

## 습식 수중 아크용접봉의 국산화개발에 관한 기초연구

김 민 남, 김 복 인

### A Basic Study on the Development of Domestic Underwater Wet Arc Welding Electrode

M-N Kim, B-I Kim

**Key words :** Underwater welding(수중 용접), Underwater welding electrode(수중 용접봉), Arc stability(아크 안정성), Slag(슬래그), Bead appearance(비드 외관), Heat affected zone(열영향부), Hardness(경도), Martensite(마르텐사이트)

#### Abstract

Underwater wet arc welding process was experimentally investigated by using the six types of flux coated electrodes of 3.2mm diameter and the KR-RA steel plate of 11mm thickness as base metal. Two types of electrodes were domestic covered arc welding electrode(CR13, CR14) and another two types of wet welding electrodes (UWCS, TN20) were imported goods, and the other two types(UWX1, UWX2) were individually designed flux coated electrodes for experimental welding purpose. Main experimental results are summerized as follows:

1. It is ascertained that individually designed flux coated electrode(UWX1) could be used in practice with KR-RA steel plate for underwater wet arc bead welds.
2. Welding arc can be generated easily and considerably kept in stable using TN20 and UWX1 electrodes.
3. The micro Vickers hardness value and the portion of martensite in the HAZ were increased in all the electrodes by rapid cooling rate, but it is relatively maintain stable for UWCS, TN20 and UWX1 electrodes.

#### 1. 서 론

지구 표면적의 71%를 차지하는 바다는 인류에

게 남은 마지막 자원의 보고라고 할 수 있다. 산업 혁명 시대를 거쳐 후기산업사회에 이르기까지 고도로 성장한 공업발전은 육지자원을 고갈시켰고

\* 부경대학교 기계공학부  
\*\* 동명대학 기계자동화계열

동시에 심각한 환경오염을 가져왔다. 우리나라의 경우 삼면이 바다이고 해안선의 굴곡이 심하여 전국토의 해안선 길이가 17,286km에 달한다. 최근 급격한 경제발전에도 따라 해양자원 개발의 필요성과 해안의 이용도에 관한 관심이 높아지고 있으며, 또한 인공섬, 해양도시건설, 석유 시추, 극지개발 등 해안 및 해양에 대한 전반적인 개발이 이루어질 전망이다. 모든 산업의 기반 기술이라 할 수 있는 용접 분야도 수중 용접 기술로서 중요한 위치를 차지하게 될 것으로 생각된다<sup>11,5)</sup>.

습식 수중 아크용접은 교량, 해저 파이프라인이나 해양 구조물 등의 건조 및 정비 수단으로 이용되고 있으며, 해난 사고시의 응급구조와 대형선박의 국부적인 부식 파손 등의 보수 수단으로도 수중 용접의 필요성이 강조되고 있다. 그러나 용접법 자체의 개발 뿐만 아니라, 구조물의 조립 기술과 잠수 기술을 가진 우수한 용접 기술자를 필요로 하고, 또한 복잡한 설비와 안전 문제들이 대두되고 있으며, 용접 이음부는 급냉되어 경도와 취성이 증가하는 등의 해결해야 할 어려운 과제들을 가지고 있다<sup>6,8)</sup>.

습식 수중 아크용접은 각종 해저 구조물의 제작에 있어서 용접 이음에 대한 신뢰성을 높이고 용접 성능을 만족시킬 수 있는 기초적인 문제점들을 분석하고 하나씩 해결함으로써 습식 수중 아크용접의 실용화를 도모할 수 있다고 생각된다<sup>9, 12)</sup>. 그러므로 습식 수중 아크용접에 이용될 수 있는 피복 아크 용접봉을 우선적으로 개발하여, 수중 용접실험을 통해 용접봉에 대한 용접성을 평가하여 습식 수중 아크용접의 실용화에 대하여 연구하고 검토해 볼 필요가 있다고 본다.

본 연구는 수중에서 2차원 속도 제어가 가능하도록 자체적으로 제작한 수중 용접 장치에서 시험적으로 제작한 수중용 피복 아크 용접봉과 일반적으로 사용되는 국산 피복 아크 용접봉 및 국외에서 개발되어 사용 중인 수중 피복 아크 용접봉을 사용하여 습식 수중 아크 용접에 의한 아크의 안정성, 슬래그 박리성, 비드 모양, 경도 및 금속조직 등의 용접에 대한 기초사항을 비교 고찰함으로써, 습식 수중 아크 용접에 대한 용접봉의 적응성과 수중 용접시의 최적 조건을 선정하여 습식 수중 아크 용접

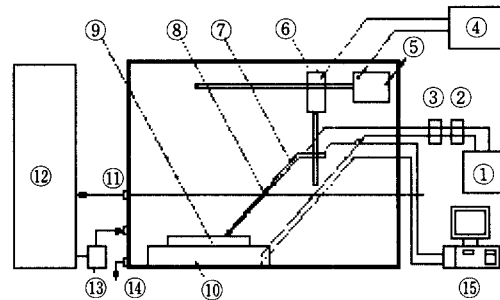
의 실용화를 위한 기초 자료를 얻는데 중점을 두었다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

실험에 사용된 수중 용접 장치는 Fig. 1에 보는 바와 같이 용접봉의 각도, 용접방향 및 속도 등을 임의로 변경할 수 있도록, 실험실에서 제작한 수중 용접 실험 장치로써 1200×850×800mm 수조 내부에 수돗물을 넣고 용접봉의 가이드 장치를 부착한 모재 고정용 작업대를 설치하였다.

또한 용접 장치에 대한 전기적인 안정을 위하여 DC±25V 이내의 범위에서 전압의 미소 조정으로 속도 조절이 될 수 있도록 감속 모터를 장치에 부착하여 수중 용접 실험에 알맞게 2차원 속도 제어가 가능하도록 제작하였다. 그리고 용접 실험 중에는 수조내의 수온을 일정하게 유지시키기 위해 수돗물을 계속하여 순환할 수 있도록 순환장치가 연결되어 있고, 신호변환장치를 이용하여 아크의 안정성을 확인하였다. 실험에 사용된 용접기는 용량 600A의 직류 용접기이며, 직류 정극성으로 수심 200mm에서 실시하였다.



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 Overflow pipe ⑫ Cooling Water tank ⑬ Circulating pump ⑭ Drainage ⑮ Data acquisition system

**Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipments**

2.2 실험재료

본 연구에 사용한 용접 모재는 크기 125×250×11mm로 선박 건조에 많이 사용되는 선체용 압연강판(KR-RA)을 이용하였고, 그 화학 조성은 Table 1에, 기계적 성질은 Table 2에 각각 나타내고 있다.

본 실험에 사용한 용접봉은 대기 중에서 일반적으로 이용되고 있는 지름 3.2mm인 고산화탄계 용접봉 KS E4313(CR13, CR14) 두 종류의 용접봉과 이미 미국과 독일에서 개발되어 사용되어지고 있는 UWCS과 TN20 두 종류와 이론적 피복제 조성비를 이용하여 습식 수중 아크 용접에 사용할 수 있도록 시험 개발된 수중 피복 아크 용접봉 두 종류(UWX1과 UWX2) 등, 모두 6 종류의 용접봉

을 사용하였다.

또한 시험 개발된 수중 용접봉의 심선은 용접봉 제작 회사에서 용접봉 제작에 일반적으로 사용되고 있는 연강용 피복 아크 용접봉의 심선 재질과 동일한 SWRY-11을 사용하였으며, Table 3에서 화학적 조성을 나타내었다.

또한 본 실험에 사용한 용접봉의 피복제에 관한 화학적 성분을 질량 분석기(XRF 1700)에 의해 분석한 결과는 Table 4와 같다.

2.3 실험방법

습식 수중 아크용접에서는 물 속에서 아크용접을 할 수 있는 잠수부의 용접기술이 필요하나, 본 실험에서는 자체적으로 제작한 수중 용접 실험장치를 이용하였다. 지름 3.2mm의 용접봉과 두께 11mm의 강판에 대한 습식 수중 아크용접 실험에서 비교 분석을 하기 위하여 동일한 용접조건을 택하여야 함으로, 수차 실험에 의해 Table 5와 같이 최적의 용접조건을 선택하여 기계적인 자동용접의 형태를 취하면서 용접속도와 용접각도, 운봉비, 용접 자세 등을 기계적으로 고정하여 두고, 수심 200mm에서 용접을 실시하였다. 또한 수조내는 계속하여 급수와 배수가 이루어져 수온을 약 20℃로 일정하게 유지할 수 있게 하였다. 용접 아크 안정성을 조사하기 위해 아날로그 신호 변환장치를 이용하여 실시간으로 HP-VEE에 전송이 되도록 하여 전압과 전류를 측정하고 모니터링을 할 수 있도록 하였다. 측정기의 gain을 10을 기준으로 하여 용접전압은 감압시키고, 용접전류는 전류 측정 장치에 바로 연결하여 각각 500 point/sec가 되도록 셋팅하였으며, Fig.2에 HP-VEE의 기본 program의 일 예를 간단히 제시하였다.

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

Table 3 Chemical composition of core wires

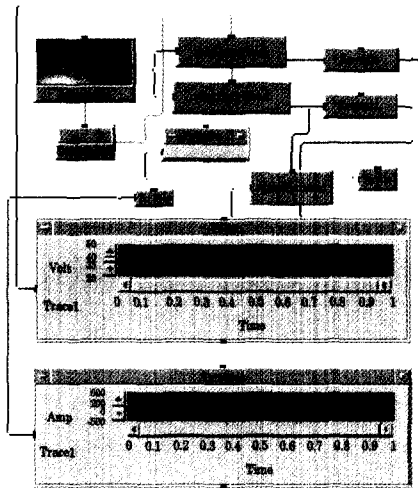
Chemical composition (wt, %)					
C	Si	Mn	P	S	Cu
0.05	0.018	0.54	0.01	0.008	0.1
SWRY-11, φ3.2×350					

Table 4 Chemical composition of covering

Type	Chemical composition (wt, %)																	
	Ca	Ti	Si	Mn	Fe	Al	Na	K	Mg	Zr	Nb	P	S	Cr	Rb	Sr	Co	Mo
CR13	13.89	22.96	26.85	10.99	3.36	8.77	4.41	7.23	1.00	0.30	0.14	0.34	-	-	0.02	0.02	-	-
CR14	10.34	16.40	25.99	10.52	14.38	8.33	6.15	6.63	0.91	0.18	0.11	0.04	0.03	-	-	-	-	-
UWCS	0.38	16.55	28.82	5.49	22.95	8.82	6.46	6.61	3.36	0.28	0.12	-	-	0.11	-	-	0.05	-
TN20	15.36	26.22	25.51	10.04	3.92	7.77	1.14	8.87	0.27	0.31	0.17	-	0.02	0.07	-	-	-	0.32
UWX1	25.14	23.24	21.45	9.16	5.86	5.84	4.02	3.69	1.15	0.23	0.14	0.02	0.02	-	-	-	-	-
UWX2	9.22	25.15	25.91	11.15	8.74	7.94	5.02	5.20	1.28	0.21	0.13	0.03	-	0.06	-	-	-	-

**Table 5 Typical welding conditions**

Current (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



**Fig. 2 Example of the HP-VEE programs**

습식 수중 아크 용접을 한 시편들은 기계톱 및 정밀 전단기로 절단하여 각각의 시험편을 2000번까지 사포로 연마한 후 알루미늄으로 에칭하여 용접부, 열영향부, 모재 부위별로 마이크로 비커스 경도시험기를 사용하여 경도를 측정하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 아크의 안정성

습식 수중 아크 용접은 물 속에서 용접 아크가 발생하게 되므로 용접 중에 아크가 단절되거나 불안정하게 되는 경향이 심하게 나타나게 되고, 이로 인한 용접 결함의 원인이 되기도 한다. 아크의 안정성은 용접 전류와 용접 전압, 용접 속도, 용접봉 재질, 모재 등의 여러 가지 변수에 따라 달라질 수 있으나, 본 연구에서는 용접봉의 종류에 따른 아크의 안정성에 대하여 집중적으로 관찰하였다. 용접

조건이 Table 5와 같은 본 실험의 경우는 물 속에서 아크를 발생시켜야 함으로 용접 부위를 찾아 용접을 시작하기가 다소 어려웠지만 자동 용접이 이루어지면서 비교적 안정된 용접을 할 수 있었다.

Fig. 3은 Table 5와 같은 용접 조건으로 실험 용접한 결과의 일부로 HP-VEE에 나타난 전압, 전류 파형으로 시판되고 있는 고산화티탄계 용접봉 (CR13, CR14), 국외에서 시판 중인 수중 용접봉 (UWCS, TN20), 시험적으로 자체 개발한 수중용 피복 아크 용접봉(UWX1, UWX2)을 비교한 것이다. 여기서 X축은 시간 좌표계로서 용접시작 후 정상상태에 도달한다고 여겨지는 24초부터 44초까지의 시간을 택하였으며, Y축은 전압과 전류 좌표계로 전압은 0~60V 범위로 전류는 0~320A의 범위로 자동적으로 측정되게 하였다. 즉, 용접 실험 시작 후 시편의 중앙 부근에서 20초간 이루어진 부분을 선택하여 아크의 안정성을 확인한 것이다. 전압과 전류의 신호 크기가 급격히 변화하는 위치에서 아크가 불안정하게 이루어지고 용접불량에 예상되므로, 피복재 성분의 변화와 조성비에도 연관성이 있을 것으로 생각된다.

Fig. 3에서 관찰하여 보면 전압과 전류의 변화가 TN20과 UWX1에서 상당히 만족스럽게 아크의 안정성이 확인되었고, CR14에서는 급격한 전압과 전류의 변화를 확인 할 수 있었다. 아크 안정성에 대한 심도있는 분석이 요구되지만, 본 실험 연구에서는 시험 제작된 수중 용접봉의 아크현상을 정밀 측정하고 서로 비교 분석하여 피복재의 재료와 조성 비율의 개선에 관한 기초자료로 삼고자 하였다. 이 실험은 수심 200mm로 제한된 물탱크 속의 수돗물에서 이루어졌으나, 잠수부의 수중아크 용접에 대한 숙련도와 수심에 따라서도 아크의 안정성에 변화가 많을 것으로 생각된다.

#### 3.2 슬래그 박리성과 스파터 발생

습식 수중 아크용접은 물 속에서 행하는 만큼 슬래그를 제거하는 작업은 쉬운 일이 아니며, 특히 수중용접부에 슬래그가 밀착되어 박리성이 나쁘면 습식 수중 아크용접의 실용화에 어려움이 가중될 것이다. 본 연구에서는 전술한 여섯 종류의 용접봉에 대하여 수중 용접 후의 슬래그 박리성에 대

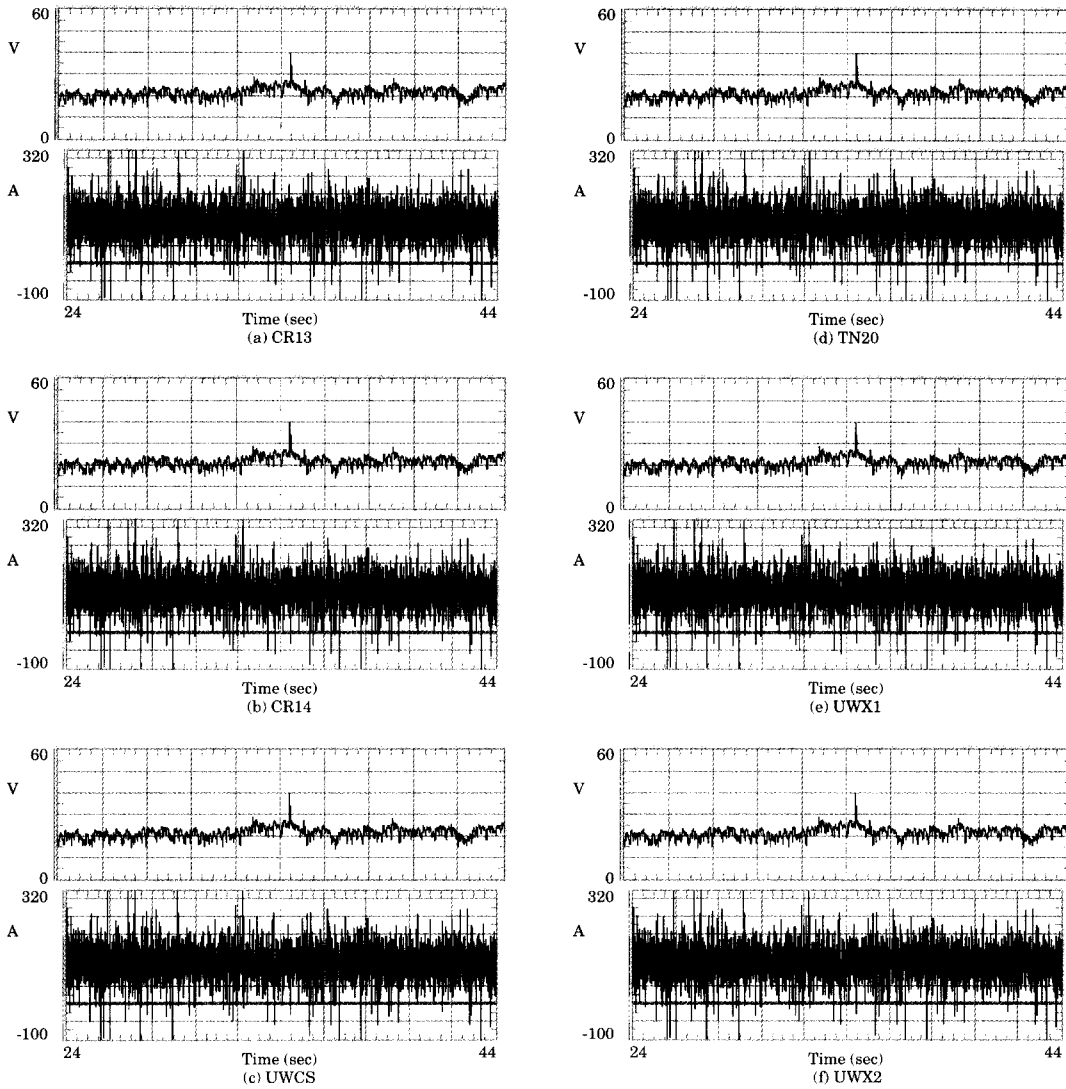


Fig. 3 HP-VEE data acquisition system of voltage and current signals

하여 검토하여 보았다.

Photo.1은 수중용접에서의 슬래그 제거전의 비드를 나타낸 것이다. 슬래그 제거는 수중에서 용접 실험을 하였지만 대기 중에서 꺼내어 제거하였다. 용접시 물의 비등 현상과 주변의 물에 의하여 급속 냉각되므로 슬래그가 용착 금속 표면에 부착되는 경향과 그 모양이 허물어지는 현상이 나타났으며, 용접부 주변의 스패트는 급속 냉각에 의해 적게 나타나는 것을 관찰 할 수 있었다. 수중 용접 실험에서의 스패트는 CR13, CR14, TN20 및

UWX1에서는 전반적으로 스패터를 발견 할 수 없었으며, UWX2 및 UWCS에서는 슬래그 제거가 다소 어려웠지만 큰 차이는 발견할 수 없었다.

### 3.3 비드 외관

Photo. 2 및 Photo. 3은 수중용접에 의한 용접 비드의 외관을 나타낸 것이다. 시험편 대부분 용접 비드가 양호하게 나타났다. 특히 시험 개발된 용접봉 UWX1과 UWX2가 비드의 퍼짐성이 크게 나타나고, Photo. 3 에 보는 바와 같이 비드단면의 형상이

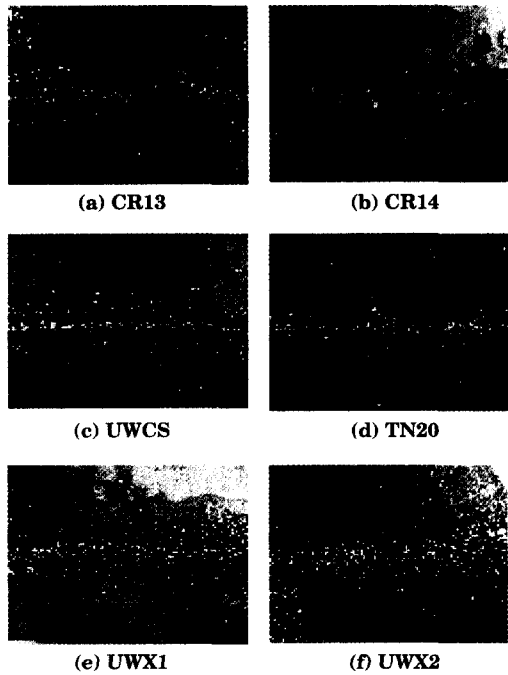


Photo. 1 Appearance of slag in various welding electrode when underwater wet welding

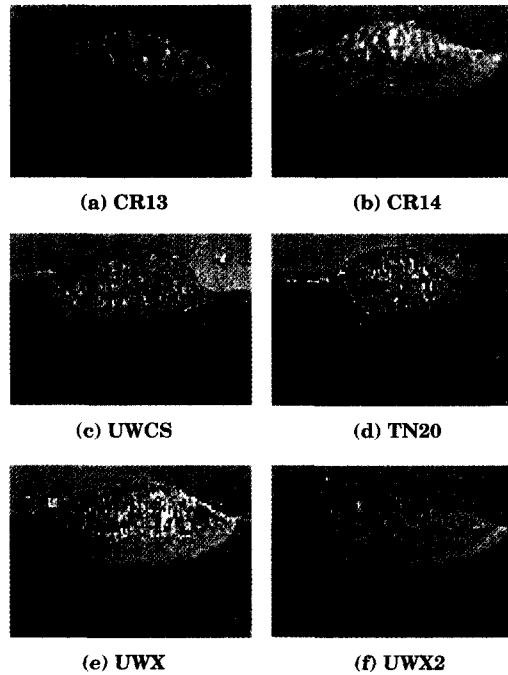


Photo. 3 General appearance of alloy cross sections

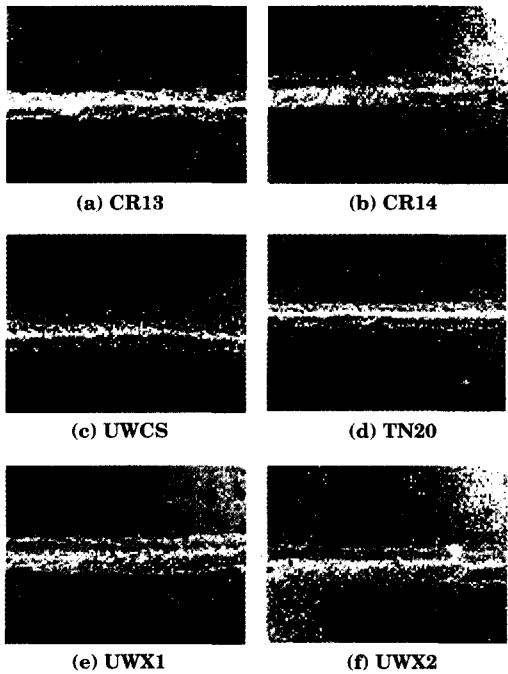


Photo. 2 General appearance of weld alloy surface

타원형으로 퍼져있음을 알 수있었다. UWCS와 TN20은 비드의 퍼짐성은 보통이나 비드 형상면에서는 상당히 양호한 편이었다. 본 실험의 범위 내에서 시판되는 일반 용접봉들과 비교했을 때 수중용접봉으로 개발한 용접봉이 비드 외관과 비드 거칠기면에서 개선의 효과가 있었으며, 외국산 수중용접봉과 비교했을 때 큰 차이를 느낄 수는 없었다.

동일한 용접 조건에서 동일 규격의 용접봉 심선을 사용한다고 할 때 피복제 성분의 배합비 변화에 의해 충분히 개선할 수 있음을 알 수 있었다.

### 3.4 경도 시험

Fig. 4는 Table 5와 같은 수중 용접 조건으로 용접한 시편의 단면에 대한 경도 시험 결과를 나타내었다. Photo. 3과 같은 비드단면에 대한 HAZ부의 경도 특성을 검토하기 위하여 마이크로비크스 경도시험기를 이용하여 조사하였다. 이때 하중은 1,000g으로 일정하게 하여 비드 단면에 대하여 표면에서 수직방향으로 0.5mm 간격으로 측정하였다. 각종 용접봉에 따라 수중 비드 용접한 시편의

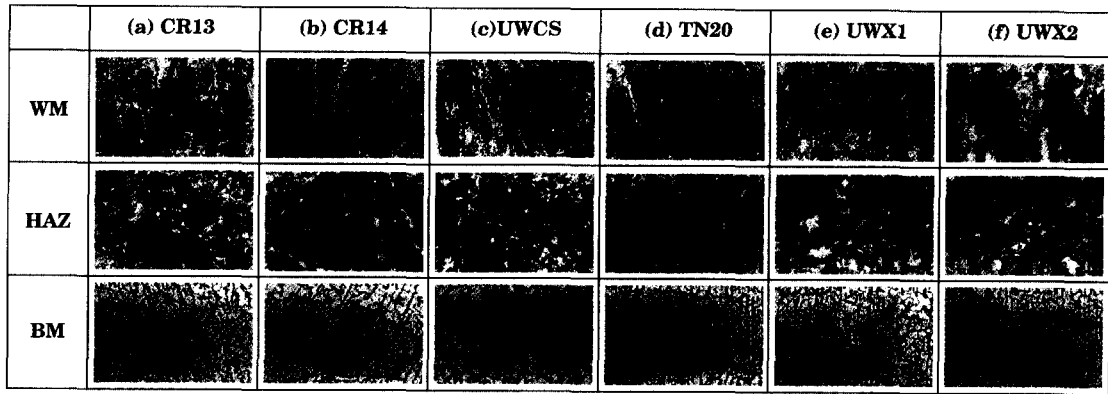


Photo. 4 Microstructures of weld

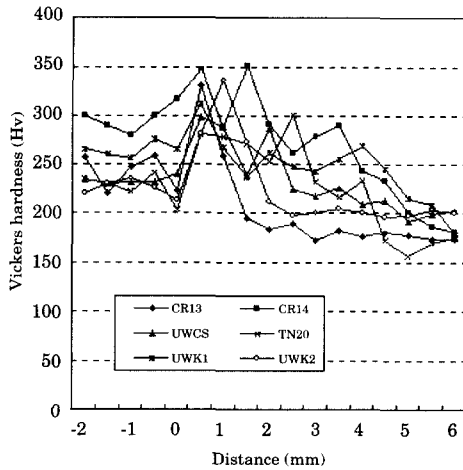


Fig. 4 Hardness distribution of underwater wet welds

경도분포를 고찰해 보면, 본드부 (Bond line)에서 약 1.5mm 정도가 열영향부로 되고, 일반 용접과는 다르게 물에 의한 급냉의 영향으로 열영향부의 마이크로비크스 경도치가 높게 됨을 알 수 있었다. 이는 냉각속도가 빠를수록 최고 경도치는 증가하는 경향이 있다고 할 수 있겠다. 수중 비드 용접한 시편의 열영향부에 대한 경도상승을 서로 비교해 보면, Fig. 4에서 보는 바와 같이 UWCS, TN20가 상대적으로 열영향부에서의 경도치가 낮고 그 확장 범위도 좁다는 것을 알 수 있었다. 여기서 UWX1도 상대적으로 높게 나타나지는 않았다. 이것은 수중용 피복 아크 용접봉 제작시 피복제 성분에 따라 최고 경도치의 개선 가능성이 있으며, 피복제 성분 비율에 따라서 수중 용접부의 최고 경도

에 영향이 있는 것으로 사료된다.

본 실험 결과를 비교 분석해 보면 습식 수중 아크 용접시 열영향부에 대한 경도 분포는 용접봉의 종류에 관계 없이 전반적으로 열영향부에서 급상승되었다. 이것은 습식 수중 아크 용접 자체가 용접부에 강한 수냉에 의해 열처리의 효과가 있었음을 나타내고, 기계적 특성에도 영향이 있을 것으로 예상된다.

### 3.5 금속 조직

Photo. 4는 용접부 단면의 현미경 조직으로 모재 부위는 페라이트와 펄라이트 조직을 나타내고 있으며, HAZ부는 모재부에 비해 결정립이 다소 커져 있음을 알 수 있으며, 베이나이트 조직과 마텐사이트 조직이 혼재 되어 있었다. 즉, 빠른 냉각속도로 인하여 열영향부는 조대한 침상의 마텐사이트 조직이 보이며, 일부 베이나이트 조직도 혼합되어 있는 것으로 사료된다. 표면에서의 용접 금속 조직은 마텐사이트 조직이 발달되어 있고, 공기 중 용접에서와 같은 베이나이트조직은 미세하게 나타났다. 여기서 UWCS, TN20, UWX1에서 마텐사이트 조직이 대체적으로 다른 조직에 비해 안정화되어 있음을 발견할 수 있었다.

### 5. 결론

용접봉은 일반적으로 용접봉 제작사에서 사용 중인 시료들을 배합하여 수 차례의 실험에 의해 기준에 자체 연구되었던 용접봉에 방해석을 추가 침

가한 UWX1과 금홍석의 비율을 조정하고 방해석을 제외시켜 제작한 용접봉 UWX2, J사의 고산화 티탄계 CR13과 CR14, 미국산 UWCS와 독일산 TN20의 용접봉을 동일한 규격과 같은 조건 하에서 선체용 압연 강판(KR-RA)에 대한 습식 수중 아크 용접 실험을 실시한 결과를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

1) 피복제의 조성비율을 개선하여 습식 수중 아크 용접봉으로 시험 개발된 UWX1은 습식 수중 아크 용접봉으로 실용화 할 수 있을 것으로 사료된다.

2) 아크의 안정성 면에서도 TN20과 UWX1이 비교적 안정적이었으며, CR14에서는 다소 불안정하였다.

3) 슬래그 박리성과 스패터 발생 및 비드 외관 등은 모든 용접봉에서 거의 비슷한 경향이 나타났다.

4) 실험에 이용된 용접봉들의 HAZ부 경도는 급격히 상승하였으며, HAZ부 금속 조직도 급격한 온도 변화에 의해 마텐사이트 조직이 현저하게 증가되었다. 그 중에서 UWCS와 TN20이 상대적으로 마텐사이트 조직이 안정화 되어 있었고, UWX1도 양호한 편이었다.

후 기

본 연구에 적극적으로 참여하여 어려운 수중용접과 자료정리에 많은 도움을 준 부경대학교 대학원 기계공학과에 재학 중인 노창석군과 정교현군에게 깊이 감사드린다.

참고문헌

[1] 오세규, 김민남, "TMCP강의 습식수중 아크 용접성에 관한 고찰", 대한용접학회지, 5(4), 1987

[2] 김민남, 강정근, "습식 수중 용접봉의 피복ro발에 관한 기초연구", 한국해양공학회지, 13(4), pp.28~36, 1999

[3] 松田一夫 外 2名 : 水中溶接による軟鋼溶接?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

[4] 屋良秀夫, 眞喜志康二, 菊田米男, 松田福久 : 濕式水中ア-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

[5] Richard N. Fultion, "Progress in underwater welding", J of Ocean industry, pp. 40~44, April 1998

[6] Duke Ogden, "School brings wet welder training on-site", Welding journal, pp. 54~56, Jure 1997

[7] D. L. Olson and S. Ibarra, "Underwater welding metallurgy", International workshop on Quality in Underwater welding of Marine structures, pp. 1~9, November 1985

[8] R. J. Dexter, E. B. Norris, W. R. Schick, P. D. Watson, "Performance of underwater weldments", Ship structure committee SSC-335, pp. 1-241, 1990

[9] A. E. Asnis and I. M. Savich, "The new method of mechanized underwater weldings", Proceedings of the Int. Conference. IIW. PP.311~317, June, 1983.

[10] AWS D3.6M / ANSI 1999 " Specification for Underwater Welding", pp. 1~91, 1999

[11] I.M. Richardson, "Arc welding underwater", Welding design and fabrication, pp.48-55, march, 1991

[12] C.E. Grubbs and O.W. Seth, "Underwater wet welding with manual arc electrodes", Underwater welding for offshore installations, The welding Institute, pp. 17~33, 1977

[13] A. Sanchez-Osio, S. Liu, D. L. Olson, "Desingning Shiedlded Metal Arc Consumables for Underwater Wet Welding in Offshore Applications", Transactions of the ASME, Vol. 117, pp.212-220, 1995

저 자 소 개



김민남(金敏男)

1942년 7월 5일생. 1971년 2월 동아대학교 공과대학 기계공학과 졸업(공학사). 1979년 2월 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 1997년 2월 부산수산대학교 대학원 기관학과 졸업(공학박사). 현재 부경대학교 공과대학 기계공학부 교수



김복인(金福仁)

1940년 7월 20일생. 1971년 2월 동아대학교 공과대학 기계공학과 졸업(공학사). 1980년 2월 동아대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 2000년 3월 - 부경대학교 대학원 기계공학과 박사과정. 현재 동명대학 기계자동화계열 교수