

선용 강판 수중용접부의 인장 구속 균열 특성에 관한 연구

오 세 규* · 강 문 호** · 김 민 남***

Study on the Tensile Restraint Crack Characteristics in Underwater
Welds of Marine Steel Plates

S. K. Oh, M. H. Kang, M. N. Kim

Abstract

Generally the factors affected largely by the cold cracking sensitivity of the weld are the quantity of the diffusible hydrogen, the brittleness and hardness of the bond area and the tensile restraint stress. These factors have relation each other, and if we can reduce one of these factors, it becomes instrumental to the root cracks prevention of weld.

This study deals with the gravity type-underwater-welding of KR Grade A-3 marine steel plate using E4303 welding electrode in order to compare wet-underwater-welding with in-air-welding, resulting in obtaining the tensile restraint characteristics, the hardness distribution, the quantity of diffusible hydrogen and the macro- and micro-crack properties in both underwater and in-air welds.

The main results obtained are as follows:

- 1) The quantity of diffusible hydrogen measured for 48 hours is about 18cc/100g-weld-metal for the in-air-weld of one pass and about 48cc/100g-weld-metal for the underwater-weld of one pass which is about 3 times penetration of diffusible hydrogen comparing with the case of the in-air-weld. However, it was experimentally confirmed that, by the multi-pass welding of 2 to 5 passes, the diffusible hydrogen in the underwater weld metal can be reduced as much as 27 to 49%.
- 2) The hardness of the weld metal indicates the highest value in the heat affected zones of underwater weld for more rapid cooling rate, resulting in the higher sensitivity of cold cracking. So, it is desirable to soften the higher hardness in the HAZ by tempering effect such as the multi-pass welding in the underwater welding.

* 정회원, 부산수산대학 박용기계공학과

** 정회원, 부산수산대학 대학원

*** 정회원, 부산개방대학 기계공학과

3) At the bond vicinity of the underwater weld HAZ, micro cracks were found as resulted by both more rapid cooling rate and more diffusible hydrogen and also by the stress corrosion cracking under the tensile restraint stress in the underwater. But this could be prevented by the tempering effect of the following weld bead such as the multi-pass welding.

1. 서 론

해저석유와 천연가스의 채굴을 위한 굴착장치, 파랑 및 조석발전등의 해양에너지 이용 기술, 우라늄등의 해저 용존 물질의 회수, 레크리에이션(recreation)을 위한 해양이용 구상 등의 다양한 해양개발계획에 따라 그 구조물의 조립과 보수작업을 위하여 수중용접의 필요성이 요구되어 수중용접의 연구활동이 활발하게 진행되고 있다.¹⁻⁵⁾ 그러나 수중용접은 대기중 용접과는 달리 다량의 확산성 수소의 발생, 빠른 냉각속도로 인한 용접부의 경화조직의 발생으로 용접부의 냉간파괴 감수성이 높게 된다.

일반적으로 수중용접부의 냉간균열파괴 감수성에 크게 영향을 미치는 인자로서는 용착금속부의 확산성 수소량, 본드부의 취성과 높은 정도분포 및 구속응력(restraint stress)이 있으며¹⁻⁵⁾, 이들 인자들은 서로 연관성이 있어서 그 중 하나라도 감소시킬 수 있다면 용접부의 루트(root) 파괴 방지에 도움이 되므로^{6,7)} 이 분야의

연구자료가 요구되고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 용접부 루트 파괴의 비연방지를 목적으로 시판중인 라임티타니아(limetitania)계 티복 아크 용접봉과 국산 선용 강판을 이용하여 습식 수중 아크 용접부를 대기중 아크 용접부와 비교하여 인장 구속 균열(tensile restraint crack; TRC)의 특성과 정도 분포, 용착금속부의 확산성 수소량, 매크로 및 마이크로 조직을 관찰하고 용접결합을 실험적으로 해석하여 수중용접부의 루트부 파괴 방지에 기여할 기초 자료가 되도록 하였다.

2. 시험편 및 실험방법

본 실험에 사용된 시험편 재료는 두께 9mm의 국산 선용 강판(KR Grade A-3)이며, 용접봉은 용접성조사와 인장강도시험을 통하여 가장 우수한 시판중인 라임티타니아계 (E 4303, ϕ 4mm)를 충분히 건조 시킨 후 사용하였다.

Table 1과 Table 2는 각각 시험편과 용접봉의

Table 1. Mechanical properties and chemical composition of base metal (KR Grade A-3)

Mechanical properties	Tensile strength kg/mm ²	Yield strength kg/mm ²	Elongation %	Charpy impact value kg·m/cm ²	
		46	28	31	17.6
Chemical composition (wt %)	C	Si	Mn	P	S
	0.18	0.04	0.86	0.011	0.014

Table 2. Mechanical properties and chemical composition of welding electrode (E 4303)

Mechanical properties	Tensile strength kg/mm ²	Yield strength kg/mm ²	Elongation %	Charpy impact value kg·m/cm ²	
		49	43	32	11
Chemical composition (wt %)	C	Si	Mn	P	S
	0.07	0.15	0.57	0.014	0.013

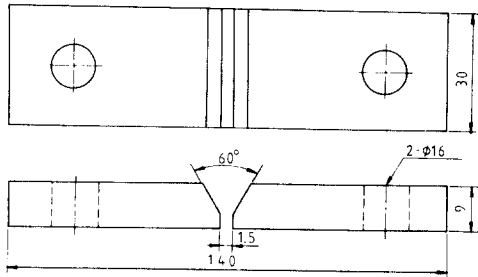


Fig. 1. Shape of groove and dimensions of specimen

기계적, 화학적 성질을 나타내고 있다.

인장 구속 균열시험을 위한 시험편은 모재를 $80 \times 40mm$ 로 전단하여 대기중 및 수중 용접하기 위해 Fig.1과 같은 치수와 그루브(groove) 형상을 갖도록 가공하였다.

수중용접에 사용된 장치는 용접봉 각도와 운봉비를 변화시킬 수 있도록 자작된 중력식 자동용접장치로서 Fig.2에 그 개략도를 나타내었다.

이 장치에 사용된 용접기는 국산 AC아크 용접기를 다이오드 정류기로 전파 정류하여 DC전류로 전환시켜 직류 정극성에서 용접을 수행하였다.

용접은 수심 20cm인 수도수 (수온 $20 \sim 25^\circ C$)에서⁸⁾ 용접전류 185A로 수중용접을 수행하였으며, 대기중 용접은 125A에서 용접을 수행하였다. 이들의 용접조건은 Table 3과 같다.

대기중 및 수중에서 수행되는 인장 구속 균열 시험장치는 자작한 것으로 최고 작용하중은 8ton이며 Fig.3에 그 개략도가 그려져 있다.

대기중에서 용접한 시험편은 대기중에서, 수중에서 용접한 시험편은 수중에서 인장 구속 균

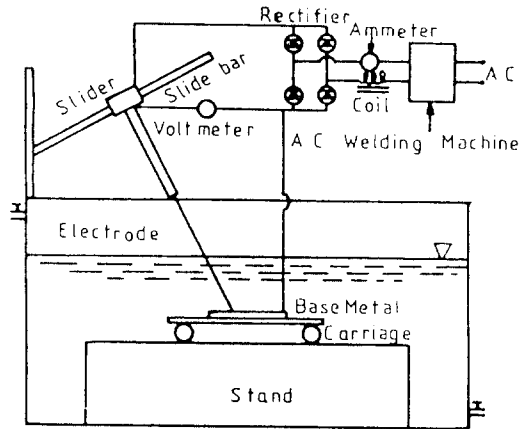


Fig. 2. Block diagram of experimental underwater welding apparatus (gravity type)

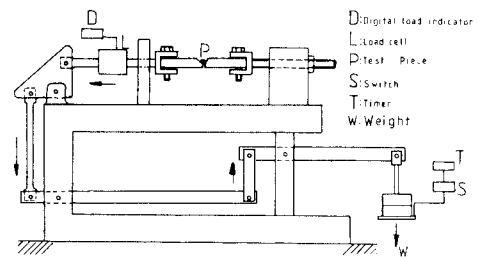


Fig. 3. Block diagram of TRC testing apparatus

열시험을 수행하였다. 이때, 인장 구속 균열 감수성이 나타나기 시작하는 온도로서 시험편의 열영향부 온도가 약 $150^\circ C$ 가 되도록⁸⁾ 시험편에 부하를 가하는 시간이 대기중용접에서는 용접온도의 peak로부터 2분 지나서, 수중용접에서는 약 20초 후에 (Fig.4 참조) 일정 인장 응력을 가하여 인장 구속 균열 특성을 조사하였다.

Table 3. Welding conditions for TRC tests

Environment of welding	Electrode	Root (mm)	No. of pass	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Electrode angle ($^\circ$)	Bead length/ Electrode length used	Welding speed (cm/min)
In-air welding	Limetitanian type E4303 ($\phi 4mm$)	1.5	1	125	21	60	1	28
Underwater welding	"	1.5	1	185	31	60	1	28

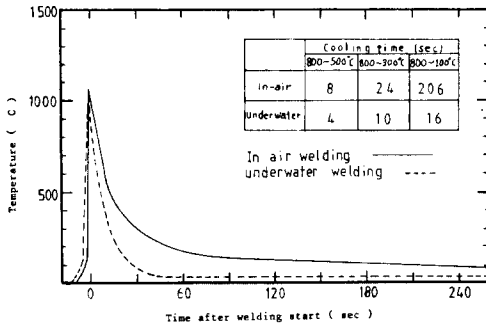


Fig. 4. Welding thermal cycle

3. 결과 및 고찰

3-1. 확산성 수소량

용접시 용접부에 용해된 수소는 냉각후 과포화 수소의 형태로 잔재하여⁶⁾ 용접부의 인장 구속 균열(TRC)에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 대기중 및 수중용접 용착금속부의 확산성 수소량을 JIS Z3113⁷⁾에 따라 클리세린을 포집액으로 하여 액운을 45°C로 유지시키면서 측정된 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

그림에서 48시간 동안에 발생한 용착금속 100g당의 확산성 수소량은 대기중 용접에서 18cc/100g-weld-metal, 수중용접의 경우에는 약 48cc/100g-weld-metal로서 수중용접의 경우가 대기중용접 보다 약 3배정도 높게 나타났다. 이와 같이 수중용접의 용접부에 다량의 확산성 수소가 침입하기 때문에 용착금속부 및 열영향부에 수소취화가 발생하여 용접부의 인장 구속 응력치가 낮게 되는 요인이 된다고 생각한다. 따라서 이의 해결을 위한 목적으로 수중용접에서 단층용접보다 다층용접에 의해 경도의 피크(peak)를 템퍼링(tempering) 효과로 완화시키는 것과 관련하여^{8,9)} 단층용접과 다층용접에서의 확산성 수소량을 조사한 결과를 Fig. 6에 표시하였다. 그림에서와 같이 단층용접의 용착금속 100g당의 확산성 수소량을 기준으로 하였을 때, 2층용접의 경우 약 27% 감소하였고, 3, 4 및 5층용접의 경우 비슷한 양으로 약 49% 감소하였다. 이와 같이 용착금속부의 확산성 수소량은 다층용접에

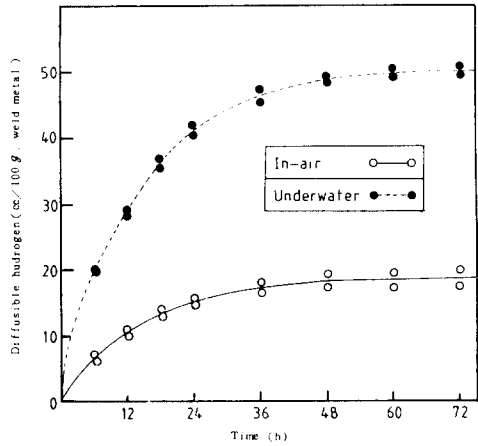


Fig. 5. Relationship between time and diffusible hydrogen

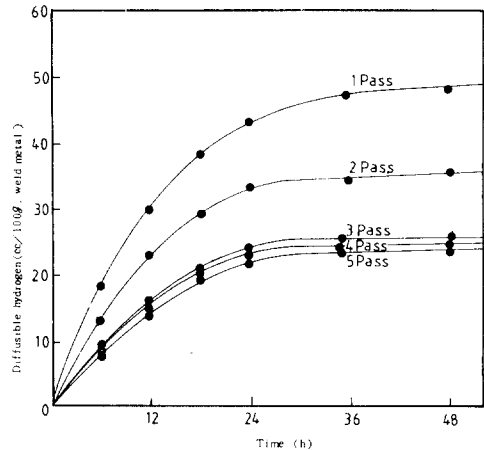


Fig. 6. Relationship between time and diffusible hydrogen of multi-pass underwater welding

의해 감소시킬 수 있음이 실험적으로 증명되었다고 생각되나 이에 관한 계속적인 연구가 필요할 것이다.

3-3. 경도 분포

용접부의 인장 구속 균열에 영향을 미치는 인자의 하나인 본드부 근방의 경도를 누프(Knoop) 미소 경도계(하중 200g)를 이용하여 측정된 결과를 Fig. 7에 나타내고 있다.

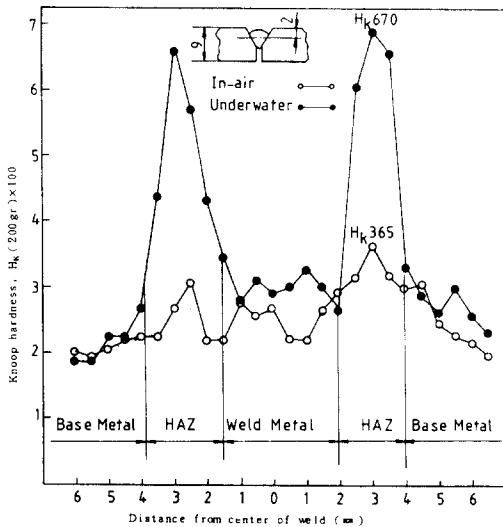


Fig. 7. Longitudinal hardness distribution in the welds

그림에서와 같이 대기중 및 수중용접의 어느 경우이든, 본드부 근방의 조밀한 열영향부에서 최고의 경도치를 나타내고, 그 최고치는 대기중 용접의 경우 Hk365, 수중용접의 경우는 Hk 670 으로 대기중용접보다 수중용접의 경우가 약 2배의 경도 최고치를 갖는다. 이와같이 약 2배의 경도 최고치를 갖는 수중용접의 경우에는 대기중용접보다 급격한 냉각속도^{10,11)}에 의해 앞에서 설명한 경화부분의 인성이 저하하여 인장 구속 균열의 파괴감수성이 높게 되므로, 이것이 수중

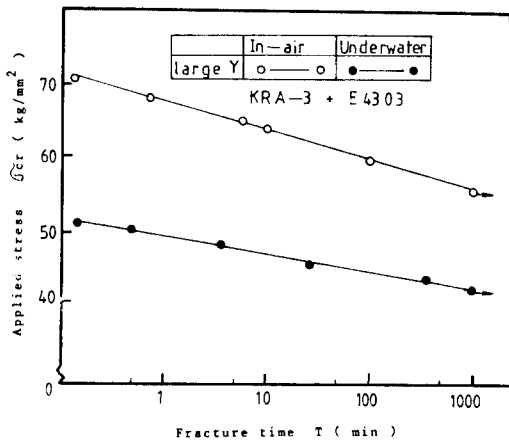


Fig. 8. Relation between applied stress and fracture time

용접부의 인장 구속 임계응력치의 저하¹⁰⁾에 대한 또 다른 요인이 된다고 생각한다(Fig. 8참조).

Fig. 8에서 알 수 있듯이 수중용접의 경우가 공기중용접의 경우보다 인장 구속 균열 임계 응력치의 값이 약 1.4배로 줄어들며 파괴시간이 지연됨에 따라 그 폭이 다소 줄어들고 있다.

이의 해결로서 수중용접의 이러한 경도 최고치는 다중용접을 통한 템퍼링효과에 의해 연화시키든지, 또 다른 별도의 용접후열처리(post-weld-tempering)를 하는 것이 바람직하다고 생각된다.^{8,9)}

3-3. 용접부의 매크로 및 마이크로 조직 검사

용접부의 인장 구속 균열(TRC)에 미치는 조직의 영향을 조사하기 위하여, 대기중 및 수중 용접한 시험편의 모재 표면에서 2mm 깊이¹⁰⁾에 해당되는 모재와 용착금속부의 조직을 관찰한 결과를 Fig. 9에 나타내고 있다.

그림에서와 같이 대기중 및 수중용접시험편의 모재측은 페라이트(ferrite)와 펄라이트(pearlite)가 분포된 조직이다. 그러나 대기중용접의 경우 열영향부에서는 마르텐사이트(martensite)와 베나이트(bainite), 펄라이트 및 소량의 임계 페라이트에서 생긴 조대조직으로 되어 있고, 용착금속부에서는 약간의 마르텐사이트와 투르스타이트(troostite) 조직이 관찰되었다.

수중용접의 경우, 급냉에 가까운 냉각속도¹⁰⁾에 의해 용접부 조직은 조대화하고 본드부에 인접한 열영향부에서는 명료한 마르텐사이트조직이 관찰되었다.

이러한 마르텐사이트조직으로 인하여 인성이 저하되어 수중용접의 경우가 대기중용접보다 낮은 인장 구속 임계 응력치를 갖는다고 생각되는 점은 전보¹⁰⁾의 경우와 일치한다(Fig. 8 참조).

대기중 및 수중용접에 있어서 인장 구속 균열 시험편의 고부하 응력시와 저부하 응력시의 대표적인 균열의 진전을 관찰한 결과를 Fig. 10에 나타내고 있다.

그림에서와 같이 각 조건에 대해 시험편 10개에 관해 반복 시험 관찰한 결과에 의하면 대기중

용접의 경우 고부하 응력시 균열의 진전은 루트부에서 발생하여 용착금속부로 전파하고 있으며, 저부하 응력시에는 루트부에서 발생된 균열은 본드부를 따라 약 20% 전진한 다음 용착금속부로 전파하고 있다. 이와 같이 파괴과정에서 균열이 용착금속부로 전파하는 이유는 응력에 수직으로 위치하는 용착금속의 목두께가 작고 용접한 후 부하를 가할 때 까지의 시간이 짧으므로 (2분) 용착금속 내부가 열영향부보다 확산

성 수소 함유량이 높기 때문이라고 생각된다.

수중용접의 경우 고부하 응력시에는 루트부에서 발생된 균열이 용착금속부로 전파하고 있다. 이것도 대기중용접의 경우와 같은 이유라고 생각된다. 저부하 응력시에는 루트부에서 발생된 균열이 본드부로 이어져 있다. 이것은 저부하 응력으로 인한 파괴시 까지의 시간이 길어져서 확산성 수소가 본드부에 집적되어⁶⁾ 수소취화가 발생한 때문이라고 생각된다.

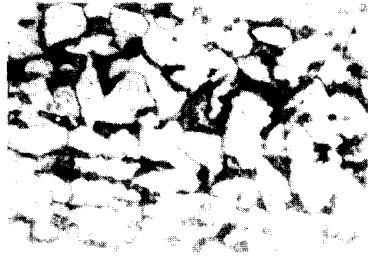




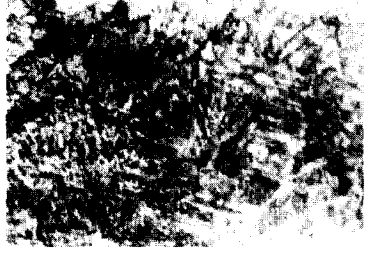
	In-air welds	Underwater welds
B.M.		
HAZ		
W.M.		

Fig. 9. Microstructures of weld metal and heat-affected zones









		In air weld		Underwater weld	
Y groove					
					
		$\sigma = 71 \text{ kg/mm}^2$	$\sigma = 55 \text{ kg/mm}^2$	$\sigma = 51 \text{ kg/mm}^2$	$\sigma = 42 \text{ kg/mm}^2$

Fig.10. Typical macro-cracks in the welded zone of TRC specimen

3-4. 마이크로 크랙의 관찰

인장 구속 균열시험에서 부하를 가한 상태에서 16시간 이상 경과하여도 파괴가 발생되지 않은 시험편에 대해서 비드 길이에 직각방향으로

절단하여 본드부 근방을 관찰한 결과, 대기중 용접시험편에서는 본드부 근방에 마이크로크랙이 관찰되지 않았지만, 수중용접의 경우 Fig. 11에서와 같이 루트부에서 발생한 크랙이 본드

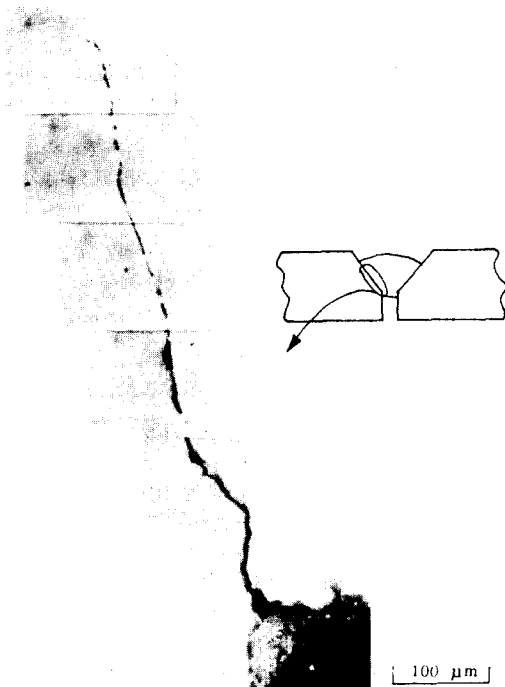


Fig.11. Microfissure in root area of underwater welded TRC specimen at $\sigma = 42 \text{ kg/mm}^2$

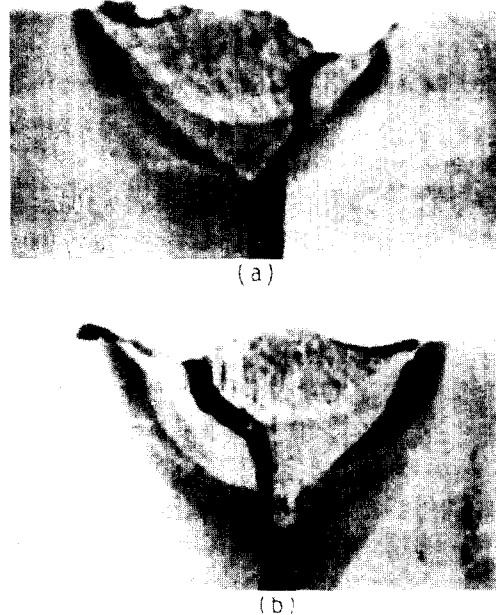


Fig.12. Typical macro-cracks in the multi-pass underwater welded zones of TRC specimens
 (a) 2-pass weld, $\sigma = 63 \text{ kg/mm}^2$
 (b) 3-pass weld, $\sigma = 65 \text{ kg/mm}^2$

부를 따라 전파하고 있다. 이와같은 마이크로 크랙이 발생한 이유는 수중용접이 대기중용접보다 확산성 수소량의 과다발생(Fig. 5)과 냉각속도가 빨라¹⁰⁾ 본드부에 경화조직이 발생하고(Fig. 7, Fig. 9), 수중에서의 인장 구속 균열시험에 의한 응력부식의 영향에 의한 결과라고 생각되며 이러한 마이크로 크랙 때문에 수중용접부의 인장 구속 균열의 임계응력치가 저하된다고 생각된다.

Fig. 12는 이러한 마이크로 크랙 제거책의 한 수단으로서 템퍼링 효과를 위한 다층용접한 경우의 수중에서의 인장 구속 균열시험의 결과로서, 균열 파단부의 매크로 조직을 보여주고 있으며, 전혀 본드부의 마이크로 크랙이 발견되지 않았다. 이는 다층용접에서의 후속용접층에 의한 템퍼링 효과에 기인한 것이라고 생각된다.

4. 결 론

국산 선용 강판(KR Grade A-3)을 라임티타니아계 피복 아크 용접봉(E 4303)을 이용하여 대기중용접 및 습식 수중용접하여 각각 대기중과 수중에서의 인장 구속 균열시험, 확산성 수소량 측정, 경도분포 및 조직검사를 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 48시간 동안에 측정된 용착금속 100g당의 확산성 수소량은 대기중용접에서 약 18cc/100g-weld-metal 이고, 수중용접의 경우는 약 48cc/100g-weld-metal 로서 대기중용접의 경우보다 약 3배정도 더 침입하고 있다. 그러나, 이것은 단층용접의 결과이고, 수중용접의 경우 2층용접을 통하여 약 27%를, 3, 4 및 5층 용접으로 모두 약 49%의 확산성 수소량을 감소시킬 수 있다.

(2) 용접부의 경도는 조밀한 열영향부에서 최고치를 나타내며, 그 값은 대기중 용접에서 약 Hk365, 수중용접에서는 냉각속도가 빠르기 때문에 약 Hk670으로 높게 되어 파괴의 감수성이 높다. 따라서, 수중 용접에서는 다층용접으로 템퍼링효과에 의해 경화부분을 연화시키는 것이 바람직하다.

(3) 수중용접에 있어서 파단되지 않은 시험편

의 본드부 근방의 마르텐사이트 조직에서 미세한 크랙이 관찰되었으며, 이는 빠른 냉각속도에 의한 본드부의 경화조직의 발생과 확산성 수소의 과다발생 및 수중에서의 인장 구속 균열시험에 의한 응력부식의 결과이나, 다층용접에서의 후속용접층에 의한 템퍼링 효과에 의해 이를 방지할 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) I. Masumoto, Y. Nakashima, A. Kondo, Study on the underwater welding, JWS, Vol. 40-7 (1971), pp.93-103.
- 2) A. Hasui, Y. Suga, On Underwater Gravity Arc Welding (The 1st Report), JWS, Vol. 43-8 (1974), pp.17-25.
- 3) M. Hamasaki, J. Sakabara, Underwater Welding of High Tensile Strength Steel, JWS, Vol. 48-2 (1979), pp.45-50.
- 4) T. Takeda, S. Yamado, I. Fukunaga, Study on the Weldability of Ultra High Strength Steel for Deep Submersible Research Vehicle, JWS, Vol. 50-8 (1981), pp.95-102.
- 5) H. Yara, Y. Makishi, Study on Wet Underwater Welding(Report 1), JWS, Vol. 1-2 (1983), pp.183-187.
- 6) 金屬の 割れ破壊總合資料集, 熔接継手部の低温割れ(1980), pp.756-763.
- 7) Y. Kikuta, T. Araki, A. Ookubo, H. Ootani, A Study on Method of Measurement for Diffusible Hydrogen in Weld Metal, JWS, Vol. 45-12 (1976), pp.30-37.
- 8) 吳世奎, 船舶用 鋼板의 水中熔接 最適化에 관한 研究, 韓國漁業技術學會誌, 第20卷 第1號(1984), pp.49-59.
- 9) 吳世奎·南起祐, 國產構造用 鋼板의 水中熔接性과 熔接強度特性, 大韓機械學會論文集, 第7卷, 第3號(1983), pp.263-269.
- 10) 吳世奎·姜文浩, 船舶用 鋼板, 水中熔接部의 TRC 임계응력특성, 대한용접학회 초록집, A-4(1986), pp.19-23.
- 11) I. Masumoto, K. Matsuda, M. Hasegawa, Study on the Crack Sensitivity of Mild Steel Welded Joint by Underwater Welding, JWS, Vol. 50-9 (1981), pp.41-47.