

工學碩士 學位論文

선체용 압연강판(KR-RA)의 鎔接棒 種類에
따른 濕式 水中 아크 鎔接特性에 관한 研究



2005年 2月

釜慶大學校 大學院

金屬工學科

黃 成 勳

黃成勳의 工學碩士 學位論文을 認准함

2004年 12月

主 審 工學博士 鄭 炳 琥



委 員 工學碩士 李 鍾 文



委 員 工學博士 金 昌 圭



목 차

Abstract	1
1. 서 론	2
2. 이론적 배경	4
2.1 피복제의 작용.....	4
2.2 Tafel 외삽법.....	6
3. 실험장치 및 실험재료	8
3.1 실험장치.....	8
3.2 실험재료.....	10
4. 실험방법	14
4.1 수중 수동 용접.....	14
4.2 분극시험.....	17
4.3 시험편 제작.....	19
5. 실험결과 및 고찰	21
5.1 용접 아크 안정성 고찰.....	21
5.2 비드 외관.....	26
5.3 용접부의 조직.....	28
5.4 경도분포.....	32
5.5 용접부의 부식 특성.....	35
6. 결 론	42
참 고 문 헌	43
감사의 글	45

A Study on the Wet Arc Welding Properties with Different Electrodes in the KR-RA Steel Plate

Sung-Hun Hwang

Department of Metallurgical Engineering Graduate School of
Pukyong National University

Abstract

Underwater wet arc welds were experimentally performed on 11mm thick KR-RA steel plate by using six different types of flux coated electrodes of 4.0mm diameter: KSKR, KSKT, USBL, JPUW, UWEA, and UWEB. The following results were obtained.

1. In aspect of bead appearance, detachability of slag, spatter producing and arc stability, UWEB electrode obtained more superior weldability than KSKR and KSKT electrodes.
2. The weldments with different electrodes differed little from those in the cross-section structures, but the Bond with UWEB electrode was more narrowed than other bonds.
3. The hardness values of Bond were most high among the Weldments. The hardness distribution was most suitable in the welds with UWEB electrode.
4. E_{corr} and I_{corr} in HAZ and Weld metal were similar to E_{corr} and I_{corr} in Base metal when welding with UWEB and JPUW electrodes, therefore the corrosion resistance of UWEB electrode was improved.

1. 서 론

해양자원 및 해저공간의 이용율을 높이기 위하여 해양개발과 해양구조물에 대한 연구가 다방면에 걸쳐 활발히 추진되고 있다[1-6]. 이러한 해저구조물은 수중 가공기술에 의한 작업이 필요하게 될 것이며 또한 미래에는 수중용접이 중요한 위치를 차지하게 될 것으로 생각된다[7-10].

이렇게 해양개발에 있어서 필수적인 해양구조물은 콘크리트 구조물과 철강 구조물로 대별된다. 이러한 해양구조물 중 해양 철강구조물은 점차적으로 대형화되고 형상이 복잡해짐에 따라서 수중 조립 및 수중 시공 작업이 필요하게 되고 기존의 해양구조물의 정비 및 보수 수단으로, 그리고 대형 선박의 건조나 보수 및 긴급 해난 구조 시에도 수중 용접에 대한 필요성이 절실해지고 기술의 향상이 요구되고 있다[11-15].

일반적으로 수중용접은 교량, 해저 파이프라인, 해양구조물 등의 건조시의 현장용 장비나 보수용접에 적용되지만 용접법 자체의 개발뿐만 아니라, 구조물의 수중 조립 및 잠수기술과 우수한 용접기술을 함께 갖춘 기술자를 필요로 하고 또한 복잡한 설비도 갖추어야 한다[16-18]. 그러나 수중에서 용접된 용접 이음부는 급냉되어 경도가 증가되어 취성이 커지는 등 아직 해결하지 못한 많은 연구과제들을 가지고 있다[19-20].

습식 수중 아크 용접은 발생하는 수증기와 용융금속의 반응, 냉각속도 증가에 의해 균열이나 기공 등의 용접 결함이 발생되기 쉽지만 수중 피복 아크 용접은 수중에서의 가장 간편하고 경제적인 용접방법으로 활용가치가 크다[21]. 습식 수중 아크 용접의 장점을 잘 활용하려면 각종 구조물의 제작에 있어서 용접 이음에 대한 신뢰성을 높이고 작업성을 향상 시킬 수 있는 기초적인 문제점들을 분석하고 해결함으로써 습식 수중 아크 용접의 실용화를 도모할 수 있다고 생각된다[22-24].

수중 용접은 1802년 미국의 Humply Dary가[25] 처음으로 수중에서 아크를 일으키기 시작한 이후 최근 각종 해양구조물이 가공과 보수 수단으로서의 수중 용접 기술의 개발 및 연구가 확대되기 시작했으며, 이와 더불어 플라즈마 용접, 탄산가스 용접 및 피복 아크 용접 등 각종 용접법이 수중 용접에 적용되어 비교적 양호한 결과를 얻었다고 보고되고 있으나 [26-28] 국내에서는 수중 아크 용접에 대한 연구는 다소 있지만 습식 수중 아크 피복 용접봉 개발에 관한 체계적인 연구는 다소 미흡한 실정이다.

본 연구는 수중에서 용접 중에 2차원 속도제어가 가능하도록 제작한 수중 용접 실험 장치를 이용하고, 또 김복인[29] 등이 개발한 습식 수중 아크 용접봉을 사용하여 선체용 압연강판(KR)에 습식 수중 아크 용접을 실시, 습식 수중 아크 용접에 대한 용접성과 부식특성 등을 고찰하였다.

2. 이론적 배경

2.1 피복제의 작용

피복제는 아크열에 의하여 용융되어 아크 흐름 및 용착 금속을 대기로 부터 보호한다. 그 작용을 열거하면 다음과 같다[30-32].

- ① 실드작용 ; 중성, 환원성 분위기를 형성하여 공기로부터의 오염을 방지한다.
- ② 아크의 안정화작용 ; 아크를 안정화시키기 위해 분위기를 전도성(電導性)으로 한다.
- ③ 용점과 비중이 작고 가장 적합한 점성(粘性)의 슬래그(slag)를 형성시킨다.
- ④ 산화물, 유황 및 인과 같은 불순물을 용융금속으로부터 녹여내려 이러한 불순물의 함량을 감소시킨다.
- ⑤ 용접금속에 적당한 합금 원소를 첨가한다.
- ⑥ 용적을 미세화 시켜 용착 효율을 높게 하고 스파터(spatter)를 방지 한다.
- ⑦ 용접금속의 응고와 냉각속도를 느리게 한다.
- ⑧ 위보기 및 기타자세의 용접을 용이하게 한다.
- ⑨ 슬래그의 제거를 쉽게 하고 비드(bead)를 미려하게 만든다.
- ⑩ 용접 중의 용접봉에 피복통(cup of coating)을 형성시킨다.
- ⑪ 용접봉 심선의 원주 측면을 절연시키므로 아크를 선단의 국한된 범위 내로 집중시키는 역할을 한다.

이와 같은 피복제의 작용 가운데 특히 강조되는 요점은 다음과 같다.

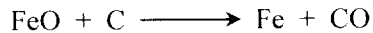
1) 피복통의 형성

피복제는 용접 중의 심선 보다는 약간 늦게 녹는 소위 피복통을 형성한다. 그 결과 아크의 집중 및 지향성과 열효율이 향상되고 용착율과 용입이 향상, 그리고 비드 표면을 미려하게 한다.

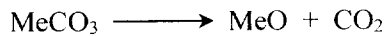
2) 아크 분위기 형성

피복제는 아크열에 의해 분해하여 다량의 가스를 발생하고, 모재와 용접봉사이에서 보호가스의 분위기를 만들어 용착금속의 산화 및 질화를 방지한다. 피복제 중의 가스원은 유기물, 탄산염, 습기 등이 있다.

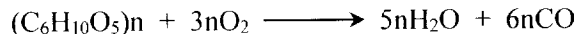
- 용융금속 중의 탄소가 산화에 의하여 일산화탄소를 방출



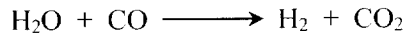
- 탄산염의 분해에 의한 탄산가스 방출



- 유기물 연소에 의한 수증기 및 일산화탄소 발생



- 수증기 일부가 분해하여 수소 등을 발생한다.



용접봉에 의한 아크분위기 조성의 일례는 저수소계(E4316) 이외의 봉에서는 일산화탄소와 수소가스가 대부분을 차지하고, 여기에 탄산가스와 수증기가 소량 포함되어 있는데 반하여 저수소계에서는 수소가스가 극히 적고 탄산가스가 상당히 포함되어 있다. 이들 가스가 용융금속을 대기로부터 보호해 준다.

3) 슬래그 작용

피복제 중의 가스 발생원은 아크 분위기를 생성하나 기타 부분은 슬래그가 되어 용융금속과 반응 또는 이것을 보호한다.

슬래그는 주로 용융금속의 주위를 둘러싸서 이것을 보호하면서 용융 풀(pool)로 이행하고 풀 내에 부상하면서 탈산 반응이나 불순물을 제거하는 플럭스 작용에 의하여 용융금속의 정련작용을 한다.

또한 적당한 합금성분의 보충, 용융금속의 유동성 증가 등에 의하여 양호한 용융금속의 생성을 돕는다. 그리고 슬래그는 응고한 용융금속을 덮어 이것을 보호함과 동시에 급냉을 완화시키는 작용을 한다.

2.2 Tafel 외삽법

이 시험법은 음극 및 양극분극시험에서 얻은 데이터를 이용하는데, 주로 Fig. 1과 같이 음극분극의 데이터를 이용하여 양극 Tafel 선을 구하고, 그 두 선을 교차시켜서 부식속도를 측정한다.

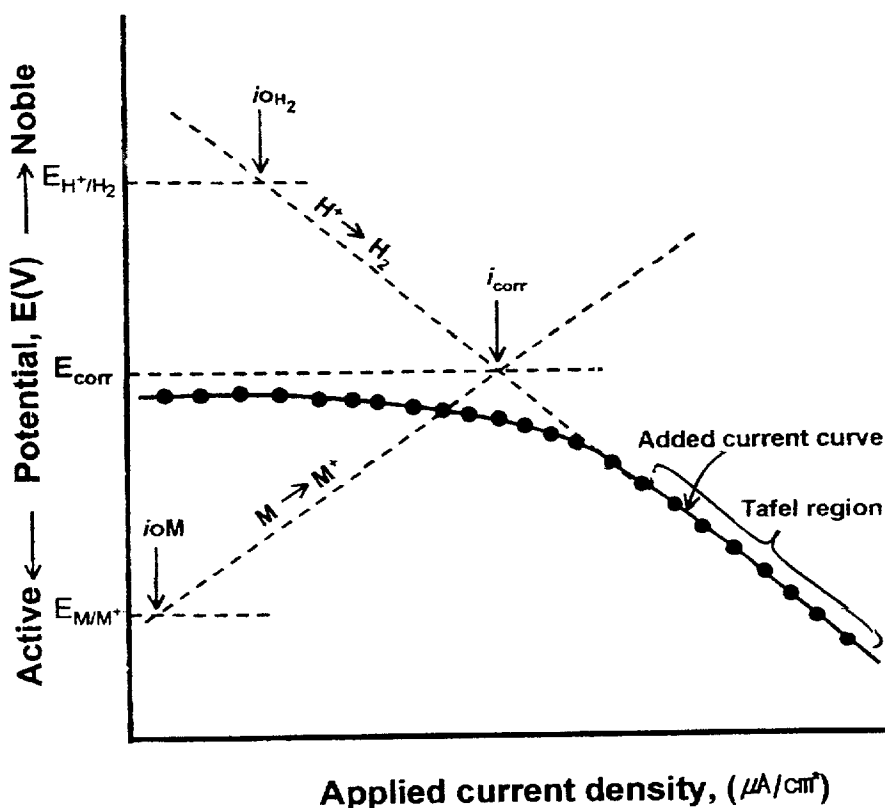


Fig. 1 Tafel extrapolation to measure corrosion rate

이와 같이 음극분극 데이터를 이용하여 양극 Tafel 선을 구하는 이유는 양극분극은 분극시의 외부 환경조건에 의해 데이터가 상당히 변동하여 선형구간을 얻지 못하기 때문이다. 이와 반대로 음극분극에서는 분극시 선

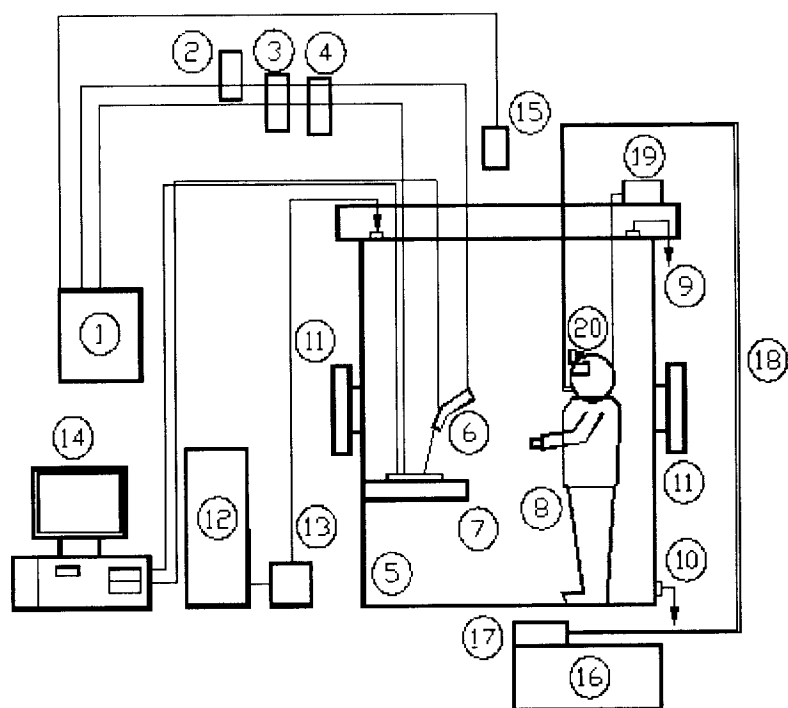
형구간을 얻을 수 있어 음극분극을 많이 사용한다. 이상적인 조건에서는 Tafel 외삽법에 의한 부식 속도의 측정이 무게감량에 의한 값보다도 정확할 수 있다. 또 Tafel 외삽법을 사용하므로 극히 느린 부식속도를 갖는 시험에서도 측정이 가능하며, 어떤 계(system)의 부식속도를 연속적으로 측정할 수 있다[33].

3. 실험장치 및 실험재료

3.1 실험장치

본 실험에 사용된 습식 수중 수동 용접 실험 장치는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 두께 28mm의 SB40 연강판을 사용하여 직경 2500mm, 깊이 2000mm의 커다란 원통형 수조를 제작의뢰 하였으며, 또 내부에서 용접을 보조할 수 있는 보조 잠수사와 직접 수중 수동 용접을 할 수 있는 용접사 등 두 사람이 동시에 2000mm 깊이의 물속에서 습식 수중 수동 용접 실험을 할 수 있도록 커다란 수조를 제작하였다. 그리고 수도수가 순환되도록 급수 및 배수 시설을 장치하여 실험 중에는 수심이 조절되고 수조내의 수온을 일정하게 유지시킬 수 있도록 하였다.

물의 온도를 측정하기 위해 측정온도 0℃~100℃까지 측정할 수 있는 디지털 온도계를 이용하였고, 수조 탱크 내의 밝기를 조절하기 위하여 탱크 중간 부분의 전면과 이면에 잠수정에 이용되고 있는 특수 유리를 장착하였다. 실험에 사용된 용접기는 용량 600A의 직류 용접기를 사용하였고, 용접 실험은 직류 정극성으로 하였다. 그리고 용접 장치에 대한 전기적인 안전을 위하여 마그넷 스위치를 이중으로 설치하였다. 또한 통신장비를 이용하여 수중의 보조사 및 용접사와 항상 통화를 하면서 꼭 필요한 시기만 용접전류를 흐르게 하여 용접사의 안전에 최대한의 노력을 기울였다.



- | | |
|---------------------------------------|---------------------------|
| ① DC arc welding machine | ② On/off magnet switch |
| ③ Ampere meter | ④ Voltage meter |
| ⑤ Chamber | ⑥ Electrode holder |
| ⑦ Work bench | ⑧ Driving dress |
| ⑨ Over flow pipe | ⑩ Drainage |
| ⑪ Sight glass | ⑫ Cooling water tank |
| ⑬ Circulating pump | ⑭ Data acquisition system |
| ⑮ Welding machine power on/off switch | ⑯ Air compressor |
| ⑰ Precision air filter | ⑱ High pressure hose |
| ⑲ Communication phone box | ⑳ Diver's full mask |

Fig. 2 Schematic diagram of experimental equipments

3.2 실험재료

본 연구에 사용한 용접 모재는 크기 125×250×11mm로 선박 건조에 많이 사용되는 선체용 압연 강판(KR-RA)을 이용하였고 그 화학 조성과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다.

본 실험에 사용한 용접봉은 시판 중인 지름 4.0mm의 고산화티탄계(high titanium oxide type) 용접봉 KSKR(KS E4313)과 라임티탄계(lime titania type) 용접봉 KSKT(KS E4303)의 두 종류와 미국에서 시판 중인 수중 용접봉 USBL과 일본에서 수입한 수중 용접봉 JPUW, 그리고 김복인 등이 시험 개발한 두 종류의 수중 피복 아크 용접봉 UWEA와 UWEB 등 모두 6 종류를 사용하였다. 한편, 시험 개발된 수중 용접봉의 심선은 용접봉 제작 회사에서 용접봉 제작에 일반적으로 사용되고 있는 연강용 피복 아크 용접봉의 심선 재질과 동일한 SWRY-11을 사용하였으며 Table 3에 그 화학적 조성을 나타내었다. 실험에 이용한 용접봉 KSKT 및 KSKR의 화학적 조성은 Table 4에 나타내고 있으며 수중용접봉으로 수입한 두 종류의 용접봉에 대한 구체적인 자료는 정확한 것을 구하지 못하여 제시하지 않았다.

김복인 등이 시험적으로 제작하여 개발한 수중 용접봉에 대한 피복제의 중요한 역할과 배합 비율의 일부를 Table 5에 나타내고 있으며, 질량 분석기(XRF 1700)를 이용하여 피복제(flux) 원소를 분석한 결과는 Table 6에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of base metal (KR-RA)

Chemical composition (wt. %)					
C	Si	Mn	P	S	Ceq
0.13	0.25	0.57	0.017	0.01	0.22

Table 2 Mechanical properties of base metal (KR-RA)

Mechanical properties			
Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Bend test
323.4	446.8	24.0	Good

Table 3 Chemical compositions of core wires for UWEA and UWEB

Chemical composition					(wt. %)
C	Si	Mn	P	S	Cu
0.05	0.018	0.54	0.01	0.008	0.1
SWRY-11, $\phi 4.0 \times 400$					

Table 4 Chemical compositions of welding electrodes

Electrode	Chemical composition					(wt. %)
	C	Si	Mn	P	S	
KSKR	0.07	0.32	0.45	0.015	0.012	
KSKT	0.07	0.15	0.37	0.014	0.013	

Table 5 Typical functions and composition ratio of constituents of covering on the UWEA and UWEB electrodes

(Wt.%)

Constituent of covering	Function of constituent		Composition ratio of flux ingredients	
	Primary	Secondary	UWEA	UWEB
Ferromanganese	alloying	deoxidizer	9	9
Silicate	slag former	extrusion	5	2
Feld spar	slag former	extrusion	14	16
Rutile sand	extrusion	arc stabilizer	30	29
Mica	extrusion	slag former	2	3
Starch	shield gas	arc stabilizer	6	5
Dextrine	shield gas	shield gas	1	2
Iron powder	arc stabilizer	contact welding	2	4
Talc	slag former	shield gas	1	2
Titanium dioxide	slag former	arc stabilizer	0.2	0.5
Ilmenite	slag former	arc stabilizer	10	1
Calcite	shield gas	shield gas	14	18
Clay	extrusion	alloying	1	2
Zeolite	alloying	extrusion	3	5
Etc.			1.8	1.5
Total			100	100

Table 6 Chemical compositions of electrode flux elements

(Wt.%)

Elements	KSKR	KSKT	UWEA	UWEB	USBL	JPUW
Si	25.31	29.11	23.89	23.59	22.09	23.40
Ti	30.72	11.47	23.86	19.43	13.87	20.19
Ca	10.82	14.12	20.53	23.70	35.13	18.30
Mn	9.19	5.45	10.62	9.81	4.76	13.74
Al	8.36	3.39	4.43	5.01	3.32	2.87
K	6.31	1.59	4.07	4.60	8.56	3.58
Na	4.38	6.06	4.67	4.91	0.81	3.79
Fe	2.86	-	6.82	5.95	9.17	8.36
Mg	0.74	4.68	0.51	2.45	0.61	4.98
Zr	0.78	0.13	0.28	0.25	1.15	0.51
Nb	0.18	0.07	0.16	0.13	0.07	0.11
P	0.05	0.04	0.03	0.03	0.05	0.04
Sr	-	-	-	0.03	-	-
S	-	0.03	0.03	0.03	0.05	0.03
Cr	-	-	0.09	0.07	0.07	0.10
F	0.32	-	-	-	-	-

4. 실험방법

4.1 수중 수동 용접

본 실험 연구에서는 김복인 등이 제작한 수중 용접 실험 장치를 이용하여 실제 현장의 수중 용접과 유사한 환경 하에서 실험을 하였다. 실험재료에서 기술한 바와 같이 6종류의 선택된 용접봉들과 모재에 대한 최적의 용접조건은 김복인 등이 실험한 용접 조건을 선택하여 사용하였는데, 그 용접 조건을 Table 7에 나타내었다.

실험 장치 내에서 수중 수동 아크 용접에 적합하도록 특별히 고안된 용접 홀더를 손으로 잡고 모든 용접봉에 대해 잠수사 겸 용접사가 Table 7과 같은 용접조건으로 수심 2000mm에서 직류 정극성(DCSP)으로 수중 수동 맞대기 용접을 실시하였다. 또한 실험 장치 내부는 예비 급수 탱크와 펌프 등을 사용하여 냉각수를 계속하여 순환시키고 수돗물을 이용하여 급수시키면서 항상 배수가 적당히 되도록 하여 수조 내의 수온은 20℃로 일정하게 유지함과 동시에 용접 슬래그에 의한 물의 혼탁을 방지하였다.

수중 용접봉의 피복제는 수중에서 사용되므로 작업 중 다량의 수분을 흡수하게 되어 사용 불가능하게 될 수 있어 습식 수중 아크 용접에서 피복제의 방수처리는 필수적이다. 전기 절연과 방수의 목적으로 우레탄 코팅제(Urethane Coating spray UC-100)와 우레탄 바니쉬(Urethane Varnish UV404-9000)를 이용하여 방수처리를 하였다.

본 연구를 위한 방수처리는 실험실에서 여러 번의 시행착오를 거듭하여 다음과 같이 방수처리를 하였다.

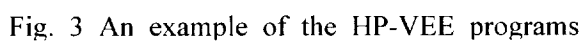
- 1) 방수를 하기 전에 100℃로 1시간 동안 가열하여 습기를 제거한다.
- 2) 1시간 후에 다시 150℃로 1시간 동안 가열한다.
- 3) 우레탄 코팅제로 얇게 스프레이 한 후에 우레탄 바니쉬에 적셔 건조시

킨 후 홀더에 접촉되는 한쪽 끝에 묻은 방수액은 제거한다.

- 4) 용접봉을 사용할 시에는 용접이 잘 되도록 하기 위해 다른 한쪽 끝의 방수액을 제거한다.

습식 수중 용접시의 용접 아크 안정성을 실시간으로 측정하기 위하여 전압과 전류의 파형 측정 프로그램인 HP-VEE(Hewlett-packard Visual Engineering Environment) 5.0 program을 활용하였다. 시스템에 적용시키기 위해 용접전압은 백분의 일로 줄이고, 전류는 분리기(shut)를 이용하여 50mV이하가 되도록 하여 신호 입력 단자에 연결시켰다. 또 데이터 획득 시스템의 두개 채널을 동시에 이용하였는데, gain은 1.0, rate는 500을 기준으로 하였으며 용접 전압과 전류 측정점이 각각 500(point/sec)이 되도록 시스템을 세팅하였다. 용접 실험 중에는 실시간으로 전송이 되도록 하여 용접 전압과 전류를 측정하고 모니터링을 할 수 있도록 하였다. Fig. 3에 HP-VEE의 기본 프로그램의 일예를 간단히 제시하였다.

Welding Conditions	
Current (A)	190
Voltage (V)	35
Welding speed (mm/min)	300
Bead length / Electrode length used	0.5
Welding angle (°)	75
Electrode source	DCSP
Welding position	Flat

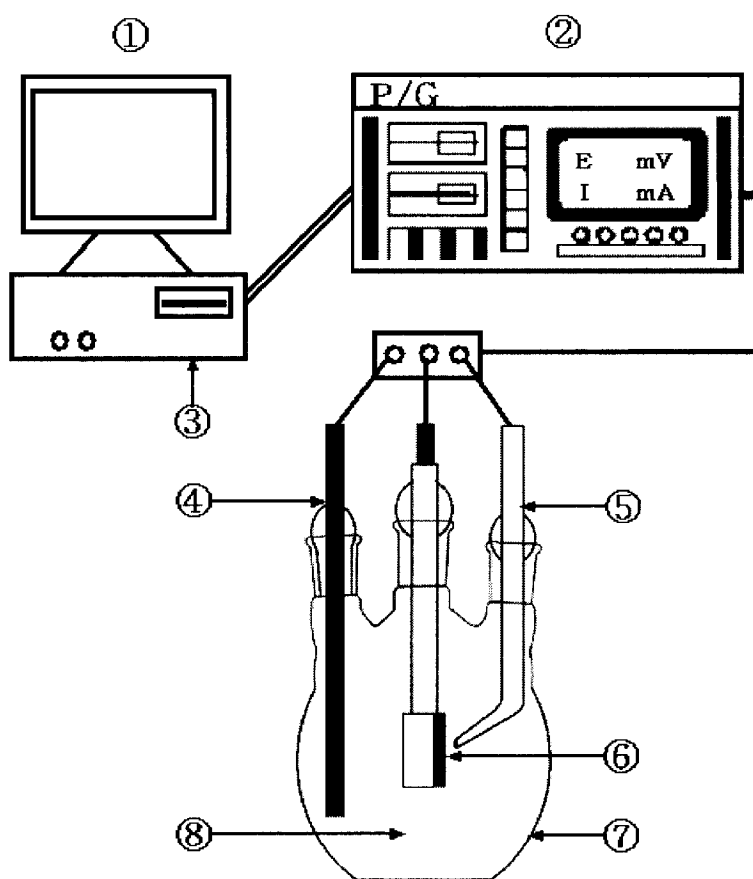


4.2 분극시험

본 연구에서는 일정 전위를 가한 후 이에 상당하는 전류량을 측정하는 방식인 동전위법에 의한 분극시험을 행하였다. 그리고 시편의 전위를 일정 속도로 연속적으로 변화시켜 이에 수반되는 전류의 변화를 측정한다. 이에 따라 각 시편의 전기화학적 부식상태를 비교하기 위하여 분극시험은 Potentiostat / Galvanostat (Model : EG & G PARC M273A)를 사용하였으며, M352 corrosion software를 사용하여 potentiodynamic scanning을 실시하였다.

Fig. 4에 본 실험에 사용된 polarization cell의 개략도를 나타내었다. 기준전극(reference electrode)으로는 포화칼로멜전극(SCE ; Saturated Calomel Electrode), 보조전극(counter electrode)으로는 고밀도 탄소봉(carbon rod)을 사용하였다. 전해액(electrolyte)으로는 3% NaCl 용액을 사용하였고, 전해액의 온도는 30℃로 유지하였다. 시험전위범위는 -1.5V에서 +1까지, 주사속도(scan rate)는 5mV/sec로 하였다. 분극시험 전에 시험편을 320~2000번까지 연마하여 초음파 세척기로 세척한 후 아세톤으로 탈지하였다.

이들 시험결과는 용접봉 종류에 따라 용접금속, 열영향부 및 모재에 대한 부식전위(E_{corr}), 부식전류(I_{corr})를 조사하여 용접부와 모재간의 전지작용 부식의 경향을 비교하였다.



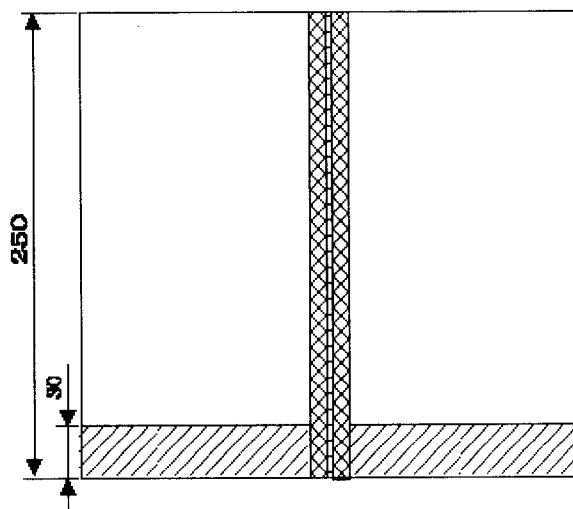
- | | |
|-----------------------|----------------------------|
| ① Monitor | ② Potentiostat/Galvanostat |
| ③ Personal computer | ④ Counter electrode |
| ⑤ Reference electrode | ⑥ Specimen |
| ⑦ Corrosion cell | ⑧ Electrolyte |

Fig. 4 Schematic diagram of polarization test apparatus

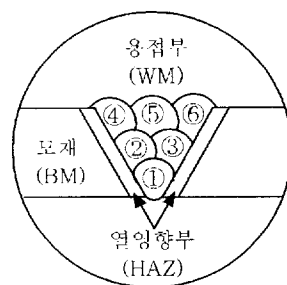
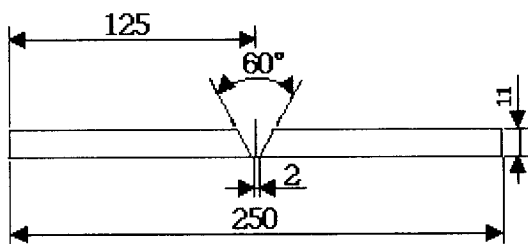
4.3 시험편 제작

습식 수중 아크 용접을 실행하기 이전에 용접시험편 제작에 대한 개략도를 Fig. 5 (a)에 나타내었다. 먼저 KR-RA 강판을 압연 방향에 관계없이 기계톱을 사용하여 125×250mm로 절단하였고, 절단된 각각의 강판에 V홈면을 밀링 가공한 후 홈 각도 60°, 루트간격 2mm, 루트면 2mm가 되도록 줄 다듬질을 하였다. 준비된 두 개의 강판(KR-RA)을 대형 수조 내에서 아래보기 자세로 다층 맞대기 이음용접을 하였다.

부식특성을 측정하기 위한 시험편은 용접된 강판을 용접방향과 수직되게 절단하여 용접부를 5% Nital 용액으로 부식시켰다. 부식된 용접부는 Fig. 5 (b)에 나타난 바와 같이 용접금속(WM), 열영향부(HAZ) 및 모재(BM)로 그 경계가 확연히 드러났다. 각각의 구역을 fine cutter로 절단하여 분극시험편으로 사용하였다.



Multi-pass welding No.



(a)

(b)

Fig. 5 Schematic diagram of polarization test specimens

(a) Welding joint design

(b) Location of polarization test specimens

5. 실험결과 및 고찰

5.1 용접 아크 안정성 고찰

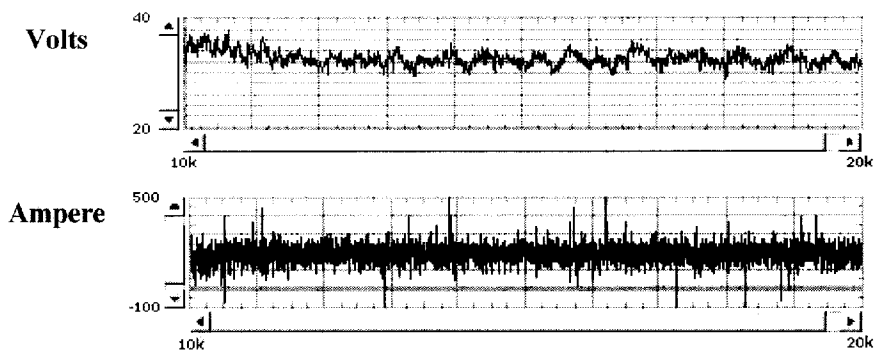
잠수사 겸 용접사에 해당되는 기능 자격을 가질 수 있을 만큼의 기술과 기능을 습득을 하고, 복잡한 잠수장비를 준비하여 수심 2m 이상의 물속에서 직접 손으로 용접 홀더를 잡고 수동으로 실험 용접을 하는 실험은 상당한 모험이었다. 습식 수중 수동 아크 용접(**underwater wet manual arc welding**)시의 용접 작업성은 수중 수동 아크 용접 기술에 따라 차이가 많아 여러 사람의 자료보다는 한 사람의 숙달된 수중 용접 기술과 용접 기능에 의존하여 수동으로 다층 아크 용접 실험을 실시하였다.

습식 수중 아크 용접의 경우 용접 입열량이 적으면 아크의 발생이 어렵고 단락되는 경우가 있으나 예비 실험을 통해 최적의 조건으로 선택된 Table 7과 같은 조건으로 용접기의 조절 노브(knob)를 고정하여 두고 피복제가 다른 6종류의 용접봉을 사용하여 용접 작업성을 비교하여 보았다. 수심 2m 수조 내부 설치한 작업대에 용접 지그(**welding jig**)를 장착하고, 여기에 시험편을 고정하였다. 수중 용접 중의 아크 안정성은 약간의 차이가 있었으나 용접 아크의 시작과 발생은 피복제의 종류에 따른 차이점은 발견 할 수 없었고 용접 자체에도 큰 영향이 없는 것 같았다.

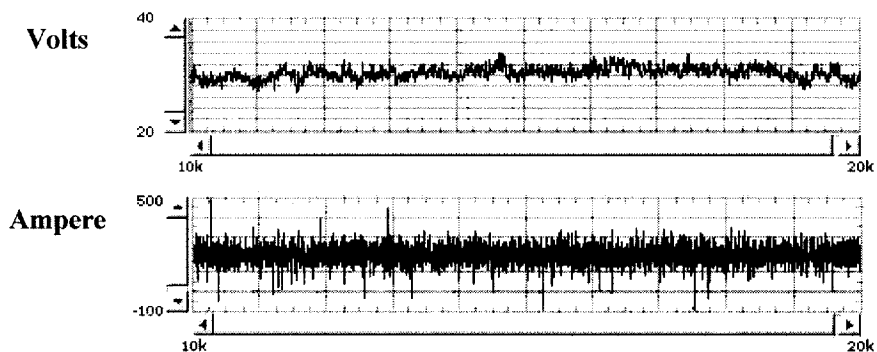
그러나 용접기 조건을 Table 7의 습식 수중 용접 조건에 고정한 상태에서 용접봉의 종류에 따라서 HP-VEE program의 실시간으로 실측된 전압과 전류파형을 Fig. 6에 그리고 그 평균값을 Table 8에 나타내었다. 용접봉 종류에 따른 전압 및 전류파형은 상당한 차이가 있었으며, 피복제의 성분에 따라서도 영향이 있다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 본 실험 연구의 범위 내에서는 수중 수동 아크 용접에 있어서 별다른 문제없이 용접을 할 수 있었다.

Table 8 Typical measured average volts and amperes

	Volts (V)	VAmperes (A)	Bead length / Electrode length	Welding angle(°)	Welding speed (mm/min)
KSKR	35-40	200-210	0.5-0.7	65-75	25-30
KSKT	28-33	205-210	0.5-0.7	65-75	25-30
UWEA	23-28	200-210	0.5-0.7	65-75	25-30
UWEB	29-34	205-210	0.5-0.7	65-75	25-30
USBL	25-30	200-215	0.5-0.7	65-75	25-30
JPUW	28-33	205-210	0.5-0.7	65-75	25-30



KSKR

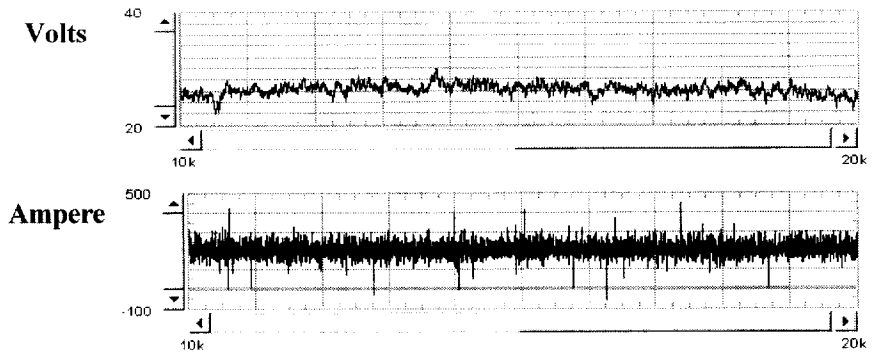


KSKT

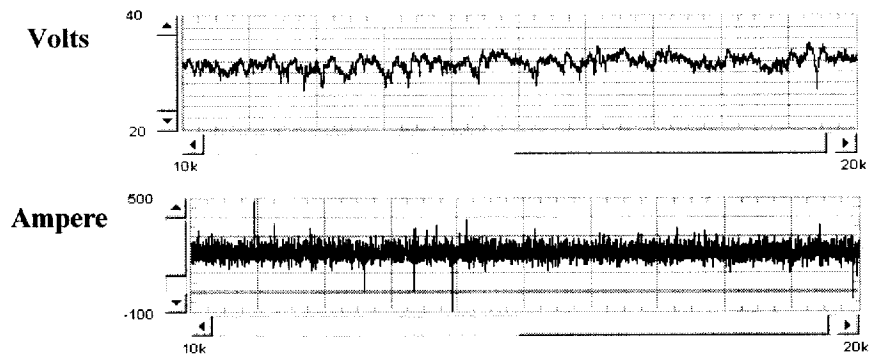
(a)

Fig. 6 Oscillograms by underwater wet arc welds for different welding electrodes

- (a) KSKR, KSKT welding electrodes
- (b) UWEA, UWEB welding electrodes
- (c) USBL, JPUW welding electrodes



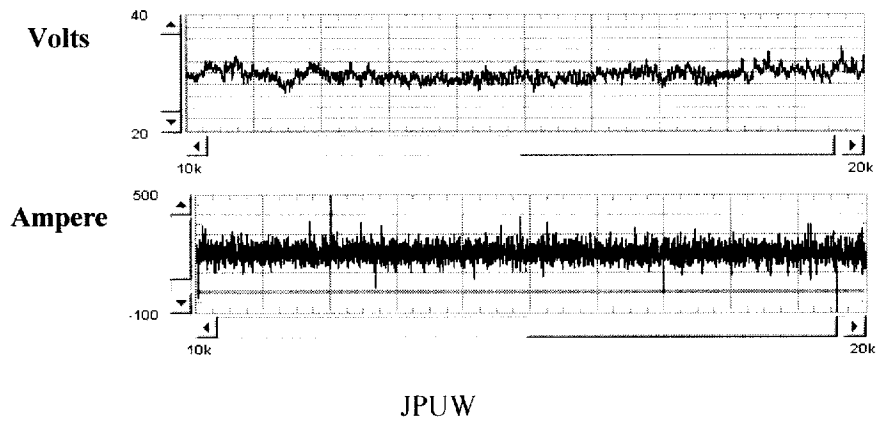
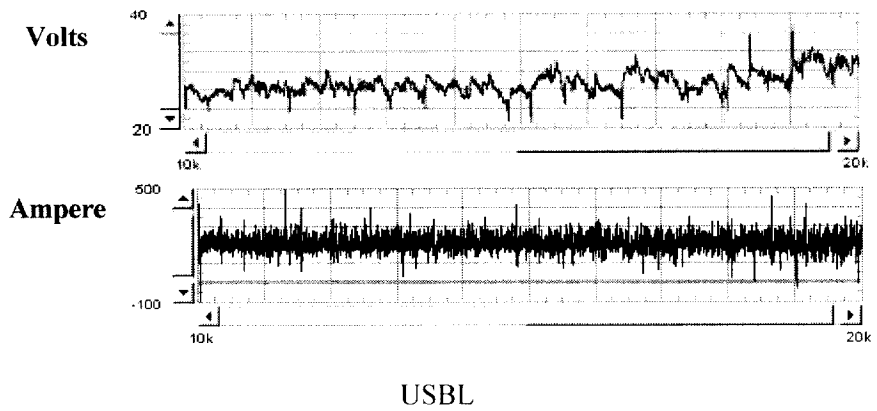
UWEA



UWEB

(b)

Fig. 6 Continued



(c)

Fig. 6 Continued

5.2 비드 외관

Table 7과 같은 용접조건으로 6 종류의 용접봉을 사용하여 피복제의 종류에 따라 습식 수중 아크 용접한 시편들의 비드 형상을 Fig. 7에 나타내었다. 대부분의 용접 비드가 뚜렷하게 나타났는데, JPUW 용접봉의 수중 용접 비드 모양이 USBL 용접봉의 비드 형상보다 조금은 더 균등하고 일정하게 나타났으며 또 시험 제작한 UWEB의 용접봉이 UWEA 보다는 비드의 형상이 양호하게 나타났음을 알 수 있었다.

외국에서 수입한 USBL 및 JPUW 용접봉과 UWEB 용접봉을 사용하여 습식 수중 아크 용접한 시편의 비드 형상은 모두 거의 비슷한 모양을 보이고 있으나 그 중에서 JPUW 용접봉을 사용한 시편의 비드 형상이 가장 양호하게 나타났고, Fig. 7에서 보는 바와 같이 USBL 용접봉에 의한 용접부는 스패터 발생으로 인해 용접부 표면이 미려하지 못함을 확인할 수 있었다.

다층 용접의 중간에 물 속에서 와이어 브러쉬(wire brush)와 칩핑 해머(chipping hammer)로 슬래그를 수동으로 제거하였다. KSKR 용접봉의 수중 슬래그 제거 작업이 가장 힘들었으며 시험 제작한 UWEB 용접봉이 UWEA 용접봉보다는 수중에서 슬래그 제거가 용이하였으며, 슬래그 형상은 수입한 수중 용접봉 JPUW 과 서로 비슷한 모양으로 나타났다.

본 실험의 범위 내에서는 시판되고 있는 범용의 일반 용접봉 KSKR 및 KSKT 들과 비교했을 때 습식 수중 아크 용접봉으로 개발한 UWEB 용접봉이 비드 외관과 비드 거칠기 면에서 개선의 효과가 있었으며 수입한 외국의 수중 전용 용접봉 두 개와 비교했을 때도 큰 차이를 느낄 수는 없었다. 또 동일한 용접 조건에서 동일 규격의 용접봉 심선을 사용한 전제를 고려할 때 피복제 성분의 배합비 변화에 의해서도 충분히 개선되었음을 알 수 있었다.

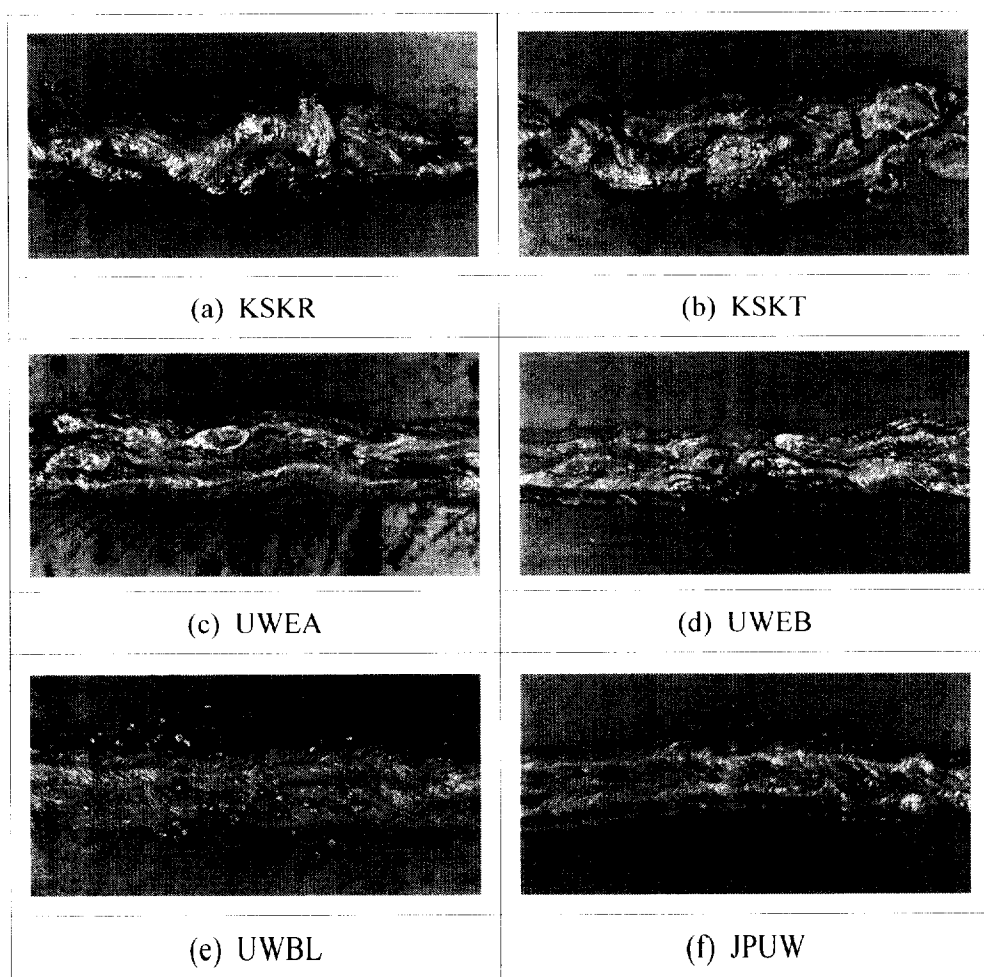


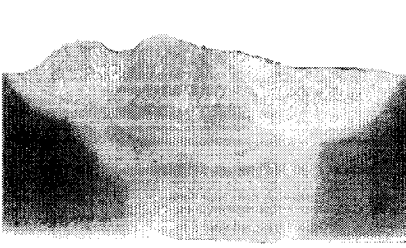
Fig. 7 Bead appearance of multi-pass underwater wet arc welds for comparison of different welding electrodes

5.3 용접부의 조직

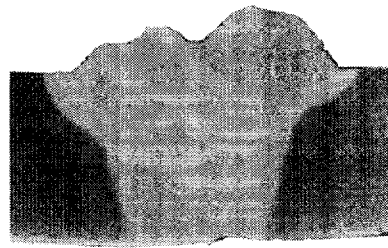
Fig. 8은 다층 용접한 시험편의 마크로 단면 조직 사진을 나타내고 있다. 대부분의 단면 조직은 거의 유사하였고 김복인 등이 시험 개발한 용접봉 UWEA와 용접봉 UWEB의 비드 표면은 안정적이었으나, 용접봉 UWEB의 열영향부가 매우 넓게 나타나 기계적 특성에 나쁜 영향을 끼칠 것으로 생각되었다. 그러나 용접봉의 종류에 따른 차이점 보다는 잠수용 접사의 기능과 기술에 따라 용접의 양부가 결정된다고 사료된다.

Fig. 9는 수중에서 수동으로 습식 다층 아크 용접 실험한 시험편의 용접 경계 부분의 단면에 대한 현미경 조직 사진으로 각각의 용접봉에 대한 용접금속, 본드, 열영향부 및 모재로 나누어 나타내고 있다.

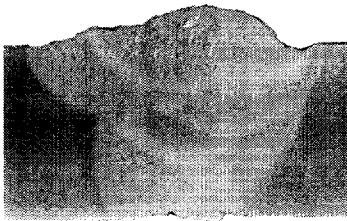
용접금속(WM)은 용가제(용접봉)와 모재의 일부가 용융되어 응고한 부분으로 연강 용접시 나타나는 응고조직을 보이며 조직사진에서 알 수 있듯이 전형적인 덴드라이트는 보이지 않는다. 대신 덴드라이트들이 성장한 후 하나의 입계를 형성해 주상정 형태는 잘 나타나고 있다. 또한 용접금속은 급냉·응고로 인하여 침상의 페라이트 조직이 잘 나타나고 있다. 용접금속에 접하는 본드(Bond or Fusion Boundary)는 용접까지 가열된 좁은 구역으로 위드만스테텐(Widmanstätten)상의 침상 페라이트 조직이 석출되어 있으며 HAZ는 다소 결정립이 조대화된 래스 마르텐사이트 조직을 나타내고 있다. 그러나 각 용접봉에 따른 조직적인 큰 차이는 찾아 볼 수 없다. 본드는 가장 경화하는 영역으로 용접균열이 발생하기 쉽고 노치 인성도 저하하는데, UWEB가 다른 용접봉에 비해 본드의 영역이 좁아 기계적 특성면에 있어서 타 용접봉보다 양호하다고 생각된다. 또 용접금속 내의 HAZ(Multi-pass HAZ)는 다층용접으로 용접부가 재가열되면서 노말라이징(normalizing) 효과로 인하여 미세화 되어졌음을 알 수 있다.



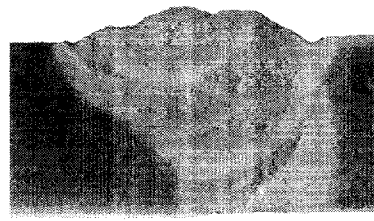
(a) KSKR



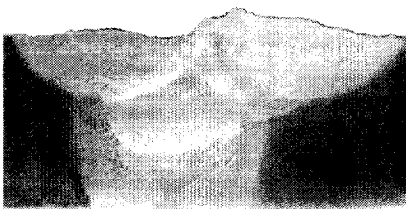
(b) KSKT



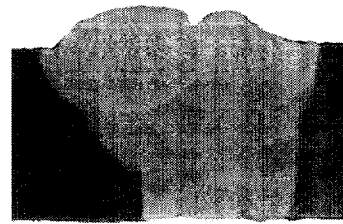
(c) UWEA



(d) UWEB

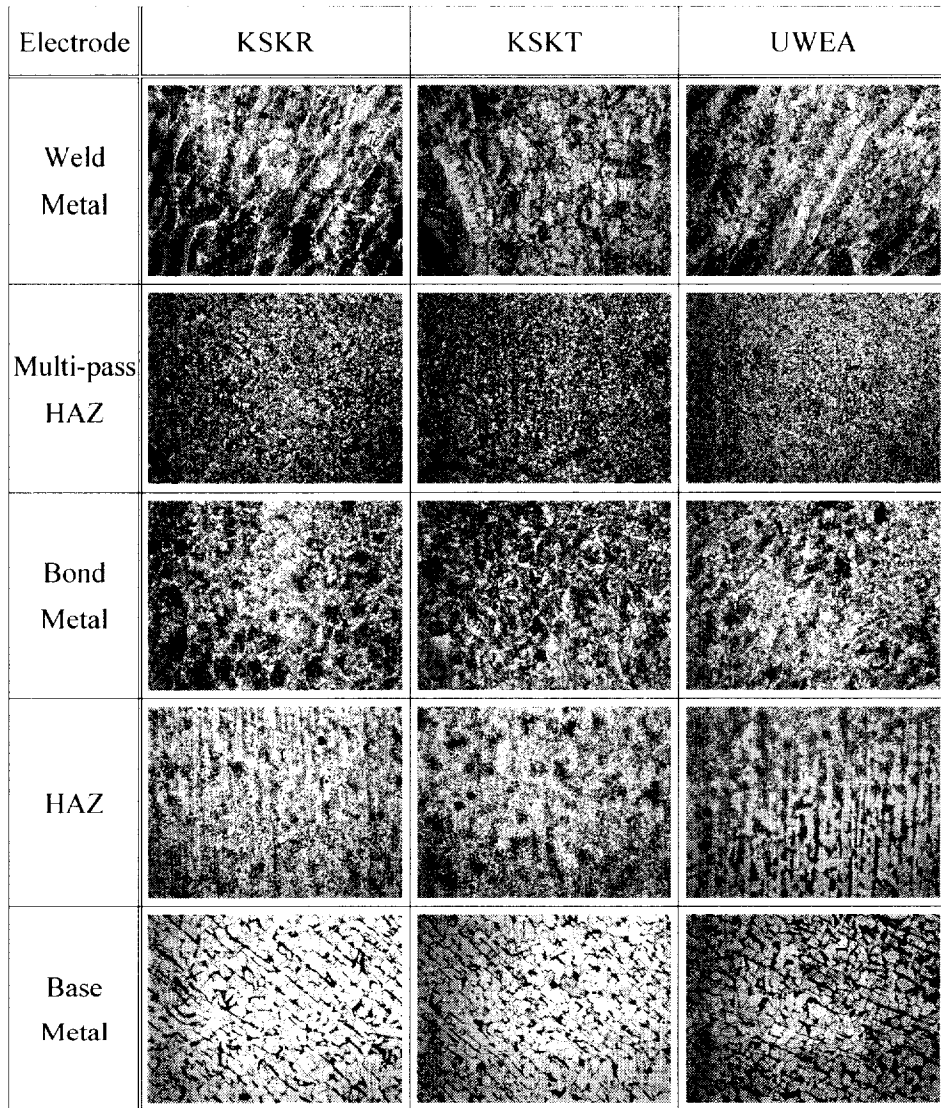


(e) USBL



(f) JPUW

Fig. 8 Macrostructures of underwater wet welds for comparison of different welding electrodes

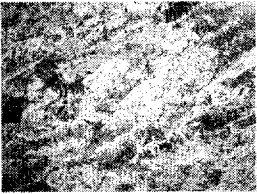
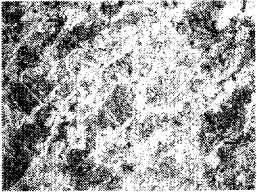
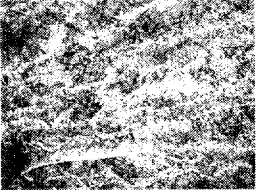
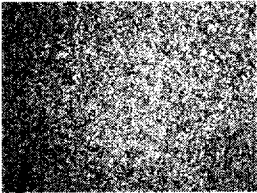
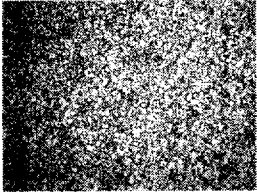
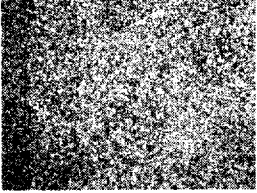
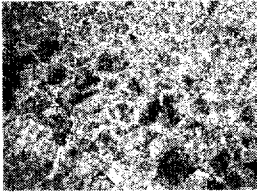
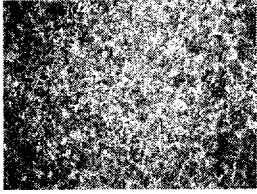
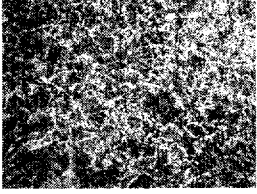
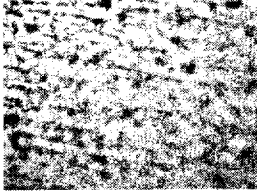
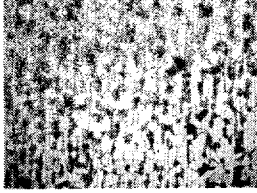
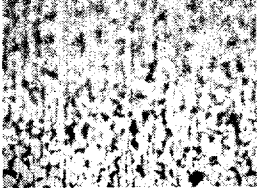
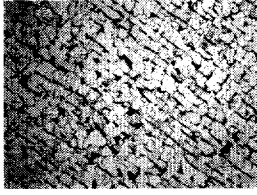
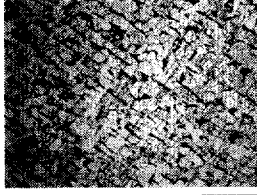
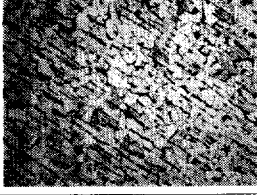


(a)

Fig. 9 Microstructures of underwater wet welds for comparison of different welding electrodes

(a) KSKR, KSKT and UWEA welding electrodes ($\times 200$)

(b) UWEB, USBL and JPUW welding electrodes ($\times 200$)

Electrode	KSKR	KSKT	UWEA
Weld Metal			
Multi-pass HAZ			
Bond Metal			
HAZ			
Base Metal			

(b)

Fig. 9 Continued

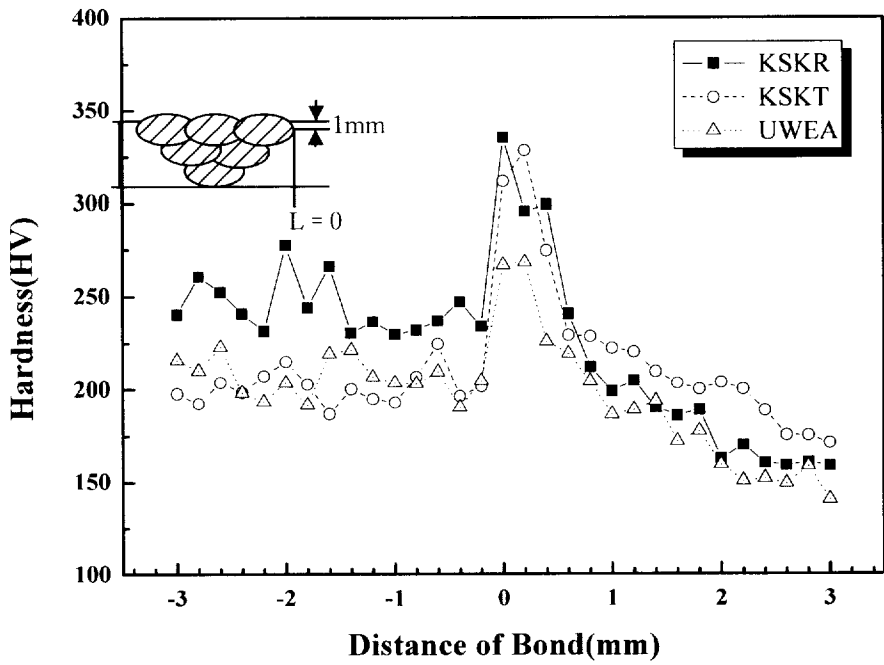
5.4 경도분포

습식 수중 아크 용접 실험을 한 후 습식 수중 아크 용접시의 열 영향부에 대한 경도 분포를 측정하기 위해 마이크로 비커스 경도기(micro-Vickers hardness tester)에 의해 경도 시험을 실시하였다. 각 시편의 경도 측정은 모재 표면에서 1mm 내부의 점을 측정 시작점으로 선정하여 각각 0.2mm 간격으로 측정하였다.

Fig. 10 (a), (b)는 Table 7과 같은 용접 조건으로 다층 맞대기 이음 용접한 시편이 열영향부에 대한 경도 분포를 나타낸 것으로 용접봉의 종류별로 나타내었다.

습식 수중 다층 용접 시 용접봉의 종류에 관계없이 전반적으로 본드부(bond)에서 급격히 경도 값이 상승되었고 용접금속, 본드 및 열영향부의 경도 값들은 용접봉 UWEA와 UWEB를 사용한 경우가 용접봉 KSKR과 KSKT를 사용한 경우에 비해 낮은 경도 값을 나타내어 수중에서의 급냉에 의한 경도 상승을 다소 낮추어 경화정도가 적어졌음을 알 수 있다. 그리고 용접봉 UWEB가 다른 용접봉에 비해 경도분포가 가장 양호함을 알 수 있다.

6 종류의 각각 다른 용접봉을 사용하여 시험한 결과 습식 수중 용접시의 열영향부에 대한 경도 값들은 용접봉의 종류에 관계없이 전반적으로 모재부에 비해 높게 나타나 특정한 효과는 나타나지 않았다.

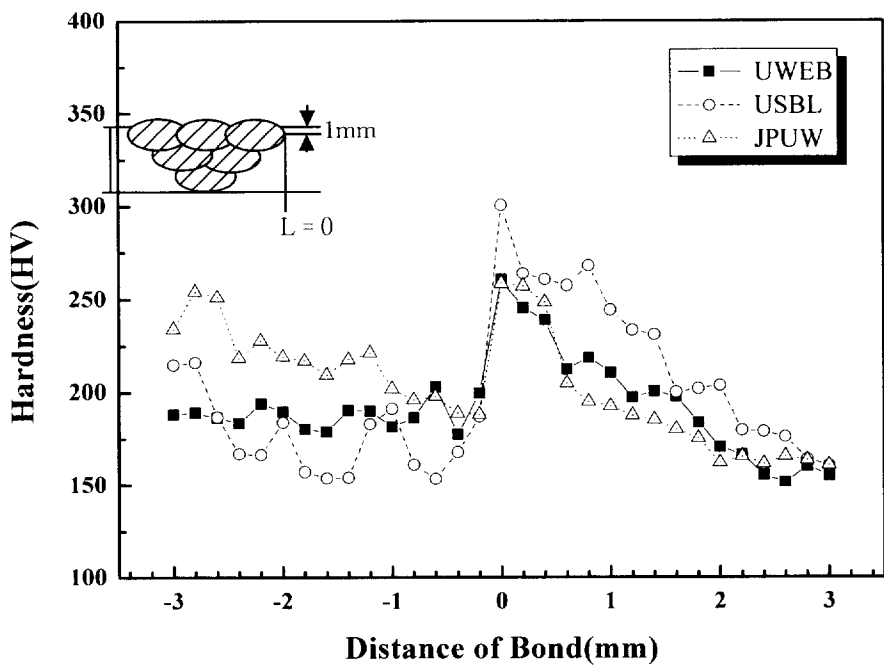


(a)

Fig. 10 Hardness distributions of Underwater wet welds for comparison of various welding electrodes

(a) KSKR, KSKT and UWEA welding electrodes

(b) UWEB, USBL and JPUW welding electrodes



(b)

Fig. 10 Continued

5.5 용접부의 부식 특성

각각의 용접봉 사용에 대한 용접부의 부위별 부식전위를 측정함으로써 환경조건에 따라 전위차에 의한 부식의 경향을 알아보았다. 전기화학적 부식에서 전위가 높은 부위가 음극으로 되고 전위가 낮은 부위가 양극으로 작용하여 환경조건에 따라 양극으로 작용한 부위가 부식에 민감하다고 일반적으로 알려져 있다[34]. 따라서 모재, 열영향부 및 용접금속에 대한 전기화학적 부식특성을 알아보기 위해 동전위 분극 시험의 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11 (a)는 모재, 열영향부 및 용접금속의 부식전위가 모두 비슷한 값을 나타내고, 모재와 용접금속의 전류밀도 역시 비슷한 값을 보였다. 그러나 양극분극 후 약 -350 mV/SCE의 전위에서 열영향부가 모재나 용접금속의 전류밀도보다 더 높게 나타났다.

Fig. 11 (b)는 용접금속의 부식전위가 모재의 부식전위보다 더 귀(貴, noble)한 전위가 나타나고 있고 부식전위 하에서 용접금속 및 열영향부는 모재의 전류밀도와 거의 비슷한 값을 보이고 있다. 그러나 전위가 상승됨에 따라 약 -300 mV에서부터 용접금속과 열영향부의 전류밀도는 모재의 전류밀도보다 더 높게 나타났다.

Fig. 11 (c)는 열영향부와 용접금속의 부식전위가 모재의 부식전위보다 귀전위화 되고 부식전위 하에서의 전류밀도는 모두 비슷하게 나타났다. 양극분극 후 약 -400 mV/SCE의 전위에서 용접금속과 열영향부의 전류밀도가 모재부의 전류밀도보다 더 높게 나타났다.

Fig. 11 (d)는 모재, 열영향부 및 용접금속의 부식전위가 모두 비슷한 값을 나타내고, 부식전위 하에서의 전류밀도 역시 거의 같게 나타났다. 그러나 양극분극 후 약 -350 mV/SCE의 전위에서 열영향부가 모재와 용접금속의 전류밀도보다 더 높게 나타났다.

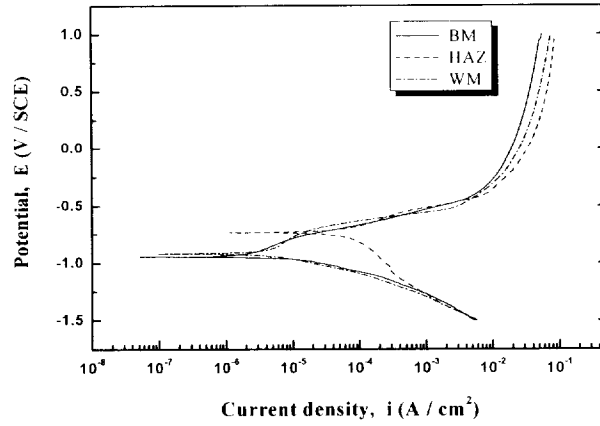
Fig. 11 (e)는 용접부의 부식전위는 모재의 부식전위와 거의 비슷하게 나타나지만 열영향부의 부식전위는 모재의 부식전위보다 더 귀한 전위가 나타나고 있다. 부식전위 하에서도 마찬가지로 용접금속의 전류밀도는 모재의 전류밀도와 거의 비슷하게 나타나지만 열영향부의 전류밀도는 모재의 전류밀도보다 더 많이 나타나고 있다. 양극분극 후 약 -400 mV/SCE 의 전위에서 용접금속과 열영향부의 전류밀도는 모재의 전류밀도보다 더 많이 나타났다.

Fig. 11 (f)는 모재, 열영향부 및 용접금속의 부식전위가 모두 비슷한 값을 나타내고, 부식전위 하에서의 전류밀도 역시 거의 같게 나타났다. 그러나 양극분극 후 약 -450 mV/SCE 의 전위에서 열영향부가 모재와 용접금속의 전류밀도보다 더 높게 나타났다.

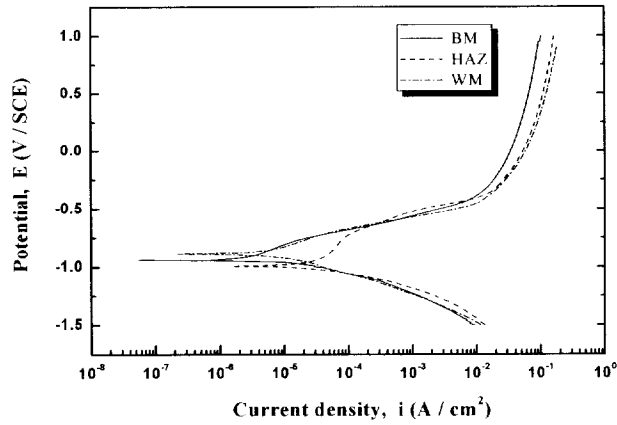
Fig. 12에 Fig. 11의 각 분극곡선에 대한 모재 및 용접부위의 부식전위를 정량적으로 나타내었다. 용접봉 KSKR 및 KSKT는 부식전위차가 많이 나지만 시험 개발된 수중 용접봉 UWEA 및 UWEB는 부식전위차가 작아 전지작용 부식에 대해 훨씬 덜 민감하다는 것을 알았다. 특히 용접봉 UWEB는 부식전위차가 가장 낮게 나타난 일본의 수중 용접봉 JPUW와 매우 유사한 부식전위차를 나타내었다.

Fig. 13에 Fig. 11의 각 분극곡선에 대한 용접부의 부식전류밀도를 비교하여 나타내었다. 부식전류밀도 역시 국내의 육상 용접봉에 비해 시험 개발된 용접봉 UWEB가 훨씬 낮아 개선되었음을 알 수 있었고 부식전류밀도가 가장 낮은 JPUW와 가장 유사함을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 용접봉 UWEB를 사용한 경우 모재와 비교하여 용접부의 부식전위차 및 부식전류밀도가 가장 적어 부식에 대한 민감도가 가장 적다는 것을 알 수 있었다.



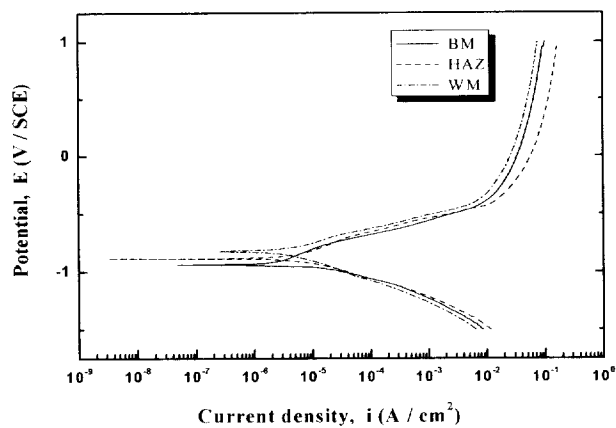
(a)



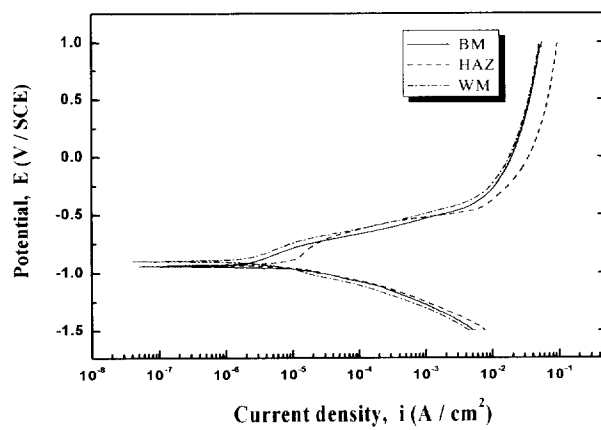
(b)

Fig. 11 Polarization curves of BM, HAZ and WM in underwater wet welds using various welding electrodes

- | | |
|--------------------|--------------------|
| (a) KSKR electrode | (b) KSKT electrode |
| (c) UWEA electrode | (d) UWEB electrode |
| (e) USBL electrode | (f) JPUW electrode |

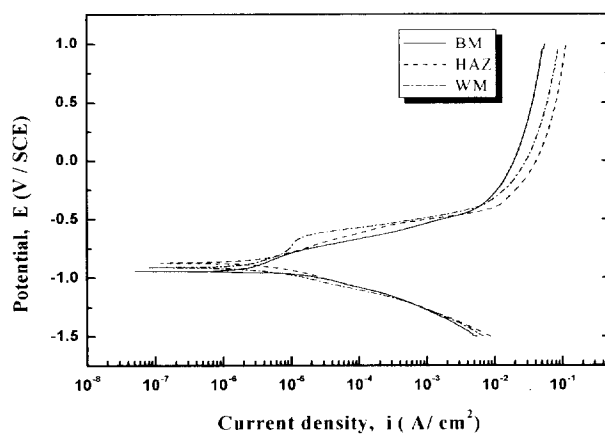


(c)

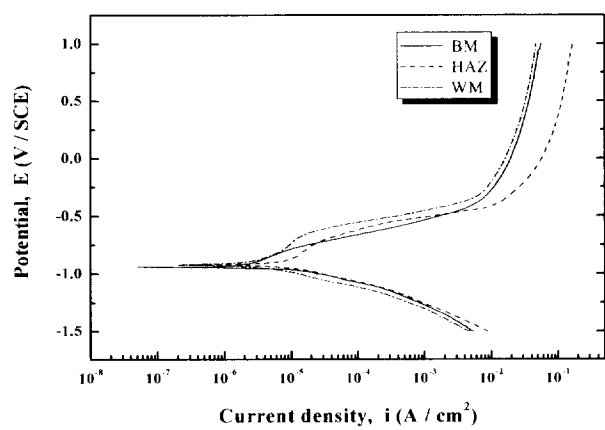


(d)

Fig. 11 Continued



(e)



(f)

Fig. 11 Continued

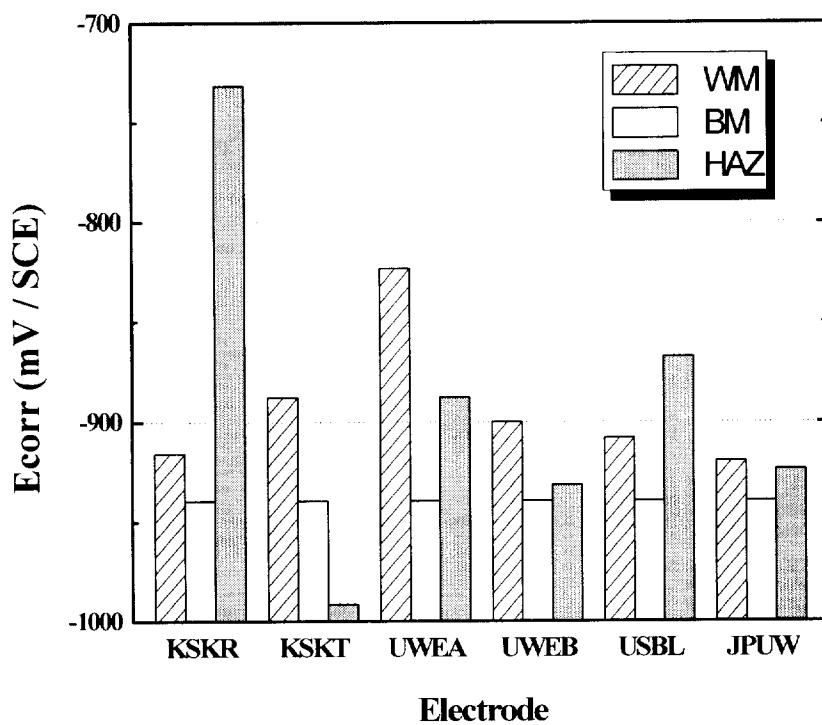


Fig. 12 Corrosion potential of underwater wet welds for comparison of different welding electrodes

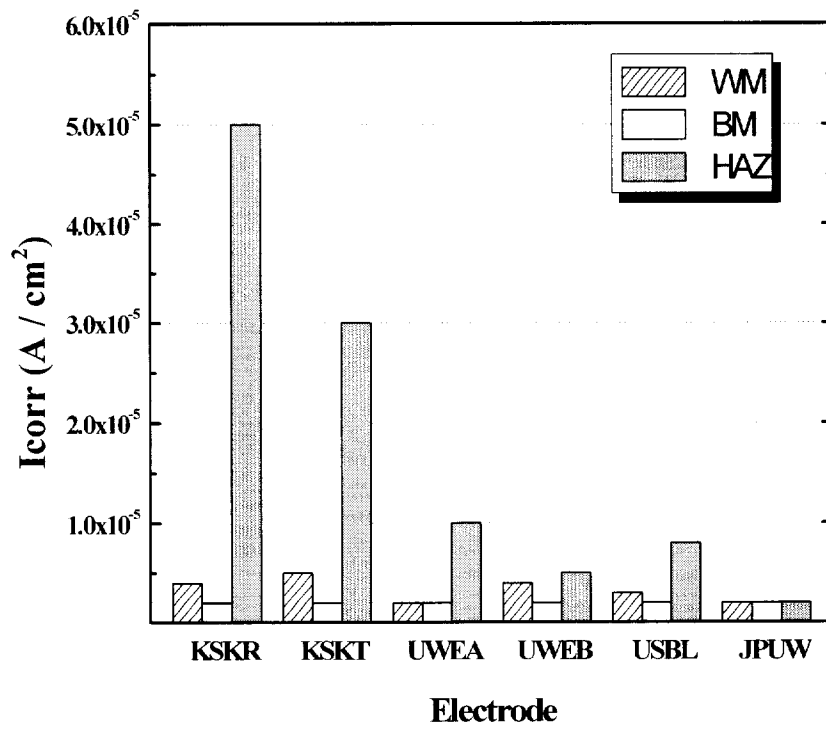


Fig. 13 Corrosion current of underwater wet welds for comparison of different welding electrodes

6. 결 론

대기 중에서 사용되고 있는 일반 용접봉(KSKR, KSKT)과 수중 용접봉(UWEA, UWEB) 및 국외에서 수입한 용접봉(USBL, JPUW) 등을 이용하여 선체용 압연 강판(KR-RA)에 대한 습식 수중 아크 용접 특성을 비교 실험하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 아크 안정성, 슬래그 박리성, 스파터 발생 및 비드형상 등의 측면에서 UWEB 용접봉을 사용한 경우가 그 외의 다른 용접봉에 비해 용접 작업성이 더 우수하였다.
- 2) 각 용접봉 사용에 대한 용접부의 단면조직은 대부분 별 차이를 보이지 않았지만, UWEB 용접봉의 경우 용접부에 대한 기계적 특성에 가장 큰 영향을 미치는 본드 구역이 다른 용접봉에 비해 더 좁게 나타났다.
- 3) 습식 수중 다층 맞대기 용접에 의한 경도 값은 대부분의 용접봉에서 본드부가 가장 높게 나타났고, 또 용접봉 UWEB를 사용한 용접부에서 가장 양호하고 안정적인 경도 분포를 나타내었다.
- 4) 열영향부와 용접금속의 부식전위(E_{corr}) 및 부식전류밀도(I_{corr})는 용접봉 UWEB, JPUW를 사용하여 수중 용접한 경우에 모재의 부식전위 및 부식전류밀도와 거의 유사하게 나타났다. 따라서 본 연구에서 개발된 용접봉 UWEB의 내식성 향상이 확인되었다.

참 고 문 헌

- [1] Koichi Masubuchi, "Some idea about the future developments of underwater welding technologies", Int' workshop on quality in underwater welding, MIT, Nov. (1985)13~14.
- [2] R. J. Dexter, E. B. Norris, W. R. Schick and P. D. Watson, "Performance of underwater weldments", Ship structure committee SSC-335, (1990)1~241.
- [3] S. Liu, S. Ibara, and D. L. Olson, "Electrode formulation for underwater welding", International Conference in Underwater Welding, AWS, (1992)98~119.
- [4] D. E. Applegate and S. I. Rokhlin, "Automated underwater welding with on-line ultrasonic inspection and control", International Conference in Underwater Welding, AWS, (1992)70~85.
- [5] 仲威雄, 増淵與一, "熔接さわる板の温度分布に 關する 研究(第1報)", 日本熔接學會誌, 16(7), (1947)281~290.
- [6] 佐藤邦彦, "移動熱源に なる 熱傳導の 特性に 關する 覺元書", 日本熔接學會誌, 36(2), (1967)64~69.
- [7] D. J. Lythall, D. E. Gibson and H. J. R. Beveridge, "Dry hyperbaric semi-automatic underwater welding", Published in underwater welding for offshore installations, The welding Institute, Abington Hall, Abington, Cambridge, (1977)33~48.
- [8] M. N. Kim, B. I. Kim, and K. H. Jung, "An experimental study on the weldability of underwater welds", Proc. of the 8th Conf. on Science and Technology, Material Technology, (2002)183~188.
- [9] Norman Baily, "Weldability of ferritic steels", Published by Abington Publishing, Abington Hall, Cambridge, CBI 6AH, England, (1994).
- [10] J. P. Vida, "Hardness testing in the heat affected zone of steel welds", IIW. DOC, IX-130 (1984)9~84.
- [11] C. E. Grubbs and O. W. Seth, "Underwater wet welding with manual arc electrodes", Published in underwater welding for offshore installations, The welding Institute, Abington Hall, Abington, Cambridge, (1977)17~33.
- [12] C. L. Tsai, "Underwater welding & applications", 1st underwater welding training course held in Hanbat Univ. Daejeon, Korea, Nov. (2001).
- [13] C. E. Grubbs, Thomas J. Reynolds, "wet welding critical to structural maintenance", Journal of Offshore, (1998)110~149.
- [14] A. E. Asnis and I. M. Savich, "The new method of mechanized underwater welding", Proc. of Int. Conf. IIW, (1983)311~317.

- [15] H. C. Cotton, " Welding underwater and in the splash zone a review", Proc. of Int. Conf. IIW, (1983)4~48.
- [16] A. Hasui, Y. Suga and M. Teranishi, "On underwater Submerged arc welding (The Ind report)", Trans. JWS, 11-1, (1980)9~15.
- [17] K. Masubuchi, A. V. Gaudiano and T. J. Reynolds, "Technologies and practices of underwater welding", Proc. of Int. Conf. IIW, (1983)49~70.
- [18] Oh. D. W. and Olson. D. L. "The Influence of Boron and Titanium on Low-Carbon Steel Weld metal", Welding Journal, 69(4), (1990)151s~158s.
- [19] D. G. Howden, "Behavior of hydrogen in arc welded pools", Welding Research Supplement, 61(4), (1984)103s~108s.
- [20] D. Ogden, "School brings wet welder training on-site", Welding journal, (1993)54~56.
- [21] 오세균, 김민남, "TMCP강의 습식수중 아크 용접성에 관한 고찰", 대한용접학회지, 제5권, 4호, (1987)28~35.
- [22] 김민남, 김복인, 한정동, "습식 수중 용접봉의 기계적 성질에 관한 연구", 한국 해양공학회지, 14(4), (2000)56~61.
- [23] 김복인, 노창석, 정교현, 김민남, "피복성분에 의한 수중용접봉의 아크 안정성 개선에 관한 실험연구", 한국 해양공학회지, 15(4), (2001)73~79.
- [24] 김민남, 김복인, "습식 수중 아크용접봉의 국산화개발에 관한 기초연구", 한국 박용기관학회지, 25(5), (2001)178~185.
- [25] AWS, "Welding Handbook", 7th Edition, Vol. 1, Fundamentals of Welding, (1976)59~70.
- [26] 蓮井淳, 菅泰雄, 關水信之, "水中におけるキブマーミアーク熔接(第 1報)", 日本熔接學會誌, 48(9), (1972)689~695.
- [27] 松田一夫 外 2名, "水中溶接による軟鋼溶接継手の割れ感受性に關する研究(第 2報)", 日本溶接學會誌, 50(9), (1981)881~887.
- [28] 屋良秀夫, 眞喜志康二, 菊田米男, 松田福久 "濕式水中アーク溶接に關する研究(第 3報)", 日本溶接學會誌, 2(2), (1985)392~397.
- [29] 김복인, "습식 수중 용접봉 개발에 관한 연구", 박사학위논문, (2003)14~15.
- [30] ASW, "Metal Handbook", 8th Edition, Vol. 6, Welding and Brazing, (1971)3~23
- [31] D. Ogden and T. Joos, "Specification stir underwater electrode development", welding journal, practical welder, Aug, (1990)
- [32] Richard N. Fultion, "Progress in underwater welding", J of Ocean industry, (1986)40~44.
- [33] 김부길, "中, 高炭素低合金鋼의 플라즈마窒化 特性에 관한 研究", 工學博士學位論文, (1999)162~168.
- [34] 임우조, 양학회, 인현만, 이진열, "부식과 방식", 원창출판사, (1996)91~94.

감사의 글

지금까지 여러모로 부족한 저에게 도움을 주신 분들이 너무나 많았습니다. 특히, 어려울 때마다 용기와 지혜를 주시고, 사랑으로 인도하여 주신 고마움은 저의 마음속 깊이 간직될 것입니다.

본 논문이 완성되기까지 무한한 힘을 주시고 오랜 실험실 생활 동안 항상 사랑을 베풀며 학문을 지도해 주신 김창규 교수님과 김민남 교수님께 형언할 수 없는 감사의 말씀을 드립니다.

더불어 대학원 과정에서 더욱 많은 가르침과 조언을 아끼지 않으시고, 심사를 맡아주신 정병호 교수님과 이종문 교수님 그리고 항상 따뜻하게 격려해 주신 오이식 교수님, 김한균 교수님, 김무길 교수님, 강창룡 교수님, 김현주 교수님께 감사드립니다.

그리고 본 연구가 완성될 수 있도록 실험과정에서 함께 밤을 지새우면서 굶은 일 마다 앓고 헌신적으로 도와준 조직제어실험실 내의 임원평, 장병준, 문영만, 김동현, 최선아에게 깊은 고마움도 결코 잊을 수 없을 것입니다.

오늘의 제가 있기까지 어렵고 힘든 생활 속에서도 항상 정성으로 기원해 주신 아버지께 감사드립니다. 그리고 항상 자신의 일에 최선을 다하는 동생 성준이에게도 고마움을 전합니다.

끝으로 이 조그만 논문이 결실을 맺을 때까지 옆에서 힘이 되어준 사랑하는 혜진이와도 함께 기쁨을 나누고 싶습니다.

2005년 1월

황성훈 드림