

## TMCP강의 습식수중 아크 용접성에 관한 고찰\*

오 세 규\*\* · 김 민 남\*\*\*

### A Study on the Weldability of TMCP Steel plates in Underwater Wet Arc Welding

S. K. Oh, M. N. Kim

**Key Words:** Underwater Welding(수중용접), Underwater Wet Arc Welding(습식수중아크 용접), Welding Conditions(용접조건), HAZ(열영향부), Hardness(경도), Bead Appearances(비드외관), Bend Test(굽힘시험)

#### Abstract

The feasibility of underwater wet arc welding process is experimentally investigated by using high titanium oxide type electrodes and TMCP steel plates as base metal. It is ascertained that this process may be put to practical use.

Main results are summarized as follows;

- (1) Sound underwater weld can be obtained by skilled welding operator, if proper welding conditions are selected.
- (2) In underwater wet arc welding process, the mechanical properties of HAZ are depend upon welding condition and the optimum welding condition can obtained.
- (3) The maximum hardness in the HAZ of TMCP steel plates is increased significantly in this welding process.

#### 1. 서 론

해양개발에 따른 해저구조물의 설비 및 보수 수단으로 수중용접기술의 개발과 응용에 대한 연구가 선진 각국에서는 다수 행해지고 있는 실정이나, 삼면이 바다에 접하고 있는 우리나라에서는 수중용접에 대한 연구가 부족한 편이다.

수중용접에는 건식(Dry Welding Method), 국부건식(Local Cavity Method), 습식(Wet Welding Method) 등으로 대별되고 있으나, 본 연구는 설비구조가 비교적 간단한 습식수중 아크용접법(Underwater Wet Arc Welding Method)을 이용하여 TMCP강의 수중아크용접성에 대한 실험연구를 시행하였다. 이 방법은 용접 분위기가 수중이므로 피복제가 시간이

\* 1987년 4월, 춘계학술대회 발표

\*\* 정회원, 부산수산대학

\*\*\* 정회원, 부산개방대학

경과함에 따라 흡습하게 되고, 용접시 높은 아크열에 의하여 산소나 수소가 쉽게 용착금속에 침입하여 취성이 발생하게 된다. 그리고 용접부의 냉각속도는 대기중 용접과는 판이하게 다른 현상으로 급냉되므로 용접부의 금속적, 기계적 성질이 달라진다. 또한 본 연구에서는 해양구조물의 신소재로 이용되고 있는 TMCP강을 모재로 하여, 용접조건을 여러가지로 바꾸어 가면서 실험용접을 실시하였다. 그리하여 습식수중아크용접의 실용화를 위한 기초자료를 제공하고, 습식수중아크용접시의 최적조건을 추구하고 보았다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1. 시험재료 및 용접봉

본 연구에 사용된 시험편은, 시판되고 있는 가속냉각형 TMCP(API 2H Grade 50) 강재를 100×60×12mm씩 기계톱으로 절단하여 기계가공한 후, 비드(Bead)용접과 다층 맞대기 이음용접을 실시하였다. 시험편의 그루브(Groove)형상과 적층순서는 Fig.1과 같으며, Table 1에 시험재료의 화학조성과 기계적 성질을 나타내고 있다.

그리고, 본 실험연구에 사용한 용접봉은 J사의 시제품으로, E5013에 해당되는 고산화티탄계의 고장력강용 용접봉이며, 그 화학조성과 기계적 성질은 Table 2에 나타내고 있다. 국내에서 시판중인 고장력강용 용접봉은 대개 저수소계이므로 습식수중용접에 적합하지 않아,<sup>12)</sup> 부득이 용접봉 제작회사에 제작의뢰하여 본 실험연구에 사용하게 되었다.

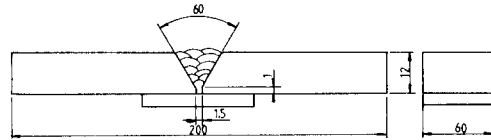


Fig.1. Shape of specimen.

### 2.2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 수중용접 실험장치는 운봉비와 용접속도 및 용접각도 등을 임의로 변경시킬 수 있도록 제작한 실험장치로, 1200×850×800mm의 수조 내부에 수도수를 순환시키면서, 모재 이동용운반차(Carriage)를 이용하여 속도제어를 할 수 있게 하였다. 용접은 용량 400Amp의 발전형 DC 용접기를 사용하여, 직류 정극성으로 수심 200mm에서 실시하였다. 또한, 용접봉은 특수한 방수처리를 하지 않고, 300°C~350°C에서 1시간 정도 건조 시킨후 바로 용접하였다. 비드(Bead) 용접은 용접조건을 바꾸어 가면서, 시편의 중앙부에 비드(Bead)길이 100mm 되게 실험용접을 실시하였다. 기계적 성질을 시험하기 위한 맞대기 이음용접은, 시편 이면에 백플레이트(Back plate)를 대고 10패스(Pass)로 수중용접을 실시하였으며, 층(Pass)간의 시간은 슬래그(Slag)제거 등으로 인하여 약 3분 정도 걸렸다.

본 연구에 이용된 실험장치의 외관과 개략도를 Fig.2와 Photo.1에 나타내고 있으며, 실험용접에 사용한 용접조건은 Table 3에 제시하였다.

열사이클(Thermal cycle)을 측정하기 위하여, 맞대기 이음용접시편의 중앙 본드부(Bond line)의 이

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of base metal

Chemical Composition (wt %)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Nb	Ceq
		0.10	0.18	1.47	0.004	0.001	0.18	0.15	0.01	0.01
Mechanical Properties	Yield Strength (MPA)		Tensile Strength (MPA)		Elongation (%)		Impact Value (-40°C)			
	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
Mechanical Properties	Yield Strength (MPA)		Tensile Strength (MPA)		Elongation (%)		Impact Value(20°C)						
	470		530		28		150						

Table 3. Conditions of underwater wet arc welding.

	Welding Current (Amp)	Arc Voltage (V)	Electrode Angle (°)	Bead Length/Electrode Length	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

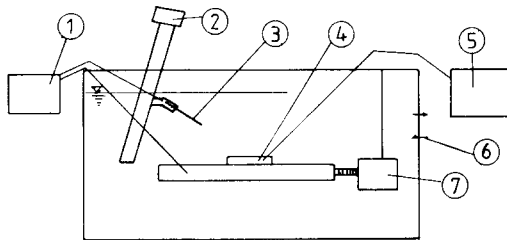


Fig.2. Schematic diagram of experimental equipment.

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

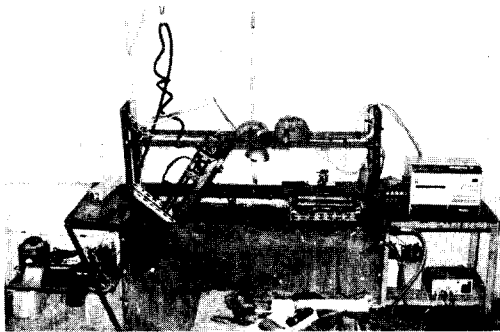


Photo. 1. Welding apparatus used in this experiment.

면에서 깊이 6mm, 지름 3.2mm의 드릴구멍을 뚫고 그 속에 지름 0.6mm의 CA 열전대를 넣고 퍼커션용접(Percussion welding)한 후 특수한 수밀처리를 하였다. 측면점은 중앙 본드부에서 모재 쪽으로 0.2mm ~ 0.5mm 되게 하였으며, 열기전력의 기록은 코일 저항 27Ω, 전류감도 0.12μA/mm, 감도 일정한 주파수 상한 400Hz의 진동자(Galvanometer)를 사용한 마그네틱오실로그래프(Magnetic oscillograph)를 이용하였다.

그리고, 다층 맞대기 이음용접시 수중에서 슬래그(Slag)제거 작업이 곤란하여, 본 실험용접에서는 시편을 대기중에 꺼내어 슬래그 제거후, 다시 물속에 넣고 수중용접을 실시하였다.

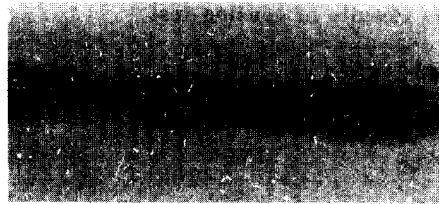
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 비드의관과 X선 투과시험

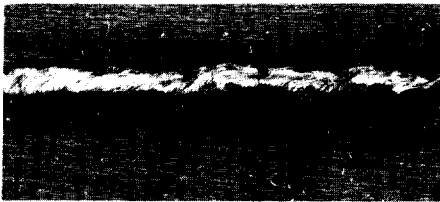
Table 3과 같은 용접조건으로 직경 4mm의 고산화 티탄계 봉접봉을 사용하여 습식수중아크비드용접을 실시한 결과를 Photo.2에 예시하고 있다. 본 실험조건 범위내에서 비드용접은 가능하였으나, 100Amp 이하의 전류에서는 용접개시에 어려움이 있었고 아크단락이 심하여 수중용접 자체가 어려웠으며, 260 Amp이상의 전류에서는 용접은 용이하게 되었으나 입열량의 과다로 인하여 스패터(Spatter)와 언더컷(Undercut)과 같은 용접결함이 발견되었다. 그러나, 180Amp~220Amp의 전류범위에서는 용접시작이 쉽게 되고 비드의관도 비교적 양호하며, X선 투과검사에도 기공등 특별한 용접결함이 발견되지 않았다. 그러므로 적절한 용접조건을 선택하고 수중용접에 적합한 용접봉을 개발하여 숙련된 용접을 실시하면, TMCP강의 습식수중 아크용접의 실현 가능성이 충분히 있다고 생각된다.

#### 3.2. 습식수중아크용접에 의한 시편의 기계적 특성

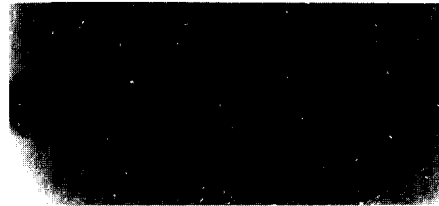
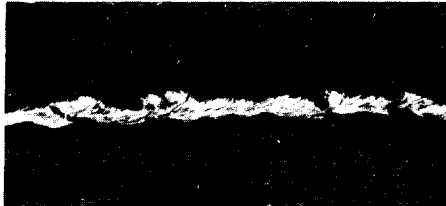
적절한 용접조건에 따라 습식수중아크용접한 시편을 인장시험하여 보면, 파단은 모재에서 일어나므로 (Photo. 3의 A), 각종 용접조건에 따라 수중용접한 시편을 Fig.3과 같이 기계가공하여, 용착금속부 혹은 열영향부의 중앙부분 양측에 1mm 길이의 V형 노치를 주고 인장시험을 하였다. 인장속도 1mm/min,



Welding Condition: 220Amp - 35 V - 32Cm/m



Welding Condition: 180Amp - 30V - 32Cm/m



Welding Condition: 140Amp - 25V - 30Cm/m

Photo. 2. Bead appearance and X-ray inspection of welds

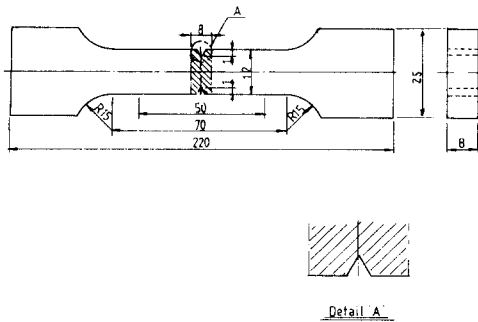


Fig. 3. Tension test specimens

게이지길이 50mm로 인장실험한 결과를 정리하여 Table 4에 나타내고 있다. 인장실험의 결과에서 살펴 보면, 용접전류 200Amp정도에서 인장강도가 최대로 되며, 용접전류 100Amp이하에서는 용접자체의 결함으로 인장강도의 측정자체가 무의미하였다. 그리고, 이와같은 인장시험시의 연신율에 대한 값을 참고로 하기 위해 Table 4에 나타내었다. Table 5는

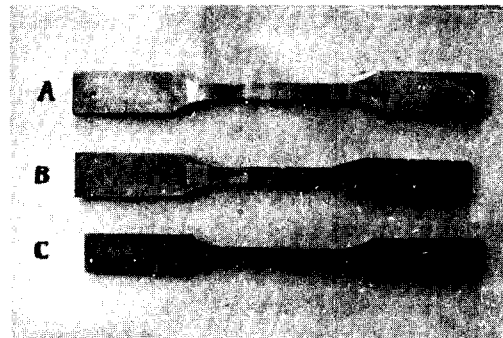


Photo. 3. Fractured tension test specimens

- A: Fractured on base metal
- B; Fractured on weld metal with notch
- C; Fractured on HAZ with notch.

수중용접된 시편에 대한 충격시험의 결과를 요약하여 제시하였다. 시험편은 폭 8mm로 Fig.4와 같이 기계가공하여 길이 2mm의 V형 노치를 용착금속 혹은 열영향부에 넣고, 충격시험을 상온에서 행하였다. 이 결과에서 고찰하여 보면, 용접부의 충격치는 모

**Table 4. Results of tension test**

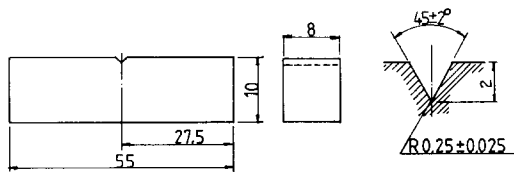
Welding Conditions	Notch location	1	2	3	4	5	※Base Metal
Tensile Strength (MPA)	W.M	—	497	522	513	511	510
	HAZ	—	498	509	525	520	
Elongation (%)	W.M	—	3.1	3.7	4.6	4.1	11
	HAZ	—	2.5	2.6	2.5	2.1	

※ Notched base metal specimen with same shape and dimension as underwater welded sample.

**Table 5. Results of Charpy impact test (20°C)**

Welding Conditions	Notch location	1	2	3	4	5	※Base Metal
Impact Value (MPA)	W.M	—	60	69	76	58	280
	HAZ	—	177	206	194	120	

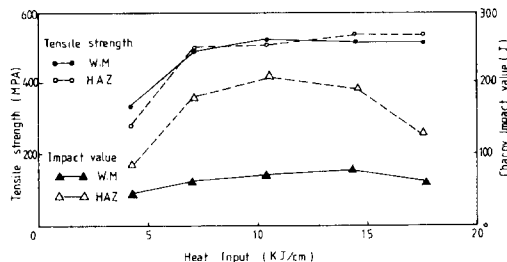
※ Notched base metal specimen with same shape and dimension as underwater welded sample.



**Fig. 4. Impact test specimen.**

재보다 상당히 떨어짐을 알 수 있다. 이와같이 습식 수중아크용접에 의한 용접부의 기계적 성질은 용접 조건에 따라 차이가 심하며, 이용될 수 있는 용접조건은 육상용접에 비하여 범위가 매우 좁다는 것을 알 수 있다. 특히 TMCP강의 제조상 특성을 감안하면, 수중용접에 의한 냉각속도의 대소에 따라 용접부의 기계적 성질에 대한 영향이 클 것이고, 다층용접시의 복잡한 용접열사이클(Weld thermal cycle)에 의해 후열 및 세열효과가 있을 것이므로, 보다 깊은 연구와 해석이 필요하다고 생각된다.

Fig.5는 본 실험의 범위내에서 입열량과 용착금속

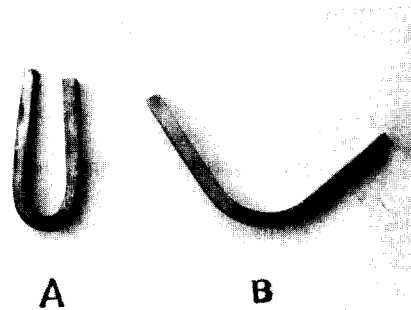


**Fig. 5. Effects of heat input on tensile strength and Charpy impact value.**

및 열영향부의 기계적 강도와외 관계를 나타낸 것으로, 입열량이 10~14KJ/cm의 범위가 적당한 것으로 사료된다.

Photo.4는 용접금속의 안정성(Soundness)과 연성(Ductility)을 검토하기 위하여, 자유굽힘시험(Transverse free bend test)한 용접시편의 외관사진을 나타낸 것이다. Table 3과 같은 용접조건에 따라 실험용접한 시편을 AWS규격에 따라 굽힘시험편을 제작하였으며, 표면굽힘시험(Face bend test)방법으로 굽힘시험을 실시하였다. Fig.6에 굽힘시험편의 형상과 치수를 나타내고 있다.

굽힘시험 결과, 수중용접된 시편은 물에 의한 용접급냉(Weld quenched)에 의하여, 육상용접에 의한 시편보다 쉽게 크랙이 생기고 굽힘작도는 현저히 줄어들었다.



**Photo. 4. Results of free face bend tests.**

A: Specimen welded in air

B: Specimen with underwater wet arc welding

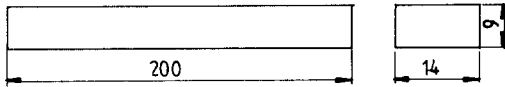


Fig. 6. Transverse free bend test specimen.

용접전류 140Amp 이하에서는 수중용접 자체의 결합으로 용접본드부에 파손이 일어나 굽힘시험을 할 수 없었으나, 용접전류 180Amp인 경우 90° 정도의 굽힘각도에서 용착금속의 표면에 크랙이 생기기 시작하였으며, 이때의 변형율은 약 11.5%가 되었다. 또한 용접전류 260Amp 이상에서는 굽힘각도가 80° 이하로 줄고, 변형율도 감소하는 경향을 나타내었다.

대기중 용접과 비교하기 위하여, 용접전류 180Amp의 동일조건으로 육상에서 용접한 시험편에 대한 굽힘시험을 실시하여 보았다. 이때는 굽힘각도가 180° 이상이 되고, 변형율은 약 33.3%가 되었다. 그러므로, 습식수중아크용접시 충분한 굽힘각도를 얻기 위해서는, 용접시의 냉각속도를 늦추고, 금속적 특성 해석에 따라서 해결해야 될 것으로 생각된다.

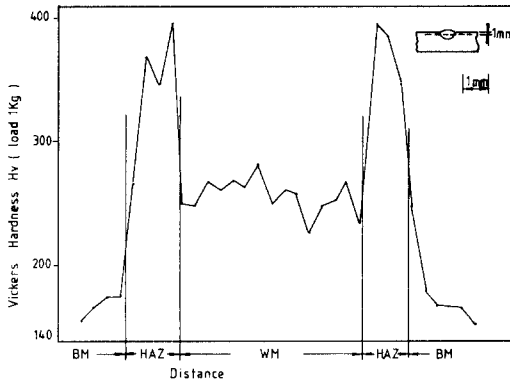


Fig. 7. Hardness profiles of underwater wet bead welding (Welding condition: 220Amp-35V-32cm/m).

### 3.3. 용접열사이클(Weld thermal cycle)과 경도 분포

각종 용접조건에 따라 수중비드용접한 시편의 경도분포를 고찰해 보면, 본드부(Bond line)에서 약 2 mm 정도가 열영향부로 되고, 대기중 용접과는 다르게 물에 의한 급냉의 영향으로 열영향부의 마이크로 비커스(Micro-Vickers) 경도치가 높게 됨을 알 수 있다. 본 실험의 경우, 시편표면에서 1 mm 떨어진 열영향부의 최고 경도는 모재의 경도보다 약 2배 이상 증가하였으며, 냉각속도가 빠를수록 최고경도치는 증가하는 경향이 있었다.

수중비드용접한 시편의 열영향부에 대한 경도상승은 TMCP강 제조시의 가속냉각(Accelerating cooling) 효과가 용접열사이클에 의해 강화되어 나타나는 현상으로 생각된다. Fig.7과 Fig.8은 수중비드용접한

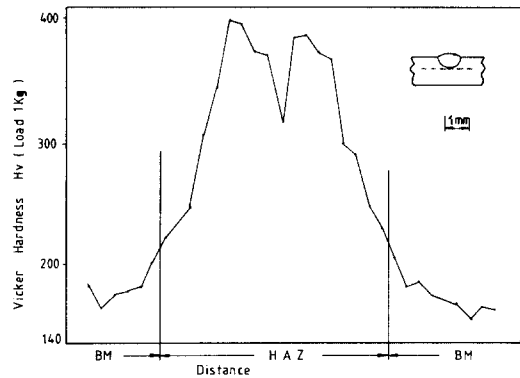


Fig. 8. Hardness profiles of underwater wet bead welding (Welding condition: 220 Amp-35V-32cm/m).

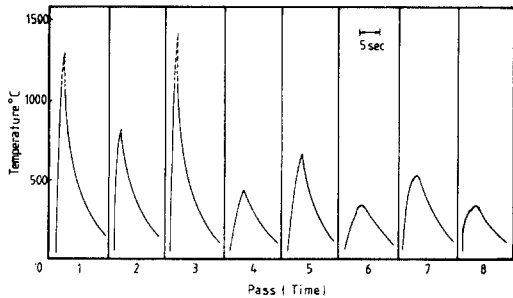


Fig. 9. Thermal cycle of underwater wet arc welding(welding condition: 220Amp-35V-32cm/m).

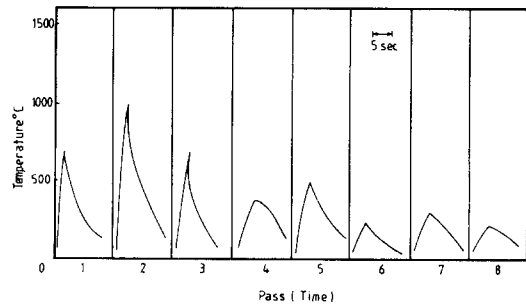


Fig. 10. Thermal cycle of underwater wet arc welding (Welding condition; 180Amp-30V-32cm/m).

시편의 경도시험 결과를 예시하고 있다.

다층용접시의 열이력(Thermal history)을 살펴보기 위해서, 용접시편 중앙본드부 근방의 열사이클을 측정하여 Fig.9와 Fig.10에 나타내었다. 이것은 아크열에 의하여 측정점의 온도가 상승한 후 10초까지의 냉각선도를 나타낸 것으로 각 패스(Pass)에 따라 최고온도가 점차 달라지고, 이에 따라 냉각시간과 냉각속도가 변하게 되므로 예열 및 후열처리와 같은 효과가 있을 것으로 간주된다. 그러므로 다층용접시의 금속적 혹은 기계적 성질의 변화는 이에 따라 해석해야 될 것으로 생각된다.

Fig. 11과 Fig. 12는 10패스로 수중아크 맞대기이음 용접한 시편의 중앙단면부의 가로방향에 대한 경도를 측정하여 그 결과를 예시하고 있다. 비드용접할 때에는 다르게 열영향부의 최고경도는 모재의 약 1.5 배 정도이고, 다층용접시 복잡한 열이력에 의하여 열영향부의 기계적 성질에 변화가 있는 것으로 사료

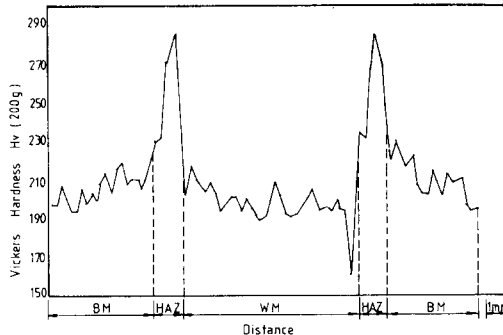


Fig.11. Hardness distribution of underwater wet arc welding (Welding condition; 180Amp-30V-32cm/m).

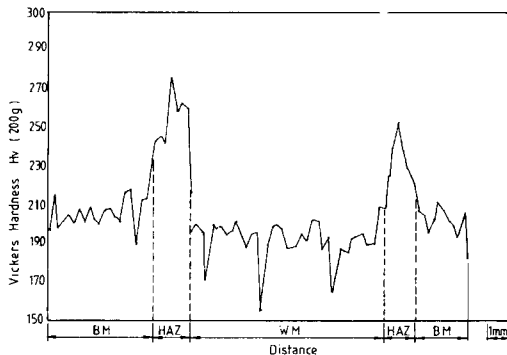


Fig.12. Hardness distribution of underwater wet arc welding (Welding condition; 220Amp-35V-32cm/m).

되어진다. 특히 TMCP 강의 육상용접시 열영향부의 연화에 따라 경도값이 감소하는 경향의과는 대조적으로, 습식수중아크용접시는 열영향부의 경도가 증가하는 것이 특징이라 생각된다.

#### 4. 결 론

습식수중아크용접 방법에 의한 TMCP강의 수중용접성에 대한 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 용접조건을 적절히 선택하여 숙련된 용접을 실시하면 습식수중아크용접의 실현이 가능하다.
2. 습식수중아크용접에 의한 용접금속과 열영향부의 기계적 성질은 용접조건에 따라 차이가 심하며 최적조건이 존재한다. 본 실험연구의 범위내에서 최적조건은, 용접전압 33V, 용접전류 200Amp 정도가 되었다.
3. 습식수중아크용접에 의한 TMCP강의 열영향부의 최고경도는 모재보다 증가한다.
4. 본 실험연구의 경우, 최적조건으로 수중용접한 시편의 최대굽힘각도는 90°, 변형율은 11.5%정도가 되었으며, 열영향부의 최대인장강도는 모재보다 약간 증가하고, 충격강도는 모재보다 떨어졌다.

#### 5. 참 고 문 헌

1. 屋良秀夫, 眞喜志康二, 濕式水中アーク溶接に関する研究(第1報), 溶接學會論文集, 1(2), (1983), pp.285-288.
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関する研究(第2報), 溶接學會論文集, 2(4), (1984), pp.721-726.
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関する研究(第3報), 溶接學會論文集, 3(2), (1985), pp.392-397.
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おける鋼材의 TRC 試驗(第1報), 溶接學會論文集, 1(3), (1983), pp.420-425.
5. 浜崎正信, 榊原實雄, 高張力鋼의 水中溶接, 溶接學會誌, 48(2), (1979), pp.115-120.
6. 小溝裕一, 鐵鋼新素材, TMCP鋼의 溶接部割れ感受性, 溶接學會誌, 55(3), (1986), pp.153-159.
7. 森川博文, 森山康, 伊藤 龜太郎, 鐵鋼新素材, TMCP鋼의 冶金的 特徵と 母材特性, 溶接學會誌, 55(2), (1986), pp.83-90.
8. 渡邊 之, 鐵鋼新素材, TMCP鋼의 適用分野, 溶接

- 學會誌, 55(1), (1986), pp.49-55.
- 9) 신던배, 윤중근, 김희진, TMCP강의 용접열향부 인성에 관한 연구, 대한용접학회지, 4(3), (1986), pp. 43-49.
  10. M. Koibuchi, T. Yokota, Underwater Wet Welding With Ni, Fe-Ni, and Stainless Steel Electrodes, J. of JWS, 50(5), (1981), pp. 489-495.
  11. 吳世奎, 南起祐, 國產構造用鋼板의 水中溶接性 과 溶接強度特性, 大韓機械學會論文集, 7(3), (1983), pp.263-269.
  12. 蓮井 淳, 菅泰雄, 水中における 重力式アーク溶接(第1報), 溶接學會誌, 43(8), (1974), pp. 767-775.
  13. 衣川純一, 福島貞夫, 福島孟, 濕式水中 溶接による SM系鋼材の變質, 溶接學會誌, 50(1), 1981, pp.65-70.
  14. T. Kasuya, N. Yurioka, Weldability of TMCP Steel in Underwater Welding, Proc. of OMAE 6th Int. Symposium, Vol.3, pp.145-150.