

外部電流에 의한 海水冷却細管 内面の 陰極防蝕에 관한 研究

田 大 熙

A Study of Cathodic Protection for the Inner Surface of Sea Water Cooling Tubes by the External Current

Jeon Daehi

| 目 次 | |
|----------------|------------------------|
| 1. 序 論 | 3-1 基礎電學의 特性 |
| 2. 實驗的 裝置 實驗方法 | 3-2 冷却細管 内面의 電位分佈 |
| 2-1 基礎電極 | 3-3 初期防蝕電流密度의 變化時間 |
| 2-2 實驗裝置 | 3-4 初期防蝕電流密度의 實驗式 |
| 2-3 測定機器 | 4. 結 論 |
| 2-4 實驗方法 | 5. 參考文獻 |
| 3. 實驗的結果 考察 | 附 錄 : 初期防蝕電流密度의 實驗式 誘導 |

Abstract

This paper presents a basic study of a new method for protecting the inner surface of sea water cooling tubes of heat exchangers by the external current.

The experimental equipments were built with 70/30 brass tubes and the dimensions of tubes were as follows:

equipment - A: 22.0mm ϕ \times 150cm l ,

 - B: 19.5mm ϕ \times 120cm l ,

 - C: 24.5mm ϕ \times 180cm l .

A twisted tape was inserted into each cooling tube and an insoluble auxiliary anode of linear type, made of the Pb-Ag alloy, was fitted on both faces of the twisted tape.

A soluble, natural sea water type AgCl electrode was used as a reference electrode, and its electrical potential characteristics were checked. This electrode was fitted on the cooling tube to measure the electrical potential of inner surface of the tube and to control the protective current density according to the potential.

An attempt was made to protect the inner surface of the sea water cooling tubes during

against the corrosion by the external current.

The results of the study were as follows:

- (1) The small, natural sea water type AgCl electrodes have been available as reference electrode for the purpose of corrosion prevention, and the mean electrical potentials of the electrodes have been as follows:

$$t \leq 25^{\circ}\text{C}; E = 6.9 + 0.19(t - 25) \text{ mV(SCE)},$$

$$t \geq 25^{\circ}\text{C}; E = 6.9 - 0.17(t - 25) \text{ mV(SCE)}.$$

- (2) The distribution and the change of electrical potentials on the inner surface of the cooling tube have been measured by the small AgCl electrodes, and the inner surface of the cooling tube have been protected satisfactorily against corrosion by the external current.

- (3) The initial protective current density $I(\text{A/m}^2)$ of the inner surface of cooling tubes cooled at $25 \sim 26^{\circ}\text{C}$ by the condensed sea water has been as follows:

$$\text{tube's dimension} - 19.5\text{mm}(\phi) \times 120\text{cm}(L);$$

$$I = 1.2230 + 1.2063 \log V - 0.2062 \log A,$$

$$\text{tube's dimension} - 24.5\text{mm}(\phi) \times 180\text{cm}(L);$$

$$I = 0.8836 + 1.1396 \log V - 0.2167 \log A,$$

where

V is the cooling sea water speed(m/s) and A is the protective area(m^2) of cooling tubes

1. 序 論

臨海工業園地가 많아짐에 따라 船舶에서만 使用하던 海水冷却 熱交換器는 그 數와 規模가 急激히 增大하였다. 海水冷却細管은 이러한 熱交換器에서 가장 重要한 部分이다. 그러나 이 冷却細管은 海水의 腐蝕性 뿐만 아니라 熱負荷의 過重, 冷却海水의 汚染, 海水配管 內面의 라이닝 등으로 말미암아 短時日內에 못쓰게 되기 쉽고, 그 冷却細管을 交換하기 위해서는 熱交換器 뿐만 아니라 다른 施設까지도 運休하여야 할 때가 많다. 따라서 熱交換器의 冷却細管의 腐蝕事故는 生産에 直接的으로나 間接적으로 莫大한 被害를 입히는 경우가 적지 않으므로 이에 대한 防蝕對策은 重要한 意義를 가지고 있다.

熱交換器는 一般的으로 傳熱性, 耐蝕性 및 建造費의 見地에서 이를 銅合金製의 冷却細管과 鐵鋼製의 外胴으로 만들고 그 水室內面에 流電陽極이나 不溶性 陽極을 設置해서 電氣적으로 防蝕한다. 이 防蝕電流은 水室과 管板을 防蝕하고 또한 冷却細管 內徑의 6~9배에 相當하는 冷却細管의 兩端內面까지를 防蝕하므로 海水의 亂流에 起因해서 發生하는 管端入口浸蝕(intake attack)도 有效하게 防止한다.^{1,2)} 그러나 冷却細管 內面의 깊숙한 部分에 대해서는 水室內의 防蝕陽極으로부터의 電流에 의해서 防蝕되지 못하므로 이 部分에 대해서 冷却細管의 耐蝕性이 不足한 경우에는 熱傳導性을 犧牲시키더라도 보다 耐蝕性이 강한 冷却細管을 採用하는 方法이나 冷却海水中에 鐵이온을 混入해서 冷却細管 內面에 防蝕皮膜을 形成시켜주는 方法이 利用되

도 및 實情이다.

耐蝕性 材料이 主로 海水冷却細管의 防蝕對策에 關한 것은 1925年頃부터 鐵鋼(鐵鋼) (admiralty metal)이 最로 使用되던 때로 그 後로 耐蝕性이 良好인 Al-黃銅의 使用가 始行되던 때로 普通의 標準管材料인 鐵鋼의 使用가 尙舊, 鐵鋼의 海水에 使用할 때의 熱負荷가 過重인 場合를 除 鐵鋼의 耐蝕性이 不足인 Al-青銅의 使用가 始行되던 때로 (cupro-nickel) 鐵鋼의 使用가 尙舊 S. Natsumura 氏의 報告에 據하면 鐵鋼의 耐蝕性은 ferrite-austenite 鋼의 工程 不純雜質 耐蝕性 冷却細管材料의 實用上 可能한 極限에 達하고 있다(Table 1)의 如히 冷却細管 材料의 耐蝕性의 要求가 日 日히 熱傳導性의 急激한 減少時, 鐵鋼의 冷却細管의 高耐蝕性 材料의 使用가 日 日히 熱交換器의 構造가 複雜하여 材料의 消耗 冷却細管의 修理等 費用의 程度가 日 日히 減少되거니와 熱傳導性을 補充할 수 있으나 熱傳導率이 尙 劣弱이 있으므로 一定熱量을 處理하기 爲해서 日 日히 熱交換器가 必要하게 되고 材料費의 高價가 缺點이 있다.

Table 1 Corrosion resistance and heat conductivity of cooling tube materials

| cooling tube material | complete immersion in sea water, penetration, mm/yr | | resistance of corrosion-erosion | heat conductivity kcal/cmhr°C |
|---------------------------------------|--|--------|---|----------------------------------|
| | mean | max. | | |
| admiralty metal | 0.04 | — | satisfactory | 95.48 |
| Al brass | 0.02 | 0.18 | good | 86.37 |
| Al-bronze | 0.02 | 0.08 | " | " |
| 90/10 cupro-nickel | — | — | " | 33.61 |
| 70/30 " | 0.005 | 0.03 | good with 0.1% excellent with 0.45%Fe | 28.70 |
| ferrite-austenite stainless steel* | — | 0.02** | good** | 18.00 |

* 25Cr-5Ni-1.5Mo steel, ** 25Cr-20Ni steel

鐵鋼에 의한 海水冷却細管 內面의 防蝕對策을 熱交換器의 冷却海水에 鐵鋼의 混入에 關한 鐵鋼의 冷却細管 內面의 防蝕皮膜이 形成된다는 事實에 據하면 1907年부터 鐵鋼의 一部分의 熱交換器가 冷却海水에 FeSO₄를 混入하여 왔다. 最近에는 A. Nakagawa 氏의 鐵電解裝置에 鐵鋼의 發生시키지 冷却海水에 混入하여 冷却細管 內面에 防蝕의 直接的 電氣防蝕法을 用하였다. 그리고 A. Nakagawa 氏는 0.01ppm의 鐵鋼의 復水器의 冷却海水에 連絡의 混入을 混入을 하여 冷却細管 內面에 密着性皮膜이 形成되도록 하였다. 이 防蝕法은 既設 海水冷却 熱交換器에 二重의 適用이 可能인 Al-黃銅管과 鉛-銅-錫合金管에 有하며 Al-青銅管의 使用가 可能한 場合를 除 鐵鋼의 混入을 하여 防蝕海水에 冷却水에 使用할 時에 防蝕皮膜이 形成되지 않는다. 이 防蝕法은 FeSO₄를 使用할 場合에 藥劑代用品의 變質의 混入 裝置가 必要하고 藥劑의 變質이 變態할 場合, 鐵電解法을 利用할 場合에 鐵鋼의 發生을 電源裝置와 電解裝置의 新設에 必要하고 混入을 大電解電流의 供給에 消耗되는 鐵電極의 補

充이 必要하게 된다.

以上에서 考察한 바와 같이 耐蝕性 冷却細管을 採用하는 方法은 熱交換器의 構造와 取扱法을 複雜하게 하지 않고, 鐵이온에 의한 防蝕法은 既設 熱交換器에 그대로 適用할 수 있다는 長點이 있다. 그러나 前者는 熱交換器에서 가장 重要한 冷却細管의 熱傳導性을 犧牲시킬 뿐만 아니라 熱交換器의 製作費를 비싸게 하고, 後者는 防蝕效能이 不充分하고 間接的인 防蝕法이므로 많은 防蝕費와 附帶施設이 所要된다. 따라서 이들의 防蝕法은 海水冷却細管의 效果的인 防蝕對策이 못된다. 또 管内徑이 300mm 以上이 되는 큰 海水管 内面에는 그 内徑의 15~20倍, 卽 5m 以上の 間隙으로 그 管内面에 流電陽極이나 不溶性陽極을 設置해서 電氣防蝕하는 方法이 利用^{12,13)} 되고 있으나 内徑이 20mm 内外가 되는 冷却細管에는 그 方法도 適用할 수가 없다. 그러므로 著者는 海水冷却細管 内面의 效果的인 防蝕對策으로서 海水中에서 防蝕效果가 대단히 크고 汚染海水中에서도 有效할 뿐만 아니라 過防蝕의 障害도 적고 極히 經濟的인 防蝕法이란 定評^{14, 15, 16)}이 있는 陰極防蝕法을 冷却細管 内面에 直接 適用하는 새로운 電氣防蝕法에 着眼했다.

이 防蝕法은 熱交換器의 海水冷却細管 内部에 트위스트테이프(twisted tape)를 插入해서 固定하고 그 테이프兩面에 붙인 不溶性 線狀陽極을 통해서 外部電源으로부터의 防蝕電流를 冷却細管 内面에 直接 流入시키는 方法이다. 이 防蝕法에서 트위스트테이프는 不溶性 陽極線을 冷却細管內에 安定하게 固定할 뿐아니라 傳熱促進裝置¹⁷⁾로서도 作用한다.

이 研究는 海水冷却細管을 長期間 交換하지 않고 冷却效率이 높은 狀態로 계속해서 使用할 수 있는 海水冷却 熱交換器를 開發하기 위한 基礎研究이다. 그러나 트위스트테이프의 傳熱效果에 대해서는 本題와 直接的인 關係가 없으므로 다루지 않는다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

2.1 基準電極

電位測定用的 基準電極(補助電極)으로는 카로멜電極, 鹽化銀電極 및 黃酸銅電極이 널리 使用되고 있다. 海水中 金屬體의 電位測定用으로서 黃酸銅電極은 鹽橋없이 使用할 때에 海水가 電極內로 浸入하므로 그 電位가 變化되고,¹⁸⁾ 飽和KCl型의 카로멜電極이나 鹽化銀電極은 長久間 繼續해서 海水中에 使用할 때에 KCl結晶粒을 자주 添加하지 않으면 電極液의 稀釋으로 그 電位가 變한다. 그러나 海水型의 카로멜電極이나 鹽化銀電極은 海水中에서 電極液의 浸透現象이 일어나지 않으므로 그 電位가 長期間에 걸쳐서 安定하다. 特히 海水型 鹽化銀電極은 電極物質이 固體이기 때문에 取扱하기가 쉽고 電位の 溫度히스테리시스가 적으므로 海水用的 理想的 電極¹⁹⁾이며 簡單히 만들 수 있다. 그러나 이 電極電位는 製作條件에 따라 若干 다르다.²⁰⁾

著者의 研究에는 熱交換器의 冷却細管 表面上的 小孔에 基準電極을 設置해서 長期間 繼續해서 使用하여야 하므로 小形이고 耐破型이며 電位가 長期間에 걸쳐서 安定한 基準電極이 여러개 必要하다. 그러므로 小形 耐破型 天然海水型의 鹽化銀電極을 다음과 같은 同一條件으로 6個 1組

單倍。1.5min 試件取出後，用 0.1mol/L 的氫氯酸洗滌 10min，取出後用去離子水沖洗，然後用 0.1mol/L 的氫氧化鈉洗滌 10min，最後用去離子水沖洗。

(1) 1.5min 在 0.1mol/L 的氫氧化鈉溶液中，取出後用去離子水沖洗，然後用 0.1mol/L 的氫氧化鈉洗滌 10min，取出後用去離子水沖洗。

(2) 以銀棒電極為陰極，以銀棒電極為陽極，在 0.1mol/L 的氫氧化鈉溶液中，取出後用去離子水沖洗，然後用 0.1mol/L 的氫氧化鈉洗滌 10min，取出後用去離子水沖洗。

(3) 以銀棒電極為陰極，以銀棒電極為陽極，在 0.1mol/L 的氫氧化鈉溶液中，取出後用去離子水沖洗，然後用 0.1mol/L 的氫氧化鈉洗滌 10min，取出後用去離子水沖洗。

(4) 以銀棒電極為陰極，以銀棒電極為陽極，在 0.1mol/L 的氫氧化鈉溶液中，取出後用去離子水沖洗，然後用 0.1mol/L 的氫氧化鈉洗滌 10min，取出後用去離子水沖洗。

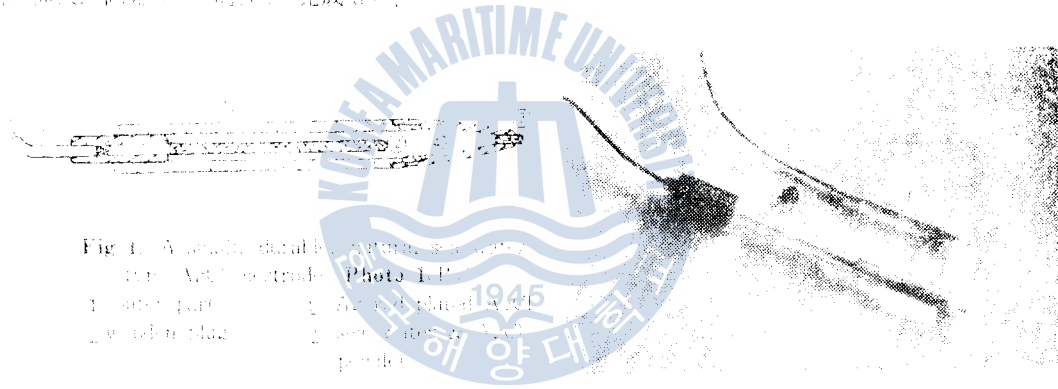


Photo 1. A typical detail of the AgCl electrode.

Photo 2. A typical detail of the AgCl electrode.

2.2 實驗裝置

1. 實驗裝置-A

Photo 3. 實驗裝置-A 的電路圖。在電路圖中，A 和 B 是電極，C 是電解液。A 和 B 之間有一個電阻 R。

Photo 4. 實驗裝置-B 的電路圖。在電路圖中，A 和 B 是電極，C 是電解液。A 和 B 之間有一個電阻 R。

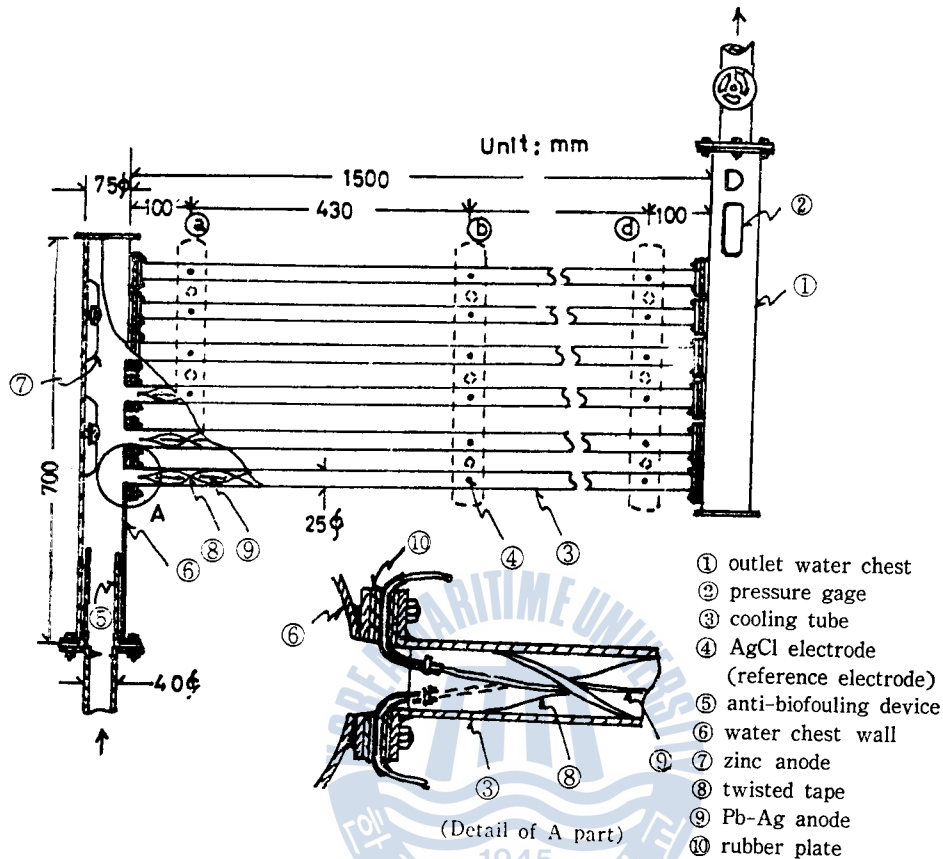


Fig. 2. The experimental equipment-A

고 다른 끝에는 플랜지를 붙여서 만들었다. 또 그 플랜지에는 內徑 40mm의 海水管을 붙였고, 水室壁에는 6本の 冷却細管을 나란히 붙일 수 있도록 플랜지를 熔接했다. 그리고 이 水室의 内外面을 깨끗이 脱銹한 後에 光明丹 下塗塗料를 3回, 알키드에나멜 上塗塗料를 2回씩 칠하고, 각 水室內面에 防蝕電流密度가 約 $400\text{mA}/\text{m}^2$ (被防蝕面積: 水室內面과 管徑의 10倍까지의 冷却細管端 內面의 面積= 0.23m^2)가 되게 $20\text{mm} \times 45\text{mm} \times 110\text{mm}$ (有效面積 約 90cm^2)의 防蝕用亞鉛板(ZAP-改鑄) 2枚씩을 밑에 고무板을 깔고 볼트로 固着시켰다.

(3) 트위스트테이프는 冷却細管 内部에 固定하는 問題와 管内에서의 海水流動抵抗을 考慮해서 두께 1mm, 幅 21mm의 鋼帶를 旋盤에 물려서 테이프트위스트피치(tape twist pitch)가 冷却細管 內徑의 8倍가 되게 꼬고 테이프길이를 冷却細管의 길이보다 約 10mm 짧게 切斷하였다. 그리고 그 테이프의 한쪽끝에 直徑 1.5mm, 길이 10cm 程度의 테이프固定用 鋼線 2本을 熔接하고 테이프面上에 不溶性陽極線을 固定할 수 있도록 그 中央에 約 12cm間隙으로 小孔(1.5mmφ程度) 2個씩을 나란히 뚫었다. 그리고 그 表面에 光明丹 下塗塗料를 3回, 알키드에나멜 上塗塗料를 2回(但, 3.3 및 3.4의 初期防蝕電流密度를 測定한 것에는 네오프렌고무를 5回 칠함)칠하고 Photo. 2

在 1945 年 9 月 3 日，日本宣佈投降後，海軍部在 9 月 15 日，即由東京發給駐紮在菲律賓的第七艦隊司令史末文斯中將命令，命令第七艦隊從菲律賓起程，向日本海空軍的預定目標——臺灣進發。史末文斯中將隨即派駐在 Zamboanga 的總務長官麥克倫尼中將率領第七艦隊先頭部隊，於 9 月 24 日開赴南島的打拉班班，以威懾日軍的護衛艦隊。

1945 年 9 月 27 日，第七艦隊的先頭部隊抵達南島。在該島，第七艦隊先頭部隊的成員與日軍展開了激烈的戰鬥。在戰鬥中，第七艦隊先頭部隊的成員利用他們的武裝力量，成功地擊退了日軍的進攻。在戰鬥中，第七艦隊先頭部隊的成員表現出了極大的勇氣和犧牲精神。在戰鬥中，第七艦隊先頭部隊的成員成功地擊退了日軍的進攻。在戰鬥中，第七艦隊先頭部隊的成員表現出了極大的勇氣和犧牲精神。

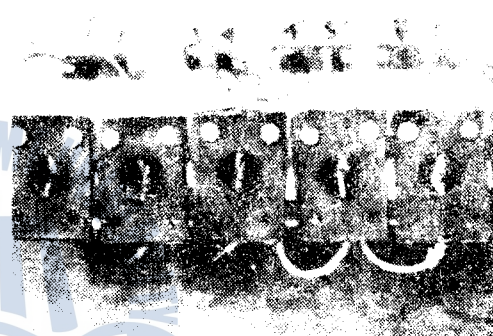
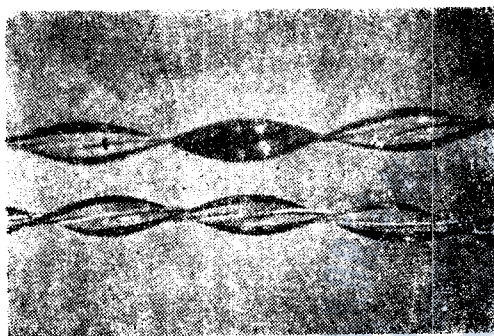


Photo 2. The camera used

Photo 3. The projector used

1945 年 9 月 27 日，第七艦隊的先頭部隊抵達南島。在該島，第七艦隊先頭部隊的成員與日軍展開了激烈的戰鬥。在戰鬥中，第七艦隊先頭部隊的成員利用他們的武裝力量，成功地擊退了日軍的進攻。在戰鬥中，第七艦隊先頭部隊的成員表現出了極大的勇氣和犧牲精神。在戰鬥中，第七艦隊先頭部隊的成員成功地擊退了日軍的進攻。在戰鬥中，第七艦隊先頭部隊的成員表現出了極大的勇氣和犧牲精神。

在戰鬥中，第七艦隊先頭部隊的成員成功地擊退了日軍的進攻。在戰鬥中，第七艦隊先頭部隊的成員表現出了極大的勇氣和犧牲精神。在戰鬥中，第七艦隊先頭部隊的成員成功地擊退了日軍的進攻。在戰鬥中，第七艦隊先頭部隊的成員表現出了極大的勇氣和犧牲精神。

在戰鬥中，第七艦隊先頭部隊的成員成功地擊退了日軍的進攻。

在戰鬥中，第七艦隊先頭部隊的成員成功地擊退了日軍的進攻。在戰鬥中，第七艦隊先頭部隊的成員表現出了極大的勇氣和犧牲精神。在戰鬥中，第七艦隊先頭部隊的成員成功地擊退了日軍的進攻。在戰鬥中，第七艦隊先頭部隊的成員表現出了極大的勇氣和犧牲精神。



Photo 4. The camera used

이 裝置는 內徑이 19.5mm이고 長이가 120cm인 冷却細管 3本으로 構成된 實驗裝置-B와 內徑이 24.5mm이고 長이가 180cm인 冷却細管 3本으로 構成된 實驗裝置-C의 2種이다. 이 두 實驗裝置는 實驗裝置-A와 같은 材料로 同一要領으로 製作하였다. 그러므로 實驗裝置-B 및 C의 海水冷却細管은 實驗裝置-A의 冷却細管에 對하여 內徑이 $\pm 11.36\%$, 長이가 $\pm 20\%$ 變하고, 被防蝕面積은 $-29.5\sim+34.7\%$ 變한다.

2.3 測定機器

이 實驗에 使用되었던 主要機器는 다음과 같다.

1) 基準電極의 電位特性 調査用 機器

- (1) 基準電極: 飽和카로멜 電極, Backman RL-B 3個와 TOA HC-806L 1個
- (2) 電位測定計: 電位差計, Shimadzu PD-83(0.2mV scale)
- (3) 水溫測定計: 水銀溫度計, Weksler(0.2°C scale)
- (4) 恒溫裝置: 恒溫水槽, Rigosha 402(恒溫 $\pm 0.1^\circ\text{C}$)

2) 冷却細管 內面의 防蝕實驗用 機器

- (1) 電源裝置: 直流定電壓裝置, 本大學製作 5V-5A
- (2) 電位測定裝置, 高抵抗直流電壓計, NCE(100,000 Ω/V)
- (3) 送水裝置: 遠心力펌프, Sanyo 650W

2.4 實驗方法

實驗에 使用되었던 海水는 沿岸의 淸明表面水와 디이켄機關의 冷却用水槽內의 海水였으며 그 質이 다음과 같다.

Table 2. Qualities of sea water for the experiments

| kinds of sample | water temp. * °C | pH | total hardness ppm CaCO ₃ | total alkalinity ppm CaCO ₃ | chloride ppm Cl ⁻ | specific resistance Ω-cm | source of sea water |
|-----------------|------------------|-------|--------------------------------------|--|------------------------------|--------------------------|---------------------|
| A | 21 | 6.8 | 4,770 | 250 | 18,820 | 25.0 | SE coast of Youngdo |
| B | 26 | 7.2 | 4,980 | 200 | 16,330 | 25.2 | " |
| C | 13 | 6.8** | 5,060 | 125 | 17,975 | 24.8** | NW coast of Jeodo |
| D | 25 | 7.0 | 5,620 | 210 | 19,680 | 19.5 | cooling S. W. tank |

* temperature at water test. ** value at 21°C

Table 2에서 A는 天然海水型 鹽化銀電極의 電極液으로 使用되었던 것이고, B는 實驗裝置-A에서 冷却細管 內面의 電位分布狀態를 調査할 때에 使用하였으며, C는 實驗裝置-A에서 初期防蝕電流密度를 測定할 때에, D는 實驗裝置-B와 C에서 初期防蝕電流密度를 測定할 때에 使用

하였던 것이다. 특히 D는 自家發電用 디젤機關의 循環冷却水의 海水槽內의 물이며 그 海水의 一部分을 繼續적으로 補充되어면서 補充水 比였으나 相當히 濃縮되어 있었다.

1) 試作 基準電極의 特性 調査

試作한 小形의 耐蝕型 天然海水型 鹽化銀電極의 電位-經時特性을 測定하여 天然海水中에 該 組의 電極을 沈入시켜 常溫下에서 每日 沈入한 飽和과로틀 電極基準으로 測定해서 調査하였다. 이 때 海水는 可學 電阻을 可學히 變하고, 電位는 每日 若干 一定時刻에 測定하였다.

2) 試作한 小形의 天然海水型 鹽化銀電極의 電位-溫度 特性을 電極을 沈入한 可學의 恒溫水槽內에 厚고 飽和과로틀 電極의 電位-溫度의 關係를 考慮하여 水溫의 變化에 充分한 時間을 주어 溫度를 變化시켜 가면서 그 電極電位의 飽和과로틀 電極基準으로 測定하여 調査하였다. 限 4 個의 飽和과로틀 基準電極中 電位가 平均値(0.1mV)의 偏差가 入는 것도 있음)인 것을 基準으로 使用하였다.

2) 海水冷却細管 內面의 電位分布

Photo. 5는 實驗裝置-A의 冷却細管 內面을 防蝕實驗하기 위한 機器의 配置圖이고, Fig. 3은 冷却細管 內面의 防蝕電氣回路와 同細管內面의 電位測定回路의 說明圖이다.

防蝕實驗에서 海水는 反復使用하지 않고 貫流하였는데, 冷却細管 外面은 加熱하지 않고 大氣中에 露出시켜서 試驗하였다.

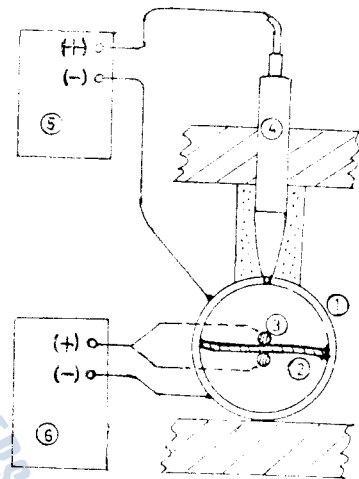


Fig. 3. Cathodic protecting circuit and potential measuring circuit
 1) cooling tube 2) twisted tape
 3) Pb-Ag anode 4) reference electrode
 5) potentiometer @ constant voltage controller

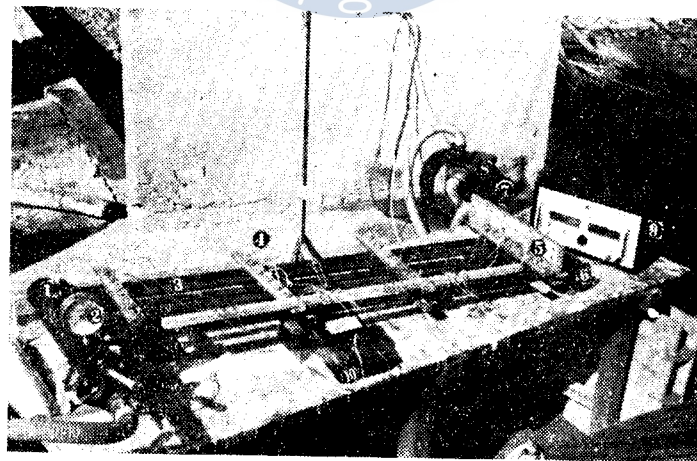


Photo. 5. General view of the experimental equipment-A
 1) outlet water chest 2) pressure gage 3) cooling tube 4) AgCl electrode
 5) distributing board 6) inlet water chest 7) anti-biofouling device
 8) cooling sea water pump 9) constant voltage controller 10) potentiometer

海水冷却細管 内面の 電位分布狀態는 다음의 두 境遇에 測定하였다.

(1) 水室内의 防蝕陽極부터의 防蝕電流密度는 A. Nakagawa의 調査²¹⁾에 의하면 被防蝕面積 5m²以下の 것에 대해서 400mA/m²이므로 이 防蝕電流密度에 의해서 冷却細管 内面の 電位分布가 어떻게 되고 그에 의해서 어느程度까지 初期防蝕되는가를 調査하였다.

(2) 冷却海水의 流速이 0.6m/s인 때에 冷却細管 内面に 外部電源에서 追加하는 3種의 電流密度에 의해서 細管内面의 電位分布가 어떻게 되는가를 調査하였다.

3) 實驗裝置-A의 初期防蝕電流密度

銅-鐵系의 熱交換器의 防蝕電位는 A. Nakagawa²¹⁾에 의하면 銅의 防蝕電位인 -0.45V(SCE)가 아니라 鐵의 防蝕電位인 -0.77V(SCE)이고 NACE가 勸奨하는 防蝕基準²²⁾에도 異金屬이 組合된 天然水中 配管의 防蝕電位는 그 系에서 가장 陽性金屬의 防蝕電位이며 S. Hanada²³⁾도 同一한 見解이다. 따라서 이 冷却細管의 防蝕電位를 -0.77V(SCE)程度로 보되 冷却海水의 溫度上昇과 安全한 防蝕을 위해서 實際의 防蝕電位를 -0.85V(SCE)程度로 보고, 이를 유지하기 위한 冷却細管 内面의 初期防蝕電流密度가 被防蝕面積과 冷却水의 平均流速〔流量/(流路斷面積×流動時間)〕에 따라 어떻게 變하는가를 調査하였다.

여기에서 初期防蝕電流密度란 防蝕電流密度가 많이 變하는 過渡期를 避하기 위해서 첫 24時間은 水室에 붙인 防蝕亞鉛板에 의해서 靜水中에서 防蝕시키고 다음의 6時間은 海水流速이 0.5m/s 内外에서 外部電流를 追加供給해서 防蝕시킨 後의 防蝕電流密度이다. 이 電流密度는 海水冷却細管 内面의 防蝕에 必要한 電源裝置의 容量을 決定하는 指標이다.

4) 實驗裝置-B 및 C의 初期防蝕電流密度

冷却海水의 水質과 水溫以外에는 實驗裝置-A에서와 同一한 條件에서 測定하였다. 이 實驗에 腐蝕성이 強한 濃縮海水를 冷却水로 採用한 것은 本防蝕法이 主로 腐蝕條件이 苛酷한 境遇에 適用될 것이기 때문이다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 試作基準電極의 電位特性²⁴⁾

試作한 小形 天然海水型 鹽化銀電極의 電位-經時特性은 그 電極을 試作한 3日後부터 安定되나 電極에 따라 ±0.8mV以內的 偏差를 나타냈다. 그 平均電位는 23℃(測定溫度가 21~25℃였으므로 23℃로 換算)에서 6.6mV(SCE) 程度이고 그 電位가 長久間 安定하였다.

또 試作한 1組의 電極의 電位가 溫度에 따라 Fig.4의 ×票의 分布를 나타냈고 ○票는 각 溫度에서의 平均電位이다. 同圖에서 각 平均電位를 直線으로 連結하면 大略 25℃에서 만나므로 25℃에서 同一電位가 되게 最小自乘法으로 다음과 같은 電位-溫度特性式을 얻었다. 卽

25℃ 以下の 溫度(t ℃)에서 電極電位는

$$E = 6.9 + 0.19(t - 25) \text{ mV(SCE)} \dots \dots \dots (1)$$

25°C 以上の 溫度에서

$$E = 6.9 - 0.17(t - 25) \text{ mV(SCE)} \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 4의 (C), (D)는 이 試作 電極의 特性이고, (A), (B)는 각각 Seo特性¹⁶⁾과 Ito特性³²⁾이다. 試作電極의 電位-溫度特性이 25°C를 前後해서 急激히 變하는 理由는 不分明하나 (A), (B)를 (C)와 比較하면 Seo特性和 Ito特性은 30°C 以下の 溫度에서 測定한 것이라고 생각되고, 이들 電極電位에 큰 差異를 나타내는 것은 電極의 製作條件과 使用한 海水質이 다르기 때문이라 생각된다.

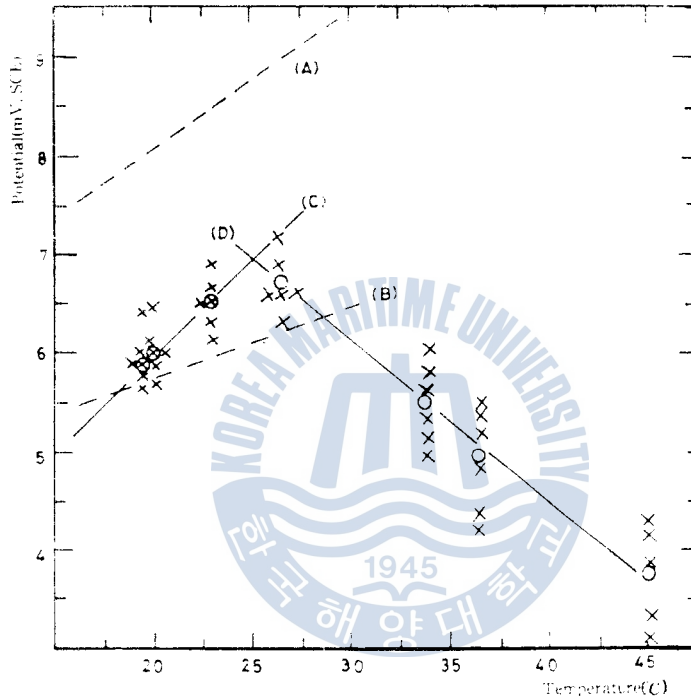


Fig. 4. Potential-temperature characteristics of the natural sea water type AgCl electrodes
 (A) $8.8 + 0.14(t - 25) \text{ mV(SCE)}$: Seo (C) $6.9 + 0.19(t - 25) \text{ mV(SCE)}$: $t \leq 25^\circ\text{C}$
 (B) $6.1 + 0.07(t - 25) \text{ mV(SCE)}$: Ito (D) $6.9 - 0.7(t - 25) \text{ mV(SCE)}$: $t \geq 25^\circ\text{C}$

그러므로 試作한 4組의 全電極의 電位는 電極에 따라 $\pm 1.3\text{mV}$ 以內의 差異를 보였으나 實際의 防蝕에서 防蝕電位의 5mV 內外의 差異가 別問題로 되지 않으므로 이들의 試作電極은 防蝕目的에 實用한 수 있는 電極이라고 생각된다. 그러므로 어떤 電位가 25°C에서 -0.77V(SCE) 이라면 이 試作電極基準으로는 $-770 - 6.9 = -776.9 \text{ mV} = -0.78(\text{sw} - \text{Ag}/\text{AgCl})$ 로 된다.

3.2 海水冷却細管 内面의 電位分布²⁵⁾

1) 水室内의 防蝕陽極에 의한 細管内面의 電位分布

Fig. 5는 實驗裝置-A의 冷却細管에 冷却海水를 充滿靜置하였을 때와 그 冷却細管에 海水를 平均流速 $0.6\text{m/s}(28^\circ\text{C})$ 로 流轉시켰을 때에 水室에 붙인 防蝕電流密度 400mA/m^2 의 亞鉛板에

인해서 생기는 冷却細管 内面の 電位分布이고, Fig. 6은 冷却海水를 靜水中과 0.6m/s로 流動시킬 때에 冷却細管端부터 10cm되는 곳 (A位置-Fig. 2 參照)과 97cm되는 곳 (C位置)의 電位가 經過時間에 對해서 어떻게 變하는가를 보인 것이다.

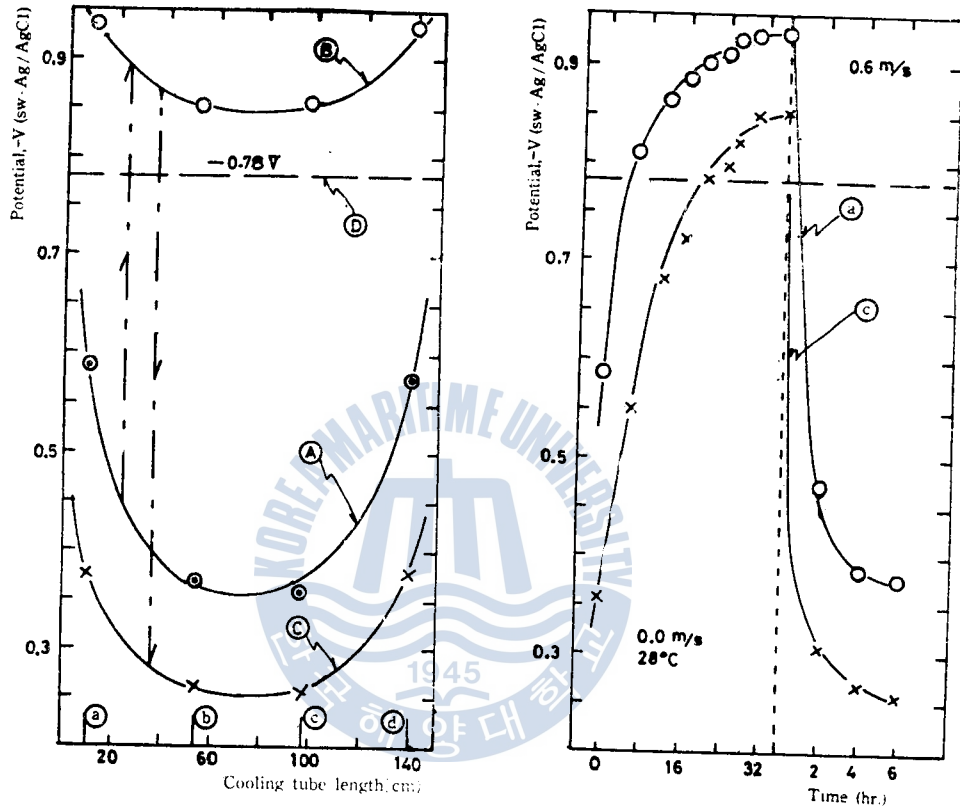


Fig. 5. Potential distributions on the inner surface of the cooling tube protected by Zn anodes in the water chest
 (A) In the stagnated water(initial)
 (B) In the stagnated water(stabilized)
 (C) In the flowing water(0.6m/s, stabilized)

Fig. 6. Potential changes on the inner surface of the cooling tube protected by Zn anode in the water chest when stagnated water is turned into flowing water.
 (a) 1st position
 (c) 3rd position

이 두 그림으로 보아서 水室에 붙인 計劃防蝕電流密度 400mA/m²의 防蝕亞鉛板은 靜水中에서 24時間程度가 經過하면 全冷却細管 内面까지를 完全防蝕시키나 0.6m/s로 冷却海水를 流動시킬 때에는 靜水中의 完全防蝕狀態에서 4時間程度가 지나면 冷却細管의 大部分의 内面이 無防蝕狀態로 된다. 그러므로 被防蝕面積이 約 0.23m²의 小形熱交換器에 對해서 防蝕電流密度 400 mA/m²로서는 冷却細管의 兩端内面の 初期防蝕을 거의 期待할 수 없다는 것을 알 수 있다.

2) 防蝕電流密度(外部防蝕電流密度) 細管內面(電位分布)

圖7. 實驗裝置(A) 1) 裝置(外部防蝕電流密度) 防蝕電流計 迴路產生器 海水冷卻細管內面(三種) 電位探頭(防蝕電流計 供電器) 實驗裝置(冷卻細管內面) 電位分布(1) (2) (3) 1) 流速: 0.6m/s, 水溫: 26°C 2) 實驗裝置(冷卻細管內面) 適正初期防蝕電流密度: 冷卻細管內面中央部上電位: $-0.78V$ sw-Ag₂A₂Cl₂ 電流: $520mA/m^2$ 程度

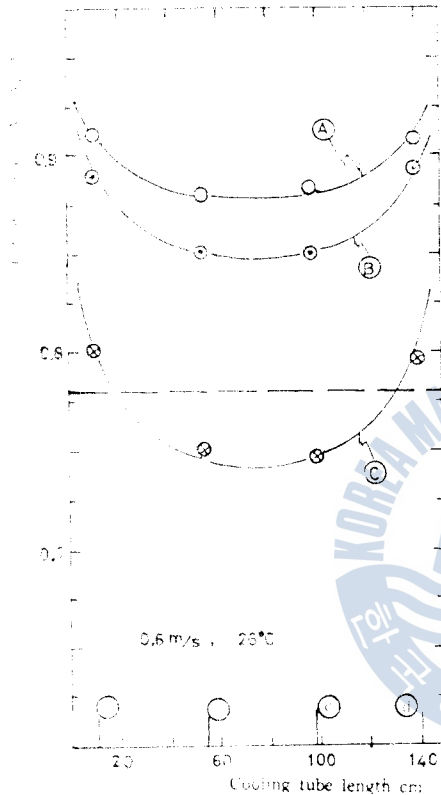


Fig. 7. Potential distributions on the inner surface of cooling tubes protected by the outside current in flowing water.
 A. $-1.87V$ (0.45A/798mA/m²)
 B. $-1.8V$ (0.38A/579mA/m²)
 C. $-1.75V$ (0.34A/470mA/m²)

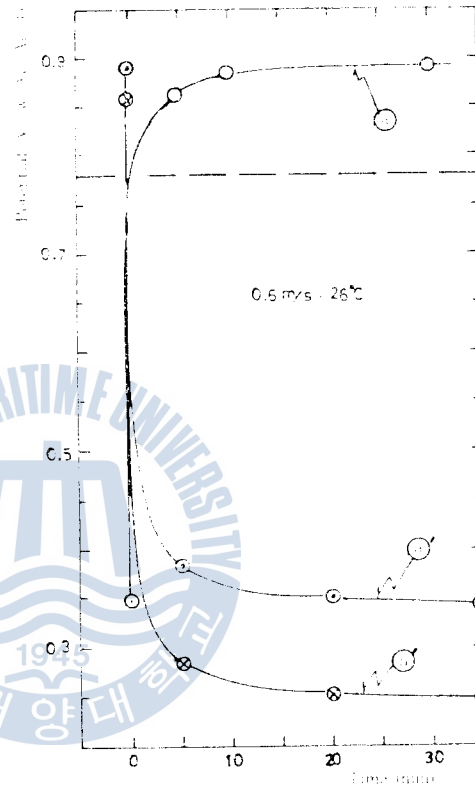


Fig. 8. Potential changes on the inner surface of the cooling tube protected or not by the outside current in flowing water.
 a. 1st position(protected) $-1.8V$ (0.38A)
 a'. 1st position(unprotected)
 b'. 2nd position(unprotected)

固定(1) (2) (3) 實際防蝕電位(冷卻水溫) 是 考慮到(防蝕電位) $-0.85V$ 8) 程度(冷卻水溫) 普通(1) (2) 實驗(初期防蝕電流密度) (冷卻細管內面) 對(1) (2) (3) 約 $600mA/m^2$ 程度

圖8. 實驗裝置(冷卻細管內面) 外部電源(防蝕電流密度) $579mA/m^2$ 程度(1) (2) (3) 冷卻細管內面(1) (2) (3) 電位(1) 電位(1) 防蝕電流(1) 斷切(1) (2) (3) 位置(1) 電位(1) 電位(1) 充分(防蝕電流密度) 電流(1) 供給(1) (2) (3) 外部(1) (2) (3) 冷卻細管內面(1) (2) (3) 防蝕電位(1) 斷切(1) (2) (3)

때도 거의 瞬間的으로 全冷却細管 内面이 그 自然電位로 되돌아 간다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 電位變化速度는 長久間 電氣防蝕해서 細管内面에 電解析出物이 形成되면 多少變化할 것이다.

또 冷却細管 内面的 防蝕電流를 트위스트데이프 兩面的 兩 電極線端을 通해서 供給하거나 그 中の 한端을 通해서 供給하느냐에 따라 影響이 나타나지 않았다. 이것은 兩 電極線中 한 電極線이 切損되어도 防蝕에는 支障이 없다는 것을 뜻한다.

3.3 初期防蝕電流密度的 變化傾向²⁶⁾

1) 冷却水 流速과 被防蝕面積의 影響

Fig. 9와 Fig. 10은 實驗裝置-A의 海水冷却細管 内面的 初期防蝕電流密度에 미치는 冷却海水의 平均流速과 被防蝕面積이 變할 때의 影響을 調査한 同一한 것을 다른 尺度로 表示한 것이다.

Fig. 9는 冷却水의 流速이 2倍로 增加되어도 所要防蝕電流密度는 2倍以下라는 L. J. E. Sawyer 등의 研究²⁷⁾와 같은 傾向이고 被防蝕面積이 增加되면 所要防蝕電流는 낮아진다는 A. Nakagawa의 調査²¹⁾와 같은 傾向임을 보여준다. 또 Fig. 9와 Fig. 10은 片對數 그래프에서 初期防蝕電

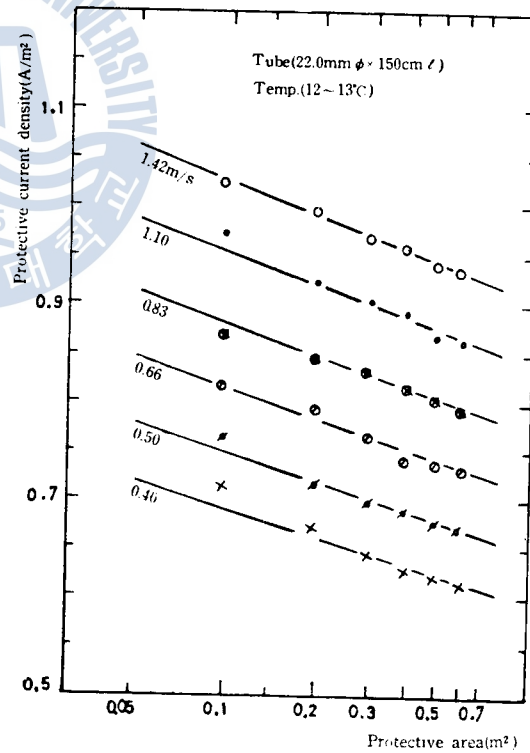
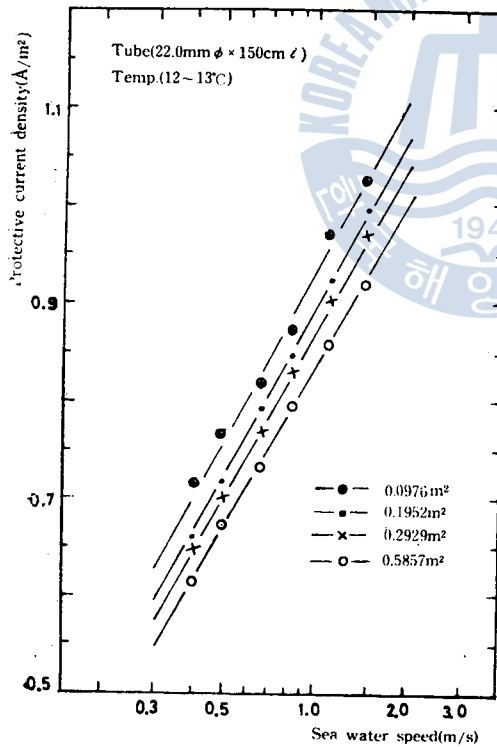


Fig. 9. Relations of the initial protective current density to the sea water speed (Experimental equipment-A)

Fig. 10. Relations of the initial protective current density to the protective area (Experimental equipment-A)

流速度に冷却海水の平均流速の關係は、初期防蝕電流密度と被防蝕面積の關係が 거의 直線に表れること、海水冷却細管内面に、初期防蝕電流密度は冷却海水の平均流速の増加에 따라對數的으로増加する、被防蝕面積が增加冷却細管の數の増加에 따라對數的으로減少한다는事が判明した。

2) 冷却細管の寸法の影響

Fig. 11은 内徑이 19.5mm인 길이 120cm인 冷却細管을 가진 實驗裝置-B에 대해서 調査한 濃縮海水의 平均流速와 被防蝕面積에 대한 初期防蝕電流密度의 關係이고, Fig. 12는 内徑이 24.5mm인 길이 180cm인 冷却細管을 가진 實驗裝置-C에 대한 것이며, Fig. 13은 Fig. 11과 Fig. 12의 冷却海水의 平均流速가 1, 2 및 3m/s의 等速인 때의 初期防蝕電流密度를 求해서 圖示한 것이다.

Fig. 13을 보면、冷却細管의 寸法가 相異하면 冷却海水의 平均流速가 같고 被防蝕面積이 같아도 初期防蝕電流密度는 海水冷却細管 内面의 初期防蝕電流密度는 異なる 結果를 冷却細管을 採用한 條

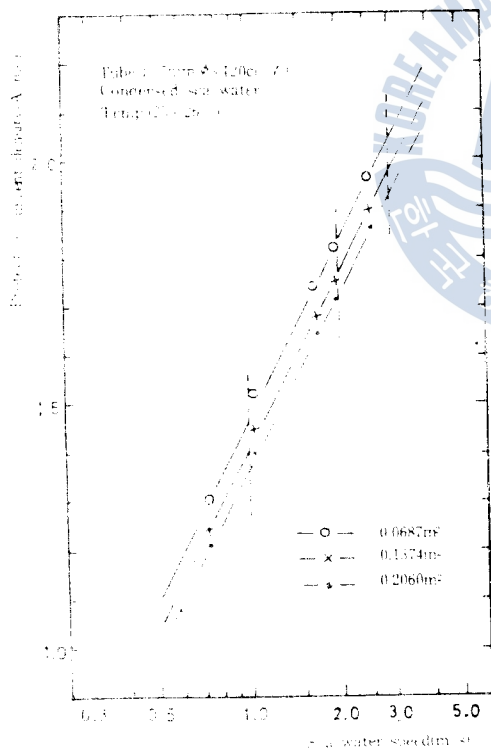


Fig. 11. Relations of the initial protective current density to the sea water speed (Experimental equipment-B)

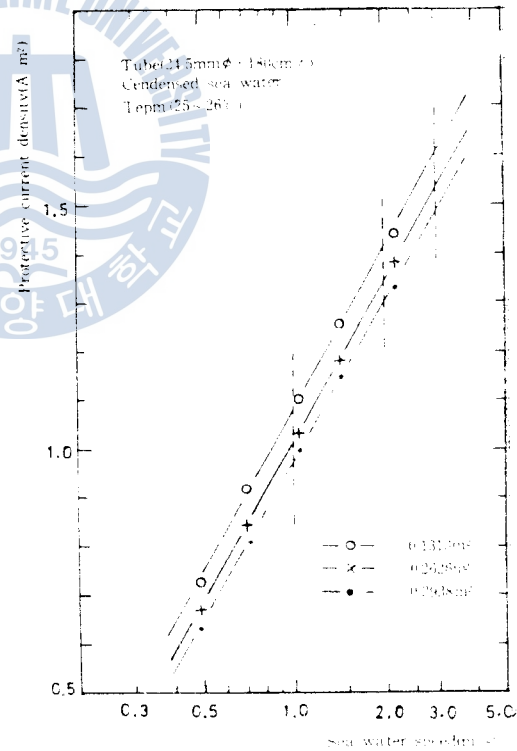


Fig. 12. Relations of the initial protective current density to the sea water speed (Experimental equipment-C)

이 더 크다는 것을 알 수 있다.

이와같이 冷却細管의 치수가 작아질 때에 그 初期防蝕電流密度가 커지는 原因은 冷却細管의 길이의 變化影響과 內徑의 變化影響으로 나누어서 생각할 수 있으나, 前者의 影響은 Fig. 7의 ㉠ ㉡로 보아서 僅少하므로 主로 後者(內徑)의 影響이다. 또 冷却細管의 內徑이 달라지면 冷却海水의 平均流速 등이 同一하여도 被防蝕電流密度가 달라지는 原因은 冷却細管의 內徑에 따라 細管內面가 사이의 海水의 흐름狀態가 相異하게 되고 이로 因해서 細管內面의 分極狀態가 달라지기 때문이라고 생각된다.

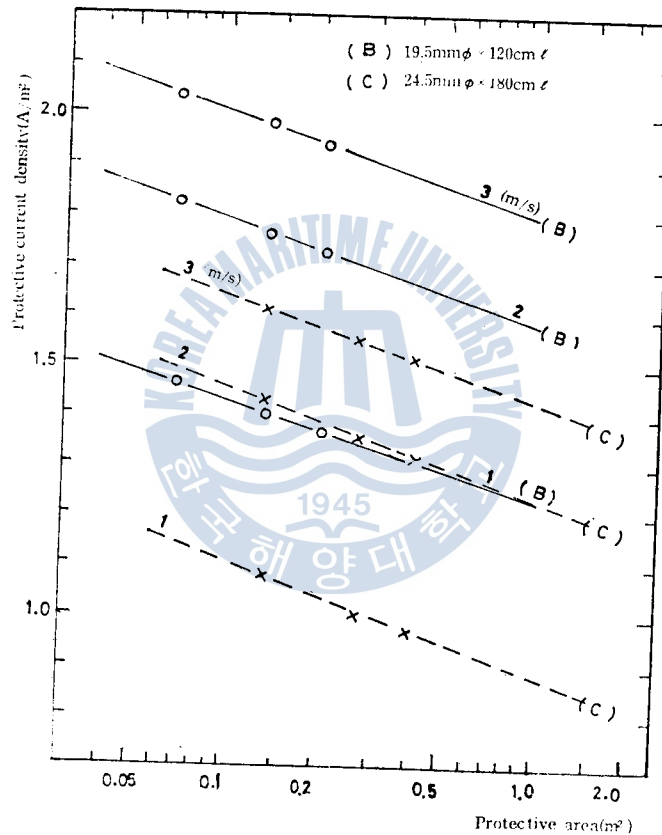


Fig. 13. Relations of the initial protective current density to the protective area and cooling sea water speed(Experimental equipment-B and C)

3.4 初期防蝕電流密度의 實驗式²⁶⁾

Fig. 9, 10이나 Fig. 11, 12, 13에 의하면 海水冷却細管 內面의 初期防蝕電流密度는 冷却海水의 平均流速과 被防蝕面積의 각각에 대해서 對數的으로 變할뿐 아니라 冷却細管의 치수에 따라서도 變하고 있으며 本防蝕法은 腐蝕條件이 苛酷한 境遇에 適用될 것이므로 實驗裝置-B와 C에

在冷却水及試驗海水，使用一冷却細管，二冷却細管内面防蝕性，必要時是初期防蝕電流密度計實驗式，求下列。

Fig. 13에 示되듯 冷却海水의 各 平均流速 V (m/s)에 對하여 初期防蝕電流密度 I (A/m²)，被蝕面積 A (m²)의 直線關係를 示해준다. 一般式의 時小數 a, b 를 表示하면,

$$I = a - b \log A$$

이것을 對하여 關係式을 實驗裝置-B에 C에 對하여 各 各의 測定值을 代入해서 最小自乘法로 求해서 平均流速 V 에 對한 I 軸에 對한 a, b 의 分配 b 의 變化關係를 調査하면,

Fig. 14에 Fig. 15에 各 各 實驗裝置-B에 C에 對하여 調査한 V 에 a 의 關係 및 V 에 b 의 關係의 大略 關係를 示해 表示하면,

$$a = c + d \log V$$

$$b = \text{const.}$$

이것을 Fig. 14에 Fig. 15에 數值을 代入해서 未知數 c, d 및 b 를 決定하면 浓缩海水의 冷却水에 使用되던 實驗裝置-B에 冷却細管 内面의 初期防蝕電流密度(附錄 參照)는

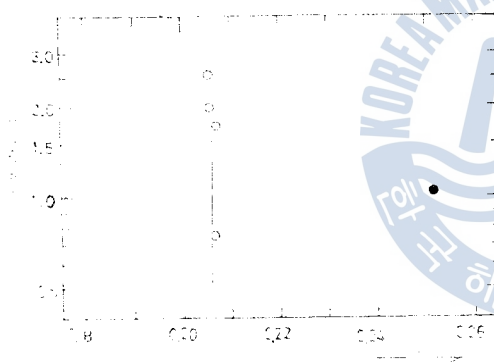


Fig. 14. Relations of the a and b to the sea water speed
①Experimental equipment B

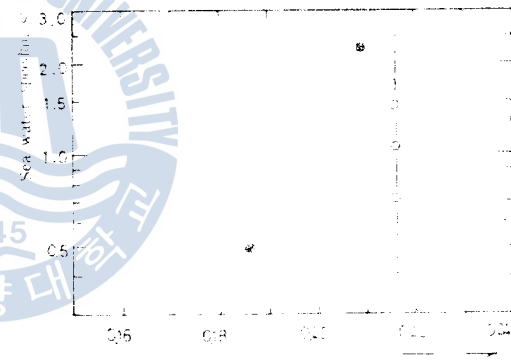


Fig. 15. Relations of the a and b to the sea water speed
②Experimental equipment C

$$I=1.2230+1.2063 \log V-0.2062 \log A \dots \dots \dots (3)$$

實驗裝置-C의 冷却細管 内面的 初期防蝕電流密度는

$$I=0.8836+1.1396 \log V-0.2167 \log A \dots \dots \dots (4)$$

(3) (4)式은 熱交換器에 가장 많이 使用되고 있는 尺寸限界의 海水冷却細管을 가진 實驗裝置에 대해서 求한 初期防蝕電流密度의 實驗式이므로 이 式은 外部電流로 海水冷却細管 内面을 直接 陰極防蝕할 때에 必要한 電源裝置의 容量을 決定하는데 있어 指標로서 利用할 수 있겠다.

4. 結 論

試作한 基準電極의 特性調査와 海水冷却 實驗裝置의 冷却細管 内面的 防蝕實驗에서 다음과 같이 結論을 내릴 수 있다.

(1) 試作한 小形 耐破型 天然海水型의 鹽化銀電極의 電位는 電極에 따라 $\pm 1.3V$ 의 偏差가 있으나 實用할 수 있고, 그 電位-溫度特性은 다음과 같다.

25°C 以下の 溫度($t^{\circ}C$)에서

$$E=6.9+0.19(t-25) \text{ mV(SCE)}$$

25°C 以上の 溫度에서

$$E=6.9-0.17(t-25) \text{ mV(SCE)}$$

(2) 試作한 鹽化銀基準電極은 冷却細管 内面的 電位를 測定할 수 있게 붙일 수 있고, 그 冷却細管의 内面은 外部電流에 의해서 充分히 防蝕시킬 수 있다. 그러므로 海水冷却細管 内面은 그 内面電位에 따라 防蝕電流密度를 適正值로 調節해서 防蝕시킬 수 있다.

(3) 冷却水로서 濃縮海水를 使用하는 實驗裝置에서 그 冷却細管 内面的 初期防蝕電流密度, I (A/m^2)는 冷却海水의 溫度가 $25\sim 26^{\circ}C$ 일 때에 그 平均流速 V (m/s), 被防蝕面積 A (m^2) 및 冷却細管의 尺寸에 따라 다음式으로 表示된다.

冷却細管의 尺寸가 $19.5\text{mm}(\phi) \times 120\text{cm}(l)$ 인 境遇

$$I=1.2230+1.2063 \log V-0.2062 \log A$$

冷却細管의 尺寸가 $24.5\text{mm}(\phi) \times 180\text{cm}(l)$ 인 境遇

$$I=0.8836+1.1396 \log V-0.2167 \log A$$

後 記

이 研究를 指導해 주신 全孝重教授님과 많은 協助를 해주신 孫珍鉉教授님을 비롯하여 여러 教授님들에게 感謝를 드리고, 3年間 研究獎勵金을 주신 科學技術處當局에 謝意를 表한다.

参 考 文 献

- 1) W. Matthewwar & G.J. Evans: 發電機に於ける海水蒸気の腐食, 防蝕技術, Vol. 11, No. 1, p. 15 (1965)
- 2) D. Ōzu: 蒸気原動機の海水蒸気に対する腐食防止の問題に於いて, 防蝕技術, Vol. 19, No. 1, p. 346 (1967)
- 3) 伊藤伍郎: 腐食科類の防食技術, コロナ社, 東京, p. 376, p. 496 (1972)
- 4) T.H. Rogers: Marine Corrosion, George Newnes, London, p. 177 (1967)
- 5) S. Natsumura: Application of New Material on Marine Condensers, Journal of the MESJ, Vol. 6, No. 12, p. 554 (1971)
- 6) 河野 功・高橋 謙: 海水冷却装置の腐食防止対策, 防蝕技術, Vol. 11, No. 1, p. 11 (1972)
- 7) N.D. Tomashov: Theory of Corrosion and Protection of Metal, Macmillan Co., New York, p. 476 (1966)
- 8) U. Pearson: 海水熱交換器の腐食の抑制における鋼の役割, 防蝕技術, Vol. 22, No. 4, p. 373 (1970)
- 9) A. Nakagawa & T. Hamasaki, et al.: Protective Method of Condenser Tube by Iron Sacrificial Anodes, Corrosion Engineering, Vol. 22, No. 5, p. 183 (1970)
- 10) Z. Tanabe: Effect of Ferrous Ions on the Corrosion of Condenser Tube Alloys, Corrosion Engineering, Vol. 19, No. 2, p. 89 (1970)
- 11) 酒井・藤田等: 電解法による復水器保護装置の實用化試験, 日機連身 第1回學術講演前編集, p. 105 (1970)
- 12) J.H. Morgan: The Internal Cathodic Protection of Large Steel Pipes Carrying Sea Water, Corrosion (NACE), Vol. 15, No. 8, p. 417 (1959)
- 13) E. Fukudani & T. Kaneko: Internal Cathodic Protection of Steel Pipes Carrying Sea Water, Corrosion Engineering, Vol. 11, No. 3, p. 103 (1962)
- 14) H.H. Uhlig: Corrosion and Corrosion Control, Wiley, New York, p. 175 (1963)
- 15) G.L. Daly: 陰極防食の經濟的考察, 防蝕技術, Vol. 11, No. 8, p. 371 (1969)
- 16) 尾屋正雄: 船舶の電気防食, 改訂版, 船舶技術協會, p. 9, p. 19 (1967)
- 17) T. Matsushita & K. Akagawa: Optimum Design of Heat Exchangers with Heat Transfer Promoters, Journal of the MESJ, Vol. 5, No. 11, p. 820 (1972)
- 18) 田 大照: 熱交換器用 海水冷却細管の 腐蝕防止対策, 船舶海陸工学論文集, 7輯, p. 27 (1971)
- 19) M.P. Peterson: 腐化銀電極は海水中において 理想的な 陽極用電極である事を理論と實験とを以て, 防蝕技術, Vol. 21, No. 10, p. 490 (1972)
- 20) H. I. Cleary: Microelectrodes for Corrosion Studies, Chemical Engineering, Vol. 18, No. 1, p. 27 (1969)
- 21) 中川雅夫: 電気防食の實際, 地人書院, 東京, p. 202, p. 203 (1971)
- 22) NACE Standard RP 01-89, Recommended Practice, Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems, Corrosion Engineering, Vol. 19, No. 8, p. 348 (1972)
- 23) S. Hanada: 電気防食法設計の手順と関連点, 防蝕技術, Vol. 19, No. 1, p. 71 (1970)
- 24) 田 大照: 球形耐破型 腐化銀電極の 試験結果, 防蝕技術, 防蝕技術論文集, Vol. 11, No. 1, p. 39 (1972)
- 25) 田 大照: 熱交換器用 海水冷却細管の 腐蝕防止対策, 防蝕技術論文集, Vol. 11, No. 5, p. 91 (1971)
- 26) 田 大照: 熱交換器用 海水冷却細管の 腐蝕防止対策, 未發表
- 27) L. J. E. Sawyer & A. B. Kinsley, et al.: 陰極防食に必要の電流密度, 防蝕技術, Vol. 18, No. 2, p. 89 (1966)

附 錄：初期防蝕電流密度的 實驗式 誘導

Fig. 13에서 一定 平均流速時의 初期防蝕電流密度 I mA/m²[冷却水：濃縮海水, 溫度：25~26℃, 防蝕電位：-0.85V(sw-Ag/AgCl)]와 被防蝕面積 A m²과의 關係들은 直線으로 表示되므로 그 一般式은 다음과 같다.

$$I = a - b \log A \dots\dots\dots(1)$$

(1)式의 方程式들은 實測值(A, I)를 代入해서 最小自乘法으로 求한다.

1) 實驗裝置-B의 境遇

海水의 平均流速 V 가 0.74m/s일 때의 關係式은 다음式이 最小로 되는 條件에서 求하면 된다.

$$P(A, I) = (a - b \log 0.2060 - 1.2136)^2 + (a - b \log 0.1374 - 1.2373)^2 + (a - b \log 0.0687 - 1.3100)^2 \dots\dots\dots(2)$$

$\partial P / \partial a = 0$ 일 때에

$$3a + 2.7112b = 3.7609 \dots\dots\dots(3)$$

$\partial P / \partial b = 0$ 일 때에

$$2.7112a + 2.5665b = 3.4228 \dots\dots\dots(4)$$

(3), (4)式을 聯立해서 풀면 $a = 1.0672$, $b = 0.2063$ 이므로, (1)式에 代入하면

$$I_{B1} = 1.0672 - 0.2063 \log A \dots\dots\dots(5)$$

海水의 平均流速이 1.03m/s일 때도 同一한 方法에 의해서

$$I_{B2} = 1.2367 - 0.2515 \log A \dots\dots\dots(6)$$

海水의 平均流速이 1.72m/s일 때도

$$I_{B3} = 1.5035 - 0.2070 \log A \dots\dots\dots(7)$$

平均流速이 1.98m/s일 때는

$$I_{B4} = 1.5773 - 0.2057 \log A \dots\dots\dots(8)$$

平均流速이 2.57m/s일 때는

$$I_{B5} = 1.7228 - 0.2058 \log A \dots\dots\dots(9)$$

(5)~(9)式에서 V 에 대한 a 와 b 는 Table 3과 같고 이를 圖示하면 Fig. 14와 같다. 平均流速이 1.03m/s의 경우는 Fig. 11로 보아서도 測定誤差가 크므로 이를 除外해서 V 와 a 의 關係 및 V 와 b 의 關係를 求하면 다음式으로 表示된다.

$$a = c + d \log V \dots\dots\dots(10)$$

$$b = 0.2062 \dots\dots\dots(11)$$

그러므로 (10), (11)式을 (1)式에 代入하면,

$$I_B = c + d \log V - 0.2062 \log A \dots\dots\dots(12)$$



(12)式의 誘導에 因하여 平均流速 1.03m/s의 場合는 다음과 같은 偏差의 吟味를 하게 된다.

Table 3. Relations of the a and b to the V

| V (m/s) | 0.74 | 1.03 | 1.72 | 1.98 | 2.57 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| a | 1.0672 | 1.2367 | 1.5035 | 1.5773 | 1.7228 |
| b | 0.2063 | 0.2515 | 0.2070 | 0.2057 | 0.2058 |

(10)式에 Table 3의 a 의 V 의 關係를 代入하여 最小自乘法로 未知數 c 와 d 를 求하면

$$a=1.2230+1.2063 \log V \dots \dots \dots (13)$$

(13)式을 (12)式에 代入하면 이 實驗裝置의 冷却細管(19.5mm ϕ) \times 120cm(L) 內面의 初期防蝕 電流密度의 實驗式은

$$I_b=1.2230+1.2063 \log V-0.2062 \log A \dots \dots \dots (14)$$

(14)式의 誘導을 可非 除外한 流速時의 實測電流密度는 (14)式에 表示하는 電流密度에 對하여 最高偏差가 ± 50.3 mA라고 (14)式에 表示하는 電流密度에 3.4%의 偏差에 不過하다.

2) 實驗裝置-(C)의 境遇

冷却海水의 平均流速 V 가 0.49m/s일 때는

$$I_{c1}=0.6589-0.1864 \log A \dots \dots \dots (15)$$

平均流速이 0.72m/s일 때는

$$I_{c2}=0.7198-0.2168 \log A \dots \dots \dots (16)$$

平均流速이 1.05m/s일 때는

$$I_{c3}=0.9103-0.2167 \log A \dots \dots \dots (17)$$

平均流速이 1.44m/s일 때는

$$I_{c4}=1.0326-0.2167 \log A \dots \dots \dots (18)$$

平均流速이 2.26m/s일 때는

$$I_{c5}=1.2637-0.2098 \log A \dots \dots \dots (19)$$

(15)~(19)式에서 V 에 대한 a 와 b 의 關係를 Table 4와 같이 示를 圖示하면 Fig. 15와 같다. 平均流速이 0.49m/s와 2.26m/s의 場合는 Fig. 12에 示하는 測定誤差가 3%의 程度을 除外하고 V 와 a 의 關係 및 V 와 b 의 關係를 示하면 大略 如下와 같다.

$$a=c+d \log V \dots \dots \dots (20)$$

$$b=0.2167 \dots \dots \dots (21)$$

즉(1)에 (1)式에 (20), (21)式을 代入하면

$$I_c=c+d \log V-0.2167 \log A \dots \dots \dots (22)$$

(22)式의 未知數 c 와 d 는 Table 4의 a 와 V 의 關係를 利用하여

(22)

$$I_c = 0.8836 + 1.396 \log V - 0.2167 \log A \dots\dots\dots(23)$$

Table 4. Relations of the *a* and *b* to the *V*

| <i>V</i> (m/s) | 0.49 | 0.72 | 1.05 | 1.44 | 2.26 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <i>a</i> | 0.5589 | 0.7198 | 0.9103 | 1.0626 | 1.2637 |
| <i>b</i> | 0.1864 | 0.2168 | 0.2167 | 0.2167 | 0.2098 |

(23)式을 誘導할 때에 除外한 流速時의 實測電流密度는 (23)式이 表示하는 電流密度에 對해서 最高偏差가 -16.5mA 이고 (23)式이 表示하는 電流密度의 2.7%에 不過한 偏差이다.

