



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](#)

공학석사 학위논문

PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접법에 의한 슈퍼 듀플렉스  
스테인리스강의 용접성에 관한 기초 연구

A fundamental study on the weldability of super duplex stainless steel  
by using PAW-TIG hybrid tandem welding process



지도교수 김 종 도

2020년 8월

한국해양대학교 대학원

기관공학과

여 준 섭

본 논문을 여준섭의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 공학박사 이 명 훈 (인)

위 원 공학박사 강 준 (인)

위 원 공학박사 김 종 도 (인)

2020년 7월 17일

한국해양대학교 대학원

# 목 차

Abbreviation .....	iii
List of Tables .....	iv
List of Figures .....	v
Abstract .....	ix
<b>1. 서 론</b>	
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구 목적 .....	8
<b>2. 이론적 배경</b>	
2.1 EGCS용 스테인리스강의 특성 .....	10
2.1.1 스테인리스강의 분류 .....	10
2.1.2 듀플렉스 스테인리스강의 종류 .....	18
2.1.3 듀플렉스 스테인리스강의 용접 특성 .....	27
2.1.4 듀플렉스 스테인리스강의 열처리 특성 .....	29
2.2 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접 프로세스 .....	34
2.2.1 PAW 용접 열원의 원리 .....	34
2.2.2 TIG 용접 열원의 원리 .....	40
2.2.3 하이브리드 텐덤 용접의 종류 및 프로세스 .....	44
<b>3. 실험 방법</b>	
3.1 실험 재료 및 장치 .....	52
3.1.1 실험 재료 .....	52
3.1.2 실험 장치 .....	54

3.2 실험 및 분석 방법 .....	58
3.2.1 실험 방법 .....	58
3.2.2 분석 방법 .....	59
<b>4. 실험 결과 및 고찰</b>	
4.1 SDSS 재료에 대한 PAW 및 TIG 열원의 용입 특성 .....	65
4.1.1 PAW 열원 특성 .....	65
4.1.2 TIG 열원 특성 .....	66
4.2 SDSS의 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접 조건별 비드용접 특성 ....	69
4.2.1 용접 전류 및 전압의 영향 .....	69
4.2.2 용접 속도의 영향 .....	75
4.2.3 용접 보호가스의 종류와 유량의 영향 .....	78
4.2.4 PAW-TIG 두 용접열원 간의 거리에 따른 영향 .....	84
4.3 SDSS의 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접 조건별 맞대기용접 특성 ..	87
4.3.1 용접 전류 및 전압의 영향 .....	87
4.3.2 용접 속도의 영향 .....	93
4.3.3 PAW-TIG 두 용접열원 간의 거리에 따른 영향 .....	96
4.4 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 맞대기용접부 고용화 열처리의 영향 ....	99
4.4.1 기계적 특성 비교 .....	99
4.4.2 미세조직 특성 비교 .....	116
<b>5. 결 론</b> .....	127
<b>참고 문헌</b> .....	129
<b>감사의 글</b> .....	134

## Abbreviation

MARPOL	: International convention for the prevention of pollution from ships, 해양오염방지협약
EGCS	: Exhaust gas cleaning system, 배기가스 세정장치
PAW	: Plasma arc welding, 플라즈마 아크 용접
TIG용접	: Tungsten inert gas welding, 비소모성 불활성 가스 용접
MIG용접	: Metal inert gas welding, 소모성 불활성 가스 용접
GTAW	: Gas tungsten arc welding, 가스 텅스텐 아크 용접
GMAW	: Gas metal arc welding, 가스 메탈 아크 용접
FSW	: Friction stir welding, 마찰교반용접
SDSS	: Super duplex stainless steel, 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강
DSS	: Duplex stainless steel, 듀플렉스 스테인리스강
IMO	: International maritime organization, 국제 해사 기구
EU	: European Union, 유럽연합
SECA	: Sulfur emission control area, 황배출 규제 지역
ECA	: Emission control area, 배출 규제 지역
Res.	: Resolution, 결의서
CFR	: Code of federal regulations, 미국 연방정부 규정
KR	: Korean register, 한국선급
LSHFO	: Low sulphur heavy fuel oil, 선박용 저유황중질유
LNG	: Liquefied natural gas, 액화 천연 가스
NO <sub>x</sub>	: Nitrogen oxides, 질소 산화물
MEPC	: Marine environment protection committee, 해양 환경 보호 위원회
SO <sub>x</sub>	: Sulfur oxides, 황산화물
PM	: Particulate matter, 입자형 물질
DBTT	: Ductile-brittle transition temperature, 연성-취성 천이온도
ASTM	: American society for testing materials, 미국시험재료협회

## List of Tables

<b>Table 1.1</b> Prohibition of cleaning water discharge by EU member countries .....	6
<b>Table 1.2</b> Comparison of fuel price for ship .....	6
<b>Table 2.1</b> Example of Cr-based stainless steel specification .....	14
<b>Table 2.2</b> Example of austenitic stainless steel specification .....	17
<b>Table 2.3</b> Example of precipitated hardening stainless steel specification .....	17
<b>Table 2.4</b> PREN lower and upper limits of UNS S31803 and UNS S32205 .....	25
<b>Table 2.5</b> Hyper duplex stainless steel components and PREN .....	26
<b>Table 2.6</b> Comparison of strength of duplex stainless steel .....	26
<b>Table 2.7</b> Advantages and disadvantages of MIG welding, laser beam welding and laser-MIG hybrid welding .....	49
<b>Table 3.1</b> Mechanical properties for wall thicknesses up to 30mm of austenitic-ferritic steels in the solution annealed condition .....	53
<b>Table 3.2</b> Chemical composition of austenitic-ferritic steels .....	53
<b>Table 3.3</b> Condition of PAW process for bead welding .....	55
<b>Table 3.4</b> Condition of PAW process for butt welding .....	55
<b>Table 3.5</b> Condition of TIG process .....	55

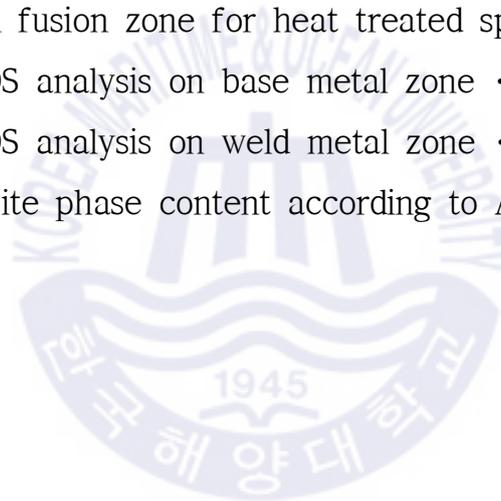
## List of Figures

Fig. 1.1 Economic analysis results .....	7
Fig. 1.2 Classification of SO <sub>x</sub> Scrubber System .....	7
Fig. 2.1 Fe-Cr phase diagram .....	13
Fig. 2.2 Effect of Ni amount on sulfuric acid resistance of Fe-Cr alloy ...	15
Fig. 2.3 Schaeffler diagram .....	16
Fig. 2.4 Category of duplex stainless steel .....	25
Fig. 2.5 Quenching and tempering heat treatment for stainless steel .....	33
Fig. 2.6 Difference of hardness according to tempering for stainless steel ...	33
Fig. 2.7 Comparison of GTA welding and plasma arc welding .....	38
Fig. 2.8 Transitional and non-transitional plasma arc welding .....	39
Fig. 2.9 Schematic illustration of laser-MIG hybrid welding .....	48
Fig. 2.10 Schematic illustration of laser-FSW hybrid welding system .....	50
Fig. 2.11 Constitution of plasma-TIG hybrid tandem welding system .....	51
Fig. 3.1 Schematic illustration of specimen .....	53
Fig. 3.2 Experimental equipment for PAW-TIG hybrid tandem process .....	56
Fig. 3.3 Condition of heat treatment .....	57
Fig. 3.4 sampling position of bead welding .....	61
Fig. 3.5 sampling position of butt welding .....	61
Fig. 3.6 Bead appearance and measuring position in weld .....	62
Fig. 3.7 Photograph of hardness tester .....	62
Fig. 3.8 Transverse direction for hardness test .....	63
Fig. 3.9 Vertical direction for hardness test .....	63
Fig. 3.10 Schematic illustrations of tensile test specimen according to ISO 6892-1 .....	63
Fig. 3.11 Schematic illustrations of bending test specimen according to ISO 5173 .....	64

Fig. 3.12	Sampling position for tensile test and bending test .....	64
Fig. 4.1	Photographs of bead appearance and cross section at PAW process and TIG process .....	67
Fig. 4.2	Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth at PAW process and TIG process .....	68
Fig. 4.3	Photographs of bead appearance and cross section with ampere ..	71
Fig. 4.4	Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with ampere .....	72
Fig. 4.5	Photographs of bead appearance and cross section with voltage ..	73
Fig. 4.6	Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with voltage .....	74
Fig. 4.7	Photographs of bead appearance and cross section with welding speed .....	76
Fig. 4.8	Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with welding speed .....	77
Fig. 4.9	Photographs of bead appearance and cross section with shield gas ...	80
Fig. 4.10	Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with shield gas .....	81
Fig. 4.11	Photographs of bead appearance and cross section with shield gas flow rate .....	82
Fig. 4.12	Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with shield gas flow rate .....	83
Fig. 4.13	Photographs of bead appearance and cross section with distance between PAW and TIG .....	85
Fig. 4.14	Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with distance between PAW and TIG .....	86
Fig. 4.15	Photographs of bead appearance and cross section with ampere ..	89

Fig. 4.16	Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with ampere .....	90
Fig. 4.17	Photographs of bead appearance and cross section with voltage ..	91
Fig. 4.18	Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with voltage .....	92
Fig. 4.19	Photographs of bead appearance and cross section with welding speed .....	94
Fig. 4.20	Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with welding speed .....	95
Fig. 4.21	Photographs of bead appearance and cross section with distance between PAW and TIG .....	97
Fig. 4.22	Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with distance between PAW and TIG .....	98
Fig. 4.23	Hardness distribution of un-heat treated specimen .....	101
Fig. 4.24	Hardness distribution of heat treated specimen .....	102
Fig. 4.25	Photographs of fracture shapes and tensile strength curve for un-heat treated specimen 1 .....	104
Fig. 4.26	Photographs of fracture shapes and tensile strength curve for un-heat treated specimen 2 .....	105
Fig. 4.27	Photographs of fracture shapes and tensile strength curve for un-heat treated specimen 3 .....	106
Fig. 4.28	SEM images of fracture surface in un-heat treated specimen 3 for left part .....	107
Fig. 4.29	SEM images of fracture surface in un-heat treated specimen 3 for right part .....	108
Fig. 4.30	Photographs of fracture shapes and tensile strength curve for heat treated specimen 1 .....	109

Fig. 4.31	Photographs of fracture shapes and tensile strength curve for heat treated specimen 2 .....	110
Fig. 4.32	Photographs of fracture shapes and tensile strength curve for heat treated specimen 3 .....	111
Fig. 4.33	SEM images of fracture surface in heat treated specimen 2 for left part .....	112
Fig. 4.34	SEM images of fracture surface in heat treated specimen 2 for right part .....	113
Fig. 4.35	Result of bending test according to ISO 5173 .....	115
Fig. 4.36	OM image in fusion zone for un-heat treated specimen .....	118
Fig. 4.37	OM image in fusion zone for heat treated specimen .....	120
Fig. 4.38	Result of EDS analysis on base metal zone .....	123
Fig. 4.39	Result of EDS analysis on weld metal zone .....	124
Fig. 4.40	Ratio of ferrite phase content according to ASTM E 562 .....	126



# A fundamental study on the weldability of super duplex stainless steel by using PAW-TIG hybrid tandem welding process

Yeo, Jun Sub

Department of Marine Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

With increasing interest in environmental, human and social hazards from worldwide air pollution, regulations have been strengthened to prevent air pollution in all areas.

IMO continues to strengthen ship air pollution regulation and at the 70th MEPC meeting held in October 2016, It was decided to use fuel oil not exceeding 0.5% sulfur content for all vessels that operate in general waters other than emission-controlled waters in the world from January 1, 2020.

According to the results of the economic analysis conducted by the Korean Register considering the payback period of the exhaust gas cleaning system (EGCS), the installation of EGCS rather than the use of low-sulfur oil or LNG that satisfies the above regulations is analyzed to be the most economical.

EGCS is a method that reduces the amount of  $SO_x$  that is finally discharged by installing an EGC system in the exhaust pipe in a ship using a large amount of sulfur-containing fuel oil.

Although several materials with excellent corrosion resistance are used in the piping system of EGCS, it is necessary to study superduplex stainless steel with good strength, hardness and corrosion resistance compared to austenite stainless steel, which is widely used among stainless steel with good corrosion resistance.

In this study, keyhole welding using PAW, which does not require groove and fillers, was applied for welding of super duplex stainless steel for EGCS of eco-friendly ship, and TIG process was also applied to improve welding quality and durability.

In order to confirm the weldability and heat treatment characteristics of the super duplex stainless steel, the penetration characteristics of the PAW and the TIG process for the super duplex stainless steel were identified, and the effect of the parameters was evaluated when the PAW-TIG hybrid tandem beads welding to the super duplex stainless steel. In addition, the effect of the parameters when the PAW-TIG hybrid tandem butt welding on the super duplex stainless steel was also evaluated.

In addition, the impact of heat treatment after PAW-TIG hybrid tandem butt welding on super duplex stainless steel was evaluated through mechanical tests such as tensile test and bending test, and microstructure analysis, SEM analysis, EDS analysis and fractional test.

**KEY WORDS** : Super duplex stainless steel, Solution annealing, Arc welding, Plasma arc welding, Hybrid tandem welding

# PAW-TIG 하이브리드 텀덤 용접법에 의한 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강의 용접성에 관한 기초 연구

여 준 섭

한국해양대학교 대학원  
기관공학과

## 초록

전 세계적으로 대기오염으로 인한 환경, 인체 및 사회적 유해성에 대한 관심이 증가되면서 모든 분야에서 대기오염을 방지하기 위한 규정들을 강화해 왔다. IMO는 선박 대기오염 규제를 지속적으로 강화하고 있으며 2016년 10월 개최된 MEPC 70차 회의에서 2020년 1월 1일부터 배출규제해역이 아닌 일반해역을 운항하는 전 세계 모든 적용대상 선박에 대하여 황함유량 0.5%를 초과하지 않는 연료유를 사용하도록 결정하였다. 한국선급이 실시한 경제성 분석 결과에 따르면 배기가스 세정장치(EGCS, exhaust gas cleaning system)의 투자비 회수 기간을 감안할 때 상기 규정을 만족하는 저유황유의 사용이나 LNG의 사용보다는 EGCS를 설치하여 규정을 만족시키는 것이 가장 경제적인 것으로 분석되었다. EGCS란 다량의 황이 함유된 연료유를 사용하는 선박에서 배기가스 배출관에 EGC 시스템을 설치하여 최종 배출되는 SO<sub>x</sub>의 양을 감소시키는 방법이다. EGCS의 관장치에는 내부식 특성이 우수한 여러 재료들이 사용되고 있지만, 내부식성이 좋은 스테인리스강 중에서도 널리 사용되는 오스테나이트 스테인리스강 대비 강도와 경도 및 부식저항성이 좋은 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 친환경 선박의 황산화물 배기가스 세정장치용 슈퍼듀플렉스 스테인리스강의 용접을 위해 개선 및 용가제가 필요 없는 PAW를 활용한 키홀 용접을 적용하였고, 용접품질 및 내구성 향상을 위해 TIG 열원도 추가 하였다.

슈퍼듀플렉스 스테인리스강의 용접성과 열처리 특성을 확인하기 위해 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 대한 PAW 열원과 TIG 열원의 용입 특성을 식별하였고, 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 대한 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 비드용접 시 매개변수의 영향 평가를 실시하였으며, 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 대한 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 맞대기용접 시 매개변수의 영향 평가도 실시 하였다.

또한, 인장시험, 굽힘시험 등 기계적 시험과 미세조직 분석, SEM 분석, EDS 분석, 분율 확인 등 조직시험을 통해 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 대한 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 맞대기용접 후 고용화 열처리 영향도 함께 평가 하였다.

**KEY WORDS** : Super duplex stainless steel, Solution annealing, Arc welding, Plasma arc welding, Hybrid tandem welding

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

20세기 후반부터 전 세계적으로 대기오염으로 인한 환경, 인체 및 사회적 유해성에 대한 관심이 증가되면서 모든 분야에서 대기오염을 방지하기 위한 규정들을 강화해 왔다. 국제해사기구(IMO)에서도 선박으로부터 배출되는 대기오염물질 저감을 위해 해양환경보고위원회(MEPC)에서 ‘선박으로부터의 대기오염 방지를 위한 규정’인 1997 의정서(MARPOL 부속서 6)을 결의 하였으며 비준 및 발효 절차에 따라 2005년 9월 발효되었다<sup>(1)</sup>.

선박으로부터 배출되는 대기오염물질의 영향성이 큰 일부 지역은 배출통제구역(ECA)로 지정하여 강화된 배출 기준을 적용하고 있다. 또한 일부 국가 또는 항만 별로 별도의 규정을 시행하는 국가들도 있으며 최근에는 이런 별도의 배출규제를 시행하는 국가·항만들이 늘어나고 있는 추세이다. 하지만 선박으로부터의 대기오염물질 배출 저감을 위한 노력에는 규정 강화만 있는 것이 아니라 육상전력 사용, 선박 저속운항 또는 저유황유 사용 등 선박의 자발적 참여를 기반으로 하는 인센티브 제도를 시행하는 국가·항만들도 있다<sup>(1)</sup>.

다음은 각 지역 및 국가의 황산화물(SO<sub>x</sub>) 규정이다.

### (1) 유럽연합 규정

유럽연합은 EU Sulfur Directive 1999/32/EC (개정 : Directive 2005/33/EC 및 2009/30/EC)에 따라 2010년 1월 1일 이후 유럽 항에 접안하는 모든 선박에 대하여 연료유 황함유량을 0.1 % m/m 이하로 제한하고 있다. 2020년 1월 1일부터 적용되는 IMO의 강화된 규정에 발맞추어 EU는 Directive 2012/33/EU를 발행하였으며 동일한 적용일자 이후 EU SECA 이외 해역에서 항해하는 선박들의 연료유 황함유량을 0.5 % m/m로 제한하고 있다. 이후 EU는 Directive (EU) 2016/802를 발행하여 1999년 이후 발행된 EU Sulfur Directive를 하나의 지침으로 통합하였다. 지금까지 Table 1.1의 EU 멤버 국가들은 EGCS로부터 나오는 세정수의 배출을 금지하고 있다<sup>(2)</sup>.

## (2) 미국 규정

미국정부는 Title 40 of CFR Part 1043을 발행하여 IMO MARPOL Annex VI 대기오염 관련 규정을 국내법에 수용하고 있다. 대부분의 규정이 IMO의 규정과 일치하나 미국 연안 3해리 이내에 적용하는 VGP(U.S EPA Vessel general permit) 요건은 IMO의 EGCS Guideline과 일부 상이한 내용을 포함하고 있으므로 미국을 항해하는 선박은 주의가 필요하다. 즉, 세정수 요건 중 pH의 경우 IMO Res.MEPC.259(68)에서는 선박이 항구에 접안하여 정지 중 세정수 선외 배출구로부터 4m 떨어진 지점에서 측정한 pH가 6.5이상이 되는 것을 증명하는 방법을 허용하고 있다. 반면 미국 VGP 요건은 선외 배출구로부터 측정한 pH 값이 6.0보다 낮지 않도록 요구하고 있어 pH의 대체 측정방법을 허용하고 있지 않다. 미국 커네티컷 주에서는 세정수의 해역 내 배출을 금지하고 있으며 하와이의 경우에는 세정수 배출은 허용하고 있으나 세정수 처리장치에 관한 상세 정보의 보고를 요구하고 있다. 또한 미국 캘리포니아 주는 캘리포니아 수역 및 캘리포니아 기선으로부터 24마일 이내를 항해하는 국제항해 선박에 대하여 2014년 1월 1일부터 0.1% 이하의 황을 함유한 정제유 사용을 강제화하고 있으며 EGCS 등 대체설비 사용을 허용하고 있지 않다. 이 규정에도 불구하고 EGCS를 사용하거나 저유황 잔사유를 사용하고자 할 경우에는 사전에 CARB(California air resources board)로부터 허가를 득해야 한다<sup>(2)</sup>.

또한 IMO는 선박 대기오염 규제를 지속적으로 강화하고 있으며 2016년 10월 개최된 MEPC 70차 회의에서 2020년 1월 1일부터 배출규제해역이 아닌 일반해역을 운항하는 전 세계 모든 적용대상 선박에 대하여 황함유량 0.5%를 초과하지 않는 연료유를 사용하도록 결정하였다. IMO의 이러한 결정은 국제항해에 종사하는 선박을 소유하고 있는 모든 선주들에게 새로운 도전과제를 안겨주고 있으며, Table 1.2의 선박용 연료유 가격을 적용하여 한국선급이 실시한 경제성 분석 결과에 따르면 배기가스 세정장치(EGCS)의 투자비 회수 기간을 감안할 때 상기 규정을 만족하는 저유황유의 사용이나 LNG의 사용보다는 EGCS를 설치하여 규정을 만족시키는 것이 Fig. 1.1과 같이 가장 경제적인 것으로 분석되었다. 선주는 보유 선박이 선종, 선령, 운항특성 및 향후 유가의 변동 가능성 등을 종합적으로 감안하여

EGCS 설치여부를 결정하고 있으나 현재 많은 선주들이 EGCS의 설치를 고려하고 있으며 이미 EGCS 설치를 진행하고 있는 선박도 있다<sup>(2,3)</sup>.

EGCS란 다량의 황이 함유된 연료유를 사용하는 선박에서 배기가스 배출관에 EGC 시스템을 설치하여 최종 배출되는 SO<sub>x</sub>의 양을 감소시키는 방법이다. EGC 시스템으로 대부분 사용되는 방법은 배기가스가 배출되는 배관에 Scrubber를 설치하여 SO<sub>x</sub>를 제거하는 것이다. 통상 Scrubber란 과형으로 된 판자를 여러 겹 쌓아서 그 사이로 대기 오염물질이 섞인 가스 등을 통과시키고 판자 사이에 오염물질 흡수제를 공급함으로써 가스 속의 오염물질을 흡수, 제거 및 분리하는 장치를 말한다. 선박에 적용되는 SO<sub>x</sub> Scrubber System은 해수나 청수, 또는 다른 고체 물질을 이용하여 배기가스로부터 나오는 SO<sub>x</sub>를 제거하고 PM (Particulate Matter)를 줄이기 위한 시스템이다. 일반적으로 SO<sub>x</sub> Scrubber System은 SO<sub>x</sub>를 제거하는 방법 및 SO<sub>x</sub> 흡수제(제거제)에 따라 Fig. 1.2와 같이 분류할 수 있다<sup>(2)</sup>.

현재 EGCS의 관장치에는 내부식 특성이 우수한 여러 재료들이 사용되고 있지만, 내부식성이 좋은 스테인리스강 중에서도 널리 사용되는 오스테나이트 스테인리스강 대비 강도와 경도 및 부식저항성이 좋은 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 대한 연구가 필요하다.

해수 부식 저항성이 높아야 하는 해양플랜트 등에 슈퍼듀플렉스 스테인리스강을 적용한 연구가 S.S.M. Tavares et al.(2006)에 의해서 진행되었지만, 해당 연구는 TIG 열원을 다층으로 용접하여 미세조직, 내부식 특성, 인성 등을 확인하였다<sup>(4)</sup>.

Jang(2014)에 의해 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강(UNS S32750)에 대한 용접 후 열처리가 미세조직, 기계적 특성 및 부식에 미치는 영향이 연구되었지만, 다층 용접시 GTAW와 FCAW를 사용하였다<sup>(5)</sup>.

Kim(2018)은 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강(UNS S32750)의 공식에 미치는 오스테나이트 형상의 영향에 대해 연구하였고, K.Devendranath Ramkumar et al.(2016)은 UNS S32750 재료를 활용한 플렉스 TIG 용접의 구조-성분 관계 및 부식 거동에 대한 연구를 하였으며, Carla Gabriela Silva Leite et al.(2019)은 Nd:YAG 펄스 레이저를 활용한 316L 오스테나이트 계 스테인리스강과 UNS

S32750 듀플렉스 스테인리스강의 이중 용접에 대한 연구, K.Devendranath Ramkumar et al.(2017)은 AISI 904L 및 UNS 32750의 이중 용접의 미세구조, 기계적 특성 및 바이오 부식 거동에 대한 연구를 각각 진행하였다. 하지만, 지금까지 연구자들은 듀플렉스 재료의 부식 특성 및 듀플렉스 재료에 일반적인 TIG 용접을 적용한 연구 등에 중점을 두었다<sup>(6-9)</sup>.

또한 메인 용접 열원인 PAW 관련하여 Yu et al.(2006)은 가변극성 플라즈마 아크용접을 이용한 알루미늄 합금의 키홀 용접을 연구하였고, Chen et al.(2011)은 동적으로 제어되는 플라즈마 아크 용접 공정을 이용한 Ti-6Al-4V 합금 용접을 연구하였고, C. S. Wu et al.(2013)은 플라즈마 아크 용접(프로세스, 감지, 제어 및 모델링)을 연구하였고, Somrerk Chandra-ambhorn et al.(2012)은 차폐 가스에 질소 혼합 기술을 사용하여 AISI 304와 AISI 201 스테인리스강 사이의 플라즈마 아크 용접을 연구하였고, Kim et al.(1987)은 플라즈마 키홀 박판 용접에서의 열 및 물질 유동에 관한 연구를 하였으며, Zu Ming Liua,b, et al.(2016)은 플라즈마 아크 용접(프로세스 변형 및 최근 감지, 제어 및 모델링 개발)에 대한 연구를 하였다. 플라즈마 키홀용접 및 플라즈마 아크 용접성에 관련된 연구는 다수 진행되었고, 두 개 이상의 열원을 동일한 시간 및 공간에서 용접하는 용접법으로써 열원 간의 시너지 효과를 극대화시켜 고품질·고효율의 용접을 실현하는 하이브리드 용접의 사례는 일부 있었지만, 플라즈마 열원을 이용한 하이브리드 텐덤 용접법은 적용되지 않았다<sup>(10-15)</sup>.

그리고 맞대기 용접 후 실시하는 고용화 열처리 관련하여 Maria E. R. Cronemberger et al.(2014)은 듀플렉스 스테인리스강에서 고용화 열처리 후 미세 구조 변화를 연구하였고, Lee et al.(2012)은 슈퍼듀플렉스 스테인리스강의 갈바닉 부식 거동에서 고용화 열처리 온도의 영향을 연구하였고, Stephania Capellari De Rezende et al.(2018)은 고용화 열처리 시간이 슈퍼듀플렉스 스테인리스강의 미세구조와 부식저항성에 미치는 영향을 연구하였으며, A. Kashiwar et al.(2012)은 고용화 열처리 온도가 2205 듀플렉스 스테인리스강에 미치는 영향을 연구하였다. 많은 연구자들에 의해 듀플렉스 스테인리스강에 미치는 고용화 열처리 변수 등이 연구되었으나, 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강의 용접 후 열처리로써 고용화 열처리가 조직의 상 및 분율의 변화에 미치는 영향에 대한 연구

는 거의 존재하지 않았다<sup>(16-19)</sup>.

본 연구에서는 친환경 선박의 황산화물 배기가스 세정장치에 사용되는 슈퍼듀플렉스 스테인리스강의 용접을 위해 개선 및 용가제가 필요 없는 PAW를 활용한 키홀용접법을 선행하게 하고, 비드표면의 험핑(humping) 및 언더컷(undercut) 결함을 억제하기 위해 TIG 열원을 후행하도록 하는 하이브리드 텐덤 용접법을 적용하였다. 또한, 슈퍼듀플렉스 스테인리스강의 페라이트-오스테나이트 조직 구성분포를 제어하기 위해 고용화 열처리를 적용하여 페라이트 분율을 확인하였다. 본 연구의 결과는 친환경 선박용 EGCS 설비, 선박의 배관 및 해양플랜트 구조물 등 다양한 분야 적용에 기초적인 자료로 이용될 수 있을 것으로 예상된다.



**Table 1.1** Prohibition of cleaning water discharge by EU member countries (Korean Register, 2018)<sup>(2)</sup>

EU country	Limitation
Germany	Inland rivers and certain ports such as Kiel Canal
Belgium	Within 3 nautical miles of the coast
Lithuania	waters area in port
Latvia	Territorial sea and port

**Table 1.2** Comparison of fuel price for ship (Korean Register, 2018)<sup>(3)</sup>

Item	Fuel price (unit : USD/ton)
LNG	USD 5/mm btu (USD 238/ton)
HFO (3.5% S)	280
LSHFO (0.5% S)	400
MGO (0.1% S)	460

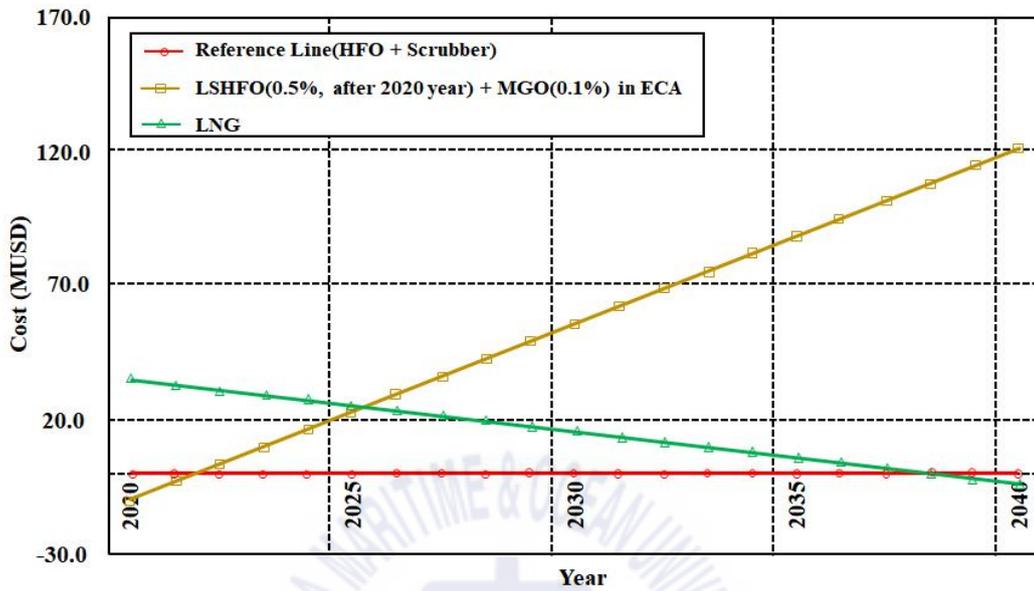


Fig. 1.1 Economic analysis results (Korean Register)<sup>(3)</sup>

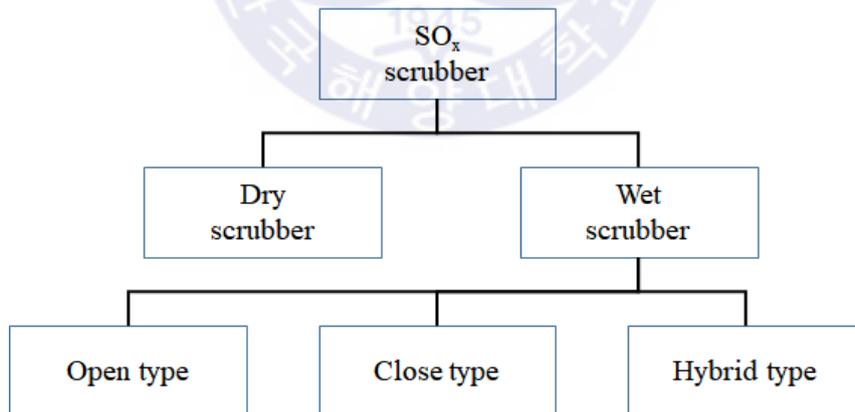


Fig. 1.2 Classification of SO<sub>x</sub> Scrubber System (Korean Register)<sup>(2)</sup>

## 1.2 연구 목적

IMO의 환경 규제로 인해 전세계 선박들의 황산화물 배기가스 세정장치(EGCS)의 사용이 상당히 많아지고 있으며, EGCS용 관설비는 해수 부식에 높은 저항성을 가져야 한다. 해수 부식 저항성이 높아야 하는 해양플랜트 등에 슈퍼듀플렉스 스테인리스강을 적용한 연구가 S.S.M. Tavares et al.(2006)에 의해서 진행되었지만, 해당 연구는 TIG 열원을 다층으로 용접하여 미세조직, 내부식 특성 및 인성 등을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 개선 및 용가재 사용을 제외하여 용접 공정을 최소화하고 PAW 열원의 키홀용접으로 하부를 용접한 후, 상대적으로 용접비드가 넓고 용접 품질이 우수한 TIG 열원으로 상부를 용접하였고, 최종적으로 고용화 열처리를 통해 용접 조건 및 열처리 특성을 파악하고자 한다. 이에 대한 연구내용은 다음과 같다<sup>(4)</sup>.

(1) 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 대한 PAW 열원과 TIG 열원의 용입 특성 식별  
슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 비드용접을 실시 한 후, 용접부에 전면, 이면, 단면부에 대한 비드 형상, 비드 폭 및 용입 깊이 확인을 통해 PAW열원과 TIG열원의 용입 특성을 파악하기 위함.

(2) 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 대한 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 비드용접 시 매개변수의 영향 평가

슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 다양한 조건(용접 전류 및 전압, 용접 속도, 용접 보호가스의 종류와 유량 및 PAW와 TIG 용접열원 간 거리)을 적용하여 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 비드용접을 실시 한 후, 용접부에 전면, 이면, 단면부에 대한 비드 형상, 비드 폭 및 용입 깊이 확인을 통해 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 비드용접에 대한 특성을 파악하기 위함.

(3) 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 대한 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 맞대기용접 시 매개변수의 영향 평가

비드용접을 통해 식별된 용접 최적 조건을 활용하여 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 다양한 조건(용접 전류 및 전압, 용접 속도 및 PAW와 TIG 용접열원 간

거리)을 적용하여 PAW-TIG 하이브리드 텀덤 맞대기용접을 실시 한 후, 용접부에 전면, 이면, 단면부에 대한 비드 형상, 비드 폭 및 용입 깊이 확인을 통해 PAW-TIG 하이브리드 텀덤 맞대기용접에 대한 특성을 파악하기 위함.

(4) 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 대한 PAW-TIG 하이브리드 텀덤 맞대기용접 후 고용화 열처리에 대한 영향 평가

비드용접을 통해 식별된 용접 최적 조건으로 PAW-TIG 하이브리드 텀덤 맞대기용접 시편을 2개 제작한 후, 한 개의 시편은 고용화열처리를 적용하고, 나머지 시편은 용접 후열처리를 적용하지 않으며, 2개의 시편 모두에 경도 분포, 인장시험 및 굽힘시험을 실시하여 기계적 특성을 파악하고, 광학현미경 분석, SEM-EDS분석 및 페라이트 분율 확인을 통해 미세조직 특성을 파악하기 위함.



## 제 2 장 이론적 배경

### 2.1 EGCS용 스테인리스강의 특성

#### 2.1.1 스테인리스강의 분류

스테인리스강은 Cr계 스테인리스강과 Cr-Ni계 스테인리스강으로 대별되며 조직적으로는 페라이트계와 오스테나이트계로 나뉘어진다. 또한 페라이트계는 고온에서도 페라이트로 되는 것과, 고온에서는 오스테나이트로 되어 담금질에 의해 마르텐사이트로 되는 것이 있다.

##### (1) 페라이트계 및 마르텐사이트계(크롬계) 스테인리스강

Fig. 2.1은 Fe-Cr 합금의 상태로 Cr은  $\gamma$  영역이 축소되는 경향이 있으며, Cr량 13%에서는 고온에서도 오스테나이트화하지 않음을 알 수 있다.  $\gamma$  영역 조성 상태에서 급랭하면 마르텐사이트 조직으로 된다. 담금질에 의해 마르텐사이트 조직으로 되는 스테인리스강을 마르텐사이트계,  $\gamma$  영역 밖에서 언제나 페라이트조직이 되는 스테인리스강을 페라이트계 스테인리스강이라 한다. 마르텐사이트계의 표준조성은 13 Cr ~ 0.1 C (STS 410), 페라이트계의 표준조성은 18 Cr ~ 0.1 C (STS 430)이다. Table 2.1에 페라이트계, 마르텐사이트계 스테인리스강의 규격을 나타낸다. 내식성은 페라이트 단상의 것이 바람직하나 강도를 향상시키기 위해서는 내식성을 약간 희생시키고, 탄소량을 높여서 마르텐사이트 조직으로 하여 사용한다. 페라이트계는 열처리에 의해 강도의 개선은 될 수 없으나 Cr량을 증가시키면 내식성이 좋아지고 가공성, 용접성도 좋아지며, 가격이 저렴하기 때문에 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 고 Cr 강을 장시간 가열하면 고 Cr 페라이트와 저 Cr 페라이트의 2상으로 분리되어, 매우 취성적이고 내식성도 열화한다. 이것을 475 °C 취성 (475 °C brittleness)이라고 일컬어진다. 한편 마르텐사이트계는 담금질·템퍼링에 의해 탁월한 기계적 성질이 얻어지기 때문에, 터빈 블레이드(blade)와 같은 고온·고압하의 구조재료와 칼날류에 사용된다. 이 강을 500 °C 부근에서 템퍼링하면 미세한 Cr을 포함한 탄화물인  $(Cr \cdot Fe)_7 C_3$ 이

석출하여, 국부전지가 생성되어 내식성을 나쁘게 한다. 이것은 Cr의 탄화물 생성에 의해 주변의 기지가 저 Cr으로 되어 이 부분이 양극으로 되기 때문이다. 또한 고 Cr강을 700 ~ 800 °C로 가열하면 Fe·Cr을 기본으로 한  $\sigma$ 상이라고 하는 금속간 화합물이 석출한다. 이  $\sigma$ 상도 재질이 취성이기 때문에 이것을  $\sigma$ 취성이라고 한다. 고 Cr 계 스테인리스강을 사용할 때는 이러한 475 °C 취성과  $\sigma$ 취성에 주의할 필요가 있다<sup>(20-42)</sup>.

## (2) 오스테나이트계(크롬·니켈계) 스테인리스강

Fig. 2.2에서 Ni을 10% 이상 합금시키면 황산에 대한 내식성이 증가하는 결과를 나타내고 있다. Cr이 13% 이상인 합금에 Ni을 10% 이상 합금시키면 산화성 분위기에서의 내식성에 비산화성 분위기에서의 내식성도 추가되게 된다. Fe-Cr-Ni 3원합금의 조직도를 Fig. 2.3에 나타낸다. 이것은 샤프러 조직도(Schaeffler diagram)라고 불리는 것으로, 세로축의 Ni 당량이란 오스테나이트화 원소의 효과를 Ni량으로 환산한 것이며, 가로축은 Cr당량을 나타내고 있다. Cr이 많을수록 작은 Ni량으로 오스테나이트 조직이 된다. Fe-Cr-Ni 합금에서는 오스테나이트인 한 개의 상으로 되며, 내식성면에서 17 ~ 20% Ni, 7 ~ 10% Cr을 포함한 합금이 개발되어 이것이 18-8 스테인리스강이다. Table 2.2는 오스테나이트계 스테인리스강의 규격 일레이다. 18-8계 스테인리스강은 Cr이나 Ni첨가 때문에 산화성산이나 비산화성산에도 강하며, 조직이 오스테나이트이기 때문에 연질이며, 용접성, 기계적 성질도 풍부하여 화학공업 장치 등에 널리 이용되고 있다. 18-8계 스테인리스강은 C량을 가능한 한 적게 한다. 탄소는 Cr과의 사이에 탄화물을 형성하고 이 탄화물이 결정립계에 석출한다. 이 때문에 탄화물 주위의 Cr이 저농도로 되어 입계에 균열이 일어난다. 입계부식을 방지하기 위해서는 C량을 가능한 한 낮게 하든가, 또는 Ti, Nb와 같은 탄화물 형성이 강한 원소를 합금시켜 TiC, NbC와 같은 안정된 탄화물로 만든다. 그 밖에 1,100 °C 이상으로 가열하여 탄화물을 고용시킨 후 급랭하면 효과가 있다. 18-8계 스테인리스강은 더욱 다양화하는 요구에 부응하여 내식성을 비롯한 내열성, 강도, 성형성, 절삭성 등을 한층 향상시킨 많은 개량 강종이 개발되어 이용범위가 매우 넓어지고 있다<sup>(20-42)</sup>.

### (3) 석출경화형(precipitated hardening) 스테인리스강

18-8 스테인리스강은 Fig. 2.3과 같은 조직도에서 알 수 있는 바와 같이 준안정 오스테나이트 영역이기 때문에 가공을 하면 일부는 마르텐사이트 변태가 일어나서 가공경화가 일어난다. 한층 강도를 높이기 위해서 시효에 의한 강화방법을 스테인리스강의 강화에 응용한 강을 PH 스테인리스강이라고 하여 각종 구조물, 특히 항공기 부재 등에 이용되고 있다. PH 스테인리스강은 Al, Ti, Nb, Cu, P 등을 Fe-Cr-Ni 합금에 첨가하고, 오스테나이트를 마르텐사이트로 변태시킨 후 480 ~ 566 °C에서 시효처리를 실시하면 마르텐사이트 중에 미세한 금속간 화합물이 석출되어 강화된다. Table 2.3은 석출경화형 스테인리스강의 규격이다. 이 강들의 대표적인 것은 17-7 PH 스테인리스강이며, 이외에 Cu 4%와 Nb를 포함한 17-4 PH강 및 Mo를 첨가하여 고온강도를 향상시킨 PH 15-7 Mo강 등이 있다<sup>(20-42)</sup>.

### (4) 2상 스테인리스강

오스테나이트·페라이트계 스테인리스강이라고도 하며, 오스테나이트 상과 페라이트 상을 거의 같은 양만큼 포함한다. 오스테나이트계 스테인리스강의 약점인 응력부식균열(SCC, stress corrosion cracking), 공식(pitting corrosion) 등의 대책의 하나로서 개발되었다. 25Cr-5Ni-1.5Mo강 (JIS 329J1)과 이의 내식성과 열간가공성을 개선시킨 저탄소의 25Cr-6Ni-3Mo-0.1N강 (JIS 329 2L)이 있다. 다른 계통의 스테인리스강에 비교하여 강도가 높을 뿐만 아니라 연신율도 페라이트계와 같은 정도이다. 염화물을 포함하고 있는 환경, 예를 들면 해수용의 열교환기 파이프, 선박용 복수기 파이프 등에 이용된다<sup>(20-42)</sup>.

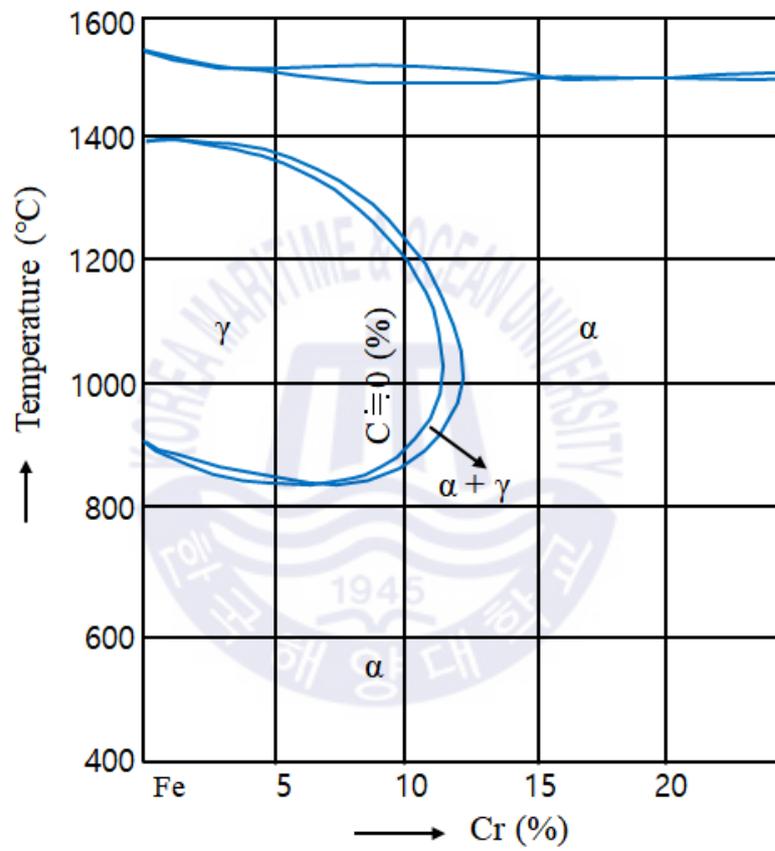


Fig. 2.1 Fe - Cr phase diagram (Kim et al., 2015)<sup>(20)</sup>

**Table 2.1** Example of Cr-based stainless steel specification  
(Kim et al., 2015)<sup>(20)</sup>

	Mark	C (%)	Cr (%)	Remark
Ferrite	STS 405	< 0.08	11.5 ~ 14.5	Al 0.1 ~ 0.3
	STS 410 L	< 0.03	11 ~ 13	-
	STS 430	< 0.12	16 ~ 18	-
	STS 434	< 0.12	16 ~ 18	Mo 0.75 ~ 1.25
Martensite	STS 403	< 0.15	11.5 ~ 13	Ni 1.25 ~ 2.5
	STS 410	< 0.15	11.5 ~ 13.5	
	STS 416	< 0.15	12 ~ 14	
	STS 420 JI	0.16 ~ 0.25	12 ~ 14	
	STS 431	< 0.20	15 ~ 17	
	STS 440 A	0.6 ~ 0.75	16 ~ 18	
	STS 440 B	0.75 ~ 0.95	16 ~ 18	
	STS 440 C	0.95 ~ 1.2	16 ~ 18	

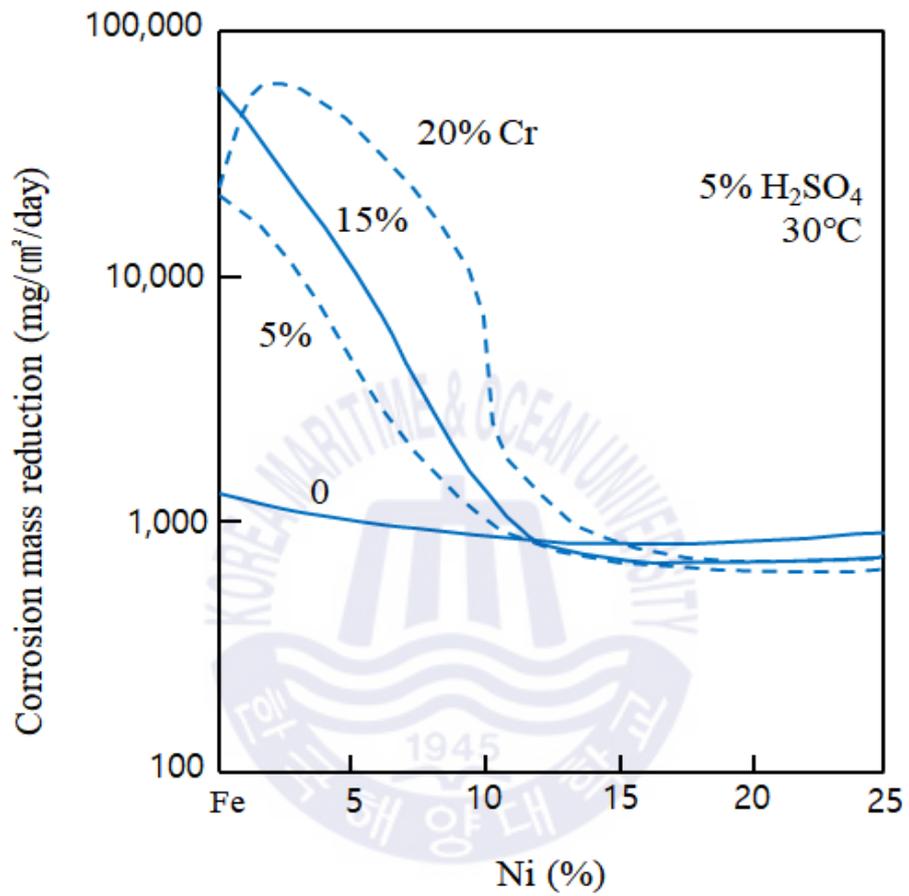


Fig. 2.2 Effect of Ni amount on sulfuric acid resistance of Fe - Cr alloy (Kim et al., 2015)<sup>(20)</sup>

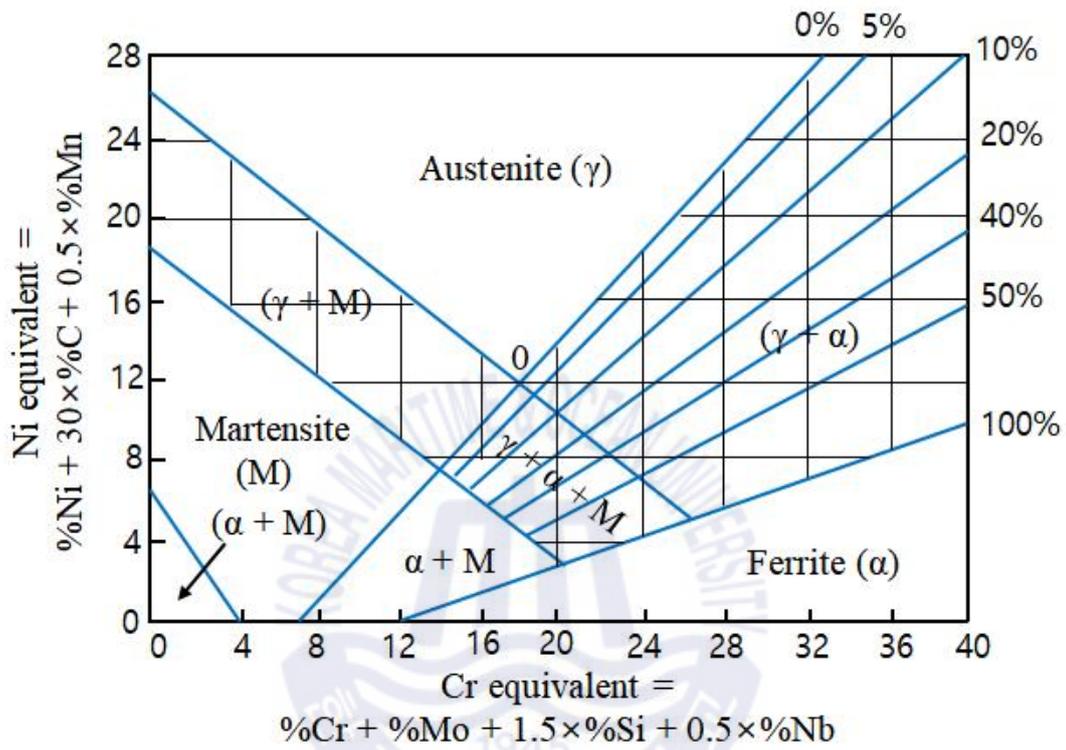


Fig. 2.3 Schaeffler diagram (Kim et al., 2015)<sup>(20)</sup>

**Table 2.2** Example of austenite stainless steel specifications (Kim et al., 2015)<sup>(20)</sup>

Mark	Ni (%)	Cr (%)	Remark
STS 201	3.5 ~ 5.5	16 ~ 18	Mn 5.5 ~ 7.5
STS 202	4.0 ~ 6.0	17 ~ 19	Mn 7.5 ~ 10
STS 301	6.0 ~ 8.0	16 ~ 18	-
STS 302	8.0 ~ 10	17 ~ 19	-
STS 303	8.0 ~ 10	17 ~ 19	-
STS 304	8.0 ~ 10.5	18 ~ 20	-
STS 305	10.5 ~ 13	17 ~ 19	-
STS 308	10 ~ 12	19 ~ 21	-
STS 309	12 ~ 15	22 ~ 24	-
STS 310	19 ~ 22	24 ~ 26	Mo 2 ~ 3
STS 316	10 ~ 14	16 ~ 18	Mo 3 ~ 4
STS 317	11 ~ 15	18 ~ 20	Ti > 5 × % C
STS 321	9 ~ 13	17 ~ 19	(Nb + Ta) > 10 × % C
STS 347	9 ~ 13	17 ~ 19	-
STS 384	17 ~ 19	15 ~ 17	-

**Table 2.3** Example of precipitated hardening stainless steel specifications (Kim et al., 2015)<sup>(20)</sup>

Mark	C (%)	Si, Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)	Cu (%)	Remark
STS 630	< 0.07	< 1.0	3 ~ 5	15.5 ~ 17.5	3 ~ 5	(Nb + Ta) 0.15 ~ 0.5
STS 631	< 0.09	< 1.0	6.5 ~ 7.75	16 ~ 18	-	Al 0.75 ~ 1.50

## 2.1.2 듀플렉스 스테인리스강의 종류

### (1) 듀플렉스 스테인리스강의 정의

2상 스테인리스강은 미세 조직이 두 개의 상으로 이루어져 붙여진 이름으로 Fig. 2.4에서 보는 것과 같이 가장 기본적인 스테인리스강인 12크롬강에 제법 많은 양의 크롬과 소량의 니켈을 넣어 조직의 변화와 부식 저항성을 향상 시킨 강이다. 첨가된 합금 및 부식 저항성에 따라 여러 그룹으로 나눌 수 있는데 현재는 하이퍼 2상 스테인리스강(hyper duplex stainless steel)까지 개발되어 상업적으로 판매되고 있다<sup>(43)</sup>.

### (2) 듀플렉스 스테인리스강의 종류

2상 스테인리스강은 PREN 지수로 등급화 시킬 수 있는데, 통상 30미만을 린(lean), 30~40이면 일반(standard), 40~45이면 슈퍼(super), 45보다 크면 하이퍼(hyper) 2상 스테인리스강으로 나눌 수 있다.

#### 가. 린 2상 스테인리스강 (Lean duplex stainless steel)

린 2상 스테인리스강은 크롬과 몰리브덴의 첨가량을 최소화한 강종으로 PREN이 2상 스테인리스강 등급 중 가장 낮다. 결과적으로 2상 스테인리스강 중에서 가장 경제성이 있는 등급이라고 할 수 있다. PREN은 26 ~ 30 정도이나 32까지 올릴 수도 있다. 린 2상 스테인리스강은 STS 304나 STS 316과 비슷한 정도의 부식 저항성을 가지고 있으나 니켈 함량이 적어 경제성 있는 대체 재질로 개발 되었다. 하지만 현재까지 수요가 많지 않아 실제 가격 경쟁력이 오스테나이트 스테인리스강 대비 좋다고 하기는 어렵다. 린 2상 스테인리스강은 2상 스테인리스강 중에서 가장 저렴하고 오스테나이트 스테인리스강 대비 염화물 분위기에서 응력부식 균열 저항성이 좋고 강도가 높기 때문에 일부 용도에서는 유용할 수도 있지만 현재로서는 사용이 많지 않다.

#### 나. 일반 2상 스테인리스강 (Standard duplex stainless steel)

2상 스테인리스강 중에서 가장 사용량이 많은 그룹으로 통상 2상 스테

인리스강이라고 하면 일반 2상 스테인리스강이라는 의미와 거의 동일하게 사용한다. 탄소 함량 0.03 % 이하, 22 % 크롬, 5 % 니켈 성분을 가지고 있는 일반 2상 스테인리스강은 흔히 SAF 2205로도 많이 알려져 있다. SAF 2205의 경우 스웨덴의 철강사 Sandnk에서 개발한 강종으로 SAF는 sandvik austenite ferrite의 약자이고, 뒤의 2205는 22 % 크롬, 5 % 니켈을 의미한다. SAF 2205의 경우 특정 회사의 상품명(trade mark)이기 때문에 UNS 번호를 사용하는 것이 바른 표현이라고 할 수 있고, UNS S32205, UNS S31803이 여기에 해당 된다고 할 수 있다. UNS S31803과 UNS S32205는 성분이 거의 비슷해 동일하게 사용되기도 하지만 ASTM에 따라 성분을 엄밀히 구분하면 PREN의 하한값이 달라 상이한 재질이라고 얘기할 수 있다. Table 2.4는 ASTM A 789에 명기된 주요 성분 값으로, 상한치는 같지만 하한치가 다르기 때문에 경우에 따라 UNS S32205를 UNS S31803 대비 상위 재질로 분류할 수도 있다. 즉 UNS S32205는 PREN의 최소치가 34.1(통상 35)이나 UNS S31803은 30.5이기 때문에 제강사에서 합금원소의 절약을 위해 하한치에 가깝게 생산을 한다면 UNS S31803은 UNS S32205 대비 부식 저항성이 낮아질 수 있다. 따라서 PREN이 중요한 용도의 경우 제품 발주 시 주의가 필요하고 가격에 차이가 없다면 당연히 UNS S32205로 발주 내는 것이 좋다.

#### 다. 슈퍼 2상 스테인리스강 (Super duplex stainless steel)

슈퍼 2상 스테인리스강은 PREN이 40 이상으로, 일반 2상 스테인리스강 다음으로 사용량이 많다. 일반 2상 스테인리스강 대비 크롬, 몰리브덴, 질소 함량을 높여 부식 저항성과 강도를 향상 시켰다. 가장 많이 사용되고 있는 강종은 SAF 2507로 알려진 UNS S32750과 Zeron 100으로 알려진 UNS S32760으로 UNS S32760에는 특이하게 텅스텐이 0.5 ~ 1.0 % 첨가되어 있다. 텅스텐의 경우 PEEN을 증대 시키지만 2상 스테인리스강 사용의 가장 큰 단점 중 하나인 2차상 형성을 촉진시킨다는 논란이 있다. 슈퍼 2상 스테인리스강의 경우 유럽, 미국 및 일본 등에서 많이 생산하고 있으며 한국에서는 슈퍼 2상 스테인리스강의 상업적 생산은 거의 없다. 슈퍼 2상

스테인리스강은 항복 강도가 STS 316 대비 2.5 ~ 3 배 정도로 아주 높고, 해수에서의 부식 저항성이 일반 2상 스테인리스강 보다 좋아 해양 석유, 가스 생산 설비에 많이 사용되며, 정유 공정에서 열교환기 튜브나 담수화 설비의 해수 배관으로도 종종 사용된다. 슈퍼 2상 스테인리스강은 일반 2상 스테인리스강 대비 크롬과 몰리브덴 함량이 높기 때문에 2차상, 특히 시그마상의 형성이 빠르므로 용접이나 열간 성형 시 주의가 필요하다.

#### 라. 하이퍼 2상 스테인리스강 (Hyper duplex stainless steel)

최소 PREN 값이 45 이상인 2상 스테인리스강 그룹을 말하는데, UNS S33207은 최소 PREN 값이 50을 넘어가는 고 부식 저항성 강재이다. 하이퍼 2상 스테인리스강의 경우 주로 해저 유전 제어용 엄비리컬 튜브로 사용되는데, 예전에는 슈퍼 2상 스테인리스강을 많이 사용하였으나 최근 해저 유전의 깊이가 깊어짐에 따라 더 고강도의 소재가 필요하게 되어 하이퍼 2상 스테인리스강을 많이 사용하고 있다. 고 부식 저항성이 요구되는 일부 열교환기에 사용된 사례도 있으나 적용 사례가 많지는 않다. 하이퍼 2상 스테인리스강은 일부 국가에서 연구와 생산이 이루어지고 있는데, 최근에는 한국에서도 고 강도, 고 부식 저항성의 신규 강종 개발 등 많은 연구가 이루어지고 있다. 대표적인 하이퍼 2상 스테인리스강의 종류와 성분은 [Table 2.5](#)와 같다. 하이퍼 2상 스테인리스강은 슈퍼 2상 스테인리스강 보다 크롬과 몰리브덴 함량이 더 높기 때문에 부식 저항성이나 강도는 높으나 용접 시 많은 주의가 필요하다<sup>(43)</sup>.

#### (3) 듀플렉스 스테인리스강의 특성

##### 가. 강도와 연성

2상 스테인리스강의 강도는 오스테나이트 스테인리스강 대비 월등히 높다. 2상 스테인리스강의 종류에 따라 다르기는 하지만 항복 강도가 작게는 2배에서 많게는 3배 이상 높다. 강도가 높을 경우 강도 설계에서 두께를 줄일 수 있기 때문에 경제적인 이점이 있다. [Table 2.6](#)에서 볼 수 있듯이 2상 스테인리스강이 단상의 오스테나이트 스테인리스강보다 강도가 높은 것은 결정립 미세화에 기

인하는 바가 크다. 2상 스테인리스강은 응고 시 최초 페라이트가 생성되고 이후에 오스테나이트가 성장하는데, 두 상이 다른 상의 성장을 방해해 결정립을 미세화 시킨다. 질소의 첨가 역시 2상 스테인리스강의 주요 강도 증대 원인을 볼 수 있으며, 질소는 침입형 원소로 상대적으로 강도가 떨어지는 오스테나이트상을 고용강화 시키는 효과가 있다. 2상 스테인리스강의 결정립 크기가 오스테나이트 스테인리스강 보다 훨씬 작은 것으로 알려져 있다.

#### 나. 경도

경도는 강도와 유사한 성질을 보이며, 2상 스테인리스강이 오스테나이트 스테인리스강 대비 높다. 또한 냉간 가공에 의해 강도 및 경도가 증대된다.

#### 다. 인성

2상 스테인리스강은 50% 정도 오스테나이트상으로 구성되어 있어 페라이트 스테인리스강이나 마르텐사이트 스테인리스강보다는 인성이 좋으나, 오스테나이트 스테인리스강보다는 나쁘다.  $-50^{\circ}\text{C}$ 에서 약 100 J 이상의 충격 인성을 가지지만,  $-150^{\circ}\text{C}$ 에는 충격 인성이 50 J 이하까지 낮아지므로, 액체 질소나 액화가스 저장설비와 같은 극저온용으로는 사용이 불가능하다.

#### 라. 산에 대한 부식 저항성

2상 스테인리스강은 대부분의 부식 환경에서 STS 304 또는 STS 316과 같은 일반 오스테나이트 스테인리스강 대비 좋다. 특히 크롬과 몰리브덴, 질소의 효과로 염소 환경에서 우수한 성질을 보인다. 2상 스테인리스강의 황산에 대한 부식 저항성을 보면 15%이하의 황산 농도에서는 일부 니켈 합금과 유사하거나 더 우수한 저항성을 나타내지만, 니켈 함량이 높지 않아 30% 이상의 황산 농도에서는 부식 저항성이 떨어진다. 동일한 이유로 염산에서의 부식 저항성도 니켈합금 대비 낮다.

#### 마. 염화물(Chloride) 분위기에서 국부부식 저항성

염화물 분위기에서 스테인리스강은 일반 부식보다 공식이나 틈새부식과 같은 국부 부식형태로 많이 나타난다. 특히, 페라이트의 양이 60%를 초과하도록 용

접하면 취성이 나타나며, 25 % 이하가 되면 염화물에 의한 응력부식균열에 대한 저항성을 상실하게 된다. 스테인리스강에서 국부 부식 저항성은 PREN으로 평가 가능하고, 2상 스테인리스강의 경우 PREN이 높기 때문에 오스테나이트 스테인리스강 대비 더 높은 온도나 더 높은 염화물의 농도에서 사용이 가능하다. 다양한 종류의 응력부식균열이 존재 하지만 오스테나이트 스테인리스강의 사용에 가장 큰 제약 중의 하나가 염화물에 의한 응력 부식균열이다. 2상 스테인리스강이 오스테나이트 스테인리스강의 대체 재질로 많이 사용되는 이유 중의 하나도 염화물 응력 부식균열 저항성이라고 볼 수 있다. 응력 부식균열의 민감도는 잘 알려진 것처럼 니켈의 함량에 많은 영향을 받는데, 8~12 % 정도를 함유하고 있을 때 가장 취약하다. 즉, STS 304나 STS 316이 아주 취약한 간종에 해당하며, 2상 스테인리스강의 경우 상대적으로 적은 니켈 함량과 조직의 특성 상 저항성이 우수한 편이다. STS 304나 STS 316의 경우 염소 이온이 0.01 wt %일 때 50 °C 이상에서 응력 부식균열 위험성이 있는 반면에, 일반 2상 스테인리스강의 경우 해수 분위기(약 1.8 wt % 염소 이온 농도)에서 150 °C까지 적용할 수 있다. 하지만 농도가 더 높거나 온도가 높을 경우 여전히 2상 스테인리스강도 응력 부식균열의 위험성이 있으므로 사용 환경을 사전에 확인하여야 한다. 2상 스테인리스강은 비교적 최근에 개발된 재질이지만 제지, 철강, 조선, 식음료 등 이미 다양한 용도로 사용되고 있다. 그 중에서 특히 부식 저항성과 강도가 동시에 요구되는 해상 플랫폼의 라이저(riser), 송유관 등의 설비에 널리 사용되고 있으며, 정유나 석유화학 분야에서 압력용기나 열교환기 재질로 많이 사용된다<sup>(43,44)</sup>.

#### (4) 듀플렉스 스테인리스강의 합금원소

2상 (duplex phase) 형성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 합금원소라고 할 수 있다. 특히 2상 스테인리스강은 PREN 지수 증대를 위해 크롬, 몰리브덴, 질소를 많이 함유하게 되는데, 이들 합금원소 이외에 상의 균형 및 성능 향상을 위해 다른 여러 원소도 첨가되게 된다. 페라이트와 오스테나이트가 50:50 비율로 구성된 2상 스테인리스강에서 Si, Cr, Mo, W은 페라이트 안정화 원소이고, C, Mn, Ni, Cu, N는 오스테나이트 안정화 원소이다.

#### 가. 크롬(Cr)

잘 알려진 것처럼 철 계 금속에 크롬을 최소 10.5 % 이상 함유하여야 스테인리스강이라고 할 수 있는데, 이는 크롬이 10.5 % 이상 들어가야만 강재의 표면에 충분하고 안정한 부동태 피막을 형성할 수 있기 때문이다. 2상 스테인리스강에서도 크롬은 부식 저항성에 핵심적인 역할을 하는데 크롬 함량이 증가할수록 부식 저항성 역시 증가한다. 하지만 크롬은 대표적인 페라이트 안정화원소로 크롬 함량이 너무 많을 경우 페라이트상이 과다할 수 있다. 또 크롬은 금속간 화합물 형성을 촉진하는 원소이기 때문에 많아질수록 고온 가공성 및 용접성이 떨어지므로 이에 대한 고려가 필요하다. 2상 스테인리스강은 크롬 함량이 오스테나이트 스테인리스강 대비 높기 때문에 열처리나 용접 시 발생하는 히트 틴트(heat tint) 제거가 오스테나이트 스테인리스강보다 어렵다.

#### 나. 몰리브덴(Mo)

몰리브덴 역시 크롬과 같이 PREN 지수를 높이는 합금원소인데, 크롬이 18 % 이상 들어간 스테인리스강에 몰리브덴을 첨가하면 염화물 환경에서의 국부부식 저항성이 크롬 대비 3배의 효과를 얻을 수 있다. PREN 식에서 몰리브덴 앞에 3.3을 곱하는 것도 이러한 이유라고 생각하면 된다. 몰리브덴도 크롬과 같이 페라이트 안정화원소이자 금속간 화합물 형성 원소이기 때문에 통상 오스테나이트 스테인리스강에서는 7.5 %, 2상 스테인리스강에서는 4 % 정도로 제한된다.

#### 다. 질소(N)

2상 스테인리스강에서 질소는 가장 중요한 원소 중의 하나이다. 2세대 2상 스테인리스강은 질소의 첨가로부터 진행되었다고 할 수 있을 만큼 현대 2상 스테인리스강에서 질소는 중요한 역할을 한다. 질소는 강력한 오스테나이트 안정화원소로써 크롬, 몰리브덴에 대항해 오스테나이트상의 균형을 이루어 주는데, 특히 용접 시 오스테나이트상 형성에 중요한 역할을 한다. 질소는 오스테나이트 안정화원소 이므로 오스테나이트상에 많이 고용되는데, 침입형원소로써 상대적으로 약한 오스테나이트상을 강화시키는 역할을 한다. 질소는 또 PREN을 가장 효과적으로 높이는 원소인데, 적게는 크롬의 16배, 많게는 30배 이상의 효과로 고려된다.

#### 라. 니켈(Ni)

대표적인 오스테나이트 안정화원소로써 오스테나이트상 형성에 중요한 역할을 한다. 잘 알려진 것처럼, 오스테나이트상은 FCC구조로 BCC구조 대비 인성이 좋으므로 2상 스테인리스강의 인성 향상에 기여한다. 또 질소와 같이 금속간 화합물 형성을 지연시켜 2상 스테인리스강의 사용성을 증대시킨다<sup>(43)</sup>.



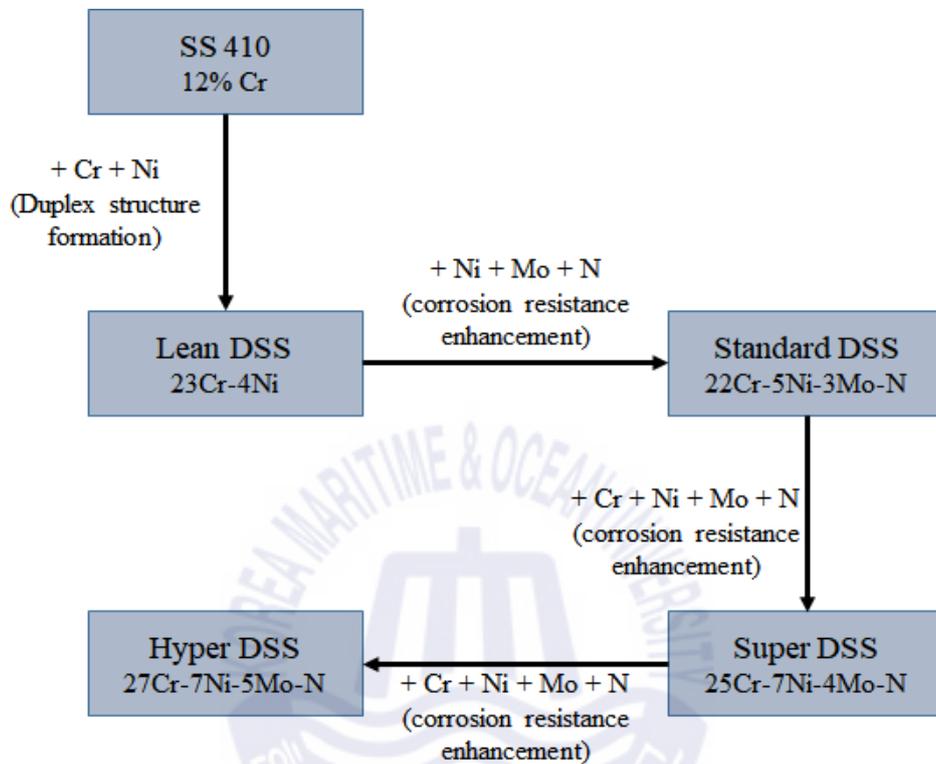


Fig. 2.4 Category of duplex stainless steel (Lee et al., 2016)<sup>(43)</sup>

Table 2.4 PREN lower and upper limits of UNS S31803 and UNS S32205 (Lee et al., 2016)<sup>(43)</sup>

UNS	Cr	Mo	N	PREN
S31803 min.	21	2.5	0.08	30.5
S31803 max.	23	3.5	0.2	37.8
S32205 min.	22	3	0.14	34.1
S32205 max.	23	3.5	0.2	37.8

**Table 2.5** Hyper duplex stainless steel components and PREN (Lee et al., 2016)<sup>(43)</sup>

UNS	C	Cr	Ni	Mo	N	Co	PREN min.
S32707	≤ 0.03	27	6.5	4.8	0.4	1.0	48
S33207	≤ 0.03	32	7	3.5	0.5	-	50

**Table 2.6** Comparison of strength of duplex stainless steel (Lee et al., 2016)<sup>(43)</sup>

Grade	Proof strength		Tensile strength (MPa)
	Rp0.2 (min.) MPa	Rp1.0 (min.) MPa	
S32750, Thickness max. 20mm	550	640	800-1,000
S32205, Thickness max. 20mm	485	500	680-880
S31254, Thickness ≤ 5mm	310	340	675-850
S31603, Thickness <10mm	220	250	515-690

### 2.1.3 듀플렉스 스테인리스강의 용접 특성

#### (1) 듀플렉스 스테인리스강의 용접성

용접성(weldability)이란 용어는 복잡하고 다양한 의미를 가질 수 있는데, 통상 용접 작업의 난이도와 완성된 용접부의 성능을 동시에 의미한다. 2상 스테인리스강은 1930년대 처음 개발 되었는데, 이 때 개발된 2상 스테인리스강은 용접 시 열영향부에 인성이 저하하는 단점으로 인해 용접이 필요 없는 곳에서만 사용이 가능하였다. 열영향부의 인성이 저하한 이유는 용접 후에 페라이트상이 과다해져 상분율이 깨졌기 때문이다. 1970년대 질소의 중요한 역할을 알게 되면서 열영향부의 상분율을 맞추는게 가능해졌고, 이때부터 용접이 필요한 곳에도 2상 스테인리스강의 사용이 가능해졌다. 하지만 최신의 2상 스테인리스강을 용접 시에도 상분율을 맞추는 것은 여전히 중요하며 적절한 상분율을 위해 여러 가지로 주의를 기울여야 한다. 우선 중요한 것이 용접 간 또는 용접 후 냉각 속도인데, 2상 스테인리스강은 응고 시 델타 페라이트로 완전히 응고하고, 응고 후에 고상변태에 의해 오스테나이트상이 생성되게 된다. 그렇기 때문에 냉각 속도가 너무 빠르면 고상변태 시간이 짧아 오스테나이트상이 충분히 생성되지 않게 된다. 그래서 일반 2상 스테인리스강은 입열이 최소 0.5 kJ/mm 이상이 되도록 추천한다. 그리고 용접재료도 오스테나이트 안정화원소인 니켈을 모재보다 2% 이상 많은 것을 사용하게 된다. 보호가스를 사용하는 용접법인 경우에는 보호가스에 포함된 1~2%의 질소가 오스테나이트상의 생성을 돕지만 2%가 넘으면 스팩터가 발생하고, 기공도 형성될 수 있으므로 주의를 해야 한다<sup>(43)</sup>.

#### (2) 듀플렉스 스테인리스강의 용접 시 예열과 후열의 영향

열영향부에 과도한 페라이트상이 생성되는 것을 방지하기 위해서는 너무 급랭이 되지 않도록 해야 하는데, 역으로 너무 서냉이 되면 다른 문제가 발생할 수 있다. 크롬과 몰리브덴은 금속간 화합물 형성을 촉진하는 원소인데, 2상 스테인리스강에는 이들 합금원소들이 많기 때문에 시그마상과 같은 금속간 화합물이 잘 생성된다. 특히 700~950℃에서 유지 시 금속간 화합물이 급속히 생성되는데, 슈퍼 2상 스테인리스강은 950℃에서 1분도 채 되지 않는 시간에 시그

마상이 생기고, 일반 2상 스테인리스강도 900 °C 에서 3~5 분 정도면 시그마상이 생성될 수 있다. 제조과정에서 생성되어 있던 기존의 석출물도 고려하면 인성과 연성, 부식 저항성이 더욱 낮아지게 되어 통상 1% 이하로 제어를 해야 한다. 용접 시 가장 좋은 제어방법은 결국 고온에서의 유지 시간을 최소화 시키는 것이다. 고온에서 유지 시간을 최소화 하는 대표적인 방법이 입열과 층간 온도를 제어하는 것이다.

입열의 경우 일반 2상 스테인리스강은 2.5 kJ/mm, 슈퍼 2상 스테인리스강은 1.5 kJ/mm를 최대치로 제한한다. 층간온도는 일반 2상 스테인리스강은 250 °C, 슈퍼 2상 스테인리스강은 150 °C 를 최대치로 제한하는데, API RP 582 (Welding guidelines for the chemical, oil, and gas industries)에는 2상 스테인리스강의 등급에 관계없이 150 °C 로 제한하고 있지만, 강종 별로 층간온도가 다를 수도 있다고 애매하게 표현하고 있다. 고온에서 유지시간을 최소화하기 위해서 예열과 후열은 통상 추천하지 않는다<sup>(43)</sup>.

### (3) 듀플렉스 스테인리스강의 용접 시 보호가스의 영향

일부 문헌에 보면 용접 시 보호가스로 질소를 충전하고 용접하는 것을 추천하고 있으나, 실제 업무에 있어서 이런 접근은 자칫 용접부의 질화 및 과도한 기공 발생 등의 문제점을 야기할 수 있다. 2상 스테인리스강의 용접 시에는 용접부가 급랭되기 때문에 용접부의 상 분율을 맞추기 어렵게 되어 페라이트 상이 과도하게 형성될 위험이 있다. 이를 방지하기 위해 용접 과정에서 보호가스로 질소를 첨가하여 용접하게 되면 용접금속이 급랭되더라도 안정적으로 오스테나이트 조직을 만들 수 있어서 최종적으로 상 분율 확보에 문제가 없다<sup>(43)</sup>.

## 2.1.4 듀플렉스 스테인리스강의 열처리 특성

### (1) 스테인리스강의 열처리 종류

기계적, 물리적, 화학적 성능을 요구 수준에 맞추기 위해서는 단순한 화학적 성분 변화 이외에 강의 열처리를 통한 미세 구조의 변화가 필요하다. 예를 들면 연성 증가, 재결정화, 불완전 페라이트 강종의 탄화 크로뮴 조대화, 입계 크로뮴 고갈 영역 제거를 통한 입계부식 저항성 향상, 오스테나이트 강종의 고용화, 또는 표면 광택 등 다양한 효과를 열처리를 통해 얻을 수 있다. 열처리는 열간 압연 후나 중도 냉간 압연 후에, 혹은 마무리가 끝난 후에 수행하기도 한다. 열처리 조건을 선정할 때에는 합금의 조성과 주조, 단조, 압연, 드로잉(drawing), 용접 등의 모든 공정 상태를 고려해야 한다. 응력 제거나 어닐링을 목적으로 하는 경우, 생산 라인에서는 대개 노를 이용하지만 일부 마르텐사이트계나 석출경화형 스테인리스강과 같이 노로 온도 제어가 힘든 경우에는 염욕을 이용하여 열처리를 한다. 스테인리스강의 열처리에는 그 목적에 따라 균질화(homogenization), 어닐링(annealing), 응력제거(stress relieving), 급랭 및 템퍼(quench and temper)와 같은 다양한 종류가 있다<sup>(45)</sup>.

#### 가. 응력제거

주조, 성형, 용접, 기계 가공 등을 통해 부품을 만들고 나면 잔류 응력이 생긴다. 제품 특성상 잔류 응력을 일부러 남기는 경우도 있지만, 대개는 열처리를 통해 응력을 제거함으로써 연성과 강도를 향상시키는 것이 바람직하다. 열처리 대상이 어떠한 공정을 거쳐 왔는지에 따라 응력 제거에 필요한 온도나 시간이 결정되는데, 대부분은 재결정 온도보다 낮은 500~600℃에서 실행한다. 즉, 재결정 없이 재료의 잔류 응력을 제거하는 것이 주목적이다. 많은 연화가 필요한 경우에는 응력 제거 열처리보다 더 높은 온도에서 어닐링을 하는 것이 일반적이다.

#### 나. 어닐링

페라이트나 오스테나이트 스테인리스강에 있어서 어닐링(annealing, 소둔)은

압연 등의 가공을 한 후에 재결정화를 목적으로 실시하는 열처리다. 어닐링 온도 및 유지 시간은 재료의 이력 및 화학성분에 따라 결정된다. 어닐링을 하는 동안에는 새로운 결정의 생성 및 성장이 일어나며, 결정립의 크기는 어닐링 전의 가공 이력, 어닐링 온도와 시간, 합금 조성에 의존한다. 오스테나이트계나 완전 페라이트계 스테인리스강의 전형적인 어닐링 온도는 1,000 ~ 1,150 °C이며, 시간은 강의 두께에 따라 다르지만 판재의 경우 수 분 정도로 한다. 불완전 페라이트계나 마르텐사이트 스테인리스강의 어닐링은 재결정화보다는 페라이트상과 탄화물 조직을 얻는 것이 목적이다. 어닐링에는 완전 어닐링(full annealing) 또는 변태점 이하 어닐링(subcritical annealing)의 두 가지 방법이 있다. 완전 어닐링은 오스테나이트화 온도보다 약간 높은 오스테나이트 상 안정 영역으로 가열하여 오스테나이트상을 얻은 후 천천히 냉각함으로써 상온에서 페라이트상과 탄화물 조직을 얻는 것이다. 오스테나이트 온도 이하에서 가열하여 마르텐사이트를 분해하는 변태점 이하 어닐링(subcritical annealing)을 하는 경우에는 상대적으로 열처리 시간이 길지만 냉각 속도는 중요하지 않다.

#### 다. 균질화

균질화(homogenization) 처리는 스테인리스강을 가열하여 편석된 원소(C, P, S)를 고르게 분포하도록 만드는 열처리이다. 결정립이 조대화 되지 않는 온도 범위 내의 고온(1,200 ~ 1,300 °C)에서 장시간 가열한다. 오스테나이트 상이 불안정한 페라이트계 스테인리스강을 제외하고는 보통 오스테나이트 상 영역에서 온도를 유지한다.

#### 라. 급냉과 템퍼링

급냉(quenching)과 템퍼링(tempering)은 마르텐사이트계 스테인리스강에서 수행하는 열처리이다. Fig. 2.5에 표시된 것처럼 오스테나이트화 온도 이상으로 가열한 후 빠르게 냉각하여 마르텐사이트 구조를 형성시키는 것이 급냉(quenching, 담금질)이다. 이때 미세구조와 경도를 결정하는 요소는 조성, 온도, 오스테나이트화 시간, 냉각 속도이다. 일반적으로 급냉된 재료는 인성이 너무 낮기 때문에 마르텐사이트가 분해되지 않도록 변태점 이하 어닐링 온도보다 더 낮은 온도에

서 열처리하여 인성을 향상시키는 것이 템퍼링(tempering)이다. Fig. 2.6과 같이 스테인리스강의 경도는 템퍼링 온도에 따라 달라진다. 템퍼링 온도를 적절히 선택하면 경도를 크게 저하시키지 않으면서 인성을 회복시킬 수 있다<sup>(45)</sup>.

## (2) 고용화 열처리 특성

어닐링(annealing)의 한 종류인 고용화 열처리(solution annealing)은 Cr 탄화물이나  $\sigma$  상 또는 냉간가공으로 생성된 마르텐사이트를 고온으로 가열함으로써 다시 오스테나이트 조직으로 만들고 가공경화응력을 제거하기 위한 열처리를 가리킨다. 따라서 강종에 따라 적절한 가열온도와 유지시간, 냉각속도를 선정해야 한다. 열처리온도는 화학조성에 따라 다르지만 STS 304는 1,050 °C 정도이며, STS 309와 STS 310S는 그 온도보다 약간 높게 관리하고 있다. 유지시간은 재료 두께 25 mm 당 1시간을 표준으로 하며, 예민화 온도 범위를 급랭하기 위하여 대개 수냉으로 처리한다<sup>(46)</sup>.

## (3) 듀플렉스 스테인리스강에 미치는 고용화 열처리의 영향

듀플렉스 스테인리스강의 국부부식은 오스테나이트/페라이트 상 간 내식성 차로 인한 갈바닉 반응으로 발생하거나 합금원소가 고갈된 지역과 편석되어 부식저항성이 약화된 곳에서 발생된다. 이러한 국부부식을 최소화하기 위해서는 적절한 고용화 열처리가 필요하다. 특히 듀플렉스 스테인리스강의 경우에는 오스테나이트상과 페라이트상 간의 계면에서 주로 국부부식이 발생된다. 듀플렉스 스테인리스강의 고용화 열처리 시 고온에서 냉각될 때 그 속도를 조절함으로써 합금 원소의 재분배를 균질하게 할 수 있으며 또한 질소의 확산에 의해서 제어할 수도 있다. 즉 국부부식이 발생하는 지역을 제어할 수 있다. 1,020 °C ~ 1,080 °C 사이에서 열처리를 수행 할 경우, 질소의 함량이 적으면 오스테나이트 상에서 Cr과 Mo의 함량이 줄어들어 페라이트상보다 국부부식에 대한 저항성이 떨어진다. 즉 오스테나이트상이나 두 상 간 계면에서 국부부식이 발생한다. 질소함량이 높은 경우에는 질소가 오스테나이트상에 농축되고 Cr과 Mo의 함량도 증가하여 오스테나이트상의 국부부식 저항성이 증가한다. 반면 과도한 질소가 첨가되면 페라이트상의 국부부식 저항성이 감소하여 페라이트상이나 두 상 간

계면에서 국부부식이 발생하게 된다. 1,100 °C 이상에서 열처리 할 경우에 국부 부식은 두 상 간 계면이나 페라이트상 내부에서 발생하게 된다. 고온에서 서냉을 하면 이러한 페라이트/오스테나이트 상 내부에서 발생하게 되다. 고온에서 서냉을 하면 이러한 페라이트/오스테나이트 상 간 재확산이 일어나는데, 이를 통해 상간 국부부식 저항성이 증가한다. 로냉 후에는 석출상이 석출하지 않도록 수냉하는 과정이 필요하다<sup>(47)</sup>.



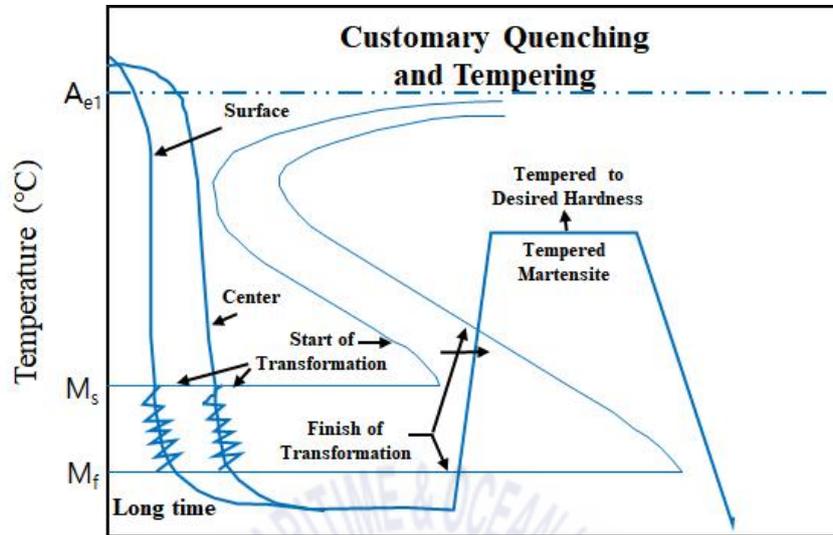


Fig. 2.5 Quenching and tempering heat treatment for stainless steel (Kwon et al., 2007)<sup>(45)</sup>

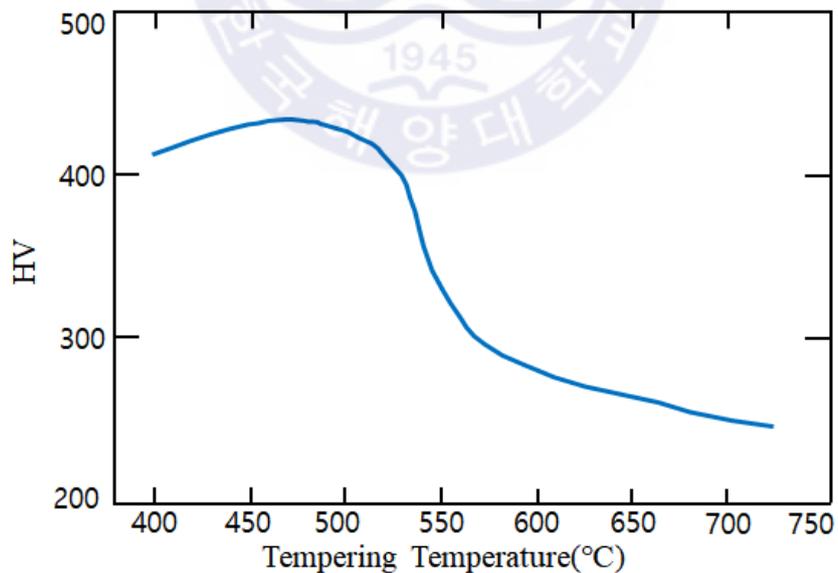


Fig. 2.6 Difference of hardness according to tempering for stainless steel (Kwon et al., 2007)<sup>(45)</sup>

## 2.2 PAW-TIG 하이브리드 텀덤 용접 프로세스

### 2.2.1 PAW 용접 열원의 원리

#### (1) PAW 용접의 특징

플라즈마 아크용접 (Plasma Arc Welding, PAW)은 고속으로 분출되는 플라즈마 제트를 이용한 용접 공정으로 플라즈마 용접에서는 내부의 플라즈마 가스와 외부의 보호 가스가 별도로 공급되며, 텀스텐 용접봉은 수냉형 수축 노즐 내부에 위치한다. 플라즈마 아크 열원을 이용하면 용융 용접뿐만 아니라 키홀 모드 (keyhole mode) 용접도 가능하다. Fig. 2.7은 플라즈마 용접과 GTA 용접을 비교한 것으로 GTA 용접에서는 텀스텐 전극봉이 노즐 밖에 노출되어 있고 원뿔 모양의 아크와 함께 용융 면적이 넓은 반면 용입 깊이는 얇다. 그러므로 GTA 용접에서는 모재와 전극사이의 거리가 멀어지면 열을 받는 모재 부위가 넓어져서 단위 면적당용접 입열이 크게 감소한다. 그러나 플라즈마 아크용접에서는 아크가 수축 노즐에 의해 수축되어 원통 형상을 가지기 때문에 노즐과 모재 사이의 거리가 변하더라도 아크열을 받는 모재 부위의 면적은 거의 변하지 않는다. 그러므로 플라즈마 아크용접은 수축 노즐에 의해 아크의 집중성을 향상시킨 측면을 제외하고는 GTA 용접 공정과 거의 동일하다고 할 수 있기 때문에 플라즈마 아크용접은 GTA 용접의 특수한 형태라고 할 수 있다. 플라즈마 아크 용접은 Fig. 2.8에 보인바와 같이 이행형 아크 (transferred arc)와 비이행형 아크 (non-transferred arc) 용접으로 분류된다. 이행형 아크 용접에서는 텀스텐 전극에 음극을 연결하고 모재에 양극을 연결하는 직류 정극성의 특성을 가지며, 비이행형 아크용접에서는 모재 대신에 수축 노즐에 양극을 연결한 것이다. 이행형 아크 용접에서는 모재가 전기회로의 일부이므로 반드시 전기전도성을 가져야 하는데, 이때 열은 플라즈마 제트와 모재의 양극점에서 집중적으로 발생하기 때문에 비교적 많은 열이 모재로 전달되어 깊은 용입을 얻을 수 있다. 비이행형 아크 용접에서는 아크가 전극봉과 수축노즐 사이에서 발생하기 때문에 모재로 전달되는 열량은 플라즈마 제트에 의해서만 이루어진다. 그러므로 비이행

형 아크 용접은 이행형 아크에 비해서 열효율이 낮고 수축노즐이 과열될 위험이 있다. 그러나 모재가 전기적으로 비전도체인 경우에도 적용이 가능하기 때문에 비금속의 용접이나 절단에 이용할 수 있는 장점이 있다<sup>(48)</sup>.

## (2) PAW 용접 가스

플라즈마 아크 용접에서 사용되는 가스는 플라즈마 가스와 보호 가스의 2가지가 있다. 플라즈마 가스는 플라즈마 형성을 위하여 수축 노즐 내부로 공급되는 가스이며, 보호 가스는 플라즈마와 용융풀을 보호하기 위해 보호 가스 노즐을 통해 공급되는 가스이다. 플라즈마 가스는 용융풀과 직접 접촉하지만, 보호 가스는 직접적으로 접촉하지 않기 때문에 용접 품질에 미치는 영향이 상대적으로 작다.

### 가. Ar 가스(플라즈마 가스)

플라즈마 가스로서 가장 많이 사용되는 가스이다. 불활성 가스로서 이온화 전압이 낮기 때문에 아크 발생이 용이하고 아크 안정성도 우수하며 텅스텐 전극 보호에도 좋다. 그러나 열전도도가 낮기 때문에 조건에 따라서는 불균일한 용접비드가 생성된다. 플라즈마 가스 유량이 너무 적으면 전극 손상과 불완전 용입을 초래하고, 유량이 너무 많으면 용접부에 기공과 언더컷 결함이 발생하기 쉽다.

### 나. Ar(95%) - H<sub>2</sub>(5%) 가스(플라즈마 가스)

H<sub>2</sub>는 Ar에 비하여 열전도도가 크기 때문에 열적 펀치 효과를 촉진하고 가스의 유출속도를 증대시킨다. 그리고 H<sub>2</sub>와 같은 2원자 분자는 아크열에 의해 원자상태로 분리되는데, 분리된 수소원자가 모재 표면에서 냉각되어 본래의 분자상태로 재결합하는 과정에서 열을 방출하므로 모재 입열을 증가시킨다. 그러므로 Ar에 5% 이하의 H<sub>2</sub>를 혼합하여 사용하면 100% Ar을 사용하는 경우보다 비드 형상이 양호하고 언더컷 발생이 감소한다. 그러나 H<sub>2</sub>는 폭발성이 큰 인화성 가스이므로 용기의 조정기 설치부, 토치 연결부, 압력 조정기 등의 가스 누설에 주의하지 않으면 폭발 사고의 위험이 있다. 또한, 전극 수명은 순수한 Ar 가스만을 사용할 때보다 단축되고, H<sub>2</sub>와 친화력이 있어 화합물을 생성하게 되

는 Ti이나 Zr과 같은 활성금속의 용접에는 적합하지 않다.

다. Ar 가스(보호 가스)

모든 금속에 사용할 수 있고 특히 Al, Cu 합금, Ti과 활성금속 용접에 적합하다. 그러나 Ar은 용융풀의 유동성이 나쁘고 약간의 언더컷을 발생시킨다.

라. Ar(95%) - H<sub>2</sub>(5%) 가스(보호 가스)

Ar - H<sub>2</sub> 혼합 가스는 용접 입열을 증가시키며, H<sub>2</sub>의 첨가로 인해 용융물의 표면장력을 감소시켜 용접속도를 증가시킬 수 있다. 또한, 용융 금속의 표면 장력 감소로 인해 용융풀의 가스를 쉽게 제거할 수 있으므로 기공 발생 정도도 감소하며, 용접속도가 증가하여도 언더컷이 발생하지 않고 비드 표면이 매우 양호하다. H<sub>2</sub>는 용접 입열의 증가 이외에도 스테인리강, Ni과 Ni 합금을 용접할 때 생기는 산화물 생성을 감소시키고 Ni 합금 용접 시에 기공 발생도 방지해 준다.

마. He 가스(보호 가스)

He는 Ar에 비해 약 25%정도 용접 입열 증가를 가져오는데 이것은 He의 이온화 전위가 높기 때문이다. 주로 열전도가 큰 Al 합금, Cu 합금, 그리고 후판의 Ti 용접에 좋다.

바. Ar-He 가스(보호 가스)

Ar에 He을 첨가하면 주어진 전류에서 입열이 증가되는데, 적어도 40% 이상의 He를 첨가하여야 실질적인 아크열의 증가 효과를 얻을 수 있다. He(75%) - Ar(25%) 혼합 가스는 Cu 합금 또는 Ti 후판 용접에 사용된다.

이외에도 보호 가스는 텅스텐 전극봉과 접촉하지 않기 때문에 CO<sub>2</sub> 또는 Ar과 CO<sub>2</sub>의 혼합 가스를 사용하기도 한다. 플라즈마 가스로 He 가스를 용융 용접에서만 제한적으로 사용하고 특히 키홀 용접에는 사용하지 않는데, 이는 He 가스가 가벼워서 고속의 플라즈마 분출에 부적합하기 때문이다<sup>(48)</sup>.

(3) PAW 용접 변수

가. 플라즈마 전류

사용전류는 모재의 두께에 의해 결정되는데, 사용 가능 전류범위에 따라 3가지로 구분된다. 0.8 mm 이하의 매우 얇은 판재의 용접에 사용되는 0.1 ~ 15 A 범위의 마이크로 플라즈마, 2.5 mm 이상의 두꺼운 판재 용접에 이용되는 100 ~ 300 A 범위의 일반적인 플라즈마, 그리고 중간 범위로써 10 ~ 100 A 범위의 플라즈마 용접이 있다.

#### 나. 수축 노즐의 직경과 형태

노즐 구멍은 아크를 수축시키고 플라즈마 제트의 흐름이 노즐의 길이 방향으로 일정하게 되도록 유지시켜 주는 작용을 하기 때문에 매우 중요하다. 직경이 사용전류 수준에 비해 너무 작으면 노즐 구멍의 마모가 심하게 되고 경우에 따라서는 용착되기도 한다. 그러므로 노즐은 최대 사용전류에 맞는 직경을 사용하는데 너무 크면 아크가 불안정해진다.

#### 다. 가스의 종류와 유속

플라즈마 가스와 보호 가스는 Ar, Ar + He, Ar + H<sub>2</sub>가 일반적이다. 플라즈마 절단공정에는 큰 에너지 밀도와 높은 가스 속도가 요구되기 때문에 고전류, 작은 노즐직경 및 높은 플라즈마 가스 유속이 사용되지만, 플라즈마 용접에서 플라즈마 가스의 유속이 너무 크면 용융금속이 폭발하고 플라즈마의 제어도 불가능해지기 때문에 낮은 유속이 요구된다. 그리고 가스 조합의 선택에 있어서는 플라즈마 가스로써 Ar을, 보호 가스로는 Ar + (2 ~ 5%)H<sub>2</sub>를 사용하는 것이 가장 보편적이다. 그러나 용접 상황에 따라 Ar, Ar - H<sub>2</sub>, Ar - He의 혼합가스를 적절히 조합하여 사용한다. 플라즈마 가스의 유량은 0.25 ~ 5 l/min이며, 보호 가스 유량은 낮은 전류를 사용할 때는 10 ~ 15 l/min를 공급하고 높은 전류를 사용할 때는 15 ~ 30 l/min를 공급한다<sup>(48)</sup>.

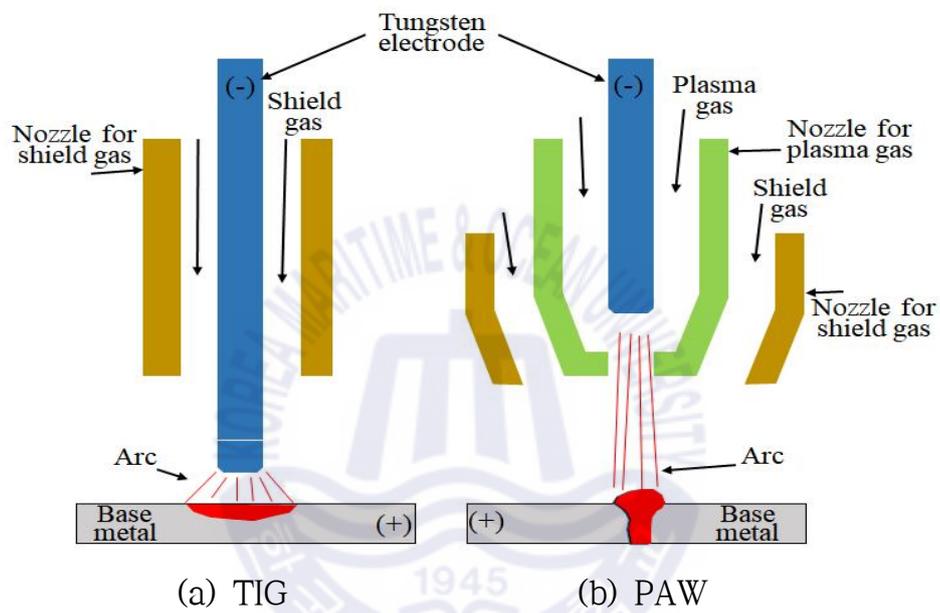
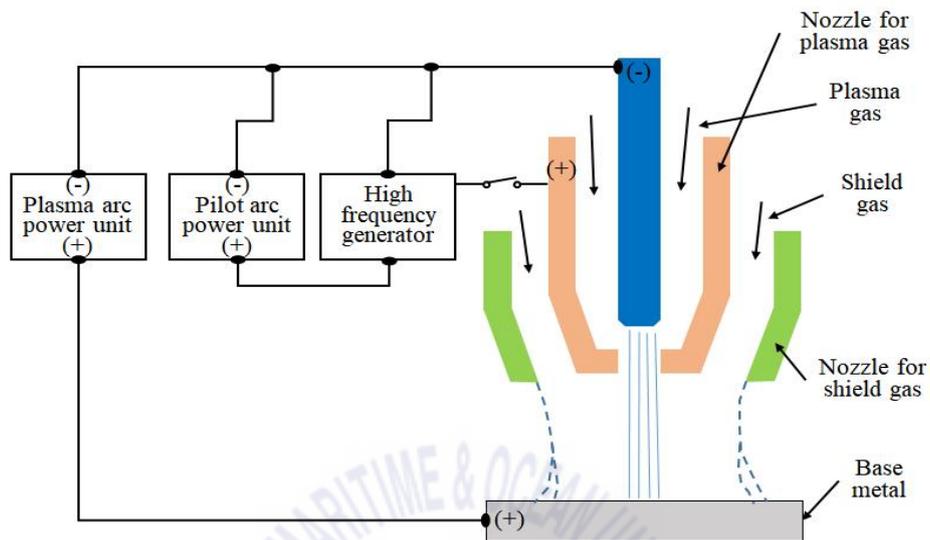
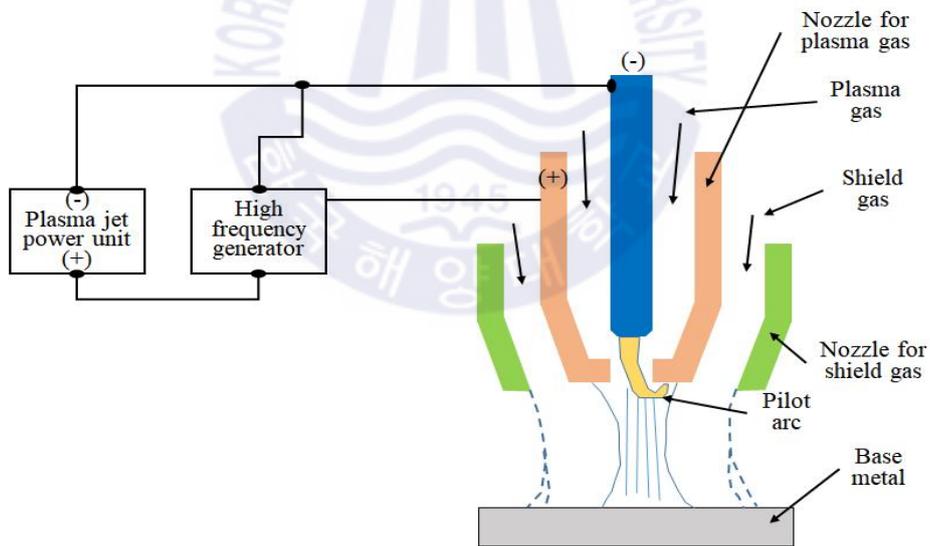


Fig. 2.7 Comparison of TIG and PAW (KWJS, 2007)<sup>(48)</sup>



(a) Transitional plasma arc



(b) Non-transitional plasma arc

Fig. 2.8 Transitional and non-transitional plasma arc welding (KWJS, 2007)<sup>(48)</sup>

## 2.2.2 TIG 용접 열원의 원리

### (1) TIG 용접의 특징

가스 텅스텐 아크 용접(GTAW, Gas tungsten arc welding)은 고온에서 녹지 않는 비소모성의 텅스텐 전극봉을 사용하여 전극과 모재 사이에 발생한 아크열로 모재를 용융시켜 용접부를 형성하며, 필요에 따라 용가재를 공급하여 모재와 함께 용융시키기도 한다. 모재의 용융풀과 텅스텐 전극봉의 산화를 방지하기 위한 보호 가스로 불활성 가스인 Ar이나 He을 사용하므로 TIG(Tungsten inert gas) 용접으로 부르기도 한다. GTA 용접은 모든 용접자세에 적용이 가능하며 아크 안정성이 높고 용접 품질이 우수하므로 산화나 질화 등에 민감한 재질의 용접 및 피복 아크 용접을 적용하기 곤란한 경우에 사용된다. 그러므로 탄소강뿐만 아니라 스테인리스강, 알루미늄 합금 등의 용접에 사용되지만, 가스 메탈 아크 용접(GMAW, Gas metal arc welding)에 비하여 용접속도가 느리기 때문에 생산성은 낮다. GTA 용접 시스템은 용접기, 토치, 보호가스로 구성되어 있으며, 필요에 따라 용가재 송급 장치를 사용한다. GTA 용접기는 정전류를 사용하기 때문에 모든 전류 영역에서 아크는 항상 안정하며, 아크길이에 무관하게 용접전류가 일정하게 유지되므로 모재의 용융량 특히 용입이 일정하게 된다. 용융량은 극성에 의하여 영향을 받는다. 정극성(DCEN)을 사용하면 아크의 전자가 모재로 향하기 때문에 전극봉보다 모재에 열이 많이 가해지므로 모재의 용융량이 증가한다. 역극성(DCEP)을 사용하면 전극봉보다 모재에 열이 적게 발생하므로 열효율이 감소하므로 박판 용접에 적합하며, 청정효과가 발생하므로 산화막을 제거하는 알루미늄 등의 용접에 사용한다. 그러므로 청정효과가 필요하지 않은 일반 탄소강의 용접에서는 모재의 용융량을 증가시켜 생산성을 높이기 위해 정극성을 사용한다. 교류를 사용하며, 정극성과 역극성의 효과를 동시에 얻을 수 있지만, 아크의 소멸과 생성이 반복되므로 아크 안정성이 낮기 때문에 교류를 사용하는 경우에는 항상 아크 발생기를 작동시켜야 한다. 전극봉의 재질은 순수 텅스텐을 사용하거나, 정극성을 사용하는 경우에 전극봉에서 전자의 방출이 쉽도록 일함수가 낮은 산화토륨( $\text{ThO}_2$ , Thorium dioxide)을 1~2

% 첨가한 텅스텐 전극봉을 사용한다. 역극성인 경우에는 전극봉에서 발생하는 열이 많기 때문에 전극봉이 과열되기 쉽다. 그러므로 동일한 용접전류인 경우에는 역극성에서 사용하는 전극봉 직경이 정극성의 전극봉 직경보다 크다. 정극성인 경우, 전극봉의 끝을 연마하여 원뿔 형태로 사용한다. 전극봉의 형상이 아크 형상에 영향을 주며, 전극봉 끝의 각도가 증가할수록 용융풀의 폭이 증가하고 용입이 감소한다. 그러나 원뿔 형태의 전극봉을 역극성에 사용하면 전극봉에 많은 열이 발생하여 전극봉의 끝 부분이 녹아 용융풀로 이행되므로 이와 같은 현상을 방지하기 위하여 전극봉의 끝을 용융시켜 구형으로 만들어 사용한다. 교류를 사용하는 경우에도 역극성과 같이 구형의 전극봉을 사용한다. 용접전류가 증가하면 전극봉에서 발생하는 저항열도 커지므로 직경이 큰 전극봉을 사용한다. 보호 가스로 불활성 가스인 Ar이나 He을 사용하여 전극봉과 용융풀의 산화를 방지한다. Ar 가스는 He 가스에 비하여 가격이 저렴하고 아크의 발생이 용이하므로 널리 사용된다. He 가스는 Ar 가스에 비하여 이온화 전위가 높기 때문에 아크의 온도가 증가하여 깊은 용입을 얻을 수 있다. 역극성을 사용하는 경우에 발생하는 청정효과를 얻으려면 Ar 가스를 사용해야 하며, He 가스를 사용하면 청정효과를 얻을 수 없다. Ar과 He 가스의 혼합 가스를 사용하기도 하며, 필요에 따라 소량의 H<sub>2</sub> 가스를 첨가하기도 한다<sup>(48)</sup>.

## (2) TIG 용접 가스

보호 가스로는 불활성 가스인 Ar과 He 혹은 혼합 가스를 사용한다. Ar 가스는 He 가스에 비하여 이온화 에너지가 낮으므로 아크의 발생이 용이하고 공기보다 무겁기 때문에 아래보기 용접자세에서 용융부의 보호성이 양호하며, He 가스보다 가격이 저렴하므로 널리 사용되고 있다. He 가스는 이온화 에너지가 높으므로 아크의 발생과 유지에 높은 전압이 요구된다. He 아크의 온도는 Ar 아크에 비해 높기 때문에 용입이 증가하며, 열전도도가 높은 Al 합금 등을 용접하는데 적당하다. He 가스는 고가이므로 Ar 가스와 혼합하여 사용하기도 한다. GTA 용접에서는 용융부를 충분히 보호할 수 있도록 노즐의 크기와 가스량을 선정해야 하며 가스량은 대략 5~10 l/min 범위에서 선정한다. 스테인리스강이나 Al 합금을 완전 용입상태로 용접하는 경우에는 이면의 산화를 방지하기

위하여 이면에도 보호 가스를 공급하여 용융부를 보호해야 한다. 실외에서 작업하는 경우에 바람의 영향을 받기 쉬우므로 주의하여야 하며, 보호 가스를 충분히 공급하여도 기포나 산화에 의한 불량 발생하면 보호 가스 자체가 수분을 함유하고 있거나 토치에 문제가 있는 것이므로 이를 점검하여야 한다<sup>(48)</sup>.

### (3) TIG 용접 변수

#### 가. 극성과 전극봉

극성에 따라 아크로부터 모재와 전극봉에 가해지는 열량이 변화하므로 모재의 용융에 큰 영향을 준다. GTA 용접에서 정극성을 사용하면 전자가 모재인 양극에 충돌하면서 에너지를 방출하기 때문에 모재의 용융량이 증가한다. 정극성의 경우, 순수 텅스텐 전극봉을 사용하거나 전극봉에서 전자의 발생이 쉽도록 텅스텐에  $\text{ThO}_2$ 를 1~2% 첨가한 전극봉을 사용한다. 역극성을 사용하면 모재에 비하여 전극봉에 더 많은 열이 가해지므로 전극봉의 온도가 증가하여 정극성에서 사용하는 전극봉 보다 지름이 큰 것을 사용한다. 정극성은 역극성에 비해 모재의 용융량은 증가하기 때문에 일반적으로 정극성을 사용한다. 또한, 역극성에서 전극봉은 전자의 발생과 무관하므로  $\text{ThO}_2$ 가 첨가된 텅스텐 전극봉을 사용할 필요가 없기 때문에 순수 텅스텐 전극봉을 사용해도 무방하다. 역극성에서 Ar 가스를 사용하면 청정효과가 발생하므로 모재의 표면에 산화막이 형성되는 알루미늄 합금 등의 용접에 적합하며, 일반적으로 정극성과 비교하여 용입이 작고 비드 폭이 큰 용융을 얻는다. 정극성으로 산화막을 형성하는 재질을 용접하려면 용접하기 전에 기계적 혹은 화학적인 방법으로 산화막을 제거하여야 불량을 방지할 수 있다. 교류는 정극성과 역극성의 특성을 모두 포함한다. 즉, 정극성 구간에서는 모재를 용융시키고, 역극성 구간에서는 산화막을 제거하므로 필요에 따라 각 구간의 지속 시간을 조절하면 원하는 효과를 얻을 수 있다.

#### 나. 용접전류와 전압 및 용접속도

용접전류와 전압 및 용접 속도는 용접조건의 선정에 있어 매우 중요한 변수로서 모재의 용융량, 열영향부의 크기와 냉각 속도, 변형과 잔류 응력 등에 영

향을 미친다. 이와 같은 용접변수들의 영향을 해석하기 위한 연구가 활발히 진행되었으며, 해석을 통하여 상당히 정확하게 예측이 가능하다. 용접전류와 전압에 의하여 입열량이 결정되며, GTA 용접에서 정전류 특성으로 인하여 용접전류가 결정되면 아크길이가 변화하여도 전류는 일정하다. 용접전압은 아크길이에 의하여 결정되며, 아크길이가 증가하면 용접 전압은 선형적으로 증가한다. 용접전압이 증가하면 입열량이 증가하므로 모재의 용융량도 증가 하지만 아크길이가 길어짐에 따라 아크가 주위로 퍼지므로 아크열이 분산되어 비드의 폭은 증가하지만 용입이 감소한다. 일반적으로 용입을 증가시키기 위해 아크길이를 짧게 유지하지만, 위보기 용접을 하는 경우에 용융풀이 아래로 처지기 때문에 전극봉과 접촉하지 않도록 주의하여야 한다. 자동용접의 경우에는 AVC를 사용하여 아크길이를 일정하게 유지시켜야 한다<sup>(48)</sup>.



### 2.2.3 하이브리드 텀덤 용접의 종류 및 프로세스

하이브리드 용접은 두 개 이상의 열원을 동일한 시간 및 공간에서 용접하는 용접법으로써 열원 간의 시너지 효과를 극대화시켜 고품질·고효율의 용접을 실현하는 방법이다.

#### (1) 레이저-아크 하이브리드 용접

일반적으로 레이저 빔의 흡수율은 재료의 고유저항에 비례하므로 알루미늄, 동 등과 같이 전기전도도가 높은 재료는 흡수율이 낮다. 한편 재료의 고유저항은 온도에 비례하므로 레이저빔의 흡수율은 재료의 표면온도에 비례하여 증가한다. 따라서 제2의 열원을 이용하여 재료의 표면을 가열시킴으로써 레이저 빔의 흡수율을 증대시키는 것이 하이브리드 용접의 기본원리이다. 하이브리드 용접은 사용하는 열원에 따라 여러 가지 종류로 분류할 수 있는데, 이 중 레이저와 아크 열원을 동시에 사용하는 레이저-아크 하이브리드 용접이 가장 대표적이며 하이브리드 용접의 대부분을 차지하고 있다. Fig. 2.9은 레이저-MIG 하이브리드 용접의 모식도를 나타낸 것으로, 피용접재와 MIG 용접 와이어 사이에서 아크가 형성되면 아크열에 의해 피용접재의 표면 및 와이어가 용융되어 용융지가 형성된다. 이때 아크의 입열로 인해 피용접재의 열전도도가 나빠짐과 동시에 용융상태에서 레이저 빔의 흡수율이 향상되어 키홀 형성이 용이해지므로 깊은 용입이 이루어진다. 레이저-아크 하이브리드 용접 도입의 근본적인 목적은 그들 각각의 장점을 유지하면서 레이저 및 아크 용접과 관련된 단점을 극복하는 것이다. 예를 들어 레이저-MIG 하이브리드 용접의 경우, 각각의 용접 열원의 서로 상반된 특성을 하나로 결합하여 용접성을 향상시킨다. Table 2.7에 레이저 및 MIG 용접 그리고 하이브리드 용접시의 장·단점을 나타낸다. MIG 용접시 발생하는 전기적 아크는 모재와 전극 와이어 사이에서 발생 및 유지되며, 이때 발생한 아크에 의해 와이어 및 모재가 용융되어 용융지가 형성되고 용접이 진행된다. MIG 용접은 높은 용착률 및 효율 그리고 낮은 투자비의 장점으로 인해 현장에서 TIG와 더불어 가장 많이 쓰이고 있는 용접법이다. 용가재와 전극사이에서 발생한 아크에 의해 전극으로 사용되는 와이어가 용융되어 용융지

로 이행하기 때문에 용접시 갭이 존재하여도 용융 와이어가 갭을 메꾸어 탁월한 갭 브릿지 효과를 가지고 있다. 또한 낮은 응고 속도로 인해 용접부의 경도가 낮아 취성이 적다. 그러나 MIG 용접은 낮은 에너지 밀도( $10^4 \text{ W/cm}^2$  부근)로 인해 용입 깊이가 얕아 후판에 대해 용접을 실시할 경우, 맞대기 면에 그루브를 주어 멀티패스로 용접을 실시해야 하며, 용접속도가 느리기 때문에 생산효율이 저하하는 중대한 결점을 가진다. 또한 높은 입열량으로 인해 용접 후 변형이 발생하기 쉽고 열영향부의 결정립이 조대화 되어 취성이 증가하는 단점이 있다. 반면 레이저 용접은 집속렌즈에 의해 집광된 높은 에너지 밀도 특성으로 인해 키홀 용접이 가능하다. 이러한 키홀 용접은 높은 어스펙트 비(aspect ratio)를 가진 용접부를 형성하며, 빠른 속도로 용접이 가능하다. 또한 레이저 용접은 집속된 에너지를 사용하기 때문에 가공하고자 하는 영역 주변으로의 입열이 현저히 낮아 열영향부의 크기가 좁으며, 열 변형이 거의 없다. 이러한 장점들로 인해 레이저 용접은 낮은 효율과 상당한 투자 및 운용비용에도 불구하고 산업현장에서 고품질의 용접부를 구현하기 위하여 사용되고 있다. 하지만 레이저 용접은 일반적으로 제살용접으로 스파터가 발생하게 되면 용융지내의 용융금속 양이 부족해져 언더컷(undercut) 및 언더필(ungerfill)이 발생하게 된다. 또한 빔의 사이즈가 너무 작기 때문에 정확한 빔의 포지션이나 가이드를 필요로 한다. 맞대기 용접시에는 맞대기 면의 갭 공차가 레이저빔 초점 미만으로 존재해야 하며, 만약 레이저 빔 스폿의 직경보다 큰 갭이 존재할 경우 레이저 빔이 갭 사이로 통과하여 에너지의 손실이 일어나기 때문에 용접이 되지 않는 문제점이 발생한다. 또한 레이저 용접은 국부적인 가열로 인해 용접부의 열이 순식간에 모재로 전도되기 때문에 용접부가 급랭되어 경도가 상승하므로 취성이 증가하는 단점을 가지고 있다. 레이저-MIG 하이브리드 용접은 이러한 레이저 및 아크의 특성을 결합함으로써 MIG 용접의 용가재 공급 및 아크에 의해 모재의 넓은 영역이 용융되기 때문에 갭 브릿지 효과가 상승되며, 이와 동시에 높은 에너지 밀도를 가진 레이저가 용융지에 조사되면서 더욱 깊은 용입 및 빠른 용접속도를 얻을 수 있다. 하이브리드 용접과 관련된 종합적인 기대는 용접속도를 빠르게 하여 생산성을 향상시키고 입열을 줄임으로써 변형 및 미세구조적 결함과 같은 열적 효과를 최소화하여 용접 품질을 향상시키는 것이다<sup>(49)</sup>.

## (2) 레이저-마찰교반 하이브리드 용접

레이저-마찰교반 하이브리드 용접은 마찰교반 용접(FSW)라 불리는 상대적으로 새로운 공정 기술에 레이저 예열을 결합한 고상용접 공정이다. 마찰교반 용접은 접합되는 재료 사이의 접촉면에 따라서 이동하는 회전 비소모 톨에 의한 고상 접합 공정이며, 이 톨은 돌출된 핀과 접합부의 표면에서 핀의 위치를 고정해주는 솔더(shoulder)부로 구성되어 있어서 이 솔더의 마찰력과 압력에 의해 접합부가 형성된다. 마찰교반 용접은 고상접합으로 용융이 일어나지 않기 때문에 균열이나 기공과 같은 용접결함으로부터 비교적 자유로우며 변형을 최소화할 수 있다. 또한 접합부의 강도 및 연성은 타 용접법에 비해 탁월한 특징을 갖고, 서로 다른 종류의 소재라도 접합이 가능하다. 하지만 마찰교반 용접법을 이용하여 이종재료를 접합할 경우 물리적인 성질과 기계적인 성질이 상이하여 기존 동종재료의 마찰교반 방식으로는 건전한 접합부를 얻기 어렵다. 또한 고강도의 재료를 접합할 경우에는 톨의 마모가 심하기 때문에 고가의 생산 비용이 들거나 생산성이 떨어지는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점들을 더욱 보완하고 우수한 접합부를 얻기 위하여 최근 하이브리드 마찰교반 용접이 주목을 받고 있다.

**Fig. 2.10**은 레이저와 마찰교반 용접을 접목한 레이저-마찰교반 하이브리드 용접을 모식적으로 나타낸 것이다. 먼저 레이저가 접합부를 예열하고 그 뒤로 마찰교반 용접을 행함으로써 접합부의 소성 유동성을 높여 건전한 접합부를 얻을 수 있다. 특히 이종재료 접합 시 톨을 연질재료 쪽으로 삽입하고 레이저를 이용하여 경질재료 쪽을 예열하여 접합성을 향상시킬 수 있다. 또한 하이브리드 마찰교반 용접법을 이용하여 재료를 예열함으로써 기존의 마찰교반 용접 이용 시 발생하는 톨의 마모를 줄일 수 있다<sup>(50)</sup>.

### (3) 플라즈마-MIG 하이브리드 용접

플라즈마 아크는 레이저와 유사하게 깊은 용입이 가능한 아크 용접기법으로, 레이저-아크 하이브리드와 유사하게 플라즈마 아크와 TIG 및 MIG를 하이브리드화한 경우 깊은 용입을 위해 이용하지 않고 오히려 MIG의 바깥쪽에 아크를 구성하여 용적 이행을 안정화 시키고 용접부재에 예열 효과를 주어 비철금속의 용접에 활용하는 방법도 개발되었다. 플라즈마 아크와 MIG 용접 공정이 하나의 토치에 결합된 상태로, 낮은 장비 비용으로 생산성을 높일 수 있는 장점을 가진다. 용접 토치의 내부는 MIG 용접 와이어가 토치의 중앙에 장착된 컨택트 팁과 그 바로 아래를 직접 통과하여 공급되는 구조를 가지고 있으며, MIG 용접 와이어와 모재 사이에서 발생하는 아크는 수냉의 링모양 구리 전극인 플라즈마 전극을 통과한다. 용접가스는 MIG 용접을 위한 중앙 가스와 플라즈마 가스로써 아르곤 그리고 실드가스로써 아르곤 혹은 아르곤/헬륨 혼합가스를 사용하여 세 방향의 구조로 토치에 공급한다<sup>(50)</sup>.

Fig. 2.11과 같이 플라즈마-TIG 하이브리드 텐덤 용접의 형태도 존재한다. 기존의 하이브리드 용접과는 일부 다른 형태이며, 선행 열원인 플라즈마와 후행 열원인 TIG와의 사이에 간극이 존재하며, 플라즈마 열원과 TIG 열원 모두 피용접물인 모재와 직각을 유지하고 용접봉을 사용하지 않는 제살 용접을 적용한다.

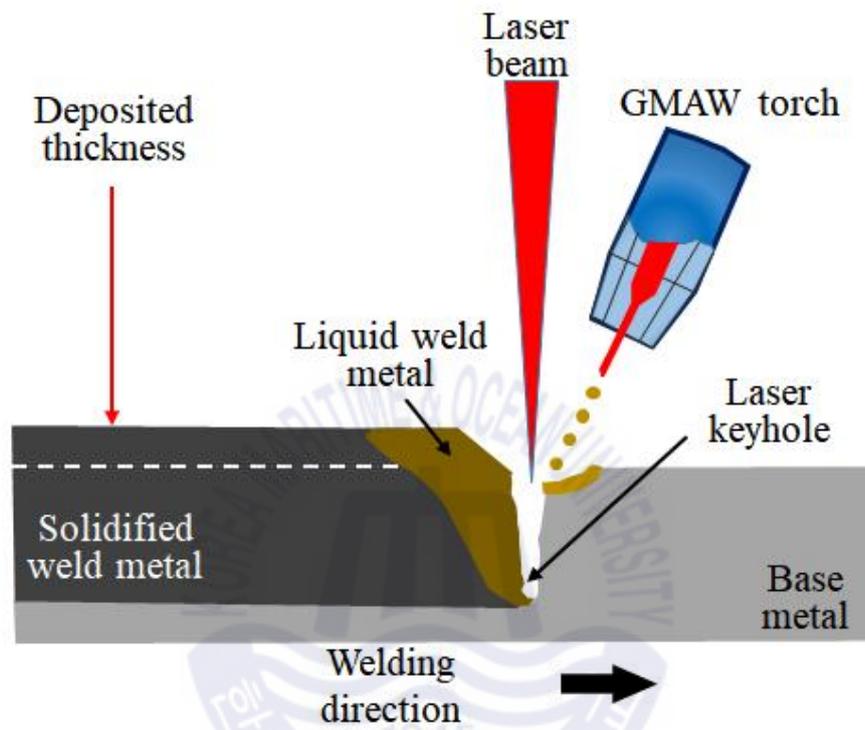


Fig. 2.9 Schematic illustration of laser-MIG hybrid welding (Myung, 2015)<sup>(49)</sup>

**Table 2.7** Advantages and disadvantages of MIG welding, laser beam welding and laser-MIG hybrid welding (Myung, 2015)<sup>(49)</sup>

	MIG welding	Laser welding	Laser MIG hybrid welding
<b>Advantage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Proven technology</li> <li>· Low investment and operating costs</li> <li>· High energetic efficiency</li> <li>· Good gap bridging ability</li> <li>· Filler wire transferred by the arc</li> <li>· Influence on solidification structure</li> <li>· Cleaning effect → removal of oxide layer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· High welding speed</li> <li>· Low heat input → less distortion</li> <li>· High weld depth to width ratio → deep penetration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Increased welding speed/penetration</li> <li>· Minimized heat input → less distortion and microstructural effects</li> <li>· Improved process stability</li> <li>· Transfer of filler wire by means of the arc → influence on solidification structure</li> <li>· Improved gap bridging ability</li> </ul>
<b>Disadvantage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· High heat input → distortion</li> <li>· Small weld depth to width ratio → multi pass technique</li> <li>· Low welding speed</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· High investment and operating ratio</li> <li>· Lower energetic efficiency</li> <li>· Narrow fir-up tolerances</li> <li>· High beam guiding and positioning requirements</li> <li>· Use of filler wire → decrease in productivity and process stability</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· High investment and operating costs</li> <li>· Many interacting parameters have to be optimized</li> </ul>

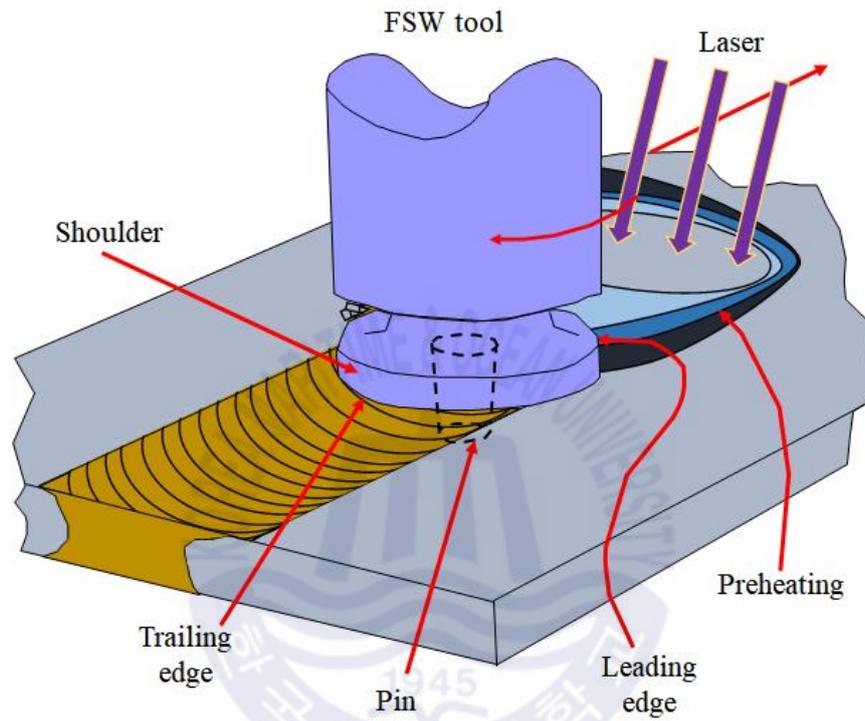


Fig. 2.10 Schematic illustration of laser-FSW hybrid welding system (KMOU, 2011)<sup>(50)</sup>

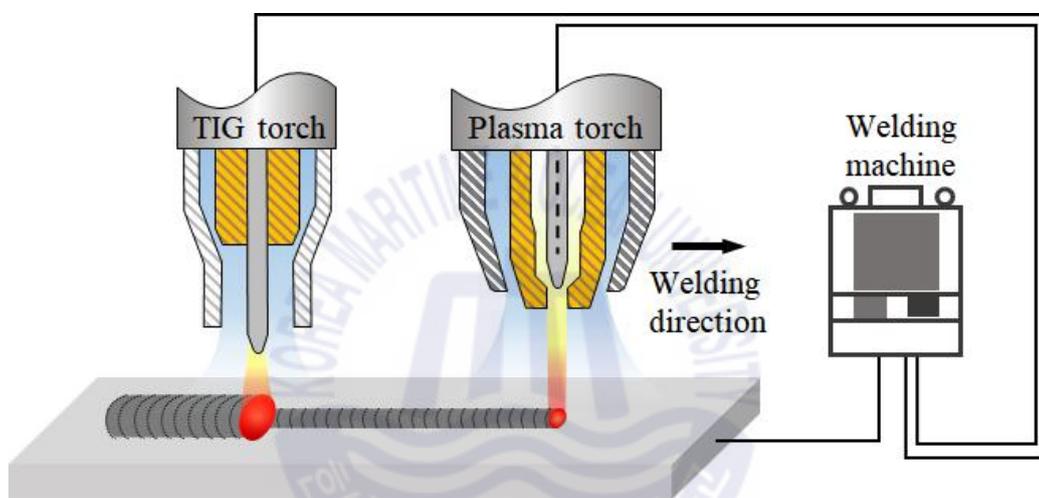


Fig. 2.11 Constitution of plasma-TIG hybrid tandem welding system

## 제 3 장 실험 방법

### 3.1 실험 재료 및 장치

#### 3.1.1 실험 재료

친환경 선박용 황산화물 배기가스 세정장치는 황산화물 세정을 위해서 해수를 사용하며, 해수의 흡입, 세정 및 배출로 인해 배관라인의 부식에 대한 우려가 있다. 본 연구에서는 일반 스테인리스강인 12크롬강에 많은 양의 크롬과 소량의 니켈을 넣어 조직의 변화와 부식 저항성을 향상 시킨 듀플렉스 스테인리스강(Duplex Stainless Steel)의 사용이 고려되었고, 그 중에서도 일반 듀플렉스 스테인리스강 대비 크롬, 몰리브덴, 질소 함량을 높여 부식 저항성과 강도를 향상 시킨 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강(Super Duplex Stainless Steel)을 사용하였으며, 조선 해양 분야에서 많이 사용하는 파이프 두께인 5mm를 적용하였다. 시편 치수는 Fig. 3.1과 같이 300 mm x 200 mm로 절단하여 사용하였다<sup>(2,3,43)</sup>.

슈퍼 듀플렉스 스테인리스강(UNS S32750)의 기계적 특성은 Table 3.1에서 화학적 구성은 Table 3.2에서 각각 확인 할 수 있다. 일반적으로 듀플렉스 스테인리스강이 단상의 오스테나이트 스테인리스강보다 강도가 높은 것은 결정립 미세화에 기인하는 바가 크며, 듀플렉스 스테인리스강은 응고 시 최초 페라이트가 생성되고 이후에 오스테나이트가 성장하는데, 두 상이 다른 상의 성장을 방해해 결정립을 미세화 시키기 때문이다. 질소의 첨가 역시 듀플렉스 스테인리스강의 주요 강도 증대원으로 볼 수 있으며, 질소는 침입형 원소로 상대적으로 강도가 떨어지는 오스테나이트상을 고용 강화시키는 효과가 있다<sup>(2,3,43)</sup>.

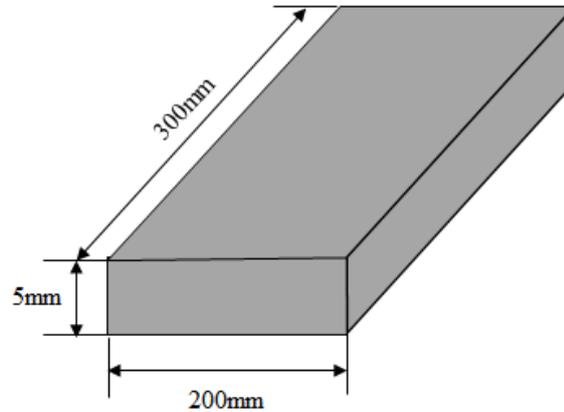


Fig. 3.1 Schematic illustration of specimen

Table 3.1 Mechanical properties for wall thicknesses up to 30mm of austenitic-ferritic steels in the solution annealed condition (BS EN, 2014)<sup>(51)</sup>

UNS number	Proof strength $R_{p0.2}$ min. (MPa)	Tensile strength $R_m$ (MPa)	Elongation $A$ min. (%)
UNS S32750	550	800~1,000	20

Table 3.2 Chemical composition of austenitic-ferritic steels (BS EN, 2014)<sup>(51)</sup>

UNS number	C max	Si max	Mn max	P max	S max	N	Cr	Cu	Mo	Ni
UNS S32750	0.030	1.00	2.00	0.035	0.015	0.20 0.35	24.0 26.0	-	3.0 4.5	6.0 8.0

### 3.1.2 실험 장치

본 연구에서는 Table 3.3과 같이 비드용접과 Table 3.4와 같이 맞대기용접에 다양한 조건의 PAW 조건이 적용되었으며, Table 3.5와 같이 용접변수가 고정된 TIG 조건도 함께 적용되었다. PAW를 적용하여 키홀 용접으로 하부비드를 용접하고, TIG를 적용하여 상부비드를 용접하는 순서로 상이한 용접 열원이 적용되었다. PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접에 사용된 장비는 Fig. 3.2와 같다. PAW process의 경우 전류, 전압, 용접속도, 보호가스, 보호가스 유량 및 열원간 거리를 용접변수 적용하였으며, 열원간 거리는 PAW와 TIG 열원 사이의 거리를 의미한다. 하이브리드 용접과는 다른 실험 조건 구현하고 상호 간섭을 방지하기 위해 자동용접기 간 최소거리를 250 mm로 설정하였다. 또한, Fig. 3.3과 같이 열처리로 내에서 1,050 °C의 온도로 30분 동안 고용화열처리를 수행하였다.



**Table 3.3** Condition of PAW process for bead welding

	$I$ (A)	$V$ (V)	$v$ (mm/min)	$G_s$	$Q_{gs}$ ( l /min)	$D_{P-T}$ (mm)
PAW	50	20	300	$H_2(7\%) + Ar(93\%)$	5	300
	100	25	400		6	320
	150	27	500		7	340
	200	30	600	Ar(100%)	8	360
	250	33	700		9	380
	300	35	800		10	400

**Table 3.4** Condition of PAW process for butt welding

	$I$ (A)	$V$ (V)	$v$ (mm/min)	$G_s$	$Q_{gs}$ ( l /min)	$D_{P-T}$ (mm)
PAW	200	20	450	$H_2(7\%) + Ar(93\%)$	10	250
	250	25	500			300
	300	30	550			350

**Table 3.5** Condition of TIG process

	$I$ (A)	$V$ (V)	$v$ (mm/min)	$G_s$	$Q_{gs}$ ( l /min)
TIG	235	18	500	$H_2(7\%) + Ar(93\%)$	25

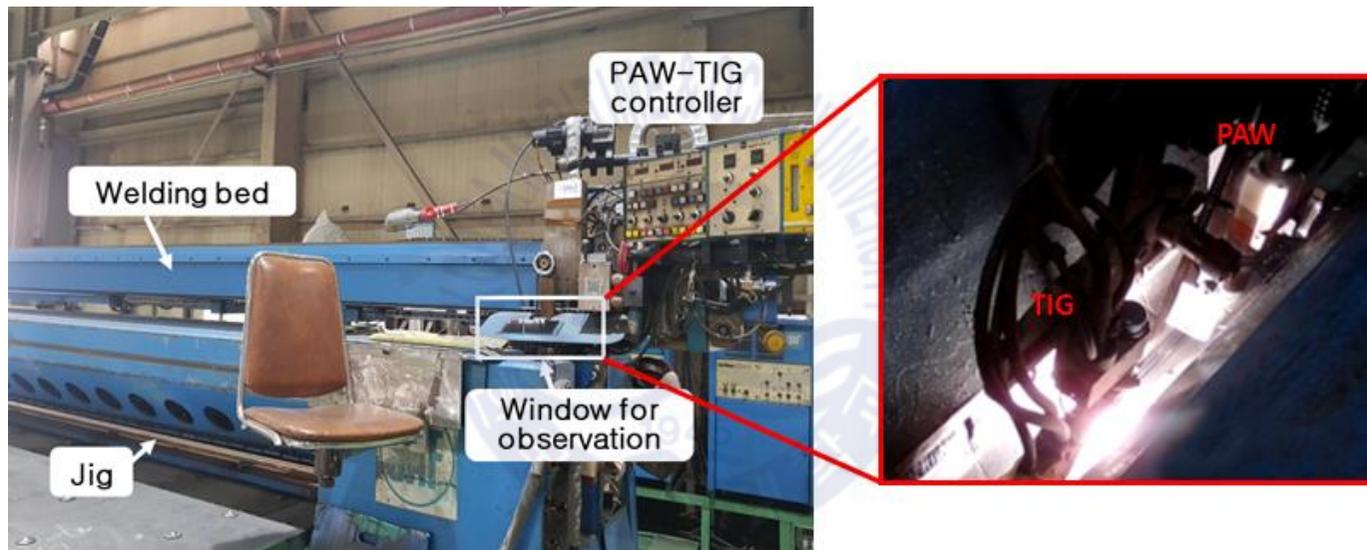
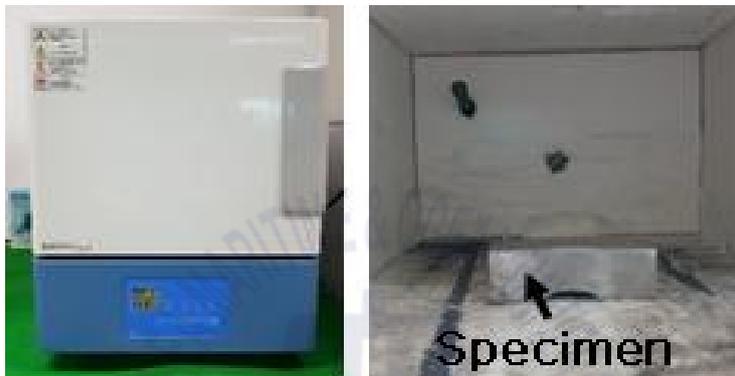
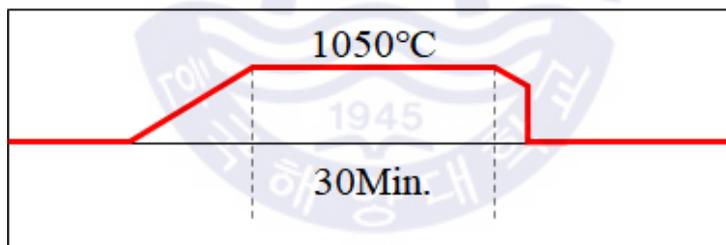


Fig. 3.2 Experimental equipment for PAW-TIG hybrid tandem process



(a) Furnace of heat treatment



(b) Curve of heat treatment

**Fig. 3.3** Condition of heat treatment

## 3.2 실험 및 분석 방법

### 3.2.1 실험 방법

실험재료에 대해 비드용접과 맞대기용접으로 실험을 진행하였다. 재료 표면의 불순물을 제거하기 위해 아세톤 및 메탄올을 사용하여 실험재료를 세정하였다. 먼저 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접을 이용한 2 종류의 비드용접을 통해 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강에 대한 PAW와 TIG 열원의 특징 및 용접성을 파악하였고, 이 후 PAW를 먼저 적용하고 일정 거리 뒤에서 TIG를 적용한 하이브리드 텐덤 비드용접을 통해 하이브리드 텐덤 용접 열원이 비드용접에 미치는 영향을 확인 하였다. 비드용접과 맞대기용접 시 PAW 열원의 플라즈마 가스는 100 % Ar 가스를 적용하였고, 보호가스의 경우 비드용접 시 93 % Ar 가스(7 % 수소)와 100 % Ar 가스를 사용하여 보호가스가 용접에 미치는 영향을 확인하였으며, 맞대기용접 시 93 % Ar 가스를 사용하였다. 맞대기용접 시 용가재가 없는 제살용접을 실시하였으며, 재료 사이의 간극을 없애고, 용접 실험을 하는 동안 재료의 변형을 막기 위해서 재료 양쪽 및 상부에 지지대를 설치하였다. 비드용접에 대한 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접의 영향을 알아보기 위해 입열량과 관련된 용접 전류 및 전압, 입열량 및 용융 속도와 관련된 용접속도, 보호가스 와 관련된 보호가스 종류 및 유량 그리고 하이브리드 텐덤 열원과 용접 상관관계를 알아보기 위해 PAW-TIG 열원 간 거리를 변수로 적용하였다. 비드용접부 전면, 이면 및 단면 용접 형상을 통해 비드용접 시 용접 변수의 최적조건을 도출 하였고, 동일한 재료에 제살 맞대기용접을 실시하였다. 맞대기용접에 대한 용접 조건 검증을 위해 용접 전류 및 전압, 용접 속도, PAW-TIG 용접열원 간 거리를 변수로 적용하여 용접부 전면, 이면 및 단면을 확인 하였다. 또한 비드용접 시 확인한 최적 용접 조건으로 2 종류의 맞대기용접 시편을 추가 제작하였고, 그 중 1개의 시편은 고용화 후열처리 및 급랭까지 진행 하였으며, 이 후 열처리 적용 시험편과 비열처리 시험편에 각각 경도시험, 인장시험, 굽힘시험 및 미세조직 분석을 진행하였다. 또한 페라이트 분율 확인을 통해 열처리 전후의 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 대한 페라이트 상과 오스테나이트 상의 조직 구성 비율을 조사하였다.

### 3.2.2 분석 방법

#### (1) 시험편 채취 및 에칭

안정적인 용접부를 얻기 위해서 시험편의 용접 시작점에서 100 mm 지난 지점부터 13 mm 간격으로 시험편을 채취하였으며, 비드용접과 맞대기용접의 시험편 채취 모식도는 Fig. 3.4와 Fig. 3.5에서 각각 확인할 수 있다.

또한 채취한 시험편을 사용하여 수지를 이용한 마운팅을 제작하였으며, 미세 연마 후 Fig. 3.6(a)와 같이 전면비드의 형상과 폭을 관찰하였고, 단면부 관찰을 위해 미세 연마된 시험편에 경면 연마를 추가한 후 에칭액(60 % 질산 + 10 % 염산 + 30 % 증류수) 내에서 DC 3 V 전압 조건으로 90초 동안 전해에칭을 실시한 후 Fig. 3.6(b)와 같이 시험편의 횡단면을 관찰하였다.

#### (2) 비커스 경도시험

용접부의 경도시험은 Fig. 3.7과 같이 Shimadzu HVM-2T 마이크로 비커스 경도시험기를 사용하여 PAW 및 TIG 각 용접부에 대한 폭 방향 경도와 상부 TIG부터 하부 PAW까지의 깊이 방향 경도를 측정하였으며, 경도시험 조건은 하중 100 g, 유지시간 10초로 설정하였고, Fig. 3.8과 같이 폭 방향의 경우 TIG는 모재 상부표면 기준 1mm 아래에서 PAW는 모재 하부표면 기준 1mm 위에서 500  $\mu$ m 간격으로 각각 측정되었으며, Fig. 3.9와 같이 깊이 방향의 경우 TIG 용접부 상단부터 PAW 용접부 하단까지 500  $\mu$ m 간격으로 측정되었다.

#### (3) 미세조직 관찰 및 성분분석

용접 시험편의 미세조직 관찰은 광학 현미경 (optical microscopy)와 전자주사 현미경 (SEM, Scanning electron microscope) 통해 수행되었으며, 시험편의 조직 구성 성분을 분석하기 위해 전자주사 현미경에 부착되어 있는 EDS (energy dispersive spectrometer)를 사용하였다. 그리고 부피 분율 결정을 위한 표준 시험 방법인 ASTM E 562 절차에 따라 선 또는 곡선의 격자로 형성된 점들의 배열을 금속 조직 표본의 확대된 이미지에 겹친 후, 관심 미세구조 영역 내에 속하는 포인트 수를 선택된 필드에 대해 계산하고 평균화하여 나온 미세 구조 성

분의 부피 백분율에 대한 편향 없는 통계적 추정치를 이용하여 맞대기용접 시험편의 열처리 전후에 대한 페라이트 상분율을 용접부, 열영향부 및 모재부에서 각각 측정하였다.

#### (4) 인장시험 및 굽힘시험

일반적으로 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강으로 제작되는 파이프의 경우, 유럽 연합(EU)의 EN 10217-7 규격을 준수해야 하며, 해당 규격에서 인장시험은 ISO 6892-1, 굽힘시험은 ISO 5173 절차에 따르도록 정의되어있다.

인장시험은 재료에 연속적으로 하중을 가하여 재료의 강도를 확인하는 시험으로 모재 대비 용접부의 강도를 확인 할 수 있으며, Fig. 3.10과 같이 ISO 6892-1 규격에 적합한 인장시험편을 준비하였다. 굽힘시험은 시험편에 굽힘모멘트가 작용하였을 때 재료 및 용접부의 결함을 확인하는 시험으로, Fig. 3.11과 같이 ISO 5173 기준을 만족하는 시험편을 준비하였으며, Fig. 3.12에서 인장 시험편 및 굽힘시험편의 채취 부위를 확인할 수 있다.

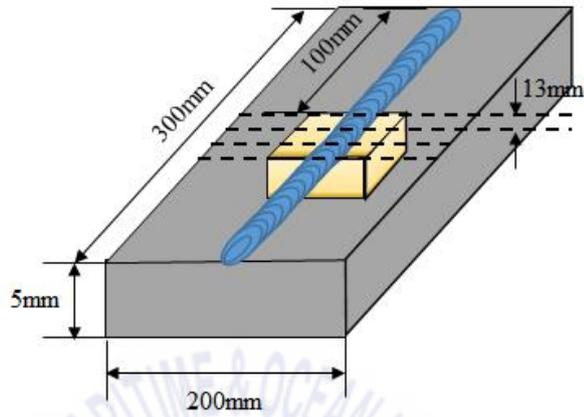


Fig. 3.4 sampling position of bead welding

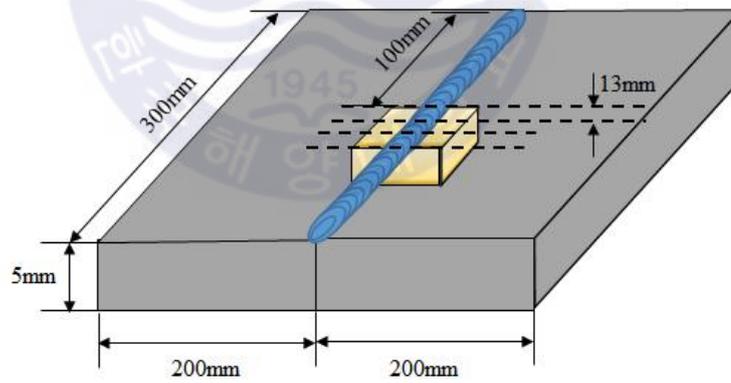
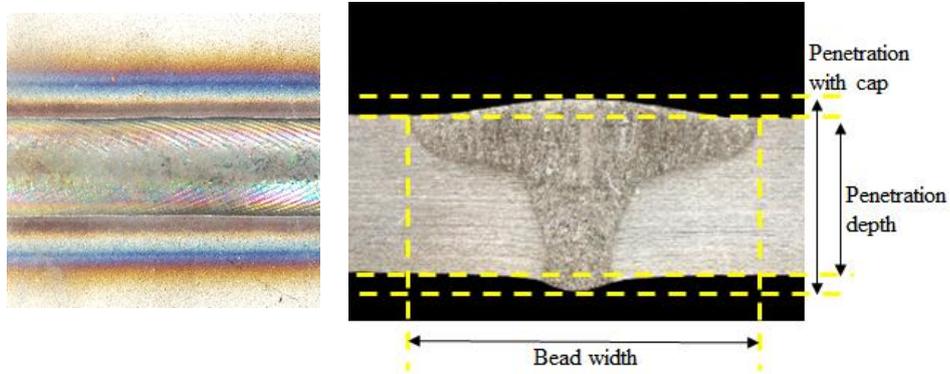


Fig. 3.5 sampling position of butt welding



(a) Bead

(b) Measuring position

Fig. 3.6 Bead appearance and measuring position in weld



Fig. 3.7 Photograph of hardness tester

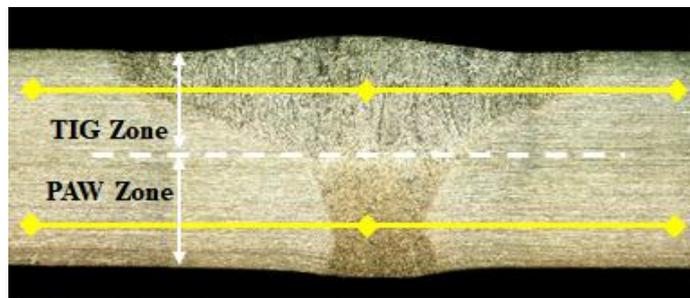


Fig. 3.8 Transverse direction for hardness test

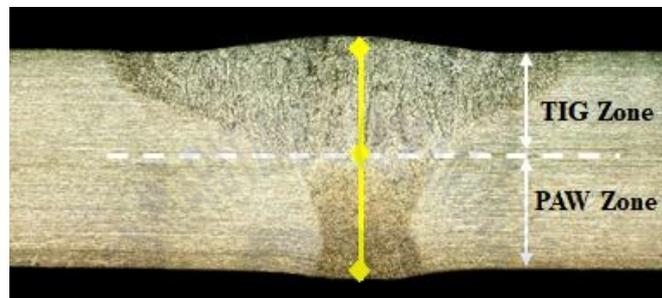


Fig. 3.9 Vertical direction for hardness test

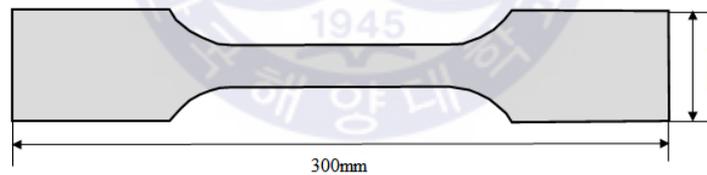


Fig. 3.10 Schematic illustrations of tensile test specimen according to ISO 6892-1 (BS EN ISO, 2019)<sup>(52)</sup>

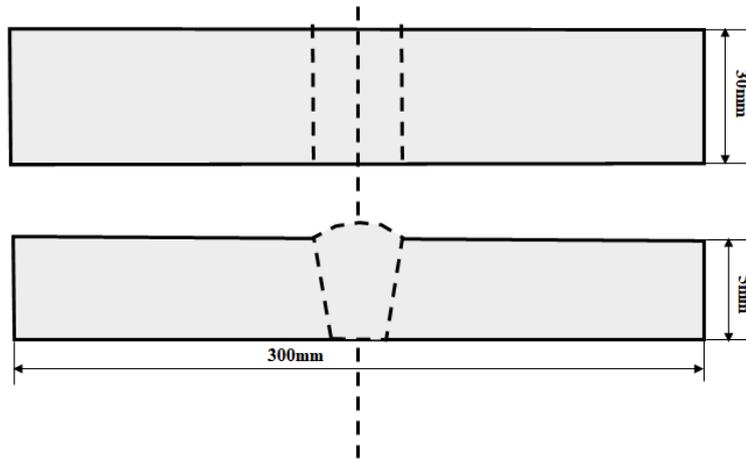


Fig. 3.11 Schematic illustrations of bending test specimen according to ISO 5173 (BS EN ISO, 2019)<sup>(53)</sup>

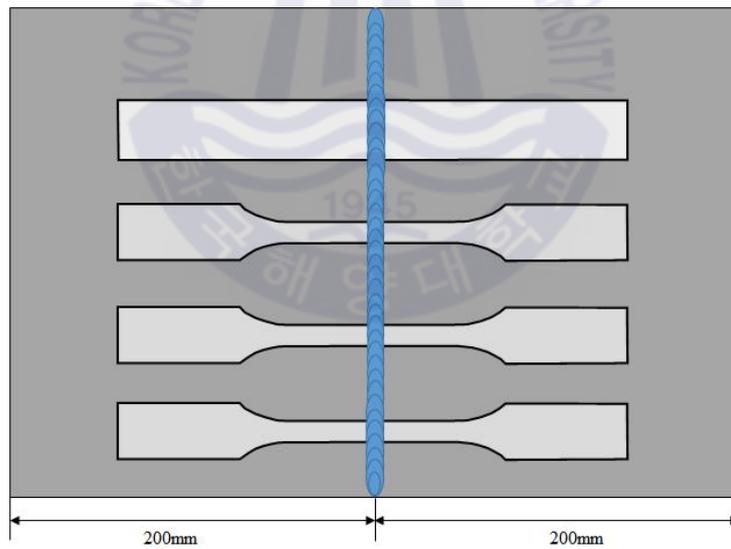


Fig. 3.12 Sampling position for tensile test bending test

## 제 4 장 실험 결과 및 고찰

### 4.1 SDSS 재료에 대한 PAW 및 TIG 열원의 용입 특성

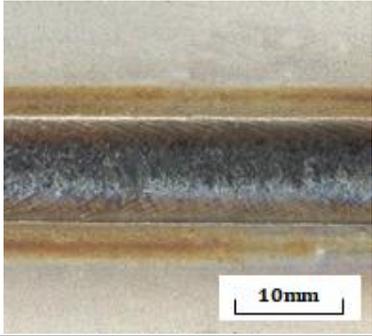
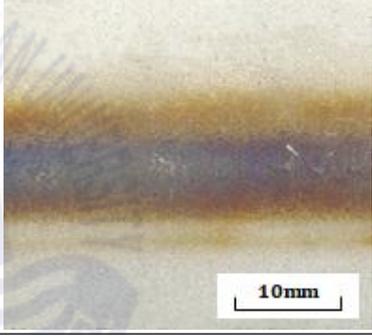
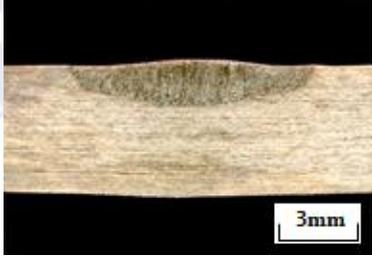
#### 4.1.1 PAW 열원 특성

플라즈마 용접법(plasma welding)은 플라즈마 아크 용접법(PAW, Plasma arc welding)이라고도 불리어 지고 있다. 여기서 플라즈마란 기체의 온도가 증가하면 기체를 구성하고 있는 원자 또는 분자의 운동량이 증가하여 상호 충돌에 의해 원자의 최외곽 전자가 이탈하면서 이온화되며, 이와 같이 이온화된 가스를 말한다. 플라즈마는 방전 구간의 전류에 따라 여러 구역으로 구분하며, 아크용접에서 열원으로 사용되는 아크는 특별한 경우를 제외하고 10 A 이상의 고전류 영역에서 발생하는 플라즈마를 말한다. 아크는 전극재료, 보호 가스, 압력 등의 다양한 인자에 의해 영향을 받지만, 전극 사이에 아크가 발생하려면 양극과 음극 사이의 전압 기울기인 전기장(electric field, V/m)이 일정 값 이상으로 증가해야 방전이 시작된다. 전기장이 증가하여 전극 사이에서 방전이 시작된 상태에서 전류를 증가시키면 저항열에 의해 플라즈마의 온도가 증가하여 기체의 이온화가 발생하면서 플라즈마가 유지된다. 아크는 전기적으로 중성이므로 양이온과 전자의 수가 동일하지만, 주로 전자의 움직임에 의해 전류가 흐르며, 이는 전자의 질량이 양이온에 비해 매우 작아서 쉽게 이동하기 때문이다. 이 플라즈마 상태의 아크는 주위로부터 냉각하면 그 직경이 수축해서 플라즈마 온도가 상승하는 성질이 있는데, 이것을 열적 핀치효과(thermal pinch effect)라고 부른다. 플라즈마 아크를 발생시킬 경우 일반적으로 TIG아크 방식이 채용되며, 텅스텐 전극봉은 수냉형 수축노즐 내부에 위치한다. 플라즈마를 발생시키는 동작 가스에는 일반적으로 아르곤(Ar) 또는 아르곤과 수소(H<sub>2</sub>)의 혼합가스를 이용하며, 용접부를 대기로부터 보호하는 보호가스는 아르곤 등의 불활성 가스를 사용한다. Fig. 4.1(a)와 같이 용융폭에 비해 용융깊이가 큰 용접부를 얻는 것이 플라즈마 용접의 일반적인 특성이다<sup>(48,54)</sup>.

## 4.1.2 TIG 열원 특성

가스텅스텐 아크용접법(GTAW, Gas tungsten arc welding)은 불활성 가스(아르곤, 헬륨) 중에서 비소모성 텅스텐전극과 모재 사이에 아크를 발생시켜 용접하는 방법으로써, TIG 용접법(tungsten inert gas welding)으로 부르기도 한다. 용착 금속량은 아크 내에 삽입하는 용가재의 공급 속도에 따라 모재의 용융과 독립해서 제어될 수 있는 특징이 있다. Fig. 4.1(b)와 같이 용융폭이 넓고 용융 품질이 좋은 것이 TIG 용접의 일반적인 특성이다<sup>(54)</sup>.

본 실험에서는 플라즈마 용접(PAW) 열원( $I=200\text{ A}$ ,  $V=25\text{ V}$ ,  $v=500\text{ mm/min}$ ,  $G_s = \text{H}_2(7\%)+\text{Ar}(93\%)$ )과 TIG용접 열원( $I=235\text{ A}$ ,  $V=18\text{ V}$ ,  $v=500\text{ mm/min}$ ,  $G_s = \text{H}_2(7\%)+\text{Ar}(93\%)$ )를 각각 이용하여 비드용접을 실시한 후 용접부의 전면, 이면 및 단면 분석과 비드 폭, 용입 깊이 및 상/하부 cap을 포함한 전체 용입 깊이 측정을 통해 PAW 열원과 TIG 열원 특성을 비교 검증하였다. 5 mm 두께의 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 대해 비드용접 시, Fig. 4.2와 같이 PAW의 경우 비드폭은 6.73 mm, 용입 깊이는 5 mm(완전 용입), 상/하부 cap을 포함한 전체 용입 깊이는 5.82 mm 였으며, TIG의 경우 비드폭은 10 mm, 용입 깊이와 상/하부 cap을 포함한 전체 용입 깊이가 모두 1.64 mm로 측정 되었다. 정량적 용접 결과만 보면 적당한 비드폭에 완전 용입이 이루어진 PAW 열원의 단독용접이 가능할 것처럼 보이나, 용접부 단면을 분석한 결과 모재일부가 떨어져 나가고 용융부 높이가 모재표면 보다 낮은 언더컷(undercut)과 용착부족(underfill) 현상이 일부 나타났다. EGCS, 선박 및 해양플랜트에 사용되는 배관은 해수의 부식에 대해 잘 견딜 수 있는 내부식성이 좋은 재료이어야 하고, 추가적으로 지속적인 압력에 견딜 수 있도록 용접부 내구성도 좋아야하기 때문에, 용접 비드폭도 넓으며 용접 품질도 우수한 TIG 용접과 함께 하이브리드 텐덤 열원을 적용한 용접프로세스를 실험에 활용하였다. 즉, 하부는 PAW열원으로 용접하고, 상부는 TIG열원으로 용접을 마무리하였다. 단, 본 연구에서는 PAW의 각 용접변수에 대한 최적조건 식별을 위해서 TIG용접조건은 Table. 3.5와 같이 고정 값으로 설정하고, PAW에 대한 변수만 변화시키면서 연구를 진행하였다.

Process Bead	(a) PAW	(b) TIG
Front bead		
Back bead		
Cross section		

**Fig. 4.1** Photographs of bead appearance and cross section at PAW process and TIG process

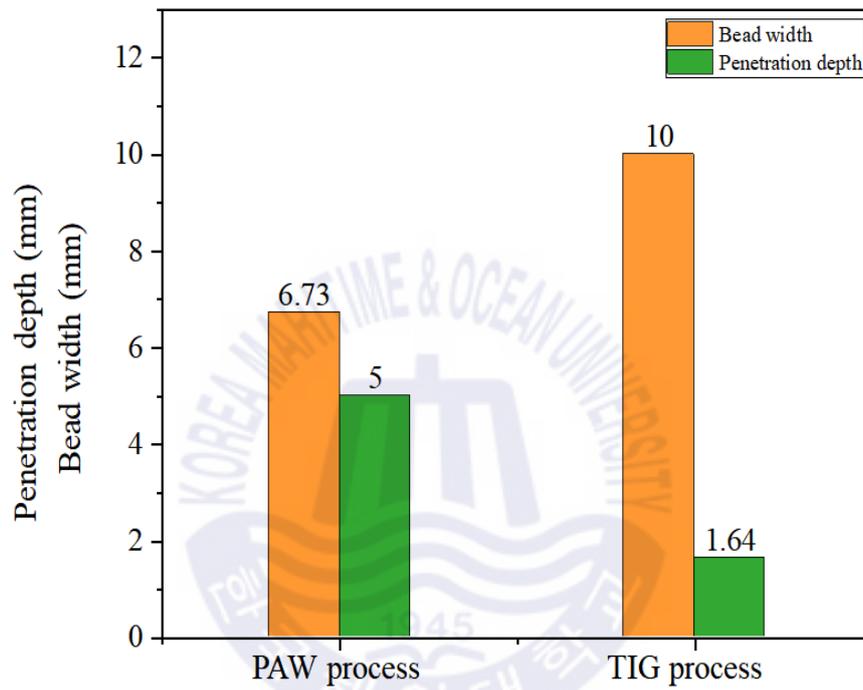


Fig. 4.2 Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth at PAW process and TIG process

## 4.2 SDSS의 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접 조건별 비드용접 특성

### 4.2.1 용접 전류 및 전압의 영향

용접전류 및 전압은 모재의 용융량, 용입 깊이 등 용접조건에 큰 영향을 주는 변수이다. 본 항에서는 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접 시, 전류와 전압 조건이 미치는 영향을 알아보기 위해 실험을 진행하였다. 먼저 전류 변화에 따른 영향을 알아보기 위해, PAW의 전류( $I$ )는 50 A, 100 A, 150 A, 200 A, 250 A, 300 A로 변화를 주었으며, 전압( $V$ )은 25 V, 용접속도( $v$ )는 500 mm/min, 보호가스 종류( $G_s$ )는 H<sub>2</sub>(7%)+Ar(93%), 보호가스 유량( $Q_{gs}$ )은 10 l/min, PAW와 TIG 열원 간 거리( $D_{p-T}$ )는 300 mm로 동일하게 설정하였다. PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접 시, PAW 전류의 변화에 따른 영향을 Fig. 4.3 및 Fig. 4.4와 같이 확인할 수 있다. 다른 변수들이 동일한 수치이고, 전류를 50 A부터 300 A로 증가시킬 때 입열량도 함께 커지며, 전면 비드 폭, 용입 깊이 및 상/하부 cap을 포함한 용입 깊이도 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 용접부 단면 분석을 통해 PAW 전류가 200 A일 때부터 PAW의 특징인 키홀 용접이 본격적으로 시작됨을 확인할 수 있다. 용접전류가 250 A, 300 A 일 때, 완전 용입이 이루어 졌으며, 그 때의 비드폭은 각각 11.18 mm와 11.19 mm 이다.

다음으로 전압 변화에 따른 영향을 알아보기 위해 PAW의 전압( $V$ )을 20 V, 25 V, 27 V, 30 V, 33 V, 35 V로 변화를 주었으며, 전류( $I$ )는 200 A, 용접속도( $v$ )는 500 mm/min, 보호가스 종류( $G_s$ )는 H<sub>2</sub>(7%)+Ar(93%), 보호가스 유량( $Q_{gs}$ )은 10 l/min, PAW와 TIG 열원 간 거리( $D_{p-T}$ )는 300 mm로 동일하게 설정하였다. PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접 시, PAW 전압의 변화에 따른 영향을 Fig. 4.5 및 Fig. 4.6과 같이 확인할 수 있다. 다른 변수들이 동일한 수치이고, 전압을 20 V부터 35 V로 증가시킬 때 전류 증가와는 반대로 용입 깊이 및 상/하부 cap을 포함한 용입 깊이가 감소하는 경향을 나타냈다. 용접 전압의 증가는 전극봉과 모재와의 거리 증가를 의미하기 때문에 이러한 결과를 나타낸 것으로 확인된다. 다만, 전압 증가가 전면 비드 폭의 증감에는 크게 영향을 미치지 않았다. 또한, 용접부 단면 분석을 통해 20 V와 25 V에서는 키홀 용접이 확인되었지만, 27 V,

30 V, 33 V, 35 V로 전압이 커지면서, 키흔 용접도 더 이상 확인할 수 없었다. 용접 전압이 20 V 일 때, 완전 용입이 이루어 졌으며, 그 때의 비드폭은 10.6 mm 이다.



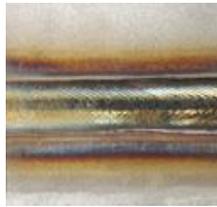
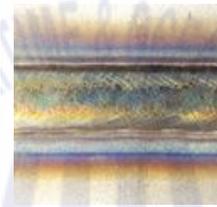
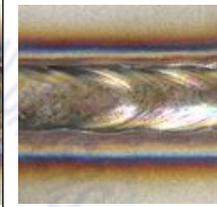
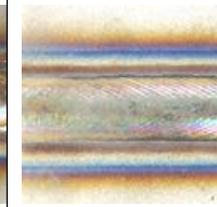
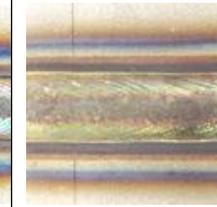
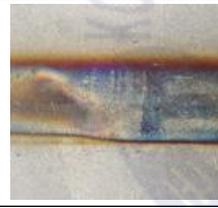
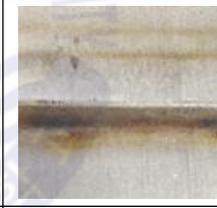
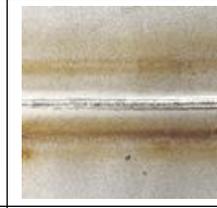
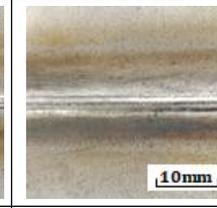
PAW, Bead welding : $V = 25 \text{ V}$ , $v = 500 \text{ mm/min}$ , $G_s = \text{H}_2(7\%)+\text{Ar}(93\%)$ , $Q_{gs} = 10 \text{ l/min}$ , $D_{p-T} : 300 \text{ mm}$							
Bead	$I(\text{A})$	50	100	150	200	250	300
Front bead							
Back bead							
Cross section							

Fig. 4.3 Photographs of bead appearance and cross section with ampere

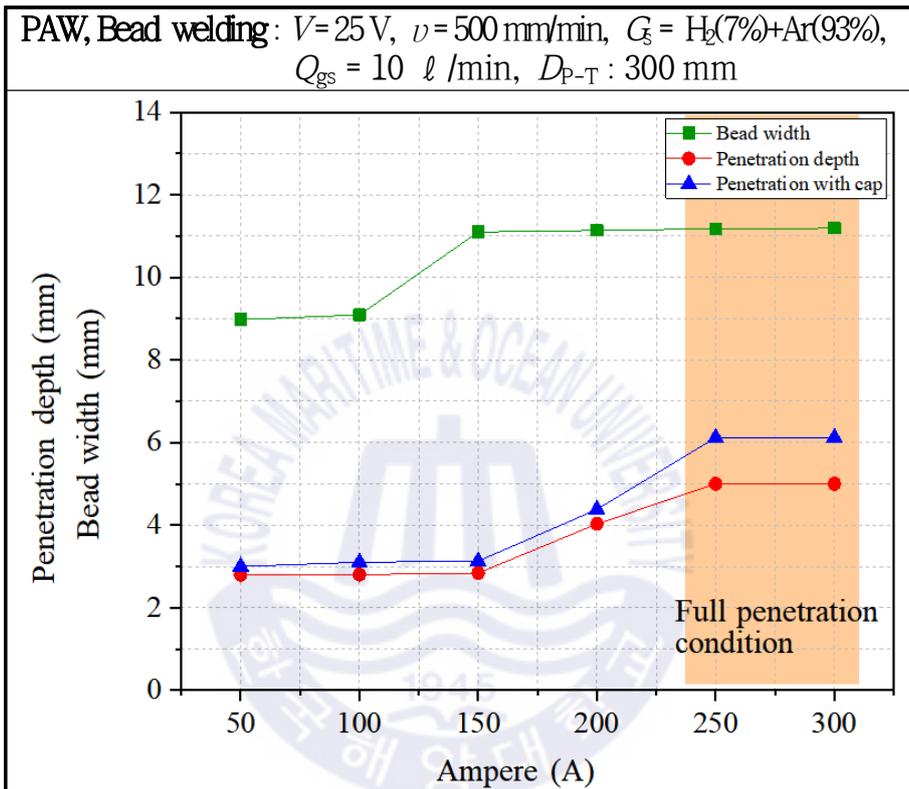


Fig. 4.4 Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with ampere

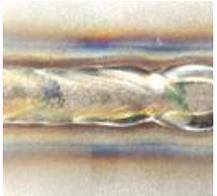
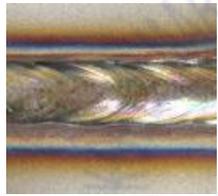
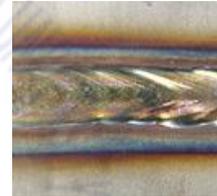
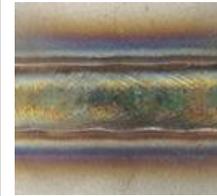
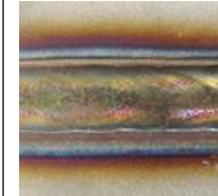
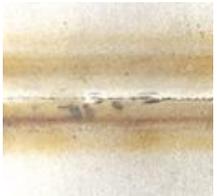
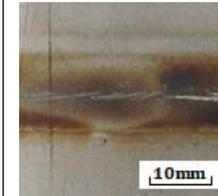
PAW, Bead welding : $I = 200 \text{ A}$ , $v = 500 \text{ mm/min}$ , $G_s = \text{H}_2(7\%)+\text{Ar}(93\%)$ , $Q_{gs} = 10 \text{ l/min}$ , $D_{p-T} : 300 \text{ mm}$							
Bead	V(V)	20	25	27	30	33	35
Front bead							
Back bead							
Cross section							

Fig. 4.5 Photographs of bead appearance and cross section with voltage

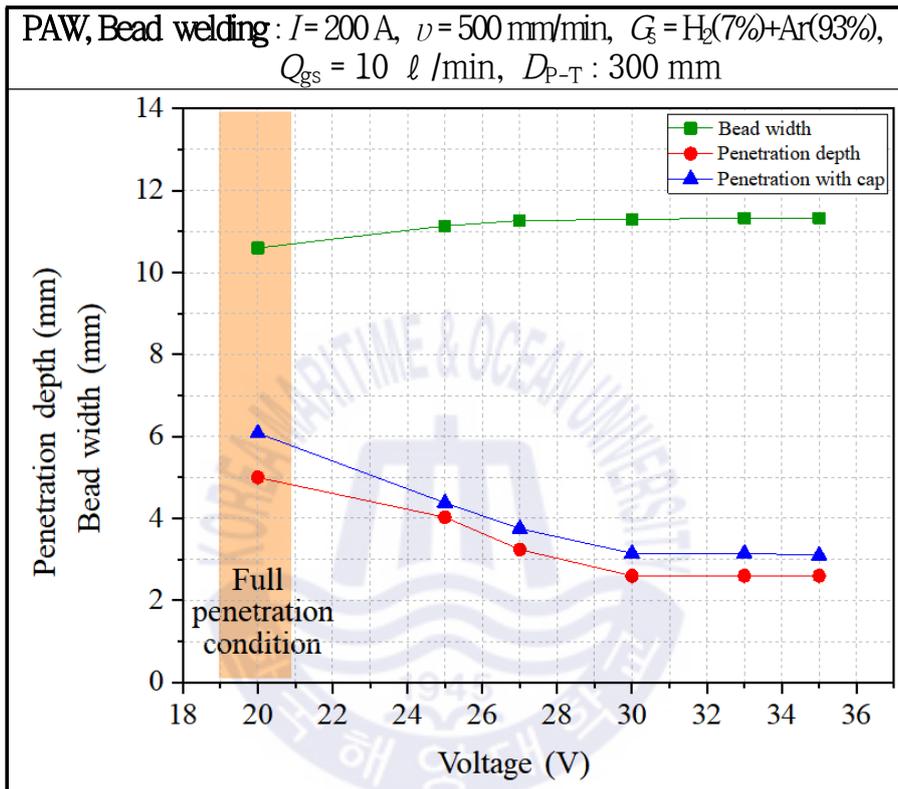


Fig. 4.6 Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with voltage

## 4.2.2 용접 속도의 영향

용접 속도는 용접전류, 전압과 함께 용접부의 입열량, 열영향부의 범위 및 냉각속도 등에 영향을 주는 변수이다. 본 항에서는 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접 시, 용접 속도가 미치는 영향을 알아보기 위해 실험을 진행하였다. 먼저 용접 속도 변화에 따른 영향을 알아보기 위해, PAW의 용접 속도( $v$ )는 300 mm/min, 400 mm/min, 500 mm/min, 600 mm/min, 700 mm/min, 800 mm/min로 변화를 주었으며, 전류( $I$ )는 200 A, 전압( $V$ )은 25 V, 보호가스 종류( $G_s$ )는 H<sub>2</sub>(7%)+Ar(93%), 보호가스 유량( $Q_{gs}$ )은 10 l/min, PAW와 TIG 열원 간 거리( $D_{p-T}$ )는 300 mm로 동일하게 설정하였다. PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접 시, PAW 용접 속도의 변화에 따른 영향을 Fig. 4.7 및 Fig. 4.8과 같이 확인할 수 있다. 다른 변수들이 동일한 수치이고, 용접속도를 300 mm/min부터 800 mm/min로 증가시킬 때 재료내의 입열량은 작아지며, 용접비드, 용입 깊이 및 상/하부 cap을 포함한 용입 깊이도 감소하는 경향을 나타냈다. 용접 전류 및 전압 증가 시와는 다르게 용접 속도 증가 시에는 용접 비드 폭 변화를 뚜렷하게 확인할 수 있었다. 또한 용접부 단면 분석을 통해 300 mm/min, 400 mm/min, 500 mm/min 조건에서는 키홀 용접이 확인되었지만, 600 mm/min, 700 mm/min, 800 mm/min 조건으로 용접 속도가 증가되면서, 키홀 용접을 더 이상 확인할 수 없었다. 용접속도가 300 mm/min, 400 mm/min 일 때, 완전 용입이 이루어 졌으며, 그 때의 비드폭은 각각 14.03 mm와 12.5 mm 이다.

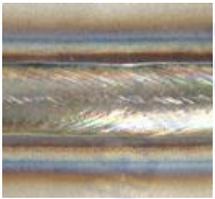
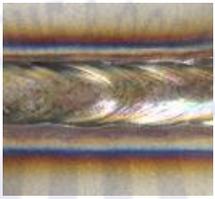
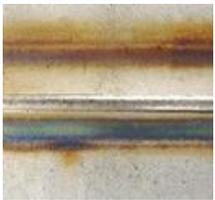
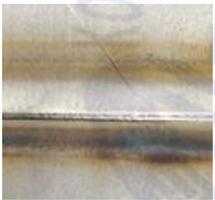
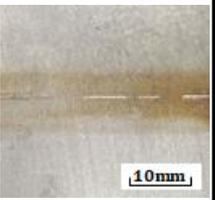
PAW, Bead welding : $I = 200 \text{ A}$ , $V = 25 \text{ V}$ , $G_s = \text{H}_2(7\%)+\text{Ar}(93\%)$ , $Q_{gs} = 10 \text{ l/min}$ , $D_{p-T} = 300 \text{ mm}$						
$v$ (mm/min)	300	400	500	600	700	800
Bead						
Back bead						
Cross section						

Fig. 4.7 Photographs of bead appearance and cross section with welding speed

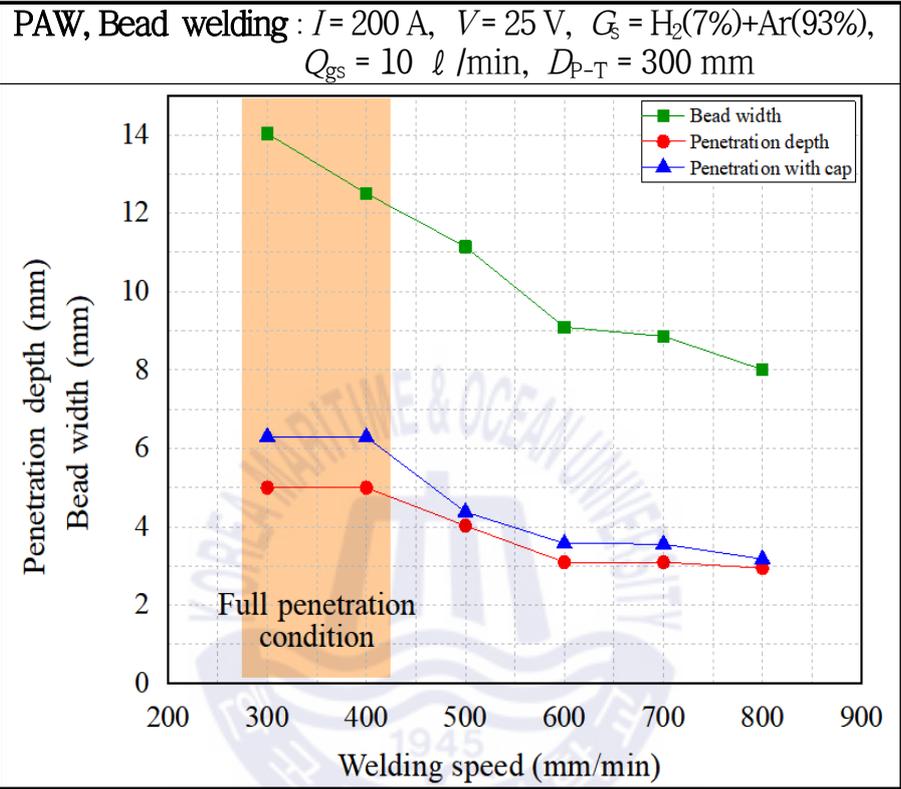


Fig. 4.8 Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with welding speed

### 4.2.3 용접 보호가스의 종류와 유량의 영향

용접 보호가스로는 불활성 가스인 Ar, Ar + H<sub>2</sub>, Ar + He를 일반적으로 사용하고, 용접부의 보호와 스패터 발생 억제 등과 관련되어 있기 때문에 용접 보호가스의 종류와 유량에 대한 검증이 필요하다. 사용하는 전류에 따라 용접 보호가스의 유량을 달리 적용하나, 본 실험에서는 H<sub>2</sub>(7%) + Ar(93%)와 Ar(100%) 2가지의 보호가스를 사용하였고, 유량은 5 ~ 10 l/min 범위를 적용하였다. 먼저 용접 보호가스 종류 변화에 따른 영향을 알아보기 위해, PAW의 용접 보호가스( $G_s$ )는 H<sub>2</sub>(7%) + Ar(93%)와 Ar(100%)로 변화를 주었으며, 전류( $I$ )는 200 A, 전압( $V$ )은 25 V, 용접속도( $v$ )는 500 mm/min, 보호가스 유량( $Q_{gs}$ )은 10 l/min, PAW와 TIG 열원 간 거리( $D_{p-T}$ )는 300 mm로 동일하게 설정하였다. PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접 시, PAW 용접 보호가스 종류의 변화에 따른 영향을 Fig. 4.9 및 Fig. 4.10과 같이 확인할 수 있다. 다른 변수들이 동일한 수치이고, 용접 보호가스를 H<sub>2</sub>(7%) + Ar(93%)와 Ar(100%)로 변화시킬 때 H<sub>2</sub>(7%) + Ar(93%) 조건에서는 비드폭은 11.14 mm, 용입 깊이는 4.03 mm와 상/하부 cap을 포함한 용입 깊이는 4.38 mm로 측정되었으며, Ar(100%) 조건에서의 비드폭(9.64 mm), 용입 깊이(2.95 mm), 상/하부 cap을 포함한 용입 깊이(3.3 mm) 측정치 보다 더 넓고 더 깊었다. 또한, 용접부 전면 및 단면부 확인 결과, 전면에서는 H<sub>2</sub>(7%) + Ar(93%)의 용접 비드가 더 균일하게 나왔으며, 단면부에서는 H<sub>2</sub>(7%) + Ar(93%)의 경우 PAW 영역에서 키홀 용접을 나타냈지만, Ar(100%)의 경우 PAW에서 키홀 영역이 생성되지 않았다. 이러한 용접 특성의 차이는 산화나 질화 방지만을 그 목적으로 하는 아르곤 가스에 비해 수소를 혼합한 보호가스를 사용함으로써 용접 시에 발생하는 수소 원자의 결합에너지에 의해서 더욱 큰 입열량을 얻을 수 있기 때문으로 사료된다.

다음으로 용접 보호가스 유량 변화에 따른 영향을 알아보기 위해 PAW의 유량( $Q_{gs}$ )을 5 l/min, 6 l/min, 7 l/min, 8 l/min, 9 l/min 및 10 l/min 조건으로 변화를 주었으며, 전류( $I$ )는 200 A, 전압( $V$ )은 25 V, 용접속도( $v$ )는 500 mm/min, 보호가스 종류( $G_s$ )는 H<sub>2</sub>(7%) + Ar(93%), PAW와 TIG 열원 간 거리( $D_{p-T}$ )는 300 mm로 동일하게 설정하였다. PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접 시, PAW 용접 보

호가스 유량 변화에 따른 영향을 Fig. 4.11 및 Fig. 4.12와 같이 확인할 수 있다. 다른 변수들이 동일한 수치이고, 용접 보호가스 유량을 5 l/min부터 10 l/min 조건으로 증가시킬 때 전면 비드폭의 증감, 용입 깊이 및 상/하부 cap을 포함한 용입 깊이 변화에 크게 영향을 미치지 않았다. 또한 용접부 단면 분석을 통해 5 l/min, 6 l/min 및 10 l/min 조건에서는 PAW 영역의 키홀 용접이 확인되었지만, 경향을 나타내는 유의미한 결과는 아니었다. 결과적으로 보호가스의 변화 가능한 유량범위가 매우 한정적이었기 때문에 대부분의 경우에 큰 영향을 미치지 않았다.



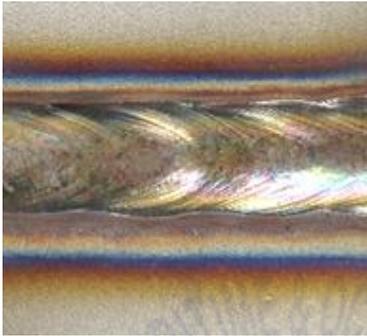
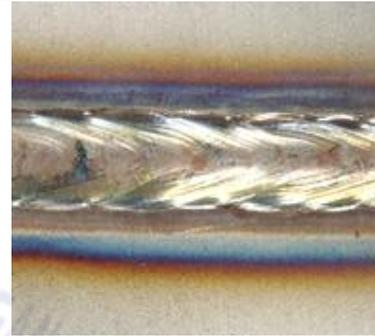
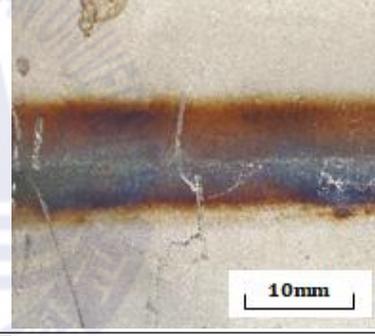
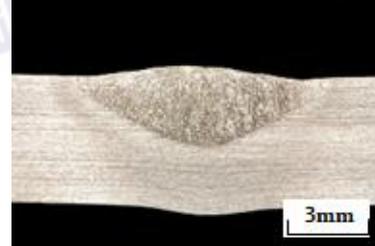
PAW, Bead welding : $I = 200 \text{ A}$ , $V = 25 \text{ V}$ , $v = 500 \text{ mm/min}$ , $Q_{\text{gs}} = 10 \text{ l/min}$ , $D_{\text{p-T}} = 300 \text{ mm}$		
Bead $G_s$	$\text{H}_2(7\%)+\text{Ar}(93\%)$	$\text{Ar}(100\%)$
Front bead		
Back bead		
Cross section		

Fig. 4.9 Photographs of bead appearance and cross section with shield gas

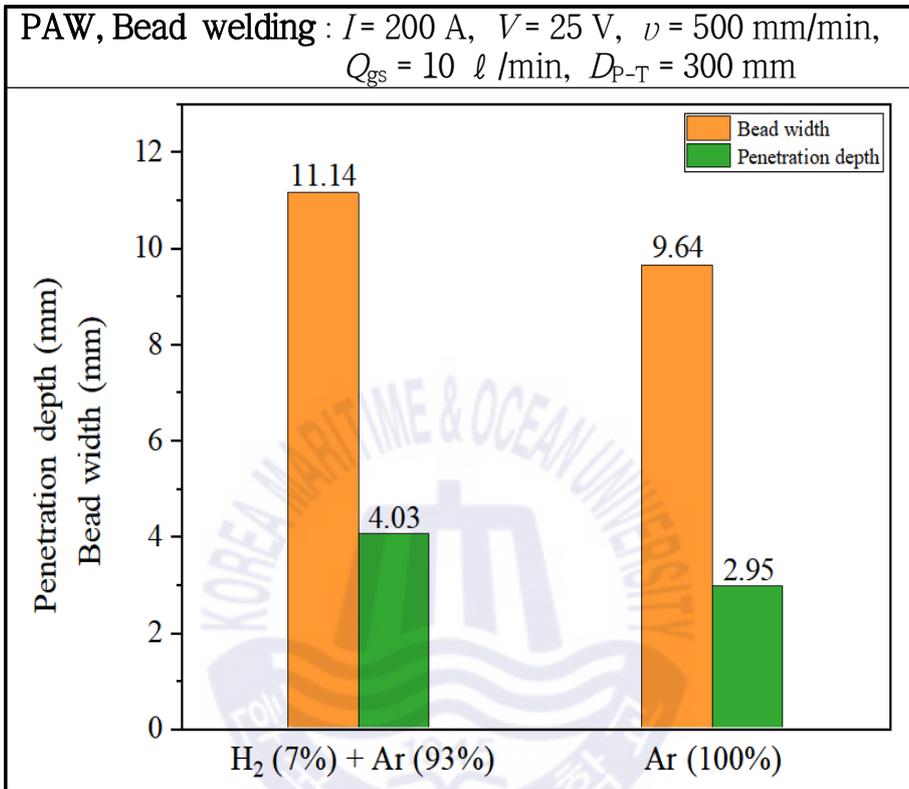


Fig. 4.10 Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with shield gas

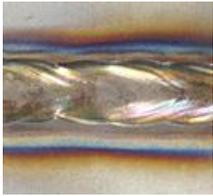
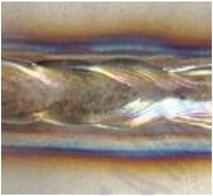
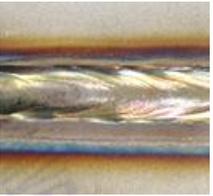
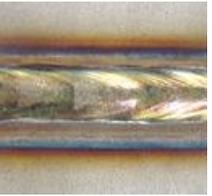
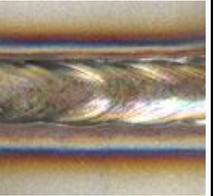
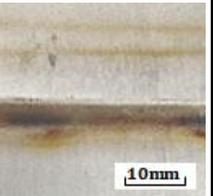
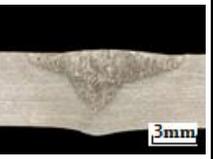
PAW, Bead welding : $I = 200 \text{ A}$ , $V = 25 \text{ V}$ , $v = 500 \text{ mm/min}$ , $G_s = \text{H}_2(7\%)+\text{Ar}(93\%)$ , $D_{p-T} = 300 \text{ mm}$						
$Q_{gs} (\text{l/min})$	5	6	7	8	9	10
Bead						
Front bead						
Back bead						
Cross section						

Fig. 4.11 Photographs of bead appearance and cross section with shield gas flow rate

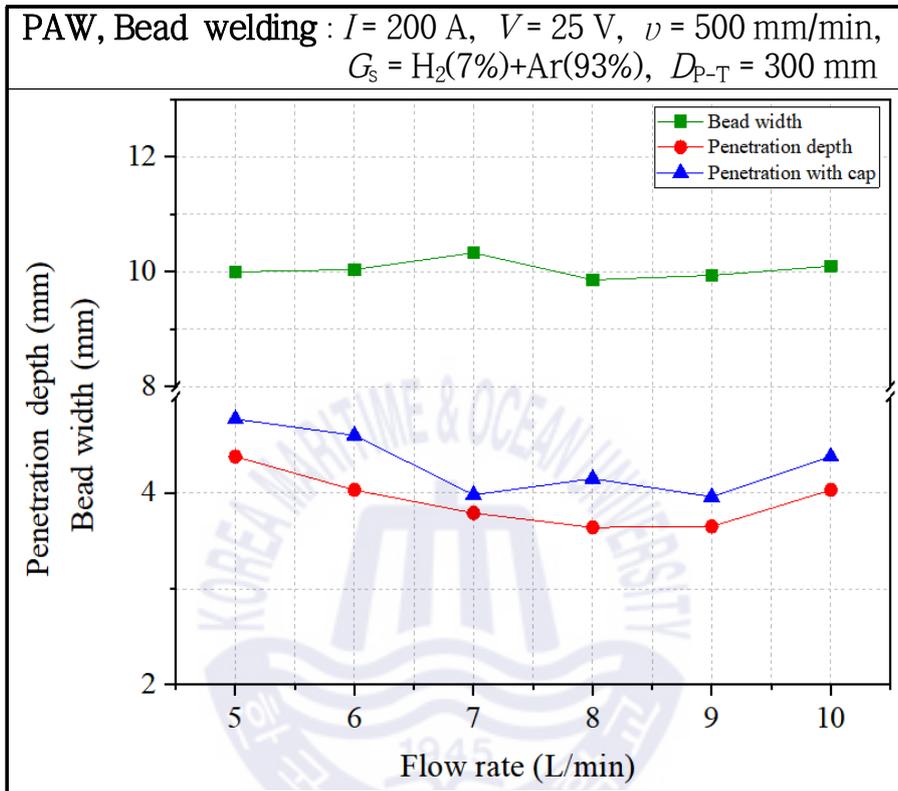


Fig. 4.12 Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with shield gas flow rate

#### 4.2.4 PAW-TIG 두 용접열원 간의 거리에 따른 영향

기존의 하이브리드 용접(ex. 레이저용접 + MIG용접)과는 다른 새로운 하이브리드 텐덤 용접시스템을 적용하는 실험으로 자동 용접을 위해 PAW 용접 장치와 TIG 용접 장치 간의 거리 설정이 변수로 적용되었다. 본 항에서는 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접 시, PAW-TIG 두 용접열원 간 거리가 미치는 영향을 알아보기 위해 실험을 진행하였다. 두 용접열원 간 거리는 선행 열원인 PAW의 전극봉과 후행 열원인 TIG 전극봉 사이의 거리를 의미한다. 먼저 용접열원 간 거리 변화에 따른 영향을 알아보기 위해, PAW와 TIG 열원 간 거리( $D_{P-T}$ )는 300 mm, 320 mm, 340 mm, 360 mm, 380 mm 및 400 mm 조건으로 변화를 주었으며, 전류( $I$ )는 200 A, 전압( $V$ )은 25 V, 용접 속도( $v$ )는 500 mm/min, 보호가스 종류( $G_s$ )는  $H_2(7\%) + Ar(93\%)$ , 보호가스 유량( $Q_{gs}$ )은 10 l/min 동일하게 설정하였다. PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접 시, PAW와 TIG 용접열원 간 거리의 변화에 따른 영향을 Fig. 4.13 및 Fig. 4.14와 같이 확인할 수 있다. 다른 변수들이 동일한 수치이고, PAW와 TIG 열원 간 거리를 300 mm 부터 400 mm로 증가시킬 때 전면 비드폭의 증감, 용입 깊이 및 상/하부 cap을 포함한 용입 깊이 변화에 크게 영향을 미치지 않았다. 또한 용접부 단면 분석을 통해 모든 거리 조건에서 PAW 영역의 키홀 용접이 확인되었지만, 경향을 나타내는 유의미한 결과는 아니었다. 이론적으로는 선행 열원에 의한 용융풀이 응고되기 전에 후행 열원이 동반되어 용접효율을 증가시켜야 하지만, 현실적으로는 자동 용접 장치의 설치 시 상호 간섭 문제로 인해 최소 거리를 유지 하였고, 최소 거리인 300 mm 조건과 최대 거리인 400 mm 조건에서 비슷하게 나온 용접결과를 통해 후행 용접 열원인 TIG가 선행 용접 열원의 용융부에 영향을 주기 전에 PAW 용융부가 이미 어느 정도 응고가 진행된 상태임을 알 수 있다.

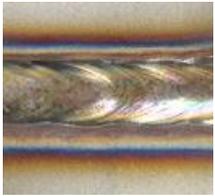
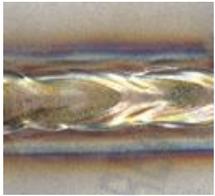
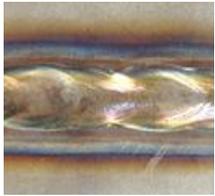
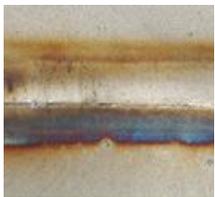
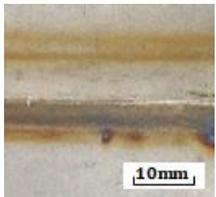
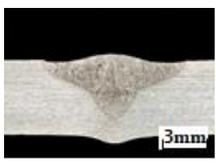
PAW, Bead welding : $I = 200 \text{ A}$ , $V = 25 \text{ V}$ , $\nu = 500 \text{ mm/min}$ , $G_s = \text{H}_2(7\%)+\text{Ar}(93\%)$ , $Q_{gs} = 10 \text{ l/min}$						
$D_{p-T}(\text{mm})$ Bead	300	320	340	360	380	400
Front bead						
Back bead						
Cross section						

Fig. 4.13 Photographs of bead appearance and cross section with distance between PAW and TIG

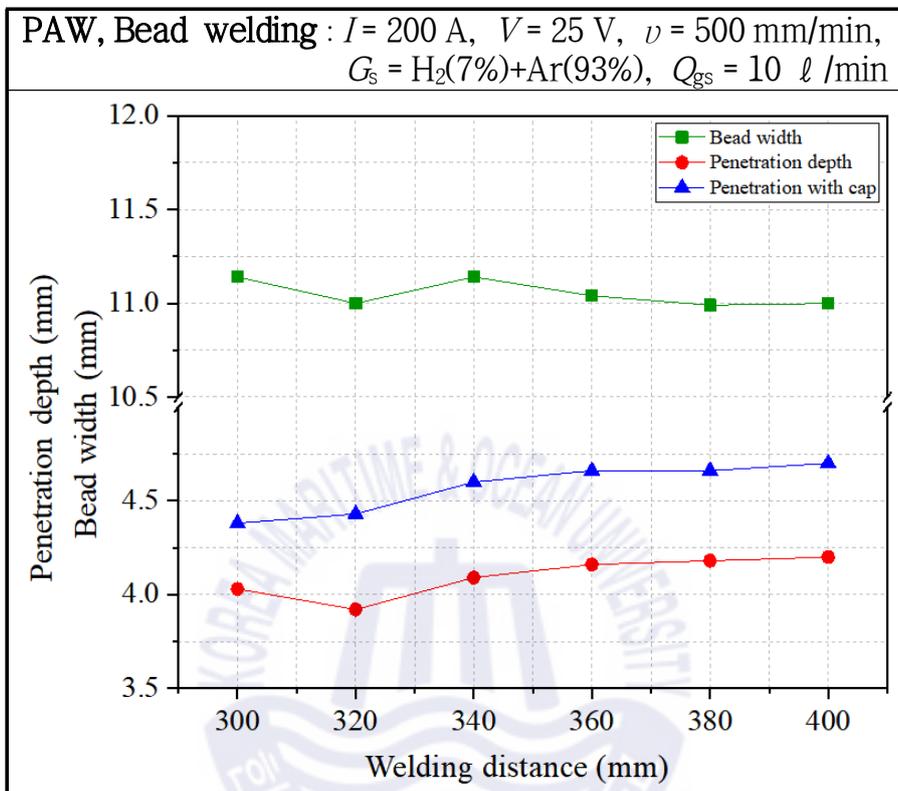


Fig. 4.14 Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with distance between PAW and TIG

## 4.3 SDSS의 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접 조건별 맞대기용접 특성

### 4.3.1 용접 전류 및 전압의 영향

앞선 SDSS의 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 비드용접을 통해 PAW 용접의 최적 조건(전류( $I$ )는 250 A, 전압( $V$ )은 25 V, 용접속도( $v$ )는 500 mm/min, 보호가스 종류( $G_s$ )는 H<sub>2</sub>(7%) + Ar(93%), 보호가스 유량( $Q_{gs}$ )은 10 l/min, PAW와 TIG 열원 간 거리( $D_{p-T}$ )는 300 mm)을 도출하였고, 본 항에서는 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 맞대기용접 시, 전류와 전압 조건이 미치는 영향을 알아보기 위해 실험을 진행하였다. 먼저 전류 변화에 따른 영향을 알아보기 위해, PAW의 전류( $I$ )는 200 A, 250 A 및 300 A 조건으로 변화를 주었으며, 전압( $V$ )은 25 V, 용접속도( $v$ )는 500 mm/min, 보호가스 종류( $G_s$ )는 H<sub>2</sub>(7%) + Ar(93%), 보호가스 유량( $Q_{gs}$ )은 10 l/min, PAW와 TIG 열원 간 거리( $D_{p-T}$ )는 300 mm로 동일하게 설정하였다. PAW-TIG 하이브리드 텐덤 맞대기용접 시, PAW 전류의 변화에 따른 영향을 Fig. 4.15 및 Fig. 4.16과 같이 확인할 수 있다. 다른 변수들이 동일한 수치이고, 전류를 200 A부터 300 A로 증가시킬 때 입열량도 함께 커지며, 전면 비드폭, 용입 깊이 및 상/하부 cap을 포함한 용입 깊이도 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 용접부 단면 분석을 통해 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 맞대기용접 시 PAW 전류가 200 A, 250 A 및 300 A 조건일 때 모두 키홀 용접과 함께 완전 용입이 진행되고, 안정적인 비드가 형성되었지만, 입열량을 최소화 하면서 완전 용입의 임계조건 이상인 전류 250 A를 적정 조건으로 선정하였다. 이때의 비드폭은 10.62 mm 이다.

다음으로 맞대기용접에 대한 전압 변화에 따른 영향을 알아보기 위해 PAW의 전압( $V$ )을 20 V, 25 V 및 30 V 조건으로 변화를 주었으며, 전류( $I$ )는 250 A, 용접속도( $v$ )는 500 mm/min, 보호가스 종류( $G_s$ )는 H<sub>2</sub>(7%) + Ar(93%), 보호가스 유량( $Q_{gs}$ )은 10 l/min, PAW와 TIG 열원 간 거리( $D_{p-T}$ )는 300 mm로 동일하게 설정하였다. PAW-TIG 하이브리드 텐덤 맞대기용접 시, PAW 전압의 변화에 따른 영향을 Fig. 4.17 및 Fig. 4.18과 같이 확인할 수 있다. 다른 변수들이 동일한 수치이고, 전압을 20V부터 30V로 증가시킬 때 전류 증가와는 반대로 전면 비드폭,

용입 깊이 및 상/하부 cap을 포함한 용입 깊이가 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 용접부 단면 분석을 통해 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 맞대기용접 시 PAW 전압이 20 V, 25 V 및 30 V 조건일 때 모두 키홀 용접과 함께 완전 용입이 진행되었지만, 전압이 상대적으로 낮은 20 V에서는 모재와 전극봉 사이의 거리가 짧아져서 과용입의 비드 형상을 나타내고 있으며, 전압이 높은 30 V에서는 적은 용입으로 인해 플라즈마 용접 폭이 좁은 특성을 나타낸다. 따라서 완전 용입의 임계조건 이하인 25 V를 적정 용접 전압으로 선정하였고, 그때의 비드폭은 10.4 mm 이다.



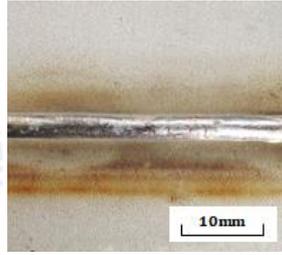
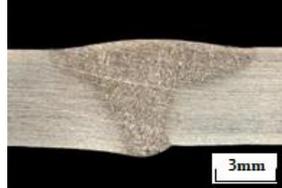
PAW, Buttt welding : $V = 25 \text{ V}$ , $v = 500 \text{ mm/min}$ , $G_s = \text{H}_2(7\%)+\text{Ar}(93\%)$ , $Q_{gs} = 10 \text{ l/min}$ , $D_{p-T} : 300 \text{ mm}$			
$I \text{ (A)}$ Bead	200	250	300
Front bead			
Back bead			
Cross section			

Fig. 4.15 Photographs of bead appearance and cross section with ampere

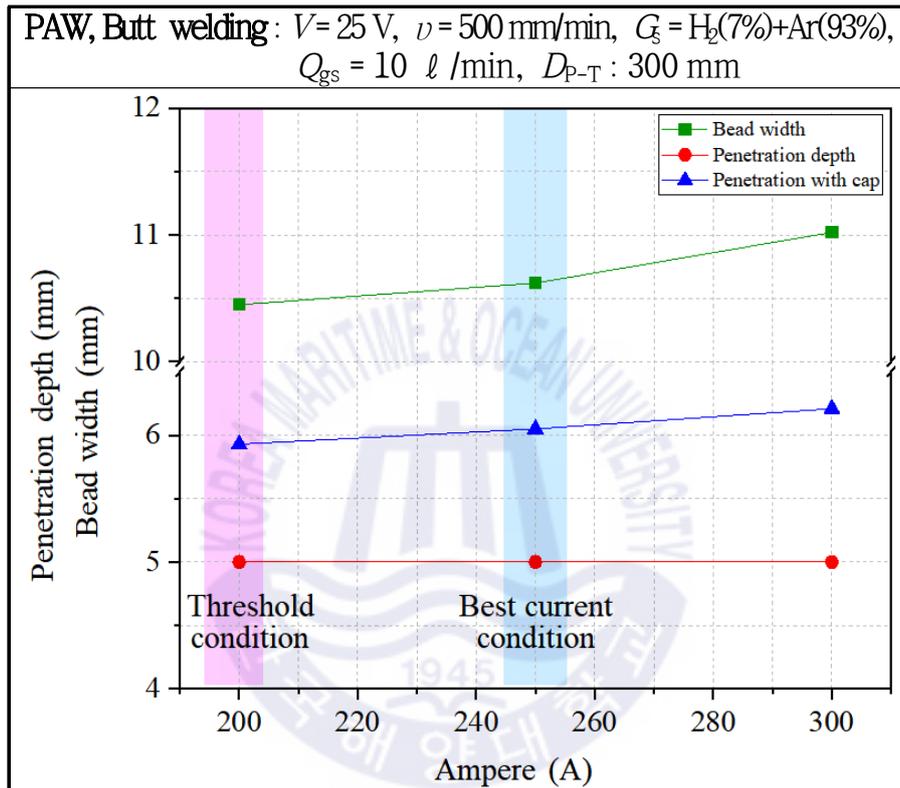


Fig. 4.16 Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with ampere

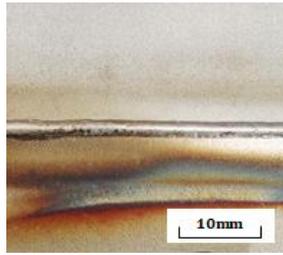
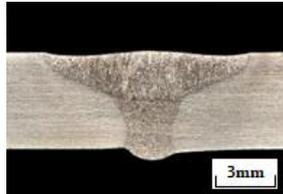
PAW, Buttt welding : $I = 250$ A, $v = 500$ mm/min, $G_s = \text{H}_2(7\%)+\text{Ar}(93\%)$ , $Q_{gs} = 10$ l /min, $D_{P-T} : 300$ mm			
V(V) Bead	20	25	30
Front bead			
Back bead			
Cross section			

Fig. 4.17 Photographs of bead appearance and cross section with voltage

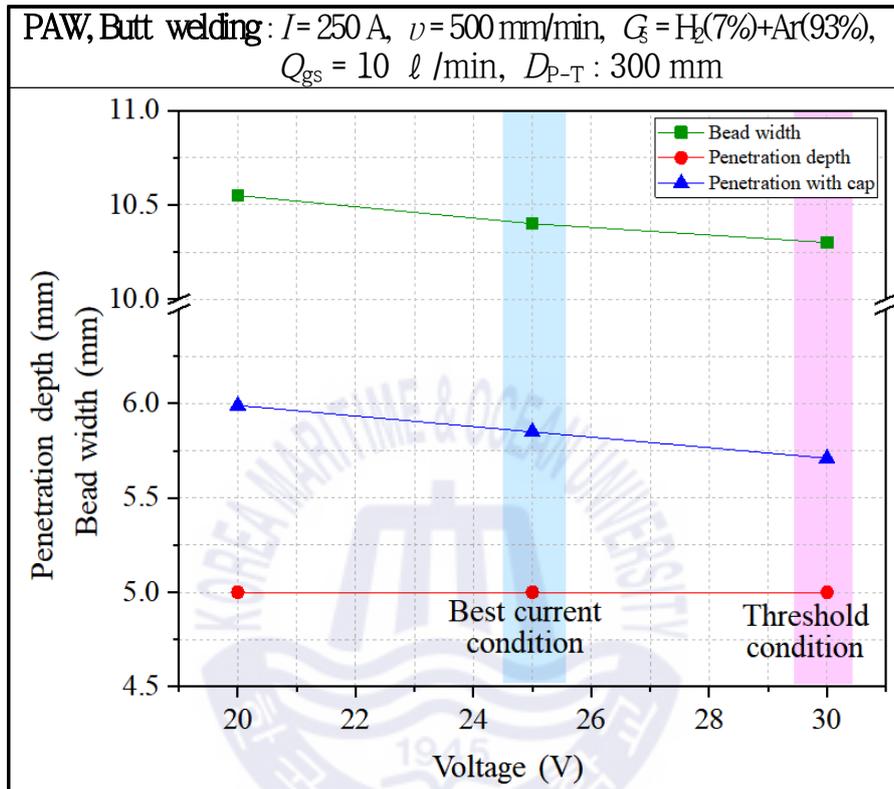


Fig. 4.18 Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with voltage

### 4.3.2 용접 속도의 영향

본 항에서는 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 PAW-TIG 하이브리드 텀덤 맞대기 용접 시, 용접 속도가 미치는 영향을 알아보기 위해 실험을 진행하였다. 먼저 용접 속도 변화에 따른 영향을 알아보기 위해, PAW의 용접 속도( $v$ )는 450 mm/min, 500 mm/min 및 550 mm/min 조건으로 변화를 주었으며, 전류( $I$ )는 250 A, 전압( $V$ )은 25 V, 보호가스 종류( $G_s$ )는  $H_2(7\%) + Ar(93\%)$ , 보호가스 유량( $Q_{gs}$ )은 10 l/min, PAW와 TIG 열원 간 거리( $D_{p-T}$ )는 300 mm로 동일하게 설정하였다. PAW-TIG 하이브리드 텀덤 맞대기 용접 시, PAW 용접 속도의 변화에 따른 영향을 Fig. 4.19 및 Fig. 4.20과 같이 확인할 수 있다. 다른 변수들이 동일한 수치이고, 용접속도를 450 mm/min부터 550 mm/min로 증가시킬 때 입열량은 작아지며, 용접비드, 용입 깊이 및 상/하부 cap을 포함한 용입 깊이도 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 용접부 단면 분석을 통해 PAW-TIG 하이브리드 텀덤 맞대기 용접 시 PAW 전압이 450 mm/min, 500 mm/min 및 550 mm/min 조건일 때 모두 키텔 용접과 함께 완전 용입이 진행 되었으나, 용접 속도가 450 mm/min의 조건에서는 과입열로 인해 비드폭이 매우 넓었으며, 550 mm/min 조건에서는 빠른 용접속도로 인해 언더필이 발생하였다. 따라서 PAW-TIG 하이브리드 텀덤 맞대기 용접시의 적정 용접 속도를 500 mm/min로 선정하였으며, 측정된 비드폭은 10.73 mm 이다.

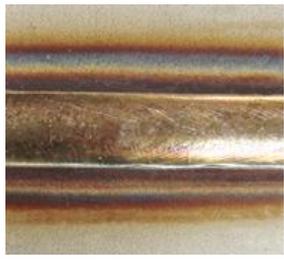
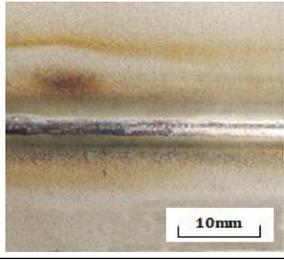
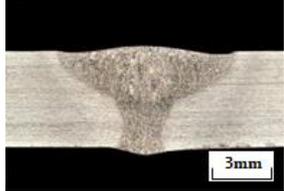
PAW, Butt welding : $I = 250$ A, $V = 25$ V, $G_s = \text{H}_2(7\%)+\text{Ar}(93\%)$ , $Q_{gs} = 10$ l /min, $D_{P-T} = 300$ mm			
$v$ (mm/min) Bead	450	500	550
Front bead			
Back bead			
Cross section			

Fig. 4.19 Photographs of bead appearance and cross section with welding speed

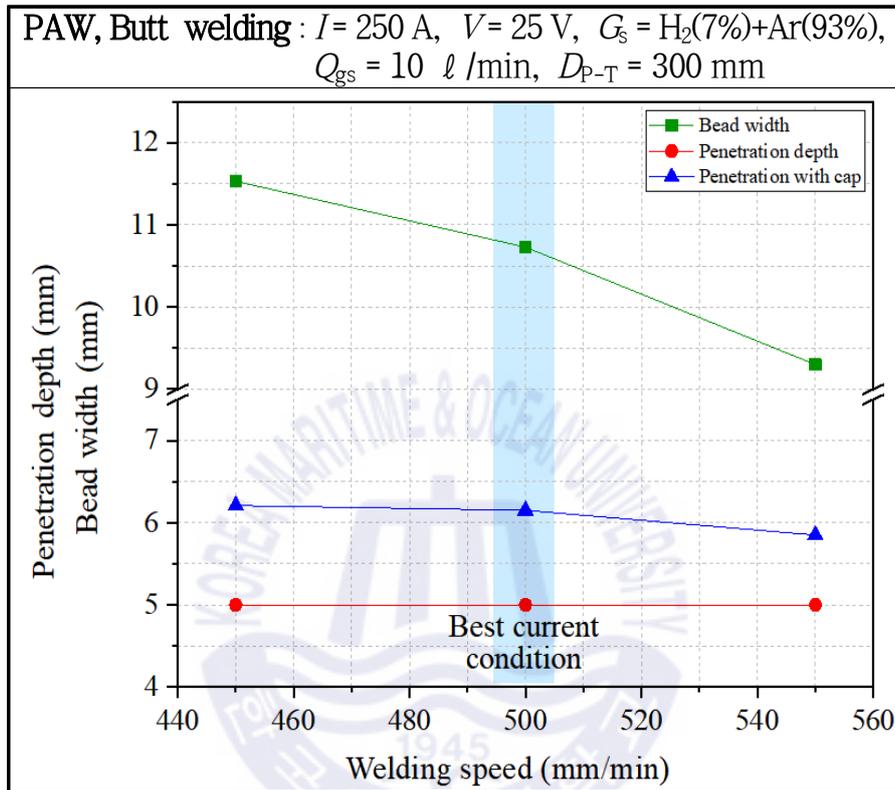


Fig. 4.20 Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with welding speed

### 4.3.3 PAW-TIG 두 용접열원 간의 거리에 따른 영향

본 항에서는 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 맞대기용접 시, PAW-TIG 두 용접열원 간 거리가 미치는 영향을 알아보기 위해 실험을 진행하였다. 먼저 용접열원 간 거리 변화에 따른 영향을 알아보기 위해, PAW와 TIG 열원 간 거리( $D_{p-T}$ )는 250 mm, 300 mm 및 350 mm 조건으로 변화를 주었으며, 전류( $I$ )는 250 A, 전압( $V$ )은 25 V, 용접 속도( $v$ )는 500 mm/min, 보호가스 종류( $G_s$ )는  $H_2(7\%) + Ar(93\%)$ , 보호가스 유량( $Q_{gs}$ )은 10 l/min으로 동일하게 설정하였다. PAW-TIG 하이브리드 텐덤 맞대기용접 시, PAW와 TIG 용접열원 간 거리의 변화에 따른 영향을 Fig. 4.21 및 Fig. 4.22와 같이 확인할 수 있다. 다른 변수들이 동일한 수치이고, PAW와 TIG 열원 간 거리를 250 mm 부터 350 mm로 증가시킬 때 전면 비드폭의 증감, 용입 깊이 및 상/하부 cap을 포함한 용입 깊이 변화에 크게 영향을 미치지 않았다. 또한 용접부 단면 분석을 통해 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 맞대기용접 시 열원 간 거리가 250 mm, 300 mm 및 350 mm 조건일 때 모두 기홀 용접과 함께 완전 용입이 진행 되었다. 비드용접 시와 동일하게 자동 용접 장치의 설치 시 상호 간섭 문제로 인해 최소 거리를 유지 하였고, 최소 거리인 250 mm 조건과 최대 거리인 350 mm 조건에서 비슷하게 나온 용접결과를 통해 후행 용접 열원인 TIG가 선행 용접 열원의 용융부에 영향을 주기 전에 PAW 용융부가 이미 어느 정도 응고가 진행된 상태임을 알 수 있다.

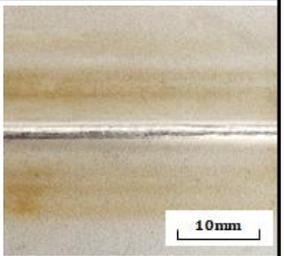
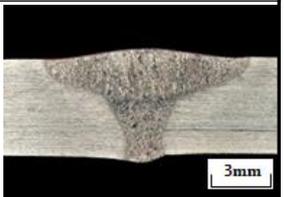
PAW, Buttt welding : $I = 250 \text{ A}$ , $V = 25 \text{ V}$ , $v = 500 \text{ mm/min}$ , $G_s = \text{H}_2(7\%)+\text{Ar}(93\%)$ , $Q_{gs} = 10 \text{ l/min}$			
$D_{P-T}$ (mm) Bead	250	300	350
Front bead			
Back bead			
Cross section			

Fig. 4.21 Photographs of bead appearance and cross section with distance between PAW and TIG

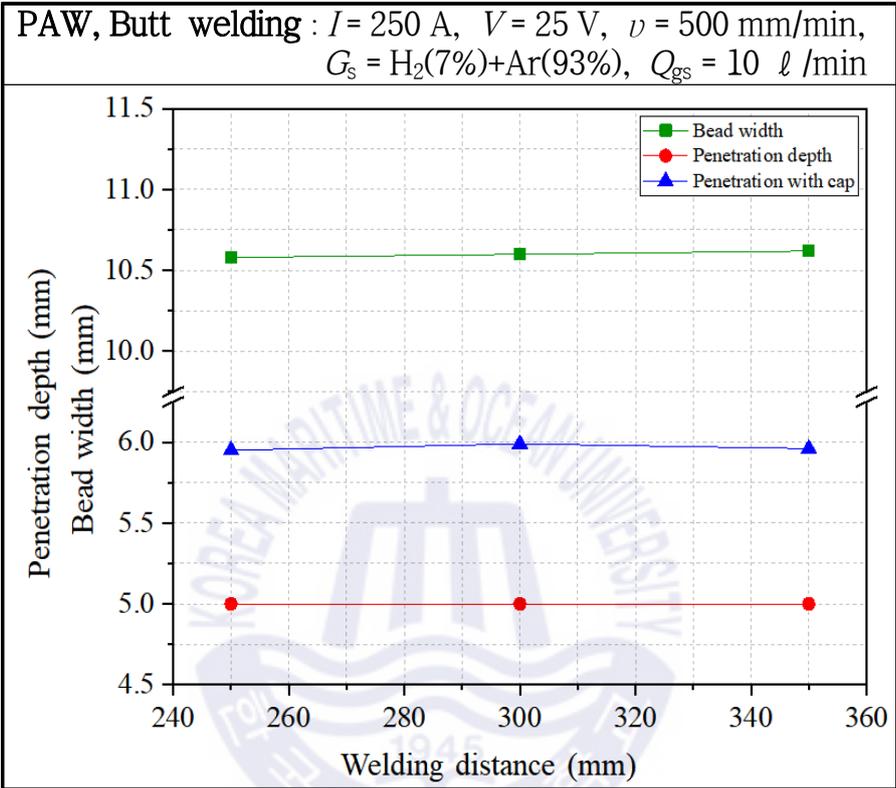


Fig. 4.22 Variation of bead width, penetration with cap, penetration depth with distance between PAW and TIG

## 4.4 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 맞대기용접부 고용화 열처리의 영향

### 4.4.1 기계적 특성 비교

비드용접을 통해 식별된 PAW 최적 용접 조건을 적용하여 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 맞대기용접 시편을 2개 제작한 후 1개의 시편은 1,050 °C 온도 조건에서 30 min 동안 고용화열처리를 실시하였다. 열처리 전/후의 각 시편을 사용하여 기계적 특성에 미치는 열처리 영향을 확인하기 위해 경도시험, 인장시험 및 굽힘시험을 실시하였다.

#### (1) 경도분포

5 mm 두께의 슈퍼듀플렉스 스테인리스강 시편에 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 맞대기용접을 적용하여 경도시험을 위한 시험편을 준비하였다. 경도시험 시, 시험편의 폭 방향의 경우, 모재 상부 표면 1mm 아래와 모재 하부 표면 1mm 위에서, 시험편의 길이 방향의 경우, 비드 상부 TIG 영역부터 비드 하부 PAW 영역까지 500 µm 간격으로 측정되었고, 하중 100g, 유지시간은 10초로 경도시험 조건을 설정하였다. Fig. 4.23은 비열처리 시험편에 대한 경도 분포이며, Fig. 4.24는 고용화 열처리를 실시한 시험편에 대한 경도 분포는 나타낸다.

먼저, Fig. 4.23과 같이 비열처리 시험편에 대한 경도 분포를 확인해보면, TIG 영역의 길이 방향 경도분포의 경우, base metal에서 최대 296 Hv, 최소 275 Hv, 평균 285 Hv의 경도값을 가지고, weld metal에서는 최대 313 Hv, 최소 281 Hv, 평균 293 Hv의 경도값을 가진다. Weld metal 영역에서의 경도값이 base metal 영역에서의 경도값 보다 다소 높게 나타나는 경향이 있고, UNS S32750 재료 규격의 합격기준 (max. 327 Hv)을 모두 만족한다. PAW 영역의 길이 방향 경도 분포의 경우, base metal에서 최대 302 Hv, 최소 260 Hv, 평균 285 Hv의 경도값을 가지고, weld metal에서는 최대 309 Hv, 최소 284 Hv, 평균 295 Hv의 경도값을 가진다. Weld metal 영역에서의 경도값이 base metal 영역에서의 경도값 보다 다소 높게 나타나는 경향이 있고, UNS S32750 재료 규격의 합격기준 (max. 327 Hv)을 모두 만족한다. TIG 비드 상부부터 PAW 비드 하부까지의 길이 방향

경도분포의 경우, TIG 영역에서 최대 290 Hv, 최소 280 Hv, 평균 286 Hv의 경도값을 가지고, PAW 영역에서는 최대 294 Hv, 최소 281 Hv, 평균 287 Hv의 경도값을 가진다. TIG 영역에서의 경도값과 PAW 영역에서의 경도값에 큰 차이가 없으며, UNS S32750 재료 규격의 합격기준 (max. 327 Hv)을 모두 만족한다.

Fig. 4.24와 같이 고용화 열처리 시험편에 대한 경도 분포를 확인해본 결과, TIG 영역의 길이 방향 경도분포의 경우, base metal에서 최대 288 Hv, 최소 272 Hv, 평균 278 Hv의 경도값을 가지고, weld metal에서는 최대 312 Hv, 최소 279 Hv, 평균 290 Hv의 경도값을 가진다. Weld metal 영역에서의 경도값이 base metal 영역에서의 경도값 보다 다소 높게 나타나는 경향이 있고, UNS S32750 재료 규격의 합격기준 (max. 327 Hv)을 모두 만족한다. PAW 영역의 길이 방향 경도분포의 경우, base metal에서 최대 296 Hv, 최소 271 Hv, 평균 284 Hv의 경도값을 가지고, weld metal에서는 최대 299 Hv, 최소 285 Hv, 평균 290 Hv의 경도값을 가진다. Weld metal 영역에서의 경도값이 base metal 영역에서의 경도값 보다 다소 높게 나타나는 경향이 있고, UNS S32750 재료 규격의 합격기준 (max. 327 Hv)을 모두 만족한다. TIG 비드 상부부터 PAW 비드 하부까지의 길이 방향 경도분포의 경우, TIG 영역에서 최대 290 Hv, 최소 287 Hv, 평균 289 Hv의 경도값을 가지고, PAW 영역에서는 최대 288 Hv, 최소 284 Hv, 평균 287 Hv의 경도값을 가진다. TIG 영역에서의 경도값과 PAW 영역에서의 경도값에 큰 차이가 없으며, UNS S32750 재료 규격의 합격기준 (max. 327 Hv)을 모두 만족한다. 또한 경도분포 평균을 확인 해볼 결과 고용화 열처리 적용여부가 경도의 변화에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

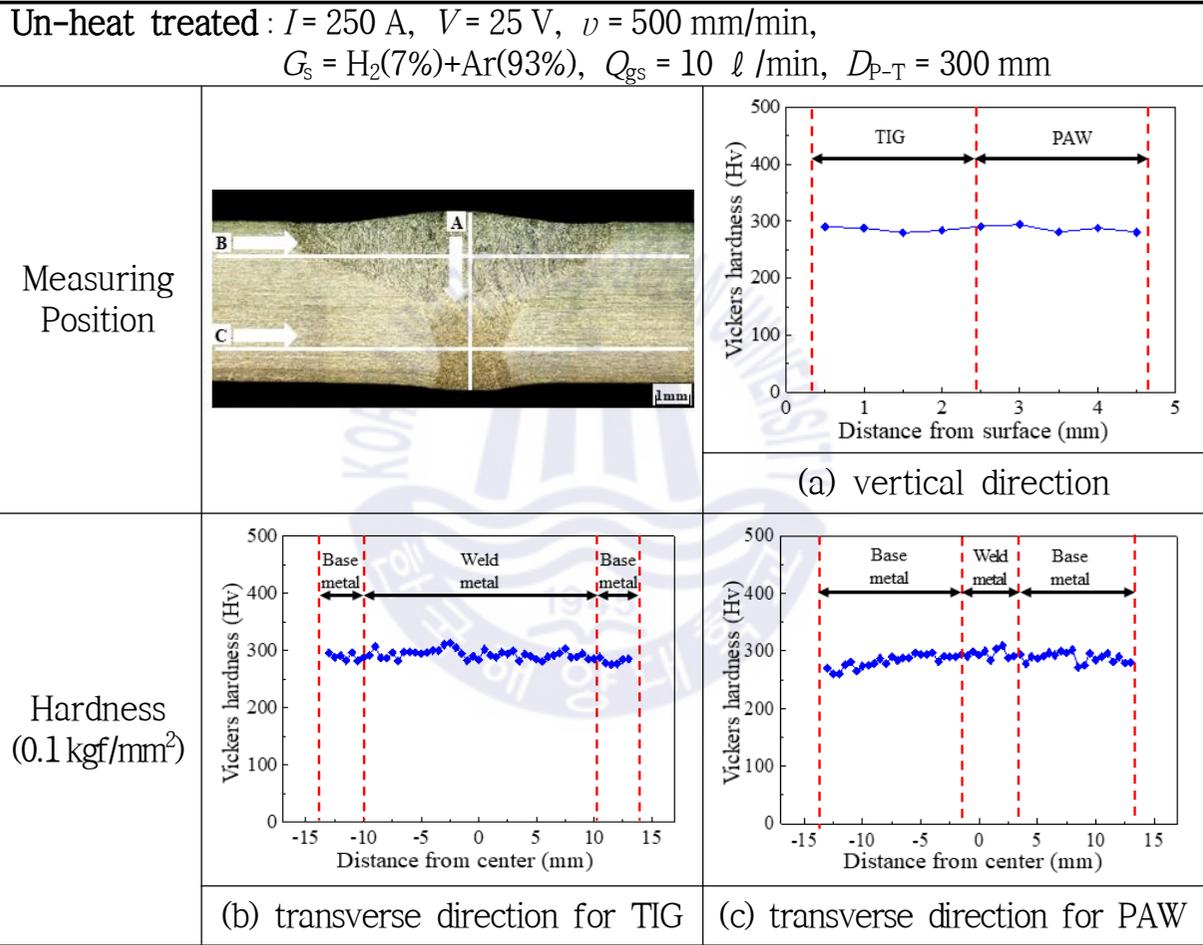


Fig. 4.23 Hardness distribution of un-heat treated specimen

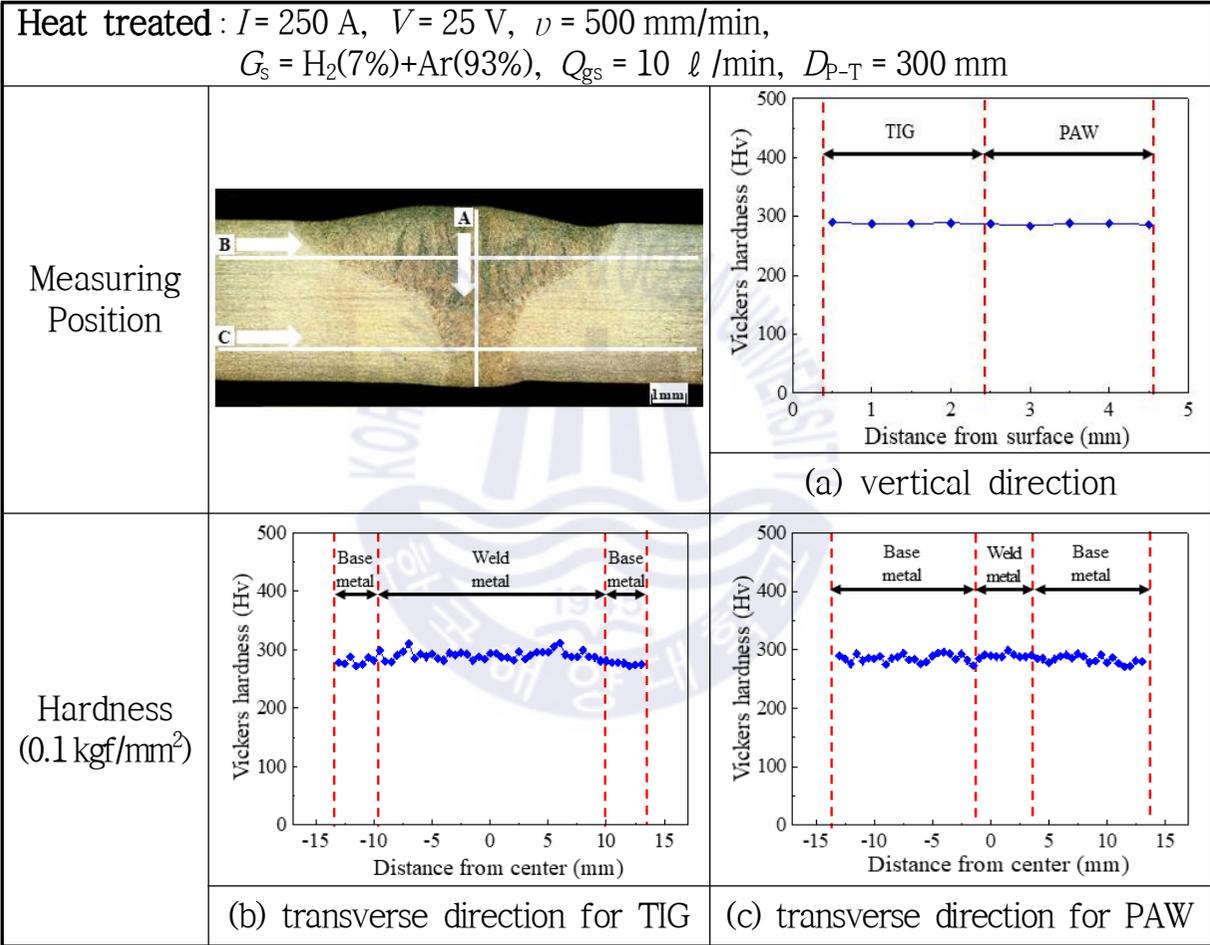


Fig. 4.24 Hardness distribution of heat treated specimen

## (2) 인장시험

유럽연합(EU)의 welded stainless steel tube 규격인 EN 10217-7 (2014)에서 요구하는 바에 따라 room temperature 조건인 EN ISO 6892-1 요건에 적합한 인장 시험 (tensile test)을 실시하였다. 시험의 결과에 대한 편차를 줄이고 정확도 검증을 위해 3 종류의 시험편을 준비하였다.

Fig. 4.25, Fig. 4.26 및 Fig. 4.27은 비열처리 인장시험편 3 종류를 나타내며, 파단부의 단면과 인장시험 그래프를 확인 할 수 있다. 인장시험 결과 시험편1은 870 Mpa, 시험편2는 873 Mpa, 시험편3은 867 Mpa의 인장강도 (tensile strength)를 가지고, 변형길이는 시험편1은 약 15.5 mm, 시험편2는 약 16 mm, 시험편3은 약 15.5 mm으로 각각 측정되었다. 또한 Fig. 4.28 및 Fig. 4.29를 통해 인장시험 파단부 단면을 SEM image로 (x50, x100, x500, x1,000, x2,000) 확인하였다.

Fig. 4.30, Fig. 4.31 및 Fig. 4.32는 고용화 열처리가 적용된 인장시험편 3 종류를 나타내며, 파단부의 단면과 인장시험 그래프를 확인 할 수 있다. 인장시험 결과 시험편1은 848 Mpa, 시험편2는 861 Mpa, 시험편3은 861 Mpa의 인장강도 (tensile strength)를 가지고, 변형길이는 시험편1은 약 17 mm, 시험편2는 약 19 mm, 시험편3은 약 17.5 mm으로 각각 측정되었다. 또한 Fig. 4.33 및 Fig. 4.34를 통해 인장시험 파단부 단면을 SEM image로 (x50, x100, x500, x1,000, x2,000) 확인하였다.

인장시험 결과, 고용화 열처리된 시험편의 인장강도는 비열처리 인장시험편 대비 최소 6 Mpa에서 최대 25 Mpa까지 더 작았으며, 변형길이 기준으로는 고용화 열처리된 시험편이 그렇지 않은 시험편 대비 최소 1 mm에서 최대 3.5 mm까지 더 늘어났다. 이를 통해 고용화 열처리된 인장시험편은 연성의 성질을 띄고, 열처리가 적용되지 않은 시험편은 취성의 성질을 띄는 것을 알 수 있었고, 파단부 단면의 SEM image를 통해 벽개 구조의 취성의 성질을 가지던 재료가 고용화 열처리 이후 덩플 구조의 연성의 성질로 바뀐다는 것을 재확인 할 수 있었다. 또한, UNS S32750 재료의 인장강도 합격기준 (800 ~ 1,000 Mpa)을 모두 만족한다.

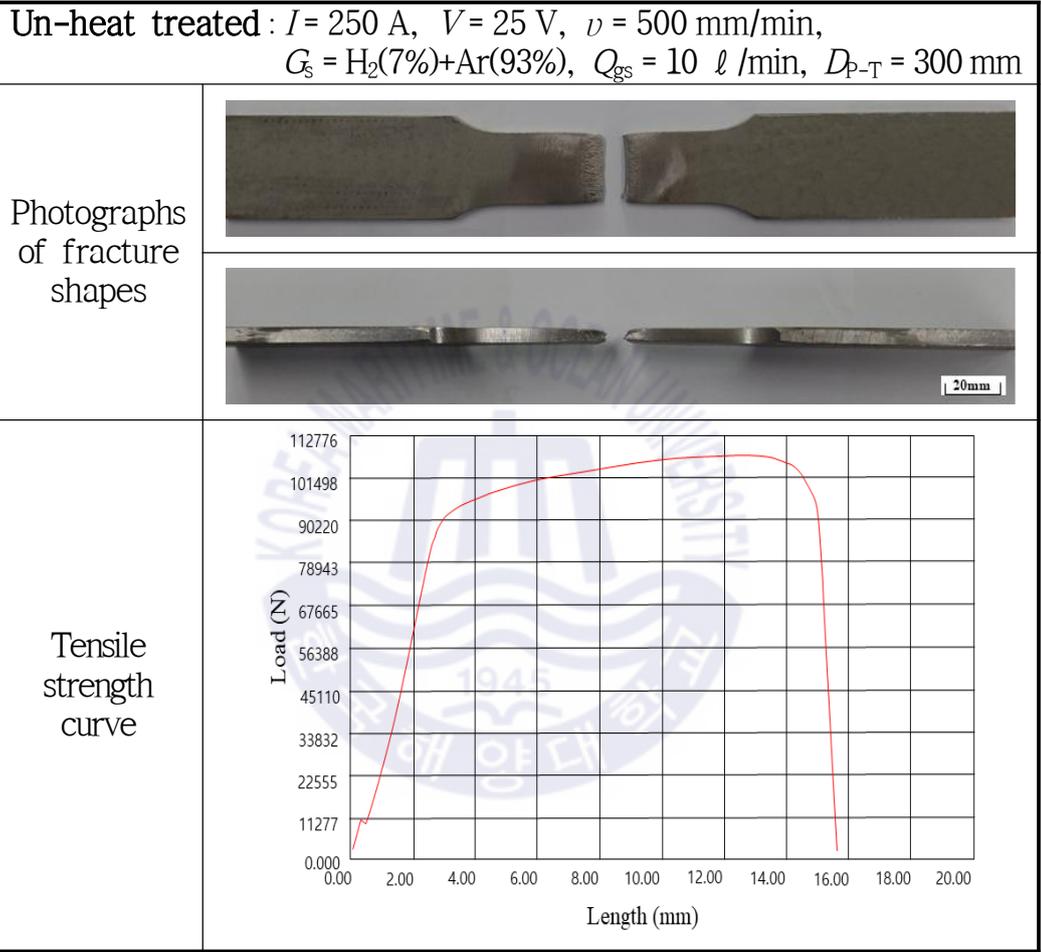


Fig. 4.25 Photographs of fracture shapes and tensile strength curve for un-heat treated specimen 1

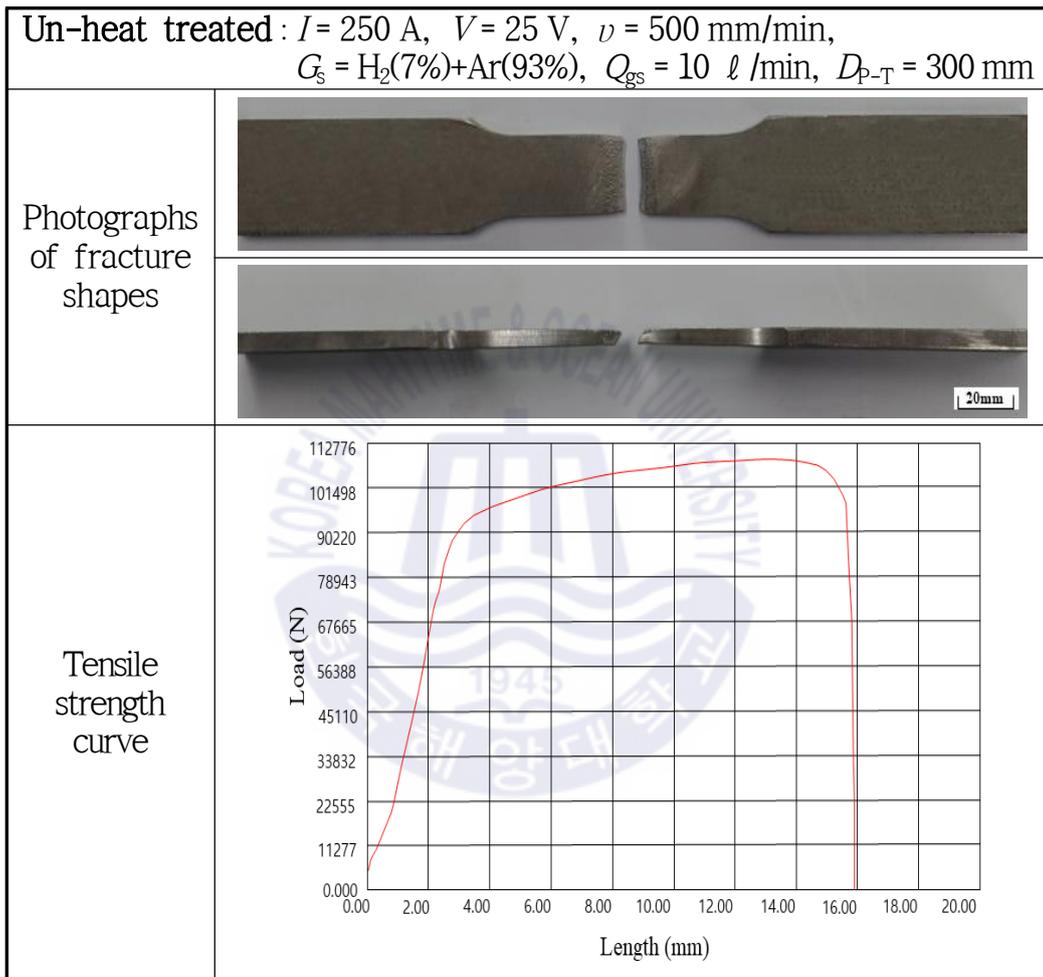


Fig. 4.26 Photographs of fracture shapes and tensile strength curve for un-heat treated specimen 2

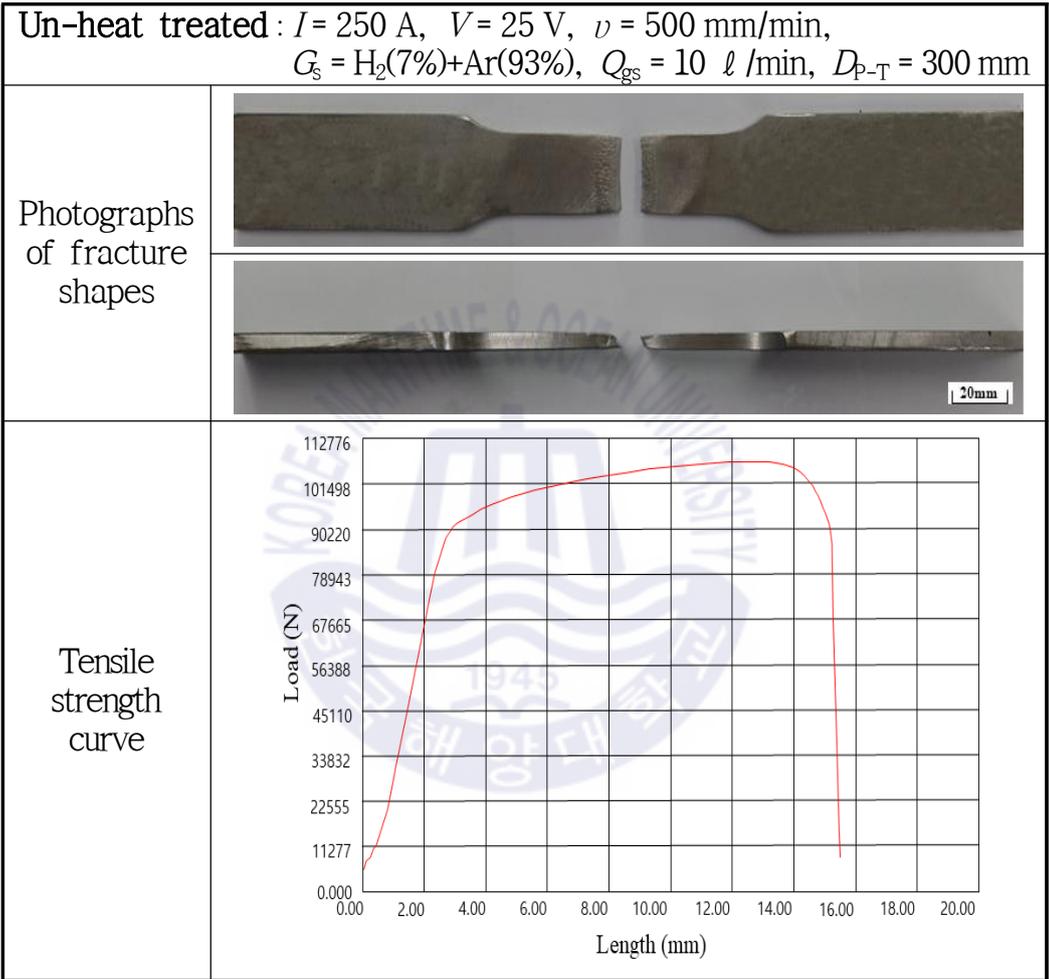


Fig. 4.27 Photographs of fracture shapes and tensile strength curve for un-heat treated specimen 3

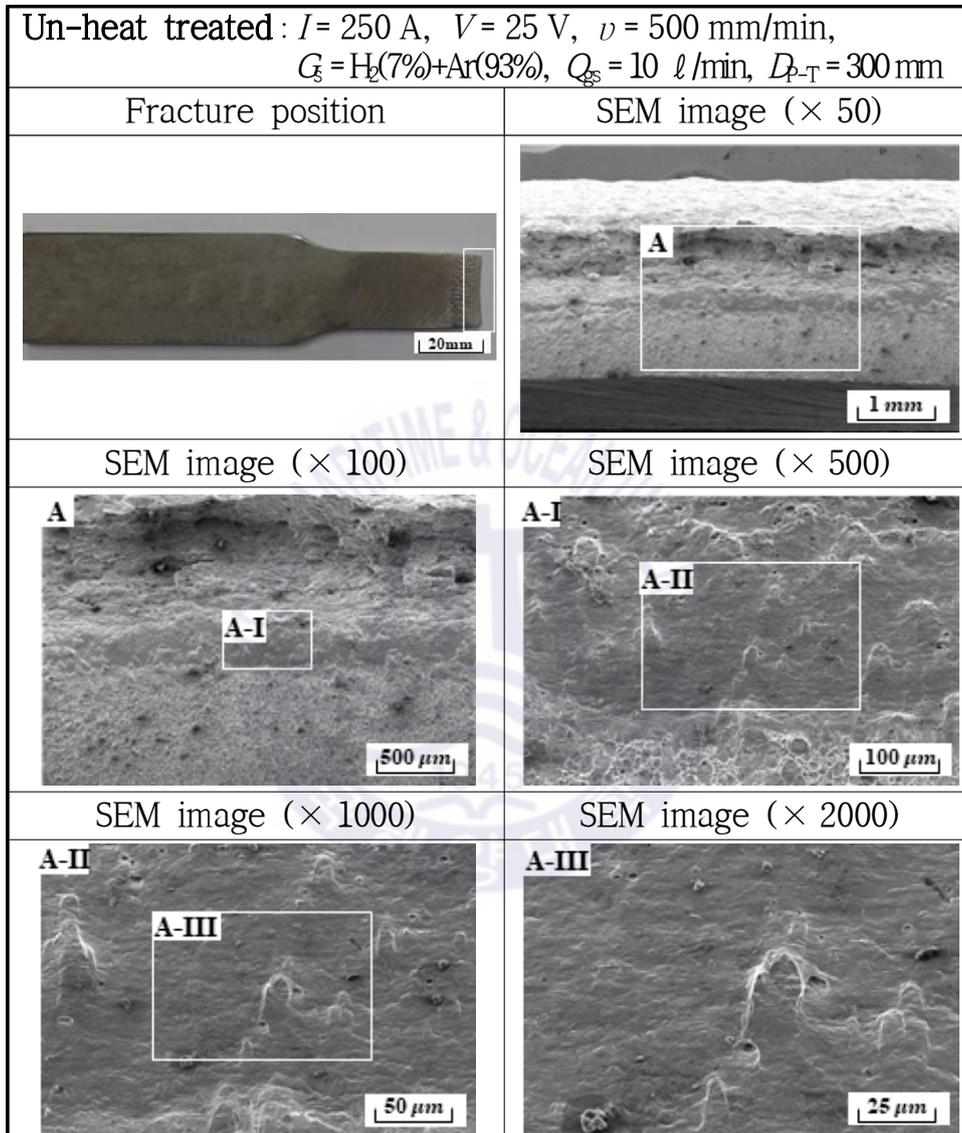


Fig. 4.28 SEM images of fracture surface in un-heat treated specimen 3 for left part

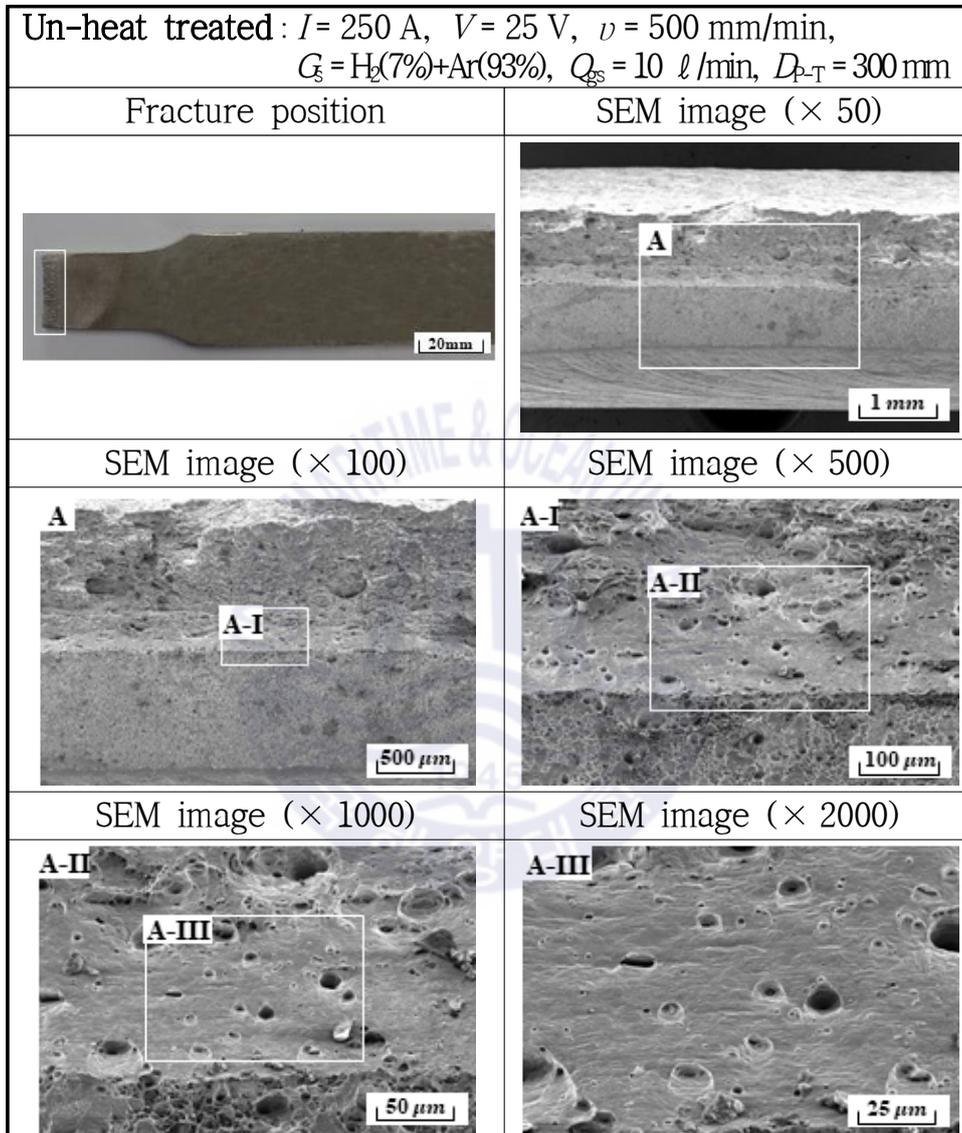


Fig. 4.29 SEM images of fracture surface in un-heat treated specimen 3 for right part

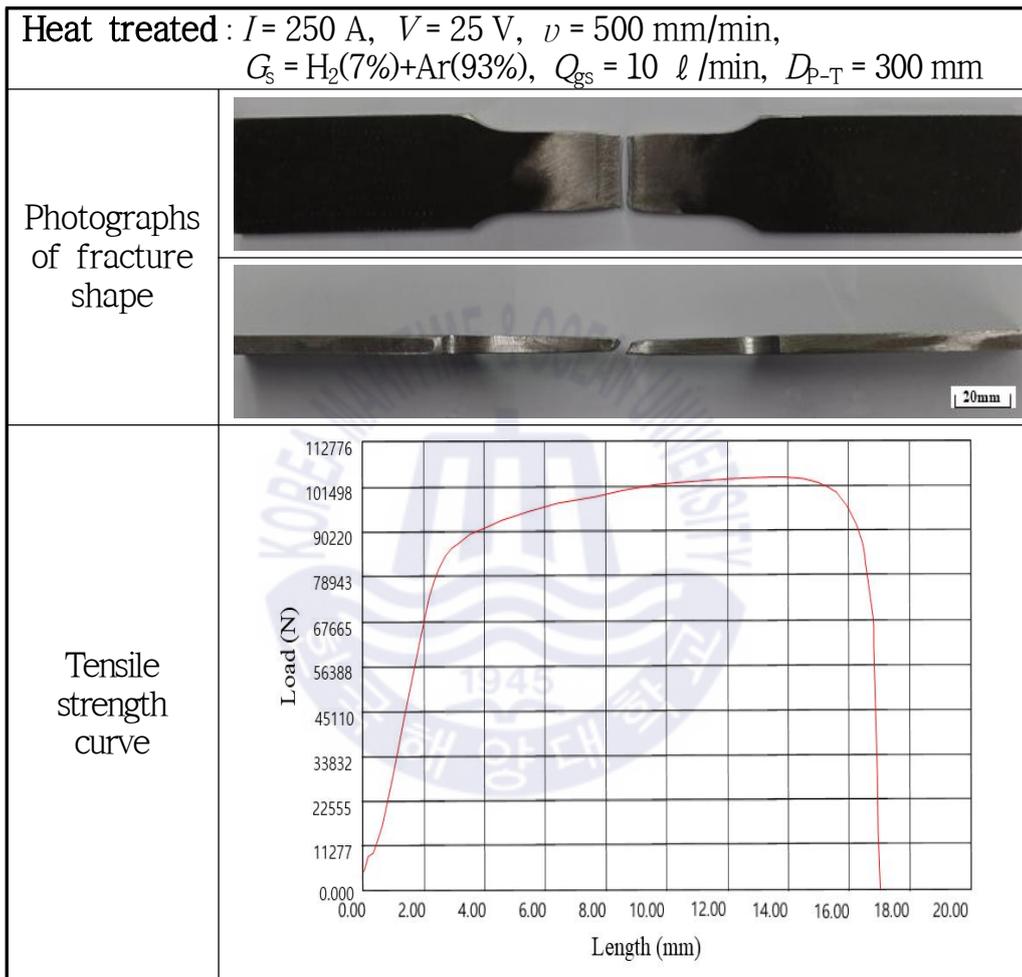


Fig. 4.30 Photographs of fracture shapes and tensile strength curve for heat treated specimen 1

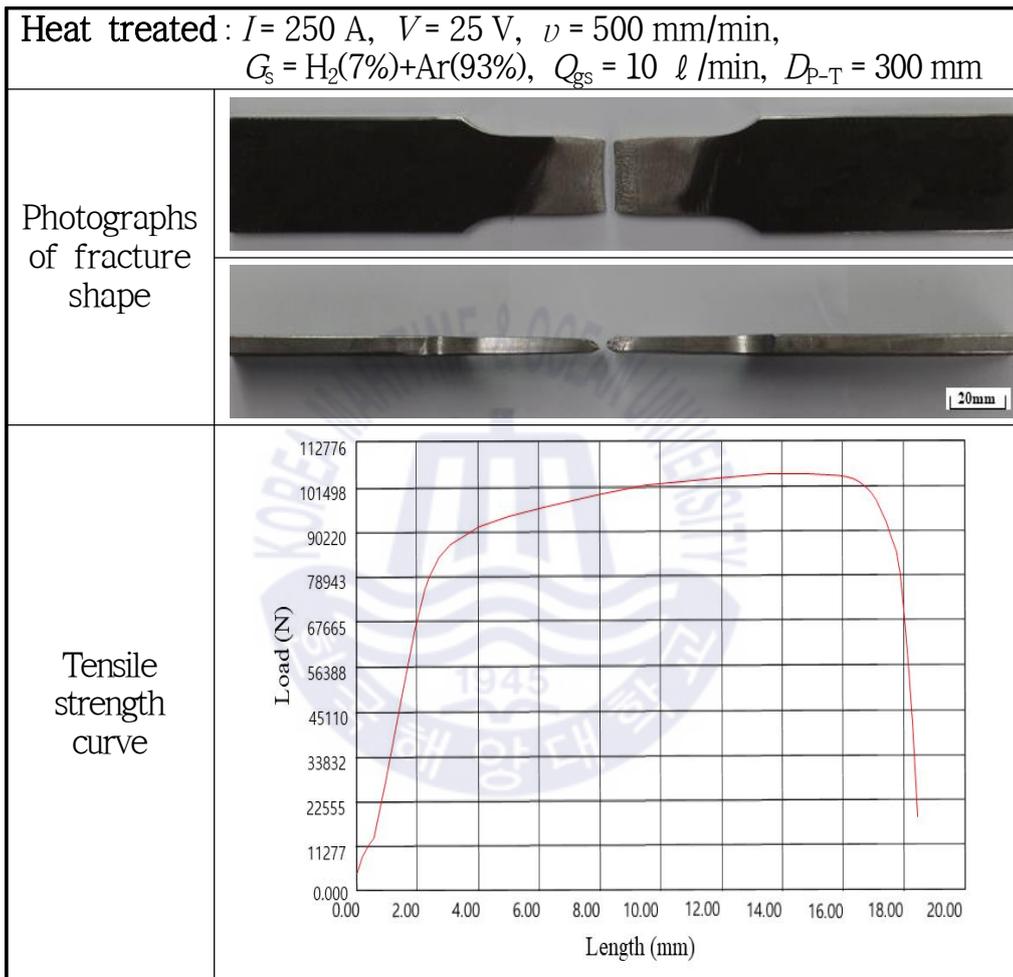


Fig. 4.31 Photographs of fracture shapes and tensile strength curve for heat treated specimen 2

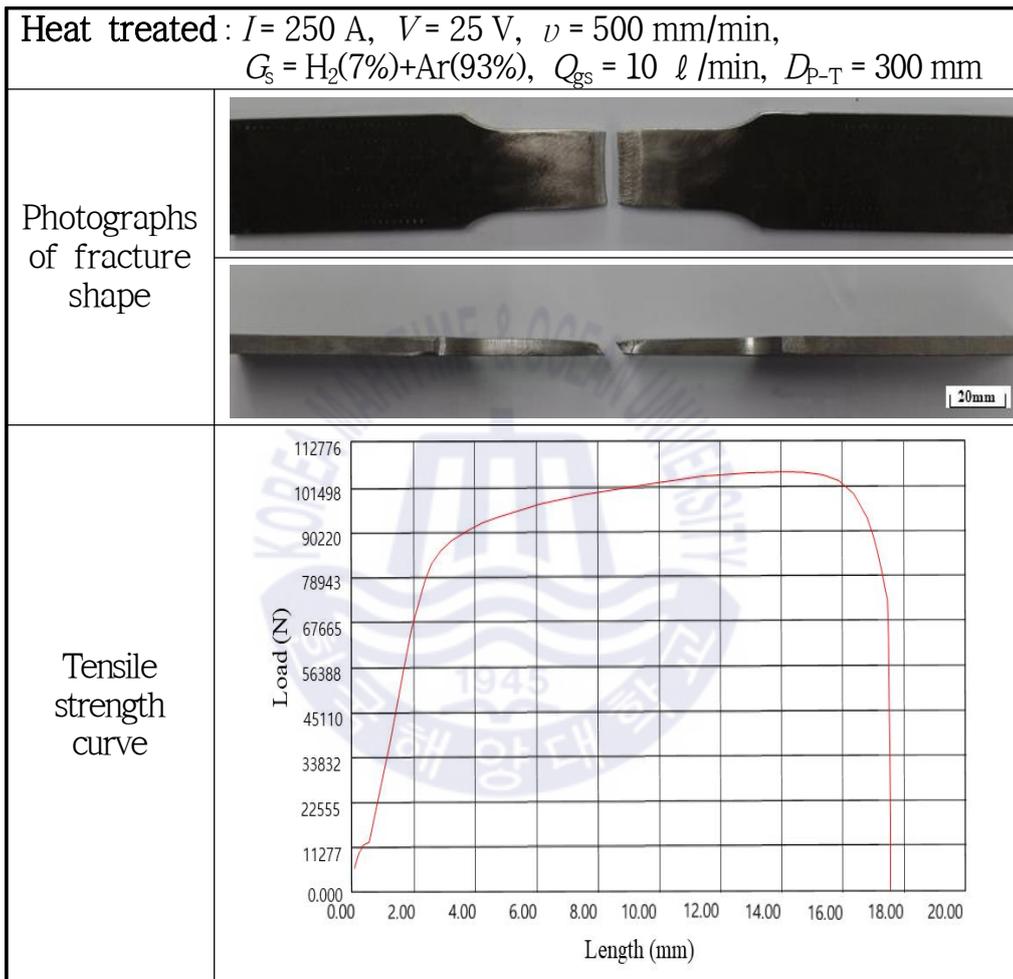


Fig. 4.32 Photographs of fracture shapes and tensile strength curve for heat treated specimen 3

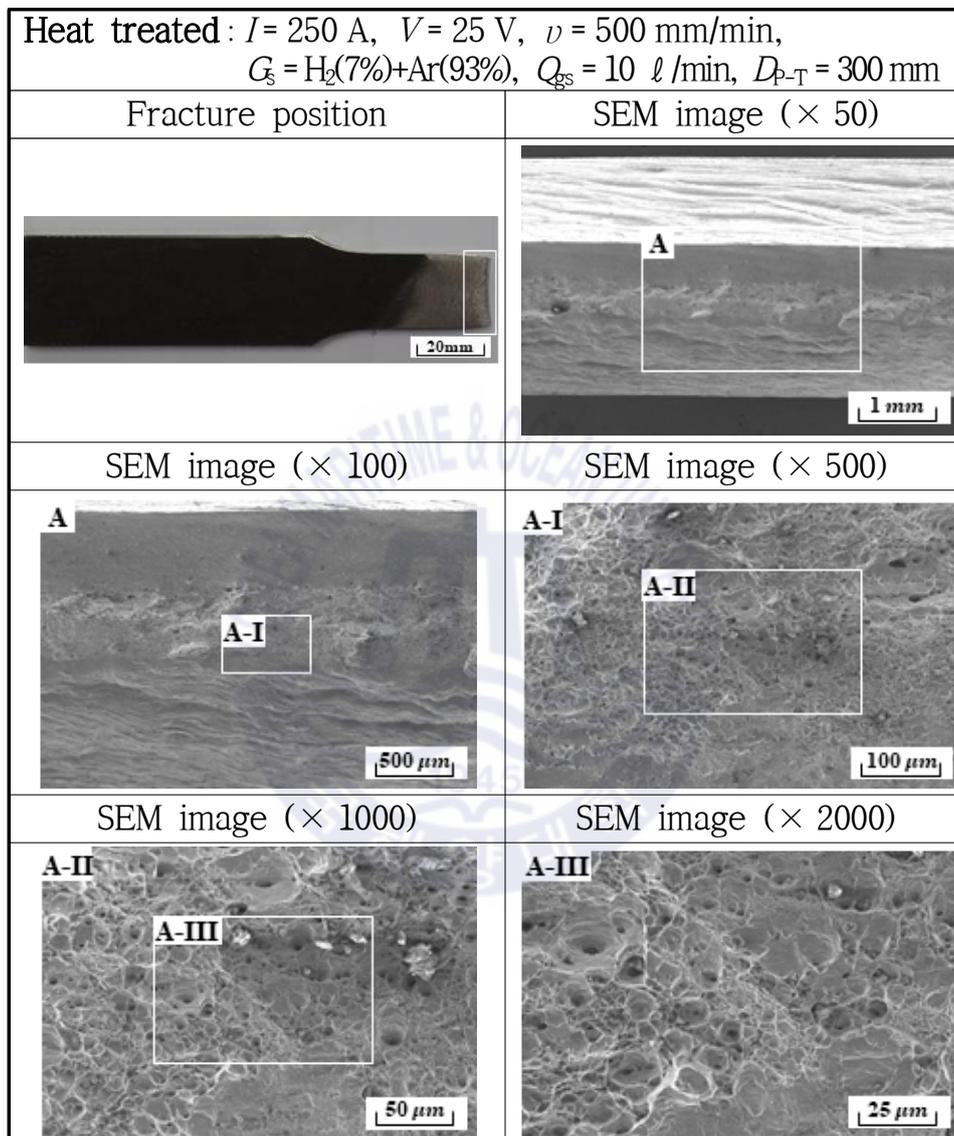


Fig. 4.33 SEM images of fracture surface in heat treated specimen 2 for left part

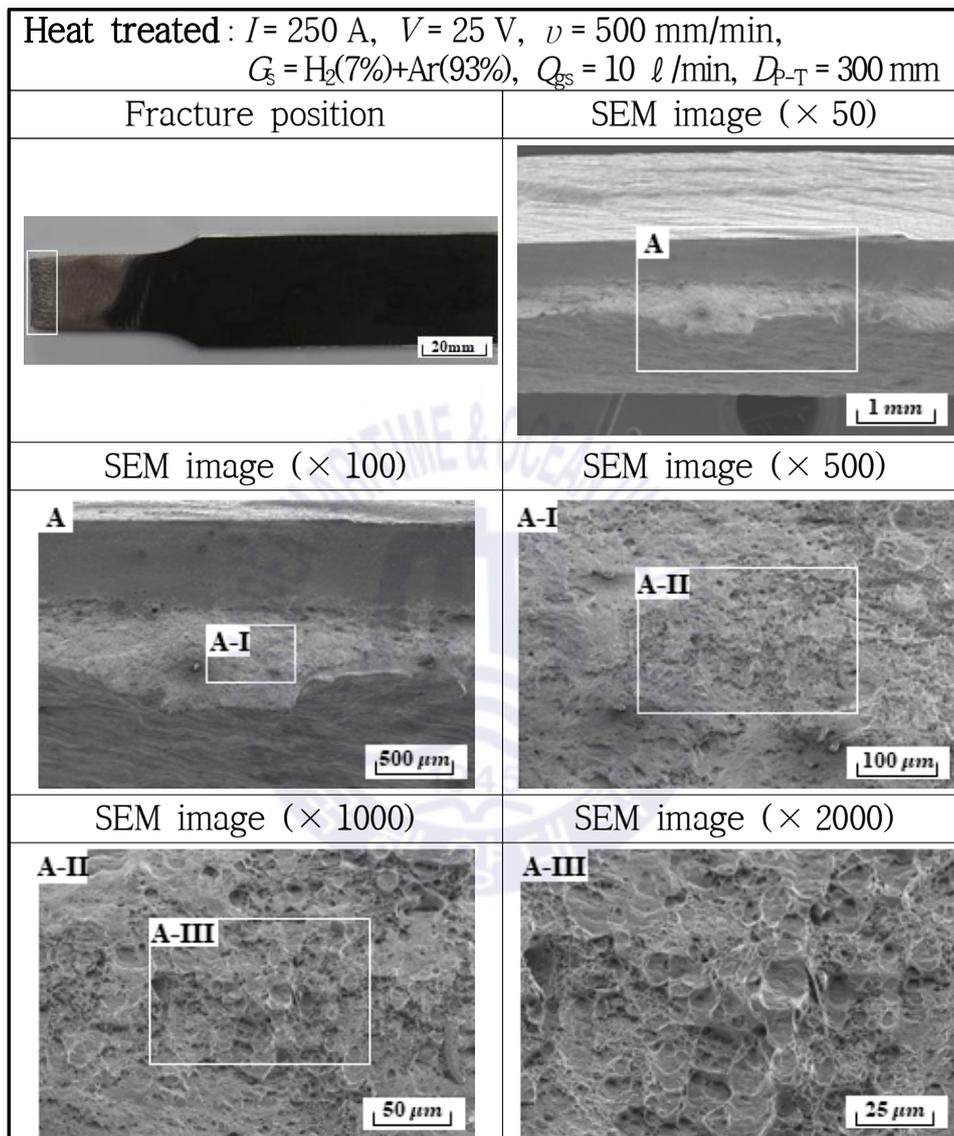


Fig. 4.34 SEM images of fracture surface in heat treated specimen 2 for right part

### (3) 굽힘시험

유럽연합(EU)의 welded stainless steel tube 규격인 EN 10217-7(2014)에서 요구하는 바에 따라 EN ISO 5173 요건에 적합한 굽힘 시험(bending test)을 실시하였다. Fig. 4.35(a)는 비열처리 굽힘시험편의 굽힘시험 결과를 나타내고, Fig. 4.35(b)는 고용화 열처리가 적용된 굽힘시험편의 굽힘시험 결과를 나타낸다. 열처리 전후의 용접부 굽힘시험 결과 양자 모두 기공, 균열 등의 용접 결함이 발견되지 않았으므로 열처리의 효과는 관찰되지 않았고, EN 10217-7(2014) 규격의 굽힘시험 합격 요건을 만족한다.



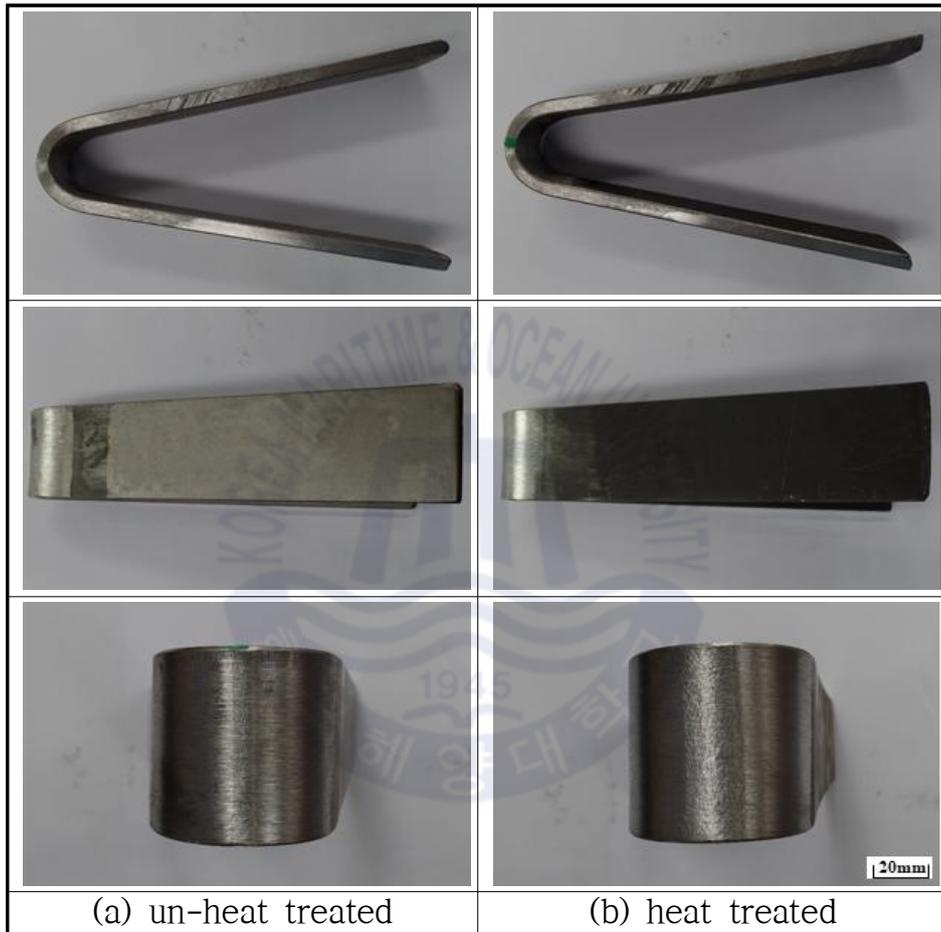


Fig. 4.35 Result of bending test according to ISO 5173

## 4.4.2 미세조직 특성 비교

비드용접을 통해 식별된 PAW 최적 용접 조건을 적용하여 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 맞대기용접 시편을 2 종류 제작한 후, 1 종류의 시편은 1,050 °C 온도 조건에서 30 min 동안 고용화열처리를 추가로 실시하였다. 2 종류의 시편을 사용하여 미세조직 특성에 미치는 열처리 영향을 파악하기 위해 광학현미경을 통한 미세조직분석, EDS를 통한 화학성분 분석 및 페라이트 분율을 확인 하였다.

### (1) 미세조직분석

5 mm 두께의 슈퍼듀플렉스 스테인리스강 시편에 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 맞대기용접을 적용하여 미세조직분석을 위한 시험편을 준비하였다. 먼저, Fig. 4.36과 같이 광학현미경 (x 50, x 100, x 500)을 통해 비열처리 시험편에 대한 미세조직분석을 확인해보았다. Fig. 4.36(a)는 TIG 영역, Fig. 4.36(b)는 TIG-PAW 교차 영역, Fig. 4.36(c)는 PAW 영역, Fig. 4.36(d)는 TIG와 모재의 교차 영역, Fig. 4.36(e)는 PAW와 모재의 교차 영역, Fig. 4.36(f)는 TIG와 PAW와 모재의 교차 영역을 각각 x 50, x 100, x 500 배율로 보여 준다.

또한, Fig. 4.37과 같이 광학현미경 (x 50, x 100, x 500)을 통해 고용화 열처리 된 시험편에 대한 미세조직분석을 확인해보았다. Fig. 4.37(a)는 TIG 영역, Fig. 4.37(b)는 TIG-PAW 교차 영역, Fig. 4.37(c)는 PAW 영역, Fig. 4.37(d)는 TIG와 모재의 교차 영역, Fig. 4.37(e)는 PAW와 모재의 교차 영역, Fig. 4.37(f)는 TIG와 PAW와 모재의 교차 영역을 각각 x 50, x 100, x 500 배율로 보여 준다.

분석결과 열처리 전/후 양자 모두에서 기공과 균열 같은 결함은 발견되지 않았고, 열처리 전 TIG 영역, TIG-PAW 교차영역, TIG-모재 교차영역 및 TIG-PAW-모재 교차영역에서는 오스테나이트 분율이 다소 낮은 경향을 나타내고 있으며, 조직도 불규칙적으로 분포되어 있다. 또한, 열처리 전 PAW 영역과 PAW-모재 교차 영역에서는 조직이 불규칙적으로 분포되어 있는 것을 확인 할 수 있다. 하지만, 고용화 열처리 후 TIG 영역, TIG-PAW 교차영역, TIG-모재 교차영역, TIG-PAW-모재 교차영역에서는 오스테나이트 분율이 전반적으로 높아졌고, 조직도 균질하게 재배치 되었다. 그리고 PAW 영역과 PAW-모재 교차영역에서도 전체적으

로 조직이 균질하게 재분포 되었다. 이것을 통해 고용화 열처리하는 페라이트와 오스트나이트 분율을 적정하게 관리해주고, 또한 조직의 균질화에도 영향을 준다는 것을 유추할 수 있다.



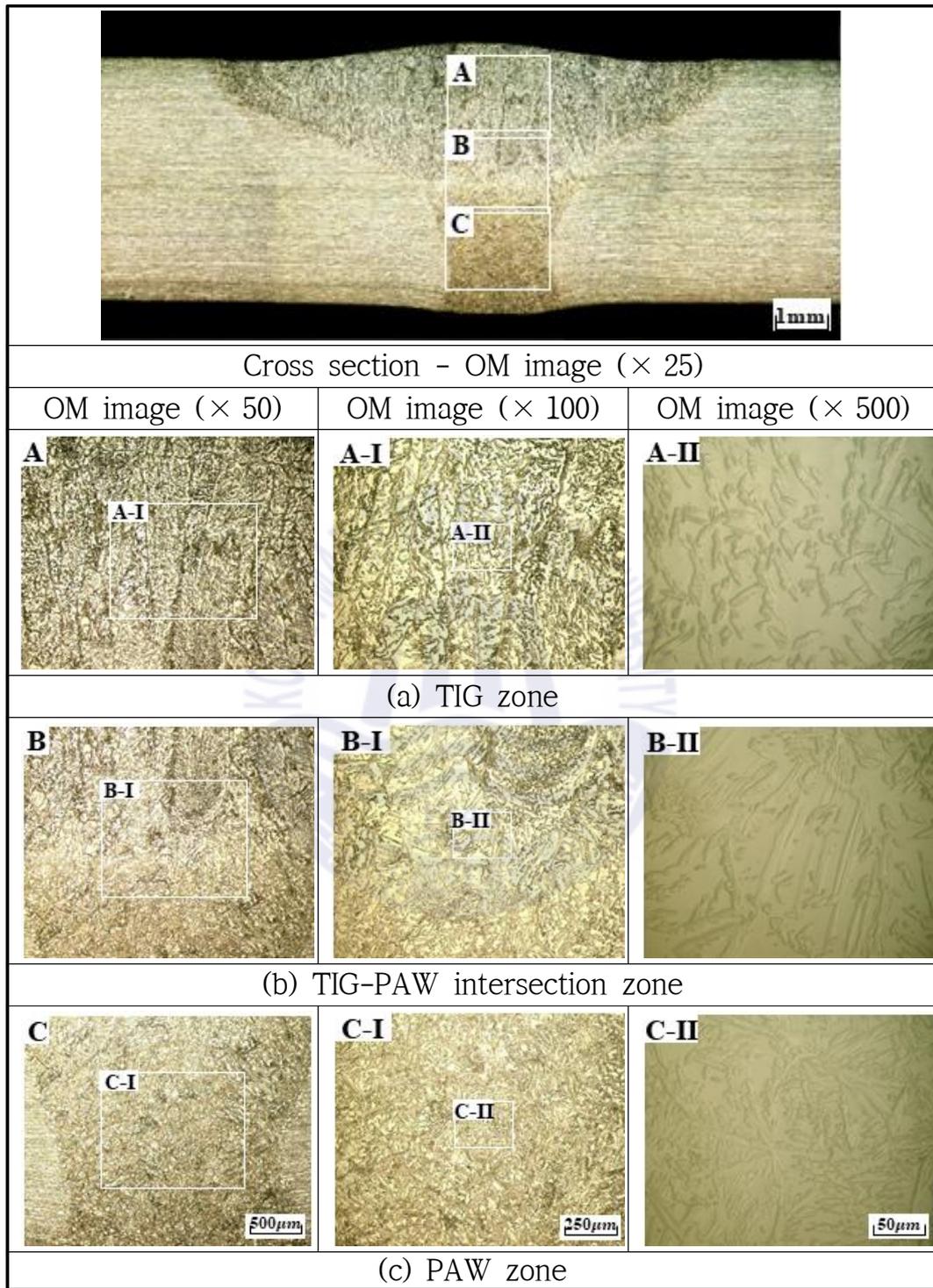


Fig. 4.36 OM image in fusion zone for un-heat treated specimen

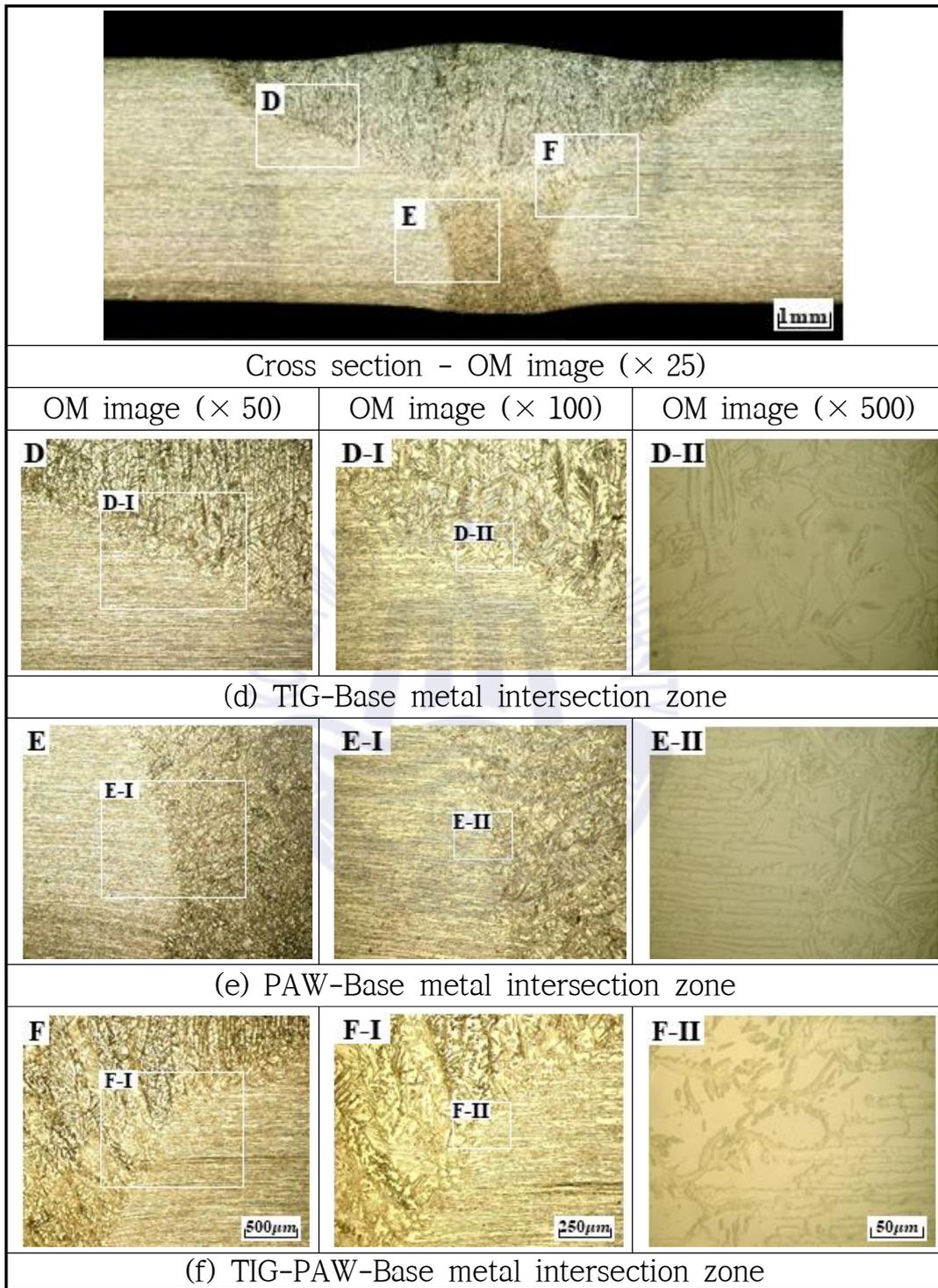


Fig. 4.36 To be continued.

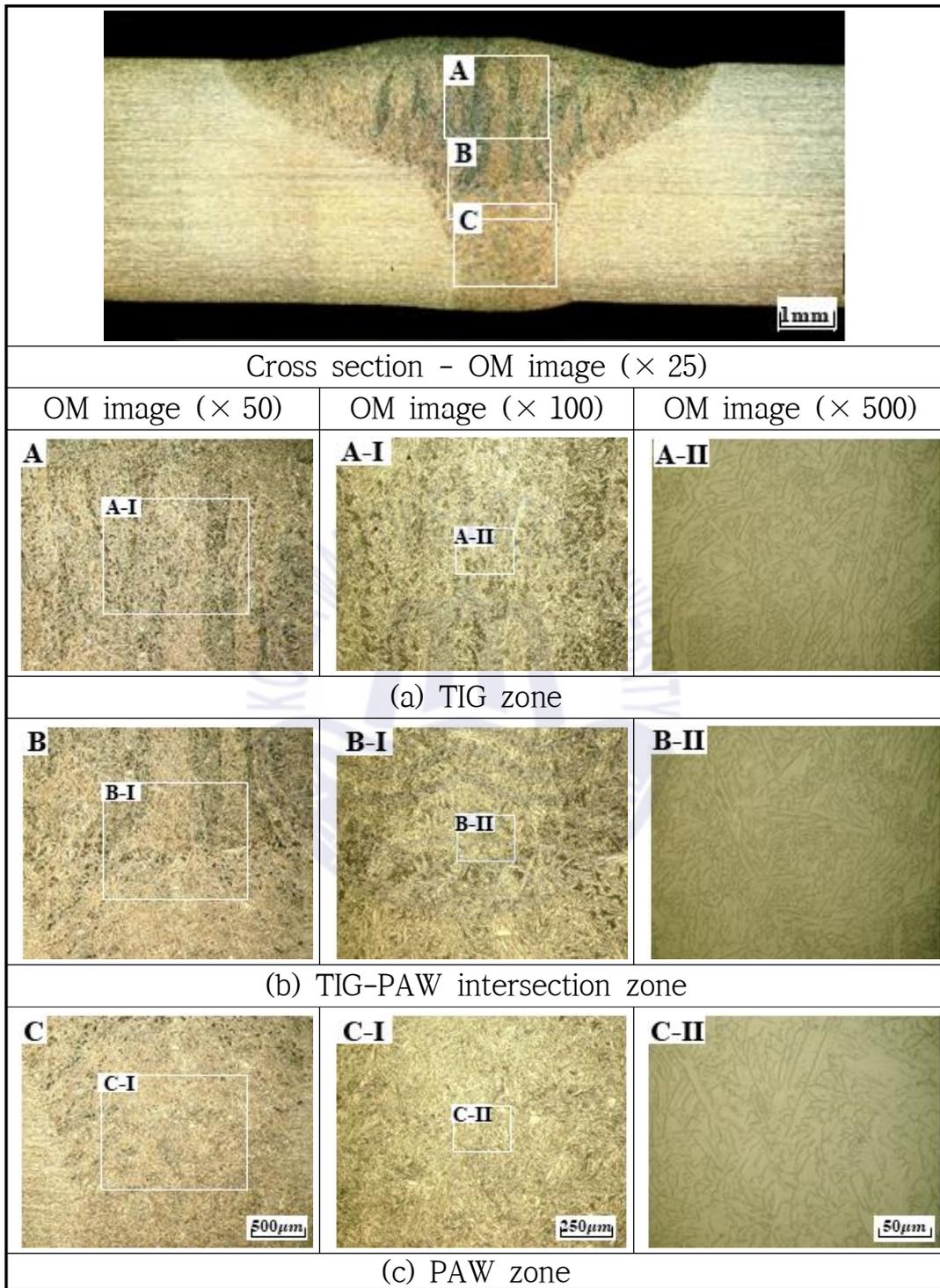


Fig. 4.37 OM image in fusion zone for heat treated specimen

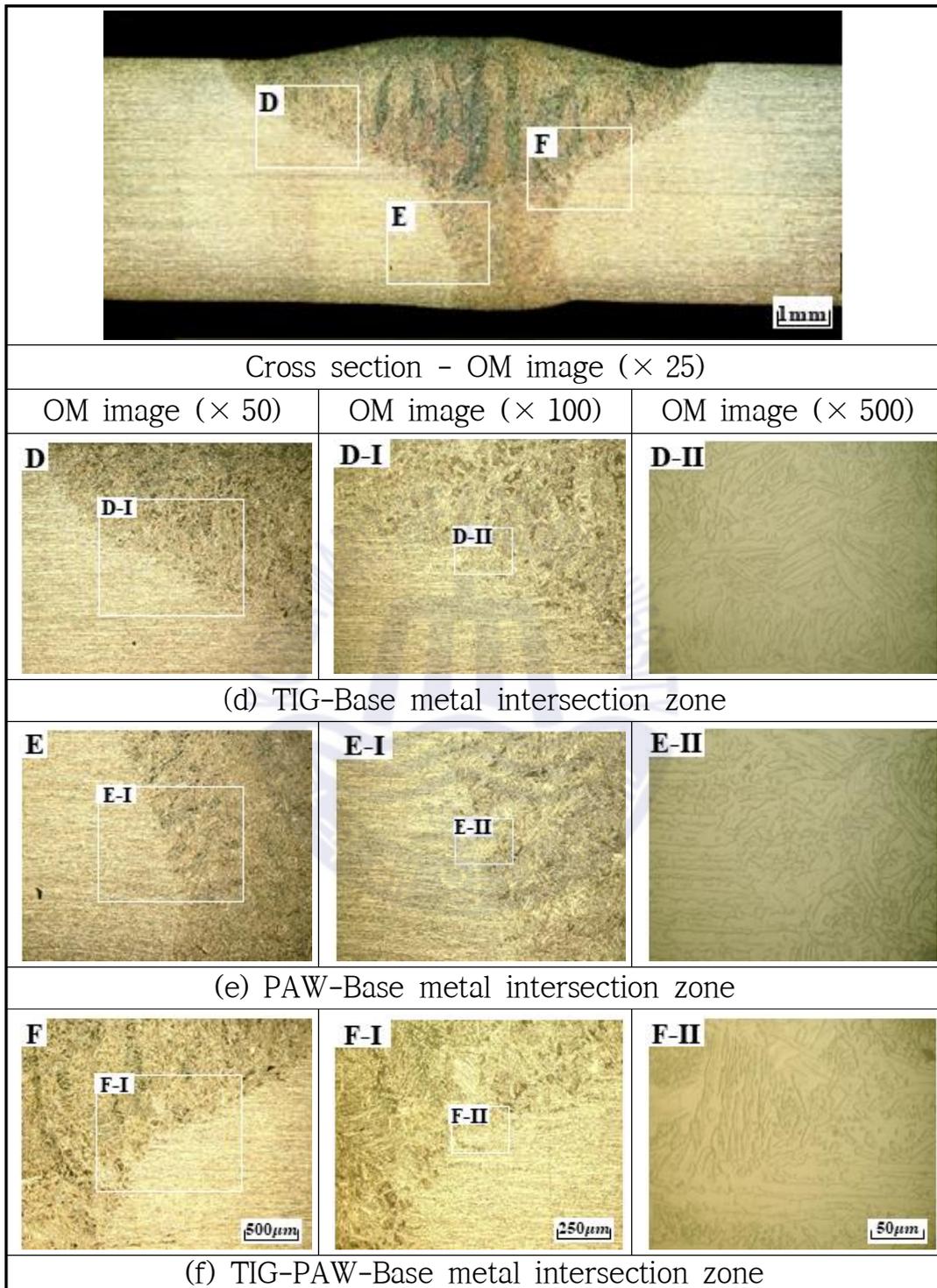


Fig. 4.37 To be continued.

## (2) EDS 분석을 통한 화학성분 확인

페라이트 분율 확인을 위한 사전 준비로써 페라이트 상과 오스테나이트 상에 대한 주요 화학성분을 확인할 필요가 있으며, 화학성분에 대한 정성적 분석 방법인 EDS를 사용하였다. EDS(energy dispersive spectrometer)는 전자현미경에 부착되어 시료의 성분을 분석하는 장비로서 고 에너지의 전자빔이 시편과 반응하여 시편의 구조 및 화학조성 정보를 간직한 다양한 신호를 이용하여 시편의 성분을 정성적으로 분석하는 장비이다<sup>(55)</sup>.

듀플렉스 스테인리스강은 PREN 지수 증대를 위해 크롬, 몰리브덴 및 질소를 많이 함유하게 되는데, 이들 합금원소 이외에 상의 균형 및 성능 향상을 위해 다른 여러 원소도 첨가하게 된다. 페라이트 상의 안정화를 위한 주요 원소는 Si, Cr, Mo, W이며, 오스테나이트 상의 안정화를 위한 주요 원소는 C, Mn, Ni, Cu, N 이다. EDS를 통한 상의 화학성분을 정성적으로 분석하였고, Fig. 4.38은 모재의 점 분석 결과, Fig. 4.39는 용접부의 점 분석 결과이다<sup>(43)</sup>.

화학성분에 대한 정성적 분석이기 때문에 미량의 원소인 Si, W, C, Mn, Cu 및 N는 제외하고, Cr, Mo 및 Ni 원소의 화학성분비를 활용하여 분석한 결과, 모재에서 Cr의 경우 페라이트 상에서는 29.54 %, 오스테나이트 상에서는 26.33 %가 각각 측정되었고, Mo의 경우 페라이트 상에서는 6.63 %, 오스테나이트 상에서는 5.04 %가 각각 측정되었으며, Ni의 경우 페라이트 상에서는 4.73 %, 오스테나이트 상에서는 6.62 %가 각각 측정되었다. 결과적으로 모재의 페라이트 상에서는 페라이트 안정화 원소인 Cr과 Mo이 더 많이 측정되었고, 모재의 오스테나이트 상에서는 오스테나이트 안정화 원소인 Ni이 더 많이 측정되었다.

또한, 용접부에서 Cr의 경우 페라이트 상에서는 28.40 %, 오스테나이트 상에서는 27.12 %가 각각 측정되었고, Mo의 경우 페라이트 상에서는 6.71 %, 오스테나이트 상에서는 4.63 %가 각각 측정되었으며, Ni의 경우 페라이트 상에서는 4.82 %, 오스테나이트 상에서는 6.56 %가 각각 측정되었다. 용접부의 SEM-EDS 분석을 통해 페라이트 상에서 Cr과 Mo 원소가, 오스테나이트 상에서는 Ni 원소가 높게 검출되었으며, 이를 통해 Cr과 Mo은 페라이트 안정화 원소이고, Ni은 오스테나이트 안정화 원소임을 확인하였다.

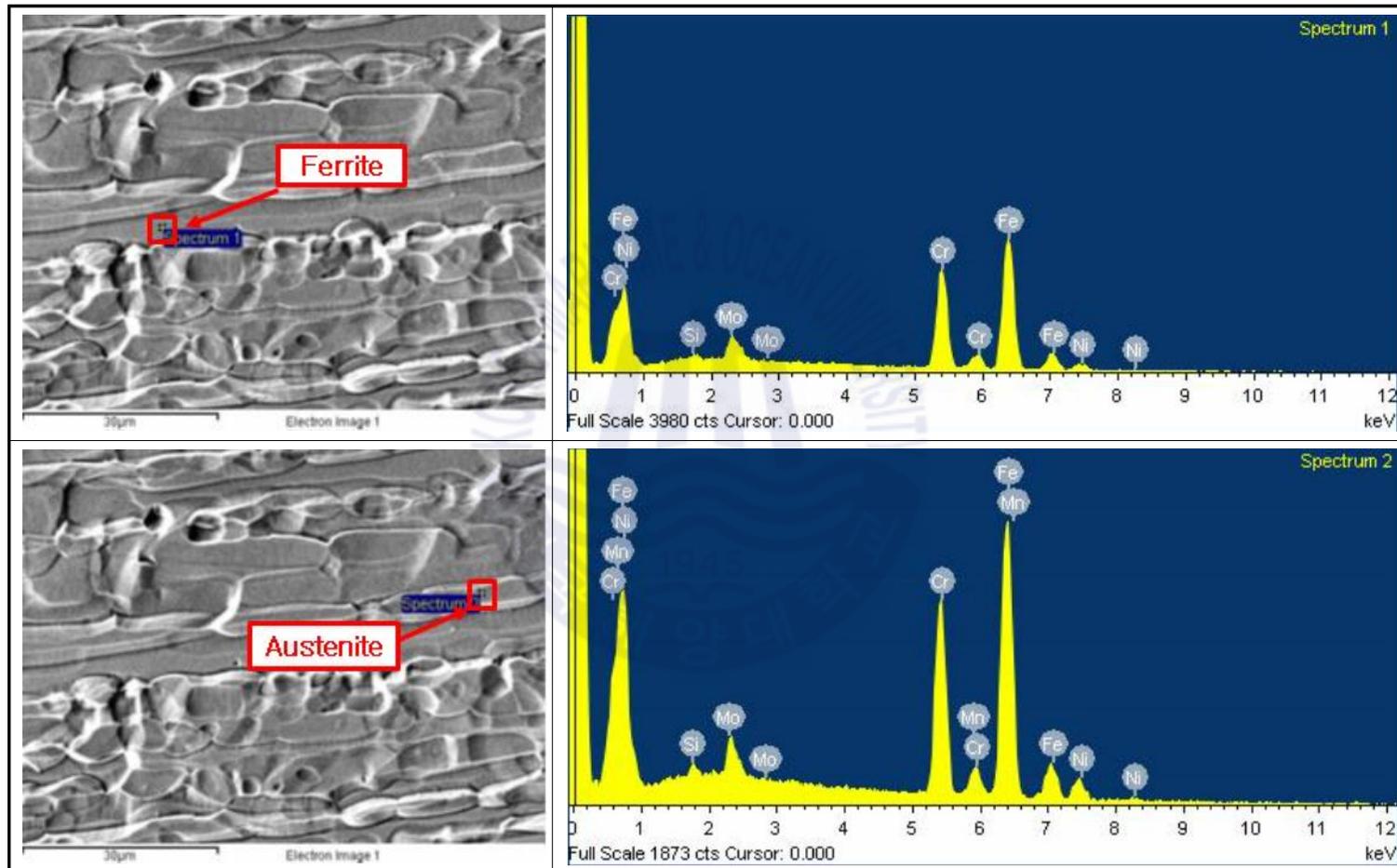


Fig. 4.38 Result of EDS analysis on base metal zone

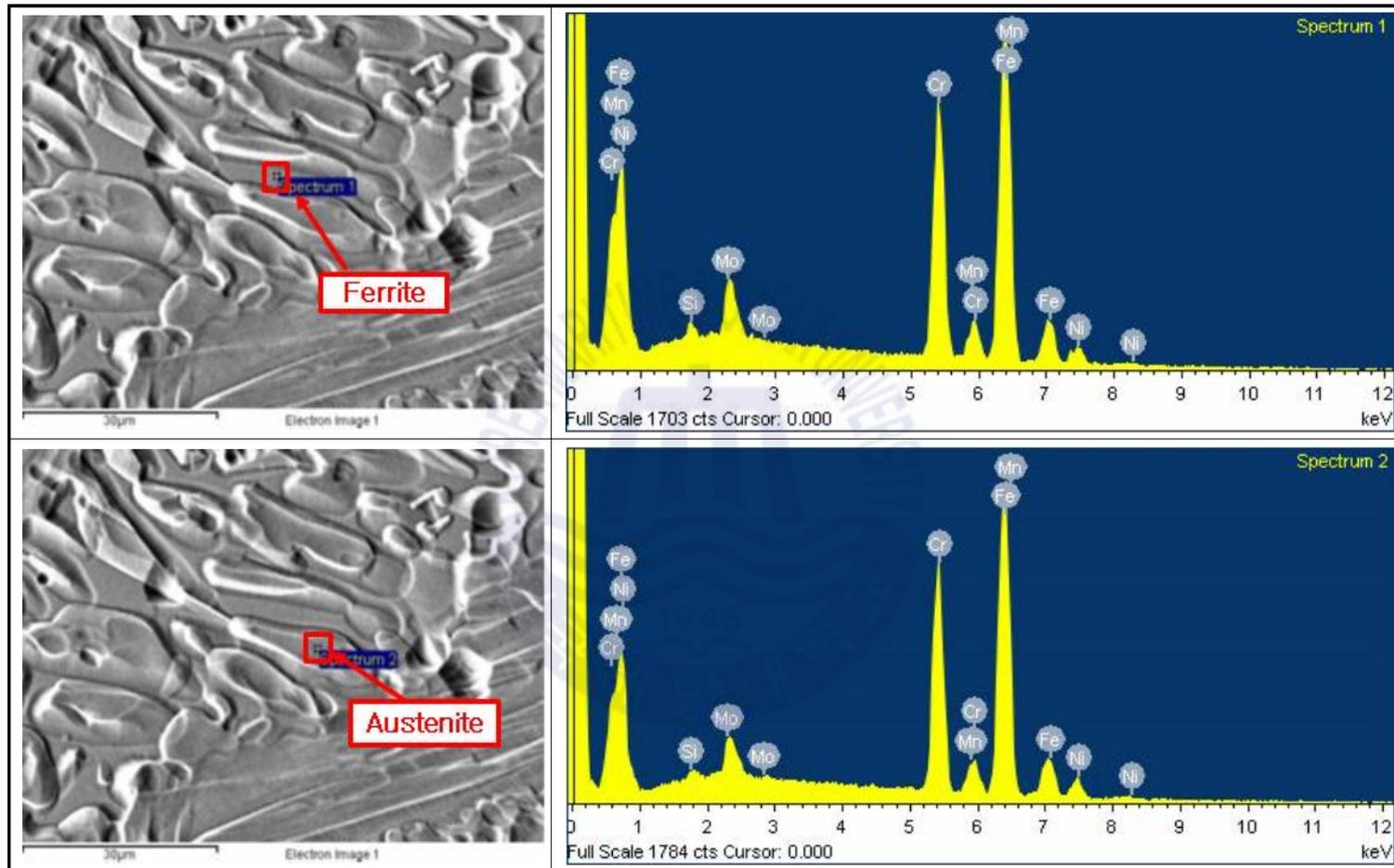


Fig. 4.39 Result of EDS analysis on weld metal zone

### (3) 페라이트 분율 확인

미국시험재료협회 (ASTM)의 부피분율 결정을 위한 표준테스트 방법인 ASTM E 562 절차에 따라 페라이트 분율 확인을 진행하였고 Fig. 4.40처럼 조직이 구성되었다. 비열처리 시험편의 경우 용접부에서 46.4 %, 열영향부에서 40.1 %, 모재부에서 35.4 %로 페라이트 함량이 측정되었고, 고용화 열처리가 적용된 시험편의 경우 용접부에서 37.8 %, 열영향부에서 36.7 %, 모재부에서 36.0 %로 페라이트 함량이 각각 측정되었다. 모재에 열이 가해지고, 용융되면서 페라이트 함량이 서서히 높아짐을 알 수 있고, 고용화 열처리 이후 용접부와 열영향부의 페라이트 함량은 모재부와 거의 유사해 짐을 알 수 있다. 또한, 400배율 조건에서 용접부, 열영향부의 페라이트 함량이 한국선급 (KR)의 듀플렉스 스테인리스강 마이크로조직 시험 기준인 30 %~70 %를 만족하여 상선 및 해양프로젝트 사용에 적합한 분율 상태임을 재확인할 수 있었다. 두 조건 모두 페라이트 함량을 만족하는 결과를 얻을 수 있었지만, 고용화 열처리를 통해 페라이트 함량이 보다 균일해짐을 확인할 수 있었다.

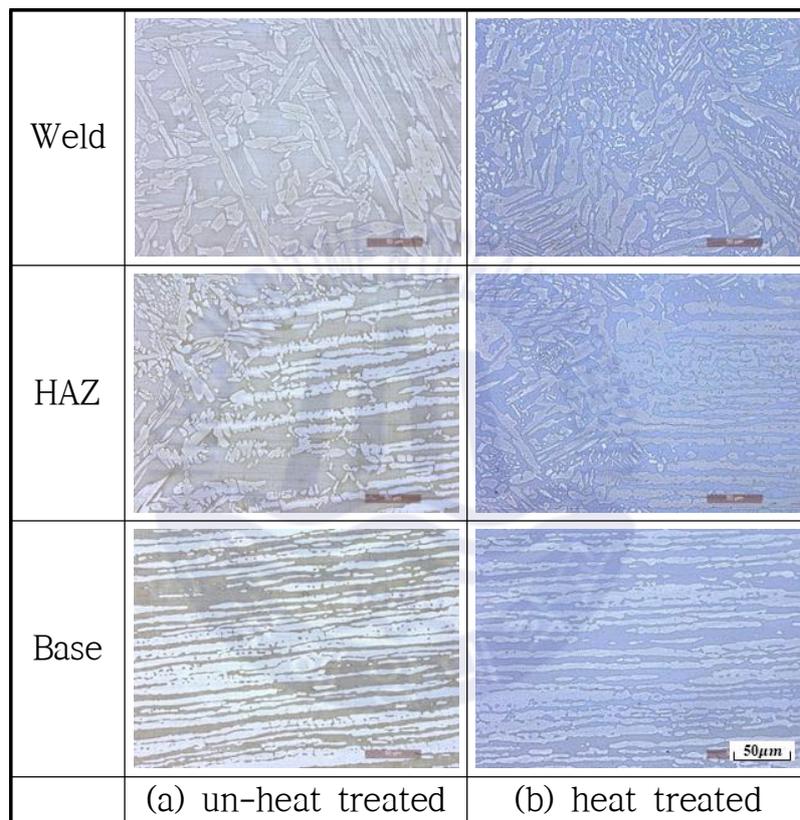


Fig. 4.40 Ratio of ferrite phase content according to ASTM E 562

## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 친환경 선박의 황산화물 배기가스 세정장치용 재료로 적용되는 두께 5mm의 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 대하여 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접을 실시하였으며, 재료의 용접성과 열처리 특성을 검토하였다. 다양한 공정변수에 대한 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 플라즈마 용접(PAW) 열원( $I=200\text{ A}$ ,  $V=25\text{ V}$ ,  $v=500\text{ mm/min}$ )과 TIG용접 열원( $I=235\text{ A}$ ,  $V=18\text{ V}$ ,  $v=500\text{ mm/min}$ )을 각각 이용하여 비드용접을 실시한 결과, 플라즈마 용접 시 TIG보다 더 작은 입열량을 적용하였으나, TIG 용접에서는 용입 깊이가 1.64 mm의 부분 용입 용접이 이루어진 반면, 플라즈마 용접에서는 5 mm로 완전 용입이 가능하였다.
2. PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접 시 TIG 용접 변수는 고정시키고, PAW의 주된 공정변수를 변화시키면서 비드용접을 진행한 결과, 용접 전류가 증가하면 비드폭과 용입 깊이가 함께 증가하였고, 용접 전압이 증가하면 용입 깊이는 감소하였으나, 비드폭의 증감에는 크게 영향을 미치지 않았다.
3. 용접속도는 재료내의 입열량을 결정하므로 속도가 증가하면 비드폭과 용입 깊이가 함께 감소하였으며, 용접 보호가스로써 수소 혼합가스를 사용한 경우 수소 원자의 결합에너지에 의한 입열량 증가로 아르곤 가스만을 사용한 용접부보다 용입이 약 36 % 증가하였다.
4. 두 용접 열원장치간의 상호 간섭으로 인해 일정거리 이내로 가까이 할 수 없는 현장에서의 문제점이 존재하는 가운데, 두 열원 간의 거리를 변수로 하여 용접성에 미치는 영향을 검토한 결과, 후행 용접열원인 TIG가 선행 용접 열원의 용융부에 영향을 주기 전에 PAW 용융부가 이미 어느 정도 응고가 진행되어 비드폭과 용입 깊이에 큰 영향을 미치지 못하였다.
5. PAW-TIG 하이브리드 텐덤 열원을 이용한 맞대기 용접 특성은 비드용접과 거의 동일한 경향을 나타내었으며, 결과적으로 PAW의  $I=250\text{ A}$ ,  $V=25\text{ V}$ ,  $v=500\text{ mm/min}$  조건에서 가장 미려한 용접부를 얻을 수 있었다.

6. 용접부에 대한 고용화 열처리를 실시한 결과, 경도값에는 큰 영향을 주지 않았지만, 인장의 경우 열처리 전의 취성 파단이 열처리 후에 연성 파단으로 변화됨에 따라 변형이 증가하고 강도는 다소 작아지는 경향을 나타내었지만, 두 조건 모두 인장강도 기준을 만족하였다.
7. 용접부의 미세조직을 살펴본 결과, 기공 및 균열과 같은 결함은 발견되지 않았으며, 특히 고용화 열처리 후에는 모든 영역에서 페라이트와 오스테나이트 상이 균질하게 분포되어 있음을 확인하였다.
8. 용접부의 SEM-EDS 분석을 통해 페라이트 상에서 Cr과 Mo 원소가, 오스테나이트 상에서는 Ni 원소가 높게 검출되었으며, 이를 통해 Cr과 Mo은 페라이트 안정화 원소이고, Ni은 오스테나이트 안정화 원소임을 확인하였다.
9. 고용화 열처리를 실시하지 않은 용접 시험편의 페라이트 분율은 용접부 46.4 %, 열영향부 40.1 %, 모재 35.4 %였지만, 열처리 후 용접부 37.8 %, 열영향부 36.7 %, 모재 36.0 %로 변화되었다. 두 조건 모두 페라이트 함량을 만족하는 결과를 얻을 수 있었지만, 고용화 열처리를 통해 페라이트 함량이 보다 균일해짐을 확인할 수 있었다.
10. 본 연구를 통해 슈퍼듀플렉스 스테인리스강에 대한 기초적인 PAW-TIG 하이브리드 텐덤 용접 특성을 확인하였으며, 다양한 공정변수의 영향을 파악하여 용접 품질을 보다 향상시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 향후 용접 열원간의 입열량 제어와 용접부의 부식특성에 대하여 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

1. 조성철, 2019. 선박 저속운항에 따른 선박 대기오염 물질 배출 영향에 관한 연구, 한국해양대학교 석사학위 논문
2. 한국선급, 2018. 선주와 검사원을 위한 EXHAUST GAS CLEANING SYSTEMS TECHNICAL INFORMATION, 한국선급
3. 한국선급 기술개발팀, 2018. 강화된 Global SO<sub>x</sub> 규제 대응을 위한 선주 지침서, 한국선급
4. S.S.M. Tavares a et al., 2007. *Characterization of microstructure, chemical composition, corrosion resistance and toughness of a multipass weld joint of superduplex stainless steel UNS S32750*, Elsevier Science V.V., Amsterdam, Materials characterization
5. 장복수, 2014. 발전플랜트용 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강(UNS S32750)의 용접 후 열처리가 미세조직, 기계적 특성 및 공식에 미치는 영향 연구, 한국기술교육대학교 박사학위 논문
6. 김봉영, 2018. 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강 UNS S 32750의 공식경 미치는 오스테나이트 형상의 영향, 부산대학교 석사학위 논문
7. K. Devendranath Ramkumar et al., 2016. *Studies on the structure-property relationships and corrosion behaviour of the activated flux TIG welding of UNS S32750*, Elsevier, Journal of manufacturing processes
8. Carla Gabriela Silva Leite et al., 2019. *Nd: YAG Pulsed Laser Dissimilar Welding of UNS S32750 Duplex with 316L Austenitic Stainless Steel*, MDPI
9. K. Devendranath Ramkumar et al., 2017. *Microstructure, mechanical properties and biocorrosion behavior of dissimilar welds of AISI 904L and UNS S32750*, Elsevier, Journal of manufacturing processes
10. 유준태 등, 2006. *Keyhole welding of aluminum alloy by variable polarity plasma arc welding*, KWS 2006-Fall, 부산, 2006년 10월
11. CHEN Jian-chun et al., 2011. *Welding of Ti-6Al-4V alloy using dynamically controlled plasma arc welding process*, Elsevier, ScienceDirect
12. C.S. Wu et al., 2013. *Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling*, Elsevier, Journal of manufacturing processes

13. Somrerck Chandra-ambhorn et al., 2012. *Plasma Arc Welding between AISI 304 and AISI 201 Stainless Steels Using a Technique of Mixing Nitrogen in Shielding Gas*, Scientific, Advanced Materials Research
14. 김원훈 등, 1987. 플라즈마 키홀 박판 용접에서의 열 및 물질 유동에 관한 연구, 대한기계학회 춘추학술대회, 대한기계학회
15. Zu Ming Liu et al., 2016. *Plasma arc welding: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling*, Elsevier, Journal of manufacturing processes
16. Maria E. R. Cronemberger et al., 2014. *INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURAL CHANGES AFTER SOLUTION ANNEALING TREATMENT IN A DUPLEX STAINLESS STEEL*, Scientific, Materials Science Forum
17. Jun-Seob Lee et al., 2012. *Effects of Solution Annealing Temperature on the Galvanic Corrosion Behavior of the Super Duplex Stainless Steels*, Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 22(2) February 2013
18. Stephania Capellari De Rezende et al., 2018. *Effect of Solution Annealing Time on the Microstructure and Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel*, Materials Science Forum Vol. 930
19. A. Kashiwar et al., 2012. *Effect of solution annealing temperature on precipitation in 2205 duplex stainless steel*, Elsevier, SciVerse ScienceDirect
20. 김종도 등, 2015. *조선해양소재공학*, 다솜출판사
21. 윤상인, 2003. *Effect of Alloying Element N on the Semiconducting Properties of Passive Films Formed on the Austenite Stainless Steels and their Resistance to Crevice Corrosion*, 국민대학교 석사학위 논문
22. 안재천, 1989. *침탄후 Creep 시험한 Austenite계 Stainless steel의 탄화물에 관한 연구*, 한양대학교 석사학위 논문
23. 김희진, 2002. *A study of sulfur behaviors in austenite stainless steels at high temperature*, 한양대학교 석사학위 논문
24. 이민열, 2000. *Annealing Behaviour of Prestrained Austenite Stainless Steel*, 순천대학교 석사학위 논문
25. 이승석, 1978. *Austenite stainless강의 polythion산에 의한 응력부식균열*, 서울대학교 석사학위 논문

26. 박현준, 2012. *Characterization of S-phase layer of austenite stainless steel nitrided by using plasma nitriding*, 한양대학교 석사학위 논문
27. 송영하, 2019. *Low Temperature Vacuum Carburizing of Austenitic Stainless Steels Using Acetylene Gas*, 부산대학교 석사학위 논문
28. 김종백, 2010. *Study on the improvement of properties of austenitic stainless steel by using mechanically induced transformation*, 부산대학교 석사학위 논문
29. 박민하, 2019. *304 오스테나이트 스테인리스강의 냉간가공 및 열처리에 따른 기계적 특성에 대한 연구*, 인제대학교 석사학위 논문
30. 허태영, 2012. *고 Mn 오스테나이트계 스테인리스강의 가공유기 마르텐사이트 변태 및 역변태에 관한 연구*, 부경대학교 박사학위 논문
31. 이창민, 2019. *Behavior of the sigma phase in Mn containing superaustenitic stainless steel weld metals*, 한양대학교 박사학위 논문
32. 이동휘, 2007. *STS 321 및 STS 316L 오스테나이트계 스테인리스강의 고온질화 특성 연구*, 신라대학교 석사학위 논문
33. 김광윤, 2019. *Improvement of Strength and Impact Toughness for Cold-Worked Austenitic Stainless Steels Using a Surface-Cracking Technique*, 부산대학교 석사학위 논문
34. 임동석, 2001. *study on the formation behavior of reversed austenite in an Fe-13%Cr-7%Ni-3%Si martensitic stainless steel*, 연세대학교 석사학위 논문
35. 구차진, 2013. *고 Mn 오스테나이트계 스테인리스강의 기계적 성질에 미치는 가공온도의 영향*, 부경대학교 석사학위 논문
36. 엄수호, 2018. *Phase transformation on machined welding and machining of austenitic stainless steels*, 부산대학교 석사학위 논문
37. 문경태, 1994. *Effects of Mo addition and ion nitriding on the corrosion behavior of austenitic stainless steel*, 전남대학교 박사학위 논문
38. 구봉주, 2010. *저 니켈 오스테나이트계 스테인리스강의 공식저항성에 미치는 망간, 질소의 영향*, 연세대학교 석사학위 논문

39. 김순태, 2000. *Effects of copper and sulfur additions on corrosion resistance and machinability of austenitic stainless steels*, 연세대학교 박사학위 논문
40. 이상권, 2001. *Effects of cold work and Mn, N additions on corrosion properties of super austenitic stainless steel*, 연세대학교 석사학위 논문
41. 장대한, 2016. *Study on improving mechanical properties of SAW welded steel austenitic stainless steel 304 with post weld heat treatment*, 인제대학교 석사학위 논문
42. 신재경, 2011. *2차상 석출이 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강의 부식 특성에 미치는 영향*, 전남대학교, 석사학위 논문
43. 이진희 등, 2016. *스테인리스강의 이해*, 도서출판 명진
44. 이의호 등, 1999. *부식과 방식의 원리*, 동화기술
45. 권혁상 등, 2007. *스테인리스강의 이해*, 주식회사 한국철강신문
46. 대한용접접합학회, 개정3판 2017. *용접 접합 용어사전*, 대한용접접합학회
47. 고재형, 2006. *슈퍼듀플렉스 스테인리스강의 내식성에 미치는 고용화 열처리의 영향*, 연세대학교 석사학위논문
48. 대한용접접합학회, 2007, *용접접합편람(III 공정 및 열가공)*, GS인터비전
49. 명기훈, 2015. *조선용 AH36 강의 레이저-아크 하이브리드 용접성에 관한 연구*, 한국해양대학교, 석사학위 논문
50. 한국해양대학교 산학협력단, 2011. *레이저-아크 하이브리드 용접기술 개발의 위한 아크의 용접특성 분석 및 평가*, 한국해양대학교 산학협력단
51. EN, 2014. *BS EN 10217-7(2014) Welded steel tubes for pressure purposes - Technical delivery conditions- Part 7 : Stainless steel tubes*, BSI Standards Publication
52. EN, 2019. *BS EN ISO 6892-1:2019 Metallic materials - Tensile testing Method of test at room temperature*, BSI Standards Publication
53. EN, 2011. *BS EN ISO 5173:2010+A1:2011 Destructive tests on welds in metallic materials - Bend tests*, BSI Standards Publication

54. 김종도 등, 2010. *알기쉬운 용접 접합공학*, 다솜출판사

55. 박영서 등, 2014. *표면특성기기분석*, 동명사



## 감사의 글

학부 졸업 후 14년이 지난 시점에서 영예로운 석사 졸업을 앞두고 있습니다. 사회 생활을 하면서 석사 학위 공부를 병행하는 것이 쉽지는 않았지만, 업무에 대한 전문성을 키우고, 학문에 대한 부족한 점을 채우기 위해 열심히 하였고, 그 기간 동안 저에게 도움을 주신 정말 고마운 분들께 감사의 말씀을 드립니다.

먼저, 석사라는 새로운 길을 갈 수 있도록 아낌없는 격려와 지도를 해 주신 존경하는 김종도 지도교수님께 머리 숙여 감사의 말씀을 드립니다. 앞으로 모든 연구, 업무에 있어 결과만큼 과정을 중요시 하는 사람이 되도록 하겠습니다. 아울러 바쁘신 와중에도 논문 심사를 맡아 주시고 학문적 충고와 조언을 주신 이명훈 교수님과 강준 교수님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다.

다음으로, 대학원 생활에 있어서 모든 어려운 점을 이해하고 해결해주시며 논문 작성 및 연구실 생활에 큰 도움을 주신 송무근 실장님께 정말 감사드립니다. 더불어 석사 과정 시작에서부터 현재까지 석사 과정에 대한 전반적인 조언과 도움을 주신 김지언 석사님, 연구 과정 및 연구실 생활에 많은 도움을 준 이기훈 석사과정 학생과 정제한 석사과정 학생, 그리고 연구 및 논문 작성 시에 많은 도움을 준 홍성환 과장님과 연구/논문 전반에 수시로 가이드를 주었던 김지성 박사과정 후배님께도 감사의 말씀을 드립니다. 또한, 학술연수를 잘 마무리 할 수 있도록 물심양면으로 지원과 진심어린 충고를 주신 김영균 단장님과 류창열 팀장님께 정말 감사드리며, 함께 석사과정을 진행하면서 서로에게 큰 힘이 되어준 친구이자 동료인 조옥래 책임님, 선배 연구자로서 많은 도움을 주신 친구 최용석 교수님, 학위과정 전반에 대해 좋은 영향을 주신 김성현 책임님과 한국선급 제품인증팀 모든 동료/선후배님들께도 감사의 인사를 드립니다.

마지막으로 석사과정 동안 가정에 충실하지 못하였지만, 끝까지 저를 믿고 지원을 아끼지 않은 저의 아내, 많은 사랑이 필요한 나이에 아버지의 부재를 느끼게 하여 항상 미안하지만 사랑하는 두 딸들과 저를 대신해 손녀들을 따뜻한 사랑으로 보살펴주시는 장모님, 장인어른 그리고 항상 열심히 하고 힘내라고 해주시는 아버지께 감사의 말씀을 드립니다.