

## 습식 수중 아크용접봉의 국산화개발에 관한 기초연구

김민남\*, 김복인\*\*, 노창석\*\*

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

Min-Nam Kim, Bok-In Kim, , Chang-Suk Rho

\* 부경대학교 기계공학부

\*\* 부경대학교 대학원 기계공학과

**Abstract** : Underwater wet 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(UW-CS-01, TN-20) and the other two types(UW-X1, UW-X2) where individually designed flux coated electrode for experimental welding purpose.

**Key words**: Uunderwater welding 수중 용접, Underwater welding electrode 수중 용접봉, Arc stability 아크 안정성, Slag 슬래그, Bead appearance 비드 외관, Heat affect zone 열영향부

#### 1. 서론

지구 표면적의 71%를 차지하는 바다는 인류에게 남은 마지막 자원의 보고이다. 산업혁명 시대를 거쳐 후기산업사회에 이르기까지 고도로 성장한 공업발전은 육지자원을 고갈시켰고 동시에 심각한 환경오염을 가져왔습니다. 우리나라의 경우 삼면이 바다이고 해안선의 굴곡이 심하여 전 국토의 해안선 길이가 17,286km에 달한다. 최근 급격한 경제발전에 따라 해양자원 개발과 필요성과 해안의 이용도가 높아지고 있다. 인공섬, 해양도시건설, 석유 시추, 및 극지개발 등 해안·해양의 전반적인 개발이 이루어 질 전망이다. 결국 모든 산업의 기반 기술이라 할 수 있는 용접 분야도 수중 용접 기술로서 중요한 위치를 차지하게 될 것으로 생각된다.<sup>[1] [5]</sup>

일반적으로 담수 또는 해수 중에서 행하는 수중 용접은 교량, 해저 파이프라인, 해양 구조물 등의 건조시의 현장용 장비나 보수용접에 적용되지 만, 용접법 자체의 개발뿐만 아니라, 구조물의 조립 기술과 잠수 기술, 또한 우수한 용접 기술을

함께 가춘 기술자를 필요로 하고, 복잡한 설비를 갖추어야 하는 어려운 문제들이 대두되고, 수중아크 용접 이음부는 급냉되어 경도와 취성이 증가 하는 등 여러 가지 해결하지 못한 과제들을 가지고 있다.<sup>[6]-[8]</sup>

습식 수중 아크 용접은 각종 구조물의 제작에 있어서 용접 이음에 대한 신뢰성을 높이고 용접 성능을 만족시킬 수 있는 기초적인 문제점들을 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 기계적 성질을 평가하여 습식 수중 아크 용접성을 연구, 검토해 볼 필요가 있다.

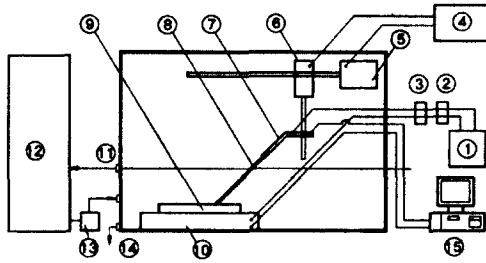
본 연구는 수중에서 2차원 속도 제어가 가능하도록 자체적으로 설계, 제작한 수중 용접 장치에서 자체 시험 개발한 수중용 피복 아크 용접봉과 일반적으로 사용되는 국산 피복 아크 용접봉 및 국외에서 개발되어 사용 중인 수중 피복 아크 용접봉을 사용하여 습식 수중 아크 용접에 의한 아크의 안정성, 슬래그 박리성, 비드 모양, 경도 등

의 용접에 대한 기초사항을 비교 고찰함으로써 습식 수중 아크 용접에 대한 용접봉의 적용성과 수중 용접시의 최적 조건을 선정하여 습식 수중 아크 용접의 실용화를 위한 기초를 얻는데 중점을 두었다.

용된 용접기는 용량 600A의 직류 용접기이며, 직류 용접기이며, 직류 정극성으로 수심 200mm에서 실시하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치



- 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

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 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 수조의 수온을 일정하게 유지시키기 위해 상수도수를 계속적하여 순환할 수 있도록 순환장치가 연결되어있고, 신호변환장치를 이용하여 아크의 안정성을 확인하였다. 실험에 사

### 2.2 실험재료

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

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					

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 용접봉을 사용하였다.

또한 시험 개발된 수중 용접봉의 심선은 용접

Table 4 Chemical composition of covering (UWX1, UWX2)  
Metal for XRF-1700

Type	Chemical composition (wt, %)													
	Ca	Ti	Si	Mn	Fe	Al	Na	K	Mg	Zr	Nb	P	S	Cr
X1	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	-
X2	9.22	25.15	25.91	11.15	8.74	7.94	5.02	5.2	1.28	0.21	0.13	0.03	-	0.06

봉 제작 회사에서 용접봉 제작에 일반적으로 사용되고 있는 연강용 피복아크 용접봉의 심선 재질과 동일한 SWRY-11을 사용하였으며, Table 3에서 화학적 조성을 나타내었다. 또한 자체 개발한 피복제의 화학적 성분은 Table 4에서 나타내었다.

2.3 실험방법

습식 수중 아크 용접에서는 물 속에서 아크용접을 할 수 있는 기술의 숙달이 필수적인데 이번 실험에서는 수중 용접 장치를 이용하였다.

지름 32mm의 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 급·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. 습식 수중 아크 용접된 시편들을 기계톱 및 정밀 전단기로 절단하여 각각의 시험편을 2000번까지 사포로 연마한 후 알루미늄으로 에칭하여 용접부, 열영향부, 모재 부위별로 마이크로 비커스 경도시험기를 사용하여 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.4 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 정압, 용접 속도, 용접봉 재질, 모재 등의 여러 가지 변수에 따라 달라질 수 있으나, 본 연구에서는 용접봉의 종류에 따른 아크의 안정성에 대하여 집중적으로 관찰하였다.

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

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. 2와 Fig.3은 Table 5와 같은 용접 조건으로 실험용접한 결과의 일부로 HP-VEE에 나타난 전압, 전류 파형으로 시판되고 있는 고산화탄계 용접봉(CR13, CR14), 국외에서 시판중인 수중용접봉 (UWCS, TN20), 시험적으로 자체 개발한 수중용 피복 아크 용접봉(UWX1, UWX2)을 비교한 것이다. 여기서 X축은 시간 좌표계로서 12k~22k (500point/sec), Y축은 전압과 전류 좌표계로 전압은 0~60V 범위로 전류는 -100~320A 범위로 한정하여 비교 분석하였다. 즉, 용접 실험 시

습식 수중 아크용접봉의 국산화개발에 관한 기초연구

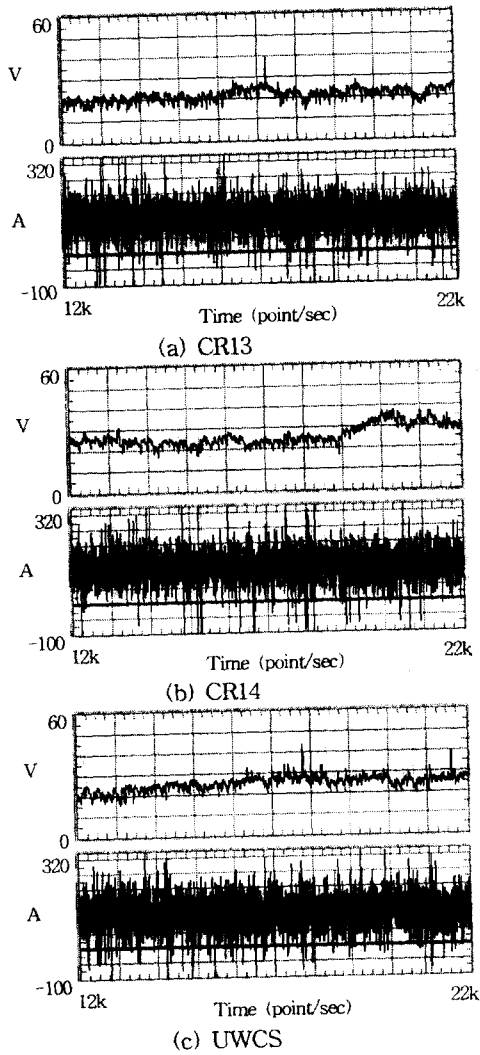


Fig. 6 HP-VEE Data acquisition system of voltage and current signals (CR13, CR14, UWCS)

작 후 시편의 중앙 부근에서 20초간 이루어진 부분을 선택하여 아크의 안정성을 확인 한 것이다. 전압과 전류의 신호의 크기가 급격히 변화하는 위치에서 아크가 불안정하게 이루어지고 용접불량이 예상될 것이다. Fig. 3와 Fig. 4에서 관찰하여 보면 전압과 전류의 변화가 TN20과 UWX1에서 상당히 만족스럽게 아크의 안정성이 확인되었고, CR14에서는 급격한 전압과 전류의 변화를 확인할 수 있었다.

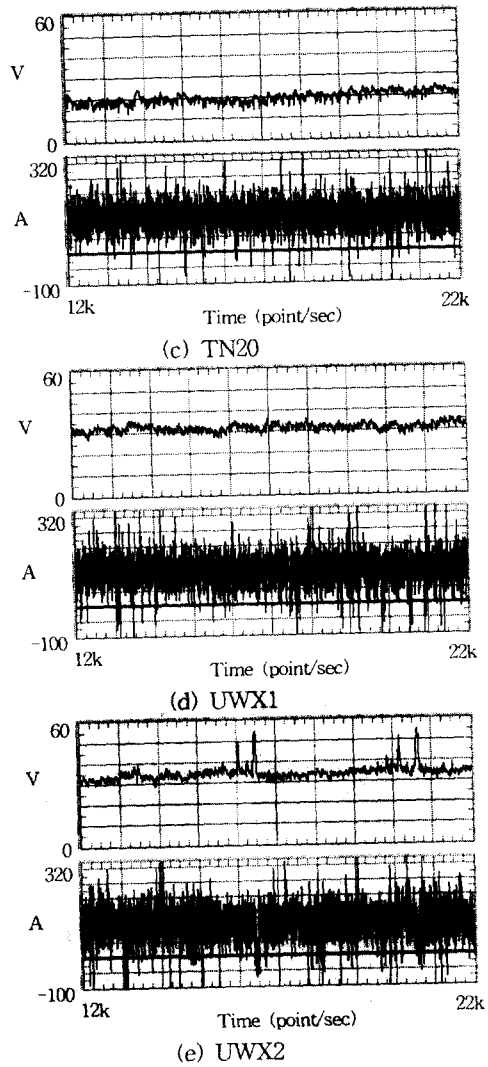


Fig. 7 HP-VEE Data acquisition system of voltage and current signals (TN20, UWX1, UWX2)

이 실험은 수심 200mm로 제한된 물탱크 속에서 수돗물에서 이루어졌었다. 용접 조건이 달라지고 담·해수 속에서 용접 할 수 있는 숙련 정도와 수심에 따라서도 아크의 안정성에 변화가 있는 것으로 생각되며, 좀 더 깊은 연구가 지속적으로 필요하다고 본다.

3.2 슬래그 박리성과 스펙터 발생

습식 수중 아크용접은 물 속에서 행하는 만큼 슬래그를 제거하는 것이 쉬운 일이 아니며, 특히 용접부에 슬래그가 밀착되어 박리성이 나쁘면 습식 수중 아크용접의 실용화에 어려움이 가중 될 것이다. 본 연구에서는 전술한 여섯 종류의 용접봉에 대하여 수중 용접 후의 슬래그 박리성에 대하여 검토하여 보았다.

Photo.1는 수중용접에서의 슬래그 제거전의 비드를 나타낸 것이다. 슬래그 제거는 수중에서 용접 실험을 하였지만 대기 중에서 꺼내어 제거하였다. 용접시 물의 비등 현상과 수온에 의한 급속 냉각에 의해 슬래그가 용착 금속 표면에 부착되는 경향과 그 모양이 허물어지는 현상이 나타났으며, 용접부 주변의 스패터는 급속 냉각에 의해 적게 나타나는 것을 관찰 할 수 있었다.

수중 용접 실험에서의 스패터는 고산화 티탄계 및 수입산과 자체 개발한 용접봉들에서는 전반적으로 스패터를 발견 할 수 없었으며, 슬래그 제거시 UWCS에서 제거가 다소 어려웠지만 큰 차이를 발견할 수 없었다.

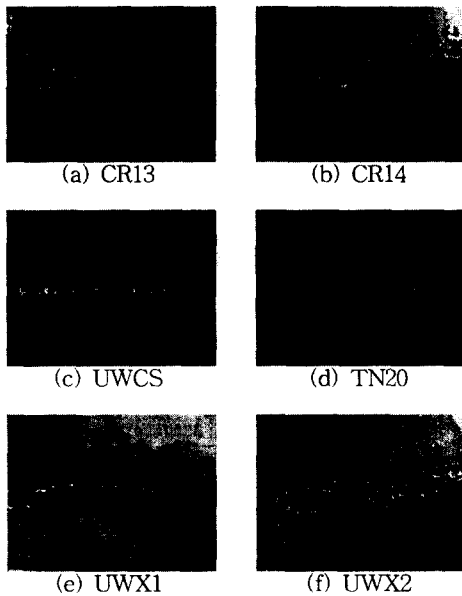


Photo. 1 Appearance of slag in various welding electrode when underwater wet welding

3.2 비드 외관

Photo. 2 및 3은 수중용접에 의한 용접 비드의

외관을 나타낸 것이다. 시험편 대부분 용접 비드가 양호하게 나왔다. 특히 시험 개발된 용접봉 UWX1과 UWX2가 더 비드의 퍼짐성이 좋았고, 외국산 용접봉 UWCS와 TN20은 비드의 퍼짐성은 보통이나 비드 형상면에서는 상당히 양호한편이었다.

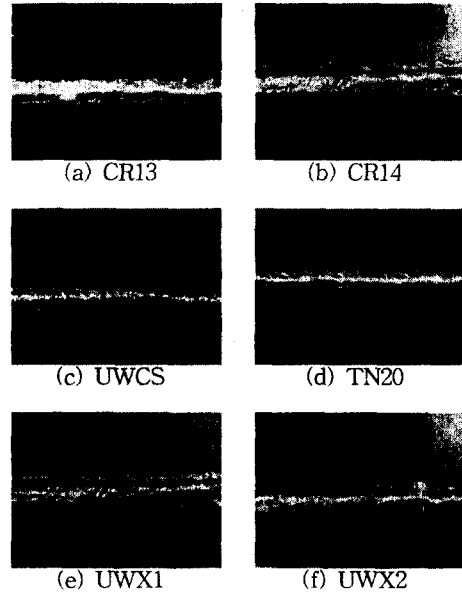


Photo. 2 General appearance of weld alloy surface

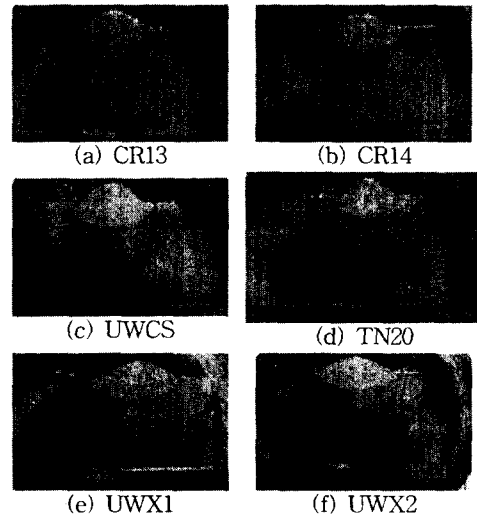


Photo. 3 General appearance of weld alloy cross sections

이렇게 볼 때 시판되는 일반 용접봉들과 비교했을 때 수중용접봉으로 개발한 용접봉이 비드 외관과 비드 거칠기에서 좋았고, 외국산 수중용접봉과 비교했을 때 크나큰 차이를 느낄 수가 없었으며 동일한 용접 조건에서 동일 규격의 용접봉 심선을 사용한다고 할 때 피복제 성분의 배합비 변화에 의해 충분히 개선할 수 있음을 나타낸다.

### 3.3 경도 시험

Fig. 5는 Table 5와 같은 수중 용접 조건으로 용접부의 경도 특성을 검토하기 위하여 비드단면(Photo. 3)의 경도는 마이크로비크스 경도시험기를 이용하여 조사하였다. 이때 하중은 1,000g으로 일정하게 하여 비드 단면에 대하여 표면에서 수직방향으로 0.5mm 간격으로 측정하였다.

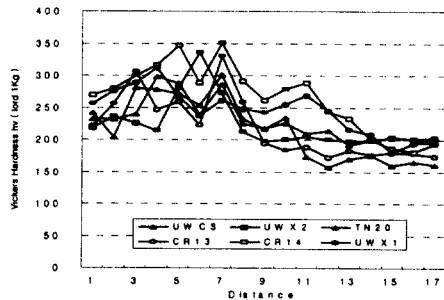


Fig 5. Hardness distribution of underwater wet welds

각종 용접봉에 따라 수중 비드 용접한 시편의 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 있다. 이는 냉각속도가 빠를수록 최고 경도치는 증가하는 경향이 있다고 할 수 있다.

수중 비드 용접한 시편의 열영향부에 대한 경도상승은 각각 비교해보면, Fig. 5와 Photo. 3에서와 같이 UWCS, TN20가 상대적으로 열영향부에서의 경도치가 낮고 그 확장 범위도 좁다는 것을 알 수 있었다. 여기서 UW X1도 상대적으로 나쁘지 않다. 이것은 수중용 피복 아크 용접봉 제작시 피복제 성분에 따라 최고 경도치의 개선 가능성이 있으며, 피복제 성분 비율에 따라서 수중 용접부의 최고 경도에 영향이 있는 것으로 사료된다.

본 실험 결과를 비교 분석해 보면 습식 수중 아크 용접시 열영향부에 대한 경도 분포는 용접봉의 종류에 관계 없이 전반적으로 열영향부에서 급상승되었고, 이것은 습식 수중 아크 용접 자체가 용접부에 수냉에 의한 열처리 효과가 있었음을 알 수 있었다.

## 5. 결론

용접봉은 일반적으로 용접봉 제작사에서 사용 중인 14가지의 시료를 배합하여 수 차례의 시험에 의해 기존에 자체 연구되었던 용접봉에 방해석을 추가 첨가한 UW X1과 금홍석의 비율을 조정하고 방해석을 제외시킨 UW X2를 제작한 용접봉, J사의 고산화티탄계 CR13과 CR14, 미국산 UWCS와 독일산 TN-20의 용접봉을 동일한 규격과 같은 조건 하에서 선체용 압연 강판(KR-RA)에 대한 습식 수중 아크 용접 실험을 실시한 결과 중에서, 그 특성을 고찰해 본 결과 다음과 같이 요약하였다.

- 1) 잠수 및 용접 기술과 기능이 숙련되면 습식 수중 아크 용접의 실용화가 가능하다.
- 2) 피복제의 재료 조성비를 개선하여 습식 수중 아크 용접봉을 개발하면, 실제 수중 아크 용접봉에 이용 할 수 있다.
- 3) 시험 제작한 지름 3.2mm의 수중 용접봉을 사용하여, 두께 11mm의 KR-RA강판의 수중 아크 용접시의 최적 용접 전류는 120A 정도임을 수 차례의 실험에 의해 알 수 있었다. 부가적으로 자동 용접시 대기 중에서는 100A 정도에서 최적치를 발견했었다.
- 4) 피복제의 개선에 따라서 수중 아크 용접부의 열영향부 최고 경도가 개선됨을 알 수 있었으며, 시험 제작한 수중 용접봉 중에서 UW X1이 좀 더 개선되었고, 아크의 안정성면에서도 좋게 나왔었다.

## 참고문헌

- [1] 오세규, 김민남, " TMCP강의 습식수중 아크 용접성에 관한 고찰", 대한용접학회지, 5(4), 1987
- [2] 김민남, 강정근, " 습식 수중 용접봉의 피복제 개발에 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
- [4] 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関する研究(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, June 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