

공업용수배관의 캐비테이션 - 침식특성에 관한 연구(1)

김윤곤 · 황재호 · 임우조 · 이광우*

부산수산대학교 · *한국전력공사

(1994년 8월 25일 접수)

Study on the Characteristics of Cavitation Erosion for Industrial Water Piping(1)

Yun - Gon KIM, Jae - Ho HWANG, Uh - Joh LIM and Kwang - Woo LEE

National Fisheries university of Pusan, Korea Electric Power Corporation

(Received August 25, 1994)

Recently, with the rapid development in the industries such as an iron mill and chemical plants, there is enlarged by the use of the piping.

Sepecially, the piping connected with a fluid, if it is increase the speed of running fluid, ought to generate cavitation phenomenon with unbalanced pressure. So, th cavitation phenomenon cause serious damage of the piping, because it generate erosion and corrosion in the piping.

In this study, the steel pipe piping water(SPPW) and SPPW on weldment were tested by using of cavitation-erosion test apparatus with nozzle and were investigated under the marine environment of liquid.(specific resistance : 25 Ω · cm)

The main results obtained are as follows :

- 1) The total weight loss and weight loss rate of affected zone of weldment by corrosion-erosion in the sea water are more increased than that of base metal.
- 2) The electrode potential by corrosion-erosion in the sea water becomes less noble than that of base metal, and current density is more increased.
- 3) As time goes by, the total weight loss and weight loss rate by cavitation erosion-corrosion in air-liquid 2 phase flow become more increased then those in only liquid solution, but these values turn to be decreased.

序 論

제철소 및 석유화학과 같은 공장의 각종 配管은

인체의 혈관에 해당하는 것으로 공장을 건설하고
저 할때 가장 중요한 설계요소 중의 하나가 되고
있다.

특히 액체를 취급하는 機械는 유속이 빠르게 되면 유속 충격과 저압의 저하에 따른 국부적 비등으로 인해 캐비테이션(cavitation) 현상이 발생한다. 이러한 캐비테이션 현상이 발생함으로써 소음과 진동을 초래하고, 또한 기포의 붕괴에 따른 충격압으로 캐비테이션-浸蝕이 발생하여 機械의 構成材料에 손상을 초래하게 된다. 이러한 손상으로 용수의 누수 때문에 각종 펌프의 과부하로 효율이 저하됨으로써 에너지 소비는 증대하게 되고, 공업용수 配管을 수리 및 교환하기 위해 각종 공장설비의 작동을 정지해야 하므로 막대한 산업의 경제적 손실을 초래하게 된다.

일반적으로 공업용수 配管은 熔接공정에 의해 설비하여 매설되며, 이와 같이 매설된 공업용수 配管은 공업용수 및 토양의 腐蝕環境 중에서 熔接工程에 따른 熔接熱 사이클에 의해 殘留應力, 熔接결합 및 미세조직의 변화 등으로 熔接部位가 腐蝕에 더 민감하다.

더욱이 腐蝕性的 액체에 사용되는 配管의 金屬材料에는 캐비테이션-浸蝕과 동시에 電氣化學的인 腐蝕이 일어나게 되며, 金屬材料에 浸蝕-腐蝕(erosion-corrosion)이 중첩하여 발생하는 경우에는 浸蝕과 腐蝕이 상호간에 가속하는 상승효과 때문에 配管의 수명에 치명적인 영향을 미친다. 그러므로 공업용수 配管에 있어서 熔接部位의 金屬材料에 미치는 浸蝕-腐蝕의 상승효과에 관한 研究가 요구되고 있다^{1,2,3)}.

캐비테이션 발생으로 인한 浸蝕-腐蝕 현상은 19세기 후반에 고속 선박의 프로펠러에서 목격되었으며, 그 이후 현재까지 각종 材料의 표면에 캐비테이션-浸蝕에 대해 다수의 研究가 행하여져 왔으나 이들의 研究는 浸蝕-腐蝕舉動에 미치는 材料, 環境 및 유체역학적인 지배인자 중에서 대부분 유체역학적인 實驗 보고들이었다^{4,5)}. 그러나 유체역학적 원인에 의한 機械的인 기포의 파괴에 따른 충격력과 사용 環境條件의 電氣化學的인 腐蝕이 작용한다면, 캐비테이션에 의한 浸蝕-腐蝕 현상은 機械的, 電氣化學的인 상승효과로 機械 구조물의 부재에 치명적인 손상을 일으킬 것으로 생

각된다. 腐蝕 環境의 영향에 대해서는 몇 편의 研究 결과에도 불구하고, 浸蝕-腐蝕舉動에 미치는 액상유(腐蝕溶液)에 따른 영향에 대해서는 충분히 밝혀져 있지 않다^{6~11)}.

따라서 本 研究는 공업용수 配管에 주로 사용되고 있는 配管用 炭素鋼管(SPPW)의 熔接部位에 대한 캐비테이션 浸蝕 특성에 관한 研究를 하기 위하여, 天然海水 環境하에서 配管用 炭素鋼管의 캐비테이션 浸蝕-腐蝕 實驗을 실시하고, 이때의 浸蝕-腐蝕舉動을 관찰 조사 하였다. 이러한 實驗 결과를 토대로 하여, 母材와 熔接部位의 浸蝕-腐蝕舉動과 電氣化學的 特性을 究明하였으며, 또한 浸蝕-腐蝕舉動에 미치는 氣-液 2상류의 영향을 고찰함으로써 공업용수 配管設備 工事의 設計, 노후 配管 수리공사의 腐蝕對策 그리고 각종 配管의 수명 연장의 基礎 設計資料로 寄與하고자 한다.

試驗片 및 試驗方法

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) 材로 하였으며, 이 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

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	0.78	0.05	0.305

(b) Mechanical properties			
Material	T. S (kgf/mm ²)	Y. S (kgf/mm ²)	Elongation (%)
SPPW (KS D3507)	30	-	27

材料를 母材로 사용하고, 두께 6mm인 材料에 아크溶接(arc welding)에 의해 Fig. 1과 같이 X形狀으로 溶接을 실시하였으며, 각 試驗片의 溶接條件은 Table 2에 나타내었다.

Table 2의 溶接條件中에서 溶接入熱量(Weld heat input) H 는 다음 式으로 계산하였다.

$$H = 60EI/V \text{ (J/cm)} \quad (1)$$

여기서

E : 아크 電壓(V)

I : 아크 電流(A)

V : 溶接速度(cm/min)

특히, 2Pass 溶接을 할 경우에는 슬랙을 철저히 제거한 다음 溶接하고, 背面溶接을 할 경우에

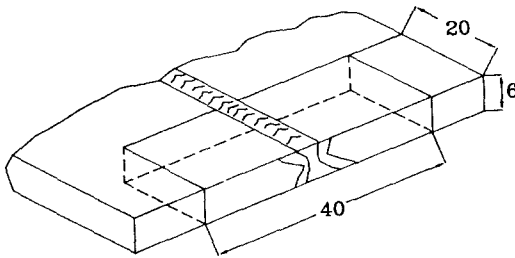


Fig. 1. Welding plate configuration and extraction of specimen(mm).



Fig. 2. Dimension of test specimen(unit : mm).

는 밀면 따내기 후 뒷면에 溶接을 실시하였다. 각 試驗片의 溶接速度는 15cm/min로 일정하게 하였다.

Table 2에서 각 溶接條件의 特性은 다음과 같은 側面에서 실시하였다.

No. 1 試驗片 : 일반 配管의 溶接指針書와 동일하게 하였다.

No. 2 試驗片 : 雨天時나 配管內의 濕氣가 있는 상태에서 工業用水配管을 溶接에 의해 補修할 경우, 大氣 中の 濕氣에 의한 母材와 溶接棒이 乾燥되지 않는 상태에서 溶接을 실시함에 따른 溶接缺陷을 조사하고자, 母材를 豫熱하지 않고 水中에 10시간 浸漬하여 반출한 후 豫熱하지 아니한 상태와 溶接棒도 乾燥를 하지 아니한 상태에서 溶接을 실시하였다.

Table 1과 같은 化學的 組成과 機械的 特性을 갖인 配管用 炭素鋼管 材料를 Table 2의 溶接條件으로 溶接한 후 試驗片을 밀링에 의해 두께 6mm로 熱影響이 가능한 작게 미치도록 微細한 量으로 가공하였다.

2. 實驗裝置

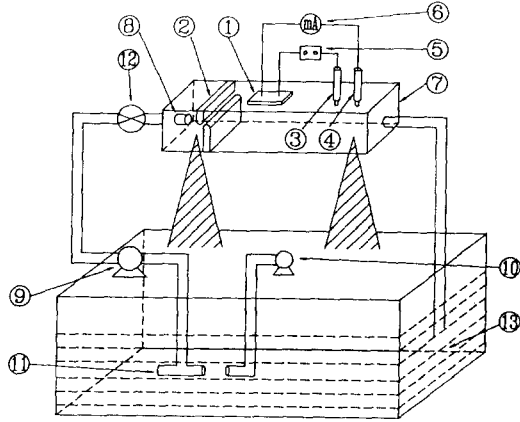
本 實驗에 사용한 水噴射의 浸蝕-腐蝕 實驗裝置의 全體系統圖는 Fig. 3과 같다. Fig. 3의 水噴射의 浸蝕-腐蝕 實驗裝置는, 아크릴로 제작한 사각형의 유로(35×65mm)에 내경 15mm의 플라스틱 平行 노즐(parallel nozzle)을 설치하였고, 노즐 선단으로 부터 40mm의 거리에 사각형 유로의 상하에 반원주의 언덕을 설치하였다. 아크릴로 제작한 반원주형의 언덕은 유로 상측에 20×25×

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
			Back	170	28	17.7
			Back	170	28	17.7
No. 2 HAZ	Bared in moist air	KSE4301 not pre-heat 4mm (dia)	Face	140	25	17.7
			Back	170	28	17.7
			Back	170	28	17.7

25mm의 언덕과 하측에 20×40×25mm의 언덕을 설치하고, 각각 R=10mm로 모뎀기를 하였다.

腐蝕溶液의 공급 및 순환은 플라스틱 펌프에 의해 노즐 선단으로부터 매분 25l의 腐蝕 溶液을



- | | |
|------------------------|----------------------|
| 1. Specimen | 2. Nozzle |
| 3. Reference electrode | 4. Counter electrode |
| 5. Potentiometer | 6. Ampere meter |
| 7. Tube | 8. Fountain-jet |
| 9. Water pump | 10. Air pump |
| 11. Filter | 12. Valve |
| 13. Drain water pump | |

Fig. 3. Schematic diagram of cavitation erosion-corrosion test apparatus.

25m/sec의 속도로 분사 하였으며, 사각형 유로의 상하에 설치한 반 원주형 언덕 사이의 분사시키는 간격은 2×2.5mm, 분사 각도는 24°로 하여 분사된 腐蝕 溶液으로부터 캐비테이션 기포군은 판상 시편(20×40mm)상에 충돌하여 붕괴해서 溶液의 충격에 의한 浸蝕-腐蝕 현상이 발생하도록 하였다. 여기서 試驗片과 試驗裝置의 각 부재들 사이에 이중 金屬접촉에 의한 電池作用腐蝕(galvanic corrosion)을 방지하기 위하여, 순환 회로 配管을 비롯한 試驗裝置의 부재들을 플라스틱, 테프론 및 아크릴 등의 절연성 材料를 사용하였으며, 試驗片에서 腐蝕된 腐蝕 생성물에 의한 전기 화학적인 영향을 제거하기 위하여 순환 회로 配管에 절연성 필터를 설치 하였다.

그리고 각 試驗片의 電氣化學的인 電位와 電流를 측정하기 위하여 電位差計(potentiometer), 電流計(amperes), 포화 카르멜電極(reference electrode), 백금 대극(pt electrode)을 Fig. 3의 浸蝕-腐蝕 實驗裝置의 回路圖와 같이 배선 하였다.

3. 實驗 方法

腐蝕溶液으로서는 比抵抗 $\rho=25\Omega \cdot \text{cm}$ 인 25°C의 天然 海水를 사용하였고, 24시간마다 腐蝕溶液을 교환하였다.

腐蝕-浸蝕에 의한 무게감소량의 측정은 試驗前에 試驗片의 중량을 측정하고, 腐蝕溶液에 試驗片을 침지하여 24시간이 경과된 후 試驗片을 試驗裝置에서 해체하여 물로 세척하였다. 그리고 60%의 농질산 溶液에 1분간 침지하여 試驗片 표면의 腐蝕 생성물을 제거시킨 다음 증류수 및 아세톤으로 세척한 후 乾燥시켜서 무게를 계측하였다.

전기 화학적인 舉動은 포화카르멜電極을 기준電極으로 사용하여 電極電位(腐蝕電位)를 측정하였고, 직경 1.5mm×45mm인 백금電極을 대극으로 하여 直流電流計에 의해 電流를 측정한 후 試驗片의 유효노출면적에 대한 腐蝕電流密度를 계산하였다. 그리고 電極電位와 電流의 측정시간은 매 24시간 마다 정기적으로 측정하였다.

本 實驗에서 행한 浸蝕-腐蝕實驗의 조건은 다음과 같다.

- 1) 浸蝕-腐蝕에 미치는 액상유 및 기-액 2상유의 영향

天然海水 중에서 試驗片을 Fig. 3에서와 같은 實驗장치로 實驗하여 浸蝕-腐蝕舉動을 관찰하고, 공기펌프를 설치하여 공기펌프의 출구에 내경 2mm의 비닐配管을 순환펌프의 흡입구에 접촉함으로써 공기주입에 의한 溶液 중에 氣體(空氣)가 포함된 기-액 2상유와 공기를 주입하지 아니한 溶液에서의 浸蝕-腐蝕舉動을 비교하였다.

結果 및 考察

1. 浸蝕 - 腐蝕에 의한 熔接部의 무게감소 樣相

Fig. 4는 比抵抗 $25\Omega \cdot \text{cm}$ 인 天然海水環境 中에서 配管用炭素鋼管材의 母材(Base Metal, BM) 및 熔接部位(Table 2의 No.1)에 대한 캐비테이션 浸蝕 - 腐蝕에 의한 무게감소량 $W_t(\text{mg})$ 을 시간경과에 대해 나타낸 것이다.

이에 의하면 캐비테이션 浸蝕 - 腐蝕에 의한 熔接部位의 무게감소량은 母材의 무게감소량 보다 더 높게 나타나는 양상을 보이고 있으며, 이러한 양상은 시간이 경과할 수록 熔接部位의 무게감소량이 더욱 크게 증가하는 추세이다.

Fig. 5은 比抵抗 $25\Omega \cdot \text{cm}$ 인 天然海水環境 中에서 配管用炭素鋼管材의 母材 및 熔接部位 No. 1에 대한 캐비테이션 浸蝕 - 腐蝕에 의한 무게감소율 $R_t(\text{mg}/\text{dm}^2\text{day})$ 을 시간경과에 대해 나타낸 것이다.

캐비테이션 浸蝕 - 腐蝕에 의한 熔接部位의 무게감소율은 母材의 무게감소율을 보다 더욱 높게 나타나고 있으며, 母材의 무게감소율은 시간이 경과할수록 완만하게 무게감소율이 둔화되지만, 熔接

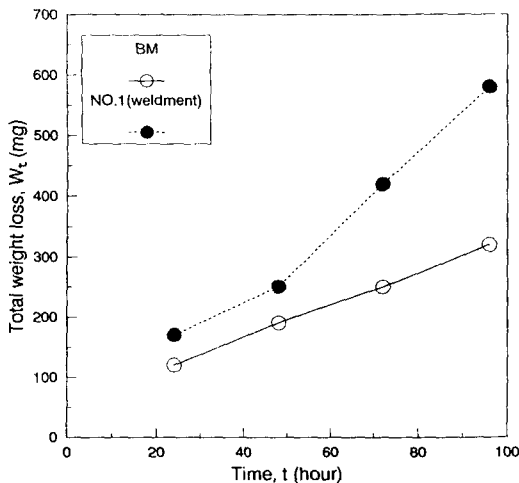


Fig. 4. Effect of welding on total weight loss under erosion-corrosion.

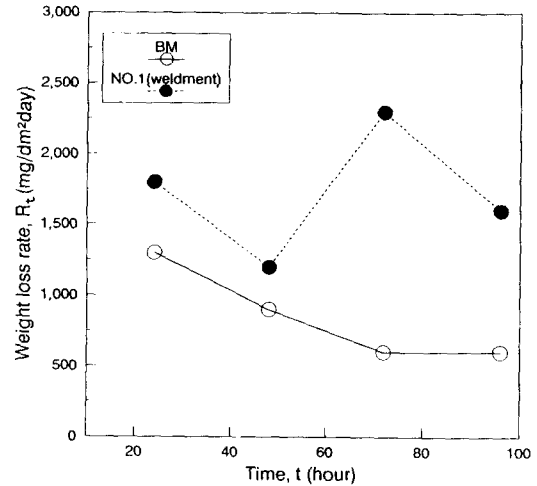


Fig. 5. Effect of welding on weight loss rate under erosion-corrosion.

部位의 무게감소율은 시간이 경과할수록 변화폭이 크게 변화되고 있음을 알 수 있다.

2. 浸蝕 - 腐蝕에 의한 熔接部의 電氣化學的 舉動

Fig. 6은 比抵抗 $25\Omega \cdot \text{cm}$ 인 天然 海水環境 中에서 配管用炭素鋼管材의 母材(BM) 및 熔接部位 No. 1에 대한 캐비테이션 浸蝕 - 腐蝕에 의한 電極電位 $E(\text{mV}/\text{SCE})$ 를 시간경과에 대해 나타낸 것이다.

캐비테이션 浸蝕 - 腐蝕에 의한 母材와 熔接部位의 電極電位는 침지 초기에 있어서 보다 24시간 지나서 가장 낮은 電位(卑電位化)를 나타내다가 점차 電位가 높아(貴電位化)지면서 안정되는 경향을 나타내고 있다. 그리고 母材의 電極電位보다 熔接部位의 電極電位가 더 卑 電位化되는 양상을 나타내고 있다.

Fig. 7은 比抵抗 $25\Omega \cdot \text{cm}$ 인 天然 海水環境 中에서 配管用炭素鋼管材의 母材(BM) 및 熔接部位 No. 1에 대한 캐비테이션 浸蝕 - 腐蝕에 의한 腐蝕電流密度 $i(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$ 를 시간경과에 대해 나타낸 것이다.

캐비테이션 浸蝕 - 腐蝕에 의한 母材와 熔接部位의 腐蝕電流密度 i 는 침지 초기에 있어서 보다

24시간 지나서 가장 높게 나타내다가 점차 腐蝕電流密度가 낮아지는 경향을 나타내고 있다. 그리고 母材의 腐蝕電流密度보다 熔接部位의 腐蝕電流密度가 높게 나타나는 양상을 나타내고 있다.

이와 같이 電極電位가 母材보다 熔接部位가 더 卑電位化되고, 또한 腐蝕電流密度가 母材보다 熔接部位가 더 높게 나타남으로써 熔接部位가 母材보다 더 腐蝕에 민감할 것으로 생각된다.

따라서 Fig. 4 및 Fig. 5에서 母材보다 熔接部

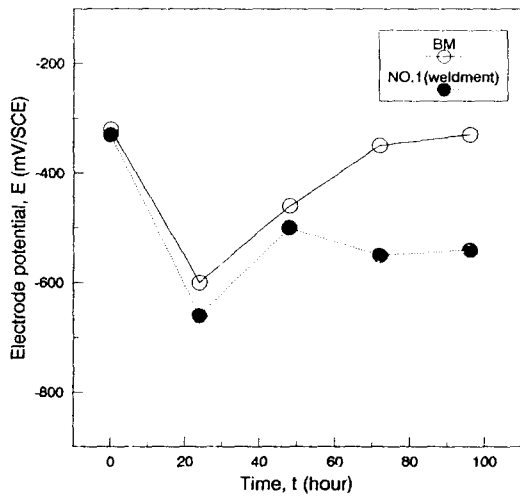


Fig. 6. Effect of welding on electrode potential under erosion-corrosion.

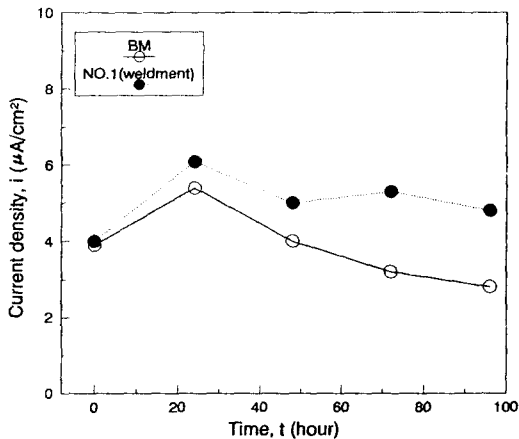


Fig. 7. Effect of welding on current density under erosion-corrosion.

位의 무게감소량과 무게감소율이 더 크게 증가하는 것은 캐비테이션에 의한 機械적인 浸蝕뿐만 아니라 電氣化學的인 腐蝕에 의한 영향도 민감함을 추정할 수 있다.

3. 浸蝕 - 腐蝕에 의한 氣 - 液2相流의 무게감소 樣相

Fig. 8은 比抵抗 $25\Omega \cdot \text{cm}$ 인 天然海水의 環境 중과 空氣를 주입한 氣-액2상류의 環境 中에서 熔接部位 NO.1에 대한 캐비테이션 浸蝕-腐蝕에 의한 무게감소량 $W_t(\text{mg})$ 을 시간의 경과에 대해 나타낸 것이다.

이에 의하면 空氣를 주입한 氣-액2상류 中에서 浸蝕-腐蝕에 의한 무게감소량은 空氣를 주입하지 아니한 溶液 中에서 보다 더 높게 나타내다가 시간이 경과함에 따라 오히려 空氣를 주입하지 아니한 溶液 中에 비해 氣-액2상류에서 감소하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 9는 比抵抗 $25\Omega \cdot \text{cm}$ 인 天然海水의 環境 중과 氣-액2상류의 環境 中에서 熔接部位 NO.1에 대한 캐비테이션 浸蝕-腐蝕에 의한 무게감소율 $R_t(\text{mg}/\text{dm}^2\text{day})$ 을 시간의 경과에 대해 나타낸 것이다.

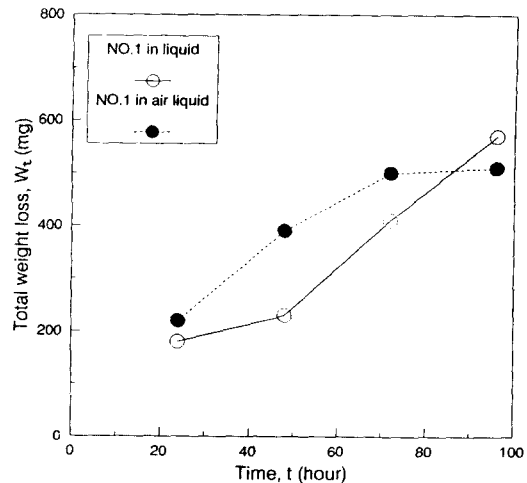


Fig. 8. Effects of air-liquid 2 phase flow on total weight loss under erosion-corrosion.

이에 의하면 기-액2상유 중에서 浸蝕-腐蝕에 의한 무게감소율, R_t ($\text{mg}/\text{dm}^2\text{day}$)는 공기를 주입하지 아니한 溶液 중에서 浸蝕-腐蝕에 의한 무게감소율 보다 더 높게 나타나다가 시간이 경과함에 따라 오히려 공기를 주입하지 아니한 溶液 중에 비해 기-액2상류에서 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 시간의 경과에 따른 무게감소율 擧動의 경향은 Fig. 8에서의 무게감소량 보다 더 민감하다.

Fig. 8과 Fig. 9에서 기-액2상유 중에서 浸蝕-腐蝕에 의한 무게감소량과 무게감소율이 공기를 주입하지 아니한 溶液 중에서 浸蝕-腐蝕에 의한 무게감소율보다 더 높게 나타나다가 시간이 경과함에 따라 오히려 공기를 주입하지 아니한 溶液 중에 비해 기-액2상류에서 감소하는 경향을 나타내고 있는 원인은 캐비테이션 浸蝕-腐蝕에 의해 성장된 공식(pit)에 기-액2상유 중의 공기방울이 침투함으로써 완충작용을 하기 때문에 캐비테이션에 의한 浸蝕-腐蝕을 억제시키는 것으로 思料된다.

4. 電氣化學的 擧動에 미치는 氣-液2相流의 영향

Fig. 10은 海水중과 海水중에 공기를 주입시킨

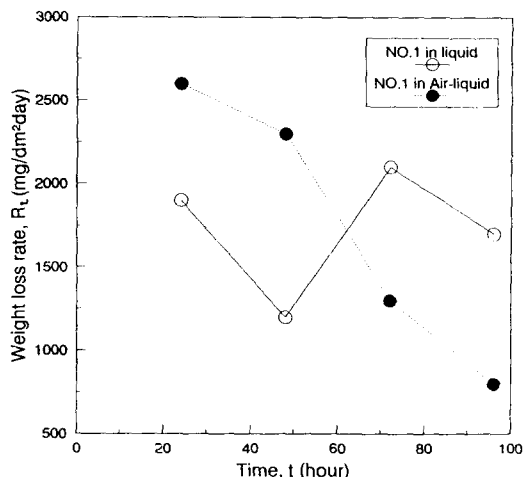


Fig. 9. Effects of air-liquid 2 phase flow on weight loss rate under erosion-corrosion.

기-액2상류의 環境 중에서 熔接部位(Table 2의 NO.1)에 대한 캐비테이션 浸蝕-腐蝕에 의한 電極電位(腐蝕電位), E (mv/SCE)을 시간의 경과에 대해 나타낸 것이다.

이에 의하면 天然海水環境 중에서 공기를 주입하지 아니한 溶液 중에서 보다 기-액2상유 중에서의 電極電位가 卑電位化(電位가 낮게 되는 양상)되다가 시간이 경과함으로써 電極電位는 서로 유사하게 안정되어 가는 양상이다.

Fig. 11은 比抵抗 $25\Omega \cdot \text{cm}$ 인 天然海水環境 중과 기-액2상류의 環境 중에서 熔接部位(Table 2의 No.1)에 대한 캐비테이션 浸蝕-腐蝕에 의한 腐蝕電流密度 i ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)을 시간이 경과에 대해 나타낸 것이다.

이에 의하면 기-액 2상류 중의 腐蝕電流密度가 공기를 주입하지 아니한 溶液 중에서의 腐蝕電流密度 보다 더욱 높게 나타나다가 시간이 경과함에 따라서 기-액 2상류 중의 腐蝕電流密度는 오히려 공기를 주입하지 아니한 溶液 중에서의 腐蝕電流密度 보다 더 낮아지는 경향을 알 수 있다.

이와 같이 기-액 2상류 중의 腐蝕電流密度가 시간이 경과함에 따라 낮아지는 경향은 Fig. 9의 캐비테이션 浸蝕-腐蝕에 의한 무게 감소율과 유

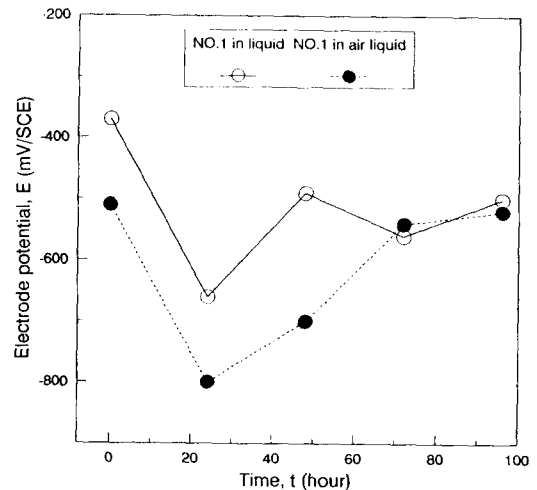


Fig. 10. Effects of air-liquid 2 phase flow on electrode potential under erosion-corrosion.

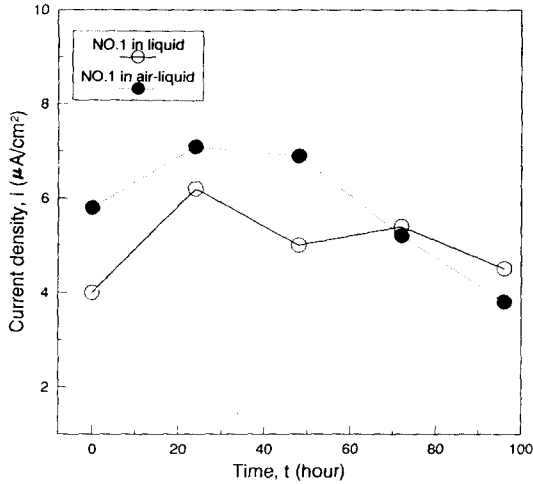


Fig. 11. Effects of air-liquid 2 phase flow on current density under erosion-corrosion.

사한 경향을 나타내고 있다.

結 論

配管用 炭素鋼管(SPPW)의 熔接部位에 대한 天然海水 中에서 熔接部位의 캐비테이션 浸蝕-腐蝕試驗을 실시하여, 配管用 炭素鋼管 熔接部の 캐비테이션 浸蝕-腐蝕特性을 研究한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 캐비테이션 浸蝕-腐蝕에 의한 熔接部位의 무게감소량과 무게감소율은 母材보다 더 증가한다.
- 2) 캐비테이션 浸蝕-腐蝕에 따른 熔接部位의 電極電位는 母材보다 더 卑電位化되고, 腐蝕電流密度는 더 높게 된다.
- 3) 기-액 2상류 中에서 캐비테이션 浸蝕-腐蝕에 의한 무게감소량과 무게감소율은 空氣를 주입하지 아니한 溶液 中에 비해 더 높게 나타나다가 시간이 경과함에 따라 둔화된다.

參考文獻

- 1) Kenneth R. Tretheway and Johe Cham-

berlain(1988) : Corrosion(for students of science and engineering), Longman Scientific & Technical, p.153 - 156.

- 2) 松村倉信, 岡 良則(1982) : 腐蝕に及ぼすエロージョンの影響, 防蝕技術, 31卷, 國際文獻印刷社, p.67 - 72.
- 3) M. G. Talk and G. Moreton(1981 - 6) : Proc. ASME Symp. Cavitation Erosion Fluid System, p.139.
- 4) 加藤洋治(1979) : キャビテーション, 日本振書店.
- 5) 渡邊豊, 高橋秀明(1988) : 炭素鋼の氣體2相流中エロージョン, コロージョンにおける電氣化學的作用, 日本防蝕技術, Vol.37, No.2 p.69 - 74.
- 6) Isao Sekine and Toshiyuki Tanaki(1991) : Erosion - Corrosion Behavior of Copper Alloy under Flowing Water Condition, Zairyo to kankyo, Vol.40, No.8, p. 527 - 532.
- 7) J. Zahavi and h. J. QWanger(1980) : Charaterization of Erosion - Corrosion Process, The Metallurgical Society of ASME, p.226 - 239.
- 8) A. Thiruvengadam(1982) : Erosion, Wear, Interfaces with Corrosion, ASTM, STP 567, p.219 - 238.
- 9) Masanobu Matumura and Yoshiniri Oka (1982) : Influence of Erosion - Corrosion, Boshoku Gijutsu, Vol.31, No.2, p.67 - 69.
- 10) 林祐助, 李鎮烈(1992) : 內燃機關用 슬라이더 베어링材의 캐비테이션 浸蝕舉動과 腐蝕影響 및 潤滑油 舉動에 관한 研究, 漁業技術學會, 28(2), p.171 - 183.
- 11) 岡良側(1990), 固體粒子衝突エロージョンの材料硬度依存性, 日本材料と環境, Vol.39, No.11, p.610 - 616.