### 工學博士學位論文

# 조선 탑재공정용 고능률 자동용접법에 관한 연구

## A Study on the Development of High Deposition Automatic Welding Processes for Erection Stage in Shipbuilding

### 指導教授 朴珠用

2007年 2月

韓國海洋大學校 大學院

海洋시스템工學科 崔 祐 鉉

### 工學博士學位論文

조선 탑재공정용 고능률 자동용접법에 관한 연구

A Study on the Development of High Deposition Automatic Welding Processes for Erection Stage in Shipbuilding

## 指導教授 朴珠用

2007年 2月

韓國海洋大學校 大學院

海洋시스템工學科 崔 祐 鉉

本 論文을 崔祐鉉의 工學博士 學位論文으로 認准함

- 委員長 工學博士 趙孝濟 (印)
- 委員 工學博士 尹鍾元 (印)
- 委員 工學博士 朴命圭 (印)
- 委員 工學博士 姜秉潤 (印)
- 委員 工學博士 朴珠用 (印)

2007年 2月

韓國海洋大學校 大學院

海洋시스템工學科 崔 祐 鉉

목	차	

Abstractiv
List of Tables
List of Figuresx
Abbreviation xv
제 1 장 서 론1
1.1 연구 개발의 배경1
1.2 탑재 용접의 환경과 특성4
제 2 장 선박 탑재 공정8
2.1 선박 탑재 공정의 개요8
2.1.1 선박의 건조 공정8
2.1.2 블록의 대형화 및 선행 탑재11
2.1.3 대형 블록 공법의 개발12
2.2 주요 블록 공법의 종류와 특성13
2.2.1 대형 선행 탑재와 스키드 조합 공법13
2.2.2 댐 공법14
2.2.3 수중 탑재 공법15
2.2.4 스키드 진수시스템 공법17
2.2.5 육상 총조립 공법18
2.2.6 플로팅 도크 건조 공법19
2.2.7 기가 및 테라 공법19

	2.2.8	크레인 전선 진수 공법	21
	2.3 블	록 탑재공법의 적용 효과	22
	2.3.1	탑재 단위 블록 중량의 증가	22
	2.3.2	도크 작업일수의 단축	23
제	3 장	고능률 자동 용접법	24
	3.1 일	렉트로슬랙 용접	24
	3.1.1	일렉트로슬랙 용접의 개요	24
	3.1.2	소모 가이드 튜브식 일렉트로슬랙 용접	29
	3.1.3	내로우 갭 일렉트로슬랙 용접	32
	3.1.4	일렉트로 용접 응용 프로세스	40
	3.2 일	렉트로가스 용접	44
	3.2.1	일렉트로가스 용접의 개요	44
	3.2.2	다전극 일렉트로가스 용접	47
	3.2.3	일렉트로가스 용접의 개량	48
	3.2.4	여타 용접법과의 비교	50
제	4 장	일렉트로슬랙 및 일렉트로가스 용접 기반 신공정 개발	56
	4.1 선	체 구조용 강재	56
	4.1.1	열가공 제어(TMCP)강	56
	4.1.2	고항복강	63
	4.2 용	접 재료	65
	4.2.1	일렉트로슬랙 용접용 재료 및 특성	65
	4.2.2	일렉트로가스 용접용 재료 및 특성	68
	4.3 일	렉트로슬랙 고용착 용접 기법 개발	71
	4.3.1	비소모 가이드 튜브 방식 용접	71

432 소모 가이드 튜브 방식의 개량 용접	74
4.3.3 2전극(탄뎀) 일렉트로슬랙 용접	
4.3.4 실험 기법별 용접 조건 및 충격 인성	
4.4 일렉트로가스 용접의 초후판 적용 기법 개발	
4.4.1 컴바인드 용접	94
4.4.2 역 컴바인드 용접	
제 5 장 대입열 용접부의 기계적 특성 개선	101
5.1 용접 실험	101
5.1.1 시험편	101
5.1.2 용접 방법 및 조건	106
5.1.3 모재 및 용접부의 화학 조성	110
5.2 실험 결과 분석	113
5.2.1 기계적 특성	113
5.2.2 단면 조직 검사 및 분석	133

제	6	장	결	론		15	51
---	---	---	---	---	--	----	----

참 고 문 헌	153
---------	-----

# A Study on The Development of High Deposition Automatic Welding for Erection Stage in Shipbuilding

Woo-Hyeon Choe

Division of Ocean System Engineering, Graduate School, Korea Maritime University

#### Abstract

The Korea shipbuilding industry continues to design and build the most advanced commercial vessels in the world and has the global competitiveness in the world shipbuilding market recently. Big yards maintain their competition capacity by develop and control the new block assembling and erection technologies among them. Unit block size and its weight has been larger and larger, and working day in dry dock, berth or grand block assembly area has been shorter and shorter.

However, to keep their competitiveness the shipbuilders must develop and improve new technologies not only ship design part but also production processes. Especially in erection stage, by application of high deposition heavy duty welding processes such as Electroslag and Electrogas welding can reduce working time and enabling to get more cost-effective and competitiveness.

As the conventional method of high efficiency welding of vertical joints, there are known various methods, such as electroslag welding, electrogas welding and consumable nozzle electroslag welding methods, and these methods have been employed in the art. In each of these known welding methods, since a groove gap is necessary, the sectional area of the groove is large, resulting in disadvantages such as excessive heat input and relatively low welding speed.

Accordingly, problems are left unsolved as regards the welding efficiency and the toughness of the heat-affected zone. Disadvantages of these conventional welding methods, there has been proposed a vertical welding method in which a small diameter wire electrode is oscillated and welding is conducted in an atmosphere of carbon dioxide gas and/or other inert gases, and this method is practiced in some construction work.

The objectives of this study and experimental research are to review current welding processes that are applied to pre-erection and erection stage of shipbuilding construction for instance high heat input or high deposition rate processes such as electroslag welding, electrogas arc welding and multi-pole submerged arc welding using smaller diameter electrode wire and to improve its mechanical properties, especially V-notch toughness to extend application range for actual fabrication work. Modified base materials and filler materials, weld preparations, weld qualities, qualification of welding procedures, qualification of welding personnel and, fabrication and inspection requirements for welds are included to the study with many experimental testing to gain the remarkable result of proceeds.

Welding work in pre-erection or erection stage of shipbuilding construction to be carried out in flat and vertical upward position mostly and Electrogas welding is actively applied especially for vertical butt joint of thicker steel plate recently.

In this study considered how to develope and improve mechanical

- v -

properties of weld metal and HAZ in high heat input welding processes such as Electrogas welding and Electroslag welding with its welding equipment in order to extend the application range to the longitudinal members and hatch coaming parts of container ship. higher reliability, larger scale, and reduced weight are required for the welded steel structures, lately, in view of social requirements such as enhanced safety, environmental protection and energy conservation, and also of severer resource development conditions.

Moreover there has been a strong need for the development of a heavy steel plate product that is excellent in the toughness of heat affected zones of a welded joint and that meets the requirements of high heat input welding, high strength, large thickness, and high toughness. Some components of welding system and parameters were modified to get the faster travel speed and reduce weld heat input, and also by adding additional filler rods or tubes increase the amount of deposited weld metal. With the test get some good date can apply to actual fabrication work and recommend items to manufacture welding materials make better.

Above all things it's a fruition that to prepare the possibility of application of Electroslag welding to the shipbuilding construction which fill up the gap of stoppage days of more than 20 years.

– vi –

# List of Tables

Table	1.1	Historical development of manufacturing unit processes7
Table	2.1	Number of block per ship and dry dock working day23
Table	2.2	Increasing productivity both value and production
Table	3.1	Chemical composition of wire electrode
Table	3.2	Comparison of Welding parameters of NGI-ESW and conventional Electroslag welding for 50mm thick steel plate
Table	3.3	Number of wires and size of guide tubes for plate thickness37
Table	3.4	Welding productivity comparison for Narrow gap welding processes50
Table	4.1	Chemical composition of EH36 (wt%)56
Table	4.2	Mechanical properties of EH3656
Table	4.3	Chemical composition of EG36 of high heat input steel (wt%)58
Table	4.4	Mechanical properties of EG36 of high heat input steel58
Table	4.5	Chemical composition of EH40 (wt%)64
Table	4.6	Mechanical properties of EH-4064
Table	4.7	An example of chemical composition for YP460 (wt%)64
Table	4.8	An example of mechanical properties for YP46064
Table	4.9	Chemical composition of YM-55HF for ESW (wt%)61
Table	4.10	Mechanical properties of YM-55HF for ESW61
Table	4.11	Chemical composition of SC-EG2 (wt%)68
Table	4.12	Mechanical properties of SC-EG268
Table	4.13	Chemical composition of DWS-43G (wt%)68
Table	4.14	Mechanical properties of DWS-43G69
Table	4.15	Chemical composition of EG-3 (wt%)69
Table	4.16	Mechanical properties of EG-369
Table	4.17	Chemical composition of DWS-1G (wt%)69

Table 4.18	Mechanical properties of DWS-1G69
Table 4.19	Chemical composition of DWS-50GTF/R (wt%)70
Table 4.20	Mechanical properties of DWS-50GTF/R70
Table 4.21	Chemical composition of EG-3T and YM-55H (wt%)70
Table 4.22	Mechanical properties of EG-3T and YM-55H70
Table 4.23	Welding condition for Non-consumable guide Electroslag welding84
Table 4.24	Welding condition for consumable guide Electroslag welding85
Table 4.25	Impact test result of consumable guide Electroslag welding [25mm Plate thick./I-groove/23mm Root gap]85
Table 4.26	Impact test result of consumable guide Electroslag welding [37mm Plate thick./I-groove/23mm Root gap]86
Table 4.27	Impact test result of consumable guide Electroslag welding [37mm Plate thick./I-groove/23mm Root gap]86
Table 4.28	Impact test result of consumable guide Electroslag welding [55mm Plate thick./I-groove/23mm Root gap]
Table 4.29	Impact test result of consumable guide Electroslag welding [55mm Plate thick./I-groove/23mm Root gap]
Table 4.30	Impact test result of consumable guide Electroslag welding [55mm Plate thick./I-groove/8mm Root gap]
Table 4.31	Impact test result of consumable guide Electroslag welding [65mm Plate thick./V-groove/8mm Root gap]
Table 4.32	Impact test result of consumable guide Electroslag welding [65mm Plate thick./Double V-groove/8mm Root gap]89
Table 4.33	Impact test result of consumable guide Electroslag welding [65mm Plate thick./I-groove/23mm Root gap]
Table 4.34	Impact test result of Non-consumable guide Electroslag welding [25mm Plate thick./I-groove/23mm Root gap]90
Table 4.35	Impact test result of Non-consumable guide Electroslag welding [25mm Plate thick./V-groove/8mm Root gap]90
Table 4.36	Impact test result of Non-consumable guide Electroslag welding [35mm Plate thick./V-groove/8mm Root gap]91

Table	4.37	Impact test result of Non-consumable guide Electroslag welding [37mm Plate thick./I-groove/23mm Root gap]91
Table	4.38	Impact test result of Non-consumable guide Electroslag welding [37mm Plate thick./V-groove/8mm Root gap]92
Table	4.39	Impact test result of Non-consumable guide Electroslag welding [55mm Plate thick./I-groove/23mm Root gap]92
Table	4.40	Impact test result of Non-consumable guide Electroslag welding [55mm Plate thick./V-groove/8mm Root gap]93
Table	4.41	Impact test result of Non-consumable guide Electroslag welding [55mm Plate thick./V-groove/8mm Root gap]93
Table	4.42	Welding condition for each test process107
Table	5.1	Chemical composition of base metal (wt%)110
Table	5.2	Mechanical properties of base metal110
Table	5.3	Chemical composition and mechanical properties of weld metal(wt%)110
Table	5.4	Chemical composition of filler metal in Electroslag welding (wt%)111
Table	5.5	Mechanical properties of filler metal in Electroslag welding111
Table	5.6	Mechanical properties of filler metal in Combined-process111
Table	5.7	Chemical composition of filler metal in Electrogas welding (wt%)111
Table	5.8	Mechanical properties of filler metal in Electrogas welding111
Table	5.9	Chemical composition of filler metal in Electrogas welding (wt%)112
Table	5.10	Mechanical properties of filler metal in Electrogas welding(wt%)112
Table	5.11	Mechanical properties of weld metal in each process114
Table	5.12	Results of Charpy V-notch impact tests for weld metal in each process125
Table	5.13	Results of Charpy V-notch impact tests for weld metal in each process125
Table	5.14	Chemical composition of weld metal for Electroslag and Electrogas welding (wt%) $135$

# List of Figures

Fig.	2.1	Shipbuilding work of The World War ages9
Fig.	2.2	Work flow for shipbuilding construction10
Fig.	2.3	Full container carrier - 6200TEU11
Fig.	2.4	Ultra large crude oil carrier (ULCC) (564,763 DWT) - Jahre Viking12
Fig.	2.5	Sketch of the skid system on the floor of dry dock13
Fig.	2.6	Final erection of large stem block14
Fig.	2.7	Large stem part of the ship erecting by two mass15
Fig.	2.8	Large stem part of the ship erecting by two mass15
Fig.	2.9	Underwater erection of stern block of the ship16
Fig.	2.10	Completion of Stern block erection16
Fig.	2.11	Building sequence of skid launching system process17
Fig.	2.12	Ground building & launching process18
Fig.	2.13	Large block erection in the floating dock20
Fig.	2.14	Bulbous bow block erection of an aircraft carrie20
Fig.	2.15	A coast guard vessel launching by a huge barge crane21
Fig.	3.1	Conventional Electroslag Welding
Fig.	3.2	Non-consumable guide multi-electrode Electroslag Welding
Fig.	3.3	Consumable guide multi-electrode Electroslag Welding27
Fig.	3.4	Deposition rate comparison in arc welding processes
Fig.	3.5	Consumable guide tube Electroslag welding
Fig.	3.6	An example of macro section of Electroslag welding
Fig.	3.7	Consumable guide tube for NGI-ESW
Fig.	3.8	Heat input influences cooling rate

Fig.	3.9	Diagram of interaction between phases in electroslag process41
Fig.	3.10	Schematic presentation of Non-consumable type single electrode Electrogas welding44
Fig.	3.11	Control of molten pool and copper shoe in Electrogas welding45
Fig.	3.12	Non-consumable type multi electrode Electrogas arc welding47
Fig.	3.13	Schematic presentation of Simplified Electrogas arc welding
Fig.	3.14	Comparison of Narrow gap welding processes
Fig.	3.15	Variation of heat input to the workpiece with power density of the heat source53
Fig.	3.16	Heat intensity controls melting
Fig.	3.17	Heat intensity of steel55
Fig.	4.1	Accelerated cooling of TMCP steel
Fig.	4.2	Comparison of yield strength of TMCP with conventional rolled steel57
Fig.	4.3	Comparison of tensile strength of TMCP with conventional rolled steel57
Fig.	4.4	An example of Preheating guide line for welding61
Fig.	4.5	Non-consumable guide Electroslag welding test and its equipment72
Fig.	4.6	Solid wire and its feeder for Non-consumable guide Electroslag welding73
Fig.	4.7	Schematic view of wire guide tube installed with filler rod75
Fig.	4.8	Welding sequence of Two-run method with Double V-groove75
Fig.	4.9	Welding completed for one side of Two-run method with Double V-groove75
Fig.	4.10	Two run method in Electroslag welding process (Double V-groove)76
Fig.	4.11	Welding power supply, wire feeding unit and water cooling equipment for Two-run method
Fig.	4.12	Completion of welding with Two-run method Electroslag welding77
Fig.	4.13	Comparison of weld pool geometry on susceptibility to hot cracking79
Fig.	4.14	Weld pool comparison depending on voltage79
Fig.	4.15	Weld pool comparison depending on welding curren80
Fig.	4.16	Weld pool comparison depending on electrode extension80
Fig.	4.17	An example of comparison of Form factor80

Fig.	4.18	Schematic drawing of Tandem electrode type Electroslag welding with Double V-groove
Fig.	4.19	One-power two-wire Electroslag welding system82
Fig.	4.20	Two-power two-wire Electroslag welding system83
Fig.	4.21	Schematic diagram of Simplified Electrogas welding95
Fig.	4.22	Groove condition of combined and conventional electrogas welding 95
Fig.	4.23	Comparison of macro section of Electrogas welding combined with FCAW and FCAW
Fig.	4.24	Groove condition and welding sequence of Reverse combined Electrogas welding
Fig.	4.25	Macro section of Electrogas welding(a) and Reverse combined Electrogas welding with FCAW(b) of 75mm thick plate
Fig.	4.26	Water cooled copper shoe for Double V-groove Electroslag welding99
Fig.	5.1	Electroslag welding test assembly for 65mm thick steel plate101
Fig.	5.2	Grove shape of Electroslag welding test for 65mm thick steel plate102
Fig.	5.3	The arrangement of test assembly and guide tube for Electroslag welding 65mm thick steel plate
Fig.	5.4	Electrogas welding test assembly for 65mm thick steel plate103
Fig.	5.5	Grove shape of Electroslag welding test for 65mm thick steel plate103
Fig.	5.6	The arrangement of test assembly and ceramic backing wit 65mm thick steel plate for Electrogas welding104
Fig.	5.7	Welding equipment for 2-pole Electroslag welding test105
Fig.	5.8	Welding equipment for 2-pole Electrogas welding test105
Fig.	5.9	A view of Electroslag welding test106
Fig.	5.10	A view of Electrogas welding test106
Fig.	5.11	A concept of mis-operation of water cooled copper shoe108
Fig.	5.12	Macro section of gaseous defect of Electroslag(a) and Electrogas welding(b)109
Fig.	5.13	Completion of welding
Fig.	5.14	Location of specimens in weld metal113

Fig. 5.15	Round tensile specimen(weld metal)113
Fig. 5.16	Hardness test with rows of hardness measurements115
Fig. 5.17	Hardness traverses along 10mm distance from top surface in Electrogas welding-2P(50GT)
Fig. 5.18	Hardness traverses along 10mm distance from top surface in Electrogas welding-2P(EG-3)
Fig. 5.19	Comparisons of hardness traverses along 10mm distance from top surface in Electrogas welding- $2P(50GT)$ and Electrogas welding(EG-3)118
Fig. 5.20	Hardness traverses along 10mm distance from top surface in Electroslag welding-2P
Fig. 5.21	Hardness traverses along 10mm distance from top surface in Electroslag welding-1P
Fig. 5.22	Comparisons of hardness traverses along 10mm distance from top surface in Electroslag welding-2P and Electroslag welding-1P121
Fig. 5.23	Comparisons of hardness traverses along 10mm distance from top surface in Electrogas welding and Electroslag welding122
Fig. 5.24	Notch located at center of weld metal123
Fig. 5.25	Charpy V-notch test specimen
Fig. 5.26	Results of Charpy V-notch impact tests for weld metal in Electroslag welding-1P
Fig. 5.27	Results of Charpy V-notch impact tests for weld metal in Electroslag welding-2P
Fig. 5.28	Results of Charpy V-notch impact tests for weld metal in Electrogas welding-2P(50GT)
Fig. 5.29	Results of Charpy V-notch impact tests for weld metal in Electrogas welding-2P(EG-3)
Fig. 5.30	Comparisons of Charpy V-notch impact test result for weld metal in Electrogas welding-2P(EG-3) and Electrogas welding -2P(50GTR)130
Fig. 5.31	Comparisons of Charpy V-notch impact test result for weld metal in Electrogas welding-1P and Electrogas welding-1P131

Fig. 5.32	Comparisons of Charpy V-notch impact test result for weld metal in Electrogas welding and Electroslag
Fig. 5.33	Macrostructure of Electroslag welding-1P and 2P136
Fig. 5.34	Microstructure of Electroslag welding-2P(X200)137
Fig. 5.35	SEM analysis of weld metal in Electrogas welding-2P(50GT)138
Fig. 5.36	SEM analysis of weld metal in Electrogas welding-2P(EG-3)139
Fig. 5.37	SEM analysis of weld metal in ESW-1P process140
Fig. 5.38	SEM analysis of weld metal in Electroslag welding-2P141
Fig. 5.39	SEM fractographs of weld metal depend on test each temperature in Electrogas welding-2P(50GT)143
Fig. 5.40	SEM fractographs of weld metal depend on test each temperature in Electrogas welding-2P(50GT)144
Fig. 5.41	SEM fractographs of weld metal depend on test each temperature in Electrogas welding-2P(EG-3)145, 146
Fig. 5.42	SEM fractographs of weld metal depend on test each temperature in Electroslag welding-1P process
Fig. 5.43	SEM fractographs of weld metal depend on test each temperature in Electroslag welding-2P process

## Abbreviations

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials							
AISI	: American Iron and Steel Institute							
ASTM	: American Society for Testing and Materials							
BIRL	: Basic Industrial Research Laboratory							
CE, Ceq	: Carbon Equivalent							
CESC	: Centrifugal Electro Slag Casting							
CVN	: Charpy V Notch							
DC	: Direct Current							
DWT	: Dead Weight Tonnage							
EBW	: Electron Beam Welding							
EGW	: lectro Gas Welding							
ESH	: Electro Slag Hardfacing							
ESR	: Electro Slag Remelting							
ESW	: Electro Slag Welding							
FAB	: Flux Asbestos Backing							
FCAW	: Flux Cored Arc Welding							
FCB	: Flux Copper Backing							
FHWA	: Federal Highway Administration							
FPSO	: Floating Production, Storage and Off-loading vessel							
GMAW	: Gas Metal Arc Welding							
GPE	: Grand Pre-Erection							
GT	: Gross Tonnage							
GTAW	: Gas Tungsten Arc Welding							
HAZ	: Heat Affected Zone							

HSLA	: High Strength Low Alloy steel					
LNG	: Liquified Natural Gas					
LOA	: Length Of All					
LOL	: Lifting Off Launch					
LPG	: Liquified Petroleum Gas					
MAG	: Metal Active Gas					
MIG	: Metal Inert Gas					
NDT	: Non-Destructive Test					
NGI	: Narrow Gap Improved					
PE	: Pre Erection					
PWHT	: Post Weld Heat Treatment					
RT	: Radiographic Test					
SAW	: Submerged Arc Welding					
SCR	: Silicon Controlled Rectifier					
SEM	: Scanning Electron Microscope					
SLS	: Skid Launching System					
TEU	: Twenty foot Equivalent Unit					
TIG	: Tungsten Inert Gas					
ТМСР	: Thermo Mechanical Controlled Process					
UT	: Ultrasonic Test					
VLCC	: Very Large Crude oil Carrier					
VT	: Visual Test					

#### 제1장서론

1.1 연구 개발의 배경

용접은 금속을 영구적으로 접합시키는데 있어서 가장 경제적이고 효율적인 방법이다. 두 개 이상의 피결합 금속을 하나의 개체로서 기능하도록 하는데 있 어서 견줄 대상이 없을 정도로 탁월하고 손쉬운 접합방법이라고 할 수 있는 것 이다. 용접은 특히 경제적인 측면에서 검토할 때 매우 중요하게 고려하여야 할 인자이다.

세계 경제의 중심으로 큰 비중을 차지하고 있는 미국에서만 하더라도 용접은 국가 GNP의 50% 이상이 용접과 여러 가지 다양한 형태로 연관되어 있다고 한 다. 용접은 또한 산업공정들 가운데서도 상위에 랭크되어 있으며, 여타 산업공 정들에 비하여 산업과학계에 더 다양하게 적용되고 있는 것이 사실이다.

오늘날 인류의 일상생활에서 사용하는 거의 대부분의 것들은 용접이 된 것이 거나 용접이 된 장비로 만들어진 것이다. Table 1.1은 인류 역사에 있어서 제조 공정단위를 보여주고 있는데 용접이라는 획기적 가공 수단이 발명되어 본격적 으로 사용되기 시작한 20세기는, 18세기의 영국에서의 산업혁명 이후의 소리 없는 제 2의 혁명기라고 하여도 과언이 아닐 것이다[1].

조선 산업 분야에 있어서 대표적인 대입열 수직 자동용접법은 일렉트로슬랙 용접 (ESW)과 일렉트로가스 용접(EGW)이다. 1958년도에 소련은 벨기에 세계박람회에서 일렉트로슬랙 용접법을 발표하기에 이르렀으며, 소련 자국 내에서는 이미 1951년부 터 사용해 오던 용접법이었다. 그러나 사실 이것은 미국의 R. K. Hopkins가 1940년 도에 특허를 인정받은 기술을 바탕으로 개발한 것이었다. 주로 대형기기 등 후판의 접합 작업에 사용되었고, 이 방법을 응용한 일렉트로가스 용접법이 1961년도에 개발 되어 중대형 구조물 제작 시 후판의 수직맞대기 용접에 적용되어 오고 있다.

Year	Casting	Deformation	Joining	Machining	Ceramics	Plastics
4000 BC	Stone & Clay moulds	Bending, Forging(Au, Ag, Cu)	Riveting	Stone, Emery corundum, Garnet, Flint	Earthenware	Wood, Natural fibers
2500 BC	Lost wax (bronze)	Shearing, Sheet forming	Soldering, Brazing	Drilling, Sawing	Glass beads, Potters wheel	
1000 BC		Hot Forging (iron), Wiredrawing	Forge welding, Gluing	Iron saws	Glass pressing, Glazing	
0AD		Coining(brass), Forging(steel)		Turning(wood), Filing	Glass blowing	
1000		Wire drawing			Stoneware, Porcelain(Ger many)	
1400	Sand casting - casting	Water hammering		Sand paper	Majolica, Crystal glass	
1600	Permanent mould	Tin plate can, Rolling(Pb)		Wheel lathe(wood)		
1800	Flasks	Steam hammer, Tin plate rolling		Boring, turning, Screw cutting	Plate glass, porcelain(Ger many)	
1850	Centrifugal moulding machine	Rail rolling, Continuous rolling		Shaping, milling, Copying lathe	Window glass form slit cylinder	Vulcanization
1875		Tue rolling, extrusion(Cu)		Turret lathe, universal mill, vitrified wheel		Rubber extrusive moulding
1900		Wire (form powder)	Oxyacetylene, Arc welding, Electrical resistance welding	Geared lathe, Automatic screw machine, Hobbing, High speed steel, Synthetic SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Automatic bottle making	
1920	Die casting	Extrusion (steel)	Coated electrode			Bakelite, PVC casting, Cold moulding, Injection moulding
1940	Lost wax for engineering pastes, Resin- bonded sand	Cold extrusion (steel)	Submerged arc			Acrylics, EMMA, PE, Nylon, Synthetic- rubber Transfer moulding
1950	Ceramic mould, Nodular iron, Semi conductors		TIG welding, MIG welding, Electroslag	EDM		ABS, Silicates, Fiber carbonates, Polyurethane
1960			Electrogas Plasma arc	Manufactured diamond	Float-glass	Acetals, Poly- carbonates

Table 1.1 Historical development of manufacturing unit processes

중화학공업이 집중적으로 육성되기 시작하면서 강구조물의 생산량이 증가되고 용 접 시공량이 늘어나면서 국내에서도 본격적으로 용접기기와 용접재료 등이 생산되기 시작하였고, 높은 생산성에의 요구 환경이 조성되고 새로운 기법의 도입과 연구가 이루어지기 시작하였다.

도크 내에서는 용접 이음이 대부분 아래보기자세와 수직자세로 이루어진다. 아래보기 자세 이음의 경우에는 서브머지드 아크용접과 플럭스 코어드 아크 용 접을 적용하고, 수직자세의 경우 일렉트로가스 용접법과 일렉트로슬랙 용접법이 대표적이다. 그 중 일렉트로슬랙 용접법의 사촌격인 일렉트로가스 용접법은 중대 형 컨테이너선과 대형 탱커(VLCC), 액화천연가스 운반선(LNG) 등을 중심으로 활발하게 사용되고 있으나 일렉트로슬랙 용접법은 고장력강이 본격적으로 적용 되기 전인 1980년대 중반까지 탱커에 주로 적용되어 오다가 강재 개발에 비해 용접재료 개발이 뒤쳐지면서 사용이 중단되었고, 점차 조선소에서 자취를 감추 게 되었다[2]. 그러나 교량 제작, 대규모 기기류의 몸체나 하부구조 용접 등에 는 꾸준히 적용되어 왔으며, 용접장비, 용접재료, 시공기법 등에서 나름대로 발 전을 이루어 온 것으로 평가되고 있다.

일렉트로슬랙 용접법은 초후판 용접에 있어서 가장 고능률적인 용접법의 하나 임에도 불구하고 그 장치나 용접법의 특수성 때문에 이것을 직접 연구하거나 사용하는 곳을 제외하고는 그다지 많이 알려지거나 보급되지 않아 주로 저탄소 강 위주로 적용이 되어 왔으나 현재는 높은 기계적 특성을 갖는 강재에도 적용 할 수 있게 되었으며, 대개 경제성이 있는 부재 두께는 25mm정도이지만 10mm부 터 300mm 정도까지 적용된 사례가 있고, 그외 전통적 용접법의 하나인 서브머 지드아크 용접에 대한 경량화, 고용착화를 위한 신 개념의 연구 및 개발의 필 요성이 시급히 요청되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 선박이 특히 컨테이너 전용 운반선을 중심으로 규모가 점차 대형화 되어감에 따라 그에 사용되는 금속 재료의 등급도 고급화 되고, 부재의 두께도 증가되어 가고 있는 추세에 반하여 보다 치열해져 가고 있는 국제 경쟁 환경으로 인하여 도크 내 작업 공기는 더욱 단축되어져야 하는 실정을 충분히

- 3 -

반영, 선측과 갑판부에 집중되어 있는 후판용접이음을 보다 신속하고 효율적으 로 접합할 수 있는 용접법을 연구하여 생산 현장에 적용하고자 하였으며, 아울 러 이러한 용접부는 저온 충격 인성을 포함한 제 기계적 성질이 충분히 만족될 수 있도록 실험, 고찰하였다. 조선에서의 용접법은 생산기술이 변화함에 따라 적용되는 프로세스가 수동용 접에서 반자동용접, 완전자동용접 쪽으로 진행되어 생산성을 향상시킬 수 있는 쪽으로 발전되어 왔다. 1970년대 초 탄산가스 아크 용접기가 시험적으로 도입 된 후 1980년 초부터 국내 조선 산업의 현장에 탄산가스아크 용접(MAG)과 플 럭스 코어드 아크 용접(FCAW)이 본격적으로 사용되기 시작하면서부터 용접 전 분야에 걸쳐 매우 짧은 시간에 광범위하게 파급되었고 아울러 휴대식 이동 장치나 고정식 대형 이동장치를 사용한 용접의 기계화와 자동화 그리고 주로 다축 관절형 로봇장치를 이용한 로봇화가 추진되어 용접의 자동화는 괄목할만 한 성장과 발전을 이루었다.

일반적으로 조선에 적용되는 용접은 크게 선체 구조물 부분과 의장부의 용접 으로 구분할 수 있다.

선체용접의 경우 자동용접법인 서브머지드 아크용접(SAW)과 함께 플럭스 코어드 아크 용접이 대부분을 차지하는 주력 용접법으로 되어 있으며, 수직 후 판 이음부에 일렉트로가스 용접법이 사용되고 있다.

대부분의 조선소에서 건조하는 선박건조공정에 있어서의 핵심은 적정 품질을 유지하면서 건조 공기를 최대한 단축시키는 것으로서 이는 블록을 최종 조립하 는 단계인 소위 탑재 공정에서 판가름이 나고 있다고 하여도 과언이 아니다. 선체 건조에 들어갈 부재들을 마킹, 절단, 가공, 조립하는 선각공장이나 조립장 의 경우 공정을 자동화하기 위한 장치나 장비들을 동원하기가 비교적 용이하다 고 할 수 있지만 선체가 온전한 겉모습을 거의 다 갖추기 직전의 최종 탑재 단 계에서는 이와는 사정이 달라 각종 자동 작업 장치들의 접근성이 매우 낮아지 게 된다.

특히 용접 작업에 있어서는 선체의 상갑판부와 외판 수직 이음부를 제외한 대부분의 용접 이음부가 선체 블록 내부에 형성되어 있기 때문에 작어 공정의 진행이 어렵고 시간도 많이 소요되게 된다. 도크 내 작업공정 시간을 가능한 한 짧게 해야 하는 실정에 비추어 이와 같은 장애 요인이 있으므로 외부에서의 접근성이 상대적으로 좋은 갑판부와 수직 외판부의 맞대기 용접부는 서브머지 드아크 용접과 일렉트로가스 용접으로 각각 수행하며, 내부재의 용접은 플럭스 코어드 아크 반자동 용접 및 소형 휴대식 용접 캐리지를 활용한 기계화 용접이 이루어져야 한다.

일렉트로가스 용접이 주로 적용되고 있는 후판 부위는 외판의 이음부 뿐 아니 라 그 상부 쪽의 해치 코밍(Hatch coaming) 부분도 포함되고 있는데 이 부분 은 화물창의 해치 커버(Hatch cover)가 여닫히며 접촉하는 부분으로서 높이는 선체의 크기에 따라 다르지만 대체로 1m에서 2m 정도의 범위로 짧으며 두께 는 대체로 50~100mm 정도이다.

한편 1980년대 중반까지 상갑판 종통재 간의 수직 맞대기용접부에 적용되었 던 일렉트로슬랙 용접은 고인성, 고강도 용접재료의 개발과 용접 공정기술의 발전으로 조선 산업에 재적용할 수 있는 여건이 형성되어가고 있는 것은 고무 적인 현상이라고 할 수 있다.

세계적으로 선박의 대형화를 주도하고 있는 컨테이너선은 현재 10000 TEU 급은 일반화되어 있으며 12000 TEU급의 초대형선선의 건조도 목전에 두고 있 는 것이 사실이다. 여기에는 두께 80mm 이상의 고장력강을 비롯하여 항복 강도 가 460MPa에 이르는 두께 100mm 이상의 고인성, 고항복 강재의 개발도 발 빠 르게 이루어지고 있으므로 이를 적용하기 위한 용접공정기술도 사전에 안정되 게 확보되어야 할 것이다.

위에서 언급한 바와 같은 초후판 용접 작업이 이루어져야 하는 조선소들에서 는 다양하고 독특한 선체건조공법들을 개발하여 사용하고 있는데, 이러한 공법 들의 공통적 개념은 도크 내에 들어갈 선체 블록의 대형화하여 탑재될 블록의 수량을 최소화함으로써 용접이음의 길이를 최소화하고, 용접 작업을 단시간에 수행함으로써 도크의 회전율을 높이는 것이다. 이것은 바로 생산비용의 저감, 매출의 증대를 이루어 회사의 이익 증가로 이어지게 되는 것이다.

이러한 사이클에서 핵심적인 비중을 차지하고 있는 것이 일렉트로가스 용접

과 일렉트로슬랙 용접법 등의 대입열, 고능률 용접기술이다. 이들 용접법에 대 하여 현장에서 요구되고 있는 것으로서 먼저 철강 재료에의 초후판, 고강도화 및 고인성화이며, 둘째는 그러한 초대입열을 감당할 수 있는 용접재료의 준비 이지만 이의 개발 속도에 제한이 따르므로 취약한 부분을 보완하여 능률과 용 접부의 품질을 확보할 수 있는 용접 파라미터의 개발이다.

본 연구에서는 주어진 강판과 용접재료를 바탕으로 용접 그루브와 용접 전류 및 전압, 용접 속도 등으로 용접 입열량을 제어하여 용접금속과 용접 열영향부 의 기계적 성질을 확보할 수 있는 파라미터를 실험적 방법으로 구현하였다.

### 제 2 장 선박 탑재 공정

2.1 선박 탑재공정의 개요

2.1.1 선박의 건조 공정

목재를 사용하여 선박을 건조하던 오랜 세월 동안 선체의 건조 재료와 사용 가능한 접합방법의 한계로 인하여 선박의 건조과정은 용골 거치(Keel laying), 늑골(Frame) 설치, (Shell) 조립, 격벽(Bulkhead) 설치, 갑판(Deck) 설치로 이어 지는 공정에 거의 변화의 여지가 없었다. 이러한 공정들은 한 공정이 끝나면 다음 단계로 넘어가는 식으로 진행되었다.

목재에서 철재로 재료가 바뀌면서 접합방식도 못과 볼트류에서 리벳으로 바 뀌었으나, 건조공정은 변화되지 않았다. 제1차 세계대전 중 선박 건조량의 증가 는 공장에서 제작한 부분품을 선대로 이송하여 조립하는 방식(Part-by-part, Fig. 2.1(a))을 탄생시켰으며 이 방식은 외판의 모든 용접 이음 그리고 모든 프 레임 단위로 작업을 위한 통행을 필요로 했으므로 엄청난 양의 비계 (Scaffolding)를 설치해야 했다(Fig. 2.1(b)).

제2차 세계대전 중 군수물자와 병력의 수송을 위해 많은 화물선이 미국에서 건조되었다. 최대한 빨리 다수의 선박을 건조해야하는 필요성은 설계와 생산에 대량생산체제로의 변화를 요구하였다. 이러한 대량생산을 위해 리버티 쉽 (Liberty Ship)이라고 불리는 표준선이 설계되었고, 점차적으로 블록의 개념과 선행의장의 개념이 도입으로 건조기간이 단축되었다.

모든 이음부에 용접을 적용한 리버티 쉽은 1941년에서 1945년 사이에 모두 2710척이 건조되었고 그 중 253척이 전쟁 중에 침몰하였다. 리버티 쉽의 제원 은 전폭 16.76m, 높이 8.16m 그리고 전장은 129.81m이었고, 배수량 14,245톤, 적재톤수 10,856톤 이었으며, 2500마력짜리 엔진을 장착하고 최대속력 11노트를 내는 함선이었다.

1920년대에 조선업계에 처음 용접이 채택되었고, 1940년대 초 제2차 세계대

전으로 선박 건조량이 증가하면서 용접의 적용도 증가 하였으며 한동안은 선체 의 횡이음은 용접, 종이음은 리벳으로 처리하거나 아니면 그 반대로 적용하는 등 두 가지 접합 방식이 혼용되었다.

리벳이나 기타 접합 방법을 전혀 사용하지 않고 순수하게 용접만을 사용하여 건조된 선박은 362톤급 "Fullarger호"로서 1920년 영국에서 건조된 것이다. 용 접은 아래보기 자세의 작업에서 가장 높은 생산성을 얻을 수 있으므로 이러한 좋은 자세에서 작업이 가능하도록 하기 위해 선대에서 이루어지던 작업이 점



(a)



(b)Fig. 2.1 Shipbuilding work of The World War ages(a) Erection work with part-by-part method(b) Many scaffolding installed on hull side

차 정반 위의 작업으로 이동하면서 조립 전용 정반이 만들어지고 단일 조립품 의 크기도 점점 증가하게 되었다. 최근에 있어서 선박은 대개 다음의 Fig. 2.2와 같은 작업과정을 거쳐 건조가 되는데 이 중 도크 설비는 고정 설비의 하나로서 선체를 온전한 하나의 몸체로 형성하는데 소요되는 필수 설비이며, 이 도크 내에서의 작업 기간에 따라 도크 회전률이 결정되며 이는 곧 연간 건조 척수를 결정해주므로 조선소의 연간매출 액과 직결되기 때문에 도크 기간을 여하히 단축시키느냐에 모든 역량과 목표가 집중되게 된다.

하나의 선박이 만들어지기 위해서는 선체, 의장, 기관, 전기, 선실, 페인트 등 의 분야가 서로 연관되어 최종적으로 완성된다고 할 수 있다. 이 중 용접은 선 박 건조의 전부라고 할 수 있을 정도로 광범위하고 다양한 방법이 적용되는데 이것을 수동용접, 반자동용접 자동용접 등으로 나누어 고려할 수 있다.



Fig. 2.2 Work flow for shipbuilding construction

2.1.2 블록의 대형화 및 선행탑재

일반적으로 초대형 운반선(Very Large Crude oil Carrier, VLCC)이나 대형 컨테이너선의 경우 이전에는 블록 하나의 크기를 수백 톤짜리로 대형화 하더라 도 블록이 조립되고 탑재되어 선체가 완성되는데 있어서 약 200개에서 400개 정도의 수량이 되는데 이 블록을 각각 하나씩 기중기 등으로 도크 내에서 조립 해 나가는 소위 탑재 기간이 최소 2~3개월이 소요되었었다.

그러나 근년에 들어서서는 이 각개의 블록을 조립장에서 서로 사전 결합을 하여 보다 큰 블록으로 만들어 도크에서 탑재되는 블록의 수량을 대폭 줄이게 되는 소위 선행탑재(Pre erection, PE)공법을 사용함으로써 도크 내 작업기간은 더욱 줄어들게 되었다.

다음의 Fig. 2.3은 최근에 건조된 최신형의 6200TEU급 컨테이너선의 시운전 중인 모습이다.



Fig. 2.3 Full container carrier - 6200TEU

한 개당 중량 100톤 이내의 크기의 블록을 10개 내지 20개 정도를 전용 선행 탑재장에서 조립하여 최대 중량 약 3,000톤 정도의 크기 이내로 만들어 도크에 서 탑재하는 대형 선행탑재, 스키드조합(GPE, Skid)공법도 활발하게 적용되고 있다. 그 외 스키드 진수시스템(SLS)공법, 육상 총조립 공법 등 여러 가지 획 기적인 블록 조립 및 탑재공법들이 속속 개발되어 국내 대형조선업체들을 중심 으로 이를 활용하여 큰 생산성 제고를 이룩하고 있는 상황이며, 향후 계획되고 있는 것 중에는 블록의 크기를 10,000톤 내외로 초대형화 하여 웬만한 선박은 블록 2-3개 정도의 결합 작업만으로 완성시키고자 하는 소위 테라(Tera)공법도 연구되고 있는 것이 사실이다.

Fig. 2.4는 한 때 세계 최대크기의 유조선이었던(ULCC) 자흐레 바이킹호의 모습으로서 전장, 전폭 및 깊이가 각각 485.46m, 69m, 24.6m로서 재화중량이 564,763톤이나 된다. 다음의 Fig. 2.5~2.14에서는 이와 같은 여러 가지 블록 공 법들을 간단한 그림과 사진을 통하여 보여 주고 있다.



Fig. 2.4 Ultra large crude oil carrier (ULCC) (564,763 DWT) - Jahre Viking

2.2 주요 블록 공법의 종류와 특성

2.2.1 대형 선행탑재와 스키드 조합 공법

대형 선행탑재와 스키드 조합(GPE + SKID)공법은 한 개당 중량 100톤 이내 의 크기의 블록 10개 내지 20개 정도를 전용 선행 탑재장에서 조립하여 최대 중량 약 3000톤 정도의 크기 이내로 만든 다음 스키드 웨이를 통해 안벽으로 이동시킨 뒤 대형 바지 크레인으로 들어 올려 도크에서 탑재하는 공법이다. 조선소 부지가 좁고 육상 크레인의 용량이 크지 못할 때 사용이 적합한 블록 탑재 방법으로서 한정된 부지 면적과 블록 운반 수단을 극복하여 초대형 조선 소와 같은 규모의 생산을 가능하게 하는 공법이다.



Fig. 2.5 Sketch of the skid system on the floor of dry dock

Fig. 2.5는 도크의 바닥이나 블록 조립장에 시설한 스키드 시스템을 보여 주 고 있는데, 이와 같은 초대형 블록은 에어 튜브 등으로 최대한 부양시켜 접촉 면적을 줄여줌으로 마찰을 최소화 한 상태에서 끌어 당겨 소정의 위치까지 이 동하게 된다. 댐(DAM)공법은 도크 길이를 초과하는 대형 선박을 건조하는 공법으로서 도 크 내에서는 가능한 선체 길이만큼 건조하여 진수하고, 도크 길이를 초과하는 선체 부분은 별도로 제작한 뒤 이들을 서로 연결할 부위에 미리 설치해 놓은 특수 댐을 이용하여 두 몸체를 서로 맞추고 이 댐 안에서 용접 작업 등을 진행 하여 하나의 완전한 선체를 이루도록 하는 공법이다.

Fig. 2.6과 2.7은 선수 블록을 하나의 덩이로 하여 탑재하는 방법을 개념적으 로 보여 주고 있다. 8100TEU 짜리 초대형 컨테이너 운반선을 이 공법으로 건 조하였고, 이때의 Fig. 2.6에서 보는 선수부의 블록 중량은 4000톤을 상회하였 기 때문에 실제 작업 공정에서는 대형 바지 크레인의 용량을 감안하여 Fig. 2.8 에서와 같이 상하 두 개의 블록으로 나누어 각각 제작하여 탑재하였다.



Fig. 2.6 Final erection of large stem block



Fig. 2.7 Large stem part of the ship erecting by one mass



Fig. 2.8 Large stem part of the ship erecting by two mass

2.2.3 수중 탑재 공법

일반적으로 도크에서 선체 부분의 건조가 완료되었을 때는 도크 내에 해수면 과 같아질 때까지 바닷물을 펌프로 채워 넣은 다음 도크 수문을 개방한다. 이 어서 예인선이나 특수 전용 선박 예인 장치를 이용하여 선체 건조가 완료된 선 박을 도크에서 빼내어 의장 작업 등을 위해 안벽 등지로 이동시킨 뒤 앞서 개 방하였던 도크의 수문을 다시 닫고 물을 퍼내고 난 연후에 후속 선체의 블록을 도크 내의 소정의 위치에 내려놓음으로써 새로운 선박의 탑재가 시작된다.

그러나 수중 탑재공법에서는 앞에서 기술한 일반적인 탑재 공법 중에서 도크 에서 과정의 일부를 생략할 수 있도록 개선한 것이다. 즉, 선체 부분의 건조가 완료되었을 때 펌프를 이용해 도크 내에 해수를 공급한 뒤 도크 수문을 개방하 여 해당 선박을 빼내어 안벽 등지로 이동시키고 난 뒤 도크 내에 해수가 들어 와 있는 상태에서 Fig. 2.9에서와 같이 바지 크레인으로 이동하여 탑재할 블록 을 도크 내의 소정의 위치에 내려놓음으로써 새로운 선박의 탑재를 시작하는 블록 건조공법이다.

Fig. 2.10은 수중탑재공법을 이용하여 도크 내에 탑재를 완료한 선미 블록을 보여 주고 있는데 도크 내에는 해수가 들어와 있는 것을 나타내고 있으며 좌우 의 필러는 블록의 균형과 위치를 잡아주는 역할을 한다.



Fig. 2.9 Underwater erection of stern block of the ship



Fig. 2.10 Completion of Stern block erection

2.2.4 스키드 론칭시스템 공법

스키드 론칭 시스템(Skid Launching System)은 Fig. 2.11에서 볼 수 있는 것 처럼 드라이 도크가 아닌 육상에서 해당 선체를 선미부와 선수부의 두 부분으 로 나누어 각각 제작한 후에 육상에서는 이 초대형 블록을 운반할 수 있는 수 단이 없으므로 블록 제작장 바닥에서 전용 바지선 위에까지 연결하여 시설한 스키드 웨이를 통하여 안벽에 접안된 스키드 바지에 밀어 올린 뒤 서로 조립, 용접하여 연결시키는 선체 건조공법이다.

4~50000톤(Dead weight, DWT)급의 중소형 석유제품 운반선의 건조에 이러 한 공법을 적용한 사례가 있으며, 현재도 지속전인 발전을 이루어 이와 같은 공법에 의한 건조 기술이나 선박의 건조 공기의 단축이라는 측면에서도 많은 발전을 가져오고 있는 것으로 확인되고 있다.



Fig. 2.11 Building sequence of skid launching system process
2.2.5 육상 총조립 공법

육상 총조립 공법은 도크가 아닌 지상에서 선체 전체를 완전 조립한 뒤 특수 스키드 크레인에 실어 안벽까지 옮긴 뒤 바지선을 이용해 바다의 깊은 쪽으로 나아가서 바지선을 가라앉힘으로서 진수시키는 블록 조립방식이다(Fig. 2.12).

도크 없이 지상에서 선박을 건조할 수 있는 획기적인 선박건조공법이긴 하 지만 도크 시설이 차지하는 면적에 버금가는 유휴 부지와 대형 크레인 등 관련 시설이 충분히 갖추어져야만 한다.

국내에서 최초로 100000톤급 이상의 중대형 원유운반선을 건조할 때 이 공법 을 사용하였으며, 블록 수는 대형 선행탑재공법의 경우 보다는 더 많아서 현재 는 약 40개 이내의 수준이다.



Fig. 2.12 Ground building & launching process

기존 대형 블록의 5~6개 크기인 소위 메가 블록을 육상에서 건조해 플로팅 도크 속에서 최종 탑재하는 블록 공법으로서 가장 큰 장점은 블록의 크기를 바 지 크레인으로 취급할 수 있는 최대 크기로 제작함으로서 블록의 수량을 최소 화 할 수 있으며, 바지 크레인이 들어 가져온 블록을 스키드 방식의 적용 없이 제 위치에 내려놓을 수 있다는 점이다.

플로팅 도크는 드라이 도크와는 달리 고정식 시설물이 아니므로 부지를 점유 하지 않아 공간 활용도가 높으며 이동이 비교적 용이하다는 장점이 있으나 Fig. 2.9에서와 같이 잔교나 기타 어떤 방식이던지 도크를 고정시킬 수 있는 계 류 시설이 필요하며, 항상 해수와 접촉하고 이동도 빈번한 편이므로 유지관리 비용이 많이 드는 것이 단점이라고 할 수 있다.

2.2.7 기가 및 테라 공법

기가(Giga) 및 테라(Tera) 공법은 별도의 공법이라기보다는 상기의 블록 공 법들을 응용하여 탑재되는 한 개의 블록의 크기를 6000톤, 12000톤까지 키워 선체 하나 당 블록 개수를 많으면 6개에서 적으면 2~3개 정도로 획기적으로 줄여 도크 작업 기간을 10일 정도도 대폭 단축시키고자 하는 공법이다.

현재 국내에서 조선용으로 사용되고 있는 바지 크레인의 최대 용량은 4000 톤 이하이므로 이 공법들을 사용하기 위해서는 크레인 1기 단독, 혹은 2기 이 상의 협력사용을 감안하더라도 초대형의 바지 크레인이 추가로 소요될 것이다.

Fig. 2.13은 대형 바지 크레인을 이용하여 플로팅 도크에 블록을 탑재하는 실 제 작업현황을 보여 주고 있다. 또한 Fig. 2.14에서는 이러한 선박건조공법이 상선 건조에서 뿐만 아니라 함정 건조에서도 부분적으로 대형 선행탑재 블록의 탑재가 이루어지고 있다는 사실을 확인시켜 주고 있다.



Fig. 2.13 Large block erection in the floating dock



Fig. 2.14 Bulbous bow block erection of an aircraft carrier

2.2.8 크레인 전선 진수 공법

안벽에 가까운 육상에서 선박을 건조한 후 대형 바지 크레인으로 선체 전체 를 들어 해상에 진수시키는 건조 공법이다. 선체 전체 최대 중량이 3000톤 이 내인 중소형 선박의 건조에 활용할 수 있으며, Fig. 2.15의 사진은 이와 같은 방법으로 경비함을 건조한 후 진수시키는 장면을 보여 주고 있다.

국내 최초로 이루어진 이 공법의 정식 명칭은 "크레인 진수공법(Lifting Off Launch, LOL)"으로 명명되었다.

바지 크레인은 수 십 가닥에 이르는 각각의 와이어로프에 부하되는 조양 하 중이 자동적으로 균일하게 조정, 분포되는 제어시스템으로 되어 있다. 이 공법 에서는 선체 전체를 조양하게 되므로 특히 선체의 변형이나 국부적인 손상이 발생하지 않도록 조양 피스의 위치 지정 등과 함께 사전 안전하고 정밀한 해석 과 시뮬레이션 작업이 선행되어야 한다.



Fig. 2.15 A coast guard vessel launching by a huge barge crane

2.3 블록 탑재 공법의 적용 효과

2.3.1 탑재 단위 블록 중량의 증가

앞에서 기술한 주요 대형 블록 공법들이 개발되기 이전에 탑재되는 블록의 단위 중량은 각 조선소에서 운용하는 크레인의 용량과 관련 설비에 따라 달랐 다. 대부분의 대형 조선소에서는 도크 주위를 작업 반경으로 하는 500톤 전후 용량의 대형 갠트리 크레인을 블록 탑재작업에 사용하고 있으며 부지가 협소하 거나 공장 혹은 설비의 배치 상황이 여의치 못하여 100톤급 정도의 집(Jib)크레 인을 여러 기 동시 운용하여 블록을 탑재하는 경우도 있다.

탑재 블록의 최대 단위 중량은 이와 같은 크레인들을 복수로 사용하더라도 여건상 1000톤을 넘지 못하였던 게 사실이며 이것은 곧 조선소 내에서 이동할 수 있는 최대 중량을 의미하는 것이기도 하다.

이와 같이 블록을 이동하는 크레인의 용량에 직접적으로 영향을 받을 수밖에 없는 일반적인 개념으로는 그 이상 블록의 크기를 키울 수 없는 한계 상황에 이르게 되었다. 여기에서 만들어진 발상이 바로 스키드 공법이라는 것으로서 이러한 발상의 전환으로 인하여 블록의 단위 중량은 당장 이전의 두 배가 넘는 1800톤까지 증가하게 된 것이다.

이 블록 공법이 적용되면서 블록의 최대 중량은 대형 선행 탑재되어 안벽에 인접한 곳까지 이동되어 온 블록을 들어 올려 도크까지 최종 운반할 바지 크레 인의 용량으로 결정되게 되었다.

2000~3000톤 규모의 블록 10개를 조립하는 대형 선행탑재 혹은 메가 블록 공법에서 2, 3년 내 단위 블록의 중량이 4000 내지 6000톤 규모로 커지고 블록 6개 정도로 선박 한 척을 완성하는 기가(Giga)블록 공법을 도입할 계획이며, 추후에는 단위 블록 중량을 더욱 키워 12000톤 이상의 대규모 블록 2~3개만으 로 선박 한척을 건조해 내는 소위 테라(Tera)공법도 적극 연구되고 있다.

## 2.3.2 도크 작업일수의 단축

현재의 대형 선행탑재 공법 등을 활용해 선박 한척을 도크 내에서 완성하는 데 약 한 달 보름 정도 걸리던 것을 만에 건조하는 것을 감안할 때 Table 2.1 에서 볼 수 있듯이 기가공법을 사용할 경우 블록 규모는 두 배 커지는 반면 블 록 숫자는 40% 가량 줄어들게 되므로 도크작업 기간 역시 40% 가까이 단축되 는 것을 알 수 있다.

이와 같은 공법 개발에 힘입어 Table 2.2에 나타난 바와 같이 종사자 1인당 부가가치와 생산액도 20여 년간 약 5배 이상 신장된 것을 통계에서 보여 주고 있는 것을 알 수 있다.

Process	Weight of Block unit (ton)	Number of block per ship	Dry dock working day	Remark	
GPE (Mega)	1500 - 3000	10	45	Large barge	
Giga	4000 - 6000	6	27	Floating dock	
Tera	12000	2-3	10		

Table 2.1 Number of block per ship and dry dock working day

Table 2.2 Increasing productivity both value and production

Year	1985	1990	1995	2003
Value added per Man (Mil. Won)	14.3	26.3	52.6	94.9
Construction weight per Man (GT)	38.6	91.9	112.9	192

## 제 3 장 고능률 자동용접법

3.1 일렉트로슬랙 용접

3.1.1 일렉트로슬랙 용접의 개요

일렉트로슬랙 용접(Electroslag welding, ESW)은 고능률 자동용접법으로서 피용접재의 두께에 관계없이 대부분 한 번의 패스로 이루어지는 단층용접법이 며 원천기술은 앞 서론 부분에서도 언급한 바와 같이 1930년대 미국에서 개발 이 시작되었고 1940년도에 특허출원이 되었다. 이 용접법에서는 용융 슬랙이 피용접재의 접합면과 용가재를 녹여 접합이 이루어지는데 전기 아크가 슬랙을 가열하여 용융시킨 뒤, 용접 중에는 바로 그 자신이 가열시킨 용융 슬랙에 의 하여 아크는 소멸된다.

용접은 수직자세로 이루어지는 경우가 대부분이며 특히 철강재의 용접에 가 장 많이 사용되고 있다. 즉, 연속주조방식에 의해 단층 상진 용접하는 것이라고 간단히 말할 수 있다. Fig. 3.1은 전형적인 일렉트로슬랙 용접의 개념을 보여주 고 있다.



Fig. 3.1 Conventional Electroslag Welding

1970년대에 들어서서는 교량 제작, 선박 건조 및 기타 대형 금속 구조물제작 에도 그 적용 범위가 확대되었으나 한 때 교량 제작과정에서 낮은 품질과 결함 발생으로 사용이 금지된 적도 있다. 용접 그루브의 형태는 스퀘어 형(I-groove) 이나 브이 형(V-groove) 또는 티 형(T-groove)을 사용한다. 피용접재가 그 보 다 두꺼운 초후판인 경우 양면 브이 형(Double V-groove)을 사용하기도 한다. 처음 아크를 발생시킬 때는 모재사이에 공급된 플럭스 속으로 와이어를 송급 하여 넣고 전류를 공급하면 순간적으로 아크가 발생되는데 이것은 서브머지드 아크 용접(SAW)과 같다. 그러나 일렉트로슬랙 용접에 있어서는 처음 발생된 아크가 꺼져버리고 전기 저항열로 용접이 계속된다는 점에서 서브머지드아크 용접과 다르며 주울열이나 칼로리 단위로 열량을 계산하고 표시할 수 있다[11]. 즉, 입열량 Q는

Q=0.24 EI (cal/sec)

혹은 금속 접합에서 일반적으로 많이 사용되는

$$Q = \frac{60EI}{1000S} \left( \frac{kJ}{cm} \right)$$

의 식으로 단위 시간당 용접 입열량을 나타내게 된다. 여기에서,

Q = Heat Input(kJ/cm)
E = Arc Voltage(Volts)
I = Welding Current(Amps)
S = Travel Speed(cm/min)

이다.

처음 발생된 아크에 의해 용융된 모재와 용접와이어, 그리고 플럭스가 화합

하여 전기 저항이 큰 용융 슬랙을 형성하고, 이렇게 되면 발생된 아크는 꺼지 면서 슬랙에 의한 저항 열로서 용접이 계속되는 것이다.

대전된 슬랙 용탕 즉, 일렉트로슬랙(Electroslag)이라는 용어의 탄생 배경이 된 슬랙으로 형성된 용탕은 그것을 통과하는 용접전류에 저항하게 되고, 그 저 항은 슬랙을 가열하여 온도가 약 2000℃에 이르는 용융상태를 유지하게 한다. 이 정도의 슬랙의 온도는 용접 아크 없이 용접 와이어를 연속적으로 용융시키 는데 충분하게 된다.

이렇게 용융된 와이어는 녹아 아래쪽으로 떨어져 이 부유 슬랙을 통과하여 용융지에 다다르게 된다. 그러므로 이러한 슬랙 용탕과 금속 용융지의 유동성 액체를 가두어 응고하도록 하기 위해 격납 장치가 필요하게 되며, 상부로 용접 이 진행되도록 강압하게 된다.

용접전류는 주로 교류의 정전압 특성을 갖는 대전류를 사용하고, 피용접물의 두께에 따라 용접전류는 400~1000(A), 용접전압은 35~50(V)정도, 용접속도는 1.2~4.5cm/min 정도가 일반적으로 많이 사용된다.

와이어 전극은 서브머지드아크 용접에서 사용하는 것과 거의 같은 계통의 것 이 주로 적용되고 있으나 최근에는 플럭스 코어드 와이어를 사용하는 보다 개 선된 프로세스도 개발되고 있다.

3전극 방식의 전형적인 일렉트로슬랙 용접법의 기본적인 개념 및 실제 용접 장면을 Fig. 3.2와 3.3에서 각각 보여 주고 있다.

피용접재의 두께가 증가함에 따라 전극의 수를 늘려나갈 수 있으며, 실험적 데이터에 의하면 피용접재의 두께가 약 25mm 증가할 때마다 전극이 하나씩 추 가되게 된다.

필요에 따라서는 전극을 피용접재의 두께 방향으로 요동시키면서 용융지 내 에서의 용탕의 유동을 활성화하여 피용접재의 가장자리 부분에서의 용입 불량 을 방지하여 고품질의 용접부를 만들어내게 된다. 이 용접법의 장점 중 하나는 높은 용착 속도인데 전극 1개가 시간당 15~20kg의 금속을 용융시킬 수 있으 며, 피용접재의 두께가 두꺼울수록 더 유리한 면이 있다. 대부분의 용접법에서



Fig. 3.2 Non-consumable guide multi-electrode Electroslag Welding



Fig. 3.3 Consumable guide multi-electrode Electroslag Welding

는 두꺼운 부재를 용접하기 위해서 여러 패스의 용접이 필요하지만 일렉트로슬 랙 용접에서는 대부분 한 패스로 충분하다. 또 이 용접법은 용가제의 용융, 소 모량에 비해 용접 그루브의 준비와 재료의 취급에 소모되는 시간이 최소화되기 때문에 매우 효율이 높다. 게다가 용접 중 아크 섬광이 없고 스패터가 적고 용 접변형이 작기 때문에 안전하게 깨끗한 용접법이라고 말할 수 있다. 일반적으 로 피용접재의 두께가 25mm에서 65mm정도사이라면 한 개의 전극을 사용하고, 두께가 이 범위를 넘으면 전극이 더 필요하게 된다.

Fig. 3.4는 일반 아크 용접과 일렉트로슬랙 용접의 용착속도를 비교한 것인데 일렉트로슬랙 용접이 수직 자세용접인 것을 감안하면 상대적으로 용착속도가 매우 빠른 용접법임을 알 수 있다. 현재까지 이 용접을 사용하여 용접한 최 대 부재 두께는 910mm 이며, 이 때 사용된 전극의 수는 6개이다.

또한 가장 많은 최대 18개의 전극을 사용하여 용접을 시행한 사례가 나타나 있는 것이 확인되고 있다.



Fig. 3.4 Deposition rate comparison in arc welding processes

3.1.2 소모 가이드 튜브식 일렉트로슬랙 용접

소모 가이드 튜브는 와이어 전극을 안내, 정렬하고 전기를 공급하는 도구로 서 대개는 철강재로 만들며 가이드 튜브 홀더 맨 위에서 바닥으로부터 약 25mm 정도 떨어진 지점까지 오도록 설치하고 와이어 전극은 이 가이드 튜브를 통해 슬랙 용탕으로 공급된다(Fig. 3.5).

용접이 진행되면서 이 튜브는 와이어 전극과 함께 녹아서 용접금속을 형성하 게 된다. 용접부 측면에서의 아크 발생과 비대칭 용입을 방지하기 위해 항상 가이드 튜브를 그루브의 중심에 오도록 만드는 것이 매우 중요하다. 가이드 튜 브를 잘 정렬하고 절연이 될 수 있도록 소모성 링을 사용하기도 하는데, 유리



Fig. 3.5 Consumable guide tube Electroslag welding(a) overall process(b) welding area enlarged

섬유나 유리 혹은 세라믹으로 제조한다. 이 링의 재질로서 또한 피복 플럭스가 아주 적합할 수 있으며 그 이유로는 용접 중 플럭스가 조금씩 연속적으로 녹아 들어가 슬랙 용탕을 보충해 주기 때문이다.

플럭스 피복은 또 가이드 튜브가 항상 용접 그루브의 중심에 놓이도록 지지 하는 역할도 수행하게 된다.

용접 헤드 부분은 어느 방향으로도 움직이지 않고 고정되어 있으며 수냉식 냉 각판인 동당금도 고정식이기 때문에 장비가 간단하다. 용접이 진행됨에 따라 가이드 튜브가 녹아 용접부의 일부가 되는데 용접부의 약 5~15% 정도를 차지 한다. 소모 가이드 튜브식 일렉트로슬랙 용접방식은 무한 두께의 용접에 사용 될 수 있다. 용접부의 길이는 9m 까지 가능하며 복잡한 형상도 날개를 부착함 으로써 용접이 가능하다. 긴 용접선의 경우는 진동을 적절하게 조절하기가 어 려우므로 용접봉을 추가하는 고정식이 사용될 수 있다.

용접 와이어가 어떻게 슬랙 용탕을 가로질러 용접금속 쪽으로 이행하는지를 이해하는 것은 중요하다. 와이어가 플럭스 용탕을 통과하여 용접금속 용탕으로 이행할 때, 용융된 와이어는 용적을 형성하여 플럭스 용탕으로 떨어진다. 이와 같이 하여 와이어는 고체 상태에서 액체 상태로 바뀌면서 용접금속을 형성해 나간다.

용접이 진행되는 동안 용접 와이어는 용접금속 용탕에 닿기 전에 용융슬랙 내에서 완전히 용해된다. 또한 와이어가 플럭스 용탕 속으로 녹아 들어갈 때 와이어의 특정한 양만큼은 가이드 튜브 아래까지 돌출되어 플럭스 용탕 상부까 지 다다른다. 이때의 와이어의 길이는 소위 "비 잠김 와이어 돌출길이"이다. 돌출된 이 와이어 아래로 추가되는 길이의 와이어는 슬랙 용탕 내로 녹아들어 간다. 이 와이어 길이가 "잠김 와이어 돌출길이"이다. 이러한 잠긴 와이어 부분 은 용접진행에 중요한 의미를 가진다.

일렉트로슬랙 용접에 소요되는 에너지인 열은 금속제 와이어의 저항 때문에 발생한 와이어의 돌출에 기인한다. 용융 플럭스에 잠긴 와이어의 길이가 길수 록 와이어는 더 가늘어지게 된다. 와이어가 가늘어지게 되면 전류의 흐름에 더 욱 큰 저항이 일어나며, 저항이 더 커지게 되면 전류는 더 많은 열을 생산해 내고 플럭스 용탕의 온도는 더욱 상승하게 된다.

여기에서 두 가지 사항을 주목해볼 필요가 있는데 와이어의 잠김 돌출길이가 늘어나면 와이어 송급 속도가 빨라진다는 점과, 이 때 사용된 와이어 전국이 솔리드 와이어라는 점이다. 솔리드 와이어는 플럭스 코어드 와이어에 비하여 단위 질량이 더 크므로 고체에서 액체로 변환되는데 더 오랜 시간이 걸린다. 이것은 솔리드 와이어의 잠김 돌출길이를 더 길게 만들어주며 플럭스 용탕의 저항열의 발생을 더 크게 하여 준다. 용탕 온도의 상승은 용접금속 용탕을 더 뜨겁고, 더 깊게 만들어 준다.

용접금속 용탕의 깊이는 용접부의 형상 즉, 용접부 단면에서의 폭과 깊이의 비율을 좌우하게 되며, 일렉트로슬랙 용접의 물리적 특성을 결정짓게 되므로 결론적으로는 이러한 형상 계수(Form factor)가 미세 조직 형성에 직접적으로 영향을 미친다고 할 수 있다. Fig. 3.6은 일렉트로슬랙 용접의 용접부 단면의 마크로 조직의 한 예를 보여 주고 있는데 수직 방향인 A-A'가 피용접재의 두 께 방향을 나타내며 초대입열 용접부로서 조직의 입자가 크고 거칠게 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 용접 중 수냉 동당금에 의해 냉각이 이루어지는 A-A' 부에 비해 피용접재에 의해서만 열의 확산이 이루어지는 B-B' 쪽이 조대한 입 자 형성 구역이 더 넓게 형성되어 있음을 확인할 수 있다.



Fig. 3.6 An example of macro section of Electroslag welding

3.1.3 내로우 갭 일렉트로슬랙 용접

1) 내로우 갭 일렉트로슬랙 용접의 개요

높은 용착 속도로 인하여 일렉트로슬랙 용접은 두꺼운 부재를 용접하는데 있 어서 가장 생산적인 용접법으로서 고려되고 있다. 1960년대 말에 이 용접법이 미국에 처음 소개되었을 때, 어느 정도는 주목할 만한 성공이 있었다. 그러나 교량의 주 인장 구조부재의 일렉트로슬랙 용접 작업 중 발생한 불완전한 용접 품질은 1977년 미연방도로국(Federal Highway Administration, FHWA)으로 하 여금 일렉트로슬랙 용접의 사용을 중단토록 하는 모라토리움을 통고(FHWA Notice 5040.23)하도록 만들기에 이르렀다.

이러한 고지는 미국에 있어서 교량제작 분야 뿐 아니라 다른 여러 산업 분야 에 있어서도 일렉트로슬랙 용접의 사용을 배제하도록 하는데 유효하게 작용하 였다.

1980년대에 들어서, 미연방도로국은 일렉트로슬랙 용접기술을 시험하기 위한 포괄적인 연구개발 프로그램을 구축하였다. 이 프로그램의 주요 목표는 일렉트 로슬랙 용접법의 특성을 더 잘 이해하고 적용기술 수준을 더욱 진보시키기 위 한 것이었다. 이 개발 프로그램의 첫 번째 시도는 워싱턴주 리치랜드에 있는 태평양 북서시험원(Pacific Northwest Laboratory)과 오레곤 주의 비버튼에 있 는 오레곤대학의 산업과학연구소에서 수행하였는데 일렉트로슬랙 용접법의 작 동 절차나 용접부의 물성에 있어서 대체적으로 중대한 개선이 이루어졌다. 보 다 향상된 내로우 갭 일렉트로슬랙 용접법(Narrow-Gap Improved Electroslag welding, NGI-ESW)법이라고 하는 중요한 기술이 개발된 것이다[3][4][5][6][7].

내로우 갭 일렉트로슬랙 용접기술은 만족할만한 품질의 용접부를 만들었으 며, 충격시험 결과 용접부의 인성이 현저하게 향상된 것을 확인하게 되었다. 1990년대 초반 이러한 연구결과를 토대로 한 현장 확대시험이 수행되었고, 시 험은 네 곳의 교량 제작공사 현장에서 이루어졌으며, 만족할만한 결과를 얻게 되었다. 내로우 갭 일렉트로슬랙 용접기술의 개선 점을 요약하면 용접부와 열영향부 에서의 충격치 향상, 피로강도 향상, 생산성 향상 그리고 응고균열과 수소균열 에 대한 저항성의 향상 등이다[13][14][15][16].

특히 충격 인성치의 향상과 균열 발생을 위해서 튜브 형태의 용가재와 빠른 용접 주행 속도 및 19mm 정도의 좁은 루트 간격을 활용하여 용접 입열량을 감 소시켰다. 용접부 형상계수(Form factor)의 개선을 위해 튜브형태의 금속분말 와이어와 ASTM 1010 또는 1008 강으로 만든 웨브와 윙가이드 판을 사용하였 다(Fig. 3.7).

또, 탄소가 적은 C-Mn-Ni-Mo 튜브형 용가재는 최적화된 충격치와 응결균 열과 수소균열의 예방을 위해 사용되었다. 가이드 튜브가 요동할 때를 고려하 여야 하는 것은 필수적인 것은 물론이고, 절연체를 포함한 가이드 튜브의 전체 두께는 당연히 그루브 간격보다 작아야 하기 때문에 그루브 간격인 19mm 보 다 훨씬 작은 약 12mm두께로 설계되고, 가이드 튜브의 폭은 피용접재의 두께 및 가이드 튜브의 요동 여부에 따라 달라지게 된다.



Fig. 3.7 Consumable guide tube for NGI-ESW(a) Single wire consumable guide tube(b) Two wire consumable guide tube

앞에서도 언급하였듯이 내로우 갭 일렉트로슬랙 용접에서는 19mm정도의 정형 화된 루트 간격을 필요로 하며, 이것은 피용접재의 두께에 관계없이 일정하게 유지되어야 하고, 따라서 소모 가이드 튜브는 이 그루브 내에 들어갈 수 있는 크기로 설계, 제작되어야 한다. 절연재를 포함한 가이드 튜브의 전체 두께는 12.7mm를 초과할 수 없으며, 용접 중 가이드 튜브가 요동하는 경우를 적용한다 면 이것은 더욱 엄격히 관리되어야만 한다.

가이드 튜브의 폭은, 요동 방식을 적용하든 적용하지 않든 피용접재의 두께 에 따라 달라진다. 만일 요동식 가이드 튜브를 사용한다면 요동 폭을 결정하기 위해서는 용접 캐비티의 폭을 어떻게 할 것인가를 고려해야만 한다.

수냉 동당금의 오목부는 대개 3.2mm정도이고 이것을 양쪽에 사용하므로 용접 목두께는 피용접재의 두께에 6.4mm를 더한 것과 같다.

요동을 적용하고자 할 때는 가이드 튜브의 바깥면이 수냉 동당금의 안쪽면 6.4mm 이내로 들어오지 않도록 조정해야 한다. 이 거리는 피용접재 두께와 같으 며, 6.4mm 미만이다. 그러므로 만일 50mm 두께의 피용접재를, 2전극 및 폭 32mm 짜리 가이드를 사용하여 용접한다면 부재 두께에 동당금 오목부 깊이를 더한 수치에서 가이드 튜브의 폭과 6.4mm를 더한 수치를 뺀 값이 요동 폭이 되는 것 이다.

즉, 요동의 폭은

(PT + SR) - (1/4'' + GW) = (2.00'' + 0.25'') - (0.25'' + 1.25'')= 0.75''

가 된다.

여기에서,

PT는 모재 두께, SR은 수냉 동당금의 홈 깊이, GW는 가이드 튜브 폭을 각 각 나타낸다. 2) 와이어 전극 특성

와이어 전극은 금속 분말이 충진된 튜브형 와이어로서 지름 2.4mm 짜리이며, 일반 여느 와이어와는 달리 표면에 구리 도금을 하지 않았다. 소모 가이드 튜 브는 고온 균열에 대한 민감성을 줄이기 위해 저탄소강을 사용하여 제조하였 다. 장방형으로 제작된 가이드는 이음 내에서 열이 양 측면으로 균일하게 분포 되도록 설계되었으며, 불완전 융합의 발생이 감소되었다. 소모 가이드 튜브의 단면적을 크게 만드는 것은 단위 시간당 용착량을 높이게 된다.

3) 와이어 전극의 화학 조성

내로우 갭 일렉트로슬랙 용접법에 있어서 와이어 전극은 그 이전에 사용되었 던 재료와는 큰 차이를 보이고 있는데 Table 3.1에서 보듯이 용착 금속의 충격 인성 개선을 위해 합금 성분을 많이 추가한 것을 알 수 있게 된다. 니켈과 몰 리브덴뿐만 아니라 바나듐, 티타늄 및 알루미늄 등의 합금을 첨가하였으며, 반 면에 탄소 함유량은 0.03% 이하로 낮추어 저탄소 바탕을 유지함으로써 양호한 용접부 충격인성을 확보함과 동시에 고온 균열이나 응고 균열 등의 위험도를 낮추고자 하는 합금 설계가 나타나 있음을 알 수 있다.

Element	wt%
Carbon	0.03% max
Manganese	0.8-1.6%
Silicon	0.3-0.6%
Molybdenum	0.3-0.6%
Nickel	2.3-3.0%
Phosphorus	0.015% max
Sulfur	0.015% max
Vanadium	0.005% max
Titanium	0.02-0.10%
Aluminum	0.03% max

Table 3.1 Chemical composition of wire electrode

4) 용접 파라미터 특성

Table 3.2에 내로우 갭 일렉트로슬랙 용접법과 일반 일렉트로슬랙 용접법의 용접 파라미터 특성을 서로 비교하여 두었다. 여기에서 보여주고 있듯이 내로 우 갭 일렉트로슬랙 용접법은 일반 일렉트로슬랙 용접법에 비해 그루브 폭이 대폭 축소된 반면에 사용하는 용접 전류와 용접 속도는 약 두 배가량 개선되었 으며, 내로우 갭 일렉트로슬랙 용접법의 용접 단위길이당의 입열량은 일반 일 렉트로슬랙 용접법의 60~70%정도 수준임을 알 수 있다.

두께 20mm에서 100mm까지의 부재를 비요동 소모 가이드 튜브방식으로 용접하는 데 있어서 요동방식에 비해 많은 수량의 가이드 튜브를 필요로 하며, 비요 동 방식에서는 이러한 두께 범위에 대해 일곱 종류의 가이드 튜브가 필요한 데 비하여 요동 방식에서는 단지 두 가지의 가이드 튜브만 있으면 된다.

부재 두께가 25mm 증가할 때마다 가이드 튜브가 하나씩 추가되어야 한다. 그 러므로 100mm 두께까지의 부재를 용접하기 위한 가이드 튜브의 폭 범위는 다음 의 Table 3.3과 같이 필요하게 된다.

Item	Conventional ESW	NGI-ESW
Root opening	32 + 2mm	19 + 1mm
Amperage	600 + 100 A (18%)	1,000 + 100 A (10%)
Voltage	39 +1 V (2.5%)	35 + 0.5 V (1.5%)
Welding speed	28 mm/min	55 mm/min
Heat input	50 kJ/mm	37 kJ/mm

Table 3.2 Comparison of Welding parameters of NGI-ESW and Conventional Electroslag welding for 50mm thick steel plate

Plate thickness (mm)	Number of wire	Size of guide tube (mm)	
25	single-wire	16	
38	two-wire	34	
50	two-wire	38	
63	two-wire	50	
75	two-wire	63	
83	two-wire	75	
100	three-wire	88	

Table 3.3 Number of wires and size of guide tubes for plate thickness

5) 무결함 용접 특성

절차적인 면이나 용접 재료 면에서 많은 변화를 준 결과 내로우 갭 일렉트로 슬랙 용접법은 슬랙 혼입, 고온 균열, 융합 불량 등 내부 용접 결함은 거의 발 생하지 않게 되었다.

내로우 갭 일렉트로슬랙 용접법을 사용할 때 이러한 일관된 무결함 용접을 확인하기 위하여 처음 이 용접법을 사용하게 되는 공장에서는 각 공장 단위별 로 일회의 시연 용접마다 피용접재의 용접부에 대하여 육안검사(VT), 방사선투 과검사(RT), 초음파검사(UT)를 각각 수행하도록 하였다.

초음파검사나 방사선투과검사를 실시하여 용접부 내부에 결함이 존재하지 않 는다는 것이 확인이 되면, 계속하여 물리적 성질을 확인키 위한 후속 시험을 실시하였다. 6) 용접부 피로 성능

내로우 갭 일렉트로슬랙 용접법에 있어서 용접부의 피로 거동을 평가하기 위 하여 두께가 50mm 되는 플랜지 두 개를 포함한 길이 6.6m의 대형 거더를 제작 하여 시험하였다. 모두 14개의 내로우 갭 일렉트로슬랙 용접부에 대한 피로 시 험을 실시해 본 결과 아무런 피로 균열도 발견되지 않았다. 피로시험 외에 피 복아크용접을 사용한 내로우 갭 일렉트로슬랙 용접법 모의 결함을 근거로 한 다양한 수정작업이 포함되었다. 용접부에 아무런 결함이 없었기 때문에 실제 결함이 발생된 상황과 같이 하여 용접부를 파내었다. 파내어진 결함부에 대한 수정 용접은 "AISI/AASHTO/AWS D1.5 Bridge Welding Code"의 수정 용접 절차에 따라 피복아크용접으로 수행하였다.

그리고 나서 이 용접부는 요구되는 피로수명 사이클로 3회에 걸쳐 재 피로시험을 실시하였다. 모의 결함을 수정한 내로우 갭 일렉트로슬랙 용접법에서는 피로 균열 을 생성하지 않았다.

7) 용접부와 용접 열영향부의 충격 인성

미연방도로국이 내로우 갭 방식 일렉트로슬랙 용접법에 대해 모라토리움을 대대적으로 선언하였던 것은 내로우 갭 일렉트로슬랙 용접부의 충격 인성값이 너무 낮았기 때문이었다. 연구개발 프로그램의 교안과 절차는 용접부 충격 인 성 개선의 가장 중요한 요인이 되었다. 실제적으로 용접 입열량을 줄이고 균일 한 인성을 가진 미세조직을 만들기 위해 용접금속의 화학적 조성을 적절히 설 계함으로써 가장 낮은 인성치 구역인 용접금속 중심선 부위에서 채취한 내로우 갭 일렉트로슬랙 용접금속부의 충격 인성치는 시험 온도 -20℃에서 규정치인 27J을 초과하였다[24][25][26][27][28].

충격 인성특성과 관련된 부차적인 영역은 열영향부에서 확인되었다. 다른 여 타 용접법에서는 요구되지 않는 인장이나 역하중 조건, 혹은 이 둘 모두와 관 련한 부재의 내로우 갭 일렉트로슬랙 용접법에 있어서 제안된 범위는 영상 4 ℃에서 20J이며, 노치의 위치는 부재 두께의 4분의 1 지점이다. 연구개발 단 계와 생산현장시험에서 획득한 결과들은 내로우 갭 방식 일렉트로슬랙 용접의 숙련 작업을 통하여 적합한 충격 특성을 시연하였다.

충분한 양의 파워 즉, 전극에 공급되는 단위 시간당 에너지 이행과 에너지 밀도가 모재와 용접 재료를 용해시킨다. 용접 입열량이라고 하는 것은 용접부 의 단위 길이당 이행되는 에너지의 상대적 측정값이다. 용접 입열량은 용접부 의 냉각 속도에 영향을 미치고 이것은 또 용접금속과 용접열 영향부의 기계적 성질과 야금적 조직에 영향을 미치게 된다. 다음의 Fig. 23과 관계식은 용접 입 열량과 냉각 속도와의 관계를 나타내고 있다[23].



Time (seconds)

Fig. 3.8 Heat input influences cooling rate

$$H = \frac{60 EI}{1000 S}$$

여기에서,

H = Heat input (kJ/cm) E = Arc voltage (Volts) I = Current (Amps) S = Travel speed (cm/min) 3.1.4 일렉트로슬랙 응용 프로세스

일렉트로슬랙 프로세스는 일렉트로슬랙 용접법을 비롯하여 일렉트로슬랙 재 용융법(ESR), 일렉트로슬랙 경화육성법(ESH) 및 원심 일렉트로슬랙 주조법 (CESC) 등으로 파생, 개발되고 있다[17][18][19].

일렉트로슬랙 용접법은 소모 가이드 튜브식과 비소모 가이드 튜브식으로 대 별되는데 기본적인 원리는 모두 간이 주조방식으로 용접이 이루어지게 되므로 일반 주조법과 용융원리가 매우 흡사한 부분이 많아 용접이 완료된 용접금속은 주괴의 개념에서 접근하는 것이 가능하다. 즉 모델링 등을 통하여 용접부의 종횡단면부의 화학 조성, 용접 층, 용접의 목두께 등을 사전에 어느 정도 예측 할 수 있는 것으로 판단되고 있다.

이 모델을 이용하여 특정한 재료 및 크기의 피 용접재를 용접하는데 필요한 최적의 용접조건을 도출하는 시간과 경비를 줄일 수 있는 것이다.

이러한 수학적 모델에 있어서 가장 중요한 파라미터의 하나는 질량이행계수 이다. 일렉트로슬랙 기법에 있어서 용융 금속과 슬랙 간의 질량이행의 물리적 모델링 연구법이 기 개발되었는데 질량이행계수에 있어서 전극의 용융속도의 영향과 그루브 충진 속도에 대하여 연구가 진행된 것이 그것이다.

Fig. 3.9는 일렉트로슬랙 기법의 진행 중 요소 E1의 이행 방향과 상 조성의 변화를 보여주고 있다[20][21][22][23].



Fig. 3.9 Diagram of interaction between phases in electroslag process: 1) Formation of molten metal at the electrode

- 2) Melting of parent metal 3) Introduction of metallic additives
- 4) Solidification of metal pool 5) Pouring of flux into slag pool
- 6) Solution in slag of oxide films at surfaces of electrodes and edges of parent metal
- 7) Interaction of slag pool and gas phase
- 8) Solidification of slag pool

상의 비체적 내에서의 특정 성분 Ei(kg/sec)의 재료적 균형은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sum V_{M^{k}} \frac{[E_{i}]_{k}}{100} = \sum V_{M^{k}} \frac{[E_{i}]_{l}}{100} + JSM + \frac{G}{100} \frac{d[E_{i}]}{d\tau}$$
(1)

여기서, V<sub>mk</sub>과 V<sub>ml</sub>은 입출하는 전류 개체당 특정한 상이 입출할 때 의 각각의 속도; kg/sec,  $[E_i]_k$ 와  $[E_i]_l$ 는 이들 전류에 있어서의 성분의 질량으로 나타낸 용량; wt-%, J는 금속에서 슬랙으로 이행하는 성분의 반응 속도 즉, 화학 반응 속도; mol.  $E_i/(m^2 \times sec)$ , G는 상의 질량; kg, 7 는 진행 시간; sec, S는 반작용 표면적; m<sup>2</sup>, M은 성분의 분자 질량; kg/mol을 각각 나타낸다.

위 공식 {1}의 좌변은 성분이 특정 상에 들어가는 속도를 나타내며 우변은 화학 반응과 축적으로 인하여 외부로 나가는 전류와 함께 빠 져나가는 성분의 속도를 나타낸다.

준 불변 조건인 d[E<sub>i</sub>]/d 에서 7 = 0가 된다. 슬랙 내의 산화물(kg E<sub>i</sub>O<sub>m</sub>/sec) 형태의 동일한 성분 E<sub>i</sub>에 대한 재질적 균형은 다음의 식으 로 표현될 수 있다.

$$\frac{G_{sl}}{100} \frac{d(E_i O_m)}{d\tau} = \sum_{j=1}^n J_j S_j \frac{M_{ox}}{M} + V_{ox1} + V_{ox2} + V_{e.sl} - V_g - V_c$$
<sup>{2}</sup>

여기에서, G는 슬랙의 질량; kg, (EiOm)은 슬랙 속의 특정 산화물의 질량; wt-%, Mox는 산화물 EiOm의 분자 질량이다. 위 {2}식 우변의 첫 번째 항은 용접법의 상이한 스테이지에서의 화학반응으로 인하여 금속 으로부터 슬랙으로 유입되는 성분의 속도를 나타내며 Vox1은 산화 필 름이 용융되는 동안 전극으로부터 모재의 가장자리로 들어가는 성분 Ei의 속도를 나타낸다.

V<sub>e.sl</sub>는 일렉트로슬랙 기법에 있어서 새롭게 공급되는 플럭스를 통하 여 슬랙으로 들어가는 산화물의 속도와 같다. V<sub>c</sub>는 산화물이 슬랙 크 러스트에 들어가는 속도이다. 가스와 반응하여 손실되는 부분은 다음 식을 사용하여 평가할 수 있다.

$$V_{q} = J_{a}[p_{o}, (E_{i})...]S_{a}$$
<sup>{3}</sup>

여기에서, Sg는 가스-슬랙의 표면적이며, m<sup>2</sup>, Jg[po,(E<sub>i</sub>)…] 는 (성분 E<sub>i</sub> 이 슬랙과 가스의 성분에 따라 달라지는) 가스와 반응할 때의 속도 (kg E<sub>i</sub>O<sub>m</sub>/(sec m<sup>2</sup>)이고.

금속과 슬랙 용탕의 조성(w<sub>t</sub>-%)은 편석 계수 *x*와 *x<sub>ax</sub>*에 의해 용접 금속과 슬랙 크러스트와 연결되어 있다.

$$[E_i]_{weld} / [E_i]_{pool} = x; (E_i O_m)_c / (E_i O_m)_{sl} = x_{ox};$$
<sup>(4)</sup>

식 {4}는 전극의 용적과 모재 영역에 대한 성분의 집중을 계산할 수 있는 다 음의 식을 제공해 준다.

$$[E_i]_j = [E_i]_j - 1 - \frac{100J_iS_jM}{V_{mj}}$$
<sup>(5)</sup>

금속 용탕속의 어떠한 성분이나 슬랙 용탕에 산화물(EiOm) 집중[Ei]의 변화 를 결정하기 위해 화학 반응이 일정하게 일어날 수 있는 비율이 유지되는 동안 일렉트로슬랙 공정 시간을 상당히 짧은 시간 주기로 나눈다 {식5}.

식 {3}, {4}, {7}에서 상호 간의 영향을 고려하는 반응속도의 결정이 가장 어 럽다. 액상 플럭스는 폴리머화된 이온 융액으로 알려져 있다. 이러한 산화불소 계와 같은 이온 조직의 완벽한 규명은 매우 어려운데 그 이유는 불소와 산소 이온을 함유한 복합 음이온 조직의 형성을 고려할 필요가 있기 때문이다.

동일한 일반 용제를 사용하는 반응 세트에 의해 금속과 슬랙 간의 상호작용 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$1/m[E_i] + (FeO) = [Fe] + 1/m(E_iO_m)$$
(6)

m은 정수 혹은 분수 값으로 표시할 수 있다. 이러한 반응 속도들은 다음과 같 은 식으로 표현된다(식 {5}로부터).

$$J_{i} = \frac{(K_{j}X_{i})^{m}[E_{i}]_{j-1} - (E_{i}O_{m})}{\frac{(K_{j}X_{j})^{m^{\alpha}}}{K_{j}^{0}} + \frac{(K_{j}X_{j})^{m}}{\beta_{j}D_{j}^{0.5}\rho_{M}} + \frac{100M_{ox}}{\beta_{j}D_{j}^{0.5}\rho_{M}} + \frac{(K_{j}X_{j})^{m}MS_{j}100}{V_{mj}}}$$

$$\tag{7}$$

3.2 일렉트로가스 용접

3.2.1 일렉트로가스 용접의 개요

일렉트로가스 용접(Electrogas welding, EGW)은 아크 용접으로 분류된다. 일 렉트로가스 용접은 1960년대 초에 개발된 수직자동 연속 아크 용접법으로서 연 속적으로 자동 공급되는 소모성 전극과 모재 간에 아크를 일으켜 용접을 진행 하는 수직 전용 자동용접법의 하나이다.

Fig. 3.10에서 보듯이 근본적으로 자동화된 시스템 내에서 이루어지는 자동 용접법이라고 할 수 있다. 용접이 일단 시작되면, 전용접장에 걸쳐 용접이 종료 될 때까지 재설정을 할 수 없으며 용접은 일반적으로 실딩 가스를 사용하지만 피용접재를 접합하는데 있어서 압력 등의 외력은 사용되지 않는다[31].

이러한 일렉트로가스 용접이 용접 방법이 매우 유사하여 상호 사촌격으로 일 컬어지는 일렉트로슬랙 용접과 다른 점은 용접이 진행되는 동안 아크가 소멸되 지 않고 줄곧 점화되어 있다는 점이다.



Fig. 3.10 Schematic presentation of Non-consumable type single electrode Electrogas arc welding

- 44 -

일렉트로가스 용접에 있어서 상승속도 제어장치는 용접 중 와이어 전극의 돌출길이(Electrode extension)를 검출하여 항상 이것이 설정치를 유지하여 일 정하게 되도록 하는 것으로서, 캐리지의 주행속도가 용융지 상승에 따르도록 한 것이다(Fig 3.11).

그루브의 변동에 따른 용접속도의 변화에 따르도록 대차 상승속도가 자동적 으로 조절되어 와이어 전극의 돌출길이가 일정하도록 유지되게 함으로서 용접 그루브의 변동에 따른 용접속도의 변화에 맞게 대차상승 속도를 자동으로 조절 되게 하는 제어 시스템의 일부이다.



Fig. 3.11 Control of molten pool and copper shoe in Electrogas welding

이 용접법은 주로 조선이나 육상저장탱크, 교량 제작 등에 사용되며, 용접 그 루브의 형태는 I 형(Square groove), V 형 또는 T 형을 사용한다. 또, 피용접 재가 초후판인 경우 양면 V 형 그루브를 사용하기도 한다.

일렉트로가스 용접에 있어서, 용접 아크는 와이어 전극과 모재를 용융시켜 피용접재 간에 형성된 용접 공간에 흘러 들어가 그루브를 채워 올라가게 되고 용융금속은 아래로부터 응고되어 피용접재를 서로 접합시켜 나가게 된다.

용접이 진행되는 동안 용접부는 별도로 공급되는 실딩 가스를 사용하거나 플 럭스 코어드 와이어 전극이 용해되며 발생하는 실딩 가스로서 대기의 유입을 차단시켜 준다. 와이어 전극은 일렉트로가스 용접에서 사용하는 것과 같은 소 모식 와이어 전극 가이드 튜브를 통하거나 연동 헤드로서 용접부 내로 인도함 을 받는다.

소모식 와이어 가이드 튜브를 사용할 때는, 용융지는 피용접재가 용해되어 형성되는 용융금속과 용해된 가이드 튜브로 채워지게 된다.

일렉트로가스 용접은 대부분의 철강 재료의 용접에 사용할 수 있으며 저탄소 및 중탄소강, 저합금 고강도강(HSLA)과 일부의 스텐리스강에 적용할 수 있다. 조질강(Quenched and tempered steel)의 경우 용접 입열량을 적절히 조정한다 면 용접이 가능하다.

특히 최근에 이르러서는, 대입열 혹은 초대입열용 열가공 제어(Thermo mechanical controlled process, TMCP)강을 사용하여 용접 입열량이 500kJ/cm 를 상회하는 용접이 현장에서 진행되고 있는 실정이다.

앞서 언급한 바와 같이 이 용접법은 수직 자세에서 행하여지지만 좌우 혹은 전후방향 어느 쪽이든 15° 각도 이내로 경사진 경우라면 용접이 가능하다.

또한 일렉트로가스 용접은 대입열 용접인데 비해서는 스패터와 소음이 적은 비교적 정숙한 용접이며, 고품질의 용착금속을 생성한다.

수직 자세용접에 있어서 두꺼운 피용접재에 대한 용접으로서 일렉트로가스 용접은 서브머지드아크 용접이나 플럭스 코어드 아크 용접 등과 같은 전통적 용접법에 비해 훨씬 경제적이다. 3.2.2 다전극 일렉트로가스 용접

하나의 전극으로 용접이 불가능한 초후판인 경우 두 개 이상의 전극을 사용 하여 다전극 용접을 수행하게 되는데 전극 전체를 피용접재의 두께 방향으로 요동시키거나 혹은 일부의 전극을 요동시켜 용접 그루브 내에 용융금속이 잘 유동하도록 한다.

용접의 기본 개념은 전통적 방식의 일렉트로슬랙 용접과 흡사하다고 할 수 있으나 용융지 상부에 형성되는 전도성 슬랙의 저항열로 용접이 이루어지는 일 렉트로슬랙 용접과는 근본적으로 원리가 상이하며 용접이 진행함에 따라 동당 금은 용접 헤드와 함께 이동하게 되므로 동당금의 크기가 작고, 이것을 냉각시 켜 주는 냉각 펌프의 용량도 상대적으로 적은 것을 사용하게 된다.

다음의 Fig. 3.12는 3전극 일렉트로가스 용접의 전형적인 모습을 개념적으로 보여 주고 있다[11][12].



Fig. 3.12 Non-consumable type multi electrode Electrogas arc welding

3.2.3 일렉트로가스 용접의 개량

전통적 일렉트로가스 용접법에서는 피용접재 그루브의 양면에 용융 금속이 흘러내리지 않도록 Fig. 3.13에서 보는 것처럼 수냉식 동당금(Copper shoe)을 사용하였으나, 최근에는 한 쪽 면에는 세라믹으로 만든 이당재를 고정시키고 그 반대 면에는 수냉식 동당금을 장착하여 용접을 진행하는 보다 간편화된 방 법이 개발되어 사용되고 있다.

용접부 이면에 동당금 대신 고정식으로 부착된 이당재는 용탕의 고온을 충분



Fig. 3.13 Schematic presentation of Simplified Electrogas arc welding

히 견딜 수 있어야 하므로 충분한 두께를 가진 고내열성의 세라믹이며, 피용접 재와의 밀착성을 좋게 하기 위하여 여러 겹으로 이루어진 섬유유리(Fiber glass)가 표면을 덮고 있다.

또한 고온에서의 붕괴를 방지하기 위하여 이당재 잔체를 강철재 케이스가 감 싸고 있다. 따라서 용접 시 이당재는 용접부 이면에 부착되어 용접이 종료될 때까지 고정되어 있고 전면의 동당금은 용접 진행과 더불어 용접 헤드와 연동 하여 올라가면서 용융지를 보호하며 용접비드를 형성해 나가는 방식으로 개량 이 이루어진 것이다.

일렉트로가스 용접에 있어서 이면의 루트 간격은 모재 두께에 따라 대개 2~16mm 수준을 유지하며, 일렉트로슬랙 용접에 비해 좁기 때문에 용접 입열량 이 적고 용접 속도가 빠르며 작업성도 양호하다.

이와 같이 기존의 일렉트로가스 용접은 양쪽을 동당금으로 막고 캐리지의 가 이드 휠이 V 형태의 용접 그루브를 안내 삼아 구동하면서 용접하는 방식인데 비하여 이 방식은 한 쪽은 세라믹으로 고정시키고 한 쪽만 동당금을 사용하므 로 용접 헤드, 냉각수 순환장치 등의 용접 장치가 대폭 간소화 되고 용접조작 도 매우 간편해지게 된 것이다.

이상과 같이 간편화된 일렉트로가스 용접이라는 의미에서 이것을 일컬어 세 그아크(Simplified Electrogas Arc, SEGARC)용접이라고 부르게 되었으며, 또한 이러한 이름으로 널리 알려져 있다. 3.2.4 여타 용접법과의 비교

1) 용접 능률의 비교

다음의 Table 3.4는 Fig. 3.14에 나타낸 내로우 갭 유사 용접법 상호간의 능률을 서로 비교하여 본 것이다[31].

내로우 갭 용접은 부재 두께 300mm, 플럭스 코어드 아크 용접과 일렉트로가 스 용접은 부재 두께 75mm에 대한 실험값이다. Table 3.4에서 보는 것처럼 내로 우 갭 용접 및 플럭스 코어드 아크 용접과 일렉트로가스 용접 사이에 가장 큰 차이점은 그루브를 단층으로 용접하느냐 다층으로 용접하느냐 하는 점인 것을 알 수 있다.

일렉트로가스 용접의 경우 내로우 갭 용접에 비해서는 그루브의 각도가 다소 큰 편이나 단 한 패스로 용접이 이루어지게 되므로 용접 능률에 있어서 단연 뛰어난 용접법인 것을 확인할 수 있다.

Welding process	Plate thick. (mm)	Root gap (mm)	Elect. dia. (øm)	welding amps (A)	Arc voltage (V)	Welding position	Travel speed per each pass (cpm)	Number of pass
Narrow gap	300	9	1.2	260	30	Flat	22	70
FCAW	75	8	1.4	180- 220	28-30	Vertical up	8	50
EGW	75	8	1.6	400- 440	40-44	Vertical up	4	1
Remark Groove angle; Narrow gap welding ; 0°, FCAW ; 35°, EGW ; 20°								

Table 3.4 Welding productivity comparison for Narrow gap welding processes









(c)

Fig. 3.14 Comparison of Narrow gap welding processes(a) Narrow gap welding (b) Flux cored arc welding(c) Electrogas welding

앞의 Table 3.4와 Fig. 3.14에 나타낸 것처럼 두께가 서로 다르고 용접자세가 다르긴 하지만 초후판에 대한 능률 비교 자료로서 검토하여 보면 다음과 같다. 내로우 갭 용접의 경우는 고가의 용접 장치와 정밀한 시공 및 장시간의 용 접시공 시간을 필요로 하는데다가 중간에 용접 결함이나 중단이 발생하게 되면 수정 작업에 큰 애로를 겪을 수 있다는 것을 충분히 예측할 수 있다.

플럭스 코어드 아크 용접인 경우는 저렴한 용접장치를 사용하여 비교적 용이 하게 용접작업을 수행할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 수십 번에 걸친 용접 패 스를 시공해야 하므로 많은 용접공수가 필요하게 되고, 수십 회 반복되는 용접 작업으로 인하여 용접결함의 발생 확률이 그만큼 높아지게 된다. 또한 적절 한 변형 방지 대책을 세워두지 않으면 용접 변형을 크게 수반하게 된다.

일렉트로가스 용접의 세경 용접법과 비교하여 보면 2전극 용접장치로 부재 두께 약 80mm까지 한 패스로 용접할 수 있으므로 매우 능률적이며 용접 각변형 은 거의 고려하지 않아도 될 수준이다. 특히 용접부의 균열 발생을 방지하기 위한 예열이 필요 없는 우수한 용접법이나 단 한 패스에 최대 600kJ/cm 정도에 까지 이르는 용접 입열로 인한 용접 열영향부의 확대와 모재의 미세 조직의 열 화 부분이 가장 중점적인 관심이 되어 왔다.

따라서 수직 초후판 용접부에 있어서는 대입열에 따른 충격인성의 저하 문제 와 전용착금속부의 연신율 확보에 대한 대책을 세울 수 있다면 일렉트로가스 용접법이 가장 경쟁력 있는 용접법으로 판단된다. 다만 일렉트로가스 용접법의 특성상 최소 부재 두께는 10mm 이상이 되어야 하고 1전극 용접인 경우 용접할 수 있는 최대 두께는 약 65mm, 최대 용접 길이는 약 20m 정도이다. 용접 열원의 밀도에 대한 하나의 예를 들면, 1.5 kW 용량의 헤어드라이어로 1.6mm 두께의 AISI 304L이나 AISI 316L 등 오스테나이트계 스텐리스 강판을 가열하면 열은 대략 지름 50mm 이상 되는 면적으로 확산되며 점진적으로 가열 이 되어 온도가 상승하긴 하지만 그것을 녹이지는 못하는 데 비하여 1.5 kW의 에너지로 텅스텐 불활성 가스 아크(TIG)용접을 하면 지름 6mm 정도의 작은 면 적에 아크가 집중되고 손쉽게 용융지를 형성한다.

이것은 바로 용접에 있어서 열원의 파워 밀도를 단적으로 보여 주는 예이다. Fig. 3.15에서와 같이 열원의 파워밀도의 증가라는 장점은 더 깊은 용입과 더



Fig. 3.15 Variation of heat input to the workpiece with power density of the heat source 빠른 용접속도를 얻을 수 있으며, 모재에의 최소한의 손상으로 더 나은 용접품 질을 확보할 수 있다는 점이다[9].
일렉트로가스 용접과 일렉트로슬랙 용접의 경우 아크용접과 전기저항용접으 로서 사용하는 용접 입열량에서는 가장 높은 수준이나 에너지 밀도는 그다지 높지 않게 나타나 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 3.16에서 볼 수 있듯이 용접법에 따른 열원의 밀도에 있어서 일반적으로 거의 모든 금속류는 10<sup>3</sup>Watts/cm<sup>2</sup> 정도의 열에너지에서 용해되고, 10<sup>6</sup> -10<sup>7</sup> Watts/cm<sup>2</sup>의 열에너지에서 수천분의 일초 안에 증발이 이루어진다[30].

용융 용접에서의 열량은 대개 10<sup>3</sup>~10<sup>6</sup>Watts/cm<sup>2</sup> 정도의 수준이며, 상대적으 로 열원의 밀도가 높은 전자빔이나 레이저빔용접에서는 10<sup>6</sup> Watts/cm 정도로서 가장 높은 수준을 나타내고 있다.



Fig. 3.16 Heat intensity controls melting

여기에서, 반 무한 판형재를 기준할 때 아인시타인 방정식은

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = erf\bigg(\frac{x}{2\sqrt{\alpha \cdot t}}\bigg)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c}$$

가 되며, 여기에서 X=열 확산 거리(cm), a=열 확산율(c㎡/s), t=시간(s)이다. 반 무한 입체형재의 경우는,

$$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x exp(-u^2) \cdot du = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( x - \frac{x^3}{3 \cdot 1!} + \frac{x^5}{5 \cdot 2!} + \frac{x^7}{7 \cdot 3!} + \dots \right)$$

으로 표현되고,

여기에서, T<sub>i</sub> = T=0에서의 2차원 열원 T∝에 대한 시작 시간이다.

Fig. 3.17은 강의 온도에 따른 열 집중도의 관계를 나타내고 있는데 용접부 에서 거리가 멀어짐에 따라 온도가 강하하게 되며, 그 정도는 단위 면적당 입 열량이 적을수록 온도 저하속도는 더욱 빨라지게 된다.



Fig. 3.17 Heat intensity of steel

## 제 4 장 일렉트로슬랙 및 일렉트로가스 용접 기반 신공정 개발

4.1 선체 구조용 강재

4.1.1 열가공 제어강

1) 열가공 제어강의 용접성

선체 건조용 열가공 제어(Thermo Mechanical Controlled Process, TMCP)강 은 미국선급협회(AWS) 분류 기준 인장강도 50kg/mm급인 AH32에서 EH40급까 지 개발, 생산되고 있으며, EH36급까지는 보편화된 지 오래되어 후판이 많이 사용되는 컨테이너 운반선을 중심으로 활발히 적용되고 있다.

항복 강도가 한 단계 높은 EH40급 강은 한국과 일본의 몇몇 조선소를 제외 하고는 아직 적용이 본격적으로 이루어지고 있지는 않은 실정이다.

Table 4.1과 4.2는 EH36급 선체건조용 열가공 제어강의 화학 조성과 기계적 특성의 한 예를 각각 나타낸 것이다.

Table 4.1 Chemical composition of EH36 (wt%)

	С	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Cr	Мо	V
EH36	0.07	0.21	1.54	0.005	0.001	0.01	0.19	0.01	0.001	0.001

Table 4.2 Mechanical properties of EH36

	Yield Strength (N/mm²)	Tensile Strength (N/mm²)	Elongation (%)	Impact absorbed energy J (-40°C)
EH36	466	577	25	327



Fig. 4.1 Accelerated cooling of TMCP steel



Fig. 4.2 Comparison of yield strength of TMCP with conventional rolled steel



Fig. 4.3 Comparison of tensile strength of TMCP with conventional rolled steel

Fig. 4.1은 열가공 제어강의 제조공정에서 가속 냉각이라는 독특한 과정이 도 입되어 있는 것을 보여주고 있는데 자체가 저탄소와 저합금을 바탕으로 가속냉 각방식에 의해 재료의 강도를 확보한 대입열 용접용 강재라고 일반적으로 규정 할 수 있다.

Ni 등 고가의 합금 성분을 적게 첨가하더라도 미세 조직을 얻을 수 있고, 보다 높은 인장 및 항복 강도를 확보할 수 있을 뿐 아니라 균열 감수성도 낮으 며 용접성이 일반 선체용 강재보다 더 좋아지게 된다. 여기서 대입열 열가공 제어강이라고 별도로 언급하는 것은 특히 용접 시에 단위 센티미터 당 500kJ이 넘는 큰 용접 입열량으로 용접하였을 때라도 우수한 용접부 충격인성치를 얻을 수 있도록 설계한 강재라는 의미이다.

Fig. 4.2와 4.3은 이러한 열가공 제어장과 일반압연장판에 있어서 항복강도와 인장강도의 경향을 각각 보여 주고 있는데 열가공 제어강의 경우가 공히 높은 강도수준을 나타내고 있음을 알 수 있다.

다음의 Table 4.3과 4.4에 나타낸 대입열용 열가공 제어강의 경우를 Table 4.1과 4.2의 그것과 비교하면 인장강도나 항복강도 면에서는 별다른 차이를 보 이고 있지 않으나 충격 인성치에서는 대입열용 열가공 제어강 쪽이 약 10% 정 도 더 높은 수준을 보이고 있다는 것을 알 수 있다.

	С	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Cr	Мо	V	Ti
EH36	0.08	0.19	1.55	0.006	0.002	0.01	0.02	0.02	0.001	0.001	Tr

Table 4.3 Chemical composition of EG36 of high heat input steel(wt%)

Table 4.4 Mechanical properties of EG36 of high heat input steel

	Yield Strength (N/mm²)	Tensile Strength (N/mm²)	Elongation (%)	Impact absorbed energy J (-40°C)
EH36	418	549	28	368

현재 개발되어 상용화된 대입열 열가공 제어강은 일반적으로 일반 열가공 제 어강에 비해 동일한 충격인성치 확보를 기준으로 50% 이상의 용접 입열량을 더 높여 사용할 수 있는 것으로 확인되고 있다.

## 2) 열가공 제어강의 예열 특성

용접 시 예열의 목적은 용접부의 냉각속도를 낮추어 열영향부에서의 마르텐 사이트 조직의 생성을 막는 것 즉, 경화도를 낮추어 균열의 발생을 미리 예방 하고자 하는 것이다.

탄소강에서 있어서 용접성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 당연히 탄소이며, 탄소 이외의 합금 원소의 영향은 탄소를 등가로 환산한 탄소당량(Carbon equivalent, Ceq, C.E)으로 표시할 수 있다. 즉, 탄소당량은 철강재료에 있어서 탄소를 1로 하였을 때 열영향부의 경화에 대한 합금원소의 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 효과의 비율을 경험적으로 구하고, 그 비율에 의해 각 합금 원 소량을 탄소의 양으로 횐산하여 본래의 탄소량에 더하여 계산한다.

근래에 들어 또한 탄소당량은 열영향부의 경화기준으로서만이 아니라 용접시 공 시의 용접재료의 선택이나 예열이나 용접후열처리 기준을 설정할 때, 그리 고 철강재의 저온균열감수성 등을 평가하는 기준으로도 많이 사용되고 있다. 탄소 이외에 Si, Mn, Mo, Cr, Ni, V 등의 성분이 경화능을 향상시켜 임계냉 각속도와 오스테나이트로부터 마르텐사이트로의 변태온도를 낮추어 주기 위해 첨가된다. 탄소당량을 산출하는 공식은 용도에 따라 여러 가지의 것이 사용되 고 있으며, 그 중 다음과 같은 일본용접엔지니어학회(WES)의 것이 비교적 많 이 활용되고 있는 편이다.

Ceq(%) = C + (1/6 Mn) + (1/24 Si) + (1/40 Ni) + (1/5 Cr) +

(1/4 Mo) + (1/14 V)

그 외 국제용접협회(IIW) 및 영국공업규격(BS), 미국용접협회(AWS) 등에서 제

공하고 있는 공식들은 다음과 같다.

Ceq = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15; BS 2642, IIW Ceq = C + Mn/4 + Ni/20 + Cr/10 + Cu/40 + Mo/50 + V/10, AWS

열가공 제어강은 탄소당량의 지수를 높이는 탄소를 비롯 여러 가지 합금성분 이 일반 압연강에 비하여 상대적으로 적게 함유되기 때문에 탄소당량이 비교적 낮고 그만큼 예열 온도도 동일 두께를 기준하여 낮은 편이다.

한편, 탄소당량은 모재 또는 용접재료의 화학조성에만 의존하므로 균열의 감 수성에 대한 정확한 판단을 하기에는 다소 부족한 점이 있다. 균열은 화학 조 성 외에 대기 또는 용접부재의 흡습상태, 부재크기 등에 극히 민감하므로 이들 까지 고려할 때 더욱 정확한 균열 감수성을 예측할 수 있다(각 성분은 %).

Pc = PCM + /60xH + /600xt (or K/40,000)

단, PCM(용접 균열 감수성 지수, %)

= C + Si/30 + Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V + 5xB

- H: 확산성 수소량(cc/100g)
- T: 판의 두께(mm)
- K: 구속도(kg/m.m)







Fig. 4.4 An example of Preheating guide line for welding(a) Preheating guideline for high low input welding(b) Preheating guideline for high heat input welding

$$E = \frac{U[volts] \cdot I[amps] \cdot welding time[min] \cdot 6}{length of weld[mm] \cdot 100} \left[\frac{kI}{mm}\right]$$

HD 5 = max. 5ml diffusible hydrogen per 100g of weld metal HD 15 = max. 15ml diffusible hydrogen per 100g of weld metal

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$
 [% in weight]

Fig. 4.4는 독일선급협회의 용접 시의 예열기준 및 가이드라인을 보여 주고 있다. 앞서도 언급한 바와 같이 낮은 탄소당량 수준을 기저로 한 열가공 제어 강의 우수한 용접성에도 불구하고 일부 선급협회 등에서는 앞의 Fig. 4.4 및 탄 소당량식 등을 토대로 예열기준 및 가이드라인을 설정하고 피용접재의 두께에 따라 좀더 엄격하다고 판단되는 용접 전 예열을 요구하고 있는 실정이다.

용접부의 크기와 용접 입열과의 관계를 살펴볼 때 용접의 단면적은 용접 입 열량과 대체적으로 비례한다. 이것은 아크에 더 많은 에너지가 공급되면 단위 길이 당 더 많은 용가재와 모재가 녹고 결과적으로 큰 용접부를 만들기 때문에 직관적으로 이에 대한 공통된 인식을 만든다.

만일 동일한 용접전류 및 전압 상태에서 한쪽은 용접속도를 빠르게, 다른 한 쪽은 느리게 용접한다면, 느리게 용접한 쪽의 용접부가 더 크게 된다.

다음의 방정식은 1998년에 밀러(Miller)가 발표한 것으로서 용접 입열량에 근 거한 필릿용접 각장의 근사값이다[29].

$$\omega = \sqrt{of - \frac{H}{500}}$$

여기서,

ω = fillet weld leg sizeH = heat input (kJ/mm)

4.1.2 고항복강

EH36급 강재에 비해 항복강도가 약 10% 이상 상회하는 EH40(400MPa)급 강재는 또한 동일한 강성을 유지하면서 두께를 약 10% 정도 줄여 설계할 수 있다.

후판이 적용되는 초대형 선박의 현측후판이나 헤치 코밍 부위, 혹은 상갑판 구조물 등에 적용하면 선체의 경하중량을 상당히 저감할 수 있게 되는데 용접 재료, 용접 입열량 관리 등 용접 공정관리가 관건이라고 할 수 있다.

항복 강도가 460MPa를 상회하는 고항복강은 아직 상용화가 진행 중이다.

이러한 고항복장의 개발에는 두께가 증가함에 따라 용접시공성이나 고온 균 열, 각종 용접 결함발생 가능성의 증가가 문제점으로 대두되기 때문에 선체에 적용되는 강재를 일정 두께 수준으로 제한하여 둠으로써 일관된 용접부의 품질 을 확보하고자 하는 목적도 포함하고 있다.

이와 같이 용접 실험을 위해서 열가공 제어강과 고항복강재를 검토하였으나 고항복강재의 경우 이에 적합한 용접재료를 확보하지 못하여 우선 열가공 제어 강에 대한 실험을 수행하였다.

다음의 Table 4.5와 4.6은 항복 강도 400MPa급 강재의 화학 조성과 기계적 성질의 한 예를 나타내고 있으며, Table 4.7과 4.8은 460MPa급 고항복강의 화 학 조성과 기계적 성질의 한 예를 나타낸 것이다.

	С	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Cr	Мо	V
EH-40	0.07	0.21	1.54	0.005	0.001	0.01	0.19	0.01	0.001	0.001

Table 4.5 Chemical composition of EH40 (wt%)

Table 4.6 Mechanical properties of EH-40

	Yield Strength (N/mm²)	Tensile Strength (N/mm²)	Elongation (%)	Impact absorbed energy J (-40°C)
EH-40	446	577	25	327

Table 4.7 An example of chemical composition for YP460 (wt%)

	С	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Cr	Мо	V
YP460	0.09	0.33	1.50	0.014	0.002	0.08	0.06	0.02	0.001	0.003

Table 4.8 An example of mechanical properties for YP460

	Yield Strength (N/mm²)	Tensile Strength (N/mm²)	Elongation (%)	Impact absorbed energy J (-40°C)
YP460	475	565	28	358

## 4-2 용접 재료

4.2.1 일렉트로슬랙 용접용 재료 및 특성

1) 와이어 전극

일렉트로슬랙 용접용 와이어 전극은 수요의 부재로 인하여 이전의 제품들이 대부분 생산이 중단되었으며, 상용화 되어 있는 등급이 낮은 것들이어서 EH급 강재에 적용 가능한 재료로서 유일하게 상용화되어 있는 YM-55HF를 채택하였 다.

Table 4.9 및 Table 4.10에 이 와이어 전극의 화학 조성과 용착금속의 기계 적 성질을 나타내었다.

초대입열을 수반하는 일렉트로슬랙 용접에 있어서 대부분의 경우에는 용접부 의 충격 인성을 확보하는데 초점이 맞추어져 있었으므로 충격 인성을 비롯하여 인장강도 및 항복강도는 요구 수준을 충분히 만족하였지만 연신율이 저하하는 경향을 나타내었던 게 사실이다.

Table 4.10에서 볼 때 본 재료의 특징적인 점은 용착금속의 기계적 성질 중 특히 연신율이 30% 이상 확보될 수 있는 것으로 나타나 있다. 이는 물론 용접 조건에 따라 달라지는 것이기는 하지만 이전의 용접재료들에 있어서 25~26% 정도의 값을 보여주었던 것에 비해서는 매우 양호한 것이라 판단된다.

	С	Si	Mn	Р	S	Mo	Ni
YM- 55HF	0.08	0.44	1.36	0.006	0.002	0.18	-

Table 4.9 Chemical composition of YM-55HF for ESW (wt%)

Table 4.10 Mechanica	l properties	of YM-55HF	for ESW
----------------------	--------------	------------	---------

	Yield Strength (N/mm²)	Tensile Strength (N/mm²)	Elongation (%)	Impact absorbed energy J (-20°C)
YM- 55HF	590	630	31	120

2) 플럭스

플럭스는 가장 중요한 재료 중 하나로서 용접 공정의 안정성을 좌우한다. 일렉트로슬랙 용접에서 사용하는 플럭스는 서브머지도 아크용접이나 플럭스 쿠어드 아크용접 또는 피복아크용접에 사용되는 플럭스와 같이 주 용융 용가재 로서 첨가되는 것이 아니라 용접 그루브 내에서 용탕을 안정화시키고 용융지의 제반 거동을 좌우하며, 특히 와이어 전극을 통하여 전달되는 용접 전류의 흐름 에 영향을 미치는 독특한 역할을 수행하게 된다.

용접 중 플럭스가 용해되어 형성된 전도성 슬랙은 전기에너지를 열에너지로 변환하여 와이어 전극과 소모성 가이드 튜브 등의 용가재와 모재를 녹이며 용 융지 내의 모든 거동들을 주도하는 역할을 수행하면서 용융금속 및 용접부를 대기로부터 보호한다.

용접 중 플럭스는 연속적으로 공급되지 않고 용융지의 거동에 따라 안정화가 요구될 때마다 소량씩 투입되는 형태를 띄게 된다.

이와 같은 중요한 임무를 띈 플럭스는 용해되어 용융 슬랙이 되었을 때 전기 전도성과 충분한 열을 발생하기 위해 적절한 전기저항을 띄어야 하지만 전기 저항이 너무 높으면 전극과 용융금속 사이에 아크가 발생하게 된다.

또한 이 용융 슬랙은 용접부 내의 열전달을 위해 충분한 점성을 지녀야 하 며, 점성이 너무 높으면 용접부내에 슬랙 혼입을 유발할 수 있으며 반면, 너무 낮으면 용융 슬랙을 가두어 주는 역할을 하는 수냉 동판 즉, 동당금 밖으로 새 어나올 수 있다.

플럭스의 용해 온도는 용융 금속보다 낮아야 하며 비등점은 가동 온도보다 높아야 하고, 용융 슬랙은 가능한 한 용접부와 반응을 일으키지 않아야 한다. 또, 가능한 한 넓은 범위의 용접조건에서도 안정한 용융지의 거동상태를 유지 할 수 있도록 기능을 발휘해야 한다. 3) 와이어 가이드 튜브

비소모성 가이드 튜브는 전극을 용융 슬랙에 정확히 공급할 수 있도록 인도 하는 역할을 하며 그 재질로서는 고온에서 적절한 강도를 갖도록 대부분 Be-Cu합금으로 만든다. 용접 중이나 통전 중에 발생할 수 있는 전기적 단락 현상을 방지하기 위하여 절연체로 외부를 감싸주며, 가이드 튜브의 직경은 그 루브의 갭을 감안하여 일반적으로 13mm 이하로 제작된다.

소모성 가이드 튜브는 전극을 지지하고 전류의 주된 통로로서 용융 슬랙의 표면에서 녹으며 용융금속의 일부가 되므로 용융금속과 화학성분이 유사하게 제작된다.

용접부가 길 때에는 모재와의 전기적 접촉을 방지하기 위해서 반드시 튜브와 모재간의 절연이 필요하며 또한, 절연물도 용융금속의 일부가 되므로 용융금속 의 조성이나 용접공정에 영향을 미치지 않아야 한다. 가이드 주요 단면이 원형 인 형태로 제작되는데, 용융부의 전 단면적을 적절하게 가열할 수 없거나 용접 부의 형태가 불규칙할 때 원형 가이드 튜브 옆에 판을 붙인 날개형태의 특수한 모양의 것을 사용하기도 한다. 4.2.2 일렉트로가스 용접용 재료 및 특성

일렉트로가스 용접용 와이어 전극은 용접부의 물성을 결정하는데 있어서 가 장 중요한 인자가 되며, 플럭스 코어드 타입과 솔리드 타입의 두 가지를 사용 하였으며, 장재의 등급과 모재의 두께에 따라 각각 조건을 달리하였다.

Table 4.11~4.22은 용접 실험에 사용된 각중 용접재료의 화학 성분과 기계적 성질을 보여 주고 있다.

Table 4.11 Chemical composition of SC-EG2 (wt%)

	С	Si	Mn	Р	S	Мо
SC-EG2	0.08	0.30	1.45	0.016	0.013	0.12

Table 4.12 Mechanical properties of SC-EG2

	Yield Strength (N/mm²)	Tensile Strength (N/mm²)	Elongation (%)	Impact absorbed energy J (-20℃)
SC-EG2	510	560	27	60

Table 4.13 Chemical composition of DWS-43G (wt%)

	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Мо	Ti
DWS-43G	0.08	0.35	1.63	0.014	0.010	0.02	0.17	0.02

	Yield Strength (N/mm²)	Tensile Strength (N/mm²)	Elongation (%)	Impact absorbed energy J (-20°C)
DWS-43G	470	600	27	62

Table 4.14 Mechanical properties of DWS-43G

Table 4.15 Chemical composition of EG-3 (wt%)

	С	Si	Mn	Р	S	Мо
EG-3	0.08	0.29	1.85	0.011	0.008	0.15

Table 4.16 Mechanical properties of EG-3

				Impact
	Yield Strength	Tensile Strength	Elongation	absorbed
	(N/mm²)	$(N/mm^2)$	(%)	energy
				J (−20°C)
EG-3	510	620	30	150

Table 4.17 Chemical composition of DWS-1G (wt%)

	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Мо	Ti
DWS-1G	0.05	0.25	1.60	0.009	0.007	1.40	0.13	0.05

Table 4.18 Mechanical properties of DWS-1G

	Yield Strength (N/mm²)	Tensile Strength (N/mm²)	Elongation (%)	Impact absorbed energy J (-60°C)
DWS-1G	500	615	25	100

	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Мо
DWS- 50GTF	0.08	0.24	1.54	0.012	0.008	1.83	0.10
DWS- 50GTR	0.09	0.29	1.60	0.008	0.006	0.65	0.2

Table 4.19 Chemical composition of DWS-50GTF/R (wt%)

Table 4.20 Mechanical properties of DWS-50GTF/R

	Yield Strength (N/mm²)	Tensile Strength (N/\mm²)	Elongation (%)	Impact absorbed energy J (-60°C)
DWS- 50GTF	535	652	22	72
DWS- 50GTR	471	620	22	89

Table 4.21 Chemical composition of EG-3T and YM-55H (wt%)

	С	Si	Mn	Р	S	Мо	Ni
EG-3T	0.05	0.36	1.65	0.008	0.003	0.17	0.47
YM-55H	0.08	0.44	1.36	0.006	0.002	0.18	_

Table 4.22 Mechanical properties of EG-3T and YM-55H

	Yield Strength (N/mm²)	Tensile Strength (N/mm²)	Elongation (%)	Impact absorbed energy J (-20°C)
EG-3T	525	662	22	137
YM-55H	590	630	31	120

4.3 일렉트로슬랙 고용착 용접 기법 개발

4.3.1 비소모 가이드 튜브 방식 용접

소모 가이드 튜브 방식 일렉트로슬랙 용접법은 용가재가 전극과 가이드 튜브 로 구성되며 용접 전류는 가이드 튜브를 통하여 용융지로 전달된다. 용접이 진 행되는 동안 가이드 튜브는 용융 슬랙 상부에서 용해되어 용탕 형성을 지원하 는 동안 용접 헤드는 움직이지 않고 고정되어 있으며 수냉식 동당금도 이동하 지 않기 때문에 장비의 구조와 작동이 간단하다.

용해된 가이드 튜브는 용착금속의 일부를 형성하게 되는데 용접부의 약 5~15% 정도를 차지하게 된다.

이와는 달리 비소모 가이드 튜브 방식 일렉트로슬랙 용접은 일반 일렉트로가 스 용접 장치와 시스템을 활용한 용접기법으로서 용접 그루브 이면에는 길이가 긴 고정식 동당금을 부착시키고 전면에는 이동식 동당금을 장착하여 용접 실험 을 진행하였다.

전면의 동당금은 일렉트로가스 용접에 사용하는 것보다 길이를 다소 길게 하 슬랙 용탕이 흘러넘치지 않고 깊이가 충분히 유지될 수 있도록 하였으며 플 럭스 자동 공급 장치를 제작, 부착하여 용접 중 일정량의 플럭스가 균일하게 공급되도록 하여 용융지의 안정을 꾀하였다(Fig. 4.5).

이 방식의 가장 큰 장점은 일반 일렉트로슬랙 용접의 넓은 그루브 조건이 아 닌 일렉트로가스 용접과 동일한 그루브 조건을 사용함으로서 용접 입열을 일렉 트로가스 용접 수준으로 대폭 낮추게 된 것이다. 이는 동일한 두께의 부재를 용접할 때의 용접 입열량에 있어서 일렉트로슬랙 용접 쪽이 일렉트로가스 용접 의 2~3배에 달하기 때문에 만족할만한 용접부의 충격인성을 확보할 수 없었던 문제를 해결할 수 있게 된 것이라고 할 수 있다.

용가재로서는 Fig. 4.6에서 보는 것과 같은 형태의 1.6ø짜리 솔리드 와이어 전극을 사용하였으며, 용접 전원은 600(A) 용량으로 인버터 방식으로서 용접의

안정성과 제어 성능이 우수하였다. 특히 이 용접 전원은 100%의 사용율





Fig. 4.5 Non-consumable guide Electroslag welding test and its equipment

(Duty cycle)을 가졌으므로 일반적으로 사용하는 용접 전류 값보다 20% 정도 높여 460(A) 부근에서 장시간 연속 용접이 가능하도록 하였다.

본 개발 실험에서는 용접부의 물성치보다는 프로세스 개발에 중점을 두었으 며, 용접 금속이 채워질 그루브 체적의 축소와 용접 속도의 제고라는 두 가지 방향의 진로를 따라 진행한 결과 500kJ/cm 대까지 용접 입열량을 낮출 수 있 게 되어 선박 건조 공정에 적용할 수 있는 가능성을 열어 놓게 되었다.



Fig. 4.6 Solid wire and its feeder for Non-consumable guide Electroslag welding

4.3.2 소모 가이드 튜브 방식의 개량

1) 시스템의 개선 내용과 원리

기존 소모성 가이드 방식 일렉트로슬랙 용접법에서 용접 입열량을 줄이는데 목표를 두고 장비와 시스템을 개선하여 새로운 형태의 간편화된 일렉트로슬랙 용접시스템을 구성하였다.

전류밀도를 높여 와이어의 송급속도와 단위 시간당 용착량을 증가시키기 위 해 와이어 전극의 지름을 2.80에서 1.60짜리로 교체하였는데 이는 단면적으로 보면 3분의 1로 대폭 축소된 것이다. 용접 전원은 직류 정전압 방식 용접 전원 을 사용하였다. 또한 용접을 안정되게 진행할 수 있는 범위 내에서 용접 그루 브의 면적이 최소화되도록 하였고 단위 시간당 용착량을 증가시키기 위해 특수 제작한 솔리드 와이어 노즐을 와이어 가이드 튜브에 덧붙여 용접 속도를 향상 시켰다(Fig. 4.7).

세경 와이어와 직류 정전압방식 용접전원의 채택은 범용의 플럭스 코어드 아 크 용접용 용접전원과 와이어피더 등의 장비를 그대로 사용할 수 있도록 하였 고 용접부의 와이어 가이드 노즐 고정용 장치를 제외하고는 추가 장비가 필요 없는 저비용의 일렉트로슬랙 용접시스템의 구성이 가능하게 된 것을 확인하였 다.

또 Fig. 4.8~4.10은 양면 V-그루브 조건에서 투 런 기법을 이용하여 용접하는 방법을 개념적 또는 실제적으로 보여 주고 있다[30]. 먼저 양면 V-그루브는 편면 V-그루브의 경우보다 단면적이 훨씬 작아 그루브 내에 채워 넣어야 할 전체 용접 금속량도 적어지게 된다. 이것을 양쪽에서 각각 한 패스씩 나누어 용접하게 되므로 패스당 용접입열량이 대폭 줄어들게 되어 용착금속의 기계적 성질 개선에 긍정적인 결과를 가져오게 된다.

한편 이 방법의 단점으로서는 그루브를 준비하는 절단 공정에 공수가 많이 들고 정밀한 루트 갭의 확보, 특수 형상의 동당금의 준비가 필요한 점과 두 패 스를 시공해야 하므로 전체 용접 시간이 많이 걸리는 점이라고 할 수 있다.



Fig. 4.7 Schematic view of wire guide tube installed with filler rod



Fig. 4.8 Welding sequence of Two-run method with Double V-groove



Fig. 4.9 Welding completed for one side of Two-run method with Double V-groove



Fig. 4.10 Two run method in Electroslag welding process(Double V-groove)

다음의 Fig. 4.11은 이 용접 실험에 사용된 600암페어(A) 용량의 용접 전원과 와이어 송급 장치 및 냉각수 순환장치이며, Fig. 4.12는 용접이 완료된 시험편 의 모습을 보여 주고 있다.



Fig. 4.11 Welding power supply, wire feeding unit and water cooling equipment for Two-run method



Fig. 4.12 Completion of welding with Two-run method Electroslag welding

2) 형상 계수

앞에서 언급한 바 있는 내로우 갭 일렉트로슬랙 용접법에 착안하여 과거에 사용되었던 일반 일렉트로슬랙 용접법에 비해 중대한 개선을 이루었다. 용접 결함발생에 대한 민감성이 감소되었고 생산성은 크게 증대하였으며, 용접 열영 향부의 인성이 향상되었는데 그 단적인 예로서 고온 균열 발생 가능성이 감소 된 것이다. 이것은 내로우 갭 일렉트로슬랙 용접법에 있어서의 용융지의 형상 계수(Form factor) 값이 높기 때문이다.

형상 계수는 용융지의 폭 대비 길이의 비(W/D)로 정의되는데 Fig. 4.13은 용 융지의 형상에 따른 균열 저항성을 나타내고 있으며 'W'는 용융지의 너비를, 'H'는 용융지의 깊이를 나타낸다. 높은 형상 계수비의 근본적 원인은 상당히 빠른 속도로 공급되는 튜브 형태의 와이어 전극이 다 얕고 더 넓은 용융지에서 손쉽게 녹아 없어지게 되어 용융지 내에서 본래의 형태를 유지할 수 없기 때문 이다.

사용하는 용접 전류 및 전압 역시 용융지의 깊이와 너비에 큰 영향을 미친 다. 높은 형상 계수비의 결과가 되는 얇고 넓은 용융지는 고온 균열을 완화시 켜 주는 것으로 확인되고 있다. 가이드 튜브의 제조 시에 들어가는 각종 합금 성분은 용접부의 조직을 미세화하여 균열 발생을 억제하는 데 기여한다.

소모 가이드 튜브 방식을 개량하여 내로우 갭 일렉트로슬랙 용접과 같이 용 접 속도의 향상을 목적으로 수행한 본 실험에서도 역시 일반 일렉트로슬랙 용 접의 경우 보다 용접 그루브에 채워 넣어야할 용접 재료가 적으므로 그루브를 채워가는 용접 속도는 더 증가하였다.

용접부의 충격 인성은 용접부의 냉각 속도를 빠르게 해 주는 낮은 용접 입 열량과 가이드 튜브 등을 통해 용탕에 유입된 합금이 강화되어 용접 금속 내에 서 유익한 미세조직을 형성하게 되었으므로 대폭 향상된 것을 확인할 수 있었 다. 즉, 용착 금속의 충격 인성을 높여 주는 많은 양의 침상 페라이트(Acicular ferrite)가 만들어지는 대신 충격 인성을 약화시키는 입계 페라이트 (Grain-boundary ferrite)의 생성은 최소화되었기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 4.14~4.16은 일렉트로슬랙 용접에 있어서 용접 전압 및 전류, 와이어 전 극의 돌출 길이에 따른 용융지의 형상에 대하여 나타내고 있다[11].



Fig. 4.13 Comparison of weld pool geometry on susceptibility to hot cracking



Fig. 4.14 Weld pool comparison depending on voltage (a) High voltage (b) Low voltage



Fig. 4.15 Weld pool comparison depending on welding current (a) High current (b) Medium current (c) Low current



Fig. 4.16 Weld pool comparison depending on electrode extension (a) Short electrode extension (b) Long electrode extension



Fig. 4.17 An example of comparison of Form factor (a) Form factor 0.8 (b) Form factor 1.5

앞의 Fig. 4.17은 형상 계수비에 따른 일렉트로슬랙 용접에 있어서 용융지의 깊이와 너비의 형상을 보여 주고 있다.

오른쪽 (b)의 경우가 형상 계수가 1.5로서 왼쪽의 (a)보다 약 2배 가까이 높 아 그만큼 균열 저항성이 크다고 할 수 있으나 이러한 균열 생성에 영향을 미 치는 인자는 형상 계수만이 아니라 앞에서 언급한 바 있듯이 용착금속 내의 합 금원소도 포함된다.

증가된 용접 속도는 용접부, 특히 열영향부에서의 높은 충격 인성치를 얻기 위해 첫 번째로 확보해야 하는 것이며 추가적으로 부재 두께방향으로 전개된 넓은 그루브를 가능한 짧은 시간 내에 채워 올리기 위하여 가이드 튜브의 양쪽 에 서브머지드 아크 용접용 및 피복아크용접 심선을 부착시켜 특별한 형태의 가이드 튜브를 제작하여 용접하였다.

4.3.3 2전극(탄뎀) 일렉트로슬랙 용접

2전극 일렉트로슬랙 용접은 두 가지 형태의 시스템을 구성 용접실험을 실시 하였다. 첫 번째 방법은 용접 전원 하나에 두 대의 와이어 송급 장치를 사용하 여 하나의 용융지에 두 개의 와이어 전극을 동시 송급하는 기법으로서 1전원 2 전극(1Power supply 2 wire) 일렉트로슬랙 용접법이다.

와이어 송급 장치는 기존의 플럭스 코어드 아크용접에 사용하는 것을 그대로 사용하였고, 일렉트로슬랙 용접의 탄뎀 방식 중 가장 간단한 구조를 가진 시스 템을 구성하게 되었다.

실험의 결과를 종합하여 보면, 용접은 수행이 되었으나 하나의 전원에서 각 와이어 전극으로 배분되는 용접 전류 및 전압이 불안정하여 정상적인 용융지의 안정화가 이루어지지 않았다. 특히 와이어 송급 속도가 불일정하고 아크 점호 상태도 불안정하여 2전원 2전극(2Power 2 wire) 일렉트로슬랙 용접시스템을 구성하여 재 실험을 수행하였다.

Fig. 4.18은 2전극을 이용한 양면 V-그루브 용접과 용접 헤드의 위빙 방식을

보여주고 있으며 Fig. 4.19~20은 2전극 일렉트로슬랙 용접시스템의 장치와 기 본 개념을 각각 보여 주고 있다.



Fig. 4.18 Schematic drawing of Tandem electrode type Electroslag welding with Double V-groove



Fig. 4.19 One-power two-wire Electroslag welding system



Fig. 4.20 Two-power two-wire Electroslag welding system

4.3.4 실험 기법별 용접 조건 및 충격 인성

비소모 가이드 튜브 방식과 소모 가이드 튜브 방식으로 용접 공정 개발 실 험을 실시하였으며 그에 대한 용접 조건으로서 Table 4.23에는 비소모 가이드 튜브 방식의 경우를, Table 4.24에는 소모 가이드 튜브 방식의 경우를 각각 나 타내었으며, 용접부의 충격시험 결과는 Table 4.25~4.41에 나타내었다.

충격 시험의 결과를 종합하여 볼 때 용접 재료별로 충격 인성치의 편차가 나 타났으며, 실험 강재에 있어서는 열가공 제어강과 일반 열처리 강과의 사이에 충격 인성치의 차이가 크게 나타난 것을 확인할 수가 있다.

또 다른 변수로서 용접 전류 및 전압, 플럭스의 투입 양이나 투입 방법 등에 따라서도 충격 인성치의 변화가 많이 나타난 것을 확인할 수 있었다. 따라서 용접 파라미터에 따른 이러한 변수들의 영향을 면밀히 분석하여 용접 조건을 최적화함으로써 양호한 용접부의 기계적 성질을 얻을 수 있도록 하는 것이 매 우 중요한 것임을 알 수 있다.

plate	Root gap (mm)	Groove angle(°)	Current (A)	Voltage (V)	Wire electrode (φ mm)	Heat input (kJ/cm)
25	23	0	395	37	YM-55S (1.6)	235
25	8	35, V	290	38	YM-55S (1.6)	200
35	8	35, V	370	42	YM-55HF(1.6)	280
27	23	0	440	42	SES-15/NES-53 (2.8)	320
37	8	20	440	48	SES-15/NES-53 (2.8)	310
	23	0	480	45	YM-55S(1.6)	550
55	8	20, V	430	44	YM-55S(1.6)	420
	8	20, V	455	45	YM-55HF(1.6)	345

Table 4.23 Welding condition for Non-consumable guide Electroslag welding

Plate thick. (mm)	Type of guide tube	Root gap (mm)	Groove angle(°)	Current (A)	Voltage (V)	Wire electrode (\$\phi\$ mm)	Heat input (kJ/cm)
25	Typical	23	0	400	42	SES-15/NES-53 (2.8)	410
07	Typical	23	0	420	44	SES-15/NES-53 (2.8)	580
31	Wing	23	0	420	44	SES-15/NES-53 (2.8)	700
	Typical	23	0	440	42	SES-15/NES-53 (2.8)	830
55	Typical	8	20	440	48	SES-15/NES-53 (2.8)	790
	Typical	23	20	420	46	SES-15/NES-53 (2.8)	1000
	Typical	8	20, V	440	48	SES-15/NES-53 (2.8)	930
65	Typical	Q	20,	420	46	SES-15/NES-53	440
05	Typical	0	Double-V	420	44	(2.8)	410
	Improved	10	20, V	420	48	SES-15/Autocon (6.0)	1070
75	Wing	20	0	520	48	SES-15/NES-53 (2.8)	1290

Table 4.24 Welding condition for consumable guide Electroslag welding

Table 4.25Impact test result of consumable guide Electroslag welding[25mm Plate thick./I-groove/23mm Root gap]

Plate thick	ness, Grade	25mm / AH32							
Consumable	combination	SES-15/NES-53 / I-groove / Typical guide							
Temperature	e of test (℃)	(	)	20					
	Shift of test	Upper center	Middle center	Upper center	Middle center				
Impact	1	150	94	63	53				
absorbed	2	119	97	61	50				
energy (J)	3	132	55	47	50				
	Average	134	82	57	51				

Plate thick	ness, Grade	37mm / AH32, TMCP						
Consumable	combination	SES-15/NES-53 / I-groove / Typical guide						
Temperature	e of test (℃)	C	)	20				
	Shift of test	Upper center	Middle center	Upper center	Middle center			
Impact	1	56	56	35	29			
absorbed energy (I)	2	92	53	34	32			
chergy (j/	3	65	57	35	35			
	Average	71	55	35	32			

Table 4.26Impact test result of consumable guide Electroslag welding<br/>[37mm Plate thick./I-groove/23mm Root gap]

Table 4.27Impact test result of consumable guide Electroslag welding[37mm Plate thick./I-groove/23mm Root gap]

Plate thick	37mm / AH32, TMCP									
Consumable	SES-	SES-15/NES-53 / I-groove / Wing guide								
Temperature	(	0		)	20					
	Shift of test	Upper center	Upper fusion line	Middle center	Middle fusion line	Upper center	Middle center			
Impact	1	92	31	75	11	27	24			
energy (J)	2	79	24	64	30	38	32			
	3	105	36	52	54	30	29			
	Average	92	30	64	32	32	28			

Plate th	ickness,				55mm / EH36, TMCP						
Consu combi	mable nation	SES-15/NES-53 / I-groove / Wing g							ide		
Temperatest	ature of (℃)		0			0		20			
Impact	Shift	Upper part			М	iddle pa	ırt	Lower part			
	of test	Center	Fusion line	Fusion line +2mm	center	Fusion line	Fusion line +2mm	Center	Fusion line	Fusion line +2mm	
absorbed	1	167	25	74	139	139	180	80	43	153	
energy (J)	2	54	24	165	220	220	190	50	32	160	
	3	79	24	105	23	23	24	47	154	43	
	Average	100	24	115	127	127	131	59	76	119	

Table 4.28Impact test result of consumable guide Electroslag welding[55mm Plate thick./I-groove/23mm Root gap]

Table 4.29Impact test result of consumable guide Electroslag welding[55mm Plate thick./I-groove/23mm Root gap]

Plate th Gra	Plate thickness, Grade			Ę	55mm ,	/ EH36	, TMC	Р			
Consu combi	5	SES-15/NES-53 / I-groove / Stick electrode core									
Temperatu		-20									
	Shift	Upper part			M	iddle p	art	Lower part			
Impact	of test	Center	Fusion line	Fusion line +2mm	center	Fusion line	Fusion line +2mm	Center	Fusion line	Fusion line +2mm	
absorbed	1	148	34	240	130	120	250	80	34	240	
(J)	2	57	39	265	94	65	79	147	33	230	
	3	33	43	240	69	22	24	82	230	179	
	Average	79	39	248	98	69	118	103	99	213	

Plate th Gra	ickness, ade		55mm / EH36, TMCP									
Consu combi	mable nation	SES-15/NES-53 / V-groove(20°) / Typical guide										
Tempera test	ature of (℃)	-20										
	Shift	U	pper pa	ırt	M	iddle p	art	Lo	wer pa	rt		
Impact	of test	Center	Fusion line	Fusion line +2mm	center	Fusion line	Fusion line +2mm	Center	Fusion line	Fusion line +2mm		
absorbed	1	135	51	19	51	183	300	59	45	80		
energy (J)	2	75	31	25	64	28	300	69	45	300		
	3	94	32	77	78	22	300	64	75	205		
	Average	101	38	40	64	78	300	64	55	195		

 Table 4.30
 Impact test result of consumable guide Electroslag welding

 [55mm Plate thick./I-groove/8mm Root gap]

Table 4.31 Impact test result of consumable guide Electroslag welding[65mm Plate thick./V-groove/8mm Root gap]

Plate th Gra	ickness, ade	65mm / EH36, TMCP									
Consu combi	mable nation	SES-15/NES-53 / V-groove(20°) / Typical guide									
Tempera test	ature of (℃)	-20									
	Shift	U	pper pa	art	M	iddle p	art	Lo	wer pa	ırt	
Impact	of test	Center	Fusion line	Fusion line +2mm	center	Fusion line	Fusion line +2mm	Center	Fusion line	Fusion line +2mm	
absorbed	1	39	28	270	34	69	300	75	54	262	
energy (J)	2	40	35	240	40	185	249	53	186	186	
	3	39	33	183	34	162	238	64	115	260	
	Average	39	32	231	36	139	262	64	118	236	

Plate the Gra	ickness, ade	65mm / EH36, TMCP										
Consu combi	mable nation	SES-15/NES-53 / Double V-groove(20°) / Typical guide										
Tempera test	ature of (℃)		-20									
	Shift	Upper part			Middle part			Lower part				
Impact	of test	Center	Fusion line	Fusion line +2mm	center	Fusion line	Fusion line +2mm	Center	Fusion line	Fusion line +2mm		
absorbed energy	1	150	62	205	39	60	244	40	36	230		
(J)	2	164	192	216	34	53	54	58	180	216		
	3	140	94	230	46	60	220	80	48	188		
	Average	151	116	217	40	58	173	59	88	211		

Table 4.32 Impact test result of consumable guide Electroslag welding [65mm Plate thick./Double V-groove/8mm Root gap]

Table 4.33Impact test result of consumable guide Electroslag welding[65mm Plate thick./I-groove/23mm Root gap]

Plate th Gra	ickness, ade		65mm / EH36, TMCP									
Consu combi	mable nation		SES-15/NES-53 / I-groove / Wing guide									
Tempera test	ature of (℃)		-20									
	Shift of test	Upper part			M	Middle part			Lower part			
Impact		Center	Fusion line	Fusion line +2mm	center	Fusion line	Fusion line +2mm	Center	Fusion line	Fusion line +2mm		
absorbed	1	25	37	230	40	220	256	31	52	223		
(J)	2	25	192	232	34	162	177	32	56	49		
	3	28	37	220	48	39	240	24	41	260		
	Average	26	89	227	41	140	224	26	50	177		
Plate th Gra	ickness, ade		25mm / AH32									
-----------------	-----------------	--------	------------------------	------------------------	--------	----------------	------------------------	--------	----	--	--	
Consu combi	mable nation		YM-55S / V-groove									
Tempera test	ature of (℃)		0									
	Shift	U	Upper part Middle part			art	Lo	wer pa	rt			
Impact	of test	Center	Fusion line	Fusion line +2mm	center	Fusion line	Fusion line +2mm					
absorbed	1	96	26	14	34	38	6					
(J)	2	143	18	16	130	12	7					
	3	62	12	10	28	24	7					
	Average	75	14	13	48	18	5					

 Table 4.34
 Impact test result of Non-consumable guide Electroslag welding

 [25mm Plate thick./I-groove/23mm Root gap]

Table 4.35Impact test result of Non-consumable guide Electroslag welding[25mm Plate thick./V-groove/8mm Root gap]

Plate th Gra	ickness, ade				25m	nm / A	H32				
Consu combi	mable nation		YM-55S / V-groove								
Tempera test	ature of (℃)		0								
	Shift	U	Upper part			iddle pa	art	Lower part			
Impact	of test	Center	Fusion line	Fusion line +2mm	center	Fusion line	Fusion line +2mm				
absorbed	1	36	145	118	48	189	91				
(J)	2	47	144	140	37	176	86				
	3	33	58	130	34	174	120				
	Average	39	116	129	40	180	99				

Plate th Gra	ickness, ade		35mm / AH32									
Consu combi	mable nation				YM-55H	HF / V	-groov	e				
Tempera test	ature of (℃)		0									
	Shift	U	pper pa	ırt	M	iddle pa	art	Lo	Lower part			
Impact	of test	Center	Fusion line	Fusion line +2mm	center	Fusion line	Fusion line +2mm	center	Fusion line	Fusion line +2mm		
absorbed	1	155	42	62	169	16	14	170	84	70		
(J)	2	148	60	75	177	11	16	180	57	69		
	3	165	42	66	210	14	20	186	49	40		
	Average	156	47	68	185	14	17	179	63	60		

 Table 4.36
 Impact test result of Non-consumable guide Electroslag welding

 [35mm Plate thick./V-groove/8mm Root gap]

Table 4.37Impact test result of Non-consumable guide Electroslag welding[37mm Plate thick./I-groove/23mm Root gap]

Plate the Gra	ickness, ade			ć	37mm /	′ AH32	, TMC	Р		
Consu combii	mable nation				YM-55	5S / I-	groove			
Tempera test	ature of (℃)		0							
	Shift	U	pper pa	ırt	Middle part			Lower part		
Impact	of test	Center	Fusion line	Fusion line +2mm	center	Fusion line	Fusion line +2mm	center	Fusion line	Fusion line +2mm
absorbed	1	80	49	220	66	9	280	61	84	160
(J)	2	60	37	37	22	83	278	46	126	300
	3	54	47	36	51	137	290	71	51	300
	Average	65	44	98	46	76	283	59	87	254

Plate th Gra	ickness, ade			ç	37mm /	′ AH32	, TMC	Р		
Consu combi	mable nation			Y	M-55S	/ V-gr	oove(35	5°)		
Tempera test	ature of (℃)									
	Shift	Upper part			Mi	iddle pa	art	Lo	wer pa	rt
Impact	of test	Cente r	Fusio n line	Fusio n line +2mm	center	Fusio n line	Fusio n line +2mm			
absorbed	1	111	65	46	158	90	48			
(J)	2	136	71	55	115	118	30			
	3	128	78	55	165	62	25			
	Average	125	71	52	146	90	34			

 Table 4.38
 Impact test result of Non-consumable guide Electroslag welding

 [37mm Plate thick./V-groove/8mm Root gap]

Table 4.39Impact test result of Non-consumable guide Electroslag welding[55mm Plate thick./I-groove/23mm Root gap]

Plate th Gra	ickness, ade			55	mm / 1	EH36, ′	ГМСР				
Consu combi	mable nation			Ŋ	YM-55S	/ I-gr	roove				
Temperatu (°(	ure of test					-20					
	Shift	U	pper pa	art	M	iddle pa	art	Lo	Lower part		
Impact	of test	Center	Fusion line	Fusion line +2mm	center	Fusion line	Fusion line +2mm				
absorbed	1	62	73	90	58	70	25				
(J)	2	90	25	61	59	57	20				
	3	100	25	110	47	14	62				
	Average	84	41	87	55	47	36				

Plate th Gra	ickness, ade			Ę	55mm /	/ EH36	, TMC	Р		
Consu combi	mable nation			Y	M-55S	/ V-gr	oove(35	5°)		
Tempera test	ature of (℃)					-20				
	Shift	Uj	pper pa	ırt	Mi	iddle p	art	Lower p		rt
Impact	of test	Cente r	Fusio n line	Fusio n line +2mm	center	Fusio n line	Fusio n line +2mm	center	Fusion line	Fusio n line +2mm
absorbed	1	35	155	63	37	50	177	50	67	220
(J)	2	28	62	65	37	50	34	39	49	192
	3	30	103	67	50	42	162	85	95	64
	Average	31	107	65	41	47	124	58	70	159

Table 4.40Impact test result of Non-consumable guide Electroslag welding[55mm Plate thick./V-groove/8mm Root gap]

Table 4.41 Impact test result of Non-consumable guide Electroslag welding[55mm Plate thick./V-groove/8mm Root gap]

Plate th Gra	ickness, ade			Ę	55mm /	/ EH36	, TMC	Р		
Consu combi	mable nation			YN	4-55HF	/ V-g	roove(2	20°)		
Tempera test	ature of (℃)					-20				
	Shift	U	pper pa	ırt	M	iddle pa	art	Lo	wer pa	rt
Impact	of test	Center	Fusion line	Fusion line +2mm	center	Fusion line	Fusion line +2mm	center	Fusion line	Fusion line +2mm
absorbed	1	72	71	190	104	172	225	116	70	212
(J)	2	71	204	182	92	90	58	125	65	67
	3	105	50	180	83	122	215	68	74	219
	Average	83	108	184	93	128	166	100	70	166

4.4 일렉트로가스 용접의 초후판 적용 기법 개발

4.4.1 컴바인드 용접

일반적으로, 후판을 용접하는 경우에는 플럭스 코어드 아크 용접(FCAW)과 일렉트로가스 용접을 사용한다. 플럭스 코어드 아크 용접은 소모성 전극인 용 접와이어를 일정한 속도로 용융지에 송급하면서 전류를 통하여 용접와이어와 모재 사이에서 아크가 발생되도록 하고 이 아크를 이용하여 용접을 실시하는 용접법이다. 이때 아크는 용접와이어의 둘레로 환형으로 형성된 가스노즐을 통 해 공급되는 차폐 가스에 의해서 주위 대기로부터 보호된다.

이러한 플럭스 코어드 아크 용접은 연속적으로 공급되는 용접와이어로 인해 일반 피복아크용접 법에 비하여 능률적이며, 용착속도가 높아 조선 공정의 대 부분에 적용된다. 플럭스 코어드 아크 용접에서는 모재의 두께가 두꺼워질수록 용접부를 채우기 위해서 용접 패스 수가 증가하게 된다. 예컨대 55mm두께의 모 재의 용접에는 25패스 전후의 용접회수가 필요하게 된다.

그리고 용접토치가 가스노즐과 결합된 형태이어서 용접토치의 직경이 다른 용접법보다 크게 되기 때문에, 용접토치가 접근하여 아크를 차폐가스로 적절히 보호하기 위해서는 그루브 각을 크게 하여 용접토치의 접근을 용이하게 해야 한다. 따라서 실제 사용하는 그루브 각은 최소 30° 이상을 적용하고 있다.

일렉트로가스 용접은 플럭스 코어드 아크 용접의 특수한 형태로서, 소모성 전극인 용접와이어와 차폐가스의 사용, 아크럭을 이용한 용접 등 플럭스 코어 드 아크 용접의 기본 특성을 가지는 용접법으로서 특징으로는 1 패스로 모재의 용접단면 전체를 용접할 수 있다는 것인데, 용접와이어가 연속적으로 용융되어 형성된 용융지를, 모재의 이면부는 세라믹 형태의 이당재로 막고 전면은 동당 금으로 막아서 용접한다.

동당금은 그 상부에는 차폐 가스 공급관과 연결된 차폐가스 배출구가 형성되 어 있어서 차폐가스를 용접부로 배출시켜 아크를 주위대기로부터 보호하고 하 부에는 냉각 유체 유동관과 연결된 냉각부가 형성되어 있어서 용접부를 냉각시 켜 주도록 되어 있다. 그러므로 동당금은 용접부의 전면부를 막는 기능과 주위 대기로부터 아크를 보호하기 위한 차폐가스의 배출 및 용접부를 냉각하는 기능 을 갖는다. 일렉트로가스 용접 일반 플럭스 코어드 아크 용접에 비해서 용접시 수 절감 및 능률면에서 탁월한 효과를 가진다.

또한, 동당금은 일반 플럭스 코어드 아크 용접과 달리 용접토치에서 가스노 즐이 분리되어 동당금의 차폐 가스 배출구를 통해 공급되기 때문에, 일렉트로 가스 용접은 용접 토치가 작아 용접부 단면내로의 접근이 용이하다.



Fig. 4.21 Schematic diagram of Simplified Electrogas welding



Fig. 4.22 Groove condition of combined and conventional electrogas welding



(a) (b) Fig. 4.23 Comparison of macro section of Electrogas welding combined with FCAW and FCAW (a) Electrogas welding with FCAW (b) FCAW

따라서 그루브 각을 일반 플럭스 코어드 아크 용접에 비할 때 20° 전후로 작 게 하여 사용하는 것이 가능하다. 이러한 일렉트로가스 용접은 후판 수직용접 법에서 생산성이 매우 높은 용접법이나, 일정 두께 이상으로 판 두께가 증가하 면 용접에 의한 입열량 증가로 인해서 용접강도가 저하되어 생산에 사용할 수 없다는 단점이 있다.

현재 조선소에서 건조중인 컨테이너선은 점차 대형화되어 가고 있으며, 선체 중 두꺼운 부분 현측 후판이나 상갑판, 해치코밍 등의 구역은 그 두께가 65mm 내지 75mm에 이르며, 향후 100mm에 이르게 될 예정이다.

따라서, 국내외 각 조선소에서는 용접 공수의 저감을 위해서 여러 기법으로 일렉트로가스 용접을 적용하고 있으나, 전술된 바와 같이 넓은 용접 단면을 1패스로 용접하여 발생하는 열에 의한 용접강도의 저하로 인해서 모재 열영향 부 및 용착금속부에서 선급에서 요구하는 물성치를 확보하는 데에 어려움을 겪 고 있다.

일렉트로가스 용접의 입열량을 줄이기 위해서 플럭스 코어드 아크 용접을 일 렉트로가스 용접을 함께 사용하는, 모재 및 재료에 적합한 정도의 용접법의 적 용이 불가피한데, 종래에는 먼저 플럭스 코어드 아크 용접을 용접부에 실시하 여 플럭스 코어드 아크 용접부를 형성한 후, 나머지 부분은 일렉트로가스 용접 을 실시하여 전체 용접부를 완성하는 용접법으로서 이를 컴바인드 용접법이라 고 하여 사용하였다.

그러나, 이러한 컴바인드 용접법은 플럭스 코어드 아크 용접을 먼저 적용하 기 때문에 그루브 각이 최소 30° 이상을 유지하여야 하므로 전체적인 용착 면 적이 증가하게 되며, 두께 60mm 이상의 강재에 대해서는 일렉트로가스 용접 적 용 시 표면 갭이 넓어져 모재와의 완전한 용입을 확보하기 힘들며 이로 인해서 적용할 수 있는 두께에 제약을 받는다는 단점이 있었다.

앞의 Fig. 4.21은 용접부 이면에 세라믹 이당재를 부착하여 용접하는 간편화 된 일렉트로가스 용접의 개념을 보여 주고 있으며, Fig. 4.22는 컴바인드 용접 의 그루브 조건(a)과 일렉트로가스 용접의 그루브 조건(b)을 보여 주고 있다.

Fig. 4.23은 실제 용접부의 마크로 단면 조직이다.

4.4.2 역 컴바인드 용접

역컴바인드(Reverse conbined) 일렉트로가스 용접은 컴바인드 방식의 단점을 극복하고자 고안된 것이다. 일렉트로가스 용접 시와 같은 그루브 조건에 일정 한 두께까지 일렉트로가스 용접을 먼저 시공하고 난 후 잔여 그루브에 플럭스 코어드 아크 용접을 하여 마무리하는 용접 방법이다.

피용접재와 용접 재료가 가진 제한된 조건 즉, 1패스 일렉트로가스 용접 적 용 시 사전에 산정한 용접 입열량에 맞춘 용접 전류와 전압, 용접 속도 조건 하에 용접을 진행한다.

요구되는 강도보다 저하되지 않는 최대 범위 내의 두께까지 일렉트로가스 용 접을 먼저 적용하게 되며 이때는 용접 그루브 형상을 유지할 수 있도록 특수한 형태의 수냉 동당금을 사용한다. 그리고 나서 나머지 부분에 플럭스 코어드 아 크 용접을 적용하게 됨으로써 1패스 단층 용접법인 일렉트로가스 용접의 장점 을 유지하면서 생산성을 높이는 용접법이라고 할 수 있다(Fig. 4.24~25).



Fig. 4.24 Groove condition and welding sequence of Reverse combined Electrogas welding







Fig. 4.25 Macro section of Electrogas welding(a) and Reverse combined Electrogas welding with FCAW(b) of 75mm thick plate



Fig. 4.26 Water cooled copper shoe for Double V-groove Electroslag welding

Fig. 4.26은 역컴바인드 방식 일렉트로가스 용접 시에 사용하는 특수한 모양 의 수냉 동당금을 보여 주고 있다.

2전국 일렉트로가스 용접 장비는 기본적으로 1전국 일렉트로가스 용접 장비 에 전국이 하나가 더 추가된 형태이다. 일렉트로가스 용접은 기본적으로 350~ 400(A) 부근에서, 높게는 450(A)부근에서도 용접을 실시한다. 따라서 전국을 추가하려면 반드시 용접 전원의 추가가 불가피하며, 추가된 용접 전원의 컨트 롤 박스가 필요하다. 그러므로 대부분의 시스템이 이중으로 설계된다.

일렉트로가스 용접은 수직 맞대기 이음에 적용하는 용접기법의 하나이며, 용 접부를 단층으로 용접할 수 있는 고용착, 대입열 용접이다. 1전극 일렉트로가스 용접의 경우 최대 65mm 정도의 두께를 가진 강재의 용접이 가능하며, 그 이상 의 두께를 가진 피용접재를 단층으로 용접하기위해서는 용착금속량 생성의 제 한으로 인하여 2전극화가 불가피하다.

2전극 일렉트로가스 용접 장비는 1전극 일렉트로가스 용접 시스템에 전극을 추가하여 두 개의 전극이 동시에 위빙하거나 필요에 따라 개별적으로 위빙하며 용접을 할 수 있도록 제작하였으며, 두께가 65mm에서 최대 85mm 정도 되는 피 용접재를 1회 단층 용접으로 완료할 수 있도록 구성되어 있다.

## 제 5 장 대입열 용접부의 기계적 특성 개선

- 5.1 용접 실험
- 5.1.1 시험편
  - 1) 시험편

일렉트로슬랙 용접과 일렉트로가스 용접에 사용된 강재는 선체건조용으로서 두께 65mm, 인장강도 50kg/mm급 고장력강인 EH32 등급의 열가공 제어강을 사용하였으며, Fig. 5.1과 같이 길이 500mm, 폭 200mm로 시험편을 제작하였다.

일렉트로 가스용접의 경우에는 용접 실험을 위해 V-그루브로 준비하였으며, 일렉트로슬랙 용접의 경우에는 I-그루브로 하였다.



Fig. 5.1 Electroslag welding test assembly for 65mm thick steel plate

Fig. 5.2~5.3은 일렉트로슬랙 용접 실험용 시험편의 형상과 그루브 조건을, Fig. 5.4~5.6은 일렉트로가스 용접 실험용 시\$험편의 형상과 그루브 조건을 나 타내고 있다. 실제 선체 건조 작업에서와 같은 조건을 형성하도록 시험편의 이 면에는 "ㄷ"자 형태의 보장재를 부착하였으며, 용접 시작부와 끝단부에 모재와 동일한 두께의 엔드 탭을 부착하였다.



Fig. 5.2 Grove shape of Electroslag welding test for 65mm thick steel plate



Fig. 5.3 The arrangement of test assembly and guide tube for Electroslag welding 65mm thick steel plate



Fig. 5.4 Electrogas welding test assembly for 65mm thick steel plate



Fig. 5.5 Grove shape of Electroslag welding test for 65mm thick steel plate



Fig. 5.6 The arrangement of test assembly and ceramic backing with 65mm thick steel plate for Electrogas welding

2전극 일렉트로슬랙 용접 및 일렉트로가스 용접 실험에 사용된 장비외 용접 파라미터 측정 기구 등을 및 실제 용접 장면을 다음의 Fig. 5.7~5.8에 각각 나타내었다.







(a) (b)Fig. 5.8 Welding equipment for 2-pole Electrogas welding test(a) Power supply and water cooling unit (b) Wire feeder

## 5.1.2 용접 방법 및 조건

용접방법에 있어서는 Table 4.42에 나타낸 바와 같이 일렉트로슬랙 용접은 1전극 및 2전극으로 각각 용접하였으며, 일렉트로가스 용접은 2전극으로 용접 재료를 달리하여 각각 용접하였다. 다음의 Fig. 5.9와 Fig. 5.10은 일렉트로슬랙 용접과 일렉트로가스 용접 실험 장면을 보여 주고 있다.







## (a) (b) Fig. 5.10 A view of Electrogas welding test (a) Travel carriage and control unit (b) Adjusting the welding parameter during welding

(b) Adjusting the welding parameter during welding

Condition Process	Current (A)	Voltage (V)	Travel speed (cm/min.)	Heat input (kJ/cm)
EGW- 2P(50GT)	360 ~ 370	36 ~ 38	3.75	432
EGW- 2P(EG-3)	360 ~ 370	36 ~ 38	3.42	474
ESW-2P	$\begin{array}{r} 440 \\ \sim 450 \end{array}$	45 ~ 48	2.57	968
ESW-1P	430	47	1.02	1189

Table 4.42 Welding condition for each test process

일렉트로가스 용접에 있어서 수냉 동당금이 잘못된 조작 등으로 인하여 Fig. 5.11에서 보는 것처럼 융융지를 너무 선행하게 되어 용융지에 대한 차폐가 제대로 이루어지지 않거나 하게 되면 공기 중의 산소나 질소가 유입되어 Fig. 5.12의 (b)와 같이 공기 주머니 형상의 결함을 생성하게 된다.

또한 일렉트로슬랙 용접에 있어서도 용접 전류 및 전압 조건이 잘 맞지 않거 나 플럭스의 공급량이 적절하지 않을 경우 용융지가 불안정하게 되며 적정 두 께의 슬랙층을 형성하지 못하게 되고 Fig. 5.12의 (a)와 같은 결함이 흔히 형성 되게 된다.

Fig. 5.13은 용접이 완료된 시험편들 중의 일부를 보여주고 있다.



Fig. 5.11 A concept of mis-operation of water cooled copper shoe



(a)

(b)

Fig. 5.12 Macro section of gaseous defect of Electroslag(a) and Electrogas welding(b)



(a)



(b)

Fig. 5.13 Completion of welding (a) Electroslag welding (b) Electrogas welding

## 5.1.3 모재 및 용접부의 화학조성

모재, 용접부 및 용가재의 화학조성을 조사하기 위하여 건식분석 방법인 스 펙트로 분석기(Spectrovac-2000A)로 3회 분석하여 평균값을 기록한 결과와 모 재의 기계적 성질을 Table 5.1~5.10에 나타내었다.

Table 5.1 Chemical composition of base metal (wt%)

Base metal	С	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Cr	Мо	V
EH36	0.07	0.20	1.51	0.007	0.002	0.01	0.2	0.02	0.005	0.001

Table 5.2 Mechanical properties of base metal

Base metal	Yield Strength (N/mm²)	Tensile Strength (N/mm²)	Elongation (%)	Impact absorbed energy J (-40°C)
EH36	465	557	26	245

Table 5.3 Chemical composition and mechanical properties of weld metal (wt%)

Process	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Мо	Cu	Ti	Al
EGW-2P (50GT)	0.06	0.21	1.66	0.013	0.005	1.37	0.12	0.02	0.03	0.01
ESW-2P	0.06	0.21	1.69	0.008	0.002	0.12	0.2	0.13	0.01	0.01
EGW-2P (EG-3)	0.06	0.19	1.50	0.009	0.008	1.07	0.09	0.02	0.03	0.01
ESW-1P	0.06	0.26	1.40	0.008	0.008	0.11	0.1	0.03	0.01	0.01

Filler metal	С	Si	Mn	Р	S	Мо
NES-53	0.08	0.23	1.29	0.007	0.003	0.008

Table 5.4 Chemical composition of filler metal in Electroslag welding (wt%)

Table 5.5 Mechanical properties of filler metal in Electroslag welding

Filler metal	С	Si	Mn	Р	S	Мо
SES-15A (Nozzle)	0.08	0.27	1.60	0.012	0.004	0.014

Table 5.6 Mechanical properties of filler metal in Combined-process

Combination	Yield Strength (N/mm²) Tensile Strength (N/mm²)		Elongation (%)	Impact absorbed energy J (-20°C)
NES-53 X SES-15A	417	558	32	108

Table 5.7 Chemical composition of filler metal in Electrogas welding (wt%)

Filler metal	С	Si	Mn	Р	S	Мо
EG-3	0.08	0.29	1.85	0.011	0.008	0.15

Table 5.8 Mechanical properties of filler metal in Electrogas welding

Filler metal	tal Yield Strength Tensile Strength (N/mm²)		Elongation (%)	Impact absorbed energy J (-20°C)	
EG-3	510	620	30	150	

Filler metal	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Мо
DWS- 50GTF	0.08	0.24	1.54	0.012	0.008	1.83	0.10
DWS- 50GTR	0.09	0.29	1.60	0.008	0.006	0.65	0.2

Table 5.9 Chemical composition of filler metal in Electrogas welding (wt%)

Table 5.10 Mechanical properties of filler metal in Electrogas welding (wt%)

Filler metal	Yield Strength (N/mm <sup>2</sup> ) Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )		Elongation (%)	Impact absorbed energy J	
DWS- 50GTF	535	652	22	72(-60°C)	
DWS- 50GTR	471	620	22	89(−20°C)	

5-2 실험 결과 및 분석

5.2.1 기계적 특성

1) 인장시험 및 특성

인장시험은 순수 용착금속에서 시험편을 채취하여 Table 5.11에 나타낸 바와 같이 용접 조건에 따른 인장특성을 상호 비교하였으며, 채취 위치 및 형상을 Fig. 5.14~5.15에 각각 나타내었다.



Fig. 5.14 Location of specimens in weld metal



Fig. 5.15 Round tensile specimen(weld metal)

Welding process	Yield Strength (N/mm²)	Tensile Strength (N/mm²)	Elongation (%)
EGW-2P(50GT)	484	565	22.5
ESW-2P	422	569	29.3
EGW-2P(EG-3)	639	462	20.7
ESW-1P	337	490	31.4

Table 5.11 Mechanical properties of weld metal in each process

2) 경도시험 및 특성

경도시험은 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 하중 5kg, 하중 시간 10초로 하여 시험하였다. Fig. 5.16에 경도 시험의 측정 위치를 나타내었다.



Fig. 5.16 Hardness test with rows of hardness measurements

Fig. 5.17은 용접재료를 50GT를 사용한 일렉트로가스 용접부의 경도 분포곡 선이다. 용착금속의 경도 값이 Hv 200~220을 보여주고 있으며 이는 모재에 비하여 Hv 60정도 높게 나타나고 있다.

Fig. 5.18은 용접재료를 EG-3를 사용한 의 일렉트로가스 용접부의 경도 분 포곡선이며 Fig. 5.19는 Fig. 5.17과 Fig. 5.18을 비교한 경도 그래프이다. 그림 에서 알 수 있듯이 용접재료를 50GT를 사용한 용착금속이 용접재료 EG-3을 사용한 것보다 Hv 30정도 높게 나타나고 있다.

대개 용착금속의 경도는 용접재료 화학조성과 용접입열에 직접적인 영향을 받는다. Fig. 5.20은 2전극 일렉트로슬랙 용접부, Fig. 5.21은 1전극 일렉트로슬 랙 용접부의 F경도 값을 보여주고 있다. 1전극 일렉트로슬랙 용접부에 비하여 2전극 일렉트로슬랙 용접부의 용접부 경도 값이 Hv 30정도 높게 나타나고 있 다.

Fig. 5.22는 11전극 및 2전극 일렉트로슬랙 용접부의 경도 값을 서로 비교하

여 본 것으로서 2전극 용접쪽의 F경도 값이 대체적으로 높게 형성되어 있다. Fig. 5.23은 일렉트로슬랙 용접과 일렉트로가스 용접의 F경도 값을 전체적으로 비교한 것으로서 경도 값은 2전극 일렉트로가스 용접 쪽이 가장 높고 1전극 일 렉트로슬랙 용접 쪽이 가장 낮게 분포하고 있음을 알 수 있다..

지금까지 보여준 경도 분포곡선에서 알 수 있듯이 플럭스 코어드 아크 용접 부에서 나타나는 열영향부 최대 경도(peak hardness)는 나타나지 않았는데 이 는 대입열 용접으로 기인한 느린 냉각속도로 인하여 경화조직이 생성되지 않았 기 때문인 것으로 판단된다.



Fig. 5.17 Hardness traverses along 10mm distance from top surface in Electrogas welding-2P(50GT)



Fig. 5.18 Hardness traverses along 10mm distance from top surface in Electrogas welding-2P(EG-3)



Fig. 5.19 Comparisons of hardness traverses along 10mm distance from top surface in Electrogas welding-2P(50GT) and Electrogas welding(EG-3)



Fig. 5.20 Hardness traverses along 10mm distance from top surface in Electroslag welding-2P



Fig. 5.21 Hardness traverses along 10mm distance from top surface in Electroslag welding-1P



Fig. 5.22 Comparisons of hardness traverses along 10mm distance from top surface in Electroslag welding-2P and Electroslag welding-1P



Fig. 5.23 Comparisons of hardness traverses along 10mm distance from top surface in Electrogas welding and Electroslag welding

3) 충격시험 및 특성

샤피 충격시험(Charpy V-notch)기를 이용하여 상온과 0℃, -20℃ 및 -40℃ 에서 용착금속에 대해 충격시험을 3회 실시하였으며, 결과는 Table 5.12와 5.13 에 나타내었다. 시험편 채취 위치 및 형상은 Fig. 5.24, 5.25에 각각 나타내었다.



Fig. 5.24 Notch located at center of weld metal



Fig. 5.25 Charpy V-notch test specimen

- 123 -

Fig. 5.26은 ESW-1P 재료를 사용하여 용접하였을때 온도에 따른 충격흡수에 너지를 나타내고 있다. 충격시험 온도 20℃ 및 0℃에서는 120J 이상의 높은 흡 수에너지를 보이다가 -20℃ 및 -40℃에서 급격한 인성 저하를 나타내고 있다 [33].

Fig. 5.27은 ESW-2P 충격흡수에너지로 Fig. 83과 비슷한 양상을 보여주고 있다. Fig. 5.28 및 Fig. 5.29는 용접재료를 달리한 일렉트로가스 용접부의 충격 흡수 에너지를 보여주고 있다. Fig. 5.26 및 Fig. 5.27의 일렉트로슬랙 용접에 비해 전반적으로 낮은 충격흡수에너지를 보여주고 있다.

Fig. 5.30은 일렉트로가스 용접 시 용접재료를 달리 하였을 때의 충격흡수에 너지로 50 GTR 용접재료를 사용한 용접부가 EG-3 용접재료를 사용하였을 때 보다 전반적으로 높은 인성을 보이고 있다[34].

Fig. 5.31은 1전극 일렉트로슬랙 용접 및 2전극 일렉트로슬랙 용접부의 충격 인성을 보여주고 있으며, Fig. 5.32는 전체 결과를 서로 비교하여 둔 것이다. 미세하게나마 2전극 용접부가 높은 인성을 보여주고 있는데 이는 1전극에 비해 2전극 쪽이 상대적으로 용접 입열이 낮기 때문인 것으로 판단된다. 즉 동일한 용접 조건에서는 용접 입열이 낮을수록 인성이 우수한 것을 확인할 수 있었다. 높은 충격특성을 얻기 위해서는 용접부 미세조직 중 침상 페라이트가 고분율 로 생성되어야 하고 동시에 결정럽게 페라이트나 위드만스테이튼 (Widmanstatten)조직 및 상부 베이나이트 조직이 최소로 형성되어야 한다. Ni 과 Mn은 결정럽게 페라이트와 상부 베이나이트 생성을 억제하고 침상 페라이 트 생성을 쉽게 함으로써 우수한 충격 특성을 나타낸다고 알려져 있다.

또한 용착금속 내의 산소량은 충격치와 깊은 관련이 있다고 보고되고 있는데 산소는 용착금속 내에서 0.03m 미만의 매우 미세한 산소 개재물로 분산되어 있 으며 산소 개재물이 증가될수록 취성파괴 양상도 그만큼 민감하다고 알려져 있 다[35]. 그러나 산소량이 200ppm 이하로 너무 부족한 경우에도 낮은 충격 특성 을 보이는데 이는 페라이트-펄라이트 기지조직에 부정합 결정구조를 생성시킬 가능성이 놓으며 또한 용착금속으로 응고될때 S 또는 P의 석출물 형상이 구형

- 124 -

(Globular)에서 필름(Film-like) 형태로 바뀌게 되어 소성변형을 어렵게 한다고 보고되고 있다.

또한 350ppm 이상이면 비금속 개재물이 결정립계를 따라 석출하여 외력을 받게 되면 이 부분에서 균열의 핵으로 생성되어 낮은 인성을 유발시키는 원인 이 된다고 알려져 있으며 이와 같은 결론을 종합해볼 때 용착금속의 산소량은 250~350ppm가 적정량임을 알 수 있다[36].

Test temp.	ESW-1P				ESW-2P			
No. of test	Room	0	-20	-40	Room	0	-20	-40
1	158	137	60	21	180	165	65	30
2	155	155	65	20	185	152	68	29
3	167	153	51	25	165	160	73	27

Table 5.12 Results of Charpy V-notch impact test for weld metal in each process

Table 5.13 Results of Charpy V-notch impact test for weld metal in each process

Test temp.	EGW-2(50GT)				EGW-2(EG-3)			
No. of test	Room	0	-20	-40	Room	0	-20	-40
1	99	85	60	44	91	70	23	25
2	102	82	68	40	110	43	39	15
3	105	90	58	41	86	45	34	21


Fig. 5.26 Results of Charpy V-notch impact testfor weld metal in Electroslag welding-1P



Fig. 5.27 Results of Charpy V-notch impact test for weld metal in Electroslag welding-2P



Fig. 5.28 Results of Charpy V-notch impact test for weld metal in Electrogas welding-2P (50GT)



Fig. 5.29 Results of Charpy V-notch impact tests for weld metal in Electrogas welding-2P(EG-3)



Fig. 5.30 Comparisons of Charpy V-notch impact test result for weld metal in Electrogas welding-2P(EG-3) and Electrogas welding-2P(50GTR)



Fig. 5.31 Comparisons of Charpy V-notch impact test result for weld metal in Electrogas welding-1P and Electrogas welding-1P



Fig. 5.32 Comparisons of Charpy V-notch impact test result for weld metal in Electrogas welding and Electroslag

5.2.2 용접부 단면 조직검사 및 분석

Fig. 5.33은 용접 프로세스별 마크로 조직을 보여주고 있으며 4개의 시험편 모두 1패스 용접으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 대입열 용접 시 열영향부 충격인성 저하는 높은 용접입열로 인한 오스테나이트(prior austenite) 결정립 조대화 및 결정입계 페라이트 폭이 커지고 다각화로 인한 영향 때문이다[37], [38].

Fig. 5.34와 Fig. 5.35의 용착금속에 대한 광학현미경 미세조직이며, Fig 5.36, 5.37과 5.38 및 5.39는 전자주사현미경(SEM) 미세조직으로 흰색으로 보이는 부 분이 결정입계페라이트이며 이 결정입계를 따라 판(Lath)형으로 발달한 것이 페라이트 사이드 플레이트(Ferrite side plate)이며 검게 보이는 부분이 침상 페 라이트(Acicular ferrite)이다[39].

저탄소 용접부의 기계적 성질은 냉각 중 변태를 통하여 생성된 페라이트 형 상(Ferrite morphology)에 영향을 받으며 용접부의 인성 및 강도는 침상 페라 이트와 관계가 있음은 잘 알려져 있다[40]. 즉 인성 및 강도가 향상되기 위해서 는 용접부 미세조직 중 침상페라이트가 고분률로 생성되어야 하고 동시에 결정 입계 페라이트와 위드만 스테턴 페라이트 사이드 플레이트 및 상부 베이나이트 형성을 최소화 하여야 한다[41],[42].

용접부의 화학 조성은 용접봉의 종류, 모재, 플럭스 및 차폐가스 등에 의해 결정되며 모재와 유사한 강도 및 인성을 갖는 것이 바람직하다. 합금원소를 첨 가하였을 때 상태도의 오스테나이트의 영역을 확대시키는 원소를 오스테나이트 안정화원소(Austenite stabilization element)라 하며 C, N, Mn, Ni, Cu 등이 여 기에 속한다.

이러한 원소들은 공석온도(Eutectoid temperature)를 낮출 뿐만 아니라 오스 테나이트 영역을 확장시켜 저온 변태생성물을 쉽게 형성하도록 조장하여 용접 부의 경도를 향상시킨다. 이들 원소 중 Ni은 강도는 크게 증가시키지 않은 반 면 침상 페라이트(Acicular ferrite)량을 증가시켜 인성을 높일 목적으로 사용되 는 대표적인 원소이다. 페라이트 안정화원소(Ferrite stabilization element)로는 Cr, Mo, Si, Al, Ti, Nb 등이 여기에 속한다. Liu는 HSLA강(High Strength Low Alloy, 저합금 고장력강)에서의 탄화물, 질화물 및 비금속 개재물의 종류 를 Table 5.14에 나타내었으며 용착금속에 Al의 함량이 증가함에 따라 비금속 개재물에서의 Al함량도 증가한다는 연구결과를 발표하였다[43].

Cr, Mo는 페라이트 안정화 원소로 쉽게 고온 변태 생성물을 얻을 것 같지만 실제로는 초석페라이트(Proeutectoid ferrite)보다 침상페라이트를 더 많이 생성 시켜 인성을 증가시킨다. 이와같은 이유는 Cr과 Mo가 강력한 탄화물을 형성함 으로써 결정림 내부에 핵생성 자리를 증가시켜 침상 페라이트 생성을 촉진하기 때문이며 질화물 형성 원소인 Nb, V, Ti, Al은 초석페라이트의 생성을 억제하 고 침상페라이트 및 베이나이트 생성을 촉진한다고 알려져 있다.

바나듐(V)은 800℃이하에서 VN을 형성하여 초석페라이트 성장을 방해하고 침상 페라이트 형성을 촉진하지만 너무 많이 첨가할 경우 저온 변태 생성물을 형성하여 강도를 증가시킨다.

니오븀(Nb)은 약 1000℃이하에서 NbC를 형성하여 오스테나이트-페라이트 계면에 석출하여 초석 페라이트 성장을 방해하고 침상 페라이트 생성을 촉진하 지만 너무 많이 첨가할 경우 저온 변태 생성물인 베이나이트 변태를 조장한다. 티타늄(Ti)은 강력한 페라이트 안정화 원소로써 금속 내부에 존재하는 N등과 쉽게 결합하여 TiN을 형성함으로써 결정립내의 핵생성 자리를 증가시켜 침상 페라이트 생성을 촉진한다[44].

Brownlee 등은 용착금속에서 합금 원소와 침상 페라이트량과의 관계를 연구 하였는데 Al 및 Ti량이 증가하면 침상 페라이트도 증가한다는 사실을 알았으 나 이들 합금원소가 0.25wt%이상 첨가한 경우에는 합금 원소량이 증가할수록 오히려 침상 페라이트량이 감소하여 충격특성을 저하시킨다고 발표하였다[45].

Hart는 C-Mn강에서 S가 경도에 미치는 영향을 고찰하여 S가 감소함에 따 라 F경도 값이 증가하였으나 희토류 금속(Rare earth metal)이 첨가된 경우에 는 S가 감소하더라도 경도 분포는 높게 나타나지 않음을 알 수 있다[46]. Yamamoto 등도 페라이트 핵생성에 있어 S의 영향을 설명하였는데 황화물은 대부분 MnS로 석출되며 이로 인해 S의 주위에 Mn이 고갈되기 때문에 석출물 주위에 탄소확산을 촉진하며 페라이트 핵생성을 증가시키는 역할을 한다고 설 명하였다[47].

Okumurar는 C-Mn강에서 S의 함량을 0.030에서 0.001로 감소시켰을 때 열영 향부 경화능이 증가하는 것을 확인하였으며, Ni이 첨가된 강에서는 이러한 현 상이 나타나지 않아 F경도 값이 증가하지 않는다고 발표하였다[48]. 佐彦 등에 따르면 냉각속도가 동일한 경우에 열영향부 최고 F경도 값은 C의 함유량에 1 차적으로 영향을 받으며 Mn, Cr, Mo 등도 경도향상에 2차적인 영향을 미친다 고 설명하였다[49].

Table 5.14는 일렉트로슬랙 및 일렉트로가스 용접 실험에 사용된 각 용접재 료의 화학 성분을 나타내고 있다.

	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Мо	Cu	Ti	Al
EGW-2P (50GT)	0.06	0.21	1.66	0.013	0.005	1.37	0.12	0.02	0.03	0.01
ESW-2P	0.06	0.21	1.69	0.008	0.002	0.12	0.2	0.13	0.01	0.01
EGW-2P (EG-3)	0.06	0.19	1.50	0.009	0.008	1.07	0.09	0.02	0.03	0.01
ESW-1P	0.06	0.26	1.40	0.008	0.008	0.11	0.1	0.03	0.01	0.01

Table 5.14 Chemical composition of weld metal for Electroslag and Electrogas welding (wt%)

1) 마크로 단면 조직검사 및 특성

용접부의 마크로 조직을 시험하기 위해서 가스절단과 기계가공을 실시한 후 3% 염산 수용액(Nital, Nitric acid + Alcohol)에 10초간 부식한 수 관찰한 결과 를 Fig. 5.33에 나타내었다.



- (A) Electrogas welding-2P(50GT)
- (B) Electrogas welding-2P(EG-3)



- (C) Electroslag welding-1P
- (D) Electroslag welding-2P

Fig. 5.33 Macrostructure of Electroslag welding-1P and 2P

2) 마이크로 조직 검사 및 특성

용접부의 마크로 조직 시험편은 절단 시 열에 의한 조직변화를 방지하기 위 하여 냉각수를 충분히 공급하면서 기계 절단톱을 사용하여 절단하였으며 연마 (Grinding) 및 정마(Polishing) 후 염산 수용액(3% Nital)에 10초간 부식시킨 다 음 광학현미경으로 관찰하였으며, 결과를 Fig. 5.34에 나타내었다. Fig. 5.35, 36, 37, 38은 전자주사현미경(SEM)을 이용하여 X200, X500, X1000, X5000 배율로 관찰한 결과를 나타낸 것이다.



(A) Electrogas welding-2P(50GT)



(B) Electrogas welding-2P(EG-3)



(C) Electroslag welding-2P

(D) Electroslag welding-1P

Fig. 5.34 Microstructure of Electroslag welding-2P (X200)

1) Electrogas welding-2P(50GT)





(E) X5000

20kU

X5,000

5µm 0000 20 26 SEI

2) Electrogas welding-2P(EG-3)



(A) X200

(B) X500



(C) X1000





(E) X5000





Fig. 5.37 SEM analysis of weld metal in ESW-1P process

4) ESW-2P



(C) X1000





(E) X5000



3) 파단면 SEM 분석

Fig. 5.39, 40은 2전극 일렉트로가스 50GT 용접부의 대한 실온에서 충격시험 후의 파면의 주사 전자현미경 사진이다. 파면에서 알 수 있듯이 대부분 연성파 괴인 딤플로 구성 되어 있었으며 딤플 안에는 Ti 및 Mn 산화물로 추정되는 석 출물이 존재하고 있었다. 충격시험온도를 0℃, -20℃ 및 -40℃에서 파면사진으 로 충격시험 온도가 낮아질수록 연성파면인 딤플은 줄어든 반면 취성파면이 벽 개파면(Cleavage facet)이 점차 증가하였으며 -40℃에서는 대부분 벽개파면으 로 이루어져 있었다. 이와 같이 앞에서 설명한 충격흡수에너지 곡선과 잘 일치 함을 알 수 있다[50].

Fig. 5.41은 EG-3 용접재료를 사용한 2전극 일렉트로가스 용접한 용접부의 충격시험 온도 변화에 대한 파면의 주사전자현미경 사진이다. 앞에서 설명한 2 전극 일렉트로가스 용접(50GT 사용 용접부)의 경우와 마찬가지로 충격시험 온 도가 낮아질수록 연성파면인 딤플은 줄어든 반면 취성파면이 벽개파면 (Cleavage facet)이 점차 증가하였다.

Fig. 5.42는 1전극 일렉트로슬랙 용접부의 충격시험 온도 변화에 대한 파면 의 주사전자현미경 사진이며 Fig. 5.43은 2전극 일렉트로슬랙 용접부의 충격시 험 온도 변화에 대한 파면의 주사전자현미경 조직이다. 앞서 설명한 일렉트로 가스 용접 용접에 비해 상대적으로 인성이 우수한 딤플이 더 많이 존재함을 알 수 있다. 또한 1전극 용접부에 비해 2전극 용접부의 파면에서 딤플이 더 많이 존재하였다. 1) Electrogas welding-2P(50GT)



① X200

② X500



- 3 X5000 and Spectrum
- (A) Room temperature
- Fig. 5.39 SEM fractographs of weld metal depend on test each temperature in Electrogas welding-2P(50GT)



② X500





(C) −20°C

① X200

② X500



(D) −40°C

Fig. 5.40 SEM fractographs of weld metal depend on test each temperature in Electrogas welding-2P(50GT)

2) Electrogas welding-2P(EG-3)



① X200

② X500

(C) −20°C



② X500



3 X5000

(D) −40°C

Fig. 5.41 SEM fractographs of weld metal depend on test each temperature in Electrogas welding-2P(EG-3)

3) Electroslag welding-1P



① X200

② X500



3 X5000

(A) Room temperature



③ X5000 (B) 0℃



② X500

(C) −20°C



① X200

② X500



③ X5000

(D) −40°C

Fig. 5.42 SEM fractographs of weld metal depend on test each temperature in Electroslag welding-1P process







② X500



③ X5000

(B) 0℃



② X500

(C) −20°C



(D) −40°C

Fig. 5.43 SEM fractographs of weld metal depend on test each temperature in Electroslag welding-2P process

## 제 6 장 결론

■ 2700TEU급 컨테이너 운반선을 건조하기 시작하였던 1980년대 후반부터 최 근까지 약 15년 동안 컨테이너 운반선의 크기는 마치 조선소들의 한계 능력을 시험하듯 12000TEU급까지 확장 일로를 걸어 왔다.

일렉트로슬랙 용접과 일렉트로가스 용접은 조선의 탑재공정에 큰 영향을 미 치는 대표적인 수직자동 대입열 용접법이다. 대형 컨테이너선의 대형화가 가파 른 속도로 진행되고 있으나 이의 건조에 소요되는 초후판 강재 및 용접재료의 개발이 미처 뒤따르지 못하고 있는 부분이 있는 것이 사실이었다.

■ 이에 본 연구 및 실험을 진행하여 과도한 용접 입열 문제 등을 해소하고 현 실에 적합한 용접공정을 개발하여 다음과 같은 제안들을 도출할 수 있었다.

획일적인 용접 그루브를 다양화하여 축소시키고, 야금학적 측면에서 강재와 용접 재료의 물성 향상을 모색하였으며 용접 장치와 가이드 노즐, 수냉 동당금 등의 도구들의 개발 및 개선에 의한 새로운 용접공법의 개발이 이루어졌음을 확인하였다.

- 선측 후판과 해치 코밍을 형성하는 초후판 강재에 있어서는 부재 두께 약 60mm 정도까지는 1전극 일렉트로가스 용접으로 시공하였을 때 용접부의 물성 특히, 충격인성 값이 요구하는 수준에 만족할 수 있게 되었음을 확인 할 수 있었다.
- 2. 부재의 두께가 60mm를 상회하여 80mm에 이르는 강판, 기존의 것보다 한 등급 높은 항복강도 40kg/mm 급의 강재에 대해서는 2전극 일렉트로가스 용접과 일렉트로가스 용접 및 플럭스 코어드 아크용접을 조합한 형태의 역 컴바인드 공법을 각각 사용하여 용접능률과 용접부의 물성을 동시에 안정되게 확보할 수 있었다.
- 또한 지난 20여 년간 조선 산업에서 자취를 감추었던 일렉트로슬랙 용접
  의 경우, 충격인성 특성을 강화한 용접재료의 개발로 실험이 가능하게 되었다.

시초엔 일렉트로가스 용접에 비해 느린 용접주행속도로 인하여 용접 단 위 길이 당 1000kJ을 상화하던 과도한 용접 입열량을 축소하기 위해 특수 응용기법을 고안하여 시험에 적용함으로써 용접 주행속도를 향상시키고 전체 용접 입열량을 일렉트로가스 용접 수준으로 대폭 저감시켰다. 이에 따라 용접부의 저온충격인성이 만족할만한 수준을 나타내었고 적절한 승 인절차를 거쳐 선박 건조 현장에 적용할 수 있는 수준의 제 용접 조건을 확보할 수 있게 되었다.

- 4. 일렉트로슬랙 용접의 경우는 일렉트로가스 용접과 적용 범위를 차별화하여 좀 더 용접장이 짧고 용접 장치 자체에 의한 비용접구간이 발생하는 부분들을 중심으로 용접대상부위를 선정하는 것이 적절할 것으로 판단하였다. 그에 따라 우선적으로 갑판 하부 종통 보강재의 수직 맞대기 용접부와 주기관 갑판의 거더 및 해치 코밍 등에 적용하는 것을 목표로 실험을 진행하였으므로 이와 같은 두 종류의 대입열 고능률 용접법을 적절히 조화시켜 적용할 수 있는 기반이 마련된 것으로 결론지을 수 있다.
- 5. 기존 일렉트로슬랙 용접이 가지고 있던 과다 용접 입열 문제를 조선분야 에 적용하고 있는 용접 프로세스인 일렉트로가스 용접 수준으로 낮출 수 있게 되었다. 지름 2.0mm 이하의 세경 와이어와 용접부 및 용접 열 영향 부의 기계적 특성을 확보하면서 단위 시간당 용착량을 증가시킬 수 있는 가이드 튜브 적용 방식을 개발 또는 개선하여 현장에 곧바로 적용할 수 있는 조건을 도출하였다.
- 6. 2전극 일렉트로가스 용접에 있어서 전극 간의 배치 거리, 요동 폭, 용접 입열량 최대 저감 요소 분석 등은 계속연구가 필요한 항목들이다.
- 7. 일렉트로슬랙 용접에 있어서의 윙가이드 튜브의 규격최적화, 플럭스 정량 공급 장치로부터 공급되는 플럭스의 적량공급시스템화, 그리고 용접부의 형상계수에 따른 용융지의 거동의 관찰과 측정 및 물성에의 영향에 대한 정량적 분석 등은 추후 지속 연구되어야 할 과제로 남게 되었다.

## 참고 문헌

- 1. Dr. Joseph stroke, DCU, MMM551; Manufacturing Process part II
- 2. 일본용접학회 : 용접접합공학편람, 1996.10(상) pp.641-pp.654
- 3. Krishna K. Verma : Winter 1996 Vol. 59. No. 3, Federal Highway Administration, US, Department of Transportation
- 4. W. S. RICCI AND T. W. EAGAR : A Parametric Study of the Electroslag Welding Process - Heat input and HAZ size are found to be principally dependent on the same process variable-namely, plate gap width
- Federal Highway Administration, US : Improved Fracture Toughness and Fatigue Characteristics of Electroslag Welds, Publication No. FHWA-RD-87-026, October 1987.
- Federal Highway Administration, US : Technical Information Guide for Narrow-Gap Improved Electroslag Welding, Report No. FHWA-SA-96-053, January 1996.
- Federal Highway Administration, US : Process Operational Guide for Narrow-Gap Improved Electroslag Welding, Report No. FHWA-SA-96-052, February 1996.
- 8. GL Role, Matrarials and welding; chap 3. welding , 2006
- 9. Mendez, P. E. and Eagar, T. W., Advanced materials and processes, 159;39, 2001
- David H. Densmore : Narrow-Gap Electroslag Welding for Bridges, FHWA Memorandum, March 20, 2000.
- AWS : Welding Handbook, Ninth Edition Volume2, Welding Processes, Part 1
- 12. AWS : Welding Handbook, Welding Science&Technology, Ninth Edition Volume 1

- Technical Information Guide for Narrow-Gap Improved Electroslag Welding, Federal Highway Administration Report No. FHWA-SA-96-053, January 1996.
- Process Operational Guide for Narrow-Gap Improved Electroslag Welding, Federal Highway Administration Report No. FHWA-SA-96-052, February 1996.
- Training Manual for Narrow-Gap Improved Electroslag Welding, Federal Highway Administration Report No. FHWA-SA-96-051, November 1995
- Proposed Specifications for Narrow-Gap Improved Electroslag Welding, Federal Highway Administration Report No. FHWA-SA-96-050, November 1995.
- 17. 1. Boronenkov V and Shanchurov S: Mathematical model of prediction of electroslag ingots composition. Proceedings of the Tenth International Conference on Vacuum Metallurgy. Special melting. Beijing, China1990.
- Boronenkov V and Shanchurov S: A mathematical model of the kinetic processes of interaction between the metal and slag in the electroslag welding of steel, Avt. Svarka 1985 (6) 22-27.
- Shanchurov S and Boronenkov V: 'Development of program control by chemical composition of metal in electroslag welding and hardfacing on the base of mathematical simulation. Scientific Conference Proceedings, Leningrad, 1990.
- 20. Shanchurov S., Boronenkov V. and Yanishevskaya A: Mathematical model of chemical processes in electroslag casting. Scientific Presentations of 10<sup>th</sup> Vsesouznoi Conf., Moscow, Chermetinformatsiya, 1991.

- Boronenkov V, Shanchurov S and Zinigrad M: The kinetics of interaction between a multi-component metal and slag by diffusion, Izv. AN SSSR Metally 1979 (6) 21-27.
- 22. Shanchurov S and Boronenkov V: The determination of mass transfer parameters between the metal and slag by physical modelling method and in the real process of electroslag remelting. The 11<sup>th</sup> Int. Conf. On Vacuum Metallurgy, Antibes, France, 1992.
- 23. Shanchurov S, Boronenkov V and Martinovskih A: Development of the method and study of mass transfer between the metal and slag in electroslag remelting by simulation, Phusico-chemical methods of metallurgical
- ANSI/AASHTO/AWS D1.5-96 Bridge Welding Code. American Welding Society, 1996.
- ANSI/AWS D1.1-98 Structural Welding Code -Steel. American Welding Society, 1998.
- Evans, G. M. and Bailey, N. Metallurgy of Basic Weld Metal. Abington Publishing, 1997.
- Graville, B. A. The Principles of Cold Cracking Control in Welds. Dominion Bridge Company, 1975.
- Linnert, G. E. Welding Metallurgy, Vol.1. American Welding Society, pp.667–693, 1994.
- Miller, D. K. and Funderburk, R. S. ""Reviewing and Approving Welding Procedure Specifications."" The National Steel
- Prof. J. S. Colton, ME6222; Manufacturing Process and Systems, Georgia Institute of Technology
- 31. Aachen/ISF : Narrow Gap Welding, Electrogas and Electroslag Welding
- 32. Key Concepts in Welding Engineering by R. Scott Funderburk

- J. H. CHen, T. D. Xia and C. Yan, Study on impact Toughness of C-Mn Multilayer Weld Metal at -60℃, January 1993, pp.19s~27s.
- 34. R. Reierls, Proc. Phys, Soc., Vol. 52, 1940, pp.34  $\sim$  37.
- Yamamoto K., Matsuda S and Mimura H., Proc. Symp, Residual and Unspecified Elements in Steel, 1987.
- Dallam C. B, Liu S and Olson D. L., Flux Composition Dependence of Microstructure and Toughness of Submerged Arc HSLA Weldments, Welding Journal 64(5), 1985, pp.140~151.
- 37. American Welding Society, Welding Handbook, vol. 1(8th), 1987, pp.104
- A. Joarder, S. C. Saha and A. K. Ghose, Study of Submerged Arc Weld Metal and Heat-affected Zone Microstructures of a Plain Carbon Steel, Welding Research Supplement, Jun. 1991, pp.141~146.
- Evans, G.M, The Effect Manganese on the Macrostructure and Properties of Weld Metal Deposits., Welding Journal, Vol. 59, No. 8, 1980, pp.67.
- 40. Sindo Kou, Welding Metallurgy, 1987, pp. 326.
- D. Banerjee, D. Mukherjee, R. L. Saha and K. Bose, Metal. Trans. A, Vol. 14, 1883, pp.671.
- J. C. Williams and G. L. Tjering, Titanium 180 Science and Technology Wattandaie, TMS-Aime, Vol. 1, 1980, pp. 671.
- 43. F. S. Lin and E. A. Starke, Metal. Trans. A., 1984, pp. 1873.
- 44. S. Liu, The Role of Non-Metallic Inclusions in Controlling Weld Metal Microstructure in Niobium Microalloyed Steels, Colorado School of Mines Ph. D Thesis, 1986.
- Brownlee, Effect of Aluminum and Titanium on the Microstructure and Properties of Microalloyed Steel Weld Metal, 1986, pp. 245~250.
- 46. P. H. M. Hart, Inproc. Int. Conf. Trends in Steels and consumables, The

Welding Institute, London, Nov. 1978.

- K. Yamamoto, S. Matsuda, T. Haze and R. Chijiwa, Residual and unspecified Elements in steel, American Society for testing and Material, 1987.
- M. Okumura, M. Yurioka and T. Kasuya, Effect of cleanless of Steel on Its Hardenability, IIW Doc, 1987, pp.1459~1487
- 49. 佐彦, 容接構造要覽, 大阪大學, 1983, pp. 66~67
- Koshiro Tsukada, Tomoyoshi ohkita and Kazunori Yako, Application of on-line Accelerated Cooling to Steel Plates, Nippon Kokan Technical Report, No. 35, 1982.

## 감사의 글

겨울의 신선한 싸늘함 속에, "감사의 글을 어떻게 적어야 하나?" 하며 뇌리 를 스쳐가는 생각이 무심코 손가락으로 하여금 자판을 두드리도록 주문하고 있 습니다.

문득 주위를 둘러보면 생각보다 늦은 나이에 공부하는 훌륭한 이들이 많음을 볼 때 이전에 만학이라 주저하기까지 하였던 교만함과 내 자신의 생의 일천함 과 부족함이 아직도 여실히 드러나는 것을 느낍니다.

친구의 권유로 타의 반 시작한 과정이 끝맺음 단계에 와 있음을 실감나게 느 낀 건 불과 얼마 전의 일입니다.

나의 좋은 친구이자 스승인 박주용 교수께 진심으로 감사를 드립니다. 그의 권면이 없었다면 시작지도 못하였을 일입이다. 그분의 지도와 큰 인내와 가르 침은 평생 소중함으로 간직할 것입니다. '조련의 달인!' 방금 생각나서 조효제 교수께 붙인 별명입니다. 그분의 풍부함과 노련함에서 불출되는 조언은 나에게 있어서 격려와 힘이 되기에 부족함이 없었습니다. 이 두 분은 또한 내게 있어 서는 늦게 사귄 친구로서 삶에 흐르는 윤활유가 되었습니다.

박명규 교수님과 강병윤 박사님의 깊은 경험들에서 나오는 지식과 예리한 조 언에 감사를 드립니다. 박석주 교수님과 현범수 교수님의 관심과 격려에 감사 를 드리며, 윤종원 교수님, 전문가적 통찰력으로 조언하여 주시고 섬세하게 지 적하여 주심을 감사드립니다.

연구실 후배 송창섭군, 각종 학교 스케줄과 정보에 대한 연락업무를 도맡아 주고 자질구레한 일들을 자기 일처럼 성의를 다하여 도와주고 처리하여 준 그 에게 큰 감사를 드립니다.

싫은 표정 하나 짓지 않고 실험과 분석, 논문 정리를 정성껏 도와 준 팀의 막내, 자기를 닮은 떡두꺼비 같은 아들 낳는 것을 새해의 목표로 용감하게 설 정한 새신랑 장용원군에게 감사를 드리고 마지막 실험을 함께 도와준 이해우 박사에게도 감사를 드리며, 알게 모르게 누를 끼치게 된 산업기술연구팀의 이 정수 책임을 비롯한 여러 분들에게 미안한 마음과 함께 감사한 마음을 전해 드 리고 싶습니다. 때마다 격려하시고 힘을 주셨던 홍순익 사장님과 자상하게 지 도해주셨던 봉현수 전무님께 감사의 말씀을 전해 드립니다.

"아빠 논문 언제 써?" 하며 논문 작성을 도와주겠다고 자원하여 나섰던 타자 의 달인(?) 우리 예쁜 딸 고은이(사실 그의 손가락은 자판을 두드린다고 하기 보다는 날아다닌다는 표현이 더 걸맞을 정도입니다), 막상 집에서 몇 날 며칠이 고 늦은 시간에 컴퓨터를 먼저 점유하려고 쟁탈전도 심심찮게 벌였었는데 정작 은 내 자신이 바빠서 너의 지원을 제대로 받지 못하게 된 것이 너무 아쉽기도 하지만, 아빠의 이러한 과정들이 다만 너에게 좋은 모습으로 격려가 되길 바라 는 마음뿐이란다.

언젠가 "얘 너 언제 학위 마치냐?" 라고 물으시며 의미심장한 여운을 남기셨 던 아버지, 효도를 잘하지 못하는 아들이지만 자랑스럽게 생각하시고 항상 걱 정해 주시는 아버지, 어머니께 큰 절을 올려 드리는 심정으로 감사드리며 공을 돌려 드리는 바입니다. 삶의 현장에서 힘을 다하여 수고하고 있는 사랑하는 동 생들 보현, 유현, 좌현 그리고 멀리 인천에 있는 홍일점 경희, 여기에 혹 무슨 즐거워할만한 것이 있다면 너희들과 함께 나누기를 원한다.

처음으로 집을 떠나 대학 기숙사에서 친구들과 동고동락하게 된, 그리고 바 로 이 시각엔 몽골선교여행지에 있을 자랑스런 아들 기찬이, 많은 사람의 유익 을 위해 너의 꿈을 크게 펼쳐 나가길 바라며 이 기쁨을 함께 나누길 원한다. 김영수 목사님과 사랑의 교회 가족들..., 진정한 성원과 기도에 감사드립니다.

결혼하여 호강 한 번 제대로 못시켜 준 나의 사랑하는 아내 필원, 당신의 끝 없는 사랑과 희생과 수고에 진심으로 감사하고 있소. 이 모든 이루어진 것들은 바로 당신의 과실이외다.

이 보잘 것 없는 결과물이지만, 여기에 혹 아주 조그마한 것이라도 무슨 영 광이 될 것이 있다면 그것은 바로 하나님의 것입니다. 하나님께 모든 영광을 돌려 드립니다.