

工業用水配管의 應力腐蝕龜裂 舉動에 관한 研究

임 우 조, 이 진 평*

부경대학교, *부산기계공업고등학교

(1997년 6월 21일 접수)

Study on the Stress Corrosion Cracking Behaviour of Piping for Industrial Water

Uh - Joh Lim and Gin - Peyoung Lee*

Pukyong National University, *Pusan Mechanical Technical High School

(Received June 21, 1997)

Abstract

Recently, with the rapid development in the industries such as an iron mill and chemical plants, these are enlarged by the use of the piping. This piping was encountered the stress corrosion cracking(SCC) because of stress by water pressure and residual stress of welding etc. under industrial water. In this paper, the behaviour of stress corrosion cracking on the weld zone of steel pipe piping water(SPPW) were investigated according to pre - heat before welding in natural seawater(specific resistance : 25 Ω - cm).

The main results obtained are as follows :

- 1) The stress corrosion cracking for SPPW and SB 41 is most ready to propagate in heat affected zone of weldment.
- 2) The SCC sensitivity of SPPW on weldment is more susceptible than that of SB 41.
- 3) The stress corrosion cracking growth of heat affected zone is delayed by the preheat and dry of base metal and electrode before welding.

1. 序 論

제철소 및 석유화학과 같은 공장의 각종 配管은 인체의 혈관에 해당하는 것으로서 공장을 건설하고자 할 때 가장 중요한 설계요소의 하나이다. 그러나 각종 配管의 설계요소중 工業用水 配管은 腐蝕을 고려하여 지나친 耐蝕性的의 고가재료를 사용함에 따른 과잉설계로 인한 자본금이 증대할 뿐만 아니라 工場이 가동중 工業用水 配管이 腐蝕으로

인해 用水가 누설됨으로써 用水供給의 부족 및 중단현상이 일어날 수 있다. 이러한 현상으로 인해 각종 펌프의 과부하로 효율이 저하됨으로써 에너지 소비는 증대하게 되고, 工業用水配管을 수리 및 교환하기 위해 각종 공장설비의 작동을 정지해야하므로 막대한 산업의 경제적 손실을 초래하게 된다.

일반적으로 工業用水配管은 熔接工程에 의해 설치하여 매설된다. 이와 같이 매설된 工業用水配管은 工業用水 및 토양의 腐蝕環境中에서 熔接工

程에 따른 용접열사이클에 의해 殘留應力, 熔接缺陷 및 微細組織의 변화 등으로 熔接部位가 腐蝕에 더 민감하다¹⁾. 또한 工業用水配管을 장기간 사용함에 따라 熔接部位가 腐蝕龜裂에 의해 누설되고, 이러한 漏泄部位를 熔接에 의해 보수하고자 할 때 配管内部의 습기 등으로 熔接條件이 가혹하기 때문에 熔接缺陷이 일어날 수 있으며, 이러한 熔接缺陷을 갖이는 工業用水配管의 熔接部位는 工業用水가 강전해질인 海水중에서 토층의 차이, 熔接熱 사이클에 의한 殘留應力, 및 水壓에 의해 應力腐蝕龜裂이 발생할 수 있다. 이와 같은 工業用水配管의 應力腐蝕龜裂 발생으로 工業用水가 누설된다면 에너지 소비를 비롯하여 막대한 경제적 손실을 초래할 수 있으므로 工業用水중에서 配管의 應力腐蝕龜裂 特性을 考察하여, 防蝕對策을 강구해야할 研究가 요구되고 있다^{2,3)}. 그러나 이러한 요구에도 불구하고 工業用水가 강전해질인 海水中에서 熔接에 따른 應力腐蝕龜裂 舉動에 관한 研究는 거의 찾아 보기 힘들다^{4,5,6,7,8)}. 따라서 本 研究는 工業用水配管에 주로 사용되고 있는 配管用炭素鋼管(SPPW)의 熔接部位에 대한 腐蝕龜裂舉動을 研究하기 위하여, 配管用炭素鋼管의 熔接部에 대한 應力腐蝕試驗을 실시한 후 이 實驗結果를 토대로 하여, 용접전 豫熱에 따른 配管用炭素鋼管의 熔接部位에 대한 應力腐蝕龜裂舉動을 究明함으로써 工業用水配管 設備工事, 老朽配管 修理工事의 기초 자료로 활용하는데 寄與하고자 한다.

2. 試驗片 및 實驗方法

2.1 試驗材料 및 試驗片

本 實驗에 사용된 材料는 工業用水配管에 주로 사용되고 있는 配管用炭素鋼管(Steel pipe piping water, SPPW)과 補助材料(工業用水配管이 腐蝕損傷되었을 때에는 대부분 연강재로 용접공정에 의해 보수함)는 軟鋼(SS41)인 低炭素鋼으로 하였으며, 이들 두가지 試驗材料의 化學的 成分과 機械的 特性은 Table 1과 같다.

그리고 試驗片의 熔接條件은 Table 1과 같은 材料를 母材로 사용하고, 두께 7 mm인 材料에 아크

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of used materials

(a) Chemical composition(wt %)

Material	C	Si	Mn	P	S
SPPW(KS D3507)	<0.25	<0.35	0.75	0.05	0.05
SS41(KS SB41)	0.11	0.29	0.59	0.01	0.01

(b) Mechanical properties

Material	T.S(kgf/mm ²)	Y.S(kgf/mm ²)	Elongation(%)
SPPW(KS D3507)	30	-	27
SS41(KS SB41)	42.4	25.8	32

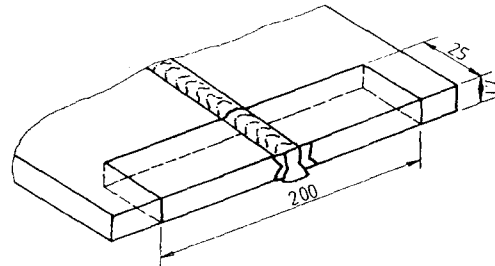


Fig. 1 Welding plate configuration and extraction of specimen(mm)

Table 2. Welding condition

Sp. No.	Pre-Heat of BM(°C)	Electrode Pre-Heat(°C)	Side	Amp. (A)	Volt (V)	Heat input (kJ/cm)
No. 1 HAZ	100-150	KSE4301 80-100 4mm(dia)	Face	140	25	14
				170	26	17.7
			Back	170	26	17.7
No. 2 HAZ	Bared in Moist air	KSE4301 Not Pre-Heat 4mm(dia)	Face	140	25	17.7
				170	26	17.7
			Back	170	26	17.7

용접(arc welding)에 의해 乾燥器로 熔接棒을 乾燥한 후, Fig.1과 같이 X形狀으로 熔接을 실시하였으며, 각 試驗片의 熔接條件은 Table 2에 나타내었다. 일반적으로 熔接部에 있어서 熱影響部가 腐蝕에 가장 민감하므로 熔接에 의한 試驗片을 熱影響部(Heat Affected Zone, 이하 HAZ 라 칭함)라 한다. Table 2의 熔接條件中에서 熔接入熱量(Weld heat input) H는 다음 式으로 계산하였다.

$$H = 60 EI/v \text{ (Joule/cm)} \quad (1)$$

여기서, E : 아크 전압(V)

I : 아크 전류(A)

v : 용접속도(cm/min)

그리고 2 Pass 용접을 할 경우에는 슬랙을 철저히 제거한 다음 용접하고, 背面용접을 할 경우에는 밀면 따내기 후 뒷면에 용접을 실시하였으며, 각 試驗片의 용접速度는 15 cm/min로 일정하게 하고, Table 2에서 각 용접條件의 特性은 다음과 같은 측면에서 실시하였다. No.1 試驗片 : 일반 配管의 용접指針書와 동일하게 하였다. No.2 試驗片 : 雨天時나 配管内의 습기가 있는 상태에서 用水配管을 용접에 의해 보수할 경우, 대기중의 濕氣에 의해 母材와 용접棒이 乾燥되지 않는 상태에서 용접을 실시함에 따른 용접缺陷 또는 水素脆化에 의한 龜裂을 觀察하고자, 母材를 豫熱하지 않고 水中에 10시간 浸漬하여 반출한 후 豫熱하지 아니한 상태와 용접棒도 건조를 하지 아니한 상태에서 용접을 실시하였다.

Table 1과 같은 化學的 組成과 機械적 特性을 가진 配管用炭素鋼管(SPPW) 및 軟鋼(SB41) 材料를 Table 2의 용접條件으로 용접한 후 試驗片을 밀링에 의해 두께 3mm 로 熱影響이 가능한 작게 미치도록 微細한 量으로 가공하였다. 이들 試驗片을 급힘試驗機에 의해 U-bend 試驗片을 製作하였다. 이와 같이 製作한 試驗片은 Bending에 의해 일정한 Strain을 유지시키도록 하였으며, 이 U-bend 試驗片의 形狀과 치수는 Fig.2와 같고, 용접部位는 용착금속을 중심으로 Bending하였다. 이 경우 試驗片에 負荷되는 Strain은 다음 式에 의해 구하였다⁹⁾.

$$\epsilon = b/2R \quad (2)$$

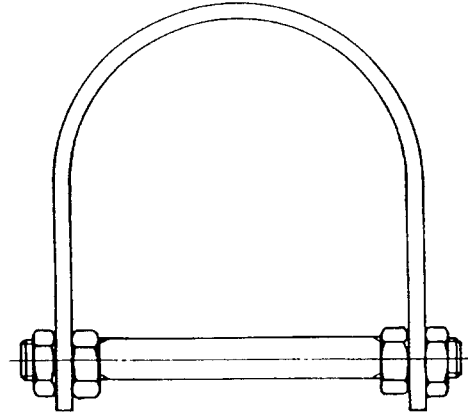
여기서 : ϵ = Engineering strain

R = Bending radius

b = Specimen thickness

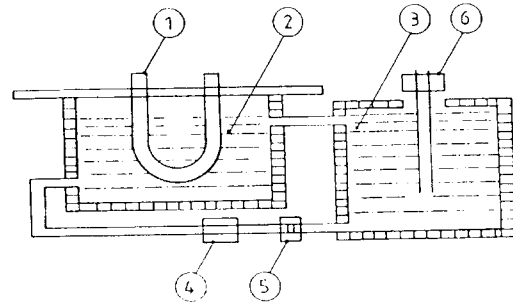
2.2 實驗裝置

Fig.2와 같은 U-bend 試驗片 表面의 불순물을 사포 1200번까지로 연마한 후 아세톤으로 탈지하고, 海水中에 浸漬하기 전에 용접熱싸이클에 의한 용접部位의 龜裂發生을 미리 관찰한 후, Fig.3과 같은 循環浸漬實驗裝置의 海水中에 浸漬하였다. 그리고 이 實驗裝置 각부 特性은 다음과 같다.



Length(mm)	Width(mm)	Thickness(mm)	Bending Radius(mm)	Strain Level(%)
120	20	3	17	8.82

Fig. 2 Schematic showing of U-bend specimen and its dimension



- 1. Specimen
- 2. Corrosion cell
- 3. Feed Water tank
- 4. Water pump
- 5. Filter
- 6. Air pump

Fig. 3 Schematic diagram of U-bend type stress corrosion

1) 각 試驗片이 浸漬되는 腐蝕環境槽는 電氣化學的인 영향을 고려하여 플라스틱 비이커를 사용하고, 腐蝕溶液貯藏環境槽는 특수 수지로 제작하였다.

2) 電氣化學的인 영향과 농도 변화를 防止를 위해 循環水 펌프는 플라스틱 펌프를 설치하여 시간당 40 리터로 循環시키고, 移送配管도 플라스틱 배관으로 제작하였으며, 試驗片의 腐蝕生成物에 의한 電氣化學的인 영향을 제거하기 위해 循環配

管에 절연성 필터를 사용하였다.

3) 공기펌프를 사용하여 공기를 주입시킴으로써 수질의 변화를 막고, 가혹한 環境條件下에서 腐蝕實驗이 進行되도록 하였다.

2.3 實驗方法

應力腐蝕實驗은 Fig.2와 같은 試驗片 表面의 불순물을 사포 1200번까지로 연마한 다음 아세톤으로 탈지 후 腐蝕溶液에 浸漬하기 전에 試驗片 表面의 龜裂發生 有無를 관찰하였다. 그리고 腐蝕環境槽의 溶液은 工業用水로 많이 사용되는 腐蝕性이 강한 比抵抗 25 Ω·cm인 天然海水로 循環시켰다. 그리고 각 試驗片을 각 腐蝕環境槽에 浸漬한 후 400시간 마다 應力腐蝕에 의한 龜裂發生을 관찰 및 조사하였다.

3. 結果 및 考察

3.1 熔接部の 應力腐蝕龜裂 樣相

Fig.4는 海水環境 中에서 主 材料인 配管用炭素鋼管材와 補助材料인 軟鋼材의 母材(Base Metal, BM) 및 熔接熱影響部(Table 2의 No.1 HAZ)에 대한 U-bend 試驗片의 應力腐蝕에 의한 龜裂進展을 나타낸 것이다. 配管用炭素鋼管材와 軟鋼材의

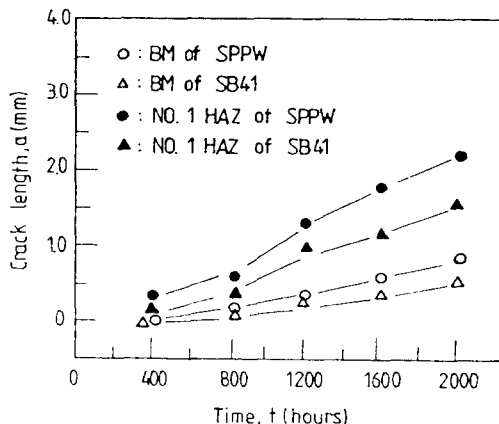


Fig. 4 Stress corrosion crack of base metal (BM) and NO.1 Heat Affected zone (No.1 HAZ) according to materials in seawater

熔接部위에 있어서 다 같이 熔接熱影響部에 應力腐蝕龜裂이 발생하여 성장되었으며, 각 材料의 熔接熱影響部에서 성장된 龜裂길이, a는 母材에서 성장된 龜裂길이보다 더 빨리 進展되고 있다. 또한 配管用炭素鋼管材의 母材와 熔接熱影響部에서 應力腐蝕龜裂은 軟鋼材의 母材와 熔接熱影響部에서 應力腐蝕龜裂길이보다 더욱 빨리 進展되었다. Fig.5는 海水中에서 熔接에 따른 용접열사이클이 配管用炭素鋼管材와 軟鋼材의 熔接熱影響部에 미치는 應力腐蝕龜裂 感受性を 定量的으로 검토하기 위하여, 熔接熱影響部の 應力腐蝕龜裂길이 (aHAZ)에 대한 母材의 應力腐蝕龜裂길이 (aBM)의 비를 계산에 의하여 비교함으로써 용접열사이클에 의한 應力腐蝕龜裂 感受性を 평가하여 보인 것이다.

여기서 應力腐蝕龜裂 感受性 S 는 Fig.4의 실험

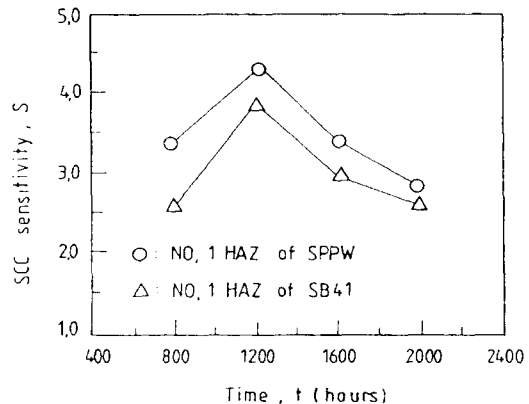


Fig. 5 SCC sensitivity to materials of No.1 HAZ in seawater (SCC sensitivity = crack length of HAZ/crack length of BM)

치를 다음 式으로 계산하였다.

$$S = aHAZ / aBM \quad (3)$$

용접열사이클에 의한 應力腐蝕龜裂 感受性は 配管用炭素鋼管材의 熱影響部가 연강재의 熱影響部보다 전반적으로 더 민감한 경향을 나타내고 있다. 이와 같이 용접열사이클에 의한 應力腐蝕龜裂 感受성이 연강재의 熱影響部보다 配管用炭素鋼管材의 熱影響部가 더 민감한 이유는 Table 1에서 탄

소의 함량이 軟鋼材보다 配管用炭素鋼管材에 더 많이 함유됨으로써 金屬의 조직에 미치는 용접열 사이클이 크기 때문인 것으로 생각된다. 그러므로 노후된 工業用水配管을 軟鋼材에 의해 보수하고 저 할 때 腐蝕環境強度에는 큰 영향이 없을 것으로 추정된다. 그리고 配管材나 軟鋼材의 應力腐蝕龜裂 感受性は 초기에 증가하다가 龜裂이 進展되면서 점차 감소되는 樣相이며, 이러한 樣相의 이유는 U-bend 試驗片에 초기에는 굽힘에 의한 구속응력이 크게 작용되어지나, 龜裂이 성장하여 구속응력이 점차 해방됨으로써 腐蝕環境은 동일하지만 應力腐蝕龜裂感受性は 둔감해지는 것으로 생각된다.

Fig.6은 配管用炭素鋼管材와 軟鋼材의 熔接部位에 대한 應力腐蝕龜裂特性을 考察하기 위하여 NO.1 試驗片 熔接部位의 硬度分布를 보여주고 있다.

이에 의하면 연강재의 熔接部는 配管用炭素鋼

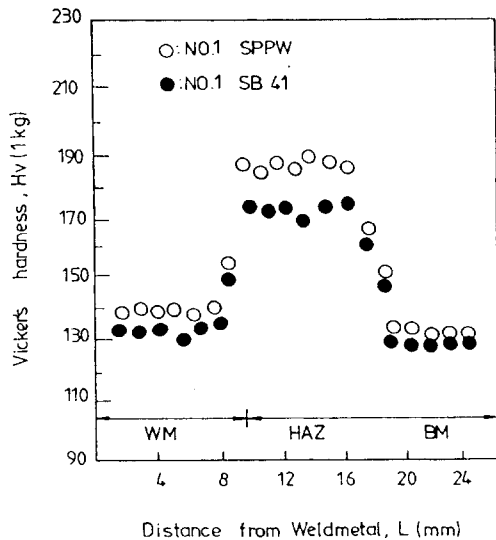


Fig. 6 Vicker's hardness of weld zone according to materials of no.1(SPPW and SB41)

管材의 熔接部보다 더 연화되어 있는 樣相을 나타내고, 이 연화된 樣相의 이유는 Table 1에서 連 강재의 탄소함량이 配管用炭素鋼管材의 탄소함량보다 더 적기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 이와 같이 軟鋼材가 配管用炭素鋼管材보다 더 연화되어 U-bend에 의한 구속응력이 작게됨으로써 母

材나 熔接熱影響部에서 軟鋼材가 配管用炭素鋼管材보다 應力腐蝕龜裂 進展이 지연되고 應力腐蝕龜裂 感受性は 둔화되는 것으로 思料된다.

3.2 應力腐蝕龜裂에 미치는 豫熱의 影響

Fig.7은 熔接을 실시하기전에 母材와 熔接棒의 豫熱 및 건조여하에 따른 熔接熱影響部の 應力腐蝕龜裂에 미치는 영향을 考察하기 위하여, 海水中에서 配管用炭素鋼管材와 連 강재에 대해 Table 2와 같이 母材, 熔接棒을 豫熱 및 건조하여 熔接한 熔接熱影響部(No.1 HAZ)와 母材, 熔接棒을 豫熱과 건조를 하지 아니한 상태에서 熔接을 실시한 熔接熱影響部(No.2 HAZ)의 應力腐蝕龜裂길이를 나타내 보인 것이다.

母材와 熔接棒을 豫熱, 건조한후 熔接을 실시한

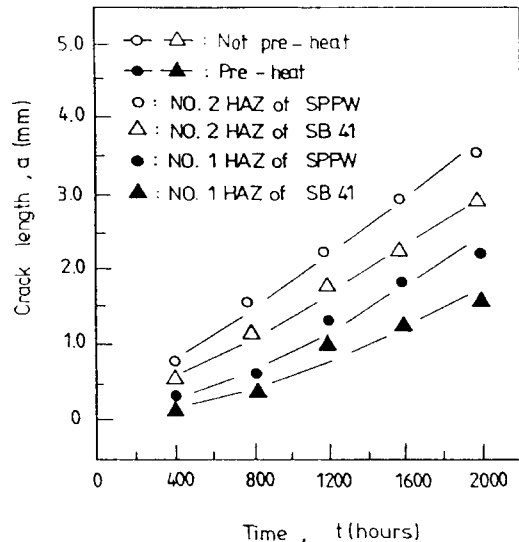


Fig. 7 Stress corrosion crack length of HAZ according to pre-heat before Welding in seawater for SPPW and SB41

熔接熱影響部の 應力腐蝕龜裂進展보다 母材와 熔接棒을 豫熱, 건조하지 아니하고 熔接을 실시한 熔接熱影響部の 應力腐蝕龜裂이 더 進展하는 樣相을 나타내고 있다. 그러므로 熔接前에 母材와 熔接棒을 豫熱 및 건조시킴으로써 應力腐蝕龜裂을 抑制할 수 있음을 알 수 있다.

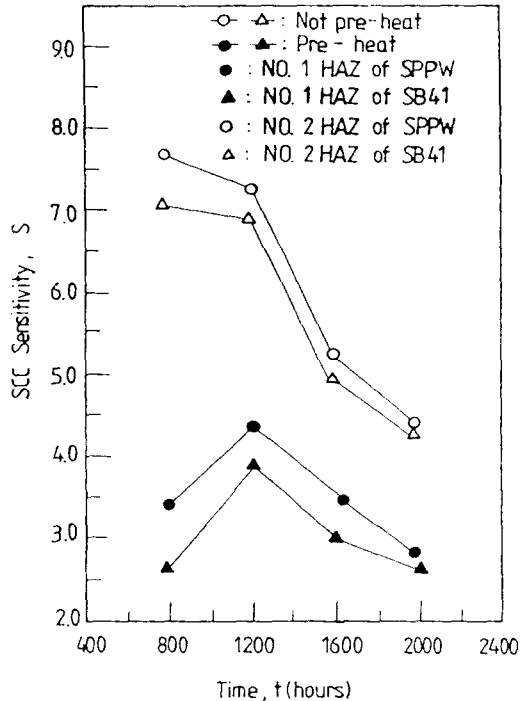


Fig. 8 SCC sensitivity of HAZ according to pre-heat before welding in seawater

Fig.8은 海水 中에서 熔接을 실시하기전에 母材와 熔接棒의 豫熱, 乾燥 여부가 配管用炭素鋼管材 및 연강재의 熔接熱影響部에 미치는 應力腐蝕龜裂 感受性を 定量的으로 검토하기 위하여, 母材와 熔接棒을 豫熱 및 건조하여 熔接한 熔接熱影響部 (No.1 HAZ)의 應力腐蝕龜裂 感受성과 母材와 熔接棒을 豫熱 및 건조도 하지 아니한 熔接熱影響部 (No.2 HAZ)의 應力腐蝕龜裂 感受성을 Fig.7의 실험치를 식 (3)에 의해 계산하여 정리한 것이다.

熔接을 실시하기전에 母材와 熔接棒을 豫熱, 건조하여 熔接을 실시한 熔接熱影響部(No.1 HAZ)의 應力腐蝕龜裂 感受성은 母材와 熔接棒을 豫熱 하지 아니하고 熔接을 실시한 熔接熱影響部(No.2 HAZ)의 應力腐蝕龜裂 感受성보다 더 크게 둔화되고 있다. 따라서 母材와 熔接棒을 豫熱하여 熔接을 실시함으로써 용접열사이클에 의한 應力腐蝕龜裂 感受성을 크게 개선할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 熔接을 실시하기전에 母材와 熔接棒을 豫熱하여 熔接을 실시한 熔接熱影響部(No.1 HAZ)의 應

力腐蝕龜裂 感受성에 비해 母材와 熔接棒을 豫熱 하지 아니함으로써 초기에서부터 應力腐蝕龜裂 感受성이 매우 크게 나타나다가 시간이 경과함에 따라 感受성이 감소하는 폭이 더 크게 나타나고 있다.

3.3 豫熱에 따른 熔接部の 機械的, 組織的 特性

Fig.9는 配管用炭素鋼管材를 熔接하기전에 Table 2의 母材와 熔接棒을 豫熱, 건조 여하에 따라 應力腐蝕龜裂에 미치는 熔接部の 機械的 特性을 考察하기 위하여, 熔接된 主材料인 配管用炭素鋼管材의 NO.1 및 NO.2 試驗片 熔接部位의 硬度分佈를 보여주고 있다.

母材와 熔接棒을 豫熱, 건조하여 熔接을 실시한

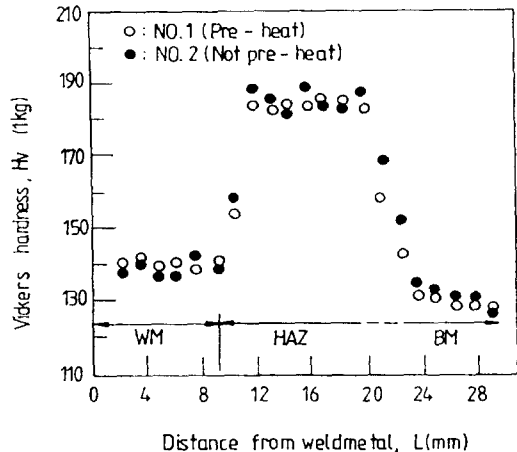
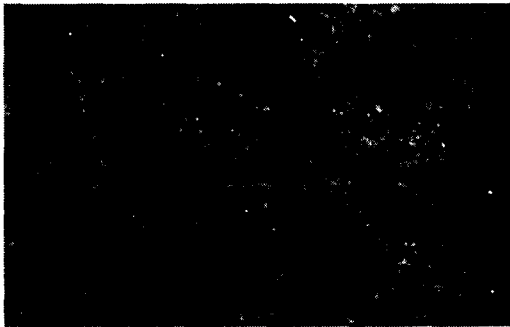


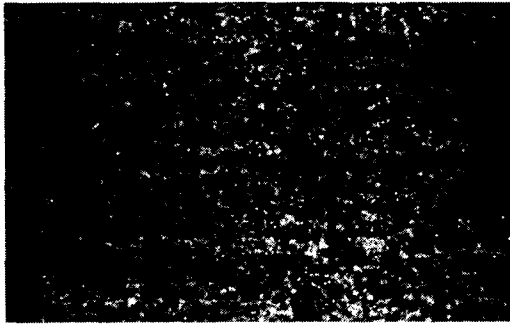
Fig. 9 Vicker's hardness of weld zone according to pre-heat before welding for SPPW

NO.1 試驗片 熔接熱影響部の 硬度分佈 변화는 거의 균일한 경도분포를 나타내고 있지만, 母材와 熔接棒을 豫熱, 건조하지 아니하고 熔接을 실시한 NO.2 試驗片에서는 熔接熱影響部の 硬度分佈가 다소 큰 폭으로 변화되고 있음을 보여 주고 있다.

이와 같이 NO.2 試驗片에서 熔接熱影響部の 硬度分佈 변화 폭이 크게 되는 이유는 母材와 熔接棒이 豫熱, 건조되지 않은 상태에서 熔接은 습기의 증발에 의해 냉각속도가 빨라지기 때문인 것으로



(a) No.1 HAZ



(a) No.2 HAZ

Photo.1 Microstructure of heat affected zone(HAZ) according to pre-heat before welding(x 400)

사료된다.

Photo.1은 配管用炭素鋼管材를 NO.1 및 NO.2의 豫熱 및 건조條件에 따라 熔接되어진 熱影響部の 微細組織을 보인 것이다.

Photo.1(a)에 의하면 No.1 試驗片的 熔接熱影響部는 熔接時 冷却速度가 완만하므로 組織의 결정입자의 크기가 母材의 크기와 거의 동일하고 탄화물의 석출이 나타나고 있다. 그러나 Photo.1(b)에 의하면 No.2 試驗片的 熔接熱影響部는 No.1 試驗片보다 熔接時 습기의 증발에 의한 影響으로 冷却速度가 빨라짐으로써 組織의 결정입자가 미세해지고, 석출시간이 짧게 되어 탄화물이 거의 나타나지 않고 있다. 따라서 Fig.7 및 Fig.8에서 No.1 試驗片보다 No.2 試驗片的 熔接熱影響部에 應力腐蝕龜裂의 進展이 빨라지고 應力腐蝕龜裂 感受性에 민감한 이유는 母材, 熔接棒이 건조되지 않은 상태에서 多層熔接이 수행될 경우 熔接熱로 습기가 증발되어질 것으로 볼 수 있으며, 이와 같은 습

기의 증발은 熔接部에 증발잠열의 흡수로 인해서 冷却速度가 더 빨라짐으로써 熔接熱影響部の 硬度分布가 다소 큰 폭으로 변화되고, 水素集積에 의한 마이크로 龜裂(micro-crack) 또는 熔接熱影響部에 있는 MnS계 不純物 및 層狀 介在物 等の 開口가 原因10)이 되어 海水의 腐蝕環境中에서 이러한 熔接熱影響部の 마이크로 龜裂과 開口의 缺陷을 基點으로 腐蝕과 應力에 의해 應力腐蝕龜裂이 촉진됨으로써 應力腐蝕龜裂 進展이 더 크게 되고, 應力腐蝕龜裂의 感受性은 초기부터 매우 민감하게 되는 原因으로 생각되어진다.

4. 結 論

本 研究에서는 配管用炭素鋼管(SPPW) 및 軟鋼(SB 41)의 熔接部에 대해 天然海水 中에서 應力腐蝕試驗을 실시하여, 熔接前 豫熱에 따른 應力腐蝕龜裂 舉動을 研究한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 配管用炭素鋼管材와 軟鋼材의 熔接部에 대한 應力腐蝕龜裂은 熔接熱影響部에서 더 빨리 進展된다.

2) 熔接部에 있어서 配管用炭素鋼管材의 應力腐蝕龜裂 感受性은 軟鋼材의 應力腐蝕龜裂 感受性보다 더 敏感하다.

3) 母材와 熔接棒을 豫熱, 乾燥시킴으로써 熔接熱影響部の 應力腐蝕龜裂 進展은 지연되었다.

參 考 文 獻

1. 林祐助(1985), 金屬構造물의 應力과 腐蝕, 한국박용기관학회지, 10, 1, p47 - 49
2. 澤田德秋(1985), "埋設管의 腐食と防食", 防食技術, 34, p246 - 253
3. 中島博志(1984), "埋設配管腐食對策のシステムの考え方", 33, p349 - 355
4. 朴庸秀, 洪淳九(1982), "水道管用 金屬材料的 腐蝕舉動研究", 韓國腐蝕學會誌, Vol.11, No.4, p7 - 14
5. 笠原見明(1981), "プローブを用いて地下埋設管の陰極防食レベルを評價する方法", 防食技術, 30, p524 - 533
6. 山本一雄, 溝口 茂, 吉光國正, 川崎淳司(1983), "鑄鐵

工業用水配管의 應力腐蝕龜裂 舉動에 관한 研究

- 管の黒鉛化腐食と強度劣化の關係”, 防食技術, 32, p157 - 162
7. Control of Pipe - Line Corrosion(1978), “Cathodic Protection - How it Work - s”, p19 - 28
8. 笠原晃明, 足立晴彦(1986), “土壤の腐食性を考慮した埋設覆装鋼管の陰極防食クライテリオン, 防食技術, 35, p509 - 514
9. 國尾 武, 岡村弘之(1984), 破壊力學實驗法, 朝倉書店, p 177 10. 金永植(1990), “最新熔接工學”, 螢雪出版社, p168 - 186