

습식 수중 용접봉의 피복제 개발에 관한 기초연구

김민남* · 강정근**
(99년 3월 11일 접수)

The Experimental Study of Flux Improvement of Wet Underwater Arc Welding Electrode

Min-Nam Kim* · Jung-Gun Kang**

Key Words : Wet Underwater Arc Welding(습식 수중 아크 용접), Welding Electrode(용접봉), Welding Condition(용접 조건), Arc Stability(아크 안정성), Slag(슬래), Bead Appearance(비드 외관), Heat Affect Zone(열영향부), Flux(플럭스)

Abstract

Wet underwater arc welding process is investigated by using experimentally developed flux coated underwater arc welding electrode and SS400 steel plate of 12mm thickness as base metal. Three kinds of different flux covered wet arc welding electrode of 4mm diameter (BK-01, BK-02, BK-03) are individually developed, and one of the improved underwater welding electrode (BK-03) may be put to practical use for underwater wet arc welding process. The results obtained from this experimental study are as follows :

1. Arc stability of developed underwater wet welding electrode is better than that of the domestic covered arc welding electrode.
2. Workability of welding electrode, remove ability of slag and bead appearances using improved underwater wet welding electrode are remarkably better than that of others.
3. Heat affected zone of test specimen welded in the underwater gets to become a lot smaller than that of test specimen welded in the air, and the maximum hardness of heat affect zone of developed underwater wet welding electrode is lower to that of domestic arc welding electrode.

1. 서 론

오늘날 우주 개발과 더불어 해양 자원과 해저

공간의 이용률을 높이기 위해 해양 개발에 대한 관심이 깊어지고 있으며, 장기적 안목으로 세계는 각종 해양 구조물이나 해양 설비의 대형화를 접진

* 중신회원, 부경대학교 공대 기계자동차공학부

** 부경대학교 대학원 기계설계학과

적으로 추진하고 있다.

미래에는 육상 자원의 고갈에 따른 새로운 에너지의 개발 및 공해 등에 의한 생활 환경의 파괴 등 여러 가지 문제점들의 해결 방법으로 각종 생산 설비나 생활공간마저도 해양으로 진출하지 않을 수 없다고 본다.¹⁾ 해양 개발에 있어 해저의 강 구조물은 반드시 수중 공작 기술에 의해 작업이 될 것이며 그에 따라 수중 용접 기술이 중요한 위치를 차지하게 될 것이다. 특히 삼면이 바다이고 최근 유조선 및 각종 선박의 해난 사고가 잇따르고 있는 현실에서 보면 수중 용접에 대한 연구와 수중 용접법의 실용화를 위한 기초 자료가 절실히 필요한 실정이다.

담수 또는 해수에서 행하는 수중 아크 용접은 대기 중에서의 용접과는 달리 잠수 기술과 우수한 용접 기술을 함께 갖춘 용접공을 필요로 하고, 복잡한 설비를 갖추어야 하며, 안전 사고의 대비 등 작업에 어려움이 따르고, 용접 이음부는 급랭되어 경도와 취성이 증가하는 등 해결하지 못한 많은 연구 과제를 안고 있다.²⁾ 1802년 미국의 Humply Davy가 처음으로 수중에서 아크를 일으키기 시작한 이후 최근 각종 해양 구조물의 가공과 보수 수단으로서의 수중 용접 기술의 개발 및 연구가 확대되기 시작했으며³⁾ 이미, 플라즈마 아크 용접, 탄산가스 아크 용접 및 피복 아크 용접 등 각종 용접법이 수중 용접에 적용되어 비교적 양호한 결과를 얻었다는 것이 보고되고 있으나,^{4~9)} 국내에서는 수중 아크 용접에 대한 연구 실적은 다소 있지만^{10~11)} 이 용접법에서 습식 수중 피복 아크 용접봉 개발에 관한 체계적인 연구는 다소 미흡한 실정이다.

현재까지 개발된 수중 아크 용접 기술은 고체 용기로 주위를 둘러싸고 물을 배제한 공간에서 아크를 발생시켜 용접하는 건식 수중 용접법(dry chamber welding method)과, 물에 접한 그대로의 상태에서 아크를 발생시켜 용접하는 습식 수중 용접법(underwater wet welding method)으로 크게 대별되는데,¹²⁾ 건식 수중 아크 용접은 이음의 성능이라는 관점에서 보면 습식 수중 아크 용접보다는 양호하지만 기체 공간의 크기가 한정되어 있으므로 다량의 매연이 발생하는 문제와 피용접물의 크

기에 대한 제약 등 그 설치에 많은 경비와 인력이 요구된다.¹³⁾ 습식 수중 아크 용접은 용접에 필요한 국부적인 기체 공동의 형성과 용접 작업을 동시에 해야 하며 또한 수증기와 용융 금속의 반응, 용접부의 냉각 속도 증대 등에 의해 균열이나 기공 등 용접 결함이 발생하기 쉽다. 그러나 고체 용기를 사용하지 않으므로 용접 치수에 제약이 없고 설비비도 싸므로 피복 아크 용접봉을 사용하는 수중 피복 아크 용접은 수중에서는 가장 간편하고 직접적인 용접법으로 적합하다는 연구결과도 다수 있다.^{14~16)}

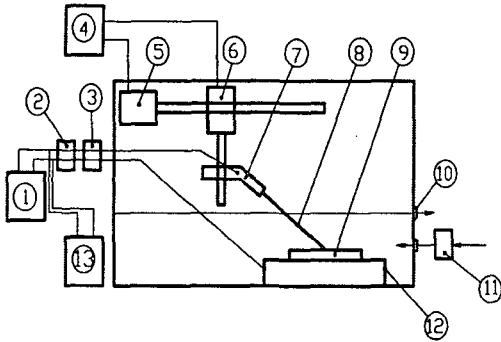
이러한 습식 수중 용접법에서 용접 금속의 기계적 성질 및 용접봉의 작업성(workability)을 좌우하는 피복 아크 용접봉의 피복제의 역할은 대단히 중요한 것이라 생각된다. 용접봉의 작업성이란 목적하는 용접이 되는 정도를 말하는 것으로 그 양부는 용접 작업의 능률 향상에 크게 영향을 미치는 것으로 작업성이 나쁘면 언더컷, 슬래그 혼입, 비드 외관의 불량 등 용접 결함을 발생하기 쉽다. 작업성을 판정하는 인자로는 아크 안정도, 편심도, 언더컷, 오브랩, 슬래그의 유동성, 슬래그 제거의 난이, 비드 외관, 스패터링 등이 있으며 이러한 각 인자들을 종합하여 용접봉의 작업성이 결정된다.

습식 수중 아크 용접의 장점을 잘 활용하려면 이 방식에 대두된 문제점을 분석하고 하나씩 해결함으로써 습식 수중 아크 용접의 실용화를 도모할 수 있다고 생각된다. 그러므로 특수한 수중용 피복 아크 용접봉을 시험 제작하여 수중 용접 실험을 통해 용접봉에 대한 작업성 평가를 하여 습식 수중 아크 용접성을 연구, 검토할 필요성은 크다.

본 연구는 수중에서 2차원 속도 제어가 가능하도록 자체적으로 설계, 제작한 수중 용접 장치에서 시험 모재에 적합하도록 직접 피복제 시료를 적정한 비율로 혼합하여 시험 개발한 수중용 피복 아크 용접봉과 일반적으로 육상에서 사용되는 국산 피복 아크 용접봉과의 비교 실험을 통하여 피복제 종류에 따른 용접봉의 작업성을 개선해 나가 습식 수중용 피복 아크 용접봉의 국산화와 실용화를 위한 기초 자료를 얻는데 목적을 두었다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치



- ① DC Arc Welding machine ② Ampere meter ③ Voltmeter ④ Control plate ⑤ Horizontal moving device ⑥ Vertical moving device ⑦ Electrode holder ⑧ Electrode ⑨ Welding specimen ⑩ Over flow pipe ⑪ Cooling water ⑫ Work bench ⑬ Magnetic oscillograph

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipments

실험에 사용된 수중 용접 장치는 Fig. 1에 보는 바와 같이 용접봉의 각도, 용접방향 및 속도 등을 임의로 변경할 수 있도록 자체 설계, 제작한 수중 용접 실험 장치로써 1200×850×800mm 수조 내부에 수돗물을 넣고 용접봉의 가이드 장치를 부착한 모재 고정용 작업대를 설치하였고, 용접 장치에 대한 전기적인 안정을 위하여 DC ±24V 이내의 범위에서 전압의 미소 조정으로 속도 조절이 될 수 있도록 감속 모터를 장치에 부착하여 수중 용접 실험에 알맞게 2차원 속도 제어가 가능하도록 하였다.

2.2 실험재료

실험에 사용된 시험편은 시중에서 흔히 사용되고 있는 일반 구조용 연강판(KS D 3503 SS400)으로 화학 조성과 기계적 성질은 Table 1 및 Table 2와 같고, 시험편을 250×125×12의 규격으로 유압 전단기로 절단하여 비드 용접 시험편으로 사용하였다.

Table 1 Chemical composition of base metal

Chemical composition (Wt, %)								
C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Mo	Ceq
0.3	0.42	1.64	0.030	0.021	-	-	-	0.56

용접봉은 일반 시중에서 구입할 수 있는 피복 아크 용접봉인 일미나이트계(KS E4301), 고산화탄계(KS E4313), 저수소계(KS E4316) 용접봉과, 습식 수중 아크 용접용으로 직접 피복제 시료 12종을 적정한 비율로 혼합시켜 봉경 4mm, 피복두께 1.2mm로 시험 개발한 BK-01, BK-02, BK-03 용접봉을 사용하였다.

Table 2 Mechanical properties of base metal

Mechanical properties			Bend test
Yield strength Yp(MPa)	Tensile strength Ts(MPa)	Elongation El (%)	
320	465	28	Good

또한 용접봉의 개발에 사용된 심선은 용접봉 제작 회사에서 용접봉 제작에 일반적으로 사용되고 있는 연강용 피복 아크 용접봉의 심선 재료와 동일한 SWRY-11을 사용하였고 그 화학조성은 Table 3에 나타내었다.

실험에 사용된 모든 용접봉은 사용 전에 예열 처리를 하지 않고 대기 중에 방치하여 두었다가 자연 그대로 사용하였으며, 비닐 코팅 등 특별한 방수처리 없이 사용하였다.

Table 3 Chemical composition of core wires for covered electrode (KS D 3508)

Size	Mark	Chemical composition(Wt, %)					
		C	Si	Mn	P	S	Cu
φ4×400	SWRY-11	0.05	0.018	0.54	0.01	0.008	0.10

2.3 실험조건 및 방법

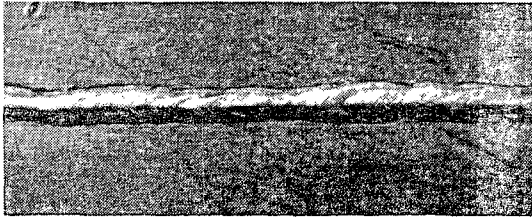
2.3.1 용접 조건의 선정

Photo. 1은 수중에서 고산화탄계 용접봉을 두께 12mm 인 모재에 용접봉각도를 75°, 용접속도

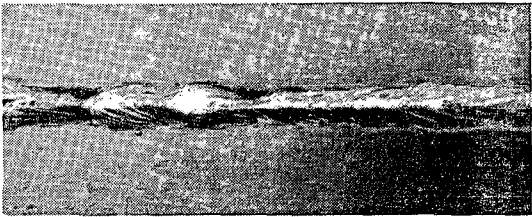
를 30 cm/min 로 일정하게 유지한 상태에서 용접 전류 150A, 180A, 210A로 조건을 변화시켜 가며, 시험 용접한 시편의 비드 외관을 나타낸 것이다



(a) Welding current : 150 Amp



(b) Welding current : 180 Amp



(c) Welding current : 210 Amp

Photo. 1 Effect of welding current on bead appearance when high titanium oxide type electrode is used

150A의 경우 전류가 낮아서 비드 폭이 좁고 용입이 부족한 형태이고, 210A의 경우는 전류가 비교적 높아서 비드가 일정하지 못하며 외관상 언더컷이 다소 발생됨을 관찰할 수 있다. 그렇지만 180A의 경우는 외관상 비드가 깨끗하고 양호한 용접이 되어 이 모재에 대한 적정 전류로 적합하다고 판단되었다.

이상과 같은 실험을 시판되는 일미나이트계, 저수소계 용접봉과 시험 개발한 습식 수중 용접봉들에 대해서도 반복한 결과, 실험에 사용된 모재에서는 용접 전류 180A 부근에서 비교적 양호한 비드

용접을 할 수 있어서, Table 4와 같은 용접 조건으로 수심 200mm 에서 아래보기 자세의 수중 용접과 기계적인 자동 용접의 형태를 택하였다.

또한 수중용접 실험 중에 수조내의 수온을 일정하게 유지시키기 위해 상수도수를 계속하여 순환될 수 있도록 배관 시설을 하였으며, 실험에 사용된 용접기는 용량 600 Amp의 직류 용접기로 용접 실험은 직류 역극성으로 용접하였다.

Table 4 Typical welding conditions

Welding environment	In-air welding	Underwater wet welding
Current(A)	150	180
Voltage(V)	30	35
Welding speed(cm/min)	30	30
Bead length/ Electrode length used	0.9	0.9
Welding angle(°)	75	75
Electrode source	DCRP	DCRP
Welding position	Flat	Flat

2.3.2 실험방법

수중 용접봉에 피복되는 피복제 성분들의 적합한 배합 비율 모델은 Table 5와 같이 피복제와 관련된 각종 자료를 연구 분석하여 실험적으로 시도한 이론적 피복제 조성을 이용하여 수중용 아크 용접봉 BK-01을 시험적으로 개발, 시판되는 용접봉 규격(용접봉 심선 $\phi 4$, 피복두께 1.2mm)과 동일하게 제작한 후 수중 용접 실험과 작업성 조사를 병행하였다. 피복제 시료의 배합 비율에 따라 제작된 용접봉의 용접 작업성을 관찰하기 위해 대기중과 수중으로 분류한 후 제작된 용접 장치에서 용접을 실시한 후 각 용접봉에 대한 작업성을 조사하여 그 장단점을 분석하였다.

1차 실험 결과에 대한 단점의 보완 및 용접 작업성 향상을 목적으로, 시료의 배합 조성을 새롭게 변화시켜 가며 피복제 시료를 재 혼합 한 후 또 다른 시험용접봉 BK-02, BK-03을 반복 제작하여 실험에 이용하였다. 용접시 아크 안정성에 대한 전류 및 전압의 파형을 조사하기 위해 검류계

(galvanometer)를 이용한 마그네틱 오실로그래프(magnetic oscillograph)를 사용하였으며, 관찰용 장비를 사용하여 아크 관찰을 시도해 보았다. 또한 용접부의 기계적 성질을 조사하기 위해 비커스 경도기를 이용한 경도 시험을 실시하였다.

Table 5 Mixing ratio of flux materials

Raw materials \ Mark	BK-01	BK-02	BK-03
CAC	21	25	21
FMM	9	9	9
FLP	15	15	15
MIC	2	2	2
STH	6	6	6
RTS	15	33	35
IRP	5	7	7
SIC	5	5	5
TAL	1	1	1
DXT	1	1	1
ILT	23	1	1
Total	103	105	103

3. 결과 및 고찰

3.1 아크 안정성의 비교

수중에서의 습식 피복 아크 용접은 주위의 물에 의해 아크 길이가 조금만 길어도 아크가 단절되고 비드는 불안정하게 되는 경향이 심하게 나타나며, 아크 집중성과 모재에 대한 용융성 및 용착성은 본 실험 장비로는 관찰이 대단히 까다로웠다.

Fig. 2와 Fig. 3은 대기중과 수중에서 용접 실험 중의 오실로그래프에 나타난 전압, 전류 파형으로 시판되고 있는 일미나이트계(KS E4301), 고산화티탄계(KS E4313), 저수소계(KS E4316) 용접봉과 시험적으로 자체 개발한 수중용 피복 아크 용접봉 BK-01, BK-02, BK-03을 비교한 것이다.

시판되는 용접봉 중에서 저수소계 용접봉(KS E4316)은 대기중이나, 수중 용접 실험에서나 전압과 전류의 파형이 불안정하여 아크 안정성 면에서는 좋지 못하다는 것을 알 수 있으며, 고산화티탄계(KS E4313)는 저수소계 용접봉보다는 전류 파형이 비교적 안정되어 있고, 일미나이트계(KS E4301)

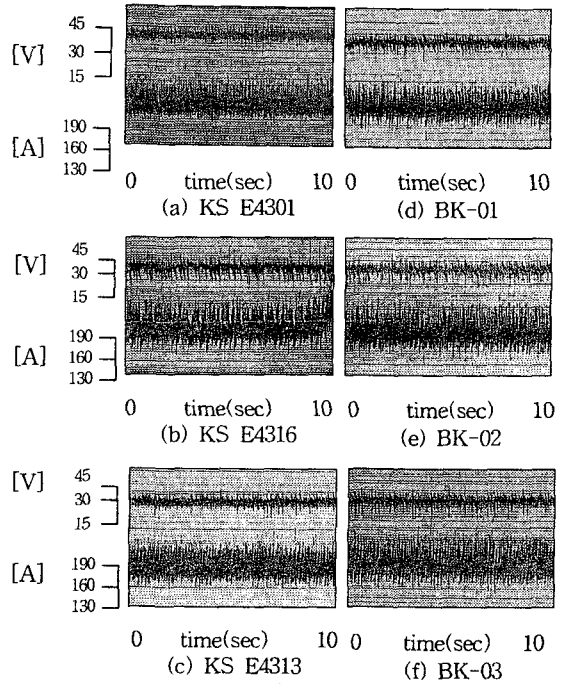


Fig. 2 Oscillograms by in-air welding when using various type welding electrode. (Welding conditions : as in Table4)

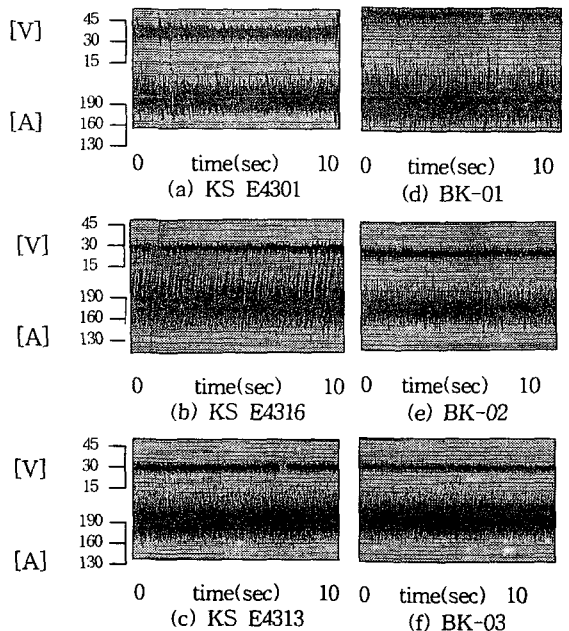


Fig. 3 Oscillograms by underwater welding when using various type welding electrode. (Welding conditions : as in Table4)

에서는 전압과 전류의 파형이 더욱 안정되어 있다는 것을 관찰할 수 있다.

자체 개발한 용접봉 중에서는 BK-01(ILT 계통을 20%이상 첨가)과 BK-02(CAC 계통 25% 첨가) 용접봉은 대기중이나 수중에서 비교적 안정되어 있으나 BK-03(RTS 계통 30% 이상 첨가) 용접봉에서는 조금 불안함을 나타내고 있다. 전체적으로 수중에서의 전압과 전류 파형은 시판되는 용접봉 중 일미나이트계(KS E4301)와 개발한 용접봉 BK-01과 BK-02가 가장 안정되어 있으며 또 고산화티탄계(KS E4313) 용접봉과 개발한 용접봉 BK-03이 비교적 안정되어 있고 서로 유사함을 나타내고 있다. 이렇게 볼 때 자체적으로 개발한 용접봉들이 아크 안정성 면에서 양호하게 개선되어 있음을 관찰할 수 있다.

3.2 슬래그 박리성과 스파터 발생

슬래그 제거는 수중에서 용접 실험을 하였지만 대기 중으로 꺼내어 제거하였다. 대기중 용접 실험에서는 어느 용접봉의 경우에도 슬래그가 잘 떨어져 실험에 어려움이 없었으나 스파터가 많이 발생된 것을 볼 수 있었고, 수중 용접 실험에서는 용접시 물의 비등 현상과 수온에 의한 급속 냉각에 의해 슬래그가 용착 금속 표면에 부착되는 경향과 그 모양이 허물어지는 현상이 나타났으며, 용접부 주변의 스파터는 대기 중에서의 용접 실험보다는 수중의 급속 냉각에 의해 다소 적게 나타나는 것을 관찰할 수 있었다.

대기 중에서의 실험에서 스파터가 표면에 부착되는 경향은 시판되는 용접봉 중에서 저수소계(KS E4316) 용접봉에서 가장 많이 나타났고 일미나이트계(KS E4301), 고산화티탄계(KS E4313) 용접봉에서는 비교적 적은 편이었으며, 시험 개발한 용접봉들은 티탄계 용접봉과 유사하나 스파터의 크기가 미세하게 나타났다.

수중 실험에서의 스파터는 저수소계 용접봉과 일미나이트계 용접봉에서 조금 관찰할 수 있었으며 고산화티탄계 용접봉과 시험 개발한 용접봉들은 전반적으로 슬래그 제거도 쉬웠고 슬래그 혼입이나 스파터 발생을 거의 볼 수 없었다.

3.3 비드의 퍼짐성과 외관의 비교

Photo. 2는 국내에서 시판되고 있는 저수소계(KS E4316), 일미나이트계(KS E4301), 고산화티탄계(KS E4313) 용접봉과 시험 개발한 수중용 피복아크 용접봉 BK-01, BK-02, BK-03을 사용하여 수중 용접 실험에 의한 용접 비드의 외관을 나타낸 것이다.

대기 중에서 용접 실험을 하였을 때는 시판되는 용접봉들 보다 시험 개발된 용접봉에서 비드 외관과 비드의 퍼짐성에서 양호하게 나타났으나 용접이음에 대한 용접부의 기계적 성질에 대해서는 앞으로 연구 과제가 되겠다.

수중에서 용접한 경우에는 시판되는 용접봉 중에서 저수소계(KS E4316) 용접봉이 비드의 거칠기 면에서 매우 불량하고, 언더컷이 많이 발생되었으며 비드 퍼짐성에서도 좋지 못함을 관찰할 수 있었다. 그러나 시험 개발한 용접봉에서는 비드 퍼짐성과 비드 거칠기 면에서 전반적으로 양호하게 나타났으며, 특히 피복제 성분에서 RTS 계통을 30% 이상 첨가한 BK-03 용접봉이 가장 우수하게 나타났다.

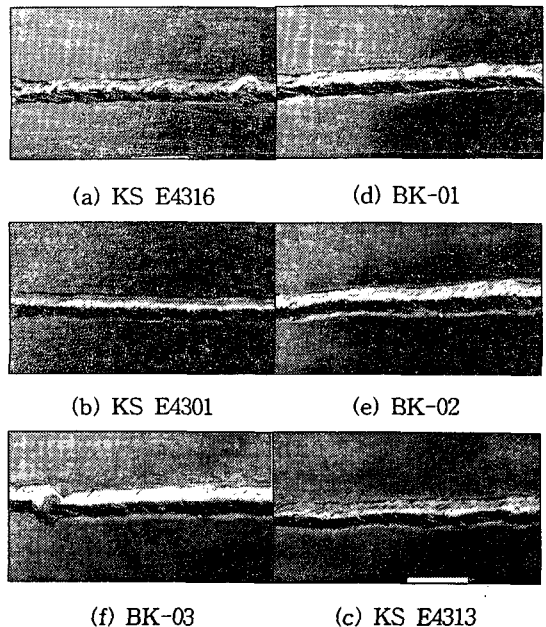


Photo. 2 Appearance of bead in various welding electrodes when underwater wet welding.
Welding conding : as in Table 4

이렇게 볼 때 시판되는 용접봉보다 수중용으로 개발한 용접봉이 비드 외관과 비드 거칠기에서 현저히 나아지는 것을 알 수 있으며, 이것은 동일한 용접 조건에서 동일 규격의 용접봉 심선을 사용한다고 할 때 피복재 성분의 배합비 변화에 의해 충분히 개선할 수 있음을 나타낸다.

3.4 경도의 개선

Fig. 4와 Fig. 5는 Table 4와 같은 조건으로 비드 용접한 시편의 표면에서 1mm 지점에 대한 미소 경도(micro-vickers hardness, load 1kg) 분포 상태를 대기중과 수중으로 구분하여 측정된 것으로, 각각의 용접봉 종류에 따라 그 평균값을 나타내었다.

여섯 종류의 각기 다른 용접봉을 사용하여 용접 실험한 결과 수중 용접시의 열영향부에 대한 최고 경도는 용접봉의 종류에 관계없이 공통으로 급격히 상승되었으며, 열영향부는 수중에서의 급속 냉각으로 대기중에서 용접한 시편의 열영향부보다 그 영역이 현저히 좁아짐을 관찰할 수 있었다.

Fig. 4(a)는 일미나이트계 용접봉(KS E4301)을 사용한 경우의 용접 조건에 따른 경도 분포로서 수중에서 실험한 용접 시편의 열영향부 최고 경도치는 Hv 270 정도이며, 대기중에서 용접한 시편은 Hv 220 정도로 수중에서의 최고 경도치가 Hv 50 정도 높다는 것을 관찰할 수 있었다.

Fig. 4(b)는 저수소계 용접봉(KS E4316)에 대한 경도 분포로서 수중에서 용접한 시편의 최고 경도가 Hv 275 정도로 다른 용접봉을 사용한 용접 시편의 최고 경도치에 비해 비교적 높게 나타났다.

Fig. 4(c)는 고산화티탄계 용접봉(KS E4313)을 사용한 경우로 수중 용접한 시편에서 열영향부 최고 경도치는 Hv 265 정도로 저수소계 용접봉(KS E4316)을 사용한 최고 경도치에 비해 다소 저감하는 것을 관찰할 수 있었다.

Fig. 5(a)는 처음으로 시험 개발한 용접봉 BK-01에 대한 경도 분포를 나타내고 있다. 열영향부의 최고 경도치에서 살펴보면, 시판되는 고산화티탄계 용접봉(KS E4313)의 경도치와 서로 유사하게 나타났다.

Fig. 5(b)는 BK-02 용접봉을 사용한 경도 분포로 수중 용접한 시편의 경우, 열영향부 최고 경도치는 Hv 250 정도로 시판되는 일미나이트계 용접봉(KS E4301)을 사용한 시편의 최고 경도치 Hv 270 보다 는 약 Hv 20정도 낮아졌음을 관찰할 수 있었다.

Fig. 5(c)는 개발되어 보완된 수중 용접봉 BK-03에 대한 용접 시편의 경도 분포로 대기중에서 용접한 시편의 최고 경도치와 수중에서 용접한 시편과 비교할 때 그 차이가 비교적 적게 나타났다. 수중에서 용접 실험한 시편의 열영향부 최고 경도치가 Hv 245 정도로 나타나서 시판되는 저수소계용접봉(KS E4316)을 사용하여 수중 용접 실험한 시편의 최고 경도치 Hv 275 와 비교해 보면, 약 Hv 30 정도의 차이가 있음을 관찰할 수 있었다.

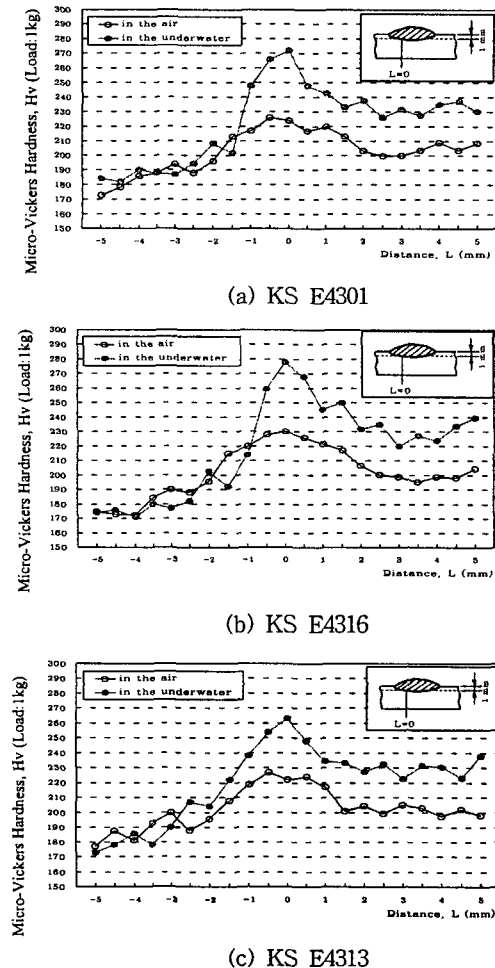
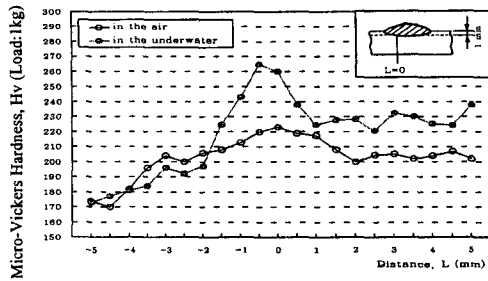


Fig. 4 Effects of environments on the hardness distribution

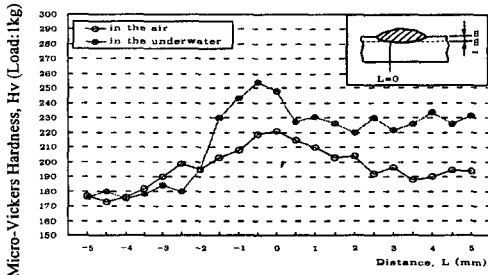
4. 결 론

일반 구조용 연강판(KS D 3503 SS400)에 대한 습식 수중 피복 아크 용접봉의 실용화 및 작업성 향상에 대한 연구 목적으로, 피복제 배합 비율을 조정하여 시험적으로 개발한 수중 용접봉(BK-01, BK-02, BK-03)과 대기중에 사용되는 국산 연강용 피복 아크 용접봉 (KS E 4301, KS E 4313, KS E 4316)을 사용하여, 대기중과 수중에서 용접 실험 연구한 결과를 요약하면 다음과 같다.

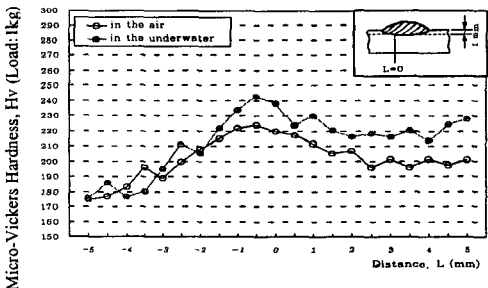
- 1) 동일한 용접 조건에서 시험 개발된 습식 수중 아크 용접봉을 수중에서 용접 시험한 결과 아크 안정성 면에서 대기중에 사용되는 국산 피복 아크 용접봉 보다 양호하게 개선되었다.
- 2) 개발되어 보화된 수중 아크 용접봉(BK-03)이 용접 작업성 및 슬래그 박리성과 비드의 퍼짐성 및 비드 외관 면에서 개선 효과가 현저하게 나타났다.
- 3) 수중에서 용접한 용접 시편의 열 영향부는 대기중에서 용접한 시편의 열 영향부와 비교할 때 그 영역이 현저히 좁아짐을 알 수 있었고, 시험 개발한 수중 아크 용접봉 (BK-03)이 시판되는 국산 용접봉보다 용접 금속에 대한 최고 경도치의 저감 효과가 있었다.



(a) BK-01



(b) BK-02



(c) BK-03

Fig. 5 Effects of environments on the hardness distribution

이렇게 볼 때 대기 중에서 용접 실험한 열영향부의 최고 경도치는 Hv 225 정도로 실험에 사용된 모든 용접봉에서 유사하게 나타났으나, 수중에서 용접한 시편의 열영향부 최고 경도치는 저수소계 용접봉(KS E4316)이 Hv 275 정도로 경도치가 최고로 나타나고, 시험 제작한 용접봉 중에서 BK-03 이 Hv 245 정도로 적게 나타났다. 이것은 수중용 피복 아크 용접봉 제작시 피복제 성분에 따라 최고 경도치의 개선 가능성이 있으며, 피복제 성분 중의 RTS와 ILT의 조성비율에 따라라도 수중 용접부의 최고 경도에 영향이 있는 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) Chung, J. S., "Technologies for Petroleum and Mineral", *J.of OET*, 1 (1), pp.10 ~20, 1987
- 2) Masubuchi, K., A. V. Gaudiano and T. J. Reynolds , "Technologies and Practies of Underwater Welding", *Proc. of Int. Conf. IIW*, pp.48 ~70, 1983
- 3) 運井淳. 菅泰雄, 關水信之, "水中におけるキプマーミアーク熔接(第1報)", *日本 溶接學會誌* 48(9), pp. 689~695, 1979
- 4) 運井淳. 菅泰雄, "水中における重力式アーク溶接(第1報)", *日本溶接學會誌*, 43(8), pp.767~775, 1974

- 5) 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), pp.881~887, 1981
- 6) 衣川純一, 福島貞夫, 福島孟, “濕式水中溶接における熱影響部の變態舉動, 日本溶接學會誌, 48(5), pp.273~278, 1979
- 7) 福島貞夫, 福島孟, 衣川純一, “溶加材を用いた濕式水中プラズマ溶接部の改善に關する一實驗, 日本溶接學會誌, 50(3), pp.309~314, 1981
- 8) Asnis, A. E., I. M. Savich, “The New Method of Mechanized Underwater Welding”, *Proc. of Int. Conf. IIW*, pp.311~317, 1983
- 9) 屋良秀夫, 眞喜志康二, “濕式水中アーク溶接に關する研究 (第1報)”, 日本溶接學會誌, 1(2), pp.285~289, 1983
- 10) 오세규, 김민남, “TMCP강의 습식수중 아크 용접성에 관한 고찰”, 대한용접학회지, 5(4), pp.28~35, 1987
- 11) 오세규, 강문호, 김민남, “선용강판 수중 용접부의 인장 구속 균열 특성에 관한 연구”, 대한 박용기계학회지, 11(3), pp.211~218, 1987
- 12) Cotton, H. C., “Welding Underwater and in the Splash Zone—a Review”, *Proc. of Int. Conf. IIW*, pp.4~48, 1983
- 13) 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2報)”, 日本溶接學會誌, 2(4), pp.721~726, 1984
- 14) 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), pp.392~397, 1985
- 15) Howden, D. G., “Behavior of Hydrogen in Arc Welded Pools”, *W. J.*, 61(4), pp.103s-108s, 1985
- 16) Videau, J. P., “Hareless Testing in the Heat Affected Zone of Steel Welds”, *IIW. DOC*, IX-1309-84, 1984
- 17) Rosenthal, D., “The Theory of Moving Sources of Heat and its Application to Metal Treatments”, *Trans. of ASME*, 11, pp.849~866, 1946