

外部電源에 의한 水中鋼帶의 陰極防蝕에 관한 研究

田 大 熙 · 閔 丙 彥

A Study on the Cathodic Protection of a Steel Strip in Water by Impressed Current Method

Jeon Daehi · Min Byeongeon

目 次	
記號說明	
1. 序 論	5. 電源裝置의 所要電壓, 防蝕의 所要電力 및 最適防蝕條件
2. 實驗裝置와 實驗條件	5.1 電源裝置의 所要電壓의 實驗式
3. 分極電位의 理論式과 實測分極電位	5.2 防蝕의 所要電力 實驗式
3.1 分極電位의 理論的 分布式	5.3 最適防蝕條件
3.2 分極電位의 計算値와 實測値의 比較	6. 結 論
4. 分極電位의 計算値를 實測値와 同一하게 하는 條件	參考文獻
4.1 表面抵抗의 實驗式	附錄 I 表面抵抗(R)의 實驗式 誘導
4.2 排流點의 分極電位의 實驗式	附錄 II 排流點의 分極電位의 實驗式 誘導
4.3 分極電位의 補正計算値와 實測値와의 比較	附錄 III Programming
	附錄 IV 附表(Table A~E)

Abstract

The electric power for corrosion prevention is much more affected by the anode location in the impressed current method than by the galvanic anode method. However, investigation about this influence of the anode location in the impressed current method has not nearly been performed.

In this work, the effect of the anode location on the polarization potential and electric power etc. for corrosion prevention has been investigated using the simplest sample of a steel strip.

It is concluded that;

1) The general formulas for calculating of cathodic polarization potential on the steel strip is given as

$$E_c = E_0 e^{-\alpha x} = E_0 e^{-\sqrt{m_0 \rho_s / m t} x / \sqrt{R}}$$

$$E_0 = \{1.205 / [\log(80h)]^{1.1567}\} i_0 - 346.8 / (80h)^{0.41}$$

$$\sqrt{R} \times 10^3 = (13.504h + 2.1656)x + (1059.328h - 35.605)$$

where, when the anode height rate (h) is 0.25~0.5 the accuracy of calculated potential is higher.

2) Required voltage of power source for the cathodic protection can be determined by

$$V_0 = I_0(0.144 + 0.0123 \log[lh]) \rho \times 10^{-3} + 1.7$$

$$I_0 = 2i_0 m_0 l \times 10^{-4} = i_0 m_0 L \times 10^{-4}$$

3) Required power for cathodic protection can be determined by

$$P = V_0 I_0 = I_0^2 (0.144 + 0.0123 \log[lh]) \rho \times 10^{-3} + 1.7 I_0$$

4) The more specific resistance of water is larger, the greater is the effect of anode location on the required minimum power.

h range when it requires minimum power is 0.5625~0.6875 without any relation with the specific resistance. But when h range is 0.375~0.6875, the effect of h on the required minimum power is very small and the accuracy of calculated potential is considerably high.

記號說明

x : 排流点에서 測定点까지의 距離(cm)

m, m_0 : 試驗片의 實幅과 露出幅(cm)

l, L : 試驗片의 半長과 全長(cm)

t : 試驗片의 實두께(cm)

I_0, I_x : 排流点과 x 点을 흐르는 電流(mA)

E_0, E_x : 排流点과 x 点의 分極電位(mV)

$R, w (=R/m_0)$: 試驗片의 表面抵抗($\Omega\text{-cm}^2$)과 1cm 길이 當의 試驗片의 表面抵抗($\Omega\text{-cm}$)

$\rho_s, r (= \rho_s / mt)$: 試驗片의 比抵抗($\Omega\text{-cm}$)과 1cm 길이 當의 試驗片의 金屬抵抗(Ω/cm)

$\alpha = \sqrt{r/w}$: 減衰係數(cm^{-1})

H, h : 試驗片부터 陽極까지의 높이(cm) 및 높이率(H/l)

V_0 : 電壓裝置의 負荷電壓(V)

i_0, i_x : 試驗片의 平均印加電流密度(mA/m^2) 및 x 点의 電流密度(mA/m^2)

ρ, ρ_{27} : 任意溫度와 27°C 下의 물의 比抵抗 ($\Omega\text{-cm}$)

R_{pH} : 比抵抗 ρ ($\Omega\text{-cm}$)의 水中에서 陽極높이 H cm일 때의 防蝕回路抵抗($\text{m}\Omega$)

P : 防蝕電力(mW)

1. 序 論

陰極防蝕法은 水中이나 地中の 모든 金屬체에 對하여 適用시킬 수 있는 防蝕法이며, 모든 防蝕法中에서 가장 確實하고 가장 經濟的인 防蝕法으로 定評되고 있다.^{1),2)} 이 防蝕法에는 流電陽極法과 外部電源法이 있으나, 大型鐵鋼体の 長期間의 防蝕에는 外部電源法이 많이 利用되고 있다.³⁾

陰極防蝕法中에서 가장 重要的 것은^{4),5)} 被防蝕体の 各部의 分極電位를 防蝕電位(-770mV SCE) 以下の 거의 均等한 一定値로 維持하는 것이다. 이를 위해서는 小形의 많은 數의 陽極을 採用하여야 하나, 이 경우에는 陽極의 設置費用이 많이 들므로 陽極의 크기가 自然히 一定 크기 以上으로 制

限 받게 된다. 따라서 被防蝕體의 分極電位의 分布狀態가 不均等하게 되므로 一部分은 過防蝕되고 一部分은 防蝕不足으로 되기 쉽다. 特히 外部電源法은 費用關係로 流電陽極法에 比하여 아주 적은 數의 아주 큰 容量의 陽極으로 防蝕하므로 被防蝕體의 分極電位分布狀態가 아주 나쁘며, 陽極의 設置位置의 適否影響이 流電陽極法의 경우보다 훨씬 크게 나타난다. 또 流電陽極法에는 最近에 大型 발라스트 탱크에 對하여 陽極의 設置費用을 아주 節減하고 分極電位의 分布狀態도 좋게 하는 새로운 陽極設置工法⁹⁾이 開發되었다. 그러나, 外部電源法에는 이것의 適用도 不可能하다.

金屬構造物을 陰極防蝕할 때 被防蝕體의 分極電位分布가 어떻게 되는가에 관한 理論的 解析은 管 內面의 경우⁷⁾⁻⁹⁾와 長大한 地下埋設管의 外面의 경우¹⁰⁾⁻¹²⁾에는 많은 進展이 있으나, 比較的 짧은 配管의 外面과 大型水槽의 內面 등의 防蝕問題에 있어서는 아직 具體的인 研究實績이 없다. 特히 陽極의 位置가 被防蝕體의 分極電位分布에 미치는 影響에 對해서는 配管外面의 防蝕에 對한 定性的인 研究⁹⁾以外에는 찾아 볼 수 없다.

이 研究는 가장 簡單한 被防蝕體의 試驗片으로서 水中의 鋼帶를 採用하여 被防蝕體의 分極電位分布, 防蝕에 必要한 印加電壓 및 所要 防蝕電力에 미치는 陽極의 位置의 影響을 理論的인 面과 實驗的인 面에서 調査하였으며 끝으로 이 경우의 最適防蝕條件을 考察하였다. 그러므로 이 研究는 鐵鋼製의 配管外面이나 大型水槽內面 등을 外部電源法으로 防蝕할 때, 陽極의 位置에 따라 그 防蝕狀態가 어떻게 變하며 또 가장 經濟的으로 防蝕시킬 수 있는 適正陽極位置는 어떻게 決定할 것인가 등을 究明할 基礎資料로서 이바지할 것이다.

2. 實驗裝置와 實驗方法

2.1 實驗裝置

이 研究를 하기 위하여 實驗裝置는 Fig.1과 같이 配置하였다. 試驗片은 試驗水槽內의 3個의 砂器사발 위에 올려 놓았으며, 不溶性 陽極은 試驗片 中央點 上方에서 높이만을 調節할 수 있도록 固定하였고, 基準電極은 試驗片 上面에 沿하여 길이 方向으로 움직일 수 있도록 設置한 뒤에 電源裝置와 電位差計를 各各 配線하였다.

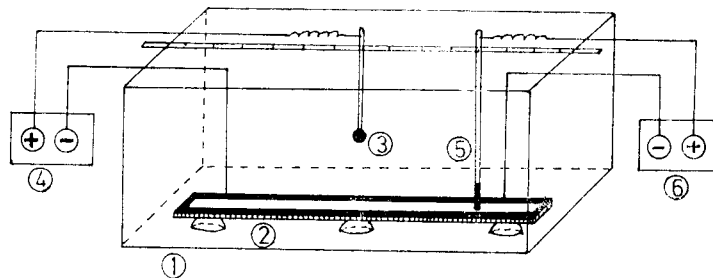


Fig. 1. Experimental equipment

- | | |
|-----------------------------|----------------------------|
| ① Fresh water tank | ④ Electric power source |
| ② Test piece | ⑤ Reference electrode(SCE) |
| ③ Pb-Ag insoluble electrode | ⑥ Potentiometer |

이 實驗裝置의 詳細는 다음과 같다.

- 1) 試驗片(Fig.2 參照)

試驗片은 길이 165cm, 폭 5cm, 두께 0.3cm의 構造用 炭素鋼帶를 採用하여 와이어 브러쉬와 샌드 페이퍼로 脫銹하고 아세톤으로 脫脂한 後에 有效作用面積이 160cm×3cm가 되도록 露出시키고 그 밖의 表面과 全裏面은 ZRP(Zinc rich primer)를 1회, 에폭시 타알塗料를 4회 칠하여 絶緣시켰다. 이 試驗片의 絶緣塗裝은 排流端線과 測定用 端線을 미리 붙인 後에 하였다. 試驗片의 露出面積(有效作用面積)은 0.048m²이다.

2) 測定機器

- (1) 電位差計 : High resistance D. C. voltmeter
Internal resistance: 100,000Ω/V
Type: NCE-MR-3E
- (2) 電源裝置 : 直流定電壓裝置
25V×3A容量 : 本大學製作
V-A meter: HINOKI 5L64 tester
- (3) 不溶性 陽極 : 含銀鉛(Pb-Ag) 電極
10mmφ球形, 本大學製作
- (4) 基準電極 : 飽和칼로멜電極
Type: Backman RL-B
- (5) 實驗用 水槽 : 試驗片과 同一하게 內面을 絶緣시킨 軟鋼板水槽
치수 : 180cm×120cm×60cm
容量 : 1톤(水深 : 50cm)

2.2 實驗用水의 質

用水는 清水였으나 쇠녹이 많으므로 150g/톤의 黃酸알루미늄을 加하여 澄清시켰다. 이 實驗用水의 質은 Table 1과 같았으며 實驗中의 水溫은 24.6°~28.6℃의 範圍이었다.

Table 1. Qualities of fresh water used for the experiments

Water temp °C	pH	Total hardness ppm CaCO ₃	Total alkalinity ppm CaCO ₃	Chloride ppm Cl ⁻	Specific resistance Ω-cm	Specific gravity
27	5.8	700	8	58.5	2,210	1.0024

2.3 實驗方法

이 實驗은 試驗片을 水槽에 浸漬하고 처음 2週日間은 晝間 8時間만 電流密度 100mA/m²로 陰極 防蝕하고 그 外의 時間은 無防蝕狀態로 放置해 둠으로써 試驗片을 安定化시켰으며, 이 環境에서 充分히 安定되도록 한 1個月後부터 通電試驗을 開始하였다. 이 때의 試驗片의 自然電位는 -650mV(SCE)였다.

試驗片 表面의 分極電位는 外部電源에서 防蝕電流를 通電하여 分極電位가 10分間 以上 安定되는 10分後에 測定하였으며, 다음의 測定時까지 自然腐蝕狀態로, 即 自然電位가 -650mV(SCE)로 復極되도록 約 50分間씩 기다렸다.

分極電位의 測定時의 不溶性陽極의 位置는 試驗片上面 中央点부터의 높이 $H=lh$ (l : 試驗片의 길이/2=80cm)를 5, 10, 20 및 40cm로 바꾸어 가면서, 또 外部에서 印加하는 電流(括弧內의 數値는 電流密度)를 12.5(260.4), 15(312.5), 17.5(364.6) 및 20mA(416.7mA/m²)로 바뀌가면서 測定하였

으며, 試驗片 表面의 分極電位를 그 中央點(排流點)으로부터 10cm 間隔으로 飽和칼로멜電極(SCE) 基準으로 測定하여 記錄하였다.

또 參考의인 補助實驗으로서 이 試驗片의 1/4點과 3/4點의 두 點의 上方에 同一한 不溶性 陽極 各 한個씩을 設置하고 本實驗과 同一 要領으로 外部電流를 通하여 그 分極電位를 測定하였다.

3. 分極電位의 理論式과 實測分極電位

3.1 分極電位의 理論的 分布式(表面抵抗이 非電流函數일 때)

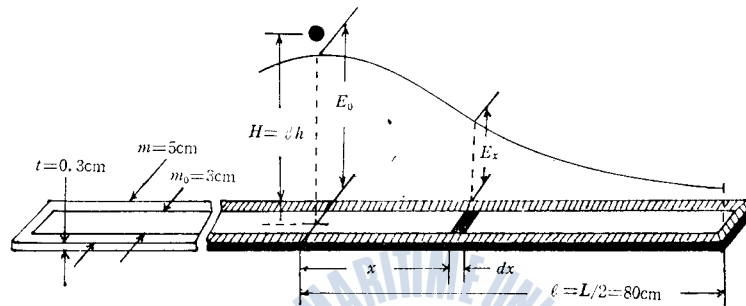


Fig. 2 Polarization potential on the strip protected by cathodic protection

排流點(中央點)에서 x cm 떨어져진 곳의 試驗片의 表面積 $m_0 dx$ (cm^2)에 流入하는 電流를 dI_x (A)라 하면 그 電流密度 $dI_x/m_0 dx$ (A/cm^2)에 의하여 일어나는 試驗片 表面의 電位變化 即 分極值(=實測電位-腐蝕電位) E_x (V)와 單位表面積의 表面抵抗 R ($\Omega\text{-cm}^2$)間에는

$$dI_x/m_0 dx = -E_x/R \dots\dots\dots(3-1)$$

單位 길이(cm)當의 試驗片의 表面抵抗을 w ($\Omega\text{-cm}$)라 하면

$$w = R/m_0 \dots\dots\dots(3-2)$$

(3-1)과 (3-2)式에서

$$dI_x/dx = -E_x/w \dots\dots\dots(3-3)$$

또 x 點의 試驗片을 흐르는 電流 I_x (A)는 dx 間에서 dE_x (V)의 電位變化를 생기게 하므로 試驗片의 比抵抗을 ρ_s ($\Omega\text{-cm}$), 그 單位 길이(cm)當의 金屬抵抗을 r (Ω/cm)라 하면

$$dE_x = -I_x \rho_s dx / mt \dots\dots\dots(3-4)$$

$$r = \rho_s / mt \dots\dots\dots(3-5)$$

(3-4), (3-5)式에서

$$dE_x = -I_x r dx \dots\dots\dots(3-6)$$

(3-6)式을 x 로 微分하면

$$d^2 E_x / dx^2 = -r dI_x / dx \dots\dots\dots(3-7)$$

(3-3)式을 (3-7)式에 代入하면

$$d^2 E_x / dx^2 = (r/w) E_x = \alpha^2 E_x \dots\dots\dots(3-8)$$

$$\text{但, } \sqrt{r/w} = \alpha (\text{減衰係數}) \dots\dots\dots(3-9)$$

Uhlig¹³⁾나 Sato¹⁴⁾ 등과 같이 R 가 電流密度에 따라 變하지 않고 全試驗片 表面에 對하여 一定이라 假定하면 α (cm^{-1})는 定數이므로 (3-8)式의 一般解는

$$E_x = A \cosh \alpha x + B \sinh \alpha x \dots\dots\dots(3-10)$$

(3-10)式을 變形하면

$$E_x = \frac{1}{2} [A(e^{\alpha x} + e^{-\alpha x}) + B(e^{\alpha x} - e^{-\alpha x})] \dots \dots \dots (3-11)$$

試驗片의 길이가 無限長이라 하고 $x=0$ (排流點)에서 $E_x=E_0$ 라 하면 $x=\infty$ 에서 $dE_x/dx=0$ 가 되므로 이 境界條件에서 (3-11)式의 未知數를 求한다.

前者의 條件($x=0$ 에서 $E_x=E_0$)에서

$$A=E_0$$

後者の 條件에서는 (3-10)式을 微分하면

$$\begin{aligned} dE_x/dx &= \alpha(A \sinh \alpha x + B \cosh \alpha x) \\ &= \frac{\alpha}{2} [A(e^{\alpha x} - e^{-\alpha x}) + B(e^{\alpha x} + e^{-\alpha x})] \end{aligned}$$

$x=\infty$ 일 때 $e^{-\alpha x}=0$ 이므로

$$B = -A = -E_0$$

$$\therefore E_x = E_0(\cosh \alpha x - \sinh \alpha x) = E_0 e^{-\alpha x} \dots \dots \dots (3-12)$$

(3-12)式을 x 로 微分하여 (3-6)式에 代入하면

$$\begin{aligned} dE_x/dx &= -\alpha E_0 e^{-\alpha x} = -r I_x \\ \therefore I_x &= (\alpha/r) E_0 e^{-\alpha x} = (E_0/\sqrt{rw}) e^{-\alpha x} \dots \dots \dots (3-13) \end{aligned}$$

(3-13)式에서 $x=0$ 일 때 $I_x = \frac{1}{2} I_0$ 라 하면

$$\frac{1}{2} I_0 = E_0/\sqrt{rw} \dots \dots \dots (3-14)$$

(3-14)式을 (3-13)式에 代入하면

$$I_x = \frac{1}{2} I_0 e^{-\alpha x} \dots \dots \dots (3-15)$$

3.2 分極電位の 計算値와 實測値의 比較

試驗片의 치수가 $m=5\text{cm}$, $m_0=3\text{cm}$, $t=0.3\text{cm}$ 및 $L=2l=160\text{cm}$ 이고 炭素鋼의 比抵抗 $\rho_s=13.5 \times 10^{-6}(\Omega\text{-cm})$ 程度¹⁵⁾이므로 單位길이 當의 試驗片의 導體抵抗 $r(\Omega/\text{cm})$ 와 表面抵抗 $w(\Omega\text{-cm})$ 등은

$$r = \rho_s/mt = (13.5/1.5) \times 10^{-6}(\Omega/\text{cm}) \dots \dots \dots (3-16)$$

$$w = R/m_0 = R/3 (\Omega\text{-cm}) \dots \dots \dots (3-17)$$

$$\alpha = \sqrt{r/w} = \sqrt{m_0 \rho_s / mt} / \sqrt{R} = 5.196 \times 10^{-3} / \sqrt{R}(\text{cm}^{-1}) \dots \dots \dots (3-18)$$

(3-16)~(3-18)式에서, 또 (3-14)式에서

$$\sqrt{rw} = r/\alpha = 1.732 \times 10^{-3} \sqrt{R} = 2E_0/I_0(\Omega) \dots \dots \dots (3-19)$$

(3-18)式을 (3-12)式에 代入하면 이 試驗片上의 分極電位分布式은

$$\begin{aligned} E_x &= E_0 e^{-\alpha x} = E_0 e^{-\sqrt{m_0 \rho_s / mt} x / \sqrt{R}} \\ &= E_0 e^{-5.196 x / \sqrt{R} \times 10^3} (\text{mV}) \dots \dots \dots (3-20) \end{aligned}$$

이 때의 R 값은 (3-19)式에서

$$\sqrt{R} = 0.5774 \times 10^3 (2E_0/I_0) (\Omega^{1/2}\text{cm}) \dots \dots \dots (3-21)$$

即 앞의 假定과 같이 R 가 電流密度에 따라 變하지 않고 全試驗片面에서 一定할 때의 R 값이 (3-21)式이다. 그러므로 이 경우의 R 는 E_0/I_0 만의 函數이다.

Fig. 3은 陽極을 試驗片의 中央上方에 둔 本實驗裝置에서 實測한 結果이며, 陽極의 電流密度에 따라 分極電位の 分布狀態가 어떻게 變化하는가를 圖示한 것이다.

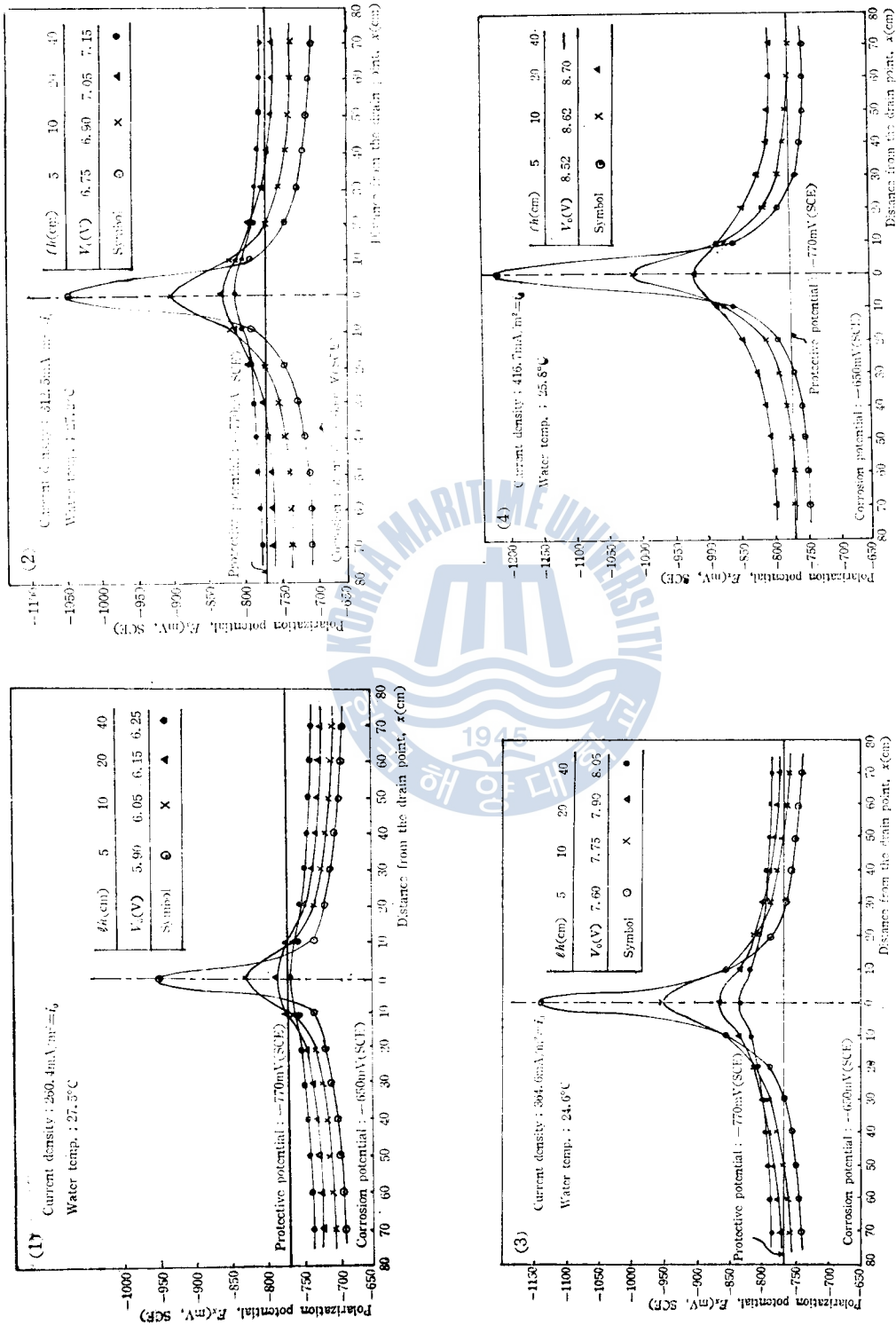


Fig. 3. Cathodic polarization potentials (An anode; Middle, upper point)

實驗結果의 한 例로서 陽極이 길이 $2l=80\text{cm}\times 2$ 의 試驗片의 中央上方에 있을 경우 陰極電流 I_0 가 17.5mA ($i_0=364.6\text{mA}/\text{m}^2$) 일 때 陽極높이率 $h=H/l$ 에 對한 E_0/I_0 (實測值)와 \sqrt{R} (計算值)가 Table 2의 左半部와 같으므로 이 實驗에서 測定한 試驗片上의 分極電位와 (3-20)式으로 計算한 分極電位가 同表의 右半部와 같이 된다.

Table 2. Cathodic polarization potentials $\left[\begin{matrix} 2l=80\text{cm}\times 2 \\ i_0=364.6\text{mA}/\text{m}^2 \end{matrix} \right]$

$h=H/l$	E_0/I_0 (Ω)	\sqrt{R} ($\Omega^{1/2}\text{cm}$)	$x(\text{cm})$ M, C*	0	10	20	30	40	50	60	70
				0.0625	28.00	32.334 $\times 10^3$	M	490	205	135	120
			C	490	490.000	490.000	499.000	490.000	490.000	489.997	489.995
0.125	17.43	20.128 $\times 10^3$	M	305	205	165	140	130	120	115	110
			C	305	305.000	305.000	304.999	304.997	304.997	304.997	304.997
0.25	12.29	14.197 $\times 10^3$	M	215	185	165	150	135	132	130	128
			C	215	215.000	214.999	214.998	214.998	214.998	214.996	214.996
0.5	10.29	11.882 $\times 10^3$	M	180	165	155	145	140	135	132	130
			C	180	180.000	179.999	179.998	179.996	179.996	179.995	179.995

* M: Measured polarization potentials(mV). C: Calculated potentials(mV) from the formula(3-20).

Table. 2에서 分極電位의 測定值와 計算值의 兩者間에 큰 差가 있는 것은 計算의 簡略化 때문에 試驗片의 長이를 無限長으로 取扱한 것과 表面抵抗 R 를 試驗片 各部 電流密度의 非函數 即, 試驗片 全長에 걸쳐 一定이라 看做하였기 때문이다. 그러나, 이 差異는 陽極의 높이率 h 를 增加시켜 試驗片上의 分極電位分布를 좋게 할수록 減少됨을 알 수 있다.

그러므로 試驗片의 長이 l 과 陽極높이率 h 가 比較的 작은 경우에는 表面抵抗 R 은 各 測定點의 電流密度에 따라 變하고, 이 測定點의 電流密度 i_x 는 陽極높이率 h 및 排流點에서 測定點까지의 거리 x 의 函數로 다루어야 한다. 따라서 任意點의 分極電位 E_x 는 一定 i_0 下에서 R 를 h 와 x 의 函數로, E_0 를 i_0 와 h 의 函數로 取扱하여 計算하면 된다.

4. 分極電位의 計算值를 實測值와 同一하게 하는 條件

(3-20)式인 $E_x=E_0e^{-5.196x/\sqrt{R}\times 10^3}$ 에서 計算되는 分極電位가 그 實測值와 同一하게 되기 위해 서는 前述한 바와 같이 表面抵抗 R 이 陽極 높이率 h 와 排流點에서 測定點까지의 거리 x 의 函數로 表示되어야 하고, 排流點에서의 分極電位 E_0 가 平均電流密度 i_0 와 陽極높이率 h 의 函數로 表示되어야 한다.

4.1 表面抵抗의 實驗式

R 은 一定한 i_0 와 一定한 h 下에서 (3-20)式의 E_0 와 E_x 에 實測值를 代入하여 求하고 다시 이 R 과 주어진 h 와 의 關係를 求하면 一定한 i_0 下의 R 의 一般式이 求해진다.

(3-20)式을 變形하면

$$\sqrt{R}\times 10^3=5.196x/\ln(E_0/E_x) \dots\dots\dots(4-1)$$

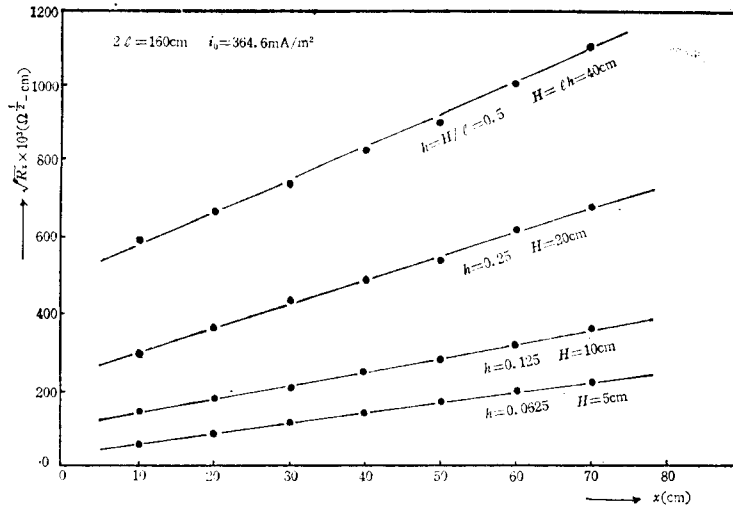


Fig. 4. Relations of x to \sqrt{R}_x when $i_0=364.6\text{mA/m}^2$

한 例로서 一定 電流密度 $i_0=364.6\text{mA/m}^2$ 下의 各 陽極 높이 率 h 에 대하여 \sqrt{R} 와 x 의 關係는 (4-1) 式에 E_0 와 E_x 의 實測值의 代入에 의하여 Fig. 4와 같이 直線的으로 된다. 그러므로 그 一般式은

$$\sqrt{R} \times 10^3 \cong ax + b \dots\dots\dots (4-2)$$

또 (4-2) 式의 a 와 b 는 주어진 h 에 대하여 Fig. 5와 같이 直線關係가 있으므로 (4-2) 式은

$$\sqrt{R} \times 10^3 = (ch + d)x + (eh + f) \dots\dots\dots (4-3)$$

(4-3) 式의 c, d, e 및 f 는 測定值를 代入하여 最小自乘法으로 決定하면 表面抵抗式 (附錄 I 參照) 은 다음과 같이 된다.

$$\sqrt{R} \times 10^3 = (13.504h + 2.1656)x + (1059.328h - 35.605) \dots\dots\dots (4-4)$$

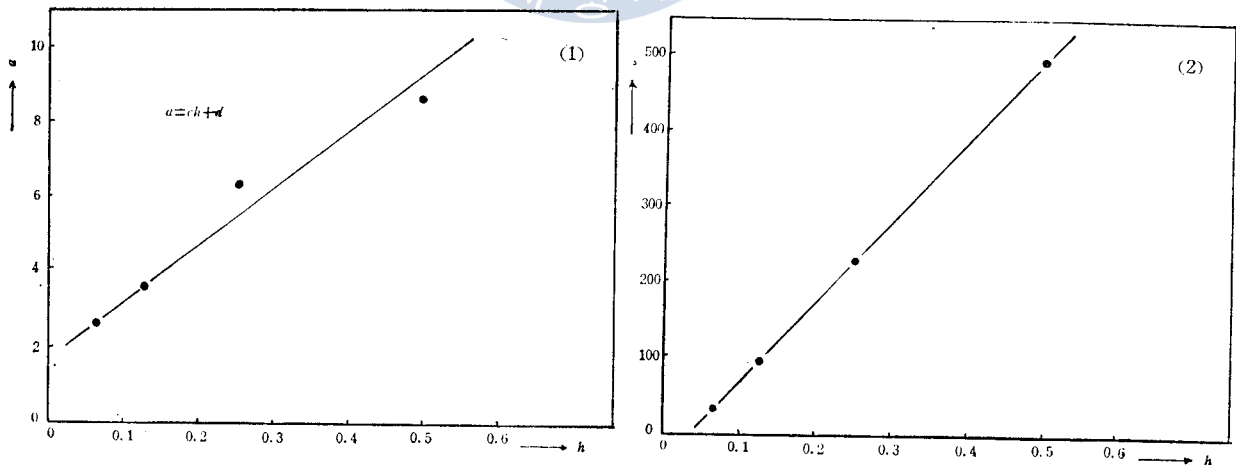


Fig. 5. Relations of a and b to h

4.2 排流点의 分極電位(E_0)의 實驗式

一定한 陽極 높이 率 h 에 대한 平均電流密度 i_0 와 排流点에서의 分極電位 E_0 의 關係는 實測值 (Fig. 3 參照)에 의하여 Fig. 6과 같이 直線的이므로

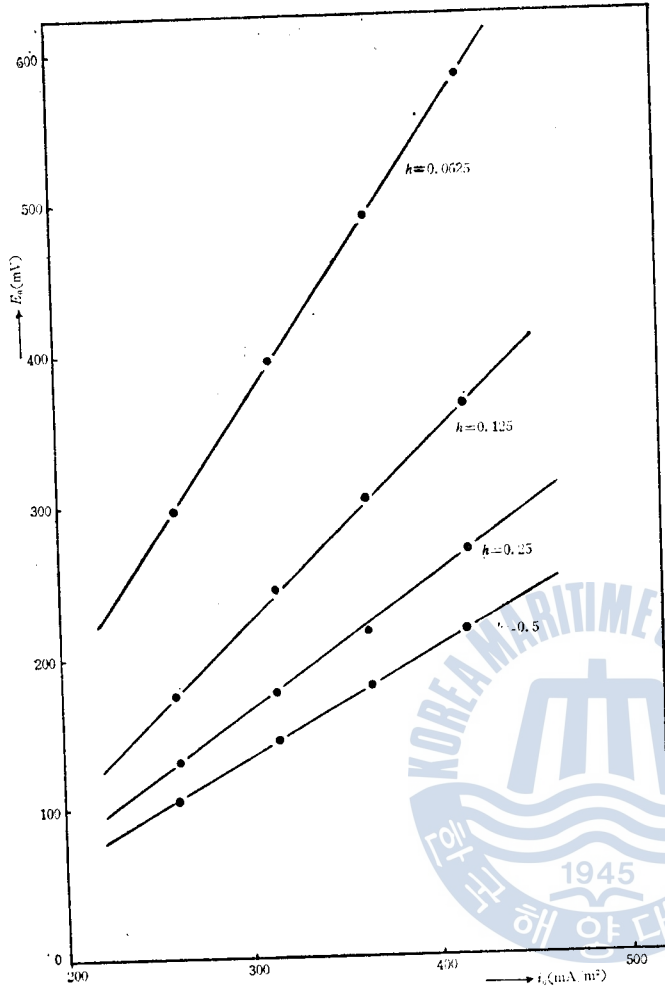


Fig. 6. Relations of h and i_0 to E_0

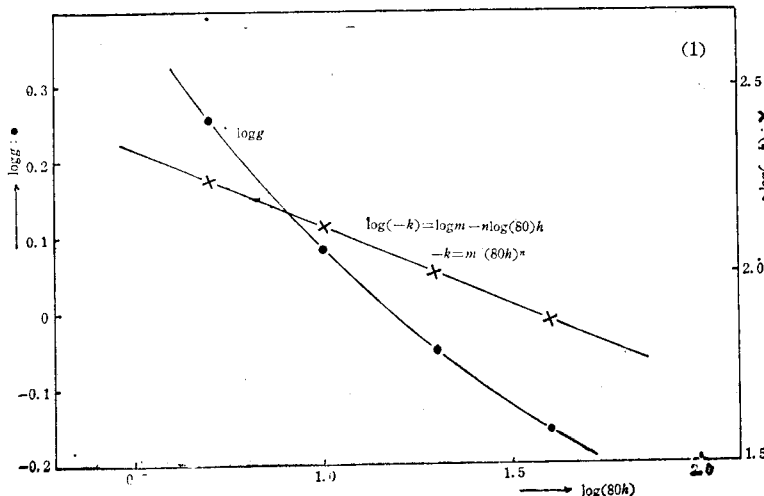


Fig. 7. Relations of lh to g and k (1)

$$E_0 = g i_0 + k \dots \dots \dots (4-5)$$

(4-5)式的 g 와 k 는 h 에 대하여 Fig. 7과 같은 관계가 있으므로 이들 값을 最小自乘法에 의하여 求하면(附錄 II 參照) 排流点의 分極電位 E_0 는

$$E_0 = \{1.205 / [\log(80h)]^{1.1667}\} i_0 - 346.8 / (80h)^{0.41} \dots \dots \dots (4-6)$$

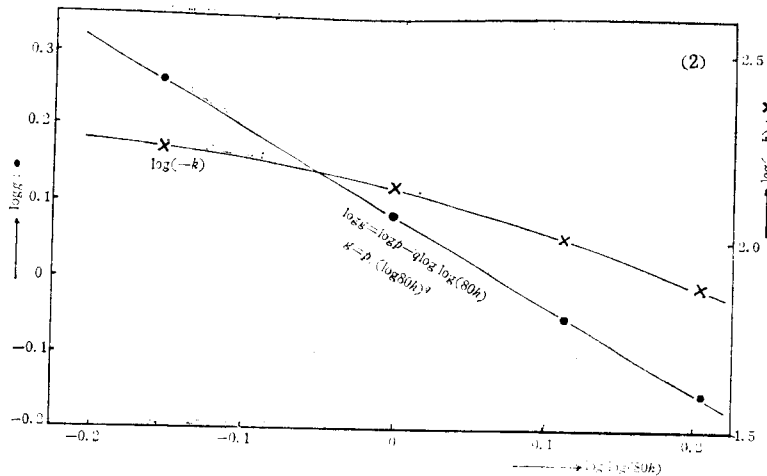
4.3 分極電位の 補正計算値와 實測値와의 比較

分極電位の 計算値 E_s 는 (3-20)式의 $\sqrt{R} \times 10^8$ 이 (4-4)式으로, E_0 가 (4-6)式으로 表示될 때 測定値와 近似的으로 같게 될 것이다. 이 分極電位の 計算値를 補正計算値라 하자.

Table A(附錄 IV 參照)는 本實驗의 分極電位の 實測値와 그 補正計算値의 比較이고, Table B는 다시 그 實測値에 對한 補正計算値의 比率을 表示한 것이다. Table B에 의하면 陽極높이率 h 가 0.25 ~ 0.5일 때 補正計算値가 實測値에 가장 接近하며 이 때의 補正計算値는 實測値에 對하여 若干의 特異한 點을 除外하면 $\pm 10\%$ 以内의 精度를 갖는다는 것을 알 수 있다.

또 參考的인 補助實驗에서의 實測値(두 陽極의 外側部의 分極電位)와 그 補正計算値 및 實測値에 對한 補正計算値의 比率은 Table C(附錄 IV 參照)와 같다. 이 補助實驗에서도 陽極의 높이率 h 가 0.25 ~ 0.5일 때에 補正計算値가 實測値에 가장 가까워지며, 實測値에 對하여 若干의 特異한 點을 除外하면 $\pm 15\%$ 以内의 精度를 갖는다.

따라서 鋼帶面의 陰分極電位 計算의 一般式은 다음의 3式으로 要約되며, 陽極높이率 h 가



0.25~0.5일 때에 精度가 높고, 그 誤差는 約 ±10% 以内이다.

Fig. 7. Relations of lh to g and k (2)

(3-20): $E_x = E_0 e^{-\alpha x} = E_0 e^{-\sqrt{m_0 \rho_s / mt} x} / \sqrt{R}$

(4-4): $\sqrt{R} \times 10^3 = (13.504h + 2.1656)x + (1059.328h - 35.605)$

(4-6): $E_0 = \{1.205 / [\log(80h)]^{1.1587}\} i_0 - 364.8 / (80h)^{0.41}$

5. 電源裝置의 所要電壓과 防蝕의 所要電力 및 最適防蝕條件

5.1 電源裝置의 所要電壓의 實驗式

鐵鋼의 防蝕에 不溶性 陽極으로 含銀鉛電極을 使用할 때 PbO_2-Fe 間의 理論的 水 分解電壓이 $1.7V^{15)}$ 이므로 防蝕電流 $I_0(A)$ 를 흘리기 위한 所要電壓 $V_0(V)$ 는

$$V_0 = I_0 R_{pH} + 1.7 \dots\dots\dots(5-1)$$

全防蝕回路抵抗 $R_{pH}(m\Omega)$ 는 (5-1)에서

$$R_{pH} = (V_0 - 1.7) / I_0 \dots\dots\dots(5-2)$$

本 實驗에서 不溶性 陽極의 높이 lh 와 全防蝕電流 $I_0(=i_0 m_0 l \times 2 \times 10^{-4} mA)$ 에 對하여 所要電壓 V_0 는 Table 3과 같으므로 이를 (5-2)式에 代入하여 全防蝕回路抵抗 R_{pH} 와 그 平均値를 求하면 Table 4와 같이 된다. Fig. 8은 Table 4를 圖示한 것이다.

Fig. 8에 의하면 R_{pH} 는 $\log[lh]$ ($[lh]$ 는 lh 의 數值, 但 l 은 cm 單位)에 比例하므로

$$R_{pH} = (B + C \log[lh]) \rho_{27} = B \rho_{27} + C \rho_{27} \log[lh] = D + E \log[lh] \dots\dots\dots(5-3)$$

(5-3)式의 D, E 를 Table 4의 數值에 의하여 最小自乘法으로 決定하면

$D = 0.319157, E = 0.0272428$ 이다. 또 $\rho_{27} = 2210 \Omega \cdot cm$ 이므로

$$B = D / \rho_{27} = 0.319157 / 2210 = 0.144 \times 10^{-3} \dots\dots\dots(5-4)$$

$$C = E / \rho_{27} = 0.0272428 / 2210 = 0.0123 \times 10^{-3} \dots\dots\dots(5-5)$$

(5-4), (5-5)式을 (5-3)式에 代入하면 防蝕回路의 全抵抗 R_{pH} 는

$$R_{pH} = (0.144 + 0.0123 \log[lh]) \rho \times 10^{-3} (m\Omega) \dots\dots\dots(5-6)$$

但, ρ 는 任意溫度下의 水의 比抵抗($\Omega \cdot cm$)

(5-6)式을 (5-1)式에 代入하면 所要電壓 V_0 는

$$V_0 = I_0 (0.144 + 0.0123 \log[lh]) \rho \times 10^{-3} (V) \dots\dots\dots(5-7)$$

Table 3. Relations of V_0 to lh and I_0

I_0 (mA)	12.5	15	17.5	20	h
$lh=H$ (cm)					
5	5.90	6.75	7.60	8.52	0.0625
10	6.05	6.90	7.75	8.62	0.125
20	6.15	7.05	7.90	8.70	0.25
40	6.25	7.15	8.05	—	0.5

Table 4. Relations of $R_{\rho H}$ to lh and I_0

I_0 (mA)	12.5	15	17.5	20	Mean $R_{\rho H}$ (m Ω)	log[lh]
$lh=H$ (cm)						
5	0.336	0.337	0.337	0.341	0.338	0.699
10	0.348	0.347	0.346	0.346	0.347	1.000
20	0.356	0.357	0.354	0.350	0.354	1.301
40	0.364	0.363	0.363	—	0.363	1.602

(5-7)式으로 計算되는 값과 實測值에 對한 %는 Table D(附錄 IV 參照)와 같다.

Table D에 의하면 (5-7)式의 所要電壓은 陽極의 높이率 h 나 防蝕電流 I_0 에 關係없이 $\pm 1.0\%$ 以內的 精度를 갖는다.

또 參考的인 補助實驗에서는 두 陽極의 內外側으로 나누고 그 外側에 對하여 (5-7)式에 $I_0=I_0/2$ 을 適用할 때 所要電壓의 (計算值)/(測定值)와 그 比率이 Table E와 같이 된다. 이것에 의하면 (5-7)式은 h 나 I_0 에 거의 關係없이 約 10% 以內的 精度를 갖는다는 것을 알 수 있다.

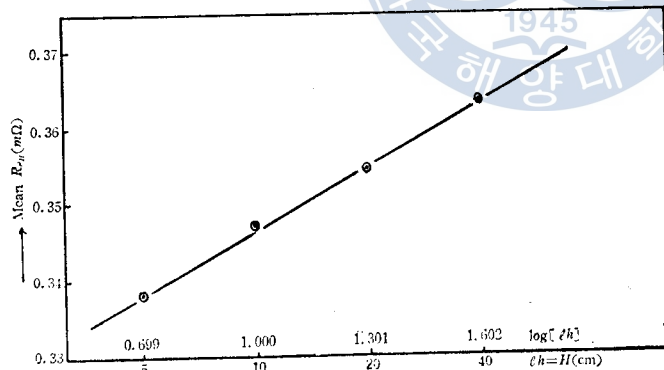


Fig. 8. Relations of mean $R_{\rho H}$ to lh

5.2 防蝕의 所要電力의 實驗式

防蝕에 所要되는 電力 P 는 (5-7)式에서

$$P = V_0 I_0 = I_0^2 (0.144 + 0.0123 \log[lh]) \rho \times 10^{-8} + 1.7 I_0 \text{ (mW)} \dots\dots\dots(5-8)$$

(5-7)式이나 (5-8)式에서 I_0 는

所要防蝕電流密度 i_0 에 經驗值를 使用한다면 그 電流密度와 被防蝕面積의 相乘積으로 求하여 活用할 수 있다. 卽

$$I_0 = i_0 m_0 l \times 2 \times 10^{-4} \text{ (mA)} \dots\dots\dots(5-9)$$

5.3 最適防蝕條件

(4-8)式에서 $x=l$ 일 때 $E_x = E_l$ (防蝕에 所要되는 分極值)를 代入하면

$$E_l = E_0 e^{-\sqrt{m_0 \rho_s / m t} l / \sqrt{R}} \dots\dots\dots(5-10)$$

(4-4)式에 $x=l$ 을 代入하면

6. 結 論

外部電源에 의한 水中鋼帶의 陰極防蝕에 關한 以上의 研究에서 다음의 結論을 내릴 수 있다.

1) 鋼帶面의 陰分極電位 計算의 一般式은 다음과 같으며, 陽極 높이率 h 가 0.25~0.5범위에서 精度가 높다.

$$E_x = E_0 e^{-\alpha x} = E_0 e^{-\sqrt{m_0 \rho_s / m} x / \sqrt{R}}$$

$$E_0 = \{1.205 / [\log(80h)]^{1.1587}\} i_0 - 346.8 / (80h)^{0.41}$$

$$\sqrt{R} \times 10^3 = (13.504h + 2.1656)x + (1059.328h - 35.605)$$

2) 陰極防蝕用 電源裝置의 所要電壓은 다음 式으로 求할 수 있다.

$$V_0 = I_0 (0.144 + 0.0123 \log[lh]) \rho \times 10^{-3} + 1.7$$

$$I_0 = 2i_0 m_0 l \times 10^{-4} = i_0 m_0 L \times 10^{-4}$$

3) 陰極防蝕의 所要電力은 다음 式으로 求할 수 있다.

$$P = V_0 I_0 = I_0^2 (0.144 + 0.0123 \log[lh]) \rho \times 10^{-3} + 1.7 I_0$$

4) 물의 比抵抗(ρ)이 클수록 陽極의 設置位置(h)의 適正問題가 防蝕電力(P)에 크게 영향을 미치나, 最少防蝕電力을 要하는 h 는 ρ 에 거의 關係없이 0.5625~0.6875의 범위이다. 그러나, 最少防蝕電力과 計算式의 精度를 고려하면 陽極 높이率 h 는 $h=0.375 \sim 0.5625$ 가 적당하다.

參 考 文 獻

1. G. L. Daly: 防蝕技術, Vol. 15, No. 8, p. 372(1963)
2. H. H. Uhlig: Corrosion and Corrosion Control, John Wiley, p. 195(1965)
3. 田大熙: 腐蝕과 防蝕, 實用編, 海洋大學 圖書出版部, p. 87 (1975)
4. 中川雅夫: 電氣防食法의 實際, 地人書館, pp. 133~134(1967)
5. R. Pope: Uhlig's Corrosion Handbook, John Wiley, p. 942(1963)
6. 筧建彦: 金屬, Vol. 45, No. 8, p. 19(1975)
7. J. H. Morgan: Corrosion. Vol. 15, August, NACE, pp. 417~422(1954)
8. 田大熙: 韓國海洋大學 論文集, Vol. 10, pp. 55~76(1975)
9. 佐藤·山内: 防食技術, Vol. 25, No. 10, pp. 611~617(1976)
10. 前掲書(2), p. 352
11. D. A. Jones: Shreir's Corrosion—2, pp. 11—13—17(1976)
12. 前掲書 (5), pp. 942~946
13. 前掲書 (2), p. 352
14. 前掲書 (9), p. 613
15. 外島忍: 基礎電氣化學, 朝倉書店, p. 333(1965)

附錄 I 表面抵抗(R)의 實驗式 誘導

(3-20)式을 變形하면

$$\sqrt{R} \times 10^3 = 5.196x / \ln(E_0/Ex) \dots\dots\dots(4-1)$$

(4-1)式에 一定 i_0 와 一定 h 下에서 E_0 와 x 에 대한 E_x 의 測定值를 代入하여 R 를 求하고, 다시 이 R 와 주어진 h 와의 關係를 求하면 一定 i_0 下의 R 의 一般式을 求할 수 있다. Fig. 4는 이 要領에 의하여 各 h 下의 x 와 $\sqrt{R} \times 10^3$ 의 關係를 求하여 圖示한 것이다. 이 그림에서 各 h 에 대하여 x 와 $\sqrt{R} \times 10^3$ 의 關係가 直線的이므로 다음의 一般式이 成立한다.

$$\sqrt{R} \times 10^3 = ax + b \dots\dots\dots(1)$$

①式에 各 h 下의 x 에 대한 $\sqrt{R} \times 10^3$ 의 計算值를 代入하여 最小自乘法으로 두 未知數를 決定한다.

(1) $h=0.0625(H=5\text{cm})$ 의 경우

$$\begin{aligned} p(\sqrt{R} \times 10^3, x) &= (10a+b-0.0597)^2 + (20a+b-0.0806)^2 \\ &+ (30a+b-0.1108)^2 + (40a+b-0.1391)^2 \\ &+ (50a+b-0.1687)^2 + (60a+b-0.1900)^2 + (70a+b-0.2146)^2 \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

$\partial p / \partial a = 0$ 일 때

$$14000a + 280b = 45.954 \dots\dots\dots(3)$$

$\partial p / \partial b = 0$ 일 때

$$280a + 7b = 0.9635 \dots\dots\dots(4)$$

③, ④式을 聯立하여 풀면 $a=2.6478, b=31.731$ 이므로

$$\sqrt{R_1} \times 10^3 = 2.6478x + 31.731 \dots\dots\dots(5)$$

(2) $h=0.125(H=10\text{cm})$ 인 경우

(1)의 경우와 같은 要領으로

$$\sqrt{R_2} \times 10^3 = 3.684x + 96.487 \dots\dots\dots(6)$$

(3) $h=0.25(H=20\text{cm})$ 인 경우

$$\sqrt{R_3} \times 10^3 = 6.430x + 227.740 \dots\dots\dots(7)$$

(4) $h=0.5(H=40\text{cm})$ 인 경우

$$\sqrt{R_4} \times 10^3 = 8.564x + 494.726 \dots\dots\dots(8)$$

⑤~⑧式의 a 와 b 를 整理하면 Table 5와 같고 이를 圖示하면 Fig. 5의 (1), (2)와 같다.

Table 5. Relations of a and b to h

h	0.0625	0.125	0.25	0.5
lh (cm)	5	10	20	40
a	2.65	3.68	6.43	8.56
b	31.73	96.49	227.74	494.73

Fig. 5에 의하여 다음의 一般式이 成立한다.

$$a = ch + d \dots\dots\dots(9)$$

$$b = eh + f \dots\dots\dots(10)$$

⑨, ⑩式에 Table 8의 數値를 代入하여 最小自乘法으로 c 와 d , 및 e 와 f 를 決定할 수 있다. 即

$$a=13.504h+2.166 \dots \dots \dots \textcircled{9}'$$

$$b=1059.328h+35.596 \dots \dots \dots \textcircled{10}'$$

그러므로 ①式에 ⑨', ⑩'을 代入하면

$$\sqrt{R} \times 10^3 = (13.504h + 2.1656)x + (1059.328h - 35.605) \dots \dots \dots \textcircled{11}$$

附錄 II 排流點의 分極電位의 實驗式 誘導

Fig. 6은 本實驗의 測定結果에서 i_0 와 h 에 對한 E_0 를 찾아서 圖示한 것이다. 이 그림에 의하면 各 h 下의 E_0 와 i_0 는 다음의 直線關係가 있다.

$$E_0 = gi_0 + k \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

그러므로 各 h 下에서 ①式에 測定結果를 代入하여 最小自乘法으로 未知數 g 의 k 를 求한다.

例로서 $h=0.0625$ ($H=5\text{cm}$)일 때 다음의 $p(E_0, i_0)$ 가 最少로 되기 위해서는 $\partial p/\partial g=0$ 와 $\partial p/\partial k=0$ 가 成立하여야 한다.

$$p(E_0, i_0) = (260.4g + k - 295)^2 + (312.5g + k - 395)^2 \\ + (364.6g + k - 490)^2 + (416.7g + k - 580)^2 \dots \dots \dots \textcircled{2}$$

$$\partial p/\partial g = 0 \text{ 일 때} \\ 472036.46g + 1354.2k = 620595.5 \dots \dots \dots \textcircled{3}$$

$$\partial p/\partial k = 0 \text{ 일 때} \\ 1354.2g + 4k = 1760 \dots \dots \dots \textcircled{4}$$

③, ④式을 聯立하여 풀면 $g=1.823$, $k=-177.318$ 이므로

$$E_{01} = 1.823i_0 - 177.318 \dots \dots \dots \textcircled{5}$$

同一한 方法으로 $h=0.125$ ($H=10\text{cm}$)일 때는

$$E_{02} = 1.180i_0 - 128.50 \dots \dots \dots \textcircled{6}$$

$h=0.25$ ($H=20\text{cm}$)일 때는

$$E_{03} = 0.883i_0 - 101.412 \dots \dots \dots \textcircled{7}$$

$h=0.5$ ($H=40\text{cm}$)일 때는

$$E_{04} = 0.701i_0 - 75.930 \dots \dots \dots \textcircled{8}$$

⑤~⑧式에서 h 에 對한 g 와 k 의 關係를 表示하면 Table 6의 上半部와 같이 된다.

Table 6. Relations of g and k to $80h^*$

h (H cm)	0.0625(5)	0.125(10)	0.25(20)	0.5(40)
g	1.823	1.209	0.883	0.701
k	177.318	136.879	101.412	75.930
$\log h$	-1.20412	-0.90309	-0.60206	-0.30103
$\log(80h)$	0.69897	1.000	1.30103	1.60206
$\log \log(80h)$	-0.15554	0.000	0.11428	0.20468
$\log g$	0.26078	0.08242	-0.05404	-0.15428
$\log(-k)$	2.24875	2.13633	2.00609	1.88041

* h 를 $80h$ 로 表示한 것은 $\log h$ 가 負數로 되기 때문이다.

Table 6을 圖示하면 Fig. 7의 (1), (2)와 같이 되므로 다음의 關係가 成立함을 알 수 있다.*

$$\log g = \log p - q \log \log(80h) \dots\dots\dots \textcircled{9}$$

$$\log(-k) = \log m - n \log(80h) \dots\dots\dots \textcircled{10}$$

⑨, ⑩式의 未知數 p 와 q 및 m 과 n 을 Table 6의 값을 代入하여 最小自乘法으로 決定하면

$$\log g = 0.080977 - 1.1567 \log \log(80h)$$

$$= \log 1.205 - \log [\log(80h)]^{1.1567}$$

$$= \log \{1.205 / \log(80h)^{1.1567}\}$$

$$\therefore g = 1.205 / [\log(80h)]^{1.1567} \dots\dots\dots \textcircled{11}$$

또 $\log(-k) = 2.540 - 0.410 \log(80h)$

$$= \log 346.8 - \log(80h)^{0.41}$$

$$= \log [346.8 / (80h)^{0.41}]$$

$$\therefore -k = 346.8 / (80h)^{0.41} \dots\dots\dots \textcircled{12}$$

⑪, ⑫式을 ①式에 代入하면

$$E_0 = \{1.205 / [\log(80h)]^{1.1567}\} i_0 - 346.8 / (80h)^{0.41} \dots\dots\dots \textcircled{13}$$

附錄 III Programming

PANAFACOM UMOS/D E004 FORTRAN V01/L05 -760101-

ISN STNO. SOURCE STATEMENT

```

1      FUNCTION P(H, R)
2      F=(99.6*EXP(416.0/(26.521*H+137.584))+288.0/H**0.41)*
      (ALOG10(H))**11.157
3      P=(3.32+.283*ALOG10*(H))*R*F*F*1.E-7+.0816*F
4      RETURN
5      END
    
```

PANAFACOM UMOS/D E004 FORTRAN V01/L05 -760101-

ISN STNO. SOURCE STATEMENT

```

1      DO 2 J=1,5
2      READ (5,100) R
3      100 FORMAT(F10.3)
4      WRITE (6,106) R
5      106 FORMAT (1H1,'RHO=' F10.1)
6      DO 10 I=1,120
7      H=I
8      PP=P(H, R)
9      WRITE(6,102) H, R, PP
10     102 FORMAT (3E15.7)
11     10 CONTINUE
12     2 CONTINUE
13     STOP
14     END
    
```

附錄 IV 附表

Table A The calculated potential and measured potential (mV) [Protected area: 0.048m²
Length of stirr: 1.60m(2f)]

$i_0(\text{mA}/\text{m}^2)$	$x(\text{cm})$ h	0	10	20	30	40	50	60	70
		260.4	0.0625	295.57 (290)	125.67 (75)	94.10 (65)	81.41 (60)	74.62 (50)	70.40 (45)
	0.125	178.86 (175)	121.78 (110)	98.33 (75)	85.13 (70)	78.09 (65)	72.87 (60)	69.11 (55)	66.28 (50)
	0.25	128.98 (130)	107.46 (115)	95.02 (95)	86.96 (85)	81.34 (80)	77.21 (80)	74.04 (75)	71.54 (70)
	0.5	105.49 (110)	96.50 (105)	90.39 (100)	85.97 (95)	82.63 (93)	80.02 (90)	77.92 (88)	76.20 (85)
312.5	0.0625	390.57 (395)	165.93 (135)	124.34 (85)	107.58 (70)	98.60 (63)	93.03 (57)	89.24 (54)	86.50 (50)
	0.125	241.64 (245)	164.53 (165)	132.849 (115)	115.93 (95)	105.50 (93)	98.44 (91)	93.37 (89)	89.55 (87)
	0.25	176.20 (175)	146.80 (155)	129.80 (140)	118.80 (125)	111.12 (115)	105.48 (113)	101.15 (110)	97.73 (107)
	0.5	141.89 (155)	129.80 (145)	121.57 (135)	115.63 (132)	111.14 (129)	107.63 (127)	104.81 (125)	102.50 (123)
364.6	0.0625	485.58 (490)	206.30 (205)	154.59 (135)	133.74 (120)	122.58 (110)	115.66 (105)	110.95 (95)	107.54 (90)
	0.125	304.42 (305)	207.27 (205)	167.36 (165)	146.05 (140)	132.91 (130)	124.02 (120)	117.63 (115)	102.81 (110)
	0.25	222.50 (215)	185.38 (185)	163.91 (165)	150.02 (150)	140.33 (135)	133.19 (132)	127.73 (130)	123.42 (128)
	0.5	178.29 (180)	163.09 (165)	152.76 (155)	145.29 (145)	139.65 (140)	135.23 (135)	131.69 (132)	128.79 (130)
416.7	0.0625	580.58 (570)	246.66 (210)	184.84 (140)	159.91 (115)	146.57 (105)	138.29 (103)	132.65 (100)	128.58 (98)
	0.125	367.20 (360)	250.01 (220)	201.88 (160)	176.18 (140)	160.32 (130)	149.60 (125)	141.88 (123)	136.07 (120)
	0.25	268.81 (265)	223.96 (225)	198.03 (205)	181.24 (170)	169.53 (160)	160.91 (155)	154.31 (153)	149.10 (150)

() ; Measured potentials

Table B $\frac{\text{Calculated potential}}{\text{Measured potential}} \times 100 (\%)$ [Protected area: 0.048m²
Length of strip: 1.60m (2l)]

$i_0(\text{mA/m}^2)$	$x(\text{cm})$ h	0	10	20	30	40	50	60	70
		260.4	0.0625	101.9	167.4	144.6	135.7	149.2	156.4
	0.125	102.2	110.7	131.1	121.6	120.1	121.5	125.7	132.6
	0.25	99.2	93.4	100.0	102.3	161.7	96.5	98.7	102.2
	0.5	95.9	91.9	90.4	90.5	88.8	88.9	88.5	89.6
312.5	0.0625	98.9	122.9	146.3	153.7	156.5	163.2	165.3	173.0
	0.125	98.6	99.7	115.5	122.0	113.4	108.2	104.9	102.9
	0.25	100.7	94.7	92.7	95.0	96.6	93.3	92.0	91.3
	0.5	91.5	89.5	90.1	87.6	86.2	84.7	83.8	83.3
364.6	0.0625	99.1	100.6	114.5	111.5	111.4	110.2	116.8	119.5
	0.125	99.8	101.1	101.4	104.3	102.2	103.3	102.3	93.5
	0.25	103.5	100.2	99.3	100.0	103.9	100.9	98.3	96.4
	0.5	99.1	98.8	98.6	100.2	99.8	100.2	101.3	99.1
416.7	0.0625	101.9	117.5	132.0	139.1	139.6	134.3	132.7	131.2
	0.125	102.0	113.6	126.2	125.8	123.3	119.7	115.3	113.4
	0.25	101.4	99.5	96.6	106.6	105.0	103.8	100.9	99.4

Table C [Calculated potential (E_{xc})/Measured potential(E_{xm})] and the ratio
(Secondary experiment)

$i_0(\text{mA/m}^2)$	$x(\text{cm})$ h	0		10		20		30		35	
		E_{xc}/E_{xm}	%	E_{xc}/E_{xm}	%	E_{xc}/E_{xm}	%	E_{xc}/E_{xm}	%	E_{xc}/E_{xm}	%
208.3	0.125	$\frac{116.08}{160}$	72.6	$\frac{79.07}{80}$	98.8	$\frac{63.86}{70}$	91.2	$\frac{55.73}{60}$	92.9	$\frac{52.95}{55}$	96.3
	0.25	$\frac{83.58}{110}$	76.0	$\frac{69.64}{80}$	87.1	$\frac{61.58}{65}$	94.7	$\frac{56.36}{60}$	93.9	$\frac{54.39}{57}$	95.4
	0.5	$\frac{69.09}{85}$	81.3	$\frac{62.19}{80}$	77.7	$\frac{59.19}{70}$	84.6	$\frac{56.30}{67}$	84.0	$\frac{55.14}{65}$	84.8
260.4	0.125	$\frac{178.86}{195}$	91.7	$\frac{121.84}{115}$	105.9	$\frac{98.39}{90}$	109.3	$\frac{85.86}{75}$	114.5	$\frac{81.59}{70}$	116.6
	0.25	$\frac{129.89}{165}$	78.7	$\frac{108.22}{110}$	98.4	$\frac{95.69}{100}$	95.7	$\frac{87.58}{90}$	97.3	$\frac{84.52}{85}$	99.4
	0.5	$\frac{105.49}{125}$	84.4	$\frac{95.00}{115}$	82.6	$\frac{90.38}{110}$	82.2	$\frac{85.96}{105}$	81.9	$\frac{84.19}{95}$	88.6
	1.0	$\frac{91.55}{130}$	70.4	$\frac{87.61}{125}$	70.1	$\frac{84.70}{120}$	67.3	$\frac{82.48}{115}$	71.7	$\frac{81.55}{110}$	74.1

312.5	0.125	$\frac{241.64}{230}$	105.1	$\frac{164.60}{125}$	131.7	$\frac{132.93}{100}$	132.9	$\frac{116.00}{95}$	122.1	$\frac{110.22}{90}$	122.5
	0.25	$\frac{176.20}{170}$	103.6	$\frac{146.80}{130}$	112.9	$\frac{129.80}{110}$	118.0	$\frac{118.80}{105}$	113.1	$\frac{114.65}{100}$	114.7
	0.5	$\frac{141.89}{145}$	97.9	$\frac{129.79}{135}$	96.1	$\frac{121.57}{125}$	97.3	$\frac{115.63}{120}$	96.4	$\frac{113.24}{117}$	96.8
	0.75	$\frac{128.79}{140}$	92.0	$\frac{121.42}{135}$	89.9	$\frac{116.14}{130}$	89.3	$\frac{112.16}{125}$	89.7	$\frac{110.53}{120}$	92.1
416.7	0.125	$\frac{246.70}{275}$	89.7	$\frac{168.05}{170}$	98.9	$\frac{135.71}{135}$	100.5	$\frac{118.43}{120}$	98.7	$\frac{112.53}{115}$	97.9
	0.25	$\frac{179.93}{215}$	83.7	$\frac{149.91}{175}$	85.7	$\frac{132.55}{140}$	94.7	$\frac{121.32}{130}$	93.3	$\frac{117.08}{125}$	93.7
	0.5	$\frac{144.82}{180}$	80.5	$\frac{132.48}{170}$	77.9	$\frac{124.08}{160}$	77.6	$\frac{118.02}{155}$	76.1	$\frac{115.57}{150}$	77.0

Table D [Calculated voltage (V_{oc})/Measured voltage(V_{om})] and the ratio (Primary experiment)

h	I_0 (mA)	12.5		15		17.5		20	
		V_{oc}/V_{om}	%	V_{oc}/V_{om}	%	V_{oc}/V_{om}	%	V_{oc}/V_{om}	%
0.0625	5	$\frac{5.916}{5.90}$	100.3	$\frac{6.759}{6.70}$	100.1	$\frac{7.602}{7.60}$	100.0	$\frac{8.445}{8.52}$	99.1
		$\frac{6.018}{6.05}$	99.5	$\frac{6.881}{6.90}$	99.7	$\frac{7.745}{7.75}$	99.9	$\frac{8.609}{8.62}$	99.9
0.125	10	$\frac{6.120}{6.15}$	99.5	$\frac{7.004}{7.05}$	99.3	$\frac{7.888}{7.90}$	99.8	$\frac{8.772}{8.70}$	100.8
		$\frac{6.222}{6.25}$	99.6	$\frac{7.127}{7.15}$	99.7	$\frac{8.301}{8.05}$	99.8	—	—

Table E [Calculated voltage(V_{oc})/Measured voltage(V_{om})] and the ratio (Secondary experiment)

h	$I_0 = I'_0/2$ (mA)	5		6.25		7.5		10	
		V_{oc}/V_{om}	%	V_{oc}/V_{om}	%	V_{oc}/V_{om}	%	V_{oc}/V_{om}	%
0.125	5	$\frac{3.39}{3.78}$	89.6	$\frac{3.81}{4.20}$	90.7	$\frac{4.23}{4.68}$	90.4	$\frac{5.07}{5.18}$	97.9
		$\frac{3.43}{3.83}$	89.6	$\frac{3.86}{4.25}$	90.8	$\frac{4.29}{4.73}$	90.7	$\frac{5.15}{5.23}$	98.6
0.5	20	$\frac{3.47}{3.90}$	88.9	$\frac{3.91}{4.32}$	90.5	$\frac{4.35}{4.80}$	90.6	$\frac{5.24}{5.32}$	98.4
		—	—	$\frac{3.96}{4.42}$	89.6	$\frac{4.41}{4.90}$	89.6	—	—