

# 중력식 습식 수중용접부의 인장구속균열 임계응력 특성에 관한 연구

오 세 규 · 강 문 호 · 한 상 덕

부산수산대학, 한국중공업  
(1987년 4월 20일 접수)

## A Study on Tensile Restraint Crack Critical Stress Characteristics of Gravity-Wet-Type Underwater Welded Joints

Sae Kyoo OH, Moon Ho KANG

National Fisheries University of Pusan

Sang Deok HAN

Korea Heavy Industries, Construction Co., LTD

(Received on April 20, 1987)

In this study, the characteristics of TRC (tensile restraint crack) critical stress in the gravity type underwater wet welding process and in the in-air welding have been investigated for Y, y and 45° r grooves using the KR Grade A-3 steel plates and the E4303 covered electrodes.

The following results were obtained:

- (1) In the TRC tests, the initial critical stress of Y groove is higher than those of the 45° r single bebel grooves in both in-air and underwater weldings, and the cold fracture sensitivity is higher in the underwater welding than in the in-air welding.
- (2) The hardness of underwater weld metal is the highest in heat affected zones, and maximum hardness of the heat affected zone is about  $H_K 365$  in the in-air weld but  $H_K 670$  in the underwater weld which is higher for cooling speed is more rapid, resulting in the lower critical stress by increase of fracture sensitivity.
- (3) The diffusible hydrogen quantity for 48 hours is about 18 cc/100 g-weld-metal in the in-air welding but 48 cc/100 g-weld-metal in the underwater welding. So that, in the case of underwater welding the diffusible hydrogen penetrates about 3 times more than that in the in-air welding.

### 서 론

최근 육상자원의 고갈화에 따른 에너지개발 및 해양자원에 대한 관심이 높아짐에 따라 선박이나 해양구조물의 건조 및 해저자원개발 분야에서 수중용접의 연구활동<sup>1-4)</sup>이 활발하게 진행되고 있으나, 수중용접은 대기중용접과는 달리 용접장치의 제작, 용접

장치의 불량, 안전사고에 대한 대책등이 수반되어야 하므로 작업에 많은 어려움이 따르고, 용접 이음부는 급냉되어 취성이 증가된다. 또한, 용접시에 용접부에 용해된 수소는 냉각 후 다량으로 과포화 수소의 형태로 잔재하여<sup>5)</sup> 상온에서도 확산능력을 가진 확산성 수소의 형태로 용접부의 저온 파괴에 큰 영향을 미치는 등<sup>5),6)</sup> 많은 연구과제를 안고 있다.

본 연구에서는 시판중인 피복 아아크 용접봉 (E 4303)과 국산 선박용 강판(KR Grade A-3)을 이용하여 습식 수중 아아크 용접부를 대기중 아아크 용접과 비교하여 그 냉간파괴의 TRC(tensile restraint crack) 임계응력 특성과 경도분포를 조사하였고, 용착 금속부의 확산성 수소량을 측정하여, 대기중용접과 수중용접과의 비교와 용접결함을 실험적으로 해석하였고, 수중용접에서 root 취성파괴의 방지에 기여할 기초자료가 되도록 하였다.

### 시험편 및 실험방법

본 실험에 사용된 시험편 재료는 국산 선박용 강판(KR Grade A-3)으로 두께는 9 mm이며, 용접봉은

용접성 조사와 인장강도 시험을 통하여 가장 우수한 시판중인 지름 4 mm의 라임티타니아계 피복 아아크 용접봉(E4303)을 충분히 건조시킨 후 사용하였다.<sup>7)</sup>

Table 1과 Table 2는 시험편과 용접봉의 기계적 성질 및 화학적 성질을 나타낸 것이다.

대기중용접과 수중용접을 한 후 대기중 또는 수중에서 TRC 시험을 수행하기 위해, 위와 같은 성질의 시험편 재료를 Fig. 1 과 같이 Y groove, y groove, 45°r groove 의 3종류의 groove 형상을 갖도록 가공하였다.

수중용접은 용접봉 각도와 운봉비를 변화시킬 수 있도록 되어 있는 중력식 자동용접장치(Fig.2)를 작각하여 수심 20 cm의 수도수 중에서 수행하였으며, 용접기는 직류 정극성 용접을 수행하기 위해 국산 AC

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

Mechanical properties	Tensile strength kg/mm <sup>2</sup>	Yield strength kg/mm <sup>2</sup>	Elongation %	Charpy impact value kg/mm <sup>2</sup>	
	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 (E4303)**

Mechanical properties	Tensile strength kg/mm <sup>2</sup>	Yield strength kg/mm <sup>2</sup>	Elongation %	Charpy impact value kgm/cm <sup>2</sup>	
	49	43	32	11	
Chemical composition (wt %)	C	Si	Mn	P	S
	0.07	0.15	0.37	0.014	0.013

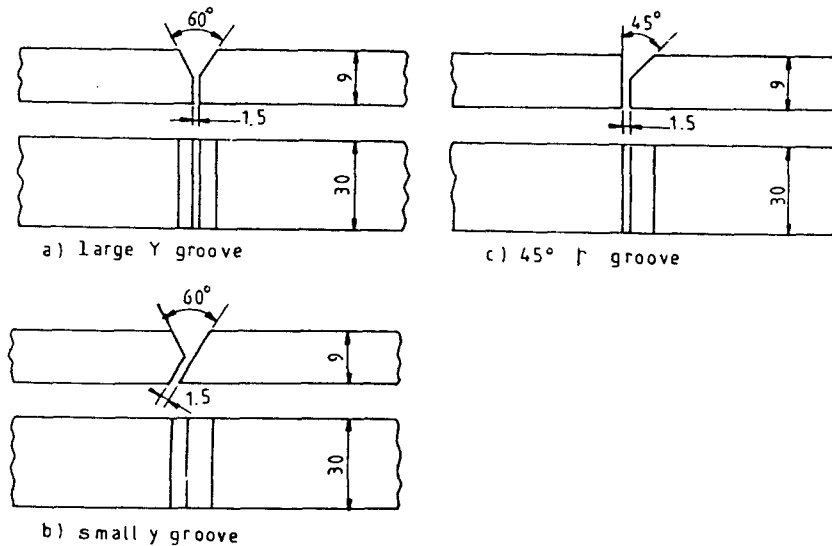


Fig. 1. Shape of grooves

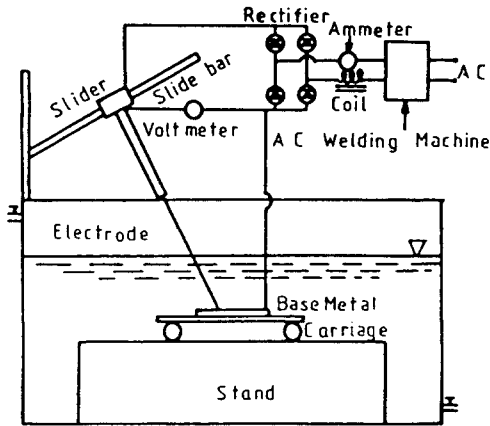


Fig. 2. Block diagram of experimental underwater welding apparatus (gravity type)

아아크 용접기를 다이오드(diode) 정류기로 電波整流하여 사용하였으며, 전류계와 전압계를 부착시켜 전류와 전압의 변화를 항상 확인할 수 있도록 하였다.

대기중 및 수중에서의 TRC 시험장치는 자작한 것으로서 定荷重 外的 拘束破壞 試驗機이며 최고 작용 하중은 8 ton 이고, Fig. 3에 그 개략도가 그려져 있다. 이 시험기의 하중은 그림의 D 부분에서 load indicator로 측정하고, 하중의 작용시 시험편의 파단 시간을 정확히 측정할 수 있도록 타이머를 부착하였다.

TRC 시험을 위한 두께 9 mm의 국산 선박용 강판(KR Grade A-3)의 용접조건은 대기중용접에서는 용접전류 125 A 이고, 수중용접에서는 수심 20 cm인 수도수(수온 20~25°C) 중에서 용접전류 185 A에서 용접을 수행하였다. 이들의 용접조건은 Table 3에 나타나 있다.

대기중 용접한 시험편은 대기중에서, 수중용접한 시험편은 수중에서 각각 TRC 시험을 수행하였으며, 시험편에 부하를 가하는 시간은 시험편의 열영향부 온도가 약 150°C가 되도록 대기중용접에서는 용접 종료 후 2분 지나서, 수중용접에서는 약 20초 후에 TRC

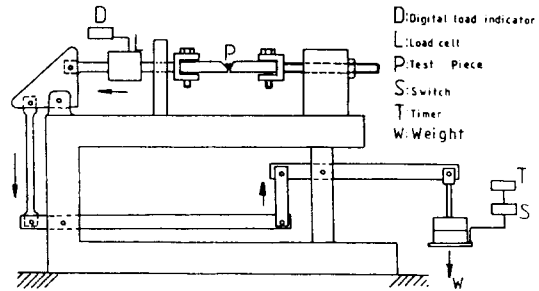


Fig. 3. Block diagram of TRC testing apparatus

시험을 수행하여 groove 형상에 따른 파단시간에 대응하는 임계응력치를 구하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 열 사이클

두께 9 mm 국산 KR Grade A-3 강판에 대해 수중용접한 TRC 시험편 열영향부의 냉각특성과 냉각 속도를 대기중 용접재와 비교하기 위하여 CA 열전대(K type)를 이용하여 용접 열사이클을 측정된 결과를 Fig. 4에 표시하였다. 그림에서 대기중 및 수중용접에서의 최고 도달온도는 모두 1100°C 전후이나, 수중용접의 경우 주위의 물에 의해 급격하게 냉각되는 것을 보여주고 있다. 이러한 급격한 냉각속도로 인하여

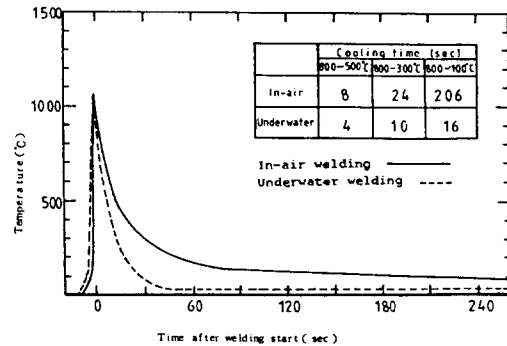


Fig. 4. Welding thermal cycles

Table 3. Welding conditions for TRC tests

Environment of welding	Electrode	Root (mm)	No. of pass	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Electrode angle (°)	Bead length/ Electrode length used	Welding speed (cm/min)
In-air welding	Limetitanium type E 4303(φ 4mm)	1.5	1	125	21	60	1	28
Underwater welding	"	1.5	1	185	31	60	1	28

용접부에 마르텐사이트 조직이 발생되어 경화되므로 경도가 높아지고(3-3절 참조) 연성이 저하되어 root 파괴 발생에 커다란 영향을 미치는 것으로 예상되며, 이로 인한 TRC 파괴 임계응력치의 저하도 예상된다.

### 2. TRC 임계 응력특성

Fig.5는 대기중 및 수중에서의 TRC 시험을 시행하여 groove 형상의 차이에 따른 임계응력  $\sigma_{cr}$  과 파단시간 T와의 관계를 규명한 결과이다. 대기중용접에 의한 초기 임계응력치  $\sigma_{cr}$ 은 Y groove의 경우에 약  $71 \text{ kg/mm}^2$ 로서 최고값을 나타내고, y groove의 경우는 약  $68 \text{ kg/mm}^2$ 이고,  $45^\circ \text{ r groove}$ 의 경우는 약  $52 \text{ kg/mm}^2$ 로서 최저값을 나타내고 있다. 수중용접에 있어서도 Y groove에서 약  $51 \text{ kg/mm}^2$ 로 최고로 높고, y groove에서 약  $49 \text{ kg/mm}^2$ ,  $45^\circ \text{ r groove}$ 에서 약  $41 \text{ kg/mm}^2$ 로써, 수중용접의 경우가 대기중용접보다 낮은 초기 임계응력치를 나타내고 있다. 이것은 수중용접을 수행할 때에는 확산성 수소량의 증대로 인한 취성파괴 영향이(3-4절 참조)과 급격한 냉각속도(Fig. 4) 때문에 martensite 조직이 생성하여 용착금속부와 열영향부의 연성을 저하시키기 때문이라고 생각된다.

최소자승법을 이용한 회귀해석법에 의해 전산된  $\sigma_{cr}$  과 T와의 상관실험식은 다음과 같다.

In-air welds:

$$Y \text{ groove; } \sigma_{cr} = 67.556 - 3.7861 \log T - 9.4790 \times 10^{-2} (\log T)^2 \quad (1)$$

$$y \text{ groove; } \sigma_{cr} = 67.49 - 1.55 \log T - 1.12$$

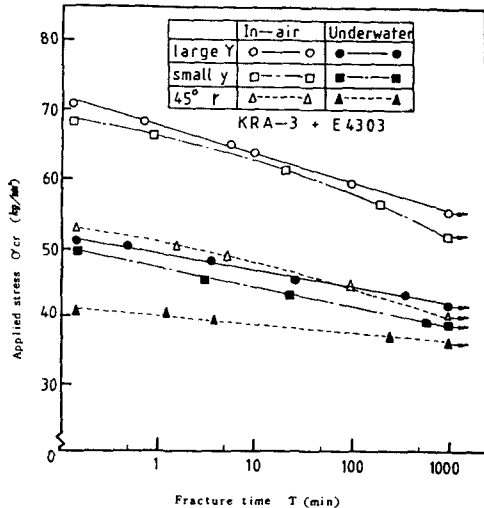


Fig. 5. Relationship between applied stress and fracture time

$$(\log T)^2 \quad (2)$$

$$45^\circ \text{ r groove; } \sigma_{cr} = 50.47 - 2.16 \log T - 0.36$$

$$(\log T)^2 \quad (3)$$

Underwater welds:

$$Y \text{ groove; } \sigma_{cr} = 49.132 - 2.1873 \log T - 1.0578 \times 10^{-1} (\log T)^2 \quad (4)$$

$$y \text{ groove; } \sigma_{cr} = 47.039 - 2.9975 \log T - 9.8476 \times 10^{-2} (\log T)^2 \quad (5)$$

$$45^\circ \text{ r groove; } \sigma_{cr} = 40.538 - 1.3137 \log T - 3.8619 \times 10^{-2} (\log T)^2 \quad (6)$$

### 3. 경도 분포

용접부의 root 파괴에 영향을 미치는 인자의 하나인 본드(bond) 부근의 경도에 대해 조사하기 위하여, TRC 시험을 시행한 시험편의 비이드 길이의 중앙부를 비이드에 직각으로 절단하여 그 횡단면에서 0.5 mm 간격으로 마이크로 누우프(micro-Knoop) 경도기(하중 200 g)를 이용하여 경도분포를 조사한 결과, 시험편의 groove 형상의 차이에 따른 경도값의 차이는 없었다. Fig. 6은 Y groove의 경우, 대기중 및 수중용접한 시험편의 경도분포를 비교한 것을 나타내고 있다.

그림에서 대기중 및 수중용접의 어느 경우이든 본드부 근방의 조립 열영향부에서 각각 H<sub>K</sub>365, H<sub>K</sub>670 으로서 최고의 경도치를 나타내고 있다. 약 2배의 경도 최고치를 갖는 수중용접의 경우, 보다 급격한 냉각속도에 의한(Fig. 4) 이러한 경화부분에 인성이 저하되어 Fig. 5에서와 같이 대기중 용접 보다 낮은

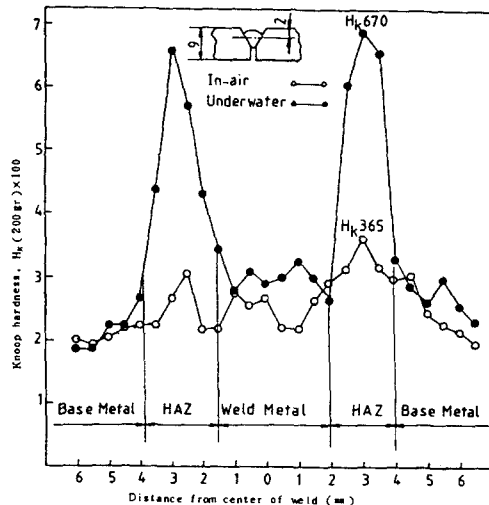


Fig. 6. Longitudinal hardness distribution in the weld

임계 응력치를 갖는 것으로 생각된다.

#### 4. 확산성 수소량

TRC 파괴 임계응력치의 또 다른 저하 원인을 규명하기 위해 대기중과 수중에서 용접한 시험편의 용착 금속부에 대해 확산성 수소량을 JIS Z 3113에 따라 클리세린을 포집액으로 하여 측정하였다.<sup>8)</sup> 그 결과 대기중 및 수중용접 시험편의 groove 형상에 따른 용착금속 100 g 당의 확산성 수소량 측정치는 큰 차이가 없었다.

Fig. 7은 TRC 시험에 의한 임계응력치가 가장 높은 Y groove에 대해 대기중 및 수중용접을 한 시험편의 용착금속 100 g 당의 확산성 수소량을 실측하여 비교한 결과로서, 48시간 동안에 측정된 수소량은 대기중 용접에서 약 18 cc/100 g-weld-metal, 수중용접의 경우에는 약 48 cc/100 g-weld-metal이며 수중용접의 경우가 대기중용접보다 훨씬 높게(약 3배) 나타났다. 이와 같이 수중용접의 용접부에 다량으로 확산성 수소가 침입하기 때문에 용착금속부 및 열영향부에 수소취성이 일어나<sup>9)</sup> Fig. 5에서와 같이 낮은 임계응력치를 갖게 된다고 생각되며 앞으로 이의 방지책에 관한 연구가 필요하다.

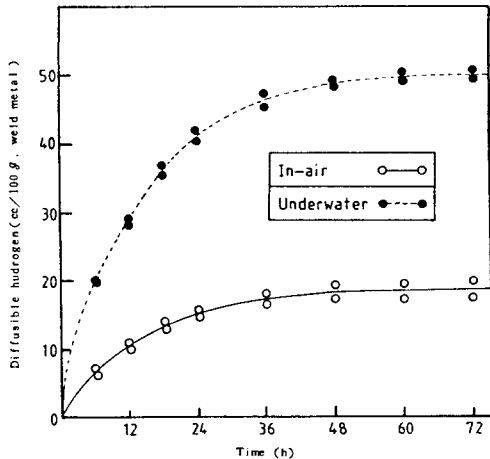


Fig. 7. Relationship between time and diffusible hydrogen

#### 요 약

선박용 강판(KR Grade A-3)과 라임티타니아계 피복 아아크 용접봉(E4303)을 이용하여 대기중용접

및 습식 수중 용접하여 TRC 임계응력치, 열 사이클, 경도분포, 확산성 수소량, micro 조적 등을 실험적으로 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. TRC 시험에 의한 초기 임계응력치  $\sigma_{cr}$ 은 대기중용접 및 수중용접의 어느 쪽에서도 Y groove 형상의 경우가 각각  $71 \text{ kg/mm}^2$ ,  $51 \text{ kg/mm}^2$ 로서 가장 높고, 반대로  $45^\circ$  r형 groove의 경우가 각각  $52 \text{ kg/mm}^2$ ,  $41 \text{ kg/mm}^2$ 로서 최저이며, 수중용접부의 냉과 파괴 감수성이 대기중용접보다 높다.
2. 용접부의 경도는 조립 열영향부에서 가장 높고 대기중용접에서 약 H<sub>K</sub>365, 수중용접에서는 급격한 냉각속도 때문에 약 H<sub>K</sub>670으로 높게 되어 후자의 경우 파괴 감수성의 증가에 의한 낮은 임계응력치를 갖게 된다.
3. 48시간 동안의 확산성 수소량은 대기중용접에서 약 18 cc/100 g-weld-metal, 수중용접의 경우 약 48 cc/100 g-weld-metal로서, 수중용접의 경우가 약 3배 정도 더 침입하고 있으므로 이의 방지책이 필요하다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Masumoto, I., Y. Nakashima, and A. Kondo (1971): Study on the Underwater Welding, JWS 40(7), p.93-103.
- 2) Hasui, A. and Y. Suga(1974): On Underwater Gravity Arc Welding, JWS 43(8), p.17-25.
- 3) Hasui, A. and Y. Suga (1977): On Cooling of Underwater Welds, JWS 48(12), p.63-69.
- 4) Yara, H. and Y. Makishi (1983): Study on Wet Underwater Welding, JWS 1(2), p.183-187.
- 5) 金屬の割れ・破壊総合資料集, 熔接継手部の低温割れ(1980), p.756-763.
- 6) 金屬の割れ・破壊総合資料集, 熔接冷間割れ(1980) p.742-755.
- 7) 吳世奎(1984): 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 20(1), p.45-59.
- 8) Kikuda, Y., T. Araki, A. Ookubo, and H. Ootani (1975): A Study on Method of Measurement for Diffusible Hydrogen in Weld Metal, JWS 45(12), p.30-37.