

船舶用 鋼板의 水中熔接 最適化에 관한 研究

吳 世 奎*

Optimization for Underwater Welding of Marine Steel Plates

Sae-Kyoo Oh*

Optimizing investigation of characteristics of underwater welding by a gravity type arc welding process was experimentally carried out by using six types of domestic coated welding electrodes for welding of domestic marine structural steel plates (KR Grade A-1, SWS41A, SWS41B,) in order to develop the underwater welding techniques in practical use.

Main results obtained are summarized as follows:

1. The absorption speed of the coating of domestic coated lime titania type welding-electrode became constant at about 60 minutes in water and it was about 0.18%/min during initial 8 minutes of absorption time.

2. Thus, the immediate welding electrode could be used in underwater welding for such a short time in comparison with the joint strength of in-atmosphere- and on-water-welding by dry-, wet- or immediate-welding-electrode.

3. By bead appearance and X-ray inspection, ilmenite, limetitanium and high titanium oxide types of electrodes were found better for underwater-welding of 10 mm KR Grade A-1 steel plates, while proper welding angle, current and electrode diameter were 60°, above 160A and 4mm respectively under 28cm/min of welding speed.

4. The proper underwater welding current range is limited to a certain range and the current should increase with an increase of electrode diameter for better weldment.

5. The weld metal tensile strength or proof stress of underwater-welded-joints has a quadratic relationship with the heat input, and the optimal heat input zone is about 13 to 15KJ/cm for 10mm SWS41A steel plates, resulting from consideration upon both joint efficiency of above-100% and recovery of impact strength and strain. Meanwhile, the optimal heat input zone resulting from tension-tension fatigue limit above the base metal's of SWS41B plates is 16 to 19KJ/cm. Reliability of all the empirical equations reveals 95% confidence level.

6. The microstructure of the underwater welds of SWS41A welded in such a zone has no weld defects such as hydrogen brittleness with supreme high hardness, since the HAZ-boundary area adjacent to both surface and base metal has only Hv400 max with the microstructure of fine martensite, bainite, pearlite and small amount of ferrite.

* 釜山水産大學: National Fisheries University of Pusan

緒 論

최근 육상자원의 고갈화에 따른 에너지개발 및 공간이용등의 관점에서 해양개발에 대한 관심이 높아짐에 따라 선박이나 해양구조물의 건조 및 보수 수단으로서 불가피한 수중용접기술^{1)~5)}의 개발·연구가 선진국에서는 중요정책의 하나로 수행되어 상당한 성과를 얻고있고, ^{6),7)} 우리나라에서도 정부의 해양과 학육성정책에 따라 그 관심도와 필요성이 높아지고 있다.

그러나 수중용접품질의 최적화를 위하여, 수중용접특성을 실험적으로 조사하고, 용접부 인성을 고려한 용접강도와 입열량과의 상관성을 정량적으로 도출하여 품질제어할 수 있는 연구는 거의 찾아볼 수 없다. ^{8)~10)}

본 연구에서는 국산 선박용 강판(KR Grade A-1, SWS41A, SWS41B)의 수중용접을 위하여 국산 용접봉(E4301, E4303, E4311, E4313, E4316, E4327)으로써, 자작한 중력식 수중용접실험장치에서 수중 아아크를 발생시켜 수중용접을 실시하고, 용접봉 피복계의 흡수속도특성 및 용접봉의 상태(건조, 직접, 吸水)가 용접강도에 미치는 영향, 용접봉의 종류·

형상·각도·용접진류등이 용접비이드외관과 X-선 검사등에 미치는 영향, 입열량과 용접부의 인장강도, 항복강도, 충격강도, 연신율, 피로강도등과의 상관성, 실험식의 신뢰성, 용접부의 X-선검사와 미시조직 검사 및 경도분포에 의한 수중용접 특성과 결함을 실험적으로 해석 하여 수중용접의 최적화 실제에 접근할 기본 자료가 되게 하였다.

實驗材料 및 方法

1. 시험편 및 용접봉

본 실험에 사용된 시험판재는 국산 선급 A-1강판(KR Grade A-1)과 용접구조용 압연강판(SWS41A 및 SWS41B)이며, 용접봉은 방수제를 바르지 않은 6종의 국산피복용접봉이다. 이들의 기계적 성질과 화학조성을 Table 1에 나타내었다.

수중용접 시험편은 모재를 100×50mm로 전단하여 사용했으며, 용접시험편의 그루우브(groove)와 비이드(bead) 적층순서는 Fig. 1과 같이 6층이며, 용접이음부의 강도를 알기 위하여 용착금속부에 노치(notch)를 연삭가공한 인장시험편은 Fig. 2의 (a)와 (b)

Table 1. Mechanical properties and chemical composition of base metals(BM) and welding electrodes(WE)

Materials	Mechanical properties				Chemical composition(wt %)					
	Tensile strength kg/mm ²	Yield strength kg/mm ²	Strain GL 50 %	Impact value kgm/cm ²	C	Si	Mn	P	S	Cu
KR Grade A-1	52	33	19	—	0.134	0.012	1.42	0.015	0.006	0.013
(SWS41A	47	29	33	—	0.17	0.04	0.83	0.02	0.02	—
B SWS41A(notch* on WM)	30.5*	19.6*	28.0*	17.6**						
M SWS41B	46	28	34	—	0.16	0.06	0.86	0.01	0.01	—
(SWS41B(notch on HAZ)	—	—	4.3***	19.0**						
Ilmenite(E4301)	48	41	34	11	0.08	0.10	0.42	0.016	0.010	—
Lime titania(E4303)	49	43	32	11	0.07	0.15	0.37	0.014	0.013	—
(High cellulose(E4311)	47	43	26	11	0.08	0.24	0.48	0.009	0.009	—
W High titanium oxide(E 4313)	49	44	29	—	0.08	0.28	0.38	0.017	0.011	—
E Low hydrogen(E 4316)	55	44	35	19	0.07	0.41	0.96	0.012	0.009	—
(Iron-powder iron-oxide 48 (E4327)		41	34	8	0.07	0.34	0.65	0.018	0.012	—

* Specimen with 2mm depth 120°-V-notch on both sides of weld metal(deposited metal).

** Specimen(6×6mm) with 1mm depth 45°-V-notch in Charpy impact test.

*** Mean strain of specimens with 1mm depth 120°-V-notch on both sides of WM in fatigue test. under 10cps stress.

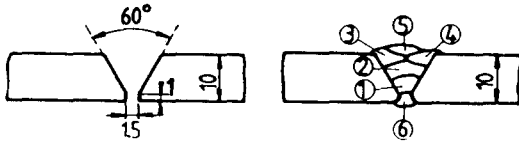
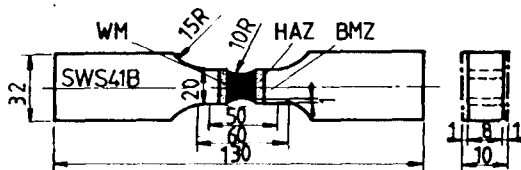
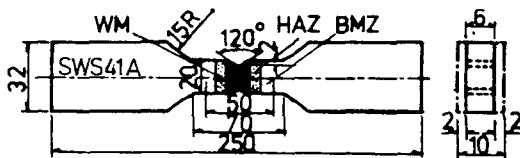


Fig. 1. Shape of groove and welding sequence(mm).

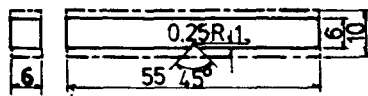
에, 단면 6×6mm로서 용착급속부에 V-노치를 가공한 샤르피 충격시험편은 Fig. 2의 (c)에, 10cps의 인장-인장 편진 반복피로하중하에서의 피로강도를 알기 위한 피로시험편은 Fig. 2의 (d)에 각각 그 형상과 치수를 표시하였다.



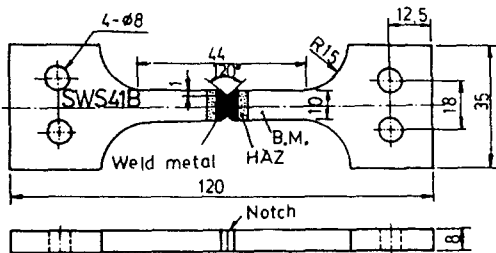
(a) Tension test specimen



(b) Tension test specimen



(c) Impact test specimen



(d) Tension-tension fatigue test specimen

Fig. 2. Specimens(mm).

용접부의 경도분포와 미시조직검사를 위한 시험편은 용접방향의 횡단면이 관찰되도록 하였으며, 배크

로(macro) 및 미시조직검사를 하기 위한 부식액은 질산 5cc+알코올 100cc이며, 부식시간은 각각 90초, 50초로 하였다.

2. 실험장치와 실험방법

수중용접을 위한 실험장치는 운봉비, 용접봉의 각도 및 봉의 지름을 임의로 변화시켜 사용할 수 있는 자작한 중력식 용접장치(Fig. 3)로서 그 개략도는 Fig. 4와 같다. 이 장치에 사용된 용접기는 용량 250A의 국산 AC용접기이며, 이를 다이오드(diode)



Fig. 3. Appearance of experimental underwater welding apparatus(gravity type).

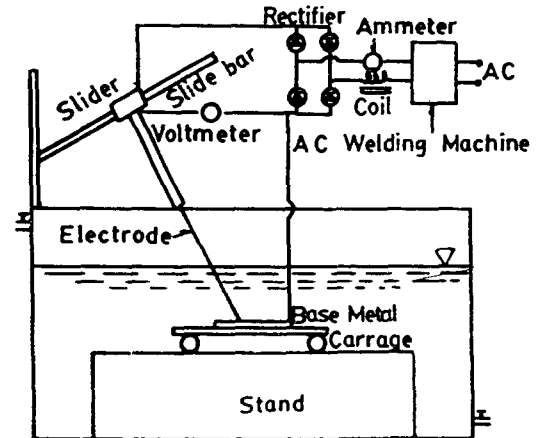


Fig. 4. Schematic block diagram of experimental underwater welding apparatus(gravity type).

整流器로 全波整流하여 DC전류로 전환시켰으며, 용접은 直流正極性에서 수행하였고, 用水는 상수도수와 해수의 경우 차이가 없다는 문헌¹¹⁾에 따라 실온의 상수도수를 사용하였다. 수면에서 용접위치까지의 깊이는, 수심 5m(수압 0.5kg/cm² 상당)까지의 수중용접에 있어서 깊이의 영향이 거의 없다는 문헌¹⁾

Table 2. Welding conditions of marine steel plates (SWS41A, SWS41B) in case of using lime titania type electrode for investigating tensile strength of the joints

Electrode	Root gap (mm)	No. of pass	Electrode angle (°)	Bead length/ Electrode melting length	Welding speed (cm/min)	Welding current (A)	Arc voltage (V)		
							①	②	③
E 4303(φ 4mm)	1.5	6	60	1	28	140	30*	24	28
						160	—	28	33
						180	—	30	36
						200	38**	32	38
						220	—	33	40

Welding environment:

- ①* (SWS41B) In atmosphere & on water.
- ①** (SWS41B) Under water.
- ② (SWS41A) Under water.
- ③ (SWS41B) Under water.

에 따라 20cm로 하였다.

용접조건의 검토를 하기 위하여 전류는 140~220A, 용접속도는 28cm/min(운봉비 즉 비이드 길이/사용봉 길이=1)로 설정하였고, 용접봉지름은 φ3.2~5mm 이고, 봉각도는 40~80°로 하였다.

각종 용접봉에 대한 適正電流에서 비이드외관과 X-선검사를 하여, 가장 우수한 용접결과를 얻을 수 있는 용접봉종류와 봉각도, 봉지름 및 운봉비를 Table 2와 같이 선정해서 용접전류를 변수로 하여 수중용접실험을 수행하여, Fig. 2와 같은 형상의 시험편으로 인장시험, 충격시험, 피로시험을 수행하고 최적전류 즉 최적 입열량의 용접조건하에서 수중용접된 용접재에 관하여 미시조직조사와 경도측정을 하였다. 경도측정은 용접재 용접층의 上下에서 1mm 떨어진 위치와 중심선에서 0.5mm 간격으로 측정하였다.

인장시험에 사용된 시험기는 Tensilon정적만능시험기(Toyo Baldwin, Model UT-25000, 25ton)이며, 피로시험에 이용된 시험기는 전기유압서어보식 피로시험기(Instron 1350 UTM, 10ton)이다.

結果 및 考察

1. 침수시간이 被覆劑의 吸水速度에 미치는 영향

국산 라임티타니아계(E4303) 용접봉(150°C×1hr 건조)의 被覆劑(coating)의 上水道水中에서의 吸水 백분율을 각 침수시간에 대하여 측정한 결과는 Fig. 5와 같다. 피복제의 흡수속도는 약 60분에서 포화상태가 되어 일정하게 되고, 침수시간 8분까지의 吸水

속도는 약 0.15%/min였으며, 따라서 길이 40cm 용접봉으로써 운봉비 1(28cm/min)인 경우에 40cm 비이드를 만드는데 1.4분 걸리며, 이때 정미 吸水量은 용접봉무게의 약 0.22% 미만으로서 미소량임을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서는 시편마다 비이드걸

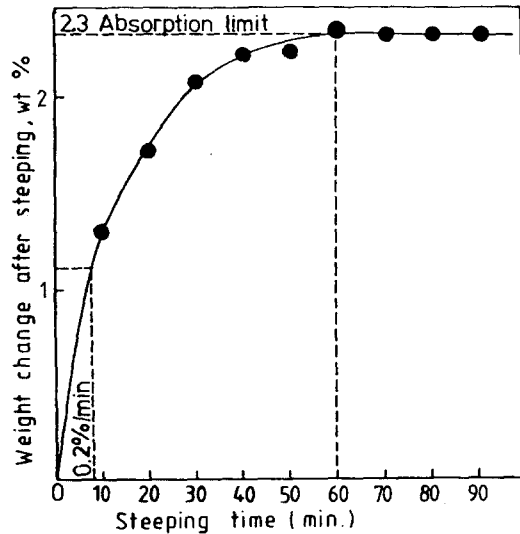
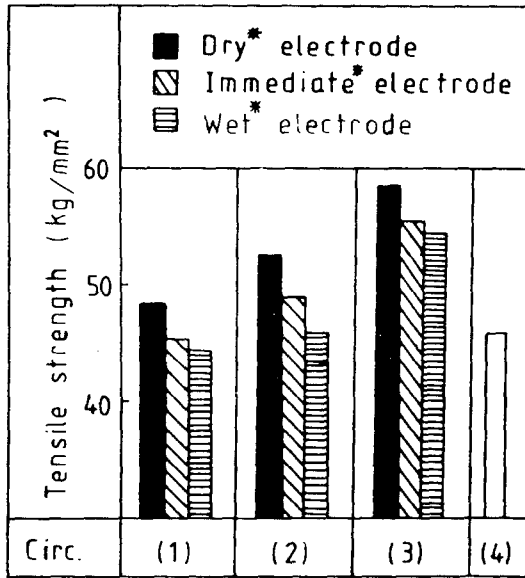


Fig. 5. Absorption factor of coated welding electrode of lime titania type.

이 약 5cm였으므로 피복제의 吸水量은 무시할 정도로서 0.03%의 극소량에 불과하였다.

2. 용접봉상태가 용접강도에 미치는 영향

Fig. 6은 건조(150°C×1hr; Dry), 침수(60min; Wet) 및 미처리(미가열, 미침수; Immediate)한 라임티타니아계(E4303) 용접봉을 사용하여 SWS 41B



(1) In atmosphere (2) On water
(3) Under water (4) Base metal

* Dry: 150°C×1hr heating

Wet: 60min steeping

Immediate: non-heating or non-steeping

Fig. 6. Results of tension test for comparison of the strength of joints(SWS41B) welded (1) in atmosphere, (2) on water, (3) under water using dry, immediate and wet electrodes(lime titania type) and the strength of (4) base metal.

Welding conditions: as ① in Table 2.

강판을 대기중, 수상 및 수중에서 Table 2의 ①과 같은 용접조건하에서 용접한 후에 Fig. 2의 (a)와 같은 인장시험에 의해 용착금속부의 인장강도를 비교한 결과이다. 건조(Dry) 용접봉의 경우가 제일 높고, 침수(Wet)용접봉의 경우가 제일 낮으며, 수중 용접재의 경우가 더 높고, 어느 경우나 모재보다는 더 높다. 침수용접봉은 다른 것보다 용착금속부에 가장 많은 수소를 함유시키므로 파단면은 취성파단면으로서 기공이 많이 발생되어 강도가 저하되며, 수중용접재는 높은 냉각속도의 영향으로 延性低下와 더불어 강도가 높아진 것이라고 생각된다. 건조 및 직접용접봉에 의한 대기중 용접재의 파단면은 컵·코운(cup-cone) 형상으로서 延性破面을 나타내나, 水上·水中용접재에서는 취성파면으로서 氣孔을 다수발생하여 수소의 영향이 있음을 나타낸다. 수상·

수중용접에서 1~4層용접부는 延性破面으로서 氣孔도 적지만 5, 6層 용접부는 취성파면으로서 氣孔이 많다. 이는 후속 용접층에 의한 용착금속부의 뜨임 처리(tempering)효과를 받은 때문이라고 생각된다.

Fig. 7은 라임티타니아계 미처리 직접용접봉을 사용하여 SWS41B 강판을 용접한 (b)대기중, (c)수상, (d)수중 용접재의 본드(bond)부근의 미시조직을 (a)모재의 경우와 비교한 것으로서, 냉각속도차에 의하여 조직의 변화가 현저함을 알수 있다. (b)는 (a)보다 페라이트 바탕에 퍼얼라이트가 조대하게 발달한 조직이고, (c)는 미세한 퍼얼라이트와 페라이트조직이며, (d)는 냉각효과에 의해 베이나이트와 미세한 마르텐사이트조직으로 나타나 있다.

이상과 같이, 건조·직접·침수용접봉에 의한 대기중·수상·수중용접과 모재의 인장강도와 파단면 및 미시조직등을 비교한 결과에 의하면, 직접용접봉의 경우가 건조용접봉의 경우보다 강도상 큰 차이가 없는 것은 직접용접봉 자체의 건조상태가 양호하고, 실제 수중용접시험중 피복재의 침수 정미시간이 짧기때문(Fig. 5에서 8분이내이면 안전)이다. 따라서 건조된 직접용접봉의 사용이 가능하다고 생각된다.

3. 수중용접조건의 영향

수중용접에서의 용접조건은 대기중용접과 마찬가지로 입열량을 결정짓는 용접전류, 전압과 용접속도 외에 용접봉각도, 용접봉지름 용접봉종류등을 들 수 있으며, 이러한 조건도 용접환경 (수온, 수질, 깊이 에 따른 수압)에 따라 다를 수 있으나, 본 연구에서는 수심 5m까지 적용할 수 있는 것으로서⁹⁾ 실은의 수도수에서 수심20cm로 정하여 실험하였다.

Fig. 8은 KR Grade A-1 강판을 $\phi 4mm$ 의 일미나이트계 용접봉을 사용하여, 전류와 용접속도는 각각 160A, 28cm/min로 일정하게 하고, 용접봉각도만 40°, 60°, 80°로 변화시켜 수중용접한 경우의 비드외관과 그 매크로조직을 나타내며, 어느 용접봉각도에서도 양호한 용접이 얻어졌음을 알 수 있다. 따라서 수중용접에서 용접봉 각도의 영향은 크지 않다고 생각된다.

Fig. 9는 Fig. 8의 용접봉각도를 60°로 일정하게 하여 용접전류만을 변화시켜 수중용접하였을 때, 용접전류가 수중용접 비드외관과 매크로 조직에 미치는 영향을 보여준다. 그림(a)는 低전류(90A)로 인한 低입열량의 경우로서 용입부족을 나타내고, 그림(c)는 高전류(240A)로 인한 高입열량의 경우로서 용

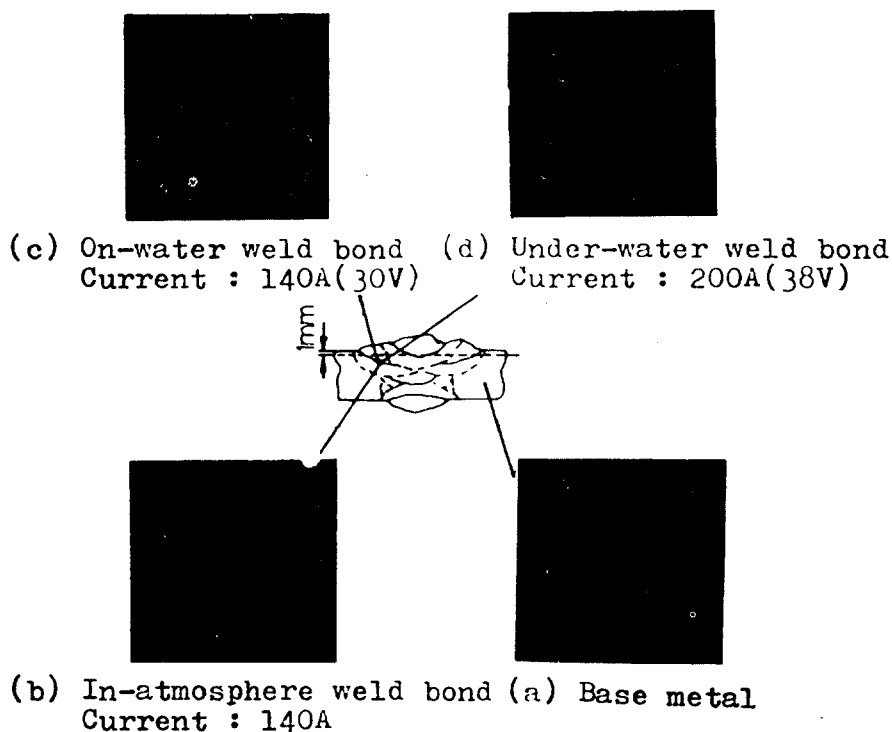


Fig.7. Micro-structures of base metal and in-atmosphere-, on-water- and under-water-weld bonds of SWS41B as lime titania type electrode is used.
Electrode angle: 60°, Welding speed:28cm/min.

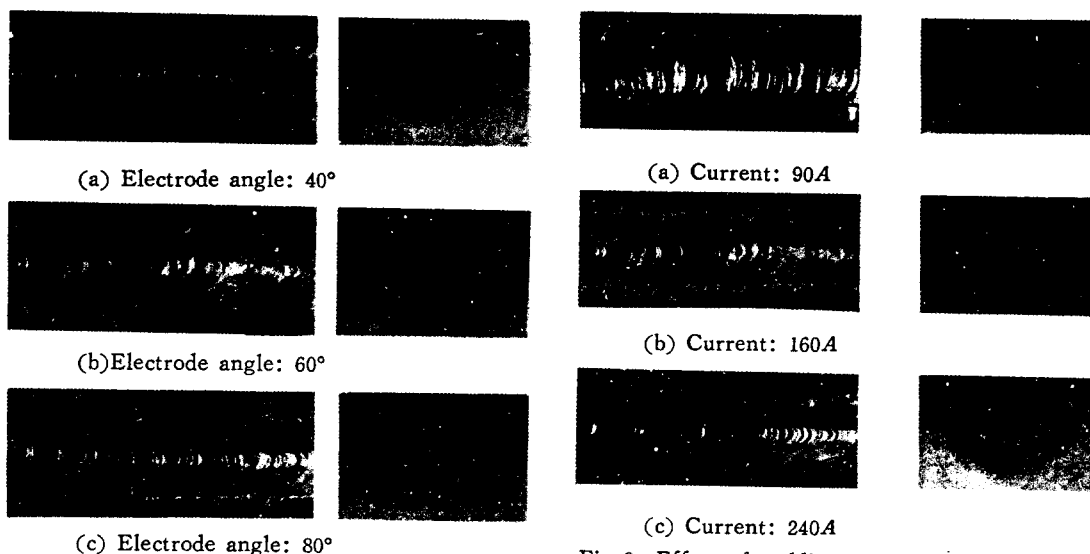


Fig.8. Effect of ilmenite type electrode($\phi 4mm$) angle on bead appearance of underwater welds of KR Grade A-1 steel plate.
Electric current: 160A,
Welding speed: 28cm/min.

Fig.9. Effect of welding current on bead appearance of underwater welds of KR Grade A-1 steel plate as ilmenite type electrode ($\phi 4mm$) is used.
Electrode angle: 60°,
Welding speed: 28cm/min.

입과다와 언더컷(undercut)이 발생함을 보여준다. 그림(b)는 적정 전류(160A)에서의 적정 입열량의 경우로서 용접결함을 보이지 않고 비이드외관이 아름다우며 대체로 양호한 용접이 얻어진 것으로 판단된다. 따라서 160A내외에서 적정전류의 범위가 존재할 것으로 추측된다.

Fig. 10은 용접봉의 지름과 전류를 다양하게 변화시켜 수중용접한 대표적 경우로서 용접봉의 지름이 수중용접비이드에 영향을 미침을 알 수 있으며, 그림(a), (b), (c)는 모두 적정 용접봉과 적정 전류가 알맞게 조합되어 양호한 용접비이드를 형성한 경우이다.



(a) Diameter: $\phi 3.2mm$, Current: 120A



(b) Diameter: $\phi 4mm$, Current: 160A



(c) Diameter: $\phi 5mm$, Current: 240A

Fig. 10. Effect of diameter of ilmenite type electrode($\phi 4mm$) on bead appearance of underwater welds of KR Grade A-1 steel plate.

Electrode angle: 60° ,
Welding speed: 28cm/min.

Fig. 11은 Fig. 10에서의 일미나이트계 용접봉 지름과 용접전류의 적정범위를 KR Grade A-1강판의 수중용접비이드 외관 검사와 매크로조직검사를 통하여 결정한 것으로서, 수중용접에 미치는 각종 용접봉형상과 용접전류의 영향을 나타낸다.

Fig. 12는 Fig. 11과 마찬가지로 SWS41A강판에 대해 조사한 결과이다.

위 두 경우를 비교하면, 수중용접전류의 범위는

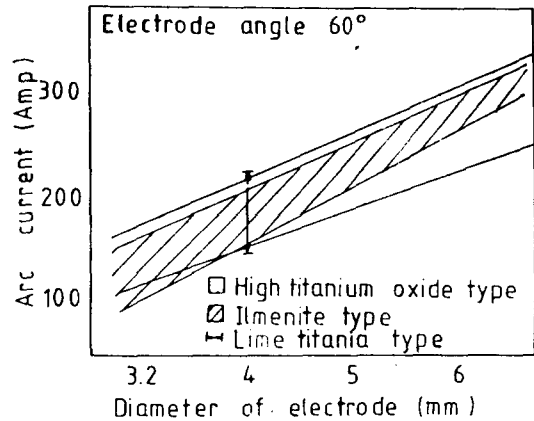


Fig. 11. Effects of arc current and diameter of each electrode on appearance of underwater welds of KR Grade A-1 steel plate.

Welding speed: 28cm/min.

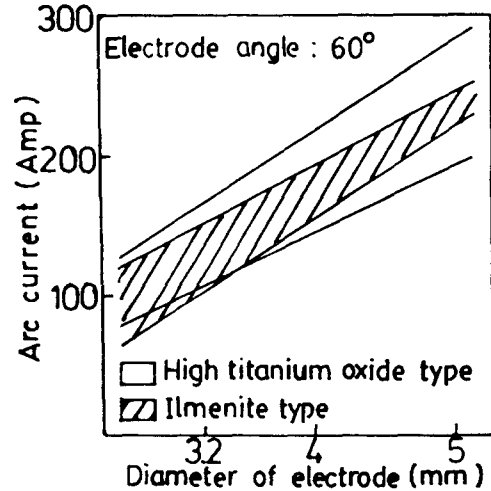


Fig. 12. Effects of arc current and diameter of each electrode on appearance of underwater welds of SWS41A steel plate.

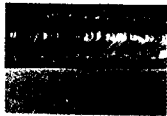
Welding speed: 28cm/min.

어느 일정범위내에 제한되는 점은 대체로 유사하나, 일미나이트계 용접봉 지름의 증가에 따른 용접전류의 증가율이 KR Grade A-1강판의 경우가 더 높다는 것을 볼 때, 용접조건은 용접재료에 따라 민감할 수 있음을 알 수 있다.

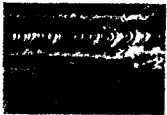
그러나 이상과 같은 KR Grade A-1강판에 대한 수중용접조건에 대한 영향은 SWS41A강판에 대한 경우와 그 경향이 대체로 유사하다고 할 수 있다.

4. 수중용접부의 외관과 X-선투과 검사

Fig. 13은 KR Grade A-1강판에 대하여 $\phi 4mm$ 의 각종 용접봉을 사용해서 추정 적정 용접조건인 용접 봉각도 60° , 용접속도 $28cm/min$, 용접전류 $160A$ 로 수중비이드 만들기를 한 비이드외관과 각각의 X-선 투과검사한 결과를 나타낸다. 그림(e)의 低수소계 및



(a) Ilmenite type



(b) Lime titania type



(c) High cellulose type



(d) High titanium oxide type



(e) Low hydrogen type



(f) Iron powder iron oxide type

Fig. 13. Bead appearance and X-ray inspection result of underwater welds of KR Grade A-1 steel plate according to electrode ($\phi 4mm$) of each type.
Electrode angle: 60° , Current: 160.4 ,
Welding speed: $28cm/min$.

그림(c)의 高セル로우스계 용접봉에 의한 비이드가 불량하게 나타난 것 외에는 어느 계통의 용접봉에

의해서도 블로우홀(blowhole) 및 언더컷등의 용접결함이 없는 우수한 용접임을 알 수 있었고, 특히 라임티타니아계, 高산화티탄계 및 일미나이트계 용접봉에 의한 용접부는 스패터(splatter)가 거의 없는 극히 양호한 비이드외관을 나타내고 있고, Hasui등의 보고¹¹⁾와 SWS41A의 경우⁸⁾에 매우 일치한다.

5. 수중용접강도의 최적화

Fig. 14는 Table 2의 ㉑와 같은 용접조건하에서 SWS41A강판의 수중용접시 용접전류 $I(Amp)$, 용접 전압 $E(Volt)$ 와 입열량 $H(joule/mm)$ 의 상관관계를 실험적으로 구한것을 나타낸다. 이때의 실험식은 다음과 같이 전산되었다.

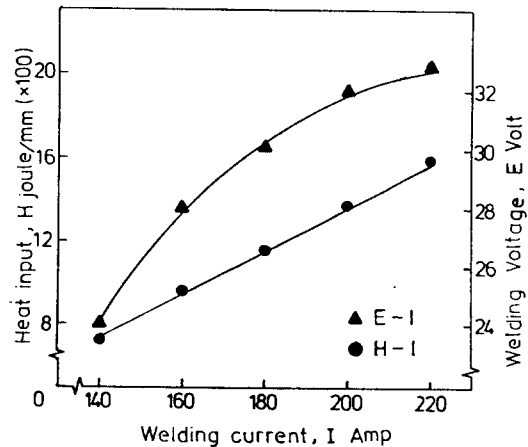


Fig. 14. Interrelation of heat input, welding current and voltage during underwater welding of SWS41A.

$$E = -1.07 \times 10^{-3} I^2 + 4.96 \times 10^{-1} I - 24.26 \dots\dots(1)$$

(Mean % Error=0.5)

$$H = 10.42 I - 723.8 \text{ (M \% E=1.1)} \dots\dots(2)$$

이때 입열량 $H(joule/mm)$ 를 계산하는데 이용된 식¹²⁾은 다음과 같다.

$$H = f_1 EI / V \dots\dots(3)$$

여기서, f_1 : 열전도효율(0.8~1.0로서 1.0으로 잡음)

V : 용접속도(mm/s , $28cm/min$ 즉 $4.67 mm/s$ 로 정함)

본 연구에서, $f_1=1$, $V=28cm/min=4.67mm/s$ 로 정하였으므로

$$H = 0.21 EI \dots\dots(4)$$

Fig. 15는 Fig. 14의 각 입열량 $H(joule/mm)$ 에 대

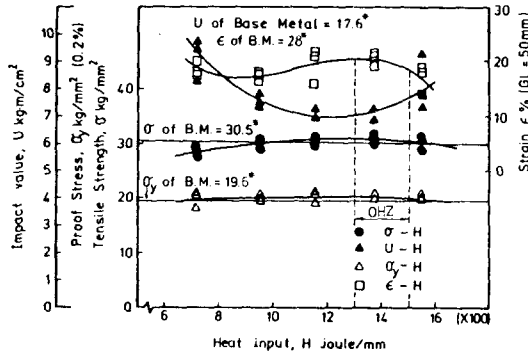


Fig. 15. Effects of heat input on tensile strength and Charpy impact strength of underwater welds of SWS41A(*See Table 1). Welding conditions: as in Table 2.

한 용착금속부의 인장강도 σ (kg/mm^2), 항복강도 σ_y (kg/mm^2), 연신율 ϵ (%), 충격치 U (kgm/cm^2)를 모재의 경우와 비교할 수 있도록 Table 2의 ㉔와 같은 용접조건에서 수중용접한 것을 Fig. 2의 (b)와 (c)의 형상을 갖는 시험편으로 실험한 결과이다. 인장강도가 모재의 것보다 높은 경우인 이음효율 100%를 넘는 경우의 입열량 범위가 10~16KJ/cm이나, 대체로 모재보다 낮은 충격치와 스트레인이 高입열량 측에서 그 증가현상이 나타나므로, 이러한 인성이 회복되는 범위를 고려하면, SWS41A에 대한 수중용접 최적입열량범위(OHZ)는 약 13~15KJ/cm로 정할 수 있을 것이다.

이때, Fig. 15의 실험치로부터 최소자승법을 이용한 회귀해석법에 의하여 전산한 결과로서, H 와 σ , U , σ_y 및 ϵ 과의 상관관계 실험식은 다음과 같다.

$$\sigma = -7.44 \times 10^{-6} H^2 + 1.90 \times 10^{-2} H + 18.8 \quad (M \% E = 2.2) \dots \dots \dots (5)$$

$$\sigma_y = -1.33 \times 10^{-6} H^2 + 3.13 \times 10^{-3} H + 18.4 \quad (M \% E = 3.2) \dots \dots \dots (6)$$

$$U = 9.05 \times 10^{-6} H^2 - 2.20 \times 10^{-2} H + 20.3 \quad (M \% E = 5.3) \dots \dots \dots (7)$$

$$\epsilon = -8.04 \times 10^{-8} H^3 + 2.65 \times 10^{-4} H^2 - 2.80 \times 10^{-1} H + 112.2 \quad (M \% E = 7.6) \dots \dots \dots (8)$$

위의 각 실험식에 대한 신뢰성을 검사하기 위하여 오차해석법(error analysis)에 의해 실험치와 실험식 기대치와의 전체 평균오차의 총평균은 3.5%이며, 이는 95%신뢰성이 있음이 확실하며¹³⁾, 수중용접강도(인장강도, 충격강도)도 마찰압접강도^{13), 14)}와 유사하게 용접조건(용접입열량)에 대해 2차함수적 관

계가 존재함을 알 수 있다,

Fig. 15의 최적입열량범위(OHZ)내의 용접조건하에서 수중용접한 SWS41A용접체의 용접부 현미경미시조직검사를 실시한 결과를 Fig. 16에 나타내었다. Fig. 16에서 (a)는 모재조직으로서 페라이트(ferrite)와 퍼얼라이트(pearlite)가 분포된 조직이며, (b)는 모재에 접한 표면부(깊이 1mm)의 열영향부(HAZ)

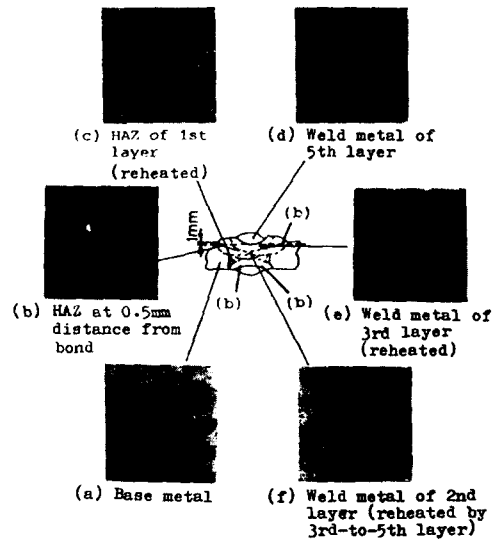


Fig. 16. Micro-structures of base metal and underwater weld of SWS41A as lime titania type electrode is used.

Welding current: 200A, Voltage: 32V, Electrode angle: 60°, Welding speed: 28cm/min.

와 본드와의 경계부근으로서 미세 분포된 마르텐사이트(martensite)와 베이나이트(bainite), 퍼얼라이트 및 소량의 입계 페라이트에서 생긴 粗大조직으로 되어있고, 이 부분의 경도는 약 Hvmax 400으로서 가장 높음이 Fig. 17의 용접부 경도분포조사에서 (b) 위치로 확인될 수 있었다. 그러나 열영향과 냉각효과를 가장 많이 받아 조직변화를 일으킨 이러한 곳의 경도상승은 그 정도를 보아 수소취성영향의 극심한 경도상승점으로는 볼 수 없다고 생각된다. (c)부는 초층매의 열영향부가 2, 6패스의 용접에 의해 재가열되어 뜨임처리효과를 받아 粗大 페라이트 입계에 베이나이트, 퍼얼라이트, 페라이트의 조직이다. (d)는 5층부의 용착금속으로서, 베이나이트와 퍼얼라이트로부터 생성된 입계에 페라이트가 보인다. (e), (f)는 모두 후속 용접층에 의해 재가열되어 미세화

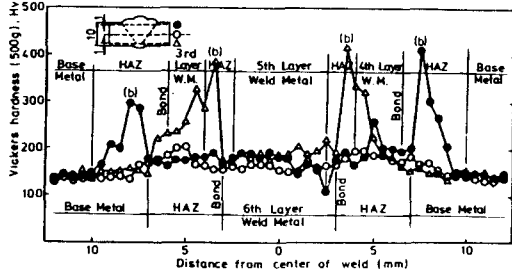


Fig. 17. Longitudinal hardness distribution of underwater weld(6th-pass welding) of SWS41A.

Electrode: $\phi 4mm$, E4303, Electrode angle: 60° , Root: $1.5mm$, Welding speed: $28cm/min$, Current: $220A$, Voltage: $33V$.

된 페라이트와 퍼얼라이트조직이다.

이때, 미시조직검사(Fig. 16)와 경도분포조사(Fig. 17)에 의하면 어느 부분에도 용접결함은 발견되지 않았다.

Fig. 18은 Table 2의 ③과같은 용접조건하에서 SW S41B 강판에 대하여 수중용접을 실시한 후, Fig. 2의 (d)와 같은 피로시험편으로 용착금속부에 대한 인장-인장 편진 반복 피로강도(피로한도) $\sigma_F(kg/mm^2)$ 를 용접입열량 $H(joule/mm)$ 에 대하여 실험적으로 구한 결과이며, 이때 모재의 경우와 비교하였다. 또한 연성과 인성의 회복 특성을 조사하기 위하여 스트레인 $\epsilon(\%)$ 과 충격치 $U(kgm/cm^2)$ 를 실험을 통해 구하였다. 그 상관관계의 실험식은 다음과 같다.

$$\sigma_F = -1.15 \times 10^{-5} H^2 + 3.61 \times 10^{-2} H - 12.2$$

(M % E=4.0)(9)

$$U = 5.76 \times 10^{-6} H^2 - 1.66 \times 10^{-2} H + 19.0$$

(M % E=0.6)(10)

$$\epsilon = -2.40 \times 10^{-8} H^3 + 1.01 \times 10^{-4} H^2 - 1.32$$

(M % E=0.4)(11)

수중용접체의 피로강도는 10cps의 고속률속도에 의하여 가공경화(strain hardening) 효과를 받아 상당히 상승되었다고 생각되며, 그림에서 수중용접체의 피로한도가 모재의 것보다 높고, 충격치와 스트레인이 회복 증가하는 범위를 고려하여, 인성과 피로강도를 고려한 용접입열량의 최적범위(OHZ)는 $16 \sim 19KJ/cm$ 로서 이 OHZ는 정적 인장강도의 경우(Fig. 15)보다 고입열량측으로 기울어진 경향이다. 따라서 용접상태에 따라 수중용접강도의 최적입열량범위를 적절하게 선정하여야 하며, 이러한 입열량의 최적범위내에서의 제어에 의하여 수중용접할 경우 신뢰성

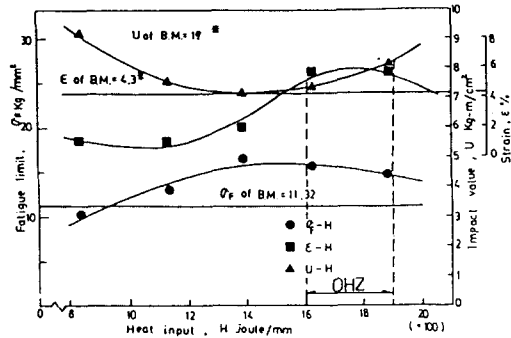


Fig. 18. Effect of heat input on tension-tension fatigue limit of underwater welds of SWS41B, relating to impact value and strain(*See Table 1).

Welding conditions: as in Table 2.

있는 용접품질의 최적화에 기여될 수 있을 것으로 생각된다.

結 論

선박용 강판(KR Grade A-1, SWS41A, SWS 41B)의 수중용접 최적화에 관한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 국산 타이타니아계 용접봉 피복체의 吸水속도는 약 60분에서 일정하게 되고, 침수시간 8분까지의 吸水속도는 약 $0.15\%/min$ 였으므로 40cm 용접기간중의 정미 吸水량은 약 0.22% 미만에 불과하였다.

2. 위의 이유와 건조, 직접, 침수용접봉에 의한 대기중, 수상, 수중용접과 모재의 인장강도 및 미시조직 비교시험결과에 의하면, 수중용접시간이 8분 이내의 충분히 짧은 때에는 강도상 건조된 직접용접봉의 사용이 가능할 것이다.

3. 용접조건이 수중용접비드에 미치는 영향을 KR Grade A-1강판에 대하여 조사한 결과, 용접각도는 60° , 용접전류는 $160A$ 정도, 용접봉지름은 $4mm$ 인 경우가 적합하며, 또한 비이드외관과 X-선검사에 의하면 일미나이트, 타이타니아, 高산화티탄계 용접봉이 가장 적합하였다.

4. 위의 용접봉 종류와 각 지름에 대해 비이드의 관검사에 의한 적정 수중용접전류의 범위는 어느 일정 범위내에 제한되며, 용접봉지름의 증가에 따라 전류는 증가하는 경향이다.

5. 수중용접부의 용착금속부에 관한 기계적특성조

사에 의하면, 인장강도와 항복강도는 입열량과 이차 함수적 관계가 성립되고, 이음효율이 100% 이상의 범위가 존재하며, 충격치와 스트레인은 모재의 경우 보다 낮으나 그 증가현상이 高입열량 범위에서 존재하므로, SWS41A에 대한 수중용접최적입열량범위는 약 13~15KJ/cm이다.

한편, 인장-인장 편진 피로한도가 모재의 경우보다 높고, 충격치와 연신율을 고려하여 구한 최적입열량의 범위는 약 16~19KJ/cm로서, 피로강도를 높이기 위한 입열량은 정적 인장강도때 보다 高입열량으로 수중용접해야 한다. 이때 모든 실험식의 신뢰성은 95%수준이다.

6. 수중용접부에 대한 X-선검사와 미시조직검사 및 경도분포조사에 의하면 용접결함은 발견되지 않았으며, 특히, 깊이 1mm표층부의 모재측 열영향부와 본드(bond)와의 경계부근에 경도 Hv400 max으로서 미세 마르텐사이트, 베이나이트, 퍼얼라이트와 소량의 粗大한 입계페라이트 조직이며 그 외의 부위는 퍼얼라이트와 페라이트 조직으로서, 수소취성영향의 극심한 경도증가 및 조직은 발견되지 않았다.

7. 위에서 구한 입열량의 최적범위내에서의 제어에 의하여 수중용접할 경우, 신뢰성있는 용접품질의 최적화가 가능할 것이다.

後 記

본 연구는 82년도 峨山社會福祉事業財團의 연구비에 의해 수행되었다.

본 연구에 협조해주신 峨山財團과 浦項綜合製鐵(株), 東國製鋼(株), 朝鮮線材(株) 및 高麗熔接棒(株) 관계제워님께 감사드리며, 실험을 위하여 시종 수고를 아끼지 않은 南起祐 助教와 文昌權 助教에게 감사를 드린다.

參 考 文 獻

- 1) Hibshman, M.S., Jenser, C.D. and Harrey, W.E.(1933): Electric arc welding under water. AWS Welding Journal Vol.12, No.10, 4-9.
- 2) Waugh, R.C. and Eberlein, O.P.(1954): Underwater metallic arc welding. AWS Welding Journal Vol.33, No.10, 531s-534s.
- 3) Madatov, N.M.(1965): The properties of the bubble of steam and gas around the arc in underwater welding. Automatic Welding Vol. 18, No.12, 29-34.
- 4) Masumoto, I., Nakashima, Y., Kondo, A. and Matsuda, K.(1971): Study on the underwater welding(Report 1). Journal of JWS Vol.40, No.7, 683-693.
- 5) Hasui, A.(1974): Phenomenon of underwater welding method. Journal of JWS Vol.43. No.4, 403-410.
- 6) Fukushima, S., Fulushima, T. and Kinugawa, J.(1981): Preliminary experiment on improvement of underwater wet plasma welds using filler metal. J. JWS Vol.50, No.3, 92-98.
- 7) 品田幸三郎 (1981): 局部乾式水中自動熔接システムの開發, 日本慶應義塾大學 大學院 工學博士學位論文.
- 8) Oh, S.K., Nam, K.W., Jeong, H.S. and Hasui, A.(1983): Study on underwater welding(Report 1)-Its weldability-Bulletin of KFTS, Vol.19, No.1, 63-70.
- 9) Hasui, A., Suga, Y. and Kurihara, M.(1981): On formation of porosity in underwater weld metal. Journal of JWS Vol.50, No.12, 1225-1231.
- 10) Takeda, T., Yamada, S. and Fukunaga, I.(1981): Study on the weldability of ultra high strength steel for deep submersible research vehicle. Journal of JWS Vol.50, No.8, 807-814.
- 11) Hasui, A., and Suga, Y.(1974): On underwater gravity arc welding(Report 1). Journal of JWS Vol.43, No.8, 767-775.
- 12) AWS(1976): Welding hand book, AWS, 1-7 p.36.
- 13) Oh, S.K., Hasui, A., Kunio, T. and Wang, K.K.(1982): Effects of initial energy on acoustic emission relating to weld strength in friction welding. Trans. JWS, 13-2(Oct.), 15-26. Proc. 4th Int. Sym. JWS 4, JWS-V-8(Nov. 24-26), 713-718.
- 14) Wang, K.K., Reif, G.R. and Oh, S.K.(1982): In-process quality detection of friction welds using acoustic emission techniques. Proc. 63rd Annual AWS Conv., Sess. 5-A (Apr. 27). Welding Journal, Res. Supp, AWS, 61-9(Sept.), 312-320.