



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](#)

2017년 2월

석사학위논문

# 필렛 용접부의 개선형상이 강도에 미치는 영향

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 준 영

# 필렛 용접부의 개선형상이 강도에 미치는 영향

The effect of groove configuration  
on the strength of fillet welded joints

2017년 2월 24일

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 준 영

# 필렛 용접부의 개선형상이 강도에 미치는 영향

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 10월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 준 영

# 김준영의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 방 한 서 (인)

위 원 조선대학교 교수 방 희 선 (인)

위 원 조선대학교 교수 주 성 민 (인)

2016년 11월

조선대학교 대학원

# CONTENTS

List of Figures .....	III
List of Tables .....	V
Abstract .....	VI
제1장 서론 .....	1
1. 1 연구배경 .....	1
1. 2 연구목적 .....	4
1. 3 연구방법 .....	6
제2장 실험 방법 .....	8
2. 1 사용 재료 및 실험 장비 .....	8
2. 2 실험 방법 .....	10
2. 3 용접부 평가 방법 .....	14
2.3.1 ISO 국제규격에 따른 용접부 품질 평가 .....	14
2.3.2 비파괴 검사 .....	16
2.3.3 인장 시험 .....	18
2.3.4 파면 시험 .....	20
2.3.5 경도 시험 .....	21
2.3.6 미세조직 관찰 .....	22

제3장 연구 결과 .....	23
3. 1 용접부 품질 .....	23
3. 2 용접부 기계적 특성 .....	25
3.3.1 비파괴 검사 .....	25
3.3.2 인장 시험 .....	28
3.3.3 파면 시험 .....	32
3.3.4 경도 시험 .....	34
3. 3 용접부 금속학적 특성 .....	38
제4장 결 론 .....	41
참고문헌 .....	43

## List of Figures

Fig. 1.1	Fillet welding process in manufacturing steel structure .....	2
Fig. 1.2	Welding process usage trends by year .....	3
Fig. 1.3	Groove preparation in fillet welding process .....	5
Fig. 1.4	Welding deformation in fillet welding .....	5
Fig. 1.5	Research flow chart .....	7
Fig. 2.1	Configuration of FCAW specimen .....	11
Fig. 2.2	Number of pass and no groove configuration (Type I) .....	12
Fig. 2.3	Number of pass and one side groove configuration (Type II) .....	12
Fig. 2.4	Number of pass and both side groove configuration (Type III) .....	12
Fig. 2.5	Tensile test equipment .....	18
Fig. 2.6	Configuration of tensile test specimen .....	19
Fig. 2.7	Configuration of break test specimen .....	20
Fig. 2.8	Micro vickers hardness test equipment .....	21
Fig. 3.1	Report of penetrant testing .....	26
Fig. 3.2	Report of magnetic particle testing .....	26
Fig. 3.3	Report of ultrasonic testing .....	27
Fig. 3.4	Stress-Strain curve of T-joints (Type I) .....	29
Fig. 3.5	Stress-Strain curve of T-joints (Type II) .....	29
Fig. 3.6	Stress-Strain curve of T-joints (Type III) .....	30
Fig. 3.7	Comparison of Stress-Strain curve (Type I, II, III) .....	30
Fig. 3.8	Fractured specimen after tensile test .....	31
Fig. 3.9	Fractured specimen after break test (Type I) .....	32
Fig. 3.10	Fractured specimen after break test (Type II) .....	33



Fig. 3.11	Fractured specimen after break test (Type III) .....	33
Fig. 3.12	Hardness measurement points .....	35
Fig. 3.13	Hardness distributions of T-joints (Type I) .....	35
Fig. 3.14	Hardness distributions of T-joints (Type II) .....	36
Fig. 3.15	Hardness distributions of T-joints (Type III) .....	36
Fig. 3.16	Comparison of hardness (Type I, II, III) .....	37
Fig. 3.17	Cross section of T-joints .....	39
Fig. 3.18	Microstructure of T-joints (Type I) .....	40
Fig. 3.19	Microstructure of T-joints (Type II) .....	40
Fig. 3.20	Microstructure of T-joints (Type III) .....	40

## List of Table

Table. 2.1	The chemical compositions in AH32 (Wt%) .....	9
Table. 2.2	The mechanical properties in AH32 .....	9
Table. 2.3	The chemical compositions in E71T-1 (Wt%) .....	9
Table. 2.4	The mechanical properties in E71T-1 (CO <sub>2</sub> 100%) .....	9
Table. 2.5	Welding parameters .....	10
Table. 2.6	Visual imperfection estimation of arc-welded joints in steel .....	15
Table. 2.7	NDT method and acceptable range .....	17
Table. 2.8	Dimensions of tensile test specimen .....	19
Table. 3.1	ISO 5817:2014 quality levels for imperfections .....	24
Table. 3.2	Comparison of tensile strength of T-joints (Type I, II, III) .....	31

## ABSTRACT

### 필렛 용접부의 개선형상이 강도에 미치는 영향

Jun-yeong Kim

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

Department of Welding and Joining  
Science Engineering,

Graduate School of Chosun University

Recently, fillet welding process is widely used in the manufacturing process of T or H frames in steel structure. For the reliability of the welded structure, it is common that the groove preparation should be preceded before welding process for the better welding results.

In the case full penetration welded joints with groove preparation, considerable welding deformation number of passes in welded joints occurred. And it can be a reason for root crack, because of the root gap. For these reasons, groove preparation is preferred to no groove preparation in manufacturing, even though higher manufacturing costs, and lower productivity.

This study intended to estimate the applicability of fillet welded joints without groove preparation(6 ~ 12t) in terms of NDT, mechanical and metallurgical characteristic.

# 제1장 서론

## 1.1 연구 배경

국내 조선 산업은 1970년대 초대형 도크를 건설 하면서 본격적으로 시장에 참여 하여 불과 30년 만에 세계 최고의 자리에 올랐다. 우리나라는 1999년 이루 수주 부문 세계 1위에 오르면서 40여 년간 세계 최고를 지켜온 일본을 밀어 냈다.

하지만 일본은 여전히 강력한 기술력을 바탕으로 견재함을 과시 하고 있다. 또한 중국의 급성장으로 한국을 위협하고 있고, 선두 자리를 유지하기 위해서는 고부가 가치선의 건조 비중을 늘려야 하며 경쟁 국가들과 차별화 된 생산기술을 개발해야 한다.<sup>[1],[5]</sup>

용접 기술은 조선 생산에서 대표적인 생산기술의 하나이다. 일반적으로 조선 건조작업은 5% 부재제작, 48~50% 선각조립, 30~35% 의장, 9~12% 도장 및 기타 3%로 구성되며 선종에 따라서 약간의 차이가 있지만 대부분의 선박은 90%이상 용접관련 기술에 의해 건조되고 있다. 따라서 조선에 있어서 용접 기술은 건조 공수 면에서 뿐만 아니라, 선박의 기본 품질 확보면에서도 중요한 위치를 차지하고 있다. 조선 산업에 적용되는 용접법은 SMAW, GMAW, GTAW, SAW, FCAW, 플라즈마 아크용접, 레이저 용접, 일렉트로 가스용접 등이 있는데, Fig. 1.2에 따르면 특히 FCAW(Flux Cored Arc Welding)은 용착효율이 80%이상으로 우수한 작업능률과 건전한 용접부를 얻을 수 있어서 현재 선박 건조에 약 72%에 육박하는 사용량을 차지하고 있다.<sup>[2]</sup>

또한 선박에서 많이 사용되는 구조인 T 및 H 형 구조는 필렛용접이 적용되는데, 용접부의 신뢰성은 구조물의 수명에 직접적인 영향을 미치므로 매우 중요한 사안이다. 이와 같은 강구조물의 제작시 개선가공(Groove) 하여 완전 용입 이음부를 얻을 수 있지만, 개선가공을 하지 않은 필렛 용접의 경우 루트부의 갭이 존재 하게 된다. 하지만 양면 개선 완전 용입 용접을 할 경우에는 모재가공에 따르는 시간과 가공경비, 용착량의 증가로 인한 용접봉의 소모 및 입열량의 과다로 용접 변형도 발생하여 후열처리도 반드시 필요하게 되어 생산성 및 경제성 측면에서 불리하다.<sup>[3]</sup> 그러나 지금까지 보고되고 있는 국내외 연구 보고서들에 따르면 필렛용접 시 루트부 크랙 발생과 파괴의 양상을 밝혀내는데 그치고 있어, 개선가공을 한 완전용입 용접과 무개선 필렛 용접이음부에 대한 역학적 특성을 상호 비교하여 강도 특성을 밝히고자 하는 연구는 부족한 실정이다. 따라서 현재 중국의 가격경쟁과 일본의 기술력에 대응하기 위해 새로운 시공 방법으로 무개선 용접의 강도에 대한 연구가 필요하다.<sup>[4],[6],[7]</sup>

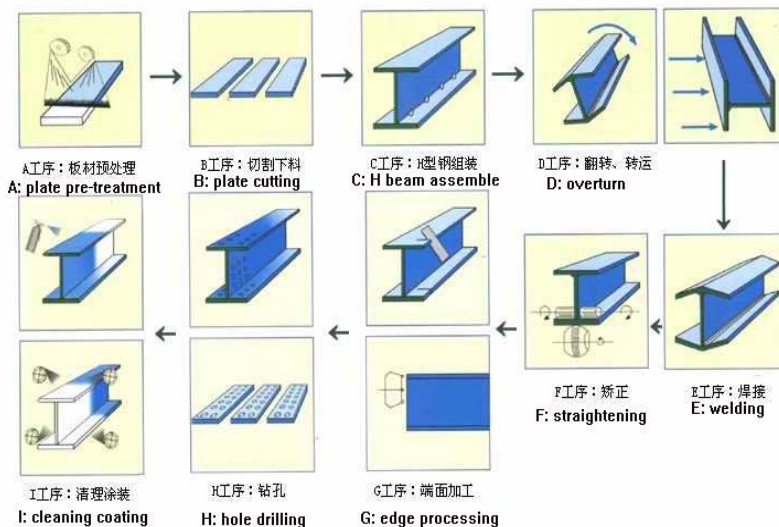


Fig. 1.1 Fillet welding process in manufacturing steel structure

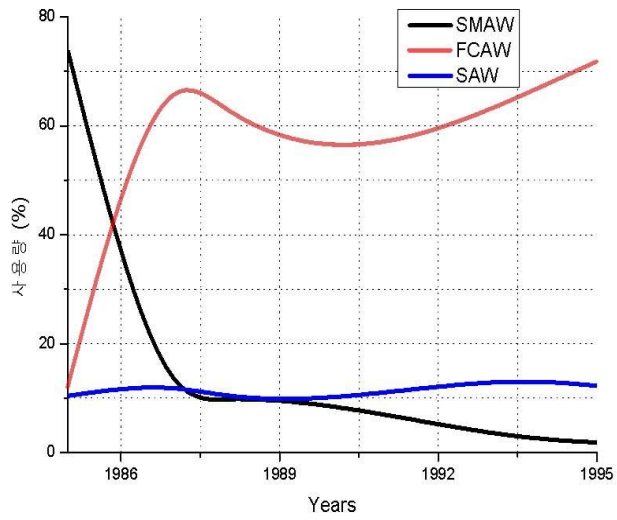


Fig. 1.2 Welding process usage trends by year

## 1.2 연구목적

강구조물의 제조 공정에서 필렛 용접은 일반적으로 T, H형 프레임 등의 제작시 사용되는데, 용접부의 신뢰성은 구조물 수명에 직접적으로 영향을 주기 때문에 매우 중요하다.

일반적으로 프레임들은 열간압연에 의해 제조되지만, 정해진 규격의 압연이 불가능할 경우, 강관을 절단하여 플랜지(Flange) - 웹(Web)을 용접하여 제작한다. 이와같은 구조물의 제작시 개선(Groove)을 가공하여 용접할 경우에는 완전 용입(Complete Joint Penetration) 된 이음부를 얻을 수 있지만, 개선을 가공하지 않은 필렛 용접의 경우에는 대부분이 불완전 용접(Partial Joint Penetration) 되어 루트부 갭이 존재하게 된다. 개선 가공의 종류는 Fig 1. 3에 나타내었다.<sup>[3],[4]</sup>

개선가공을 하여 완전용입을 할 경우에는 모재가공에 따르는 시간과 가공 경비, 그리고 용착량의 증가로 인해 용접봉의 소모량, 적층수의 증가 등으로 인해 생산성 및 경제성 측면에서 불리하며 Fig 1.4에 보이는 것처럼 용접변형도 크게 일어나기 때문에 외관상으로도 그다지 좋지 않은 영향을 받는다. 개선가공을 하지 않은 필렛용접의 경우에는 루트갭의 존재로 인해 루트부 크랙의 원인이 될 수 있다. 이러한 이유들로 인해 개선용접이 생산성 및 경제성 측면에서 불리함에도 불구하고 구조물의 강도 측면에서 요구되고 있는 실정이다.<sup>[8],[9]</sup>

특히 여객선, 방제정, 유류저장바지선 등의 선종의 경우, 워터타이트가 필요 없는 부분, 외부 프레임(데크 거더 등), 보이드 스페이스와 같이 외력이 그다지 크게 작용하지 않는 개소의 경우와 판재 두께가 그다지 후판이 아닌 6 ~ 12t에 무개선 용접 적용 가능성을 검토해볼 필요가 있다.

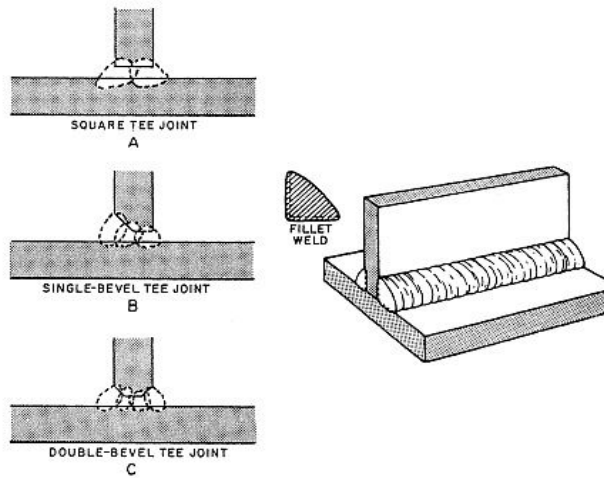


Fig. 1.3 Groove preparation in fillet welding process

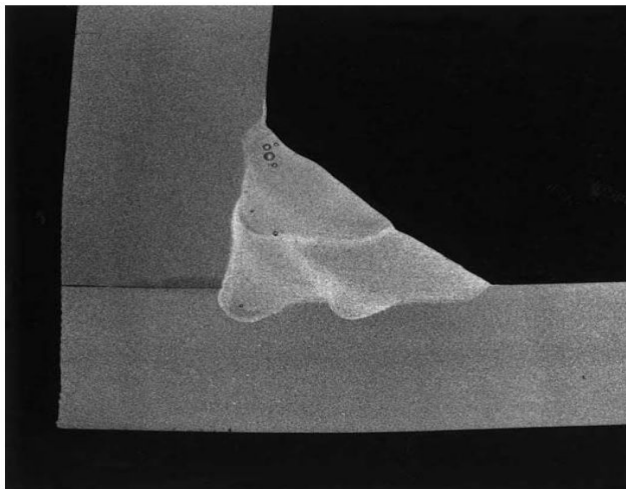


Fig. 1.4 Welding deformation in fillet welding

따라서 본 연구에서는 무개선 용접의 적용 가능성을 알아보기 위해 필릿용접에 대한 안전성 및 개선 조건(Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선))에 따른 용접부의 기계적 특성 및 미세조직을 고찰하여 비교분석하고자 하였다.



### 1.3 연구방법

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

2장에서는 개선형상별(Type I(무개선), Type II(단면개선), TypeIII(양면개선)) 실험 방법에 대해 나타내었다. 개선 형상이 용접부 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 조선용 강재 AH32 12t를 사용하였으며 아래보기 필렛 용접을 수행하였다. 3장에서 용접부의 기계적 및 금속학적 특성을 평가하기 위한

3장에서는 개선형상별(Type I(무개선), Type II(단면개선), TypeIII(양면개선)) 용접부의 기계적 및 금속학적 특성을 평가하였다. 조선용 강재 AH32 두께 12t에 대하여 실험을 수행하였다. 용접부의 결함 평가를 위해 ISO 5817 규정에 의거하여 조건별로 등급을 나타내었다. 내부의 결함을 확인하기 위한 비파괴 검사 및 파면시험을 수행하였으며, 용접부의 기계적 특성을 평가하기 위해 인장, 경도를 측정하였다. 또한 광학현미경을 이용하여 개선 형상별 용접부의 미세조직 특성을 평가하였다.

4장에서는 개선형상별(Type I(무개선), Type II(단면개선), TypeIII(양면개선)) 용접부 건전성 평가 및 기계적, 금속학적 특성을 고찰하여 요약 및 결론을 도출하였다.

Fig. 1.5 에 4개의 장으로 구성된 본 논문구성의 Research flow chart를 나타내었다.

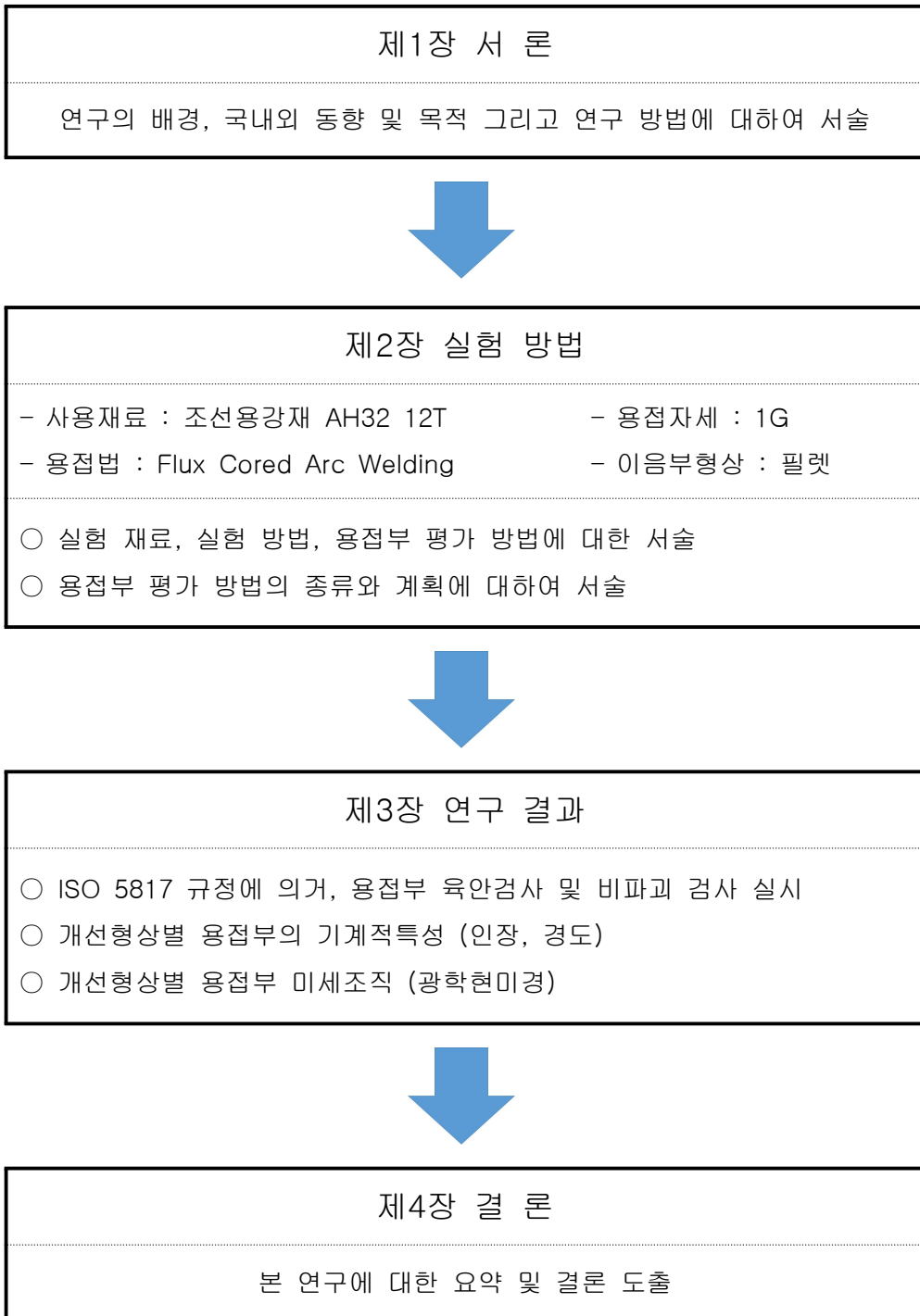


Fig. 1.5 Research flow chart

## 제2장 실험 방법

### 2.1 사용 재료 및 실험 장비

본 연구에서는 조선용 강재 AH32 Gr.A가 실험 재료로 사용되었다. AH32 Gr.A는 항복강도 값 315MPa, 인장강도 값 440-570MPa, 연신율 22%를 갖는다. 재료의 두께는 무개선 용접 적용 가능 판재 두께의 최대값인 12t로 선정하였다.

재료로 사용한 AH32 Gr.A의 화학조성비는 Table. 2.1에서, 기계적 성질은 Table. 2.2에 나타내었다.

용접 와이어로 사용한 AWS E71T-1의 화학조성비는 Table. 2.3에서, 기계적 성질은 Table 2.4에 나타내었다.

본 연구를 수행하기 위해 HYOSUNG사의 CO<sub>2</sub> 용접기를 사용하였고, 와이어는 1.2∅의 플렉스 코어드 와이어를 사용했으며 보호가스는 CO<sub>2</sub> 100%를 사용하였다.

Table. 2.1 The chemical compositions in AH32 (Wt%)

Material	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Nb	V	Mo
AH32	0.16	1.5	0.42	0.018	0.005	0.02	0.03	0.03	0.003	0.005	0.03

Table. 2.2 The mechanical properties in AH32

Material	Tensile strength	Yield strength	Elongation
AH32	440 ~ 570 MPa	315 MPa	22 %

Table. 2.3 The chemical compositions in E71T-1 (Wt%)

Material	C	Mn	Si	P	S
E71T-1	0.16	1.5	0.42	0.018	0.005

Table. 2.4 The mechanical properties in E71T-1 (CO<sub>2</sub> 100%)

Material	Tensile strength	Yield strength	Elongation
E71T-1	586 MPa	545 MPa	28 %

## 2.2 실험 방법

본 연구에는 AH32 Gr.A(12t)가 재료로 사용되었으며, 용접 와이어는 AWS E71T-1가 사용되었다. 용접 이음 형상은 필렛 용접 형태이며, 시험편의 종류는 Type I(무개선), Type II(단면개선), TypeIII(양면개선)로 제작했다.

Type I(무개선)은 개선가공을 수행하지 않았고, Type II(단면개선)은 좌 0° / 우 45°, Type III(양면개선)은 좌 45° / 우 45°로 개선가공을 한 후 용접을 시행하였다. 루트갭은 Type I(무개선), Type II(단면개선), TypeIII(양면개선) 모두 0 ~ 3mm로 선정했다.

시험 제작에 사용된 용접 조건은 전압 24~30V, 전류 180~220A, 용접속도 12.5 ~ 36.4mm/min으로 선정하였다. 보호가스는 CO<sub>2</sub> 100%를 사용하였다.

Table. 2.5에 개선형상별 용접 조건을 나타내었다.

Table. 2.5 Welding parameters

구분	Type I (무개선)	Type II (단면개선)	Type III (양면개선)
Voltage	24 ~ 30 V	24 ~ 30 V	24 ~ 30 V
Current	180 ~ 220 A	180 ~ 220 A	180 ~ 220 A
Welding Speed	12.5 ~ 36.4mm/min	12.5 ~ 36.4mm/min	12.5 ~ 36.4mm/min
Gap	0 ~ 3 mm	0 ~ 3 mm	0 ~ 3 mm
Shielding Gas	CO <sub>2</sub> 100%	CO <sub>2</sub> 100%	CO <sub>2</sub> 100%
Groove Angle	0° / 0°	0° / 45°	45° / 45°

용접 조건에 맞춰 개선형상별 용접 시험편을 제작하였다. 개선형상별 패스 수는 Type I(무개선)은 좌(3패스/2층), 우(3패스/2층) 총 5패스, Type II(단면 개선)는 좌(3패스/2층), 우(4패스/3층) 총 7패스, Type III(양면개선)은 좌(5패스/3층), 우(5패스/3층) 총 10패스를 실시하여 시험편을 제작하였다.

Fig 2.1에서는 용접시험편의 형상을 나타내었다. Fig 2.2에서는 Type I(무개선)의 용접부 단면과 용접 패스수, Type II(단면개선)의 용접부 단면과 용접 패스수, Type III(양면개선)의 용접부 단면과 용접 패스수를 나타내었다.

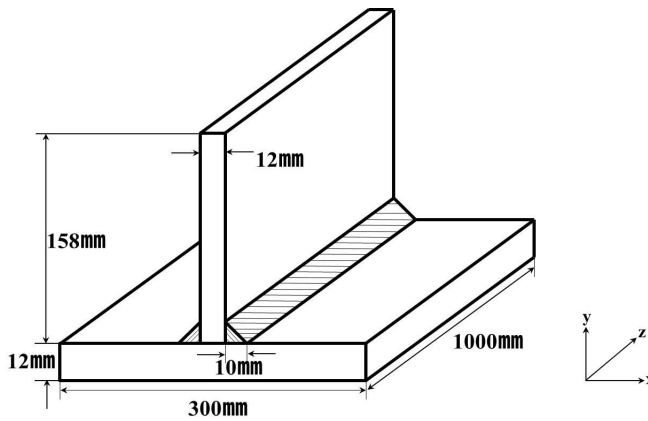


Fig 2.1 Configuration of FCAW specimen

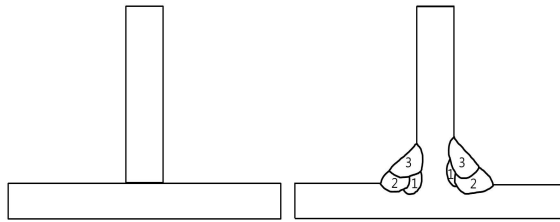


Fig 2.2 Number of pass and no groove configuration (Type I)

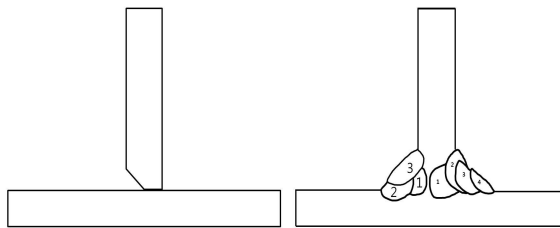


Fig 2.3 Number of pass and one side groove configuration (Type II)

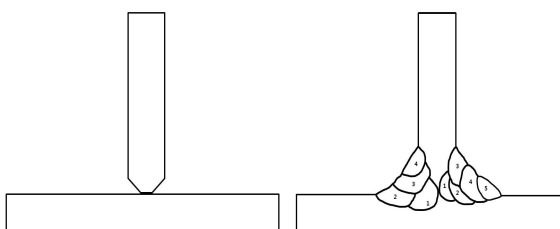


Fig 2.4 Number of pass and both side groove configuration (Type III)

용접부 품질은 ISO 5817:2014에 의거하여 평가하였다. 평가 항목은 언더컷(undercut), 과잉용접(excessive convexity), 부정확한 용접 토우(incorrect weld toe), 목두께(Throat thickness) 등 4가지 측면에서 실시하였다. 본 연구에서는 4가지 평가항목 모두 B등급에 해당하는 결과를 목표로 실험을 하였다

용접부 결함 확인을 위해 외관 검사와 비파괴 검사를 실시하였다. 비파괴 검사의 경우 액상침투시험(PT), 자분탐상시험(MT), 초음파탐상시험(UT)을 실시하였다. 액상침투시험(PT)의 경우 KS B-0816에 의거하여 결함 없음을 목표로 시험을 진행하였고, 자분탐상시험(MT)의 경우 KS D-0213에 의거하여 결함 없음을 목표로 시험을 진행하였다. 초음파탐상시험의 경우 용접부 결함 길이가 6.0mm 이하로 나오게 목표를 설정하여 KS B-0896에 의거하여 진행하였다.

용접부의 기계적 특성을 평가하기 위해서 인장, 파면, 경도 시험을 실시하였다. 인장 시험은 KS B 0801에 의거하여 0.25mm/sec로 설정하였다. 파면 시험은 ‘한국선급 선급 및 강선규칙 2편 재료 및 용접, 제 2장 용접, 405. 필렛용접 이음시험’에 따라 평가하였다. 경도 측정은 비커스 경도 시험기를 사용하여 측정하였다.

비파괴 검사를 실시한 후, 용접부의 금속학적 특성을 고찰하기 위하여 미세연마와 에칭을 실시하였다. 미세연마는 Diamond paste 1 $\mu$ m까지 실시하였고, 에칭은 4%의 나이탈 용액으로 25 ~ 30 sec 동안 실시하였다. 그리고 광학현미경을 이용해서 미세조직 관찰을 실시하였다.



## 2.3 용접부 평가 방법

### 2.3.1 ISO 국제규격에 따른 용접부 품질 평가

본 연구에서는 Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선)의 세 가지 type으로 용접 이음부의 개선형상별로 필렛 용접부의 용접성을 평가하고자 하였으며, 용접부의 품질은 Table. 2.6에 나타난 4가지 관점으로 ISO 5817:2014에 의거하여 평가하였다.

평가항목으로는 언더컷(undercut), 과잉용접(excessive convexity), 부정확한 용접 토우(incorrect weld toe), 목두께(Throat thickness) 등 4가지 측면에서 실시하였다.

ISO 5817:2014에 따르면 언더컷(undercut)의 경우, D등급은  $h \leq 0.2t(\text{max. } 1\text{mm})$ , C등급은  $h \leq 0.1t(\text{max. } 0.5\text{mm})$ , B등급은  $h \leq 0.05t(\text{max. } 0.5\text{mm})$ , 과잉용접(excessive convexity)의 경우, D등급은  $h \leq 1\text{mm} + 0.25b(\text{max. } 5\text{mm})$ , C등급은  $h \leq 1\text{mm} + 0.15b(\text{max. } 4\text{mm})$ , B등급은  $h \leq 1\text{mm} + 0.1b(\text{max. } 3\text{mm})$ , 부정확한 용접 토우(incorrect weld toe)의 경우, D등급은  $\alpha \geq 90^\circ$ , C등급은  $\alpha \geq 100^\circ$ , B등급은  $\alpha \geq 110^\circ$ , 목두께(Throat thickness)의 경우, D등급은 상관없음, C등급은  $h \leq 1\text{mm} + 0.2a(\text{max } 4\text{mm})$ , B등급은  $h \leq 1\text{mm} + 0.15a(\text{max } 3\text{mm})$ 로 등급이 나뉜다.

본 연구에서는 4가지 평가항목 모두 B등급에 해당하는 결과를 목표로 실험을 진행하였다.

Table. 2.6 Visual imperfection estimation of arc-welded joints in steel

평가항목 (주요성능 Spec)	단위	개발목표치 (B등급)	평가방법
Undercut	mm	$h \leq 0.05t$ , max 0.5mm	육안검사 ISO 5817:2014
Excessive convexity	mm	$h \leq 1\text{mm} + 0.1b$ , max 3mm	
Incorrect weld toe	°	$\alpha \geq 110^\circ$	
Excessive Throat thickness	mm	$h \leq 1\text{mm} + 0.15a$ , max 3mm	

### 2.3.2 비파괴 검사

비파괴 검사는 제조 분야에서 공작물의 제품 완전성이나 표면상태를 변형시키지 않고 검사하는 방법이다. 비파괴검사의 종류에는 액상침투시험(PT), 자분탐상시험(MT), 초음파탐상시험(UT), 방사선투과시험(RT) 등이 있다. 액상침투시험은 모든 비다공성 및 비흡수성 물질의 표면 결함을 검출하기 위한 시험이다. 자분탐상시험은 자성을 갖는 재질에 사용 가능한 시험 방법으로 표면과 표면 바로 밑의 결함을 검출할 수 있다. 초음파탐상시험은 금속, 비금속 및 합금에 적용 가능하며 내부결함을 검출할 수 있다. 방사선투과시험은 거의 모든 부품에 적용 가능한 시험법으로 내부검사를 위한 목적으로 주로 시행된다.

본 연구에서는 개선형상별(Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선)) 시험편의 표면 및 내부 결함을 검사하기 위한 시험 방법으로 액상침투시험(PT), 자분탐상시험(MT), 초음파탐상시험(UT)을 실시하였다.

액상침투시험은 표면의 기공, 개구형 결함 등 표면 결함을 검출하기 위한 시험이다. 본 연구에서는 KS B-0816 규격을 적용하여 시험을 실시하였다. 실험 방법은 SPRAY 분사 침투제를 사용해서 10분 동안 침투시간을 주고 SPRAY 분사 세척제를 사용하여 닦아낸 후, 10분 동안의 흡출시간이 지난 후 평가하였다.

자분탐상시험은 용접구조물에서 열응력 등으로 인한 결함 등 표면 결함을 검출하기 위한 시험이다. 본 연구에서는 KS D-0213 규격을 적용하여 시험을 실시하였다. 자화방법은 Yoke법을 사용했으며 시험 장비는 NAWOO社의 MY-2를 사용하여 시험을 진행하였다.

초음파탐상시험은 용접부위 중 완전용입 용접부의 슬래그 개재물 혼입, 용입불량, 융합불량, 크랙 등의 유해한 결함으로 인한 악영향을 예방하기 위한 시험이다. 본 연구에서는 KS B-0896 규격을 적용하여 시험을 실시하였다.

시험 장비는 Olympus社의 Epoch600를 사용하여 시험을 진행하였다. 탐촉자는 B2S-E 타입을 사용했으며 시험각도는 70°로 시험했다.

Table 2.7에 본 연구에 사용된 비파괴 검사의 종류와 목표치, 평가방법을 나타내었다.

Table. 2.7 NDT method and acceptable range

검사 종류	목표치	평가방법
액상침투시험	결함 없음	KS B-0816
자분탐상시험	결함 없음	KS D-0213
초음파탐상시험	결함 길이 ≤ 6.0mm	KS B-0896

### 2.3.3 인장 시험

용접부의 건전성을 평가하기 위해서 개선형상별 필릿용접 시험편에 대하여 인장 시험을 실시하여 파단 후 개선 형상과 인장강도 간의 상관관계를 분석하였다.

이를 평가하기 위해 Fig. 2.5에 나타난 MTS사 MTS 810 시험기를 사용하였다. MTS 810의 최대 부하 용량은 500kN으로 본 연구에 사용된 AH32 Gr.A의 인장 시험에 적합하다.

인장 시험편은 ASTM E466 규격에 의거하여 Transverse 방향, 와이어 커팅 방식으로 채취하였다. Fig. 2.6는 시험편 형상을 나타내었으며, Table. 2.8에 시험편의 규격을 나타내었다.



Fig. 2.5 Tensile test equipment

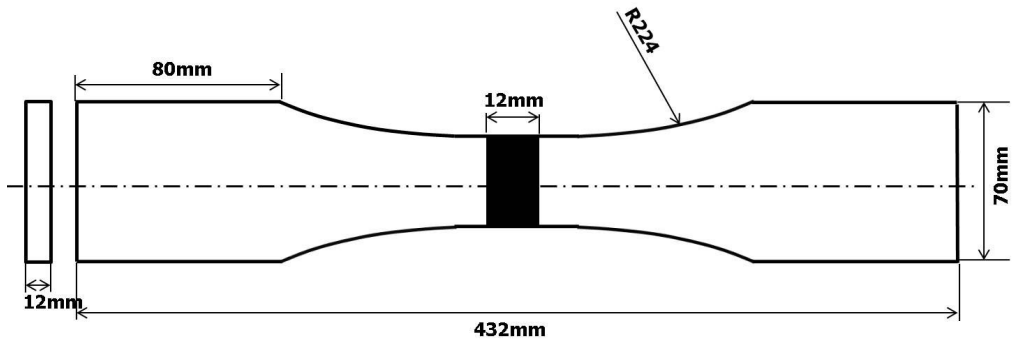


Fig. 2.6 Configuration of tensile test specimen

Table. 2.8 Dimensions of tensile test specimen

Standard	T	W	$R \geq 8W$	L	Force(kN)
ASTM E466	12	28	224	84	235.7

### 2.3.4 파면 시험

파면 시험은 필렛 용접 후, 용접부를 비드 방향으로 파단하여 용입 불량, 과도한 기공, 균열 등의 유해한 결함이 있는가 조사하는 시험이다.

본 연구에서는 KR rules 제 2편 재료 및 용접에 제시된 필렛용접 이음시험에 의거하여 파면 시험을 실시하였다.

Fig. 2.7는 파면 시험편의 규격을 나타내었다.

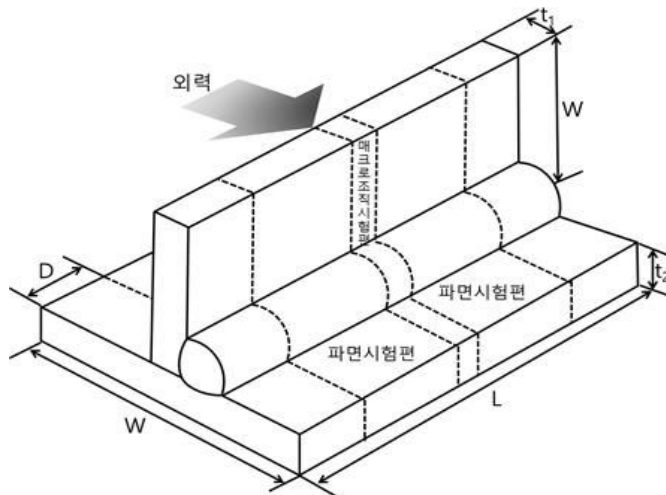


Fig. 2.7 Configuration of break test specimen

### 2.3.5 경도 시험

경도 측정에는 Fig. 2.8에 나타난 Akashi 社の 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 연마하였다. 연마는 #400 - #800 - #1200 - #1500 - #2000 - #4000 순으로 연마한 후, Diamond paste  $9\mu\text{m}$ ,  $3\mu\text{m}$ ,  $1\mu\text{m}$ 를 이용하여 미세연마 하였다. 에칭의 경우, Nital 4% 부식액으로 25 ~ 30sec 동안 실시하였다.



Fig. 2.8 Micro vickers hardness test equipment



### 2.3.6 미세조직 관찰

본 연구에서 제작한 Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선)의 시험편들의 금속학적 특성을 고찰하기 위해 미세조직 관찰을 실시하였다. 미세조직 관찰은 시험편 횡단면의 연마 및 에칭 후에 이루어졌다.

연마는 #400 - #800 - #1200 - #1500 - #2000 - #4000 순으로 연마한 후, Diamond paste 9 $\mu$ m, 3 $\mu$ m, 1 $\mu$ m를 이용하여 미세연마 하였다.

에칭은 Nital 4% 부식액으로 25 ~ 30sec 에칭을 실시한 후, 광학현미경을 이용하여 미세 조직을 관찰하였다.

## 제 3 장 연구 결과

### 3.1 용접부 품질

본 연구의 용접 시험편의 용접부 비드형상과 횡단면부 용입 특성을 고찰하였다. Table 3.1에서 보듯이 Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선) 모두 4가지 평가항목(언더컷(undercut), 과잉용접(excessive convexity), 부정확한 용접 토우(incorrect weld toe), 목두께(Throat thickness))에 대해 B등급에 해당하는 건전한 용접부를 나타냄을 알 수 있다.

언더컷(undercut)의 경우, Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선) 모두 발생하지 않아서 B등급에 해당하는 결과를 얻었다.

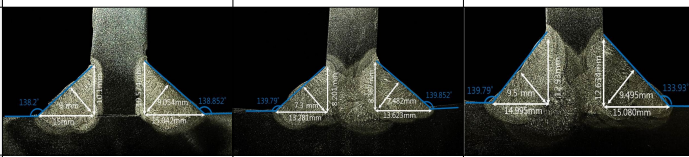
부정확한 용접 토우(incorrect weld toe)의 경우, Type I(무개선)은  $138.851^\circ$ , Type II(단면개선)는  $139.790^\circ$ , Type III(양면개선)는  $133.93^\circ$ 의 결과를 얻었다. 모든 결과가  $110^\circ$  이상으로 B등급에 해당하는 결과를 얻었다.

과잉용접(excessive convexity)의 경우, Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선) 모두 발생하지 않아서 B등급에 해당하는 결과를 얻었다.

목두께(Throat thickness)의 경우, Type I(무개선)은 0.155, Type II(단면개선)는 0.35, Type III(양면개선)는 0.478로 모두 B등급을 얻었다.

특히, Type I(무개선) 시험편의 경우, 완전 용입이 이루어지지 않았음에도 불구하고, Type II(단면개선), Type III(양면개선)와 마찬가지로 ISO 5817:2014의 B등급에 해당하는 결과를 얻었음을 알 수 있다.

Table. 3.1 ISO 5817:2014 quality levels for imperfections

		Type I	Type II	Type III
Groove		0° / 0°	0° / 45°	45° / 45°
Cross section				
Undercut	h(mm)	None	None	None
	Level	[B]	[B]	[B]
Incorrect weld toe	degree	138.851°	139.790°	133.93°
	Level	[B]	[B]	[B]
Excessive convexity	h(mm)	None	None	None
	b(mm)	None	None	None
Excessive Throat thickness	h(mm)	0.155	0.35	0.478
	Level	[B]	[B]	[B]

## 3.2 용접부 기계적 특성

### 3.2.1 비파괴 검사

본 연구에서는 개선형상별(Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선)) 시험편의 표면 및 내부 결함을 검사하기 위한 시험 방법으로 액상 침투시험(PT), 자분탐상시험(MT), 초음파탐상시험(UT)을 실시하였다.

Fig. 3.1은 액상침투시험(PT)의 결과이며, KS B-0816 규격을 적용하여 시험을 실시하였다. 3 PCS(Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선) 각 1 PCS)의 시험편에 대한 시험 결과, 모두 결함 없음 판정으로 본 연구의 목표값인 결함없음에 충족하는 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 모든 개선형상별 시험편에서 양호한 용접부를 얻었음을 확인할 수 있었다.

Fig. 3.2은 자분탐상시험(MT)의 결과이며, KS D-0213 규격을 적용하여 시험을 실시하였다. 3 PCS(Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선) 각 1 PCS)의 시험편에 대한 판정은 모두 결함 없음으로 모든 개선형상별 시험편에서 양호한 용접부를 얻었음을 확인할 수 있었다.

Fig. 3.3은 초음파탐상시험(UT)의 결과이며, KS B-0896 규격을 적용하였고 Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선) 각 2 PCS씩 시험을 진행하였다. 시험 결과, 6개의 시험편 모두 결함이 발견되지 않았으며, 이로 인해 Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선) 모두 합격 판정 및 1등급의 건전한 용접부를 갖고 있음을 확인할 수 있었다.



REPORT OF ULTRASONIC TESTING (초음파탐상검사보고서)		REPORT NO.	NO.3.10(양면개방형)용접	18급	2 PCS	2024-04-20
CUSTOMER 고객명	동해조선	PROJECT NUMBER 프로젝트 번호	*SPECIMEN*			
ITEM NAME 개방형	18H 180T LP FRANK	TESTING PLACE 시험장소	동해조선			
MATERIAL 재료	STEEL	THICKNESS 두께	N/A			
SAMPLE NUMBER 시료번호	AL MELLED	SPECIFICATION 규격	KS B-0596			
TESTING EQUIP. SERIAL NO. 시험장비 일련번호	TRANS-DUCER MODEL	CALIBRATION BLOCK SERIAL NO. 교정블록 일련번호	N/A			
BRAND 브랜드	주요 2사	MODEL 모델	CALIBRATION BLOCK 180x180x40			
MODEL 모델	TRANS-DUCER MODEL	TYPE 타입	18-A1-A2			
S/N 시리얼번호	TYPE	TEST ANGLE/ANGLE 시험각/각도	CALIBRATION ANGLE 60도			
DRAPARY METHOD 드래퍼리 방법	TEST ANGLE/ANGLE	TEST ANGLE/ANGLE	70° SKIRREL 0			
IS CENTER/IS CENTER LINE/SWAP 중심선/중심선/스왑	IS CENTER/IS CENTER LINE/SWAP	METHOD/TEST METHOD 시험방법/시험방법	JOINT COMPARISON METHOD 접합 비교법			
METHOD/TEST METHOD 시험방법/시험방법	CONTACT SURF 접촉면	CONTACT SURF	RUTT C1 N/A			
TEST TEMP. STANDARD 시험온도 기준	COMPLIANCE METHOD 준수방법	TEST TEMP. STANDARD	D.A.C 100			
REMARKS 비고	COMPLIANCE METHOD	REMARKS	SCANNING SENSITIVITY 18dB			
TESTER 시험자	TESTER	TESTER	LEE WON-HEL			
DATE 날짜	DATE	DATE	2024.04.20			
NO.3.10(양면개방형)용접	18급	2 PCS	2024-04-20			
THICKNESS 12"	*SEE THE ATTACHED SHEET					
NO.3.10(양면개방형)용접	18급	2 PCS	2024-04-20			
THICKNESS 12"	*SEE THE ATTACHED SHEET					

NO.3.10(양면개방형)용접

\*SEE THE ATTACHED SHEET

NO.3.10(양면개방형)용접

\*SEE THE ATTACHED SHEET

NO.3.10(양면개방형)용접

NO.3.10(양면개방형)용접

NO.3.10(양면개방형)용접

NO.3.10(양면개방형)용접

NO.3.10(양면개방형)용접

NO.3.10(양면개방형)용접

REPORT OF ULTRASONIC EXAMINATION

초음파탐상검사보고서

DATE  
날짜

2024.04.20

TESTER  
시험자

LEE WON-HEL

Fig. 3.3 Report of ultrasonic testing

### 3.2.2 인장 시험

필렛 용접부의 개선형상(Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선))에 따른 인장 강도를 고찰하기 위하여 ASTM E466 인장시험 규격에 의거하여 인장강도를 평가하였다.

Fig. 3.4는 Type I(무개선)의 Stress-Strain Curve, Fig. 3.5는 Type II(단면개선)의 Stress-Strain Curve, Fig. 3.6은 Type III(양면개선)의 Stress-Strain Curve를 나타내었다. Fig. 3.7에서는 Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선)의 개선형상별 Stress-Strain Curve를 비교하였다.

Table. 3.2에는 인장시험의 결과값을 나타내었다. 인장 시험은 Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선) 별로 2회씩 실시하였다.

Type I(무개선)의 조건에서 인장강도는 평균값 461.446MPa를 나타내었다. Type II(단면개선)의 조건에서 인장강도는 평균값 459.846MPa를 나타내었다. Type III(양면개선)의 조건에서 인장강도는 평균값 461.231MPa로 용접부의 최대인장강도는 개선형상별 차이가 그다지 없었으며 모든 개선 조건에서 모재 대비 약 80% 이상의 인장강도를 나타내었다.

또한 Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선)의 시험편 모두 인장시험 결과 모재부에서 파단이 발생하였다.

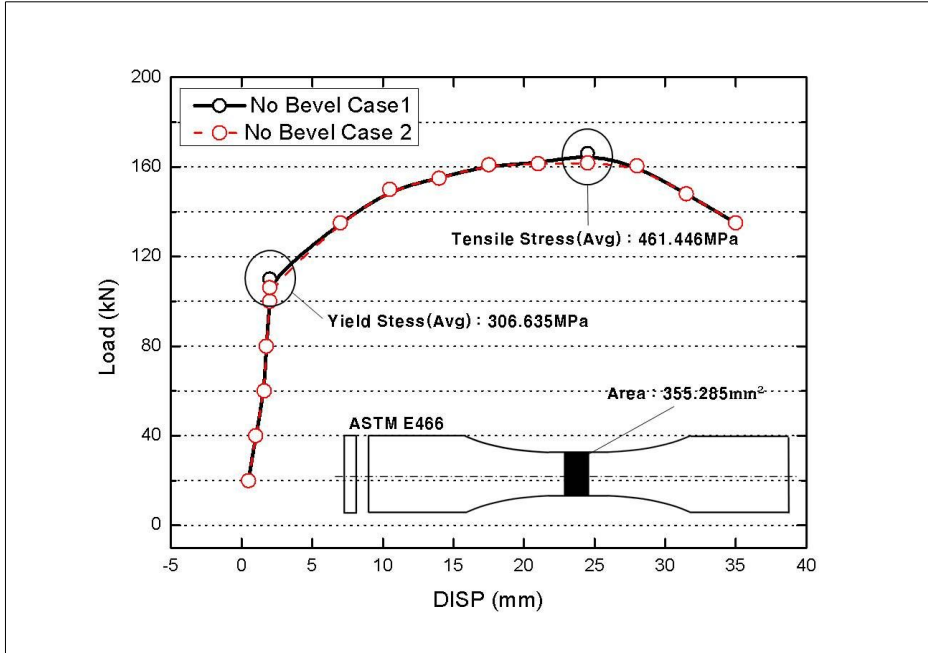


Fig. 3.4 Stress-Strain curve of T-joints (Type I)

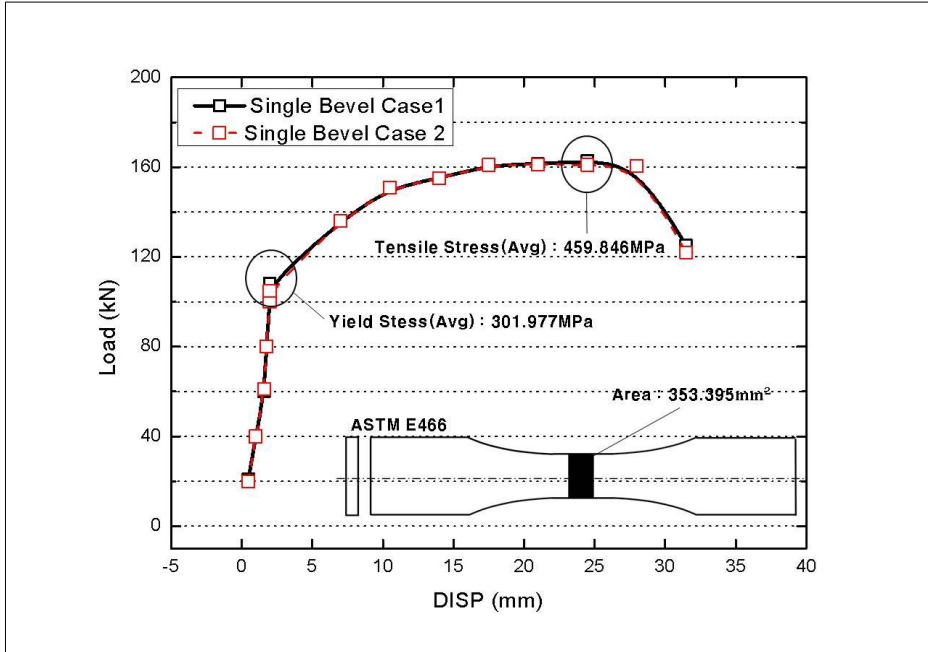


Fig. 3.5 Stress-Strain curve of T-joints (Type II)



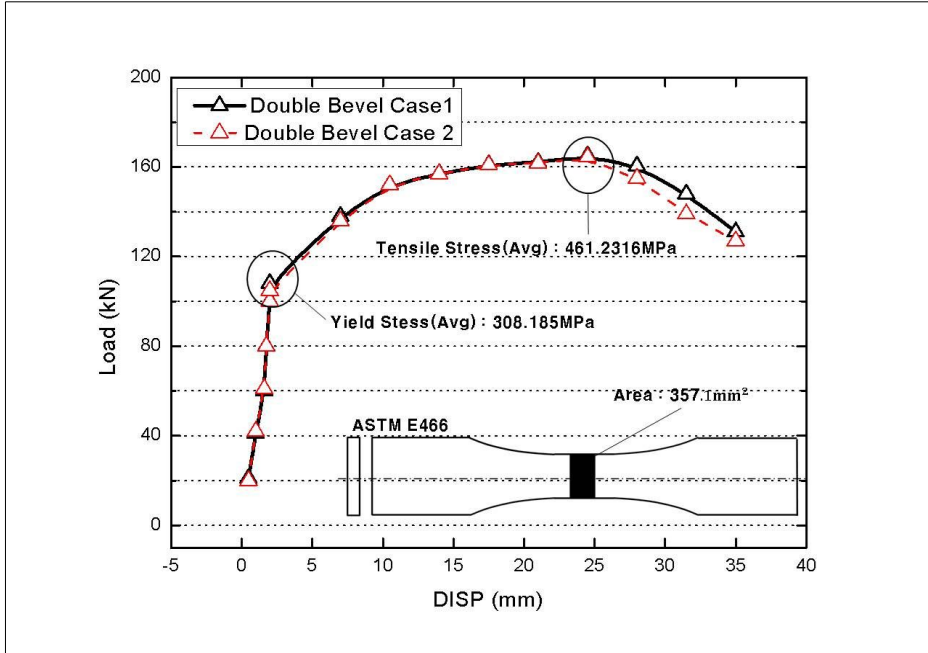


Fig. 3.6 Stress-Strain curve of T-joints (Type III)

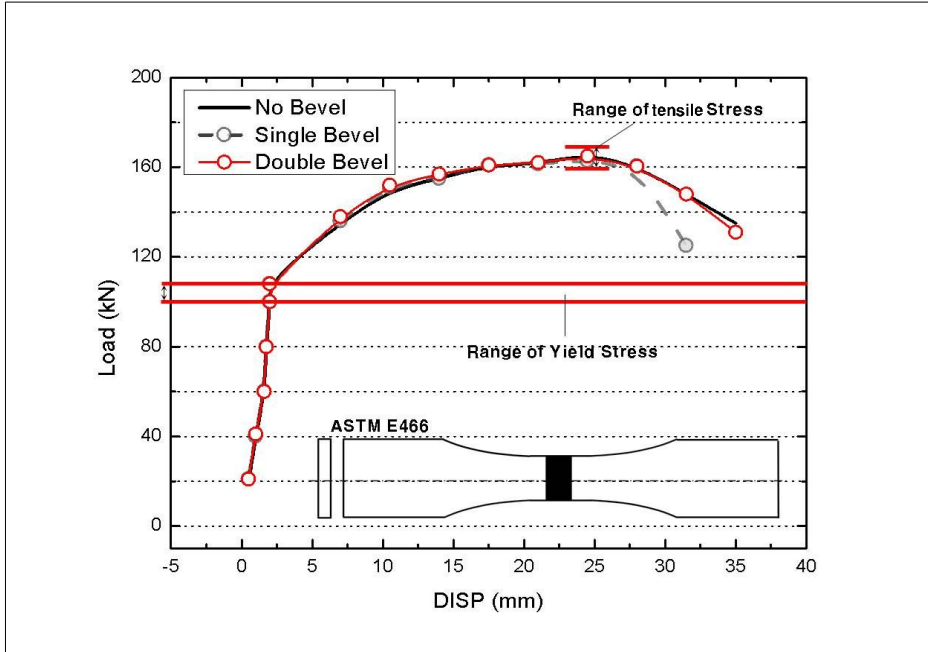


Fig. 3.7 Comparison of Stress-Strain curve (Type I, II, III)

Table. 3.2 Comparison of tensile strength of T-joints (Type I, II, III)

시료 번호	시편크기 mm	단면적 mm <sup>2</sup>	최대하중 kN	인장강도 MPa	항복하중 kN	항복강도 MPa
TypeI 무개선	28.56×12.48	356.43	166.1	466.01	111.5	312.824
	28.56×12.40	354.14	161.8	456.881	106.4	300.446
평균값		355.285	<b>163.95</b>	461.446	108.95	<b>306.635</b>
TypeII 단면개선	28.56×12.48	356.43	166.1	466.01	111.5	312.824
	28.56×12.40	354.14	161.8	456.881	106.4	300.446
평균값		355.285	<b>163.95</b>	461.446	108.95	<b>306.635</b>
TypeIII 양면개선	28.56×12.48	356.43	166.1	466.01	111.5	312.824
	28.56×12.40	354.14	161.8	456.881	106.4	300.446
평균값		355.285	<b>163.95</b>	461.446	108.95	<b>306.635</b>



Fig. 3.8 Fractured specimen after tensile test

### 3.2.3 파면 시험

파면시험은 시험편에서 매크로 조직시험편을 채취한 후 나머지 시험재에 필렛 용접의 파단을 쉽게 하기 위해 용착금속부를 제거하고 루트부에 인장이 걸리도록 반대쪽에 힘을 가하여 파단시켰다. 파단 후, 파면에 균열, 기공 (blow hole), 용입불량 등의 유해하다고 인정되는 결함의 발생여부를 고찰하였다.

Fig. 3.9는 Type I(무개선)의 파단시험면, Fig. 3.10은 Type II(단면개선)의 파단시험면, Fig. 3.11는 Type III(양면개선)의 파단시험면을 각각 나타내었다. 각 파단시험면을 관찰한 결과, 개선형상에 관계 없이 양단부를 제외하고 기공과 용입 불충분의 길이가 용접부 전 길이의 10% 이하임을 확인할 수 있었으며 기타 불완전 용입 등의 결함은 발견되지 않았다.



Fig. 3.9 Fractured specimen after break test (Type I)



Fig. 3.10 Fractured specimen after break test (Type II)



Fig. 3.11 Fractured specimen after break test (Type III)

### 3.2.4 경도 시험

Fig. 3.12는 용접부의 경도 측정 위치를 나타낸 것이다. 경도 시험편의 용착금속, 열영향부 및 모재에 대하여 Fig. 3.12와 같이 측정하였다. 경도 측정은 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 하중 10 kgf를 적용하여 실시하였으며, 측정위치는 용접부의 깊이 방향으로 세 지점에서 2Points씩, 열영향부에서 네 지점에서 4Points 그리고 웨브 모재 및 플랜지 모재에서 각각 2Points씩 측정하였다.

Fig. 3.13 ~ 15는 Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선)의 경도 측정 결과를 나타내었다. Fig. 3.16은 Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선)의 경도 분포를 비교하였다.

용접부의 경도분포를 살펴보면 Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선) 모두 용접부에서 최대 경도값(약 230~238HV)을 나타내었고 모재 대비 약 40HV 높은 값을 나타내었다. HAZ부에서는 약 210HV 값을 나타내었으며, 모재 대비 약 48HV 낮은 값을 나타내었다. 또한 모재에서 열영향부로 갈수록 경도 값이 증가하였다.

개선형상별 경도 분포를 비교해보면, 개선형상(Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선))에 관계없이 동일한 경도 분포 양상을 보임을 알 수 있다.

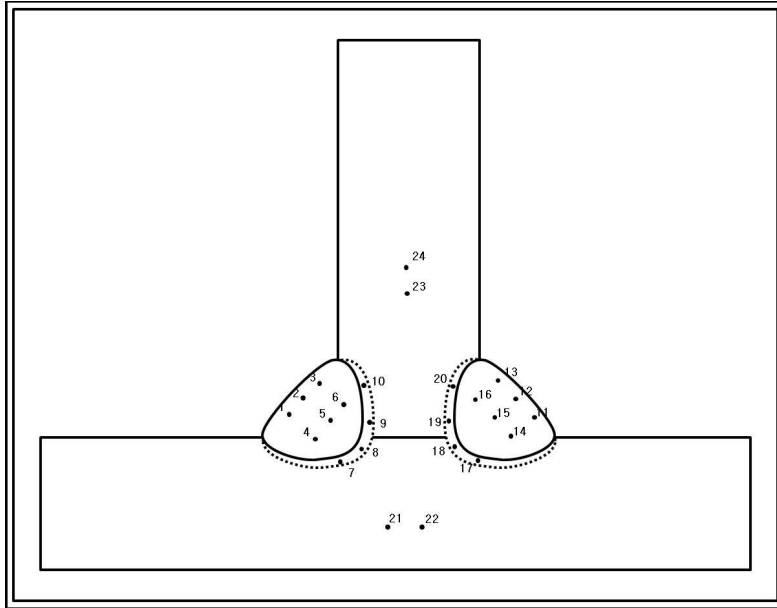


Fig. 3.12 Hardness measurement points

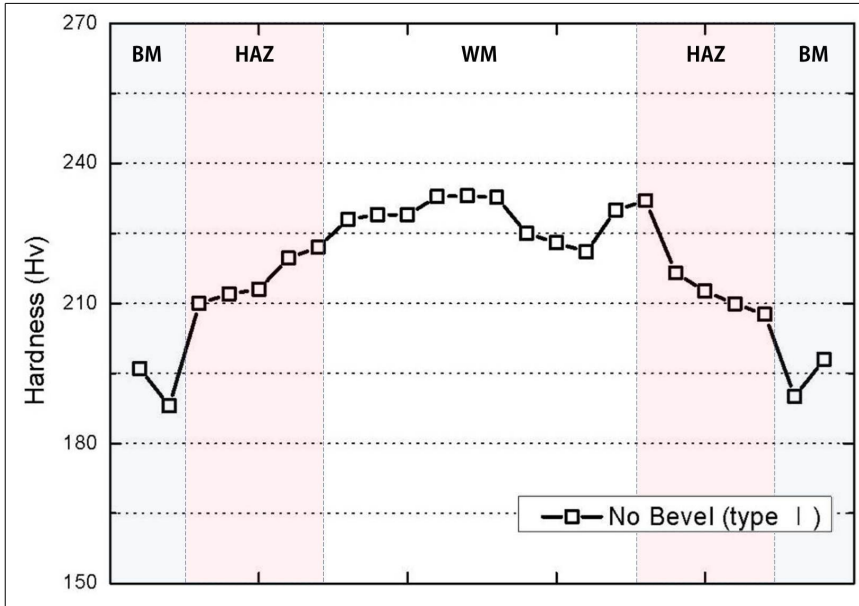


Fig. 3.13 Hardness distributions of T-joints (Type I)



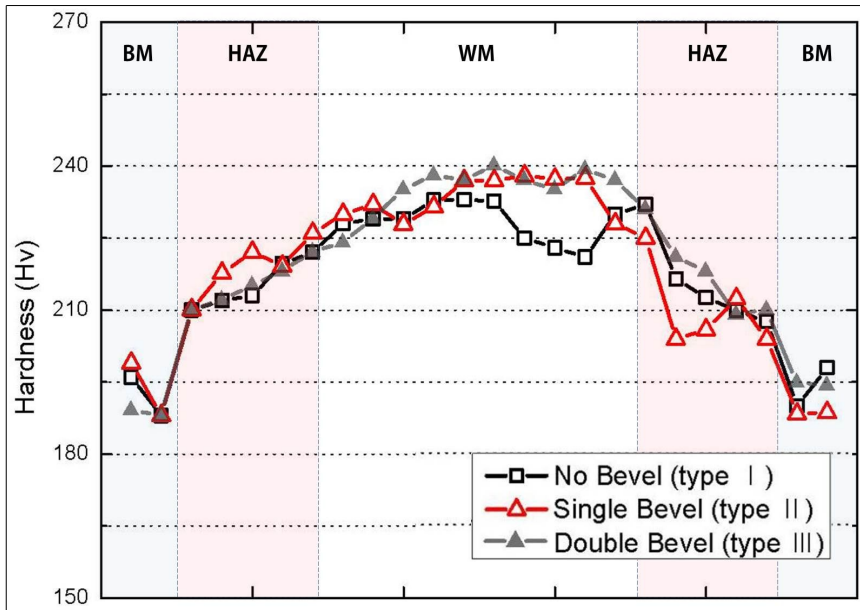


Fig. 3.16 Comparison of hardness (Type I, II, III)



### 3.3 용접부 금속학적 특성

Fig. 3.17은 각 개선형상별 용접부의 단면을 나타내었다. 용접부의 단면부를 관찰한 결과, 상하 각장의 차이, 용입 불량이나 균열, 기타 유해한 결함들은 발견되지 않았다.

Fig. 3.18 ~ 20은 Type I (무개선), Type II (단면개선), Type III (양면개선) 시험편의 용접부를 광학현미경을 이용하여 관찰한 용접부(WM), 열영향부(HAZ), 모재부(BM)의 미세조직이다.

미세조직을 고찰해보면, 용접부에서는 잘 분포된 판상 및 Needle 형상의 페라이트 조직이 관찰되었고 열영향부는 용착금속부와 거의 유사하나 상변태로 인하여 조대화된 판상의 페라이트 조직이 관찰됨을 볼 수 있다. 모재부는 저탄소강(탄소 함유량 0.05~2.1Wt%)의 전형적인 조직인 페라이트(bright contrast) 그리고 펄라이트(black band)로 조직이 관찰됨을 알 수 있다.


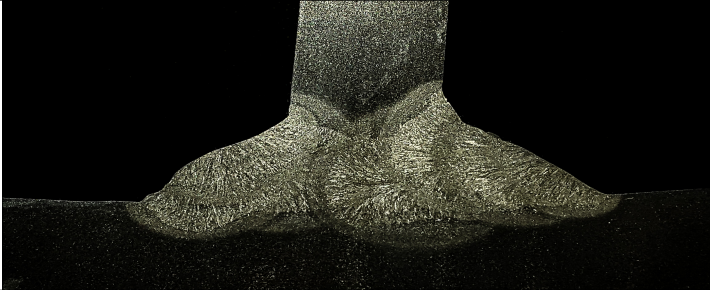
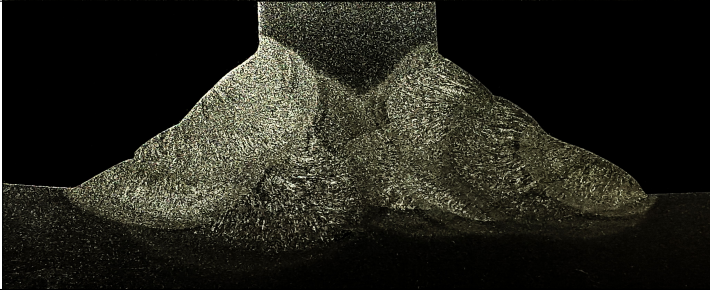
Type	Cross Section
Type I (무개선)	
Type II (단면개선)	
Type III (양면개선)	

Fig. 3.17 Cross section of T-joints

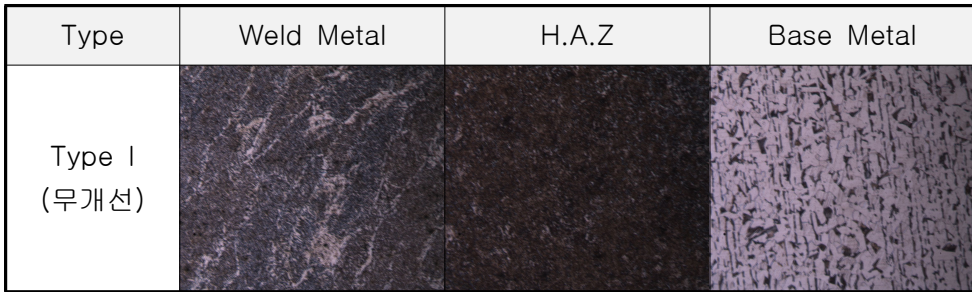


Fig. 3.18 Microstructure of T-joints (Type I)

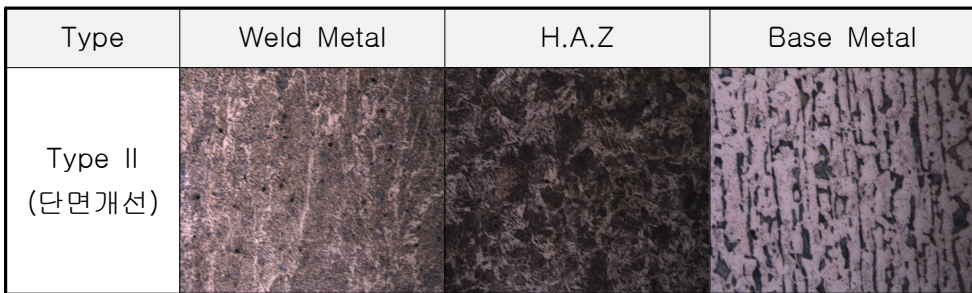


Fig. 3.19 Microstructure of T-joints (Type II)

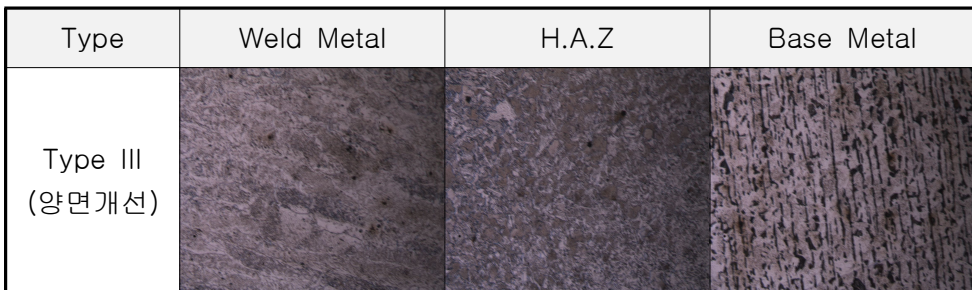


Fig. 3.20 Microstructure of T-joints (Type III)

## 제 4 장 결 론

본 연구에서는 강구조물의 제조과정 중 무개선 용접의 적용 가능성을 검토하기 위해 필렛용접부에 대한 개선형상별(Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선)) 용접성 평가, 기계적, 금속학적 특성을 고찰하였다.

1) 개선형상별(Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선)) 용접부의 Cross section을 본 결과, Type I(무개선)의 경우 완전 용입이 이루어지지 않음을 확인할 수 있었다.

하지만 ISO 5817:2014의 4가지 평가항목(언더컷(undercut), 과잉용접(excessive convexity), 부정확한 용접 토우(incorrect weld toe), 목두께(Throat thickness))에서 개선형상에 관계없이 모두 B등급에 해당하는 건전한 용접부를 확보할 수 있음이 확인되었다.

2) 용접부 결함 확인을 위해 개선형상별(Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선)) 비파괴 검사(액상침투시험(PT), 자분탐상시험(MT), 초음파탐상시험(UT))을 실시하였다. 액상침투시험(PT)의 경우 KS B-0816에 의거하여 결함 없음, 자분탐상시험(MT)의 경우 KS D-0213에 의거하여 결함 없음, 초음파탐상시험의 경우 KS B-0896에 의거하여 용접부 결함 없음이 확인되었다.

3) 개선형상별(Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선)) 용접부 기계적 특성을 평가해보면 인장강도의 경우, 개선형상별 최대 인장강도 값이 460~461MPa로 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 경도 분포의 경우에도 개선형상별 경도 분포 값과 분포 양상이 거의 일치함을 알 수 있다. 파면 시험의 결과에서도 개선형상별 파면시험편에서 모두 용입불충분의 길이가 10% 이하임을 알 수 있었다.

이는 필렛 용접을 수행함에 있어 개선형상에 관계없이 건전한 용접부의 기계적 성질을 가질 수 있음을 알 수 있다.

4) 개선형상별(Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선)) 용접부 금속학적 특성을 평가해보면 개선형상에 관계없이 용착금속부에서는 판상 및 Needle 형상의 페라이트 조직이, 열영향부에서는 조대화된 판상의 페라이트 조직이, 모재부에서는 페라이트 조직과 펄라이트 조직이 관찰되었다.

이는 필렛 용접을 수행함에 있어 개선형상에 관계없이 건전한 용접부의 금속학적 성질을 가질 수 있음을 알 수 있다.

5) 위의 결론들을 통해서 개선형상(Type I(무개선), Type II(단면개선), Type III(양면개선))에 관계없이 모든 실험 결과물의 기계적 특성, 금속학적 특성이 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

따라서 여객선, 방제정, 유류저장바지선 등의 선종에서 두께가 6 ~ 12t 사이의 판재의 경우, 외부프레임, 보이드 스페이스, 워터타이트가 필요 없는 부분에서는 개선 가공을 하지 않은 무개선 용접 적용 가능성이 충분함을 알 수 있다. 또한 이번 연구결과를 근거로 조선 산업뿐만 아니라 다른 산업분야에서도 무개선 용접을 적용하여 공정 및 생산성 측면에서 변화를 가져올 수 있을 것이라 생각한다.

## Reference

- [1] 한종만, '조선용접기술의 현황과 합리화 방안', 한국강구조학회지, 3-1, (1991), pp. 13-19
- [2] 성요경, 한용섭, '조선분야에서의 용접기술의 응용연구', 대한용접학회지, 10-4, (1992), pp. 82-90
- [3] 방한서, 김종명, 김성주, '필릿 용접부의 형상에 따른 역학적 특성에 관한 연구', 대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집 1998년 제1권, (1998), pp. 96-101
- [4] Saito Tzuo, '조선용접의 최근의 동향', 일본조선학회지, 788호, (1995), pp. 7-13
- [5] 대한용접학회, '제 9회 용접기술강습회 교재', 9.26-9.28, (1991)
- [6] Hideo Takeda, Hiroshi Koga, 'The present condition and the future of automatized, mechanized and robotized welding in shipbuilding', 일본용접학회논문집, 9-1, (1991), pp. 203-208
- [7] 용접시공위원회, '조선용접에의 간이자동기의 적용과 그의 효과', 일본용접협회지, 40- 3, (1993), pp. 96-102
- [8] 김성환, 방한서, 방희선, 송관형, '외력을 고려한 양면 T 용접이음부의 응력해석', 대한용접학회지 제19권 제2호, (2001), pp. 78-83
- [9] 김성환, '양면필릿용접 루트부의 갭이 강도에 미치는 영향', (1997)