

◎ 論 文

# TMCP강의 수중 ARC용접 실험과 용접성<sup>+</sup>

오 세 규\* · 김 민 남\*\*

## An Experimental Study on Underwater Wet Arc Welding and Weldability

S. K. Oh and M. N. Kim

**Key Words :** Underwater Wet Arc Welding(습식수중아크용접), Welding Condition(용접 조건), Bead Appearance(비드외관), HAZ(열영향부), Hardness(경도), Mechanical Properties(기계적성질)

### Abstract

The feasibility for a practical use of underwater wet arc welding process is experimentally investigated by using low hydrogen and high oxide type electrodes and TMCP steel plates. Main results are summarized as follows:

- 1) The absorption speed of the coated low hydrogen and high titanium oxide type electrodes becomes constant after about 30 minutes in water, and more steeping time in water does not influence welding arc behavior.
- 2) By bead appearance and X-ray inspection, the high titanium oxide type electrode is better than the low hydrogen type in underwater wet arc welding process.
- 3) The mechanical properties of underwater wet arc welds depend upon welding conditions more than those of in-air welds, and the optimum welding condition can be obtained.
- 4) Because of quenching effect by rapid cooling rate in underwater wet welding, the maximum hardness of HAZ is increased relatively higher in underwater wet welding process.

### 1. 緒 論

해양구조물의 설비 및 보수수단으로 수중용접에 대한 기술개발의 중요성이 강조되어 선진각국에서는 수중용접에 대한 연구활동이 활발하며, 수중용접 기

술의 실용화를 위해 많은 노력이 경주되고 있다.

습식수중용접에서는 용접분위기가 수중이므로 피복아크용접봉을 사용할 경우, 시간이 경과함에 따라 피복제가 흡습하게 되고 용접시 높은 아크열에 의하여 수소와 산소가 쉽게 용착금속에 침입하여 취성운

<sup>+</sup> 1987년도 한국해양공학회 춘계학술대회 발표(1987년 6월)

\* 정희원, 부산수산대학 이공학부 박용기계공학과

\*\* 정희원, 부산개발대학 기계공학과

발생하게 된다. 또한 용접부가 물과 접촉하게 되므로 냉각속도가 매우 빨라 열영향부의 경도가 크게 되고, 이는 냉간균열이나 취성의 원인이 된다. 따라서 습식수중용접부의 기계적, 금속적 특성은 육상용접의 경우와 많은 차이를 나타내게 된다.

수중용접 방식에는 건식, 국부건식, 습식등으로 대별되고 있으나, 본 연구에서는 비교적 취습이 용이하고 경비가 적게 드는 습식수중아크용접(under-water wet arc welding) 방식을 택하여, 신소재로 알려진 TMCP(thermo-mechanical control process) 강을 모재로 하여, 용접실험을 통하여 용접성을 고찰하고 습식수중 아크용접의 최적조건을 추구한 것이다.

2. 實驗材料 및 實驗方法

2.1 試驗片 및 熔接棒

본 실험에 사용한 용접시편의 재료는 TMCP(API 2H grade 50)강을 100×60×12mm 크 기계톱으로 절단하여 기계가공한 후 Fig.1과 같은 그루브(gr-

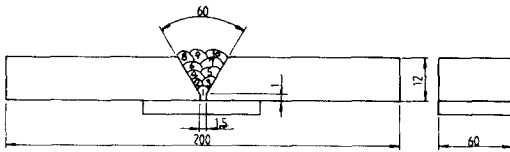


Fig.1 Shape of specimen.

oove) 형상의 다층 맞대기이음용접과 비드용접(bead welding)을 실시하였으며, 시험재료의 화학조성과 기계적 성질은 Table 1과 같다. 다층 맞대기이음

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of base metal

Chemical composition (wt%)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Nb	Ceg
	0.10	0.18	1.47	0.004	0.001	0.18	0.15	0.01	0.01	0.37
Mechanical properties	Yield strength (MPa)		Tensile strength (MPa)			Elongation(%)		Impact value(J)		
	404		524			35		280		

Table 2 Chemical composition and mechanical properties of weld metal

Chemical composition (wt%)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Co	Cu	Mo	Al	V	Sn
	0.089	0.051	0.734	0.013	0.007	0.091	0.124	0.019	0.129	0.208	0.021	0.014	0.017
Mechanical properties	Yield strength (MPa)		Tensile strength (MPa)			Elongation(%)		Impact value(J)					
	470		530			28		150					

용접에 대한 급습시험편은 AWS규격에 따라 Fig.2와 같이 기계가공하였으며, 용접이음부의 강도를 측



Fig.2 Transverse free bend test specimen.

정하기 위한 인장시험편은 Fig.3과 같이 기계가공하여 용접부의 양면에 1mm 길이의 V형 노치(notch)

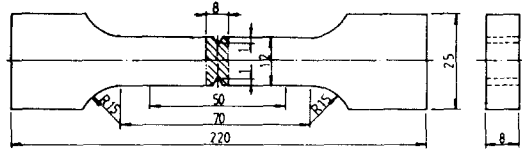


Fig.3 Tension test specimen.

를 주었다. 또한 용접부에 V형 노치를 준 충격시험편은 Fig.4에 표시되어 있다.

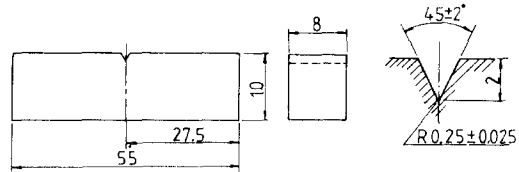


Fig.4 Impact specimen.

용접실험에 사용한 용접봉은 E5016에 해당되는 저수소계 용접봉과 E5013에 해당되는 고산화티탄계의 고장력강용 용접봉이며, 고산화티탄계 용접봉의 화학조성과 기계적 성질은 Table 2에 나타내고 있다.

2.2 實驗裝置 및 實驗方法

습식수중아크용접을 실시하기 위한 실험장치는 용접속도, 용접각도 및 운봉비등을 임의로 변경할 수 있도록 자작한 수중용접 실험장치로, 1200×850×800mm의 수조내부에 수도물을 순환시키면서, 모재 이동용 운반차를 설치하여 용접속도의 조절도 가능하게 하였다. 용접기는 수하특성의 발전형 직류용접기(용량 400A)를 이용하였으며, 직류 정극성으로 수심 200mm에서 Table 3과 같은 용접조건으로 용접 실험을 실시하였다. 용접봉은 약 300°C의 온도에서 1시간 건조시킨 후, 특별한 방수처리를 하지 않고 바로 용접하였다. 기계적 성질을 측정하기 위한 용접시편의 제작을 위해, 10층(pass)의 맞대기 이음용접을 실시하였으며, 각 층 사이에 수중에서 슬래그(slag) 제거작업이 곤란하여, 시편을 대기중에 꺼내어 슬래그를 제거한 후, 다시 물속에 넣고 용접실험을 실시하였다. 이 때문에 각 층사이에 소요된 시간은 약 3분정도 되었다.

본 연구에 이용된 실험장치의 의관과 개략도를 Photo.1과 Fig.5에 나타내었으며, 수중용접조건은

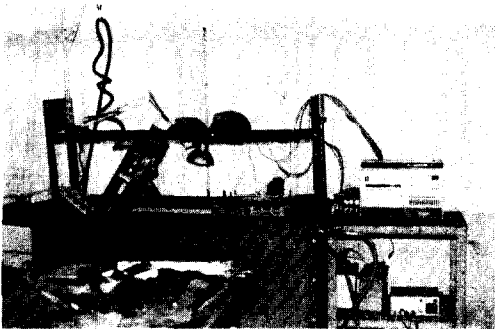


Photo.1 Welding apparatus.

Table 3과 같다. 비드용접시 열사이클(thermal cycle)을 측정하기 위하여 시편이면에서 지름 3.2

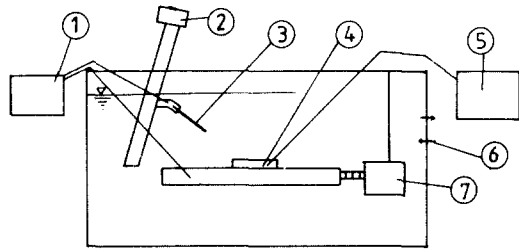


Fig.5 Schematic diagram of experimental equipment

- (1) Welding machine, (2) Electrode moving device, (3) Electrode, (4) Specimen, (5) Temperature recording device, (6) Cooling water, (7) Specimen moving device

mm의 드릴구멍을 뚫고, 그 속에 지름 0.6mm의 CA 열전대를 넣어 퍼커션용접(Percussion welding)을 한 후, 특수한 방수처리를 하였다. 측정점은 비드용접선의 중앙부분 표면에서 약 1mm 내측인 곳으로, 용융선에서 약 0.5mm 떨어진 열영향부이다. 또한 다층 맞대기이음용접에 대한 시편의 측정은 중앙 본드부의 용융선에서 모재쪽으로 0.6mm정도의 열영향부이며, 열기전력의 기록은 검류계(galvanometer)를 이용한 마그네틱 오실로그래프(magnetic oscillograph)를 사용하였다.

3. 結果 및 考察

3.1 被覆劑의 浸水時間과 吸水量

저수소계와 고산화티탄계 용접봉의 피복제에 대한 흡수백분율을 Fig.6에 나타내고 있다. 피복제의 흡수속도는 약 30분정도의 침수시간에서 거의 포화상태로 되고, 그 이상의 시간경과에 대해서는 흡수량의 증가가 거의 일정하였다. 그러므로 초기 흡수량을 줄이기 위하여 피복제의 방수에 대한 연구가 필요하다고 생각된다. 본 용접실험의 경우, 저수소에

Table 3 Conditions of underwater wet arc welding

	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Electrode angle (°)	Bead length /electrode length used	Welding speed (cm/min)	Root gap (mm)	No. of pass
1	100	20	60	1	28	1.5	10
2	140	25	60	1	30	1.5	10
3	180	30	60	1	32	1.5	10
4	220	35	60	1	32	1.5	10
5	260	40	60	1	35	1.5	10

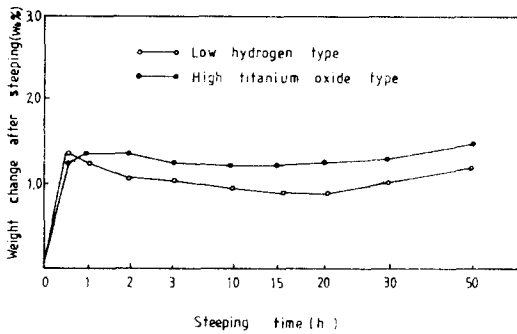


Fig. 6 Relationship between steeping time and weight change after steeping of coated electrodes

서 짧은 시간만 침수되었으므로 피복제의 흡수량은 무시할 정도였으며, 수중용접시 피복제의 흡수에 대한 영향은 크게 감지할 수 없었다.

3.2 비드外觀과 X線 透過試驗

Photo. 2와 Photo. 3은 지름 4mm의 저수소계 및 고산화티탄계 용접봉을 사용하여 습식수중비드용접을 실시한 결과를 예시하고 있다. 각종 용접조건에 따른 용접결과에서 고찰해 보면, 저수소계의 용접봉은 아크상태가 불안정하고 비드의관이 고르지 못하며 스패터(spatter)와 같은 용접결함이 보였으나, 고산화티탄계의 용접봉은 저수소계에 비하여 안정된 아크상태와 양호한 비드의관을 얻을 수 있었다. 또한 용접전류가 140A 이하의 낮은 전류범위에서는

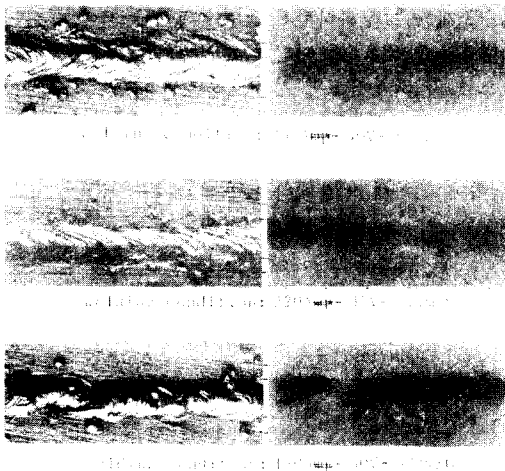


Photo. 2 Bead appearance and X-ray inspection of underwater welds (Low hydrogen type electrodes)

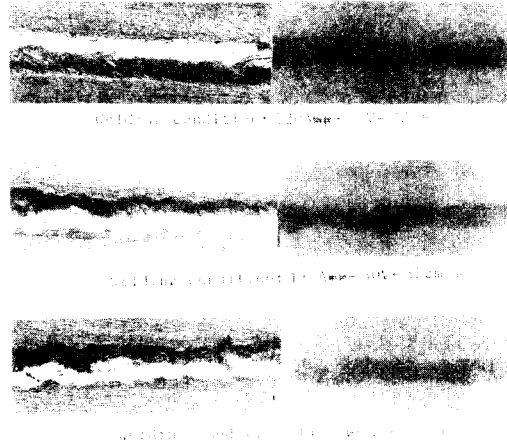


Photo. 3 Bead appearance and X-ray inspection of underwater welds (High titanium oxide type electrodes)

용접시작이 잘 안되고, 아크단락이 심하여 용접자체가 곤란하였으며, 260A 이상의 용접전류에서는 비드용접은 용이하게 되었으나, 입열량의 과다로 인하여 스패터와 언더컷(undercut)과 같은 용접결함이 발견되었다. 그러나, 180~220A의 용접전류 범위에서는 용접시작이 쉽게 되고, 비드의관은 비교적 양호하였으며, X선 투과시험에도 기공등 특별한 용접결함이 발견되지 않았다.

본 용접실험에서는 우선 고산화티탄계와 저수소계 용접봉에 대한 실험결과만을 비교한 것이지만, 해양구조물의 설비 및 보수를 위한 수중용접 기술개발의 중요성이 고조되고 있는 점을 고려할 때, 습식수중 아크용접의 실용화를 위해서는 수중용접에 적합한 특수수중용접봉의 개발이 필요하다고 본다.

3.3 濕式水中 아크熔接에 의한 熔接部の 機械的 特性

용접금속의 안정성과 연성을 검토하기 위하여 자유굽힘시험(transverse free bend test)한 용접시편의 외관을 Photo. 4에 나타내고 있다. Table 3과 같은 용접조건에 따라 다층 맞대기 이음용접한 용접시편의 표면 굽힘시험(face bend test) 결과에서 살펴보면, 습식수중용접시 불에 의한 용접금냉(weld quenched)의 영향으로 작은 굽힘각도에서도 용착금속에 크랙(crack)이 발생하였다. 용접전류 140A이하에서는 수중용접 자체의 결함으로 용접이음부에 파손이 일어났으나, 용접전류 180~220A에서는 굽힘각도

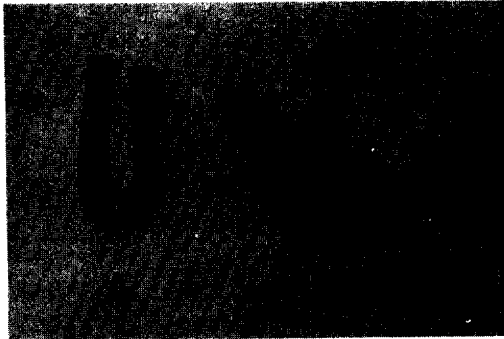


Photo. 4 Typical results of free face bend tests  
A: In-air welding  
B: Underwater wet arc welding

가 93°, 변형율은 12%정도가 되었다. 동일조건  
의 대기중 용접시편은 굽힘각도가 180°이상 되고, 변형  
율은 33.3%정도가 되었다. 수중용접시편의 굽힘각  
도가 작게 된 것은, 습식수중아크용접시 용접부가  
물에 의해 급냉되므로 냉각속도가 매우 빨라지게 되  
고, 이에 따라 금속조직과 기계적 성질이 변한 것으  
로 생각된다. 그러므로 습식수중아크용접시 충분한  
굽힘각도를 얻기 위해서는, 용접부의 냉각속도를 조  
절하고 금속학적인 특성해석에 따라 해결해야 될 것  
으로 사료된다.

Table 4 Results of tension and impact tests

Welding condition	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Impact value(J)
1	—	—	—
2	498	2.5	177
3	509	2.6	206
4	525	2.5	194
5	520	2.1	120
Base metal	524	35.0	280

Table 4는 2.1절에서 기술한 용접시편의 인장 및  
충격시험에 의하여 얻은 결과를 요약하여 나타낸 것  
이다. 이 결과에서 고찰하여 보면, 용접전류 100A  
이하에서는 용접결함으로 측정값에는 의미가 없었으  
며, 용접전류 200A부근의 인장강도는 모재보다 크  
게 되고 충격강도 역시 측정값은 최대로 되었으나,  
모재의 충격강도보다는 급격히 줄어들고 있음을 알  
수 있다. 이와같이 습식수중아크용접에 의한 용접부  
의 기계적 특성은 용접조건에 따라 차이가 심하며,

대기중 용접과는 판이하게 급냉되므로 냉각속도의  
대소에 따라 기계적 성질의 변화가 클 것으로 생각  
된다. 특히 다중이음용접시 복잡한 열사이클에 의한  
에일 및 후연처리와 같은 효과가 있을 것이므로, 다  
중이음용접에 대한 특성해석은 이 점을 감안해야 될  
것이다.

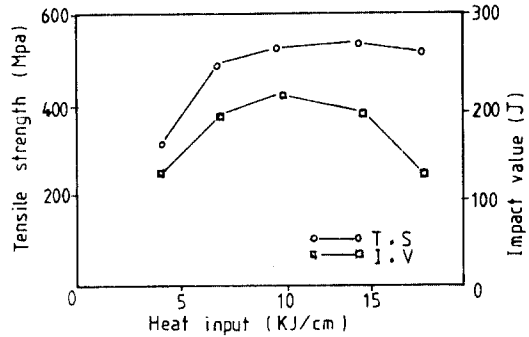


Fig. 7 Effects of heat input on tensile strength and Charpy impact value

Fig. 7은 본 실험연구의 범위내에서 입열량과 기계  
적 성질과의 관계를 나타낸 것으로, 입열량이 10~  
14 KJ/cm인 범위가 최적조건인 것으로 나타났다.

### 3. 4. 熱사이클測定과 硬度分布

습식수중용접에 의한 용접부의 냉각특성은 시편표  
면과 이면에서 강한 수냉의 영향으로 급냉되므로, 용  
접부의 경도와 조직등이 변하게 되고 용접이음의 성  
능을 저하시킨다. 용접부의 최고도달온도를 검토하기  
위하여, 비드용접시 모재표면에서 1mm너이의 열영  
향부에 대한 열사이클을 측정하여 Fig. 8에 나타내고

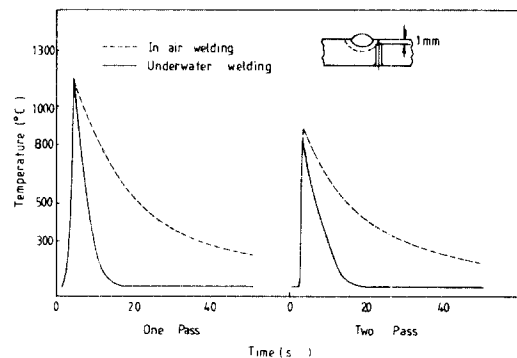


Fig. 8 Welding thermal cycle (Welding condition: 180A-30V-32cm/m)

있다. 일중 비드용접시 측온점의 최고 도달온도는

약 1150°C로서, 급속조직 변화에 영향을 미치는 800~500°C사이의 냉각시간은 대기중 용접시는 약 9.2초, 수중용접시는 약 1.9초였으며, 800~300°C사이의 냉각시간은 대기중 용접시는 약 27초, 수중용접시는 약 2.8초가 되었다. 이와 같이 습식수중아크용접에 의한 시편표면의 냉각속도는 대기중과는 다르게 급냉되므로 용접부의 경도와 조직변화에도 심한 영향을 미칠 것이다. 그러나 다중용접시는 예열 및 후열의 효과가 있을 것이므로, 용접 층수의 증가에 따른 해석을 고려해야 될 것이다.

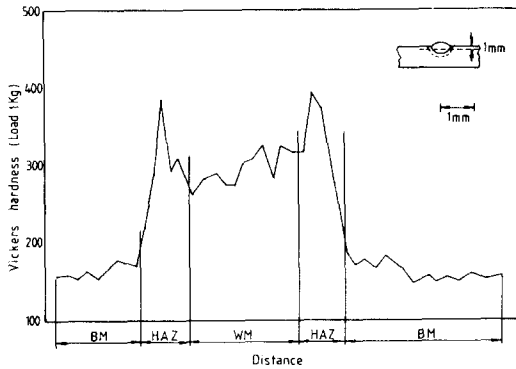


Fig. 9 Hardness distribution of underwater wet bead welding (Welding condition: 220A-35V-32cm/m)

Fig. 9는 습식비드용접한 시편의 경도 분포를 예시하고 있다. 표면에서 1mm 내측의 열영향부에 대한 최고경도는 모재의 2배이상으로 증가되었으며 냉각속도가 빨라질 수록 최고경도는 상승하였다. 이것은 TMCP강 제조시의 가속냉각(accelerating cooling) 효과가 한층 더 강화되어 나타나는 현상으로 사료된다. 다중이음용접시의 열이력(thermal history)을 고찰하기 위하여 맞대기이음용접시편의 중앙본드부에 대한 열사이클을 측정하여 Fig. 10에 예시하고 있다.

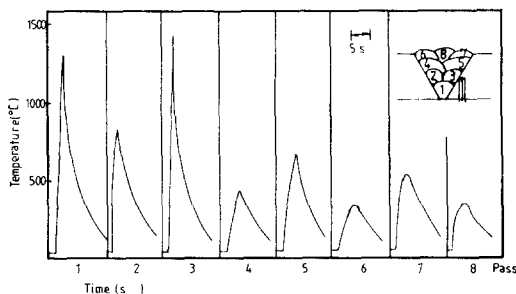


Fig. 10 Thermal cycle of underwater wet arc welding (Welding condition: 220A-35V-32cm/m)

각각의 층수에 따라 축온점의 최고 도달온도가 점차 달라지고 냉각시간과 냉각속도도 변하게 되므로 이에 따른 특성해석을 연구해야 될 것이다. 다중용접시 용접부의 열사이클은 용접조건, 판두께 및 용융선에서 거리등에 따라 최고 가열온도가 다르기 때문에 경도 및 변태조직은 매우 다양한 형태로 변한다.

본 실험용접의 일례로서 Fig. 10에서 고찰해 보면, 1층과 3층용접에서는 최고도달온도가 1300°C 이상이 되고, 800~500°C사이의 냉각시간은 약 2.5초, 800~300°C사이의 냉각시간은 약 4.7초가 되었으나, 그 외의 층에서는 최고도달온도와 냉각시간 및 냉각속도가 다양하게 나타났다.

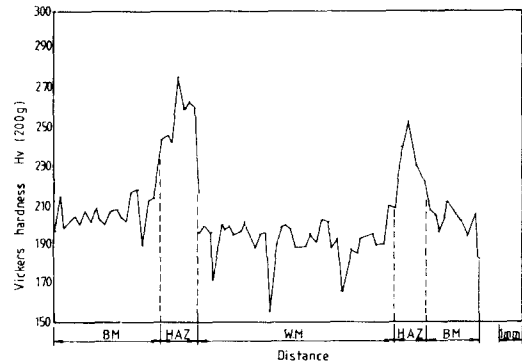


Fig. 11 Hardness distribution of underwater wet arc welding (Welding condition: 220A-35V-32cm/m)

Fig. 11은 10층으로 맞대기 이음용접한 시편의 중앙부분에 대한 경도 분포를 측정하여 그 결과를 예시하고 있다. 다중이음용접시의 열영향부에 대한 최고경도는 모재의 약 1.5배로서, TMCP강의 대기중용접시, 열영향부의 연화에 따라 최고경도가 감소하는 경향이라는 대조적이라 할 수 있다.

본 용접실험의 결과에서 고찰한 내용을 종합하여 보면, 습식수중아크용접에 적합한 특수용접봉을 개발하고, 적절한 용접조건을 선택하여 숙련된 수중용접을 실시하면 습식수중아크용접의 실용화가 가능하다고 생각된다.

#### 4. 結 論

습식수중아크용접에 의한 TMCP강의 수중용접실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 저수소계 및 고산화티탄계 용접봉 피복계의 흡수속도는 약 30분의 침수에서 거의 포화상태로 일정

하게 되고, 침수시간 경과에 따른 흡수백분율의 증가는 없었다.

2) 고산화티탄계의 용접봉이 저수소제의 용접봉보다는 습식수중아크용접에 적합하였으나, 습식수중아크용접의 실용화를 위해서는 특수한 수중용접봉의 개발이 요구된다.

3) 습식수중아크용접에 의한 용접부의 기계적 성질은 용접조건에 따라 차이가 심하며 최적조건이 존재한다. 본 실험연구의 범위내에서는 200.4정도의 용접전류가 최적조건이 되었다.

4) 습식수중비드용접에 의한 용접부는 불에 의한 급냉의 영향으로 열영향부의 최고경도는 모재의 정도보다 2배이상 증가하였다.

5) 습식수중아크용접에 적합한 특수용접봉을 개발하고, 적절한 용접조건을 선택하여 숙련된 수중용접을 실시하면 습식 수중아크용접의 실용화가 가능하다.

參 考 文 獻

1) 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 論文集, Vol. 1, No. 2, pp.285~288, 1983

2) 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 論文集, Vol. 2, No. 4, pp.721~726, 1984

3) 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 論文集, Vol. 3, No. 2, pp.392~397, 1985

4) 浜崎正信, 榑原實雄, “高張力鋼の 水中溶接”, 溶接學會誌, Vol.48, No.2, pp.115~120, 1979

5) 森川博文, 森山康, 伊藤龜太郎, “鐵鋼新素材, TMCP鋼の 冶金的 特徴と 母材特性”, 溶接學會誌, Vol.55, No.2, pp.83~90, 1986

6) 신민태, 윤중근, 김희진, “TMCP강의 용접부 인성에 관한 연구”, 대한용접학회지, Vol.4, No.3, pp.43~49, 1986

7) Koibuchi, M. and T. Yokota, “Underwater Wet Welding with Ni, Fe-Ni, and Stainless Steel Electrodes”, J. of JWS, Vol.50, No. 5, pp.489~495, 1981

8) Kasuya, T. and N. Yurioka, “Weldability of TM CP steel in Underwater Welding”, Pro. of OMAE 6th Int. Symposium, Vol.3, pp.145~150, 1986

9) Masumoto, I., K. Matsuda and M. Hasegawa, “Study on the Crack Sensitivity of Mild Steel Welded Joint by Underwater Welding”, Trans. of JWS, Vol.14, No.2, pp.20~25, 1983

10) 오세규, 남기우, “國産構造用 鋼板의 水中熔接性과 熔接強度特性”, 대한기계학회 논문집, 제7권, 제3호, , pp.263~269, 1983

11) 오세규, “船舶用 鋼板의 水中熔接 最適化에 관한 研究”, 한국어업기술학회지, 제20권, 제1호, pp.49~59, 1984

NDT 국제행사 안내

일 자	회 의 명	주 회	장소(국명)
'88. 9. 19~22	1988 National Conference on NDT	AINDT	Australia
'89. 4. 23~29	12th WCNDT	ICNDT	The Netherlands (Amsterdam)
'90. 4.	4th Pan Pacific Conference on NDT	NDTA	New Zealand