

피복성분에 의한 수중용접봉의 아크 안정성 개선에 관한 실험연구

김복인* · 노창석* · 정교훈* · 김민남**
*부경대학교 대학원 기계공학과 **부경대학교 기계공학부

An Experimental Study on the Arc Stability Improvement of Underwater Wet Welding with Flux Ingredients

BOK-IN KIM*, CHANG-SUK RHO*, KYO-HUN CHUNG* AND MIN-NAM KIM**

*Graduate School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

**School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

KEY WORDS: Underwater wet arc welding 습식수중 아크용접, Underwater wet welding electrode 습식수중 용접봉, Arc stability 아크 안정성, Slag 슬래그, Bead appearance 비드 외관, Welding condition 용접 조건, Heat affected zone 열영향부

ABSTRACT: Underwater wet bead-on-plate welds were experimentally performed on 11mm thick SS400 steel plate as base metal by using six different types of flux coated electrodes of 3.2mm diameter. Two kinds of different flux coated wet arc electrodes (UW-1, UW-2) were individually designed flux materials, three kinds of the electrodes (E4301, E4311, E4313) were terrestrial electrodes and the another one (TN20) was an imported underwater wet welding electrode. As results, the individually designed flux coated underwater electrode, UW-2 and TN20 had a good starting and the excellent arc stability compared with other electrodes. No significant difference of bead appearance could be detected, but the slag detachability of TN20 electrodes was relatively undesirable. By rapid cooling rate, the hardness value and the portion of martensite of HAZ were increased, but it was considerably maintain stable for TN20 and UW-2 electrodes. The individually designed flux coated electrode, UW-2 could be used in practice for underwater bead welds.

1. 서 론

해양 자원 및 해저공간의 이용률을 높이기 위하여 해양 개발에 대한 연구가 다방면에 걸쳐 활발히 추진되고 있다(Chung, 1987). 그래서 각종 생산 설비나 생활 공간마저도 해양으로 진출하지 않을 수 없다고 보며 그에 따라 해양 구조물의 형태가 해양 개발에 있어 매우 중요한 위치에 놓여지게 될 것이다. 이러한 해양 구조물은 수중 공작 기술에 의해 작업이 될 것이며 결국 모든 산업의 기반 기술인 용접 분야중 수중 용접 기술 또한 중요한 위치를 차지하게 될 것으로 생각된다(Cotton, 1991).

현재 해양 개발에 있어서 필수적으로 필요한, 해양 구조물에 이용되는 재료는 콘크리트(concrete)와 철강 구조재로 대별되고 있다. 여기서 철강 구조물은 대형화 및 형상이 복잡해짐에 따라 수중에서 조립 및 시공작업의 필요성이 예상되며, 기존 구조물의 해수에 의한 부식 및 손상에 따른 국부적인 보수와 정비 등이 불가피하게 되었다(Asnis, 1983).

일반적으로 담수 또는 해수 중에서 행하는 수중용접은 교량, 해저 파이프라인, 해양 구조물 등의 건조시 현장용 장비나 보수 용접에 적용되지만(Asnis, A. E., I. M. Savich 1983), 용접법 자체의 개발뿐만 아니라, 구조물의 조립 기술과 잠수 기술, 또한 우수한 용접 기술을 함께 갖춘 기술자를 필요로 하고 복잡한 설비

를 갖추어야 하는 어려운 문제들이 대두되고(오 등, 1987), 수중 아크 용접 이음부는 급냉되어 경도와 취성이 증가하는 등 여러 가지 해결하지 못한 과제들을 가지고 있다(A. Sanchez-Osio et al, 1995).

본 연구는 수중에서 2차원 속도 제어가 가능하도록 자체적으로 설계하여 제작한 수중 용접장치에서, 피복제 시료를 적절하게 선택하고 적당한 비율로 혼합하여 시험 제작한 수중 피복 아크 용접봉과 일반적으로 육상에서 사용되는 용접봉 및 독일에서 시판되고 있는 수중 용접봉등을 사용하여 습식수중 아크 용접에 의한 용접부의 비드모양, 슬래그 박리성, 아크 안정성, 경도, 금속조직 등의 용접에 대한 기초사항을 비교 고찰함으로써, 시험 제작한 수중용접봉의 적용 가능성에 대해 집중적으로 연구하여 보았다. 또한 습식 수중 아크용접시의 최적조건을 선정하여 습식 수중 아크 용접의 실용화를 위한 기초 자료도 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험재료

2.1 실험장치

본 실험연구에 사용된 수중 용접 장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 용접봉의 각도와 용접 속도를 임의로 조정 할 수 있어 최

적의 용접상황을 만들어 낼 수 있도록 제작한 수중용접 장치로서 1200×850×800mm 수조 내부에 수돗물을 넣고 용접봉의 가이드 장치를 부착한 모재 고정용 작업대를 설치하였다.

측정 장치로서 HP-VEE 프로그램을 사용하여 용접봉과 모재 사이에 발생하는 전류 및 전압을 측정하였다. 모재의 비드와 슬래그는 디지털 카메라 SDC-007을 사용하여 촬영하였다.

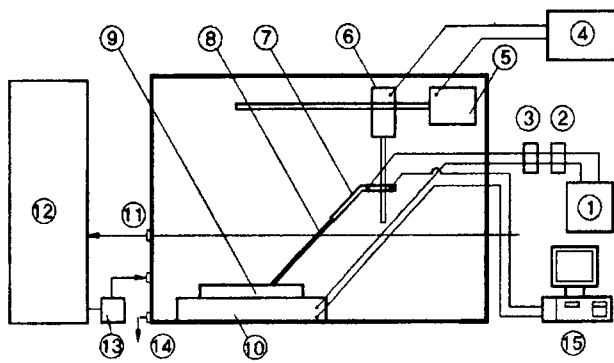
또한 용접 장치에 대한 전기적인 안전성을 위해 DC ±24V 이내의 범위에서 전압의 미소 조정으로 속도 조절이 될 수 있도록 감속 모터를 장치에 부착하여 수중 용접 실험에 알맞게 2차원 속도 제어가 동시에 가능하도록 제작하였다. 그리고 용접 실험 중에 상수도를 계속하여 순환 할 수 있도록 배관 시설을 하여 수조내의 수온을 일정하게 유지하였다.

실험에 사용된 용접기는 용량 600A의 직류 용접기이며, 직류 정극성으로 용접 실험을 실시하였다.

수중 용접시 아크의 상태와 용접 상태를 자세히 관찰하기 위해 아크릴 판을 11×6.5×410mm 크기로 자외선 차광유리(#11)를 부착한 아크 관찰 장비를 만들어서 이용하였다.

2.2 실험재료

본 연구에 사용한 용접 모재는 시중에서 흔히 사용되고 있는 일반 구조용 연강판(SS400)으로 크기는 250×125×12mm의 규격으로 유압 절단기로 절단하여 비드 용접 시험편을 사용하였고 시험편의 화학적 조성과 기계적 성질은 Table 1 및 Table 2에 나타났다. 본 실험에 사용한 용접봉은 대기 중에서 일반적으로 사용하는 지름 3.2mm인 국산의 고산화티탄계 용접봉(E4313)과 일미나이트계 용접봉(E4301) 및 고셀루로즈계(E4311)등 세 종류와 이미 독일에서 개발되어 사용되어 지고 있는 수중 용접봉인 Thyssen Nautica 20 (TN20)과 연구실에서 자체적으로 시험 제작한 수중 용접봉(UW-1, UW-2)등 모두 6종류의 용접봉을 사용하



① DC arc welding machine ② Ampere meter ③ Voltage meter ④ Control console box ⑤ Horizontal moving device ⑥ Vertical moving device ⑦ Electrode holder ⑧ Electrode ⑨ Welding specimen ⑩ Work bench ⑪ Over flow pipe ⑫ Cooling water tank ⑬ Circulating pump ⑭ Drainage ⑮ Data acquisition system

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipments

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

Table 2 Mechanical properties of base metal

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

Table 3 Chemical composition of core wires for covered electrode

Size	Mark	Chemical composition(wt. %)					
		C	Si	Mn	P	S	Cu
φ3.2×350	SWR-11	0.05	0.018	0.54	0.01	0.008	0.10

Table 4 Chemical composition of covering(wt.%)

Analytical Object	(a) E4313	(b) E4311	(c) E4301	(d) UW-1	(e) UW-2	(f) TN20
Si	26.85	32.67	31.46	24.04	23.18	25.51
Ti	22.96	7.64	10.60	15.31	14.65	26.22
Ca	13.89	9.44	14.21	26.46	26.21	15.36
Mn	10.99	10.75	18.21	9.27	9.51	10.04
Al	8.77	0.89	3.23	3.15	3.22	7.77
K	7.23	3.48	4.53	4.02	3.98	8.87
Na	4.41	12.76	5.87	7.73	7.30	1.14
Fe	3.36	15.30	8.00	8.11	10.05	3.92
Mg	1.00	6.90	3.38	1.57	1.64	0.27
Zr	0.30	0.04	0.05	0.20	0.10	0.31
Nb	0.14	0.05	0.06	0.11	0.10	0.17
P	0.04	0.04	0.04	-	-	-
Rb	0.03	-	-	-	-	-
Sr	0.03	-	-	-	0.03	-
S	-	0.05	-	0.03	0.03	0.02
F	-	-	0.33	-	-	-
Mo	-	-	-	-	-	0.32
Cr	-	-	-	-	-	0.07

였다. 용접봉들은 사용전에 예열 처리를 하지 않고 대기 중에 방치하였다가 자연 그대로 용접 실험을 하였다. 또한 용접봉의 개발에 사용된 심선은 용접봉 제작 회사에서 용접봉 제작에 사용되고 있는 연강용 피복 아크 용접봉의 심선 재질과 동일한 SWRY-11을 사용하였고, 그 화학조성은 Table 3에 나타내었다.

본 실험 연구에 사용한 각각의 용접봉들과 시험적으로 제작된 용접봉의 피복제에 대한 질량분석기 (XRF-1700)의 분석 결과를 Table 4에 나타내고 있다.

3. 실험방법

습식 수중 아크 용접에 대한 기본적인 지식과 물 속에서 아크용접을 할 수 있는 기술의 숙달이 필수적이라는 것을 체험 할 수 있었다.

용접봉의 종류에 따른 어느 정도의 오차가 있는 것이 감지 되었으나 비교분석을 하기 위하여 동일한 용접조건을 택하였다.

지름 3.2mm의 용접봉과 두께12mm의 강판에 대한 습식 수중 아크용접 실험에서 용접봉과 피복제의 종류에 따른 수중용접의 최적 조건을 찾기 위하여 용접전류, 용접속도, 용접전압 및 용접 각도 등을 여러 가지로 바꾸어 가며 예비 실험을 수차 실시하여 본 결과, 습식 수중 아크용접을 할 수 있는 최적의 조건을 찾을 수 있었다. 본 실험 연구에서 이용된 대표적인 용접 조건들을 Table 5에 나타내고 있다.

습식 수중 아크 용접 실험시의 수조내의 수온(약 20°C)과 수면(약 200mm)을 일정하게 유지시키기 위하여 급수 및 배수장치를 이용하여 물의 양을 조절하였다.

용접 아크 안정성을 조사하기 위해 아날로그 신호 변환장치를 이용하여 실시간으로 HP-VEE에 전송이 될 수 있도록 하여 전압 (V)과 전류(A)를 측정하였고, 습식 수중 아크 용접된 시편들을 기계톱 및 정밀 전단기로 절단하여 폴리싱 작업을 한 후 용접 부, 열 영향부, 모재 부위별로 마이크로 비커스 경도시험기를 사용하여 측정하였다.

경도 측정 시험편과 조직검사에 사용한 시험편은 용접 열 사이클이 비교적 준 정적 상태에 있다고 여겨지는 용접부의 중앙 부분에서 시험편을 절단하여 사용했다.

여러 차례의 예비 실험을 통해서 얻어진 피복제 조성비율에 따라 시판되고 있는 용접봉의 피복제 크기와 동일하게 제작하였으며, 실험에 사용한 용접봉들의 피복제 조성비율을 분석하여 Table 4에 나타내었다.

피복제 시료에 따른 용접봉들과의 차이를 조사하여 그의 장단 점을 분석하였고, 또한 용접부의 기계적 성질을 조사하기 위해 마이크로 비커스 경도기를 이용한 경도 시험을 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 아크의 안정성

습식 수중 아크 용접은 물속에서 용접아크가 발생하게 되므로 주위의 물에 의하여 아크가 단절되거나 불안정하게 되는 경향이

Table 5 Typical welding conditions

Curmt (A)	120
Voltage (V)	30~35
Welding speed (mm/min)	250
Bead length / Electrode length used	0.8
Welding angle (°)	75
Electrode source	DCSP
Welding position	Flat

심하여 이로 인한 용접결함의 원인이 되기도 한다.

습식수중 아크용접시의 여러 종류의 전압과 전류를 HP-VEE에 실시간으로 전송하여 아크의 안정성을 비교하기 위한 프로그램을 작성하여 실험에 이용하였다. 각각 다른 종류의 용접봉을 사용하여 Table 5와 같이 동일한 용접조건으로 습식수중 아크용접을 실시하여 전압과 전류특성을 측정하여 서로 비교하여 보았다.

특히 피복제의 종류에 따라서 아크의 안정성이 달라지는 현상을 관찰 할 수 있었다. 용접봉의 종류에 따른 측정 결과를 서로 비교하여 보면, E4313이 일반적으로 대기 중에서 사용하고 있는 용접봉 중 가장 아크가 안정하게 나타났다.

그러나 역시 습식수중 아크용접에서는 아크가 불안정하고 쉽게 아크가 끊어지는 현상이 나타났다. Fig. 2는 습식수중 아크 용접 실험 중의 전압과 전류의 파형을 나타낸 것으로, 용접봉의 종류별로 서로 비교하여 보면 UW-2에서 가장 좋게 나타났으며, UW-1과 TN20도 다소 안정적임을 발견할 수 있다.

그러나 용접 조건이 달라지고 물 속에서 용접 할 수 있는 잠수부의 수중용접에 대한 숙련 정도와 수심에 따라서도 아크의 안정성에 변화가 심한 것으로 예상되며, 이러한 면에서는 좀 더 깊은 연구가 필요하다고 본다.

4.2 슬래그 박리성과 스파터 발생

슬래그 제거는 수중에서 용접 실험을 하였지만 용접시편은 대기 중에 꺼내어서 슬래그를 제거 하였다.

Photo 1 은 습식수중 아크용접한 시험편의 슬래그 외관사진으로 용접봉에 따라 슬래그의 형상에 약간의 차이가 있음을 알 수 있었으며, 또한 용접봉의 종류에 따라서 슬래그의 제거 작업에도 차이를 발견 할 수 있었다.

수중 용접실험에서는 물의 비등현상과 수온의 급속한 냉각 등으로 인하여 슬래그가 비드부에 용착하는 현상이 발생함을 알 수 있었다. 본 실험에서 고찰해 보면, 각종 용접봉 중에서 E4313이 가장 딱딱한 슬래그를 형성하였고, TN20은 슬래그 제거가 쉽지 않을 정도로 용착성이 크게 나타났다. UW-1과 UW-2는 슬래그가 쉽게 부스러졌으며, E4311와 E4301은 물에 씻어질 만큼 연한 슬래그가 형성되었다.

E4311에서는 수중용접 실험중에도 슬래그가 이탈되고 있음을 발견할 수 있었으며, E4313과 TN20에서는 슬래그가 다소 딱

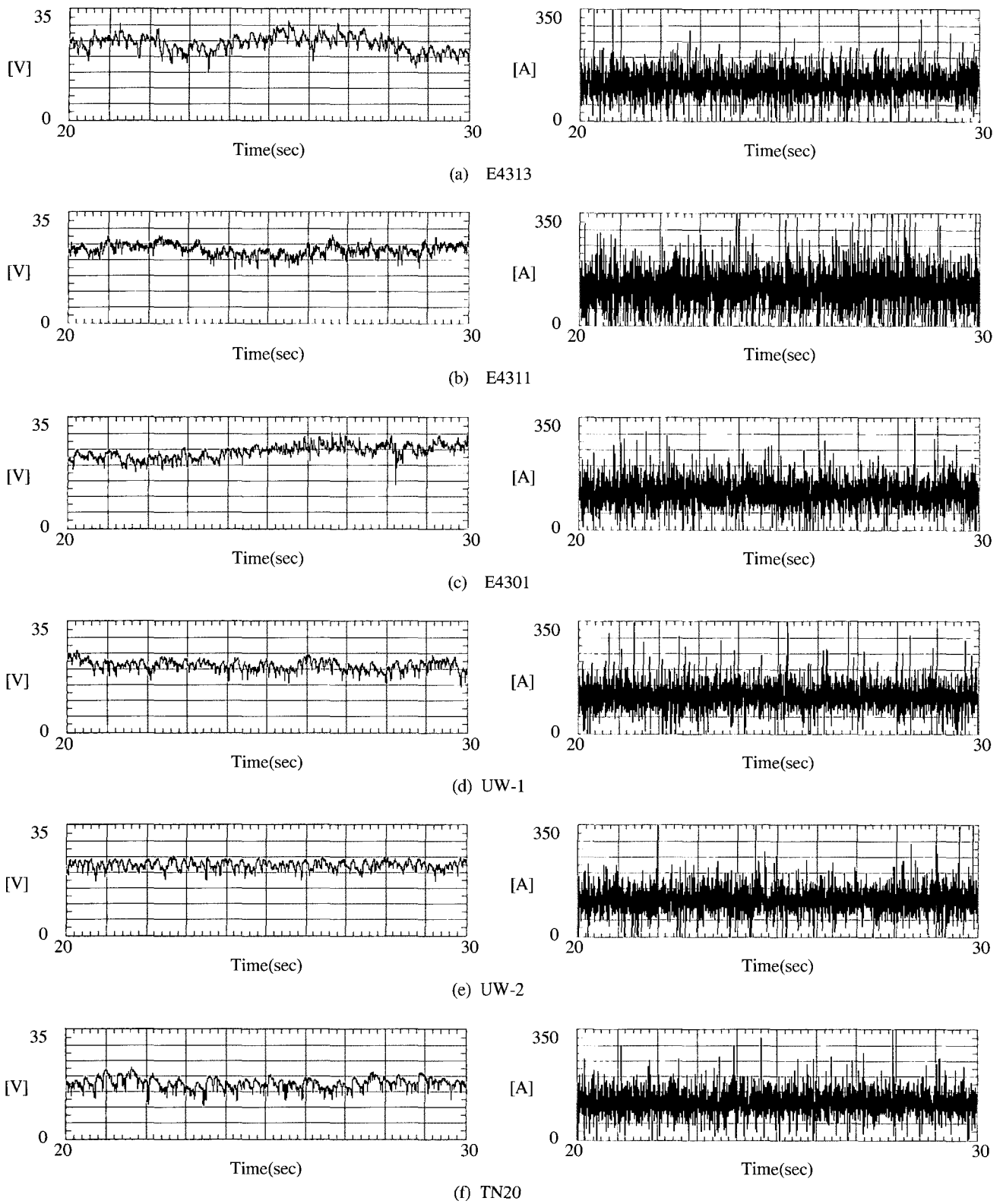


Fig. 2 HP-VEE of voltage and current signal

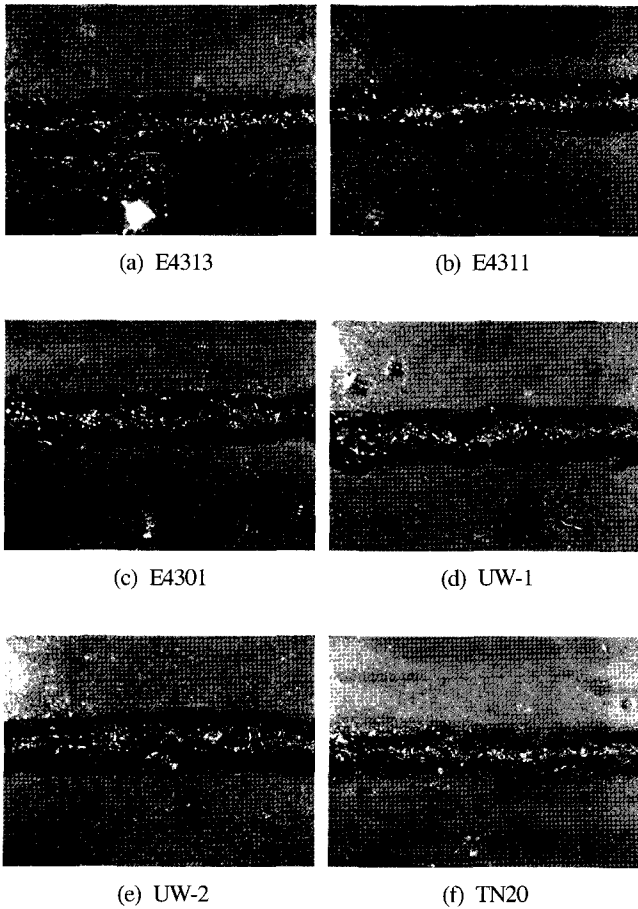


Photo 1 Appearance of slag in various welding electrodes

딱함을 발견할 수 있었다. 그러나 본 실험에서는 용접시편을 육상에 꺼내어 슬래그를 제거하게 되어 특별한 어려움은 없었다. 스파터 발생은 E4311과 E4301에서는 거의 발견할 수 없었으며, E4313과 UW-1과 UW-2 그리고 TN20에서 약간의 스파터를 발견할 수 있었다.

4.3 비드의 외관

Photo 2와 Photo 3은 시험에 사용한 각각의 용접봉들의 비드를 디지털 카메라(digital camera)로 촬영한 것이다.

비드의 외관과 비드의 퍼짐성에 따른 아크의 안정성을 서로 비교하여 보았다.

수 차례의 예비 실험에 의해 이루어진 수중 아크용접은 용접시 시야가 확보되지 않아 어려움이 많았지만, 용접이 이루어진 부분의 비드 외관은 대체로 양호한 편이었다. Table 5와 같은 용접조건으로 습식수중 아크용접한 시편의 비드형상은 용접봉의 종류에 따라서 커다란 차이점은 발견하기 어려웠으나, E4313이 E4301과 E4311 보다는 비드의 형상이 조금은 더 균등하고 일정하게 나타났다. 시험 제작한 UW-2와 TN20 용접봉의 비드 형상이 가장 양호하게 나타났다.

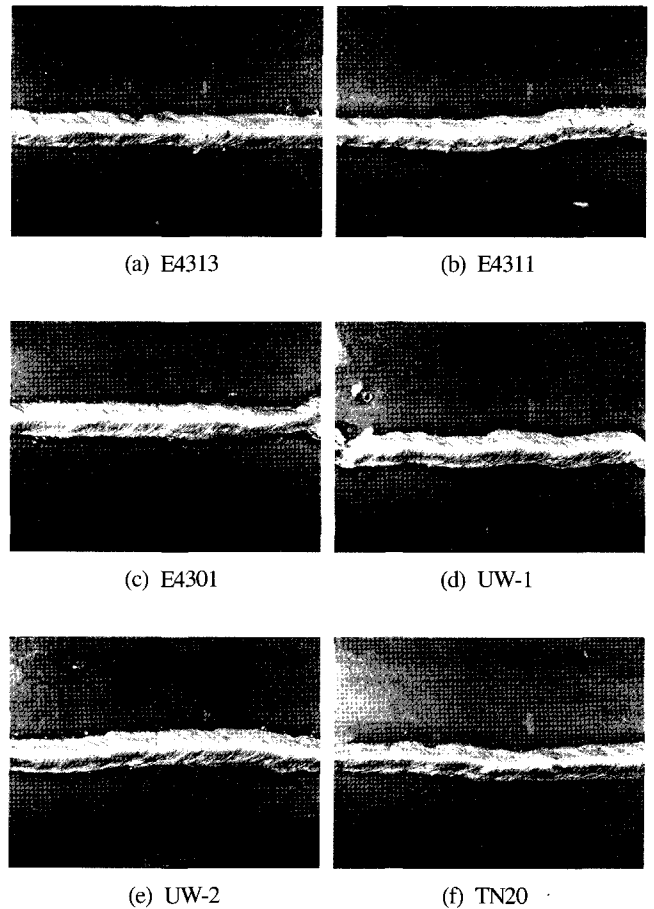


Photo 2 Appearance of bead in various welding electrodes

4.4 경도분포

실험의 결과를 분석하여 보면 습식 수중 아크용접시의 열영향부에 대한 경도 분포는 용접봉의 종류에 관계없이 전반적으로 열 영향부 영역에서 공통적으로 급격히 상승되었고 용착 금속부분에서는 모재 부분의 평균 경도 보다 훨씬 높은 것으로 나타났다.

각 시편의 경도측정은 모재 표면에서 1mm 내부의 점을 측정점으로 선정하여 각각 0.5mm 간격으로 측정하였으며, 용접봉의 종류에 따라 열 영향부의 경도차이가 크게 나타났다.

Fig 3은 용접 전류 120A에서 용접봉의 종류에 따른 열 영향부의 경도 분포를 나타낸 것으로 E4313과 E4301의 경우에는 최고 경도가 크게 나타났으며, 수중 용접봉으로 사용중인 TN20과 시험 개발한 UW-2는 최고 경도치가 낮게 나타났음을 알 수 있었다. 각 부분의 경도치를 비교 분석해 보면 수냉에 의한 열처리가 발생하였음을 알 수 있었다.

본 시험 결과를 비교 분석해 보면 습식 수중 아크 용접시 열영향 부에 대한 경도 분포는 용접봉의 종류에 관계없이 전반적으로 열 영향부에서 공통적으로 급상승되었다.

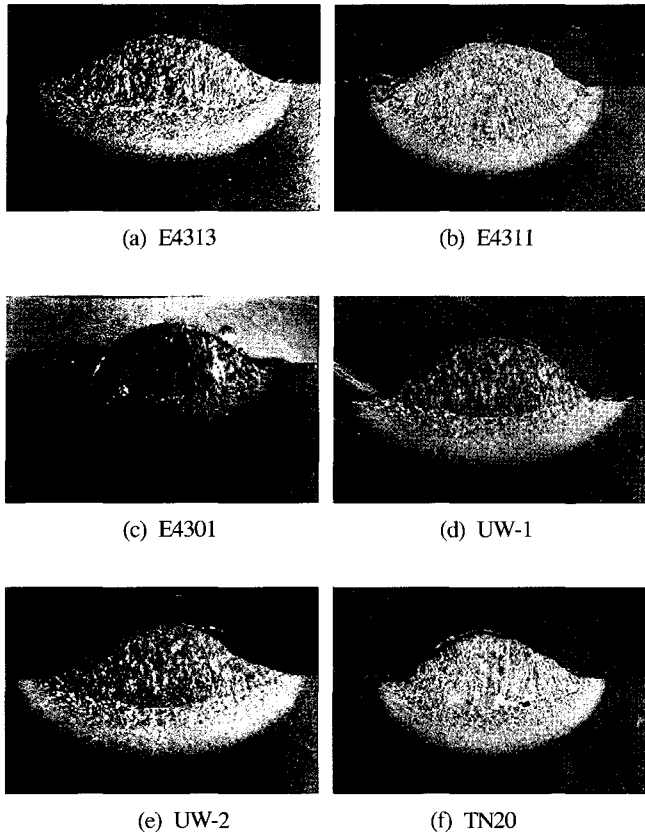


Photo 3 General appearance of alloy cross sections

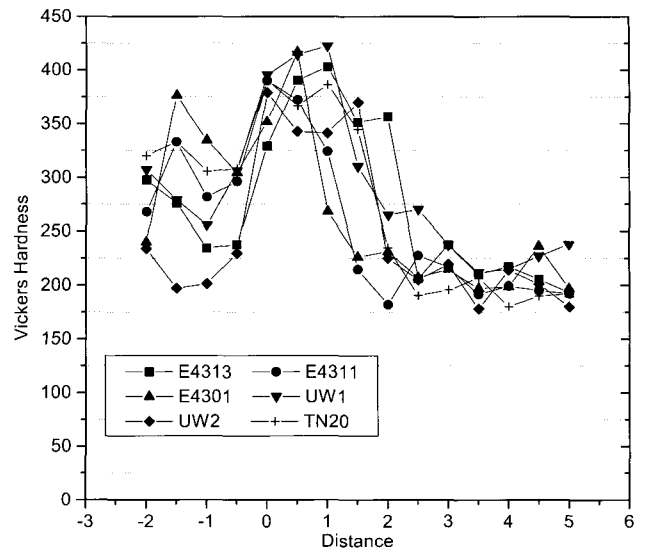


Fig. 3 Hardness distributions of underwater wet welds

이것은 습식 아크 용접의 경우 용접부가 주위에 있는 물의 영향을 받아 급냉되고 담금질 효과에 의하여 경화되어 있음을 알 수 있었다.

4.5 금속조직

Photo 4는 습식 수중 아크 용접에서 용접부의 금속조직을 나타내고 있다. 모재 부위는 페라이트와 펄라이트 조직을 나타내

	(a) E4313	(b) E4311	(c) E4301	(d) UW-1	(e) UW-2	(f) TN20
WM						
FB						
HAZ 1						
HAZ 2						
HAZ / BM						
BM						

Photo 4 Microstructure of welds

고 있으며, 열 영향부는 모재부에 비해 결정립이 다소 커짐을 알 수 있었다. 베이나이트 조직과 마르텐사이트 조직이 혼재되어 있고 빠른 냉각 속도에 의해 마르텐사이트 조직이 발달되어 있을 뿐만 아니라 조직의 비율이 크게 나타남을 볼 수 있다.

E4301의 열 영향부에서 비평형 마르텐사이트 조직을 발견할 수 있었으며, UW-2와 TN20이 가장 안정화된 마르텐사이트 조직을 발견할 수 있었다.

이러한 사실을 습식 수중 아크 용접시 용접부의 급냉에 의해 냉각속도가 매우 빨라지므로 용접금속의 경도치가 크게 높아지고, 열 영향부도 경도값이 크다는 것을 조직의 형태로 알 수 있었다.

5. 결 론

공기 중에서 사용되고 있는 국산의 일반 용접봉(E4313, E4311, E4301)과 습식 수중 용접에 적합하도록 피복제의 배합 비율을 적절하게 개선하여 시험적으로 제작한 수중 용접봉(UW-1, UW-2) 및 독일에서 실용화되고 있는 수중용접봉(TN20)을 사용하여 최적 수중 용접 조건을 선정하고, 이것을 바탕으로 일반 구조용 연강판(SS400)에 대하여 습식 수중 아크용접을 실시 한 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 시험 제작한 UW-2는 습식수중 아크 용접시 전압과 전류의 파형이 TN20과 비슷하게 발생하였으며, 아크의 안정성이 비교적 양호하게 나타났다.
- (2) 비드의 외관, 슬래그 박리성, 스패터 발생등의 측면에서 시험 제작한 수중 용접봉을 서로 비교하여 보면 UW-1보다는 UW-2가 보다 더 양호한 것을 알 수 있었다.
- (3) 본 실험에 이용된 시험편들의 열 영향부 경도는 급격히 상승하였으며, 열 영향부의 금속조직도 심한 온도 변화에 의해 마르텐사이트 조직이 현저하게 증가하게 되었다. E4301의 열 영향부에서 비평형 마르텐사이트 조직을 발견할 수 있었으며, UW-2와 TN20이 안정된 마르텐사이트 조직을 발견할 수 있었다.
- (4) 피복제 성분을 조절하고 적절한 조성비율을 선택하여 시험 제작한 UW-2 수중용접봉은, 피복제에 대한 방수처리를 합리적으로 개선한다면 습식 수중 아크용접의 실용화에 크게 기여할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 BK 한국과학재단 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, BK 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 오세규, 강문호, 김민남. (1987). "선용강판 수중 용접부의 인장 구속 균열 특성에 관한 연구", 대한박용기계학회지, 11(3), pp 211~218.
- 오세규, 김민남. (1987). "TMCP강의 습식수중 아크 용접성에 관한 고찰", 대한용접학회지, 5(4), pp 28~35.
- A. Sanchez-Osio, S. Liu, D. L. Olson. (1995). "Designing Shield Metal Arc Consumables for Underwater Wet Welding in Offshore Applications", Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 117, pp 212~220.
- Asnis, A, E., I. M. Savich. (1983). "The new method of mechanized underwater welding", Proc. of Int. Conf. IIW, pp 311~317.
- AWS D3.6M / ANSI, (1999). "Specification for Underwater Welding", pp 1~91.
- C.E. Grubbs and O.W. Seth. (1977). "Underwater wet welding with manual arc electrodes", Underwater welding for offshore installations, The welding Institute, pp 17~33.
- Chung, J. S. (1987). "Technologies for petroleum and mineral", J. of OET, 1 (1), pp 10 ~20.
- Cotton, H. C. (1991). "Welding underwater and in the splash zone-a review", Proc. of Int. Conf. IIW, pp 4~48.
- I.M. Richardson.(1991). "Arc welding underwater", Welding Design and Fabrication, Mar, pp 48~55.
- D. L. Olson and S. Ibarra. (1985). "Underwater welding metallurgy", International Workshop on Quality in Underwater Welding of Marine Structures, Nov, pp 1~9.
- Duke Ogden. (1997). "School brings wet welder training on-site", Welding Journal, June, pp 54~56.
- Richard N. Fultion. (1998). "Progress in underwater welding", J. of Ocean Industry, pp 40~44.
- R. J. Dexter, E. B. Norris, W. R. Schick, P. D. Watson. (1990). "Performance of underwater weldments", Ship Structure Committee SSC-335, pp 1~241.
- 運井淳, 菅泰雄, 關水信之. (1972). "水中におけるキブ マーミアーク溶接(第1報)", 日本溶接學會誌 48(9), pp 689~695.
- 松田一夫外2名. (1981). "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.
- 屋良秀夫, 眞喜志康二, 菊田米男, 松田福久. (1985). "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.

2001년 8월 7일 원고 접수

2001년 9월 12일 수정본 채택