

조선 탑재용접용 대입열 수직자동용접법의 개발에 관한 연구

박주용* · 최우현**

*한국해양대학교

**대한조선 산업기술연구소

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

Ju-Yong Park* and Woo-Hyeon Choe**

*Div. of Ocean System Engineering, Korea Maritime Univ., Busan 606-791, Korea

**Institute of Industrial Technology of Daehan Shipbuilding Co., Jeonnam 536-881, Korea

*Corresponding author : dispaul@hanmail.net

(Received April 22, 2008 ; Revised June 16, 2008 ; Accepted September 4, 2008)

Abstract

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(EGW) is actively applied especially for vertical butt joint of thicker steel plate recently. In this study considered how to develop and improve mechanical properties of weld metal and HAZ in high heat input welding processes such as EGW and Electroslag welding(ESW) with its welding equipment in order to extend the application range to the longitudinal members and hatch coaming parts of container ship. 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 ESW to shipbuilding construction which fill up the gap of stoppage days of more than 20 years.

Key Words : High heat input, Deposited weld metal, Filler rods, Vertical upward, Guide tube

1. 서 론

현재 우리나라의 조선 산업은 상선분야에 있어서 총 수주잔량 및 생산량에 있어서 모두세계 정상에 지키고 있으며 불과 30년 밖에 되지 않는 짧은 기간에 급성장하여 한 때 타 조선경쟁국들로부터 많은 견제를 받기도 하였다. 국내 조선의 특징은 초대형 유조선과 초대형 컨테이너선 등 대형선 건조 비중이 높아져 가고 있을 뿐 아니라 고부가가치선 혹은 장치에 속하는 천연가스 운반선과 FPSO 등의 해양구조물류도 대형화 되어가는 추세이다. 여기에는 고강도 및 고장력강, 초후판 강재의 사용비율이 높아지게 될 수밖에 없는 경향을 보여주

고 있다.

용접 시간 단축을 위해 국내 대형조선소들을 중심으로 독특하고 과감한 선체건조공법들을 개발하여 사용하고 있는데, 이러한 공법들의 공통적 개념은 도크 내에 들어갈 선체 블록의 대형화이다. 즉, 도크 내에 탑재될 블록의 수량을 최소화하여 용접 이음의 길이를 최소화 하며, 용접 작업을 단시간에 수행함으로써 도크 내 작업 시간을 감소시켜 도크의 회전율을 높이는 것이다. 도크 내에서는 용접 이음이 대부분 아래보기자세와 수직자세로 이루어진다.

본 연구에서는 특히 대형 컨테이너선을 중심으로 위와 같은 실정을 충분히 반영하여 선측과 갑판부에 집중되어 있는 후판 용접 이음을 보다 신속하고 효율적으로

접합할 수 있는 용접법을 연구하여 생산 현장에 적용하고자 하였으며, 아울러 이러한 용접부는 저온 충격 인성을 포함한 기계적 성질이 충분히 만족될 수 있도록 실험, 고찰하였다.

2. 탑재 공정 후판용 주요 용접법

우선 EGW법은 1961년에 개발된 수직자동 연속 아크용접법으로서 연속적으로 자동 공급되는 소모성 전극과 모재 간에 아크를 일으켜 용접을 진행하는 수직자동용접법의 하나로서 그 사춘격 되는 ESW법과는 달리 용접이 진행되는 동안 아크가 소멸되지 않고 줄곧 점화되어 있게 되는 용접법으로서 주로 조선이나 육상 저장탱크, 교량 제작 등에 사용되며, 용접 그루브의 형태는 I 형, V 형 또는 T 형을 사용한다¹⁻²⁾.

ESW법은 한 번의 패스로 이루어지는 단층용접법으로서 원천기술은 1930년대 미국에서 개발이 시작되었으나 1950년대 초 소련의 페튼연구소에서 실용화 개발이 이루어졌으며 그 후 용접기 제작업체, 조선, 중기계분야 등 다방면에 걸쳐 실용화 연구가 진행되었다. 1970년대에 들어서서는 교량 제작, 선박 건조 및 기타 대형 금속 구조물제작에도 그 적용 범위가 확대되었다가 한 때 교량 제작과정에서 낮은 품질과 결함 발생으로 사용이 금지된 적도 있다⁴⁻⁵⁾. 처음 발생된 아크가 꺼져버리고 전기저항열($Q=0.24 \cdot E \cdot I$ cal/sec)로 용접이 계속된다는 점에서 서브머지드아크 용접과 다르다. Fig. 1은 소모 가이드 튜브식 ESW법의 개념도를 나타낸 것이다⁸⁻⁹⁾.

Fig. 2는 일반 아크 용접과 일렉트로슬랙 용접의 용착속도를 비교한 것인데 일렉트로슬랙 용접이 수직 자세용접인 것을 감안하면 상대적으로 용착속도가 매우 빠른 용접법이라는 것을 알 수 있다. 현재까지 이 용접을 사용하여 용접한 최대 부재 두께는 910mm 이며, 이 때 사용된 전극의 수는 6개이다.

또한 가장 많은 최대 18개의 전극을 사용하여 용접을 시행한 사례가 나타나 있는 것이 확인되고 있다³⁻⁶⁾.

3. 실험 방법

EGW나 ESW 모두 큰 용접 입열을 필요로 하는 용접법이지만 강재나 용접 재료 부분은 상대적으로 개발이 뒤늦은 실정이라서 무엇보다도 주어진 조건 하에서 충격인성을 확보하기 위해서 용접 그루브의 체적을 작게 형성시키거나 단위시간당 용착량을 증가시켜 용접속도를 빠르게 하거나 혹은, 모재가 더 두꺼울 경우 두 패스로 시공하여 물성을 검증하였다.

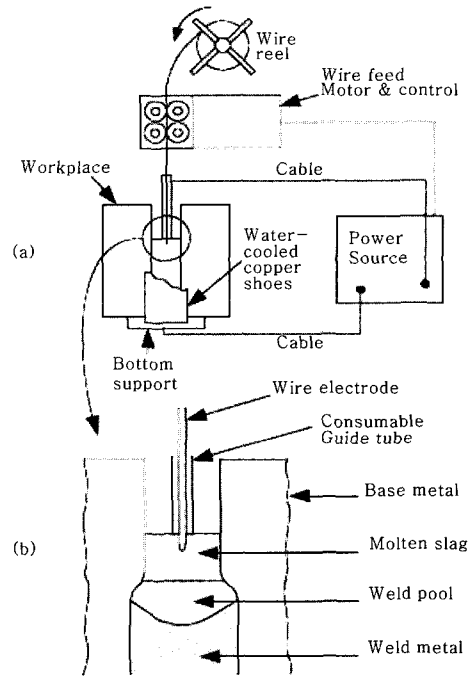


Fig. 1 Scheme of Electroslag Welding (a)overall process (b)welding area enlarged

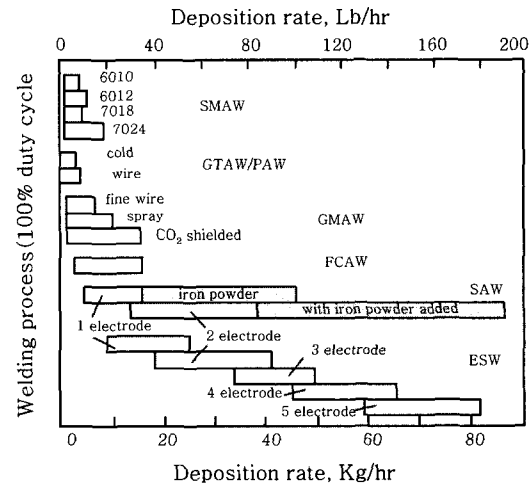


Fig. 2 Deposition rate comparison in arc welding processes

3.1 실험용 강재

실험에 사용한 강재는 미국선급협회(ABS)규격 기준 AH-32에서 EH-40급까지의 것을 용접법과 용접 입열량에 따라 선별 사용하였다. 이는 선체용 고장력강으로서 대부분 TMCP강이며 대형 컨테이너선에 주로 많이 적용되는 두께 30~80mm, 인장강도 50kg/mm²급, 항복강도 32~40kg/mm²급대의 것이다. Table 1 및 2는 시험에 사용된 강재의 기계적 성질과 화학 조성을 나타낸 것이다.

Table 1 Mechanical properties of test pieces

Steel grade	Thick. (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	Nb
		×100			×1000		×100			×1000			
AH32	35	0.16	0.45	1.07	0.014	0.004	0.02	0.01	0.01	Tr	Tr	0.024	0.009
EH36	55	0.07	0.21	1.54	0.005	0.001	0.01	0.19	0.01	0.001	0.001	0.036	0.001
EH36*	55	0.07	0.19	1.54	0.006	0.002	0.02	0.02	0.01	0.002	0.001	0.033	0.017
EH36	65	0.07	0.21	1.53	0.005	0.002	0.01	0.20	0.01	0.001	0.001	0.038	0.001
EH36*	65	0.08	0.19	1.55	0.006	0.002	0.01	0.02	0.02	0.001	0.001	0.032	0.016
EH40	75	0.09	0.34	1.41	0.009	0.000	0.02	0.01	0.01	0.001	0.001	0.031	0.013

* = TMCP steel for higher heat input welding

Table 2 Chemical composition of test pieces

Steel grade	Thick (mm)	Y.S. (N/mm ²)	T.S. (N/mm ²)	Elongation %	V-notch toughness Jule(-40°C)
AH32	35	410	534	28	301
EH36	55	446	577	25	327
EH36*	55	453	562	28	355
EH36	65	457	577	25	315
EH36*	65	418	549	28	368
EH40	75	427	533	31	352

* = TMCP steel for higher heat input welding

3.2 용접 재료

EGW 용접재료로서는 일반적으로 많이 사용되는 지름 1.6mm짜리 플럭스 코어드 와이어를 사용하였다. 1전극 용접에서는 플럭스 코어드 와이어를 단독으로 사용하였고 2전극인 경우 2가지 조합을 사용하여 용접하였는데 첫 번째 조합은 플럭스 코어드 와이어와 솔리드

와이어로, 두 번째 조합은 플럭스 코어드 와이어만 두 개를 써서 용접시험을 실시하였다.

ESW용접재료는 와이어 전극과 소모성 가이드 튜브 그리고 플럭스로 이루어진다. Fig. 3 및 Fig. 4에 EGW와 ESW시험에 사용된 용접재료의 화학 조성을 나타내었다.

3.3 그루브 형상

기본적으로 EGW에서는 Single V그루브를 사용하였으며 그루브 각도는 최종적으로 20°를 유지하였고 루트 간격은 8mm로 하였다(Fig. 3).

용접 토치는 이 그루브 내에서 용접 중 전후 방향 즉, 모재의 두께 방향으로 위빙하게 되는데, 그루브의 단면적을 최소화하면서 토치의 움직임에 간섭을 받지 않는 그루브 조건을 산정하였다. 부재의 두께가 일정한 범위를 넘어가면 한계 용착량에 이르게 되므로 두께 65mm 이상인 재에 대해서는 2전극을 적용하였다. 또

Table 3 Chemical composition of EGW materials

Material brand	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo	SiO	SiO ₂ +MnO+TiO	CaO+M	Remark
YM-55S	0.04	0.10	1.89	0.011	0.005	0.14	0.27				wire electrode (1.6φ)
NES-53	0.08	0.23	1.29	0.007	0.003		0.08				wire electrode (2.8φ)
SES-15A	0.11	0.01	0.42	0.015	0.004	0.01					guide tube
YF-151								32	48	38	flux

Table 4 Chemical composition of ESW materials

Material brand	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Ti	Remark
EG-3	0.08	0.24	1.54	0.012	0.008	1.83	0.1		wire electrode (1.6φ)
DWS-1G	0.05	0.25	1.6	0.009	0.007	1.4	0.13	0.05	wire electrode (2.8φ)
DWS-50GTF	0.08	0.24	1.54	0.012	0.008	1.83	0.1		guide tube
DWS-50GTR	0.09	0.29	1.6	0.008	0.006	0.65	0.2		flux

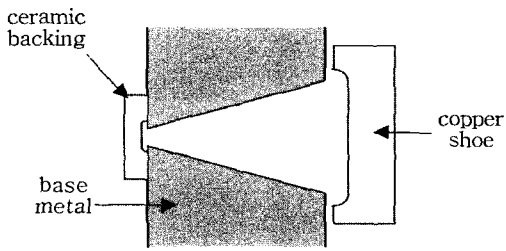


Fig. 3 Preparation of welding groove, backing ceramic and water cooled copper shoe

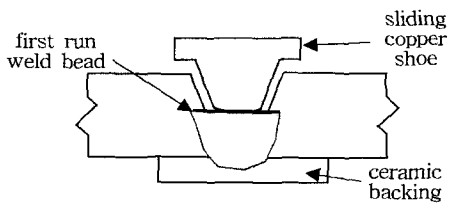


Fig. 4 Combined EGW with flux cored arc welding

한 항복강도 40kg/mm^2 급인 두께 75mm 짜리 EH-40강의 용접에 있어서는 충격인성의 확보를 위해 Fig. 4와 같이 특수 형상의 동당금을 가공하여 선행 패스로서 EGW를 1회 시공한 후 나머지 부분을 플럭스 코어드 아크 용접으로 마무리하는 소위 역컴바인드 공법을 적용하였다.

ESW에서는 I형과 V형 및 X형에 대해 모두 시험을 실시하였다. 용접단면적을 줄여 용접속도작업의 용이성과 작업시간을 고려하면서 용접부의 충격인성을 안정되게 확보할 수 있는 조건을 도출하였다. 가이드 튜브 방식 용접에서는 단위시 간당 용착량을 증가시키기 위해 동일한 용접 전류의 조건하에 튜브에 심선을 덧붙여 그 튜브 내에서 함께 용융시키면서 용접 시험을 진행하였다.

Fig. 5는 전형적인 I-그루브를 나타내고 있으며, Fig. 6은 그루브 단면적과 용접 입열을 줄이기 위해 양면 V-그루브를 만들어 1 전극으로 2 패스용접을 시행한 것을 나타낸다¹⁰⁻¹¹⁾. 또 Fig. 7에 있어서 (a)는 2전극 양면 V-그루브 용접을, (b)와 (c)는 편면 V-그루브 용접법을 보여주고 있으며, (c)는 특히 단위 시간당 용착량 증가를 위해 덧붙이 심선을 사용한 것을 보여주고

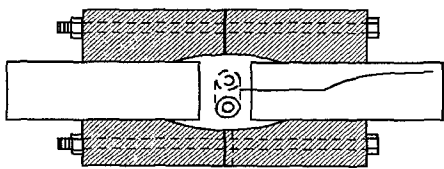


Fig. 5 I-groove joint of ESW attached with water cooled copper shoe

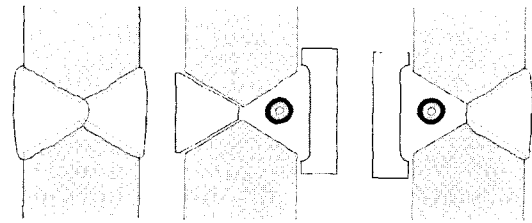


Fig. 6 Two pass welding for double V-groove of consumable guide tube method ESW

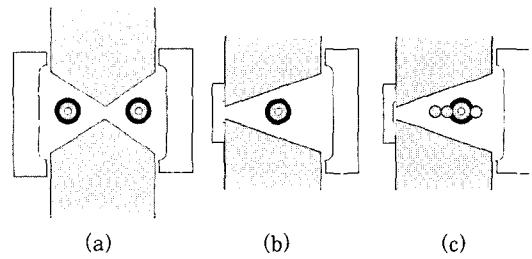


Fig. 7 Variable techniques for consumable guide method ESW. (a) Tandem technique with two consumable guides/electrodes for double V-groove (b) Single electrode method (c) Single electrode wing attached consumable guide method

있다^{4,5,7)}.

3.4 용접 장치

EGW 용접장치는 자체 제작한 디지털제어방식의 간편경량모델을 사용하였으며, 전원은 600암페어 용량의 인버터 타입을 사용하였다. ESW의 경우는 특히 용접 입열량 감소를 지향하여 용접 전류에 따라 와이어 송급 속도를 변화시키기에 따라 용착량을 증감시켜 용접 입열량 조절이 용이하도록 한 방식의 용접전원을 구성, 사용하였다. 비소모식 가이드 튜브 방식의 경우 플럭스 공급 조건을 정량화하기 위해 플럭스 자동공급 장치를 제작, 부착하여 사용하였다. 용접 전원에 있어서는 x전격용량 600암페어짜리 인버터 타입을 비소모식 가이드 튜브방식 용접 시험에 사용하였고, 소모 가이드 튜브방식 용접 시험에는 전격 용량 1000암페어짜리 교류전원을 사용하였다(Fig. 8).

3.5 용접 조건

Table 5는 1전극 EGW, Table 6은 2전극 EGW 용접 조건을 각각 나타내고 있으며, Table 7은 소모 가이드 튜브식 ESW의 용접 조건을, Table 8은 비소모 가이드 튜브식 ESW용접 조건을 각각 보여주고 있

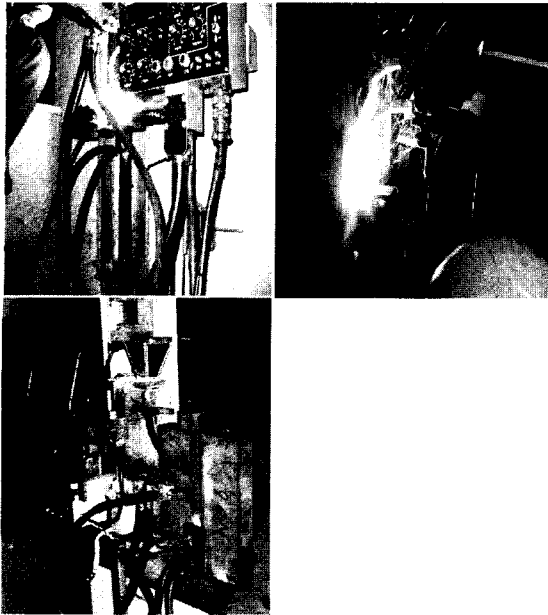


Fig. 8 Consumable guid tube type welding head of ESW

Table 5 Welding condition for single electrode EGW

Plate thick. (mm)	Root gap (mm)	Groove angle(°)	Current (Amp)	Voltage (Volts)	Elect. wire (φ mm)	Heat input (kJ/cm)
13	6	35	350	34	1.6	99.2
18	6	35	340	33	1.6	96.2
26	6	35	375	36	1.6	150
35	8	20	335	35	1.6	182
55	8	20	395	40	1.6	316

Table 6 Welding condition for Tandem-elect. EGW

Plate thick. mm	Root gap mm	Groove angle(°)	Current Amp	Voltage Volts	Elect. wire φ mm	Heat input kJ/cm
60	8	20	(F [*])370 (R ^{**})325	(F [*])42 (R ^{**})39	1.6	420
65	8	20	(F [*])365 (R ^{**})355	(F [*])38 (R ^{**})36	1.6	360
75	8	20	(EGW)365 (FCA)200	44 26	1.6	250 40

다. EGW의 경우 그루브 각은 일반적으로 사용 조건인 20°, FCAW에서는 35°를 적용하였다. 또한 용접 전류에 있어서는 모재 두께별로 335~460암페어, 용접 입열량은 약 100~420kJ/cm 범위에서 시험을 진행하였으며 ESW에서는 이 보다 입열량이 높아 용접 전류 420~520암페어, 용접 입열량은 1cm당 435~1070kJ로 시험하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

Table 9와 10은 EGW와 ESW 실험에 대한 기계적 성질을 평가한 후의 물성치를 각각 보여주고 있으며, 인장강도와 충격인성치를 주요 확인 항목으로 하였다. 용접부의 인장강도는 전체적으로 기준치를 만족하고 최저치 493 N/mm²에서 최고치 573 N/mm²까지 용접 입열량과 충격인성치는 대체적으로 만족하는 모습을 보여주고 있으나 모재 특성상 불규칙 분포 경향을 나타내는 것도 나타나고 있다. -20°C에서 충격시험을 실시한 두께 55mm 이상의 초후판에 있어서도 충격인성치는 요구치 34J을 상회하는 양호한 결과를 EGW와 ESW 모두에서 얻을 수 있었다¹²⁻¹³⁾. 단, 용접 금속이나 용합선에 인접한 용접열 영향부에서 가끔씩 낮은 값을 나타내는 경향을 보이고 있는데 이는 모재의 제조 특성상 합금원소나 산화물의 분포균일화가 완벽하게 잘 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 또한 위 Table 9와 10에서 보듯이 EGW나 ESW 모두 -20°C에서 충격치 저하가 급격하게 일어나지 않은 것을 알 수 있으며, 추후 용접 전압 등 파라미터의 최적화 조정에 의해 충격인성치를 좀 더 향상시킬 수 있는 여지가 있을 것으로 판단된다. ESW에 있어서도 용접전압이 주요 변수로 작용하고 있는데 Form factor에 대한 분석이 충분히 이루어지지 못하였는데 향후 이에 대한 분석과 개선을 통해 아직도 EGW에 비해 높은 용접 입열량 수준을 좀 더 낮추어야 할 것으로 판단되며 이와 관련한 실험이 추가로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

용접부에 대한 미세조직 검사 및 특성에 있어서서는, 용접부의 마크로 조직 시험편은 열에 의한 조직 변화를 방지하기 위하여 냉각수를 충분히 공급하면서 기계적으로 절단하였고, 표면 연마 후 3%염산 수용액으로 10초간 부식시킨 다음 광학 현미경으로 관찰하여 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 10은 주사전자미경을 이용하여 200배의 배율로 단면을 관찰한 결과를 나타낸 것이다. ESW의 경우 파면에서 알 수 있듯이 대부분 연성파괴인 덤플로 구성 되어 있었으며 덤플 안에는 Ti 및 Mn 산화물로 추정되는 석출물이 존재하고 있었다. 충격시험온도를 0°C, -20°C 및 -40°C에서 파면 사진으로 충격시험 온도가 낮아질수록 연성파괴인 덤플은 줄어든 반면 취성파면이 벽개파면이 점차 증가하였으며 -40°C에서는 대부분 벽개파면으로 이루어져 있었다.

EGW에서는 Fig. 10의 (A) EGW-2Pole-b의 경우보다 (B) EGW-2Pole-b의 경우가 훨씬 미세한 조직을 보여주고 있는데 이는 서로 다른 두 가지 용접재료를 각각 사용한 결과로서 나타난 것이다.

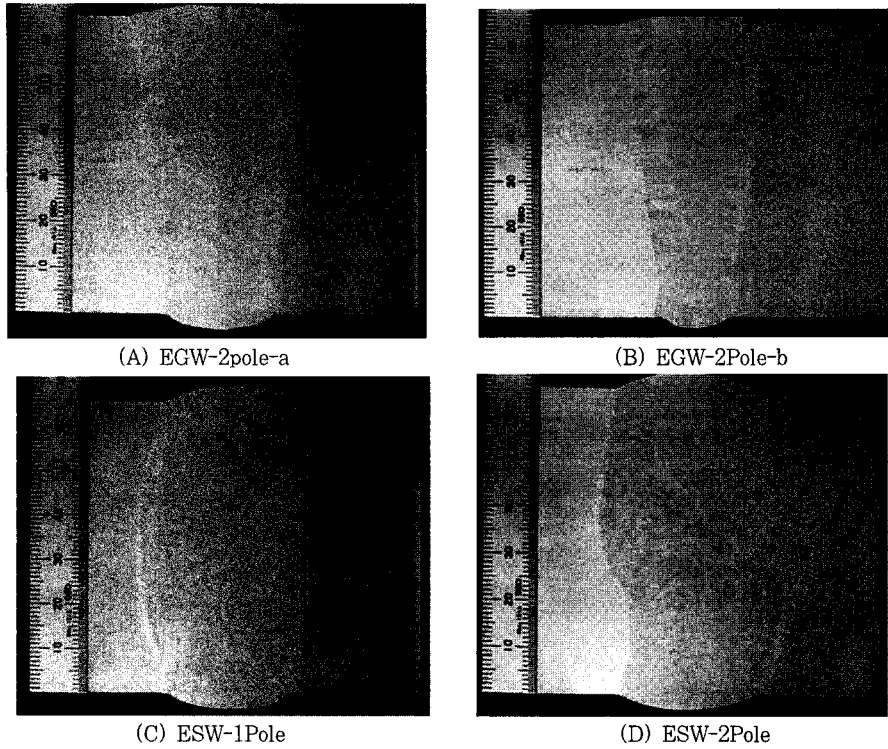


Fig. 9 Macro section of EGW and ESW - 65mm thick

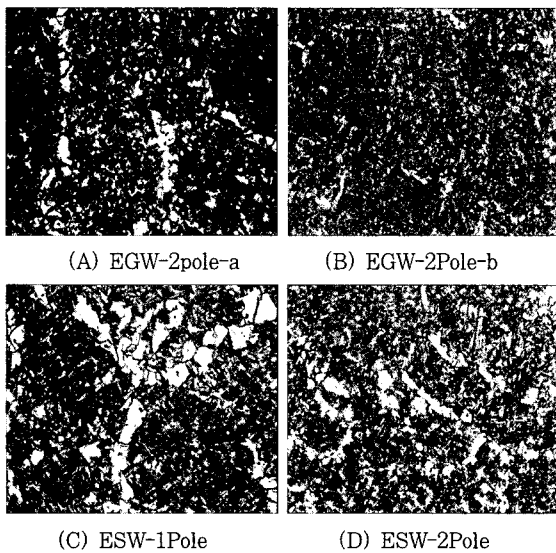


Fig. 10 Microstructure of EGW and ESW - 65mm thick(×200)

5. 결 론

EGW와 ESW는 대표적인 수직자동 대입열 용접법이지만 초후판 강재 및 용접재료의 개발이 미처 뒤따르지 못해 용접 시공상 곤란을 겪어 왔으나 본 연구 및 실험을 통하여 과도한 용접 입열량을 적절하게 줄이면서 용접 능력을 확보할 수 있는 기반을 마련할 수 있게 되었

다. 선축 후판과 해치 코밍을 형성하는 초후판 강재에 있어서는 두께 약 60mm± 정도까지는 1전극 EGW용접으로 시공하였을 때 용접부의 물성 특히, 충격인성 값이 요구하는 수준에 만족할 수 있음을 확인할 수 있었다. 두께가 60mm를 상회하거나 항복강도 40kg/mm² 강재에 대해서는 2전극 EGW와 EGW+FCAW 형태의 컴바인드용접법을 각각 사용하여 용접능률과 용접부의 물성을 안정되게 확보할 수 있었다. 또한 지난 20여년간 조선산업에서 자취를 감추었던 ESW의 경우 충격인성 특성을 강화한 용접재료의 개발로 실험이 가능하게 되었으며, EGW에 비해 느린 용접주행속도로 인한 과도한 용접 입열량 축소를 위한 응용기법을 고안함으로써 용접주행속도를 향상시키고 전체 용접 입열량을 EGW수준으로 대폭 저감시켰으며 용접부의 저온충격인성이 만족할만한 수준을 나타내었고 적절한 승인절차만 거치면 선박 건조 현장에 적용할 수 있는 수준의 제 용접 조건을 확보할 수 있게 되었다.

적용 대상으로서 우선 선체 상갑판 하부 종통 보강재의 수직 맞대기 용접부와 주기판 갑판의 거더 및 해치 코밍 등에 적용하는 것을 목표로 실험을 진행하였으므로 이와 같은 두 종류의 대입열 용접법을 적절히 조화시켜 적용할 수 있는 기반이 마련된 것으로 결론지을 수 있겠다. 기존 ESW이 가지고 있던 과다 용접 입열 문제를 조선분야에 적용하고 있는 용접 프로세스인

Table 7 Welding condition for consumable guide type ESW

Plate thick. (mm)	Root gap mm	Groove angle(°)	Current Amp	Voltage Volts	Electrode wire φ mm	Heat input kJ/cm	guide type
35	23	0	420	44	SES-15/NES-53(2.8)	575	General type
	23	0	420	44	SES-15/NES-53(2.8)	NA	Removed coating
	23	0	420	44	SES-15/NES-53(2.8)	700	Wing rod
55	23	0	420	42	SES-15/NES-53(2.8)	830	General type
	23	0	440	46	SES-15/NES-53(2.8)	1000	Removed coating
	23	0	420	46	SES-15/NES-53(2.8)	1070	Wing rod
	8	20	440	48	SES-15/NES-53(2.8)	785	General type
	10	20	440	46	SES-15/NES-53(2.8)	760	General type
	10	20	420	42	SES-15/YM-5H(1.6)	555	General type
65	8	20	420	48	SES-15/NES-53(2.8)	930	General type
	8	40	440	46	SES-15/NES-53(2.8)	435	General type

Table 8 Welding condition for Tandem-elect. EGW

Plate thick. (mm)	Root gap (mm)	Groove angle(°)	Current (Amp)	Voltage (Volts)	Electrode wire (φ mm)	Heat input (kJ/cm)
25	23	I-groove (0)	395	37	YM-55S(1.6)	234
	8	Single-V(35)	290	38	YM-55S(1.6)	198
35	8	Single-V(35)	370	42	YM-55HF(1.6)	277
35	23	I-groove (0)	400	42	YM-55S(1.6)	323
	8	Single-V(35)	370	41	YM-55S(1.6)	314
55	25	I-groove (0)	480	45	YM-55S(1.6)	551
	8	Single-V(20)	430	44	YM-55S(1.6)	420
	8	Single-V(20)	455	45	YM-55HF(1.6)	345

Table 9 Mechanical Properties of EGW

Plate thick. (mm)	Mechanical Properties					Remark
	T.S. (N/mm ²)	Impact value(J)			Test temp. (°C)	
		Weld metal	Fusion Line	Fusion Line+2mm		
26	573	36	55	41	0	Single electrode
32	547	109	61	135	0	
55	523	75	116	230	-20	
60	493	43	65	147	-20	Tandem electrode
65	530	59	115	211	-20	
75	520	90	81	114	-20	

Table 10 Mechanical Properties of ESW

Plate thick. (mm)	Mechanical Properties					Test temp. (°C)
	Tensile strength (N/mm ²)	Impact value(J)			Test temp. (°C)	
		Weld metal	Fusion Line	Fusion Line+2mm		
25	511	182	108	91	0	
35	514	156	47	68	0	
37	533	125	71	52	0	
55	526	83	108	184	-20	
65	516	151	116	217	-20	

EGW 수준으로 낮출 수 있는 세경 와이어, 가이드 튜브 등을 개발, 개선한 것 또한 본 연구를 통해 얻은 귀중한 수확이라고 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Aachen/ISF : Narrow Gap Welding, Electroslag and Electroslag Welding
2. Krishna K. Verma : Winter 1996, **59-3**, Federal Highway Administration, US, Department of Transportation
3. 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
4. Federal Highway Administration, US : Improved Fracture Toughness and Fatigue Characteristics of Electroslag Welds, Publication No. FHWA-RD-87-026, October 1987
5. David H. Densmore : Narrow-Gap Electroslag Welding for Bridges, FHWA Memorandum, March 20, 2000
6. AWS : Welding Handbook, Ninth Edition Volume2, Welding Processes, Part 1
7. AWS : Welding Handbook, Welding Science & Technology, Ninth Edition Volume 1
8. Claude Sainte-Catherine and Marc Di Fant Bruno Duquaire and Pascal Balladon : Prediction of toughness scatter in heat affected zones(HAZ) with local approach, Engineering Fracture Mechanics, **46-1**, September 1993, Pages 115-12
9. T. Debroy, J. Szekely and T.W. Eagar : Temperature profiles, the size of the heat-affected zone and dilution in electroslag welding, Materials Science and Engineering, **56-2**, November 1982, Pages 181-193
10. D.A. Canonico and R.G. Berggren : Tensile and impact properties of thick-section plate and weldments, Nuclear Engineering and Design, **17-1**, August 1971, Pages 4-15
11. Howard B. Cary and Scott C. Helzer : Modern Welding Technology, Sixth Edition, PEARSON, Prentice Hall
- 12.鈴木 亮, 荒川宜一郎 : 薄板・厚板ダイヤフラムの実験報告 -ダイヤフラムの最小板厚, 最大板厚に挑戦, サクラダ技報 **No. 9** (in Japanese)
13. 福田 充, 鈴木 亮, 澤井隆之 : 60キロ高性能鋼溶接試験報告, サクラダ技報 **No. 9** (in Japanese)