

外部電源에 의한 水中圓鋼板의 陰極防蝕에 관한 研究

田 大 熙 · 金 貴 植

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

Jeon Dae Hi · Kim Gui Sig

〈目 次〉

| | |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| Abstract | 및 最適防蝕條件 |
| 記號說明 | |
| 1. 序 論 | 6. 結 論 |
| 2. 實驗裝置와 實驗方法 | 參考文獻 |
| 3. 分極電位の 理論式과 實測分極電位 | 附錄 I. 表面抵抗의 實驗式 誘導 |
| 4. 分極電位の 計算值 및 이를 實測值와 同 一하게 하는 條件 | 附錄 II. 排流点의 分極電位の 實驗式 誘導 |
| 5. 電源裝置의 所要電壓, 防蝕의 所要電力 | 附錄 III. 附表 Table A~E |

Abstract

There are the impressed current method and the galvanic anode one in the cathodic corrosion prevention. The polarization potential distribution and the electric power are more affected by the anode location in the former than in the latter.

In the impressed current method, the effects that anode location exerts on polarization potential distribution and electric power have been investigated under water steel pipe and strip, but such effects on steel disc or plate have not been reported yet.

Protecting a steel disc in the water with utilization of the single insoluble anode, the present authors investigated the effects that anode location exerts on polarization potential distribution and electric power for corrosion prevention in terms of the theoretical and experimental aspects.

This paper is concerned with a basic research which premises economical corrosion prevention on the inside surface of large water tank and the bottom plate.

The results of research are as follows;

- 1) The cathodic polarization potential on the steel disc surface can be calculated by

$$E_s = E_o \left\{ K_o \left(\sqrt{\frac{\rho_s}{Rt}} x \right) / K_o \left(\sqrt{\frac{\rho_s}{Rt}} \right) \right\}$$

where,

$$E_o = \{-9.078 \log(50h) + 16.731\} i_o + 10^{3-3.1418} - 19.0$$

$$\sqrt{R} \times 10^3 = 10^{2.7689A+0.238} + 10^{3.806A+1.4}$$

- 2) The required voltage of power source for the cathodic protection is able to be determined by

$$V_o = I_o \{0.1441 + 2.2875 \times 10^{-4}(rh)\} \times 10^{-3} + 1.85$$

where,

$$I_o = \pi/4 d^2 i_o \times 10^{-4}$$

- 3) The required power for cathodic protection is able to be determined by

$$P = V_o I_o = I_o^2 \{0.1441 + 2.2875 \times 10^{-4}(rh)\} 10^{-3} + 1.85 I_o$$

- 4) The larger the specific resistance of water is, the greater becomes the effect of anode location on the required minimum power, but the height rate range required minimum power is 0.42~0.64 according to the specific resistance of water.

記號說明 (Nomenclature)

- x : 排水点에서 測定点까지의 거리 (distance from drainage point to measuring point) (cm)
 r, d : 試驗片의 半徑과 直徑 (radius and diameter of test plate) (cm)
 t : 試驗片의 두께 (thickness of test plate) (cm)
 I_o, I_x : 全防蝕電流과 x 点을 흐르는 電流 (external current and current in test plate at x point) (mA)
 E_o, E_x : 排水点과 x 点的 分極電位 (polarization potential at drainage point and x point) (-mV)
 R : 試驗片의 表面抵抗 (surface resistance of test plate) (Ω -cm²)
 ρ_s : 試驗片의 比抵抗 (specific resistance of test plate) (Ω -cm)
 H : 試驗片부터 陽極까지의 높이 (distance from center of test plate to anode) (cm)
 h : 陽極의 높이率 (anode height rate) (H/r)
 i_o, i_x : 試驗片의 平均電流密度 및 x 点的 電流密度 (average current density on test plate and x point) (mA/m²)
 ρ, ρ_{24} : 任意溫度和 24℃의 물의 比抵抗 (specific resistance of water optional temperature and 24℃) (Ω -cm)
 $R_{\rho H}$: 比抵抗 ρ (Ω -cm)의 水中에서 陽極높이 H (cm) 일 때의 防蝕回路抵抗 (total circuit resistance) (Ω)
 P : 防蝕電力 (electric power for corrosion prevention) (mW)
 V_o : 電源裝置의 負荷電壓 (impressed voltage) (V)

1. 序 論

陰極防蝕法은 水中이나 地中の 金屬構造物에 適用할 때 다른 어느 防蝕法보다도 가장 確實하고 經濟的인 防蝕法으로 評價되고 있다.^{1), 2)}

이 防蝕法에는 外部電源法과 流電陽極法이 있으며, 前者는 地下埋設管이나 海洋構造物 등 大型鐵鋼體의 長期間 防蝕에 주로 利用되고, 後者는 아연合金이나 알루미늄合金 등을 犧牲陽極으로 使用해서 小型施設의 防蝕에 利用된다.³⁾ 陰極防蝕法에서 經濟的으로 防蝕하는데 가장 중요한 것은 被防蝕體 各部의 分極電位를 防蝕電位 以下の 거의 均等한 값으로 維持하는 것이다.^{4), 5)} 이렇게 하기 위해서는 多數의 小型陽極을 設置해야 하지만 陽極의 設置費用 관계로 少數의 大容量의 陽極을 設置하고 있다. 特히 外部電源法은 流電陽極法에 比하여 經濟的인 理由로 少數의 大容量의 陽極에 依하여 防蝕하므로 陽極位置의 適否 影響이 훨씬 크게 나타난다. 또 流電陽極法에서는 大型발라스트탱크 등에 設置費用과 分極電位分布를 고려한 새로운 陽極設置工法⁶⁾이 開發되었으나 外部電源法에는 이것의 適用도 不可能하므로 陽極의 適正位置의 設定이 대단히 중요한 問題이다.

平板을 陰極防蝕할 때 陰極의 排流點으로 부터 半徑上의 各 測定點의 分極電位分布에 대해서는 Morgan⁷⁾, Ewing-Hutchinson⁸⁾ 등의 研究가 있고, 그 半徑上의 電流密度分布에 대해서는 Nelson⁹⁾, Kasper¹⁰⁾, Wilson¹¹⁾ 등의 研究가 있다. 이들의 研究에서 Morgan은 電位分布式을 各部의 電流密度가 一定하다고 假定하여서, Ewing-Hutchinson은 分極電位式을 分極이 陽極부터의 거리에 反比例한다고 假定해서 求하고 있다. 또 Nelson은 電流密度分布式을 陽極과 被測定點 間의 回路抵抗이 그 사이의 距離와 防蝕環境의 比抵抗의 函數로 보고 陽極과 陰極部의 各 電位를 實測해서 計算하고 있으며, Kasper 와 Wilson은 同一하게 陽極의 位置까지 고려해서 測定點의 電流密度가 그 距離의 3제곱에 反比例한다고 假定해서 電流密度의 分布式을 求하고 있다. 特히 Wilson은 最小防蝕電流로 防蝕할 수 있는 陽極의 適正位置까지 求하고 있다. 그러나 所要防蝕電流密度가 最小로 되는 條件이 所要防蝕電力이 最小로 되는 條件이라고 斷定할 수가 없다.

平板을 陰極防蝕할 때 被防蝕體 各部의 電位와 電流密度는 陽極과 排流點 間의 距離, 排流點에서 被測定點까지의 距離, 被防蝕體의 金屬抵抗, 環境의 比抵抗 등 여러가지 因子에 따라 變하고 被防蝕體 各部의 電流密度의 測定도 대단히 어렵다.

本研究는 地中이나 水中의 平板防蝕을 위한 基礎研究로서, 圓鋼板의 試驗片을 使用하여 各部의 分極電位를 排流點에서 測定點까지의 距離, 平板의 두께와 比抵抗 및 平板의 表面抵抗의 函數로 假定하여 理論式을 求하였다. 그리고 이 理論值가 實際 分極電位와 같도록 平板의 表面抵抗을 排流點에서 測定點까지의 距離, 陽極과 排流點까지의 距離, 平均電流密度의 函數로 假定하여 實驗的으로 求하였다. 또 防蝕에 필요한 電源裝置의 電壓 및 電力 등에 미치는 陽極設置位置의 影響을 理論的인 面과 實驗的인 面에서 調査하고 이를 基準으로 經濟的인 防蝕條件을 考察하였다.

그러므로 本研究는 大型水槽의 內面이나 油槽의 底板 등을 外部電源法에 依해 經濟的으로 防蝕할

때 陽極의 適正位置와 外部電源의 所要容量을 決定하는데 利用할 수 있을 것이다.

2. 實驗裝置와 實驗方法

2.1 實驗裝置

本研究의 實驗裝置는 Fig.1과 같이 配置하였다. 즉, 試驗片을 試驗水槽와 絶緣되게 安置시키고, 不溶性陽極은 試驗片 中央点의 上方에서 높이 만을 調節할 수 있도록 固定하였고, 基準電極은 試驗片의 直徑方向으로 움직일 수 있도록 設置한 뒤에 電源裝置와 電位差計를 各各 配線하였다.

이 實驗裝置의 詳細는 다음과 같다.

1) 試驗片(Fig. 2 參照)

試驗片은 直徑 105cm, 두께 0.4cm의 構造用炭素鋼(KS D 3566 SPS 30) 圓板을 使用하여 와이어 브러쉬와 샌드페이퍼로 녹을 除去하고 아세톤으로 脫脂하였다. 그리고 有效作用面積이 $\pi/4 \times 100^2 \text{ cm}^2 (0.7854\text{m}^2)$ 가 되도록 露出하고 그외의 表面과 全裏面은 排流端線과 測定用端線을 붙인 후 ZRP (Zinc Rich Primer)를 1회, 에폭시 타알도르를 4회 칠하여 絶緣시켰다.

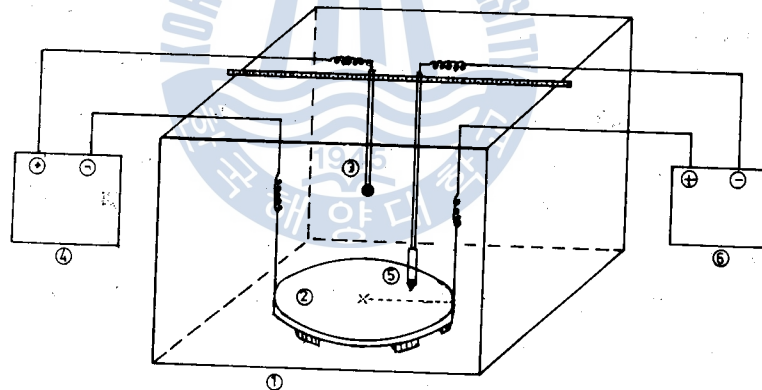


Fig.1 Experimental equipment

- | | |
|----------------------------|-------------------------|
| ① Water tank | ② Test piece |
| ③ Pt insoluble electrode | ④ Electric power source |
| ⑤ Reference electrode(SCE) | ⑥ Potentiometer |

2) 測定機器

(1) 電位差計 : VTVM(Vacuum Tube Voltmeter) KYORITSU K 142

(2) 電源裝置 : 直流定電壓裝置

45V × 1A 容量 : 韓國海洋大學 製作

V-A meter : HINOKI 5L 64 tester

(3) 不溶性陽極 : 백금電極(直徑 1cm 球型)

백금 : 99.5% 금

(4) 基準電極 : 飽和 칼로멜電極

Type: Corning cat. No. 47610900

2.2 實驗用水의 質

이 實驗用水는 清水에 海水를 넣어서 調質하였으며 그 質은 Table 1 과 같고, 實驗中의 水溫은 20.3~24.0°C의 範圍였다.

Table 1. Qualities of 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 |
|------------------|-----|--|--|---------------------------------|--------------------------------|
| 24 | 6.4 | 62 | 24 | 113.6 | 1,920 |

2.3 實驗方法

이 實驗은 試驗片을 水槽에 浸漬하고 2週日間은 8時間만 電流密度 100 mA/m²로 陰極防蝕하고 그 외의 時間은 無防蝕狀態로 放置해 품으로서 試驗片을 安定化시켰다. 그리고 이 환경에서 더욱 安定되도록 3週日間 放置한 後에 通電試驗을 시작하였다. 이때의 試驗片의 自然電位는 -690 mV(SCE)였다.

試驗片 表面의 分極電位는 外部電源에서 防蝕電流를 10分間 通電한 後에 測定하였으며, 다음 測定時까지 自然電位로 復極되도록 약 50분씩 斷電해서 기다렸다.

試驗片의 分極電位는 不溶性陽極의 位置를 試驗片 中心에서 높이 $H=rh$ (r : 시험편의 半徑)를 5, 10, 20, 30 및 50cm의 各 條件下에서, 또 外部로 부터 印加하는 電流密度를 50, 75, 100, 125 및 150 mA/m²로 바뀌가면서 分極시키고, 分極電位는 各 경우마다 中心에서 10, 20, 30, 40 및 50cm의 点에서 飽和칼로멜 電極(SCE)基準으로 測定하였다.

또 參考的인 補助實驗으로서는 同一材質의 직사각형 (150×100cm²)의 試驗片을 使用하여 長邊의 1/2點의 上方에 同一한 不溶性陽極을 設置하고 本實驗과 同一要領으로 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을 非電流函數로 假定)

Fig. 2 와 같이 陽極을 被防蝕體의 中心, 上方에 設置해서 防蝕하였을 때 그 分極電位分布狀態를 考察한다.

中心(排流點)에서 x 만큼 떨어진 點의 表面積 $2\pi x dx$ 에 流入하는 電流를 dI_r 라고 하면 그 電流密度 $I_r/2\pi x dx$ 에 의하여 일어나는 試驗片表面의 電位變化, 即 分極值(實測電位-自然電位) E_r 와 表面抵

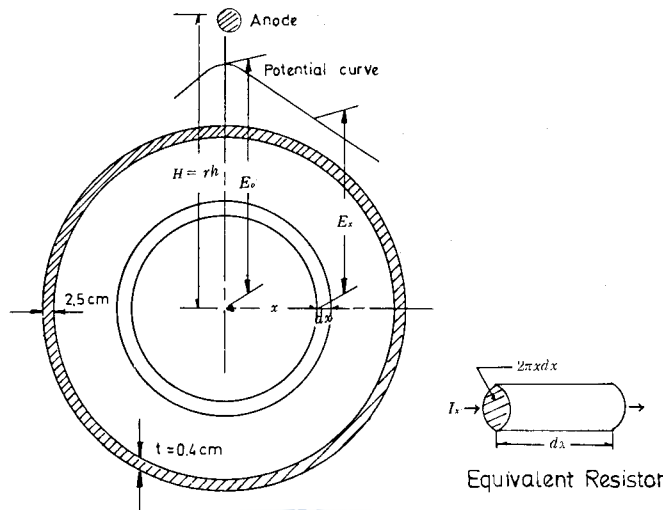


Fig. 2 Polarization potential on the steel disc protected by cathodic protection

抗 R 사이에는

$$dI_s/2\pi x dx = -E_s/R \dots\dots\dots(3-1)$$

또 半徑 x 의 圓周斷面을 통하여 流入하는 電流 I_s 는 길이 dx 사이에서 dE_s 의 電位變化를 생기게 하므로 試驗片의 比抵抗을 ρ_s 라 하면

$$dE_s = -I_s(\rho_s dx/2\pi x t) \dots\dots\dots(3-2)$$

(3-1)과 (3-2)式을 연립하면

$$x d^2 E_s/dx^2 + dE_s/dx - \rho_s/t R x E_s = 0 \dots\dots\dots(3-3)$$

$\sqrt{\rho_s/tR} = a$ (減衰係數)라고 하면 (3-3) 式은

$$x \frac{d^2 E_s}{dx^2} + \frac{dE_s}{dx} - a^2 x E_s = 0 \dots\dots\dots(3-4)$$

Uhlig¹²⁾나 Sato¹³⁾ 등과 같이 表面抵抗 R 가 電流密度 i 에 따라 변하지 않고 全試驗片表面에 대하여 一定이라고 假定하면 減衰係數 a 는 常數이므로 그 一般解는

$$E_s = C_1 I_0(ax) + C_2 K_0(ax) \dots\dots\dots(3-5)$$

여기에서 I_0, K_0 는 Bessel 函數¹⁴⁾이다.

排流点의 分極電位를 E_0 라 하고 다음의 境界條件을 適用하면

i) $x = \infty$ 에서 $dE_s/dx = 0$

ii) $x = 1$ 에서 $E_s = E_1 \doteq E_0$

(3-5) 式의 常數는 $C_1 = 0, C_2 = E_0/K_0(a)$ 가 된다.

그러므로 (3-5) 式은

$$E_s = E_0 \{K_0(ax)/K_0(a)\} \dots\dots\dots(3-6)$$

一般的인 Bessel 函數 $K_0(x)$ 는 다음과 같이 表示된다.

$$K_o(x) = -[0.577 + \ln \frac{x}{2}] I_o(x) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(m!)^2} \left(\frac{x}{2}\right)^{2m} \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{m}\right) \quad (3-7)$$

$$I_o(x) = 1 + \frac{x^2}{2^2(1!)^2} + \frac{x^4}{2^4(2!)^2} + \frac{x^6}{2^6(3!)^2} + \dots \quad (3-7)'$$

(3-6) 式을 微分하여 (3-2) 式에 代入하면

$$I_x = \frac{2\pi x t a}{\rho_s} \cdot E_o \cdot \frac{K_1(ax)}{K_o(a)} \quad (3-8)$$

$x=1$ 일 때 $I_x=I_1$ 이고 $I_1 \doteq I_o$ 이므로

$$I_o = \frac{2\pi t a E_o}{\rho_s} \cdot \frac{K_1(a)}{K_o(a)} \quad (3-9)$$

3.2 分極電位の 計算値와 實測値의 比較

試驗片의 치수가 $d=100\text{cm}$, $t=0.4\text{cm}$ 이고 炭素鋼의 比抵抗 $\rho_s=13.5 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ 程度⁽¹⁵⁾ 이므로 減衰係數 $a \text{ cm}^{-1}$ 은

$$a = \sqrt{\frac{\rho_s}{Rt}} = \sqrt{\frac{13.5 \times 10^{-6}}{0.4R}} = \frac{5.603}{\sqrt{R \times 10^3}} \quad (3-10)$$

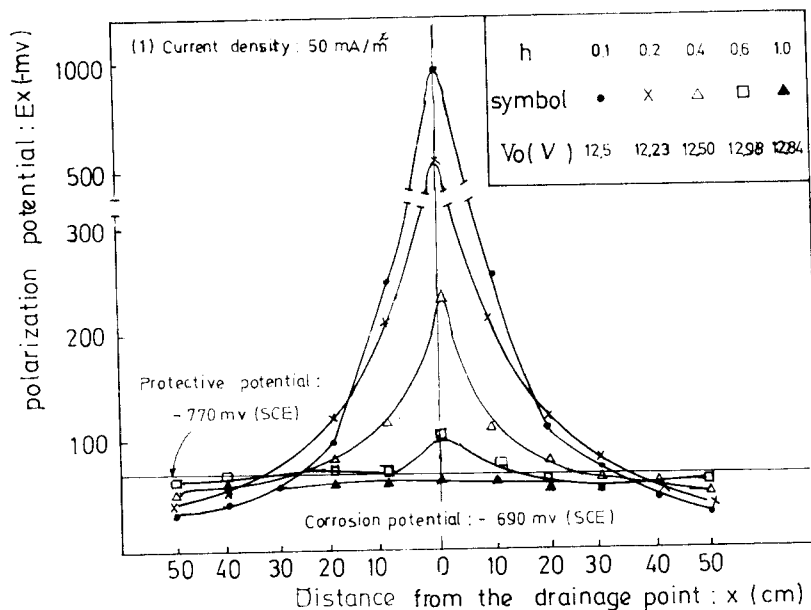
(3-10) 式을 (3-6)式에 代入하면

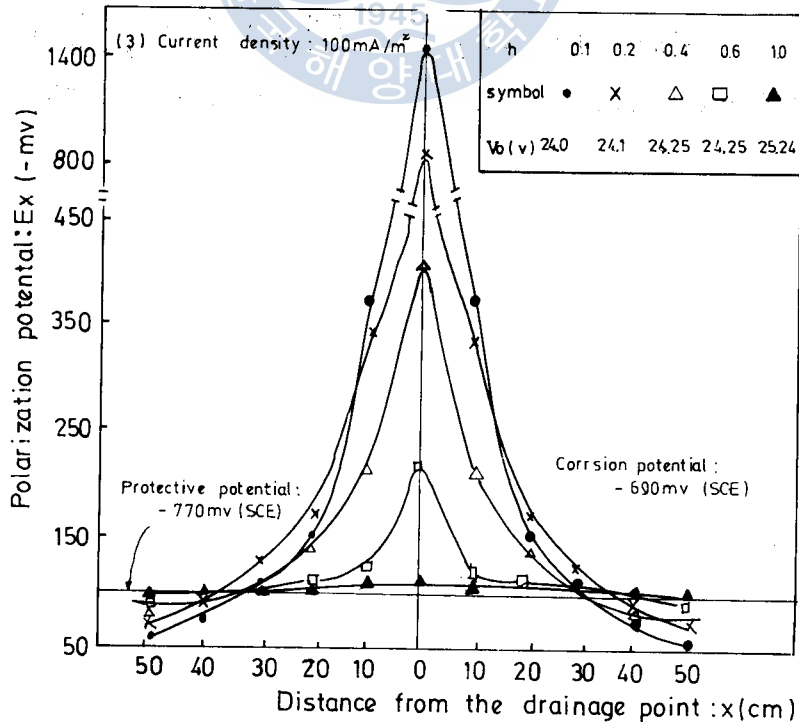
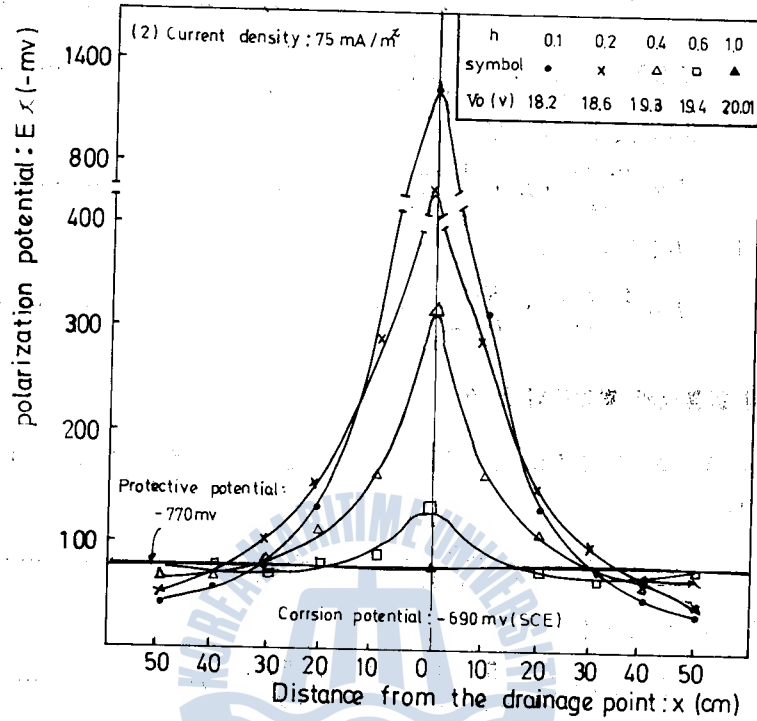
$$E_x = E_o \left\{ K_o\left(\frac{5.603}{\sqrt{R \times 10^3}} x\right) / K_o\left(\frac{5.603}{\sqrt{R \times 10^3}}\right) \right\} \quad (3-11)$$

(3-10) 式을 代入하여 R 을 구하면

$$\sqrt{R} = 0.344\pi \times 10^3 \left(\frac{E_o}{I_o}\right) \left\{ K_1\left(\frac{5.603}{\sqrt{R \times 10^3}}\right) / K_o\left(\frac{5.603}{\sqrt{R \times 10^3}}\right) \right\} \quad (3-12)$$

즉, 앞에서의 假定과 같이 表面抗抵 R 가 電流密度 i 에 따라 變하지 않고 全試驗片表面에서 一定





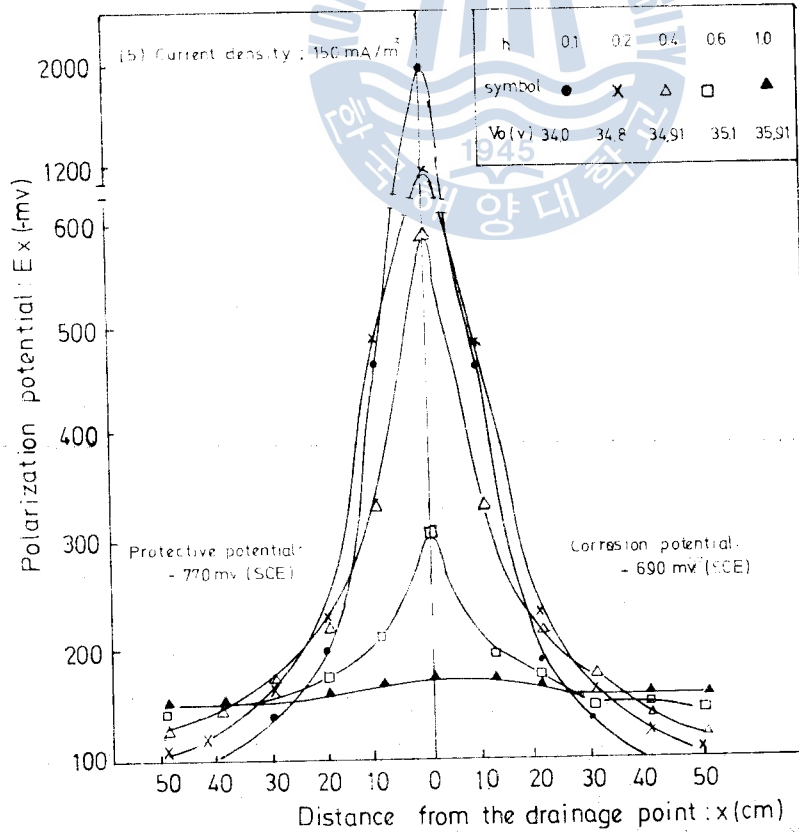
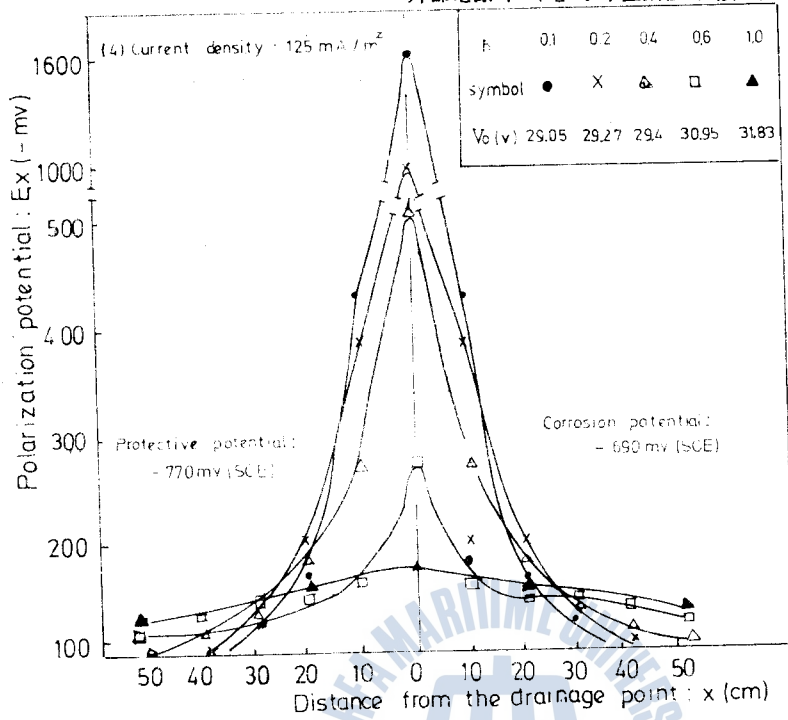


Fig. 3. Cathodic polarization potentials

일 때의 表面抵抗値는 (3-12)式으로 表示된다. 그러므로 이 때의 表面抵抗은 E_o/I_o 의 函數로 表示된다. 여기에서 $K_1(5.603/\sqrt{R} \times 10^3)/K_o(5.603/\sqrt{R} \times 10^3)$ 項은 어떠한 表面抵抗의 값에서나 거의 1이므로 (3-12)式은 다음과 같이 表示된다.

$$\sqrt{R} = 0.344\pi \times 10^3 \left(\frac{E_o}{I_o} \right) \dots \dots \dots (3-13)$$

Fig. 3은 試驗片 上方에 不溶性陽極을 設置한 경우에 實測한 分極電位分布狀態이며, 陽極의 높이率과 電流密度에 따라 分極電位の 分布狀態가 어떻게 변하는 가를 보여주고 있다.

實驗結果의 代表的인 경우로서 電流密度를 $100\text{mA}/\text{m}^2$ 로 하였을 때 陽極의 높이率에 대한 E_o/I_o 의 實測值와 \sqrt{R} 의 計算值, 그리고 實測分極電位와 (3-11)式으로 計算한 分極電位를 Table 2에 表示하였다.

Table 2. Cathode polarization potentials ($i_o=100\text{mA}/\text{m}^2$)

| $h=H/r$ | \sqrt{R} ($\Omega^{1/2}\text{cm}$) | E_o/I_o (Ω) | M. C | x | 1 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
|---------|---|---------------------------|------|-----|------|---------|---------|---------|---------|--------|
| 0.1 | 19.76×10^3 | 18.30 | M | | 1437 | 377 | 148 | 108 | 76 | 60 |
| | | | C | | 1437 | 1170.98 | 1090.91 | 1044.06 | 1010.83 | 785.05 |
| 0.2 | 11.40×10^3 | 10.56 | M | | 829 | 348 | 175 | 130 | 96 | 80 |
| | | | C | | 829 | 682.04 | 737.80 | 611.92 | 593.56 | 579.31 |
| 0.4 | 5.75×10^3 | 5.32 | M | | 418 | 221 | 150 | 112 | 95 | 90 |
| | | | C | | 518 | 347.61 | 326.42 | 314.02 | 303.23 | 298.40 |
| 0.6 | 3.16×10^3 | 2.93 | M | | 230 | 122 | 117 | 96 | 94 | 93 |
| | | | C | | 230 | 192.89 | 181.72 | 175.19 | 170.55 | 166.95 |
| 1.0 | 1.57×10^3 | 1.45 | M | | 114 | 100 | 98 | 95 | 94 | 92 |
| | | | C | | 114 | 96.47 | 91.19 | 88.10 | 85.91 | 84.21 |

M : Measured polarization potentials(-mV)

C : Calculated polarization potentials(-mV)

Table 2에서 分極電位の 實測值와 計算值의 사이에 큰 차이가 있는 것은 表面抵抗이 試驗片 各部 電流密度의 非函數, 즉 試驗片 全面에 걸쳐 一定이라고 看做한 때문이며, 特히 陽極의 높이率이 적어서 各 測定点의 電流密度差가 클 때 그 差가 큼을 알 수 있다. 그러므로 表面抵抗은 各 測定点의 電流密度에 따라 변하는 것으로 보고 이 測定点의 電流密度는 陽極의 높이率과 排流点에서 測定点까지의 거리의 函數로 다루어져야 한다. 따라서 任意点의 分極電位 E_x 는 一定平均電流密度 i_o 에서 表面抵抗 R 을 陽極의 높이率 h 와 排流点에서 測定点까지의 거리 x 의 函數로, 排流点의 分極電位 E_o 를 一定平均電流密度 i_o 와 陽極의 높이率 h 의 函數로 취급해야 한다.

4. 分極電位の 計算値 및 이를 實測値와 同一하게 하는 條件

(3-11) 式의 $E_s = E_0 \left\{ K_0 \left(\frac{5.603}{\sqrt{R} \times 10^3} x \right) / K_0 \left(\frac{5.603}{\sqrt{R} \times 10^3} \right) \right\}$ 에서 計算되는 分極電位를 그 實測値와 同一하게 하기 위해서는 表面抵抗 R 이 陽極의 높이率 h 와 排流點에서 測定點까지의 距離 x 의 函數로 表示되어야 하고, 排流點에서의 分極電位 E_0 가 一定平均電流密度 i_0 와 陽極의 높이率 h 의 函數로 表示되어야 한다.

4.1 表面抵抗의 實驗式

(3-11) 式을 變형하면

$$K_0 \left(\frac{5.603}{\sqrt{R} \times 10^3} x \right) / K_0 \left(\frac{5.603}{\sqrt{R} \times 10^3} \right) = E_s / E_0 \quad \dots \dots \dots (4-1)$$

(4-1) 式에서 R 은 一定한 i_0 와 h 下에서 E_0 와 E_s 의 實測値를 代入하여 附錄 I 과 같이 計算하고, 다시 이 R 와 주어진 h 와의 關係를 求하면 一定한 i_0 에서의 R 의 一般式이 求해진다.

代表的인 경우로서 $i_0 = 100 \text{mA/m}^2$ 일 때 (4-1) 式에서 E_0 와 E_s 에 實測値를 代入하여 各 h 下에서의 R 을 求하고 R 와 x 의 關係를 圖示하면 Fig. 4 와 같이 直線的으로 된다.

그러므로 그 一般式은

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

또 (4-2) 式의 a 와 b 는 주어진 h 에 대하여 實測値가 Fig. 5 와 같이 直線的이므로 (4-2) 式은

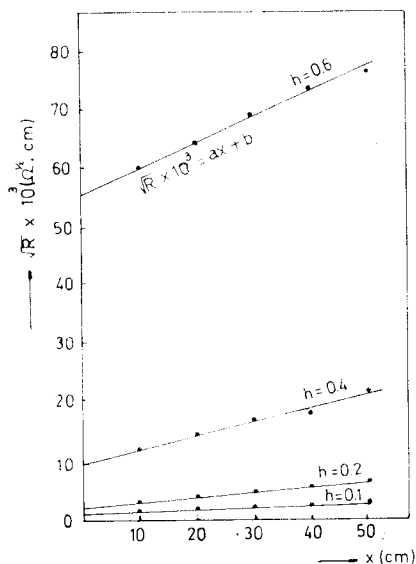


Fig. 4 Relations of R to x

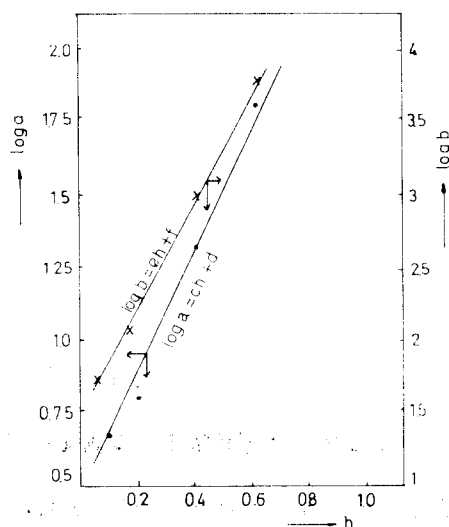


Fig. 5 Relations of a and b to h

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

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

$$\sqrt{R} \times 10^3 = 10^{2.7698A+0.238} x + 10^{3.906A+1.4} \dots (4-4)$$

4.2 排流點의 分極電位의 實驗式

一定한 陽極높이率 h 에 대한 電流密度 i_o 와 排流點에 서의 分極電位 E_o 의 關係는 實測值(Fig.3 參照)에 의 하여 Fig.6 과 같이 直線的이므로

$$E_o = ki_o + q \dots \dots \dots (4-5)$$

(4-5)式的 k 와 q 는 h 에 대하여 實測值가 Fig.7 과 같은 關係에 있으므로 이들 값을 最小自乘法에 의 하여 구하면 (附錄 II 參照) 排流點의 分極電位 E_o 는

$$E_o = - \left\{ 9.708 \log(50h) + 16.731 \right\} i_o + 10^{3.3 \cdot 1412} - 19.0 \dots \dots \dots (4-6)$$

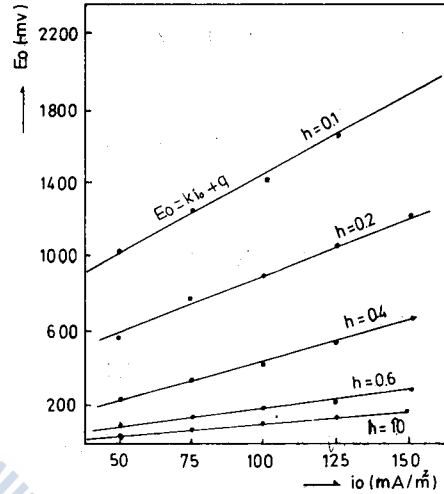


Fig.6 Relations of h and i_o to E_o .

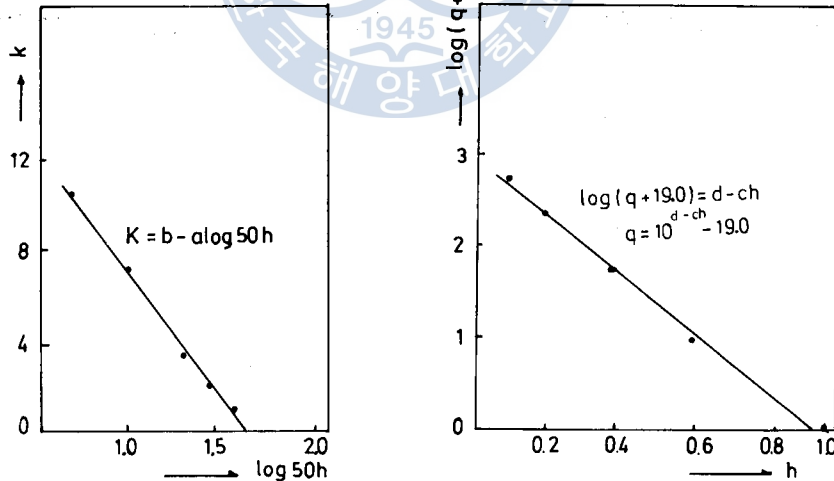


Fig.7 Relations of h to k and q

4.3 分極電位의 補正計算值와 實測值의 比較

分極電位計算值 E_o 는 (3-11)式에서 表面抵抗 $\sqrt{R} \times 10^3$ 이 (4-4)式으로, 排流點의 分極電位 E_o 가 (4-6)式으로 表示될 때 實測值와 近似的으로 같게 될 것이다. 이 分極電位를 補正計算值라 하자.

附錄 III의 Table A는 本實驗의 分極電位의 測定值와 그 補正計算值의 比較이고, Table B는 그

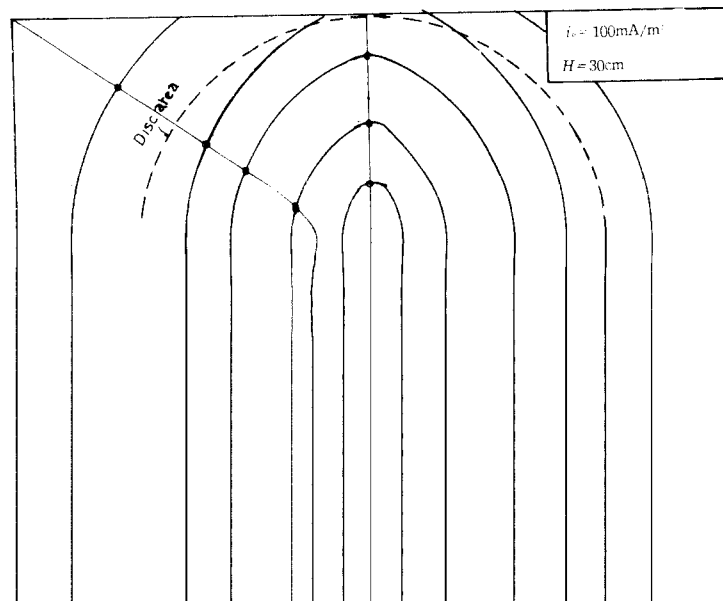
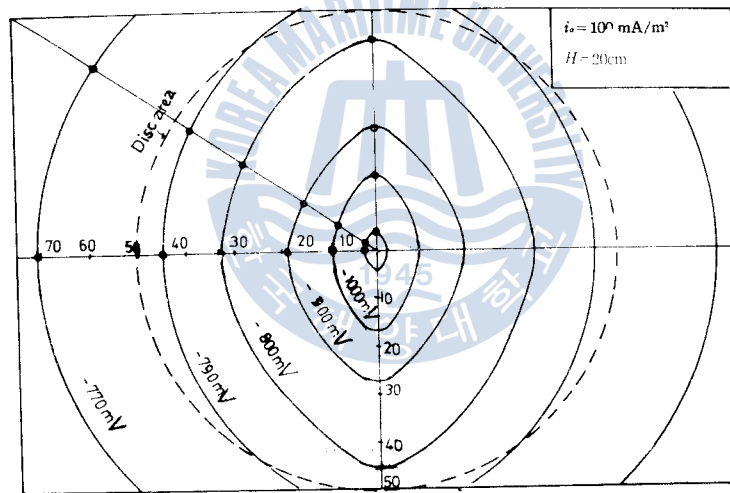
比率를 나타낸 것이다. Table B에 의하면 약간을 特異한 點을 제외하고는 $\pm 10\%$ 以內的 差異를 나타내고 있고, 또 參考의인 補助實驗에서도 Table D에 表示한 바와같이 $\pm 12\%$ 의 精度를 나타내고 있다.

Fig. 8은 이 補助實驗에서 各 測定點의 分極電位를 等電位線으로 나타낸 것이다. 이것에 의하면 직사각형 平板은 長邊을 直徑으로 하는 圓板으로 看做하여 防蝕하여야 함을 알 수 있다, 따라서 圓鋼板面의 陰分極電位 計算의 一般式은 다음 세 式으로 要約될 수 있다.

$$(3-11) \quad E_x = E_o \left\{ K_o \left(\frac{5.603}{\sqrt{R} \times 10^3} x \right) / K_o \left(\frac{5.603}{\sqrt{R} \times 10^3} \right) \right\}$$

$$(4-4) \quad \sqrt{R} \times 10^3 = 10^{3.7698A + 0.238x} + 10^{3.906A + 1.4}$$

$$(4-6) \quad E_o = \left\{ -9.708 \log(50h) + 16.731 \right\} i_o + 10^{3-3.141h} - 19.0$$



比率을 나타낸 것이다. Table B에 의하면 약간을 特異한 點을 제외하고는 $\pm 10\%$ 以內의 差異를 나타내고 있고, 또 參考的인 補助實驗에서도 Table D에 表示한 바와같이 $\pm 12\%$ 의 精度를 나타내고 있다.

Fig. 8은 이 補助實驗에서 各 測定點의 分極電位를 等電位線으로 나타낸 것이다. 이것에 의하면 正方形 平板은 長邊을 直徑으로 하는 圓板으로 看做하여 防蝕하여야 함을 알 수 있다,

따라서 圓鋼板面의 陰分極電位 計算의 一般式은 다음 세 式으로 要約될 수 있다.

$$(3-11) \quad E_x = E_o \left\{ K_o \left(\frac{5.603}{\sqrt{R} \times 10^3} x \right) / K_o \left(\frac{5.603}{\sqrt{R} \times 10^3} \right) \right\}$$

$$(4-4) \quad \sqrt{R} \times 10^3 = 10^{2.7698A+0.238} x + 10^{3.906A+1.4}$$

$$(4-6) \quad E_o = \left\{ -9.708 \log(50h) + 16.731 \right\} i_o + 10^{3-3.141A} - 19.0$$

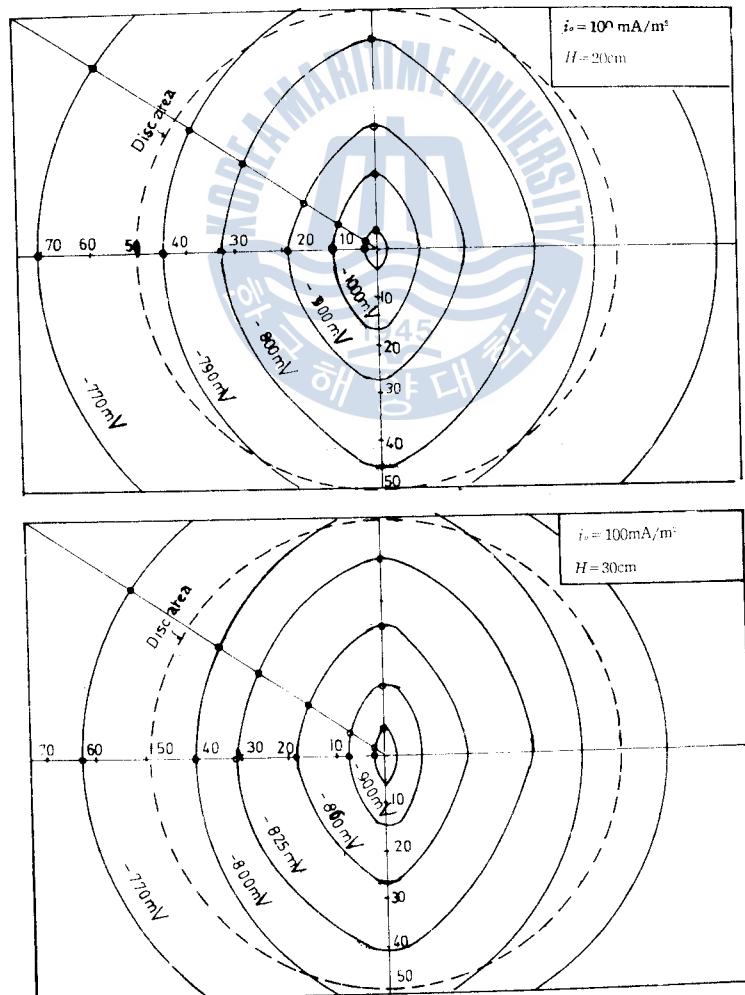


Fig. 8 Iso-potential line of secondary experiment

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 所要電力의 實驗式

鐵鋼의 防蝕에 不溶性陽極으로 백금 電極을 使用할 때 Pt-Fe 間의 理論的 水 分解電壓이 1.85V¹⁶⁾이므로 全防蝕電流 I_o (mA)를 흘리기 위한 所要電壓 V_o (V)는

$$V_o = I_o R_{\rho h} \times 10^{-3} + 1.85 \dots \dots \dots (5-1)$$

全防蝕回路抵抗 $R_{\rho h}$ (Ω)는 (5-1)式에서

$$R_{\rho h} = \{(V_o - 1.85) / I_o\} \times 10^3 \dots \dots \dots (5-2)$$

本實驗에서 不溶性陽極의 높이 H (rh)와 全防蝕電流 $I_o (= \frac{\pi}{4} d^2 i_o \times 10^{-4})$ 에 대하여 所要電壓 V_o 는 Table 3 과 같으므로 이를 (5-2)式에 代入하여 全防蝕回路抵抗 $R_{\rho h}$ 와 그 平均値를 구하면 Table 4와 같이 된다.

Table 3. Relations of V_o to H and I_o

| $I_o \backslash H$ | 39.25 | 58.91 | 78.54 | 98.18 | 117.81 |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 5 | 12.05V | 18.20V | 24.00V | 29.05V | 34.00V |
| 10 | 12.23 | 18.60 | 24.10 | 29.27 | 34.80 |
| 20 | 12.50 | 19.30 | 24.25 | 29.43 | 34.91 |
| 30 | 12.98 | 19.42 | 24.35 | 30.95 | 35.10 |
| 50 | 13.84 | 20.01 | 25.24 | 31.83 | 35.95 |

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

| $I_o \backslash H$ | 39.25 | 58.91 | 78.54 | 98.18 | 117.81 | mean $R_{\rho H}$ |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| 5 | 259.87 | 278.54 | 282.02 | 277.90 | 272.90 | 273.87 |
| 10 | 264.46 | 284.33 | 283.30 | 279.28 | 279.69 | 278.21 |
| 20 | 271.34 | 296.21 | 285.20 | 280.91 | 280.62 | 282.86 |
| 30 | 283.57 | 298.25 | 286.48 | 296.39 | 282.23 | 289.38 |
| 50 | 305.48 | 308.10 | 297.81 | 305.36 | 289.45 | 301.24 |

Fig. 9은 Table 4를 圖示한 것이다. Fig. 9에 의하면 $R_{\rho H}$ 는 rh , 즉 H 에 比例하므로 24°C에 있어서 水의 比抵抗을 $\rho_{24}(\Omega\text{-cm})$ 라 하면

$$R_{\rho h} = \{A + B(rh)\} \rho_{24} = A\rho_{24} + B\rho_{24}(rh) = C + D(rh) \dots \dots \dots (5-3)$$

(5-3)式의 C, D 를 Table 4의 數値에 의하여 最小自乘法으로 決定하면 $C = 276.7672, D = 0.4392$ 이

다. 또 $\rho_{21} = 1920 \Omega\text{-cm}$ 이므로

$$A = C/\rho_{21} = 276.7672/1920 = 0.1441 \dots (5-4)$$

$$B = D/\rho_{21} = 0.4392/1920 = 2.2875 \times 10^{-4} \dots (5-5)$$

(5-4), (5-5)式을 (5-3)式에 代入하면 防蝕回路의 全抵抗 $R_{\rho H}$ 는 任意溫度下의 물의 比抵抗 $\rho(\Omega\text{-cm})$ 라 하면

$$R_{\rho H} = \{0.1441 + 2.2875 \times 10^{-4}(rh)\} \rho [\Omega] \dots (5-6)$$

(5-6)式을 (5-1)式에 代入하면 所要電壓 V_o 는

$$V_o = I_o \{0.1441 + 2.2875 \times 10^{-4}(rh)\}$$

$$\rho \times 10^{-3} + 1.85 \dots (5-7)$$

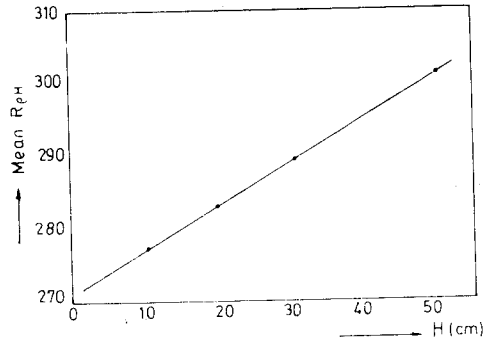


Fig. 9 Relation of mean $R_{\rho H}$ to H

(5-7) 式으로 計算되는 값과 實測值에 대한 比率은 Table C(附錄 III 參照)와 같으며, (5-7) 式의 所要電壓은 陽極높이率 h 나 全防蝕電流 I_o 에 관계없이 $\pm 6\%$ 以內의 差異를 갖는다. 또한 補助實驗에서의 實測值에 대한 計算值의 比率도 Table E에 나타낸 바와같이 역시 陽極의 높이率이나 全防蝕電流 I_o 에 關係없이 $+8\%$ 以內의 精度를 나타낸다.

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

$$P = V_o I_o = I_o^2 \{0.1441 + 2.2875 \times 10^{-4}(rh)\} \rho \times 10^{-3} + 1.85 I_o \dots (5-8)$$

(5-7) 式이나 (5-8) 式에서 全防蝕電流 I_o 는 所要防蝕電流密度 i_o 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. 即

$$I_o = \pi/4 d^2 i_o \times 10^{-4} \dots (5-9)$$

5.3 最適防蝕條件

(3-11) 式에서 $x=r$ 일 때 $E_x = E_r$ (防蝕에 所要되는 分極值)를 代入하면

$$E_r = E_o \left\{ K_o \left(\frac{5.603}{\sqrt{R} \times 10^3} r \right) / K_o \left(\frac{5.603}{\sqrt{R} \times 10^3} \right) \right\} \dots (5-10)$$

(4-4) 式에서 $x=r$ 일 때

$$\sqrt{R} \times 10^3 = 10^{2.7698A + 0.238 \cdot r + 10^{3.906A + 1.4}} \dots (5-11)$$

(4-6) 式은 그대로

$$E_o = \{-9.708 \log(50h) + 16.731\} i_o + 10^{3-3.141A} - 19.0 \dots (5-12)$$

(5-10)~(5-12)에서 $i_o = f_1(h)$ 를 求하고 (5-9) 式에서 I_o 를 求한 다음에 (5-8) 式에서 $P = f_2(h, \rho)$ 를 求한다. 그 다음에 $\partial P / \partial h = 0$ 의 最小條件에서 $h = f_3(\rho)$ 를 求하면 最小電力으로 防蝕할 수 있는 陽極의 位置 h 가 求해진다. 이 때의 V_o 와 I_o 를 求하면 그것이 電源裝置에 要求되는 最小容量이 될 것이다.

그러나 計算이 대단히 복잡하므로 各 防蝕與件을 代入하여 數值計算하는 것이 편리하다. 한 例로 서 本實驗에 使用되었던 試驗片을 생각하면 $r=50$ cm, $t=0.4$ cm, $\rho_s=13.5 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ 의 試驗片이 防蝕되기 위해서는 鐵鋼의 防蝕電位가 -770 mV SCE¹¹⁾이므로 試驗片의 끝 부분이 다음과 같이 80 mV 陰分極되어야 한다.

$$E_r = E_{s_0} = -770 - (-690) = -80 \text{ mV} \dots\dots\dots (5-13)$$

防蝕電力 P 의 計算式은 (5-8)과 (5-9) 式에서

$$\begin{aligned} P &= \left(\frac{\pi}{4} d^2 i_o \times 10^{-4}\right)^2 \{0.1441 + 2.2875 \times 10^{-4} (rh)\} \rho \times 10^{-3} \\ &+ 1.85 \times \frac{\pi}{4} d^2 i_o \times 10^{-4} \\ &= (88.7 + 7.0455h) i_o^2 \rho \times 10^{-6} + 1.4523 i_o \dots\dots\dots (5-14) \end{aligned}$$

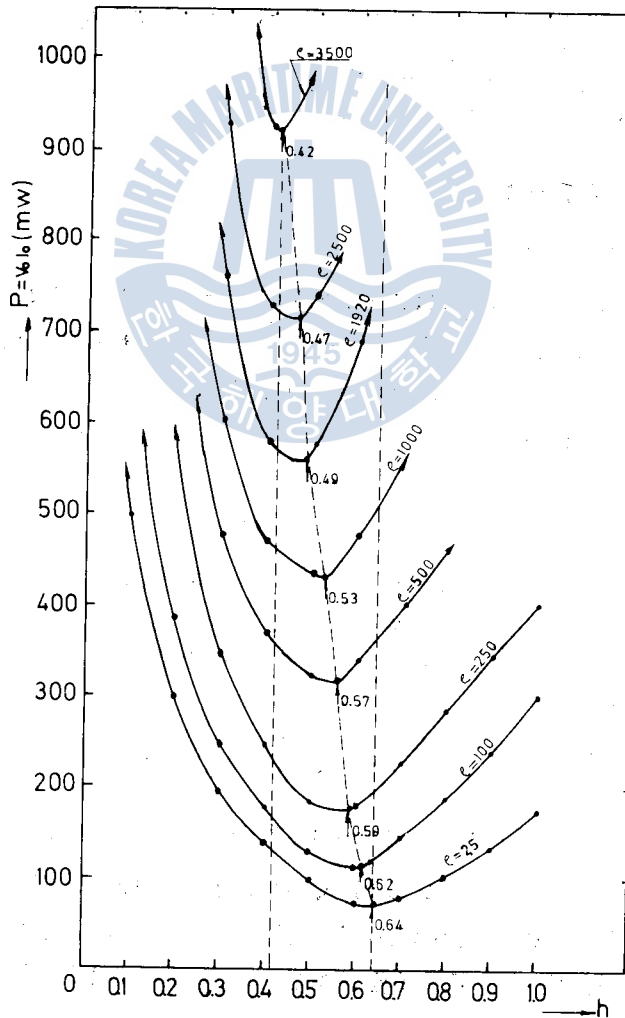


Fig. 10 Relations ρ and h to P (ρ, h)

그리고 試驗片 끝이 防蝕電位로 分極되게 하는 電流密度는 (5-10) 式에 (5-12)와 (5-13)式을 代入하면

$$i_o = \frac{80/\beta + 19.0 - 10^{3.998-3k}}{16.093 - 9.162 \log(50h)} \dots \dots \dots (5-15)$$

단, β 는 다음 式과 같고, 附錄 I의 ④式의 변형에 의하여

$$\beta = K_o \left(\frac{5.603 \times 50}{\sqrt{R} \times 10^3} \right) / K_o \left(\frac{5.603}{\sqrt{R} \times 10^3} \right) = 1 + \frac{3.912}{\ln \frac{4.986}{\sqrt{R} \times 10^3}} \dots \dots \dots (5-16)$$

\sqrt{R} 은 $x=50$ cm에서

$$\sqrt{R} \times 10^3 = 50 \times 10^{2.7698k+0.238} + 10^{3.906k+1.4} \dots \dots \dots (5-17)$$

위의 條件下에서 여러가지 ρ 및 h 의 값을 代入하여 $P(\rho, h)$ 을 電算하고, 一定 ρ 下에서의 $P(\rho, h)$ 와 h 의 關係를 圖示하면 Fig. 10과 같다. Fig. 10에 의하면 물의 比抵抗이 큰 경우가 작은 경우보다 陽極의 設置位置의 適正問題가 防蝕電力에 미치는 영향이 더욱 크며, 特히 水中鋼帶¹⁸⁾나 鋼管¹⁹⁾의 경우 보다 영향이 훨씬 크다. 그리고 水中圓鋼板表面을 最小電力으로 防蝕할 수 있는 陽極의 높이率은 물의 比抵抗에 따라서 0.42~0.64의 범위이다. 또 最小電流로 防蝕할 수 있는 條件이 반드시 最小電力으로 防蝕할 수 있는 條件이 아니나 本實驗片에 Wilson 式을 適用하면 最小電流密度로 防蝕할 수 있는 陽極의 높이率은 0.71로서, 물의 比抵抗이 25 Ω -cm(海水) 以下일 경우에 本實驗結果와 거의 一致한다.

6. 結 論

外部電源에 의한 水中圓鋼板의 陰極防蝕에 관한 研究에서 다음의 結論을 내릴 수 있다.

1) 圓鋼板面의 陰分極電位 計算의 一般式은 다음과 같다.

$$E_s = E_o \left\{ K_o \left(\sqrt{\frac{\rho_s}{Rt}} x \right) / K_o \left(\sqrt{\frac{\rho_s}{Rt}} \right) \right\}$$

단,

$$E_o = \{-9708 \log(50h) + 16.731\} i_o + 10^{3.141k} - 19.0$$

$$\sqrt{R} \times 10^3 = 2.7698k + 0.238 x + 10^{3.906k+1.4}$$

2) 陰極防蝕用 電源裝置의 所要電壓은 다음 式으로 求할 수 있다.

$$V_o = I_o \{0.1441 + 2.2875 \times 10^{-4}(rh)\} \rho \times 10^{-3} + 1.85$$

단,

$$I_o = \frac{\pi}{4} d^2 i_o \times 10^{-4}$$

3) 圓鋼板面의 所要防蝕電力은 다음 式으로 求할 수 있다.

$$P = V_o I_o = I_o^2 \{0.1441 + 2.2875 \times 10^{-4}(rh)\} \rho \times 10^{-3} + 1.85 I_o$$

4) 陽極의 設置位置의 適正問題가 防蝕電力에 미치는 영향은 물의 比抵抗이 클수록 그 영향이 크고, 最小電力으로 防蝕할 수 있는 陽極의 높이率의 범위는 물의 比抵抗에 따라서 0.42~0.64이다.

參 考 文 獻

- 1) G. L. Daly: 陰極防蝕の 經濟的 考察, 防蝕技術, Vol. 15, No. 8, p. 372 (1963)
- 2) H. H. Uhlig: Corrosion and Corrosion Control, John Wiley, New York, p. 195 (1965)
- 3) 田大熙: 腐蝕과 防蝕의 管理, 太和出版社, 釜山, p. 284 (1979)
- 4) 中川雅央: 電氣防蝕法の 實際, 地人書館, 東京, pp. 133~134 (1967)
- 5) R. Pope: Uhlig's Corrosion Handbook, John Wiley, New York, p. 942 (1963)
- 6) 筧建彦: 金屬, Vol. 45, No. 8, アクネ, 東京, p. 19 (1975)
- 7) J. H. Morgan: Cathodic Protection, Macmillain, New York p. 28 (1959)
- 8) Scott p. Ewing · J. S. Hutchison: Cathodic Protection Applied to Tank Bottoms, Corrosion, Vol. 9, No. 7, p. 221~224 (1953)
- 9) E. E. Nelson: A Study of Current Distribution in Cathodic Protection, Corrosion, Vol. 13, No. 3, p. 45~50 (1957)
- 10) C. Kasper: The Theory of the Potential and the Technical Practice of Electrodeposition, Electrochem., Soc., 77, p. 353~365 (1940)
- 11) L. Wilson: The Distribution of Current Densities at the Cathodic Surfaces of Cathodic Protection System, Anti-Corrosion, February, p. 23~26 (1970)
- 12) 前掲書(2): p. 352
- 13) 佐藤・山内: 復水器管の 分極特性について, 防蝕技術, Vol. 25, No. 10, p. 611~617 (1976)
- 14) 林桂一: 高等函數表, 岩波書店, 東京, p. 155 (1971)
- 15) 日本金屬學會編: 金屬データブック, 丸善, 東京, p. 105 (1974)
- 16) 外島忍: 基礎電氣化學, 朝倉書店, 東京, p. 333 (1965)
- 17) 田大熙: 金屬의 防蝕規定・防蝕基準 및 그 關聯規格, 韓國腐蝕學會誌, Vol. 9, No. 1, p. 21~22 (1980)
- 18) 田大熙・閔丙彦: 外部電源에 의한 水中鋼帶의 陰極防蝕에 관한 研究, 韓國海洋大學論文集, Vol. 13, p. 124 (1978)
- 19) 田大熙・金垣寧: 外部電源에 의한 水中鋼管의 陰極防蝕에 관한 研究, 韓國腐蝕學會誌, Vol. 8, No. 1, p. 16 (1979)

附錄 I 表面抵抗의 實驗式

(3-6)式을 변형하면

$$E_x/E_o = K_o(ax)/K_o(a) \dots\dots\dots ①$$

(3-7)式을 다시 쓰면

$$\left. \begin{aligned} K_o(x) &= -(0.577 + \ln \frac{x}{2}) I_o(x) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(m!)^2} \left(\frac{x}{2}\right)^{2m} \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{m}\right) \\ I_o(x) &= 1 + \frac{x^2}{2^2(1!)^2} + \frac{x^4}{2^4(2!)^2} + \frac{x^6}{2^6(3!)^2} + \dots \end{aligned} \right\} \dots\dots ②$$

① 式에서 一定 i_o 와 一定 h 下의 E_o 와 E_x 에 測定値를 代入한 후 右側의 Bessel 函數의 比에서 任意의 a 값을 代入하면 그 比가 E_x/E_o 의 값과 一致되는 a 의 값은 0.01 以下의 작은 값이고 $I_o(a) \doteq 1$ 이므로 ③式으로 計算해도 오차는 거의 없다.

즉,
$$K_o(x) = -(0.577 + \ln \frac{x}{2}) \dots\dots\dots ③$$

③ 式에 a 및 ax 를 x 대신 代入하여 ① 式에 적용하면

$$\frac{E_x}{E_o} = \frac{-(0.577 + \ln \frac{ax}{2})}{-(0.577 + \ln \frac{a}{2})} = 1 + \frac{\ln x}{\ln \frac{1.78a}{2}} \dots\dots\dots ④$$

④ 式을 변형하면

$$\ln a = \frac{\ln x}{(E_x/E_o) - 1} + 0.116 \dots\dots\dots ⑤$$

(3-10) 式에서 $a = 5.603/\sqrt{R} \times 10^3$ 이므로 ⑤ 式에 代入하면

$$\ln(5.603/\sqrt{R} \times 10^3) = \frac{\ln x}{E_x/E_o - 1} + 0.116 \dots\dots\dots ⑥$$

⑥ 式에 E_o 와 E_x 의 各 測定値를 代入하여 R 을 구하고 다시 이 R 과 주어진 h 와의 關係를 구하면 一定 i_o 下의 R 의 一般式이 求해진다.

Fig. 4는 이 要領에 의하여 各 h 下의 x 와 $\sqrt{R} \times 10^3$ 의 關係를 구하여 圖示한 것이다. 이 그림에서 x 와 $\sqrt{R} \times 10^3$ 의 關係는 直線的이므로 다음의 一般式이 成立한다.

$$\sqrt{R} \times 10^3 = ax + b \dots\dots\dots ⑦$$

그러므로 ⑦式에 各 h 下의 x 에 대한 $\sqrt{R} \times 10^3$ 의 計算値를 代入하여 最小自乘法으로 a, b 를 決定한다.

(1) $h=0.1$ ($H=5\text{cm}$)의 경우

$$\begin{aligned} P(\sqrt{R} \times 10^3, x) &= (10a + b - 120.02)^2 + (20a + b - 162.41)^2 \\ &+ (30a + b - 218.85)^2 + (40a + b - 263.55)^2 \\ &+ (50a + b - 307.86)^2 \dots\dots\dots ⑧ \end{aligned}$$

$$\partial P / \partial a = 0 \text{ 일 때}$$

$$550a + 15b - 3694.87 = 0 \dots\dots\dots ⑨$$

$\partial P / \partial b = 0$ 일 때

$$150a + 5b - 1072.67 = 0 \dots\dots\dots ⑩$$

⑨, ⑩을 聯立하여 풀면 $a = 4.7686$, $b = 71.476$

$$\sqrt{R} \times 10^3 = 4.7686x + 71.476 \dots\dots\dots ⑪$$

(2) $h = 0.2 (H = 10\text{cm})$ 의 경우

(1)과 같은 要領으로

$$\sqrt{R} \times 10^3 = 5.9637x + 123.733 \dots\dots\dots ⑫$$

(3) $h = 0.4 (H = 20\text{cm})$ 의 경우

$$\sqrt{R} \times 10^3 = 9.1488x + 957.64 \dots\dots\dots ⑬$$

(4) $h = 0.6 (H = 30\text{cm})$ 의 경우

$$\sqrt{R} \times 10^3 = 226.03x + 16369.7 \dots\dots\dots ⑭$$

⑪~⑭式의 a, b 를 整理하면 Table 5와 같고 이를 圖示하면 Fig. 5와 같다.

Table. 5 Relations of a and b to h

| h | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 |
|----------|--------|---------|--------|----------|
| a | 4.7686 | 5.964 | 9.1488 | 226.0 |
| b | 71.476 | 123.733 | 957.64 | 16369.27 |
| $\log a$ | 0.6784 | 0.7705 | 1.32 | 1.78 |
| $\log b$ | 1.8542 | 2.092 | 2.9812 | 3.75 |

Fig. 5에 의하면 다음의 一般式이 成立한다.

$$\log a = ch + d \dots\dots\dots ⑮$$

$$\log b = eh + f \dots\dots\dots ⑯$$

⑮, ⑯式에 Table 5의 값을 代入하여 最小自乘法으로 c 와 d 및 e 와 f 를 決定하면

$$a = 10^{2.7698h + 0.238} \dots\dots\dots ⑰$$

$$b = 10^{3.906h + 1.4} \dots\dots\dots ⑱$$

그러므로 ⑰式에 ⑱式을 代入하면 表面抵抗式은

$$\sqrt{R} \times 10^3 = 10^{2.7698h + 0.238} \cdot x + 10^{3.906h + 1.4}$$

附錄 I 排流点的 分極電位 實驗式

Fig. 6은 本實驗의 測定結果에서 i_0 와 h 에 대한 E_0 를 찾아서 圖示한 것이다. 이 그림에 의하면 各 h 下的 E_0 와 i_0 는 直線的이므로

$$E_o = ki_o + q \dots\dots\dots ①$$

그러므로 各 h 下에서 測定值을 代入하여 最小自乘法으로 k 와 q 를 구한다.

(1) $h=0.1$ ($H=5\text{cm}$) 일 때

$$P(E_o, i_o) = (50k + q - 1040)^2 + (75k + q - 1317)^2 + (100k + q - 1437)^2 + (125k + q - 1648)^2 + (150k + q - 2012)^2 \dots\dots\dots ②$$

$\partial P / \partial k = 0$ 일 때

$$2 \cdot 250k + 20q - 35733 = 0 \dots\dots\dots ③$$

$\partial P / \partial q = 0$ 일 때

$$500k + 5q - 8280 = 0 \dots\dots\dots ④$$

③, ④을 연립하여 풀면 $k=10.452$ $q=610.8$

$$\therefore E_o = 10.452i_o + 610.8 \dots\dots\dots ⑤$$

(2) $h=0.2$ ($H=10\text{cm}$) 일 때

$$E_o = 6.552i_o + 231.6 \dots\dots\dots ⑥$$

(3) $h=0.4$ ($H=20\text{cm}$) 일 때

$$E_o = 3.512i_o + 23.2 \dots\dots\dots ⑦$$

(4) $h=0.6$ ($H=30\text{cm}$) 일 때

$$E_o = 2.004i_o - 11.6 \dots\dots\dots ⑧$$

(5) $h=1.0$ ($H=50\text{cm}$) 일 때

$$E_o = 1.332i_o - 18.0 \dots\dots\dots ⑨$$

⑤~⑨式의 k, q 를 整理하면 Table 6 과 같고 이를 圖示하면 Fig. 7 과 같다. Fig. 7 에 의하면 다음의 關係가 成立한다.

$$k = -a \log(50h) + b \dots\dots\dots ⑩$$

Table 6. Relations of k and q to h

| $h(H\text{cm})$ | 0.1(5) | 0.2(10) | 0.4(20) | 0.6(30) | 1.0(50) |
|-----------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| k | 10.452 | 7.052 | 3.512 | 2.004 | 1.332 |
| q | 610.8 | 231.60 | 23.20 | -11.6 | -18.0 |
| $\log(50h)$ | 0.699 | 1.0 | 1.301 | 1.447 | 1.699 |
| $q+19.0^*$ | 629.8 | 250.6 | 52.2 | 7.4 | 1.0 |
| $\log(q+19)$ | 2.799 | 2.398 | 1.717 | 0.869 | 0 |

$$\log(q+19) = -ch + d \dots\dots\dots ⑪$$

⑩과 ⑪式에 Table 6의 값을 代入하여 最小제곱법으로 a 와 b 및 c 와 d 를 決定하면

$$k = -9.708 \log(50h) + 16.731 \dots\dots\dots ⑫$$

$$q = 10^{3-3.141h} - 19.0 \dots\dots\dots ⑬$$

⑫와 ⑬式을 ①式에 代入하면

$$E_o = \{-9.708 \log(50h) + 16.731\} i_o + 10^{3-3.141h} - 19.0$$

* q 가 負數이면 對數值가 存在하지 않으므로 q 를 正數로 만들기 위해서 $(q+19.0)$ 을 하였음.

附錄 III 附 表

Table A. The calculated potentials and measured potentials (mV) (Protected area: 0.7854 m²)

| i_o (mA/m ²) | x (cm) | h | | | | | |
|----------------------------|----------|--------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|
| | | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| 50 | 0.1 | 936.426 (1040) | 288.377 (255) | 115.351 (106) | 89.397 (75) | 63.443 (54) | 49.024 (50) |
| | 0.2 | 567.546 (580) | 216.720 (212) | 123.866 (116) | 89.459 (80) | 70.535 (63) | 60.213 (52) |
| | 0.4 | 241.200 (229) | 119.439 (115) | 80.335 (80) | 63.985 (72) | 55.454 (56) | 51.188 (46) |
| | 0.6 | 113.59 (113) | 65.427 (57) | 53.356 (60) | 45.069 (57) | 40.706 (53) | 37.799 (43) |
| | 1.0 | 60.241 (56) | 41.04 (38) | 39.312 (38) | 38.016 (38) | 35.424 (41) | 33.696 (35) |
| 75 | 0.1 | 1212.051 (1315) | 344.865 (3.5) | 137.951 (136) | 105.912 (91) | 75.853 (64) | 58.629 (55) |
| | 0.2 | 743.12 (556) | 272.993 (303) | 155.996 (146) | 112.664 (104) | 88.831 (82) | 75.629 (63) |
| | 0.4 | 343.91 (320) | 172.189 (168) | 115.815 (112) | 92.244 (90) | 79.945 (76) | 52.595 (64) |
| | 0.6 | 173.27 (159) | 96.021 (83) | 88.083 (80) | 74.402 (68) | 67.202 (60) | 67.202 (62) |
| | 1.0 | 0.071 (75) | 62.369 (60) | 58.743 (60) | 5.77 (59) | 53.83 (57) | 51.200 (55) |
| 100 | 0.1 | 1460.673 (1437) | 404.076 (377) | 161.631 (148) | 125.264 (118) | 88.897 (76) | 68.693 (60) |
| | 0.2 | 818.698 (829) | 329.220 (348) | 188.126 (175) | 135.869 (130) | 107.127 (96) | 91.450 (08) |
| | 0.4 | 426.57 (418) | 224.806 (221) | 151.209 (150) | 120.432 (112) | 104.374 (95) | 96.345 (90) |
| | 0.6 | 233.164 (230) | 133.85 (122) | 122.911 (117) | 103.737 (100) | 93.698 (96) | 87.005 (93) |
| | 1.0 | 118.489 (114) | 112.56 (98) | 107.82 (98) | 104.27 (95) | 97.100 (94) | 92.42 (93) |

| | | | | | | | |
|-----|-----|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 125 | 0.1 | 1709.301 (1648) | 461.926 (531) | 186.771 (170) | 143.197 (127) | 101.824 (86) | 78.528 (70) |
| | 0.2 | 1094.27 (1064) | 385.448 (415) | 220.256 (205) | 159.074 (133) | 125.424 (109) | 107.069 (100) |
| | 0.4 | 549.035 (541) | 277.611 (271) | 186.726 (175) | 148.72 (140) | 128.891 (120) | 119.976 (110) |
| | 0.6 | 292.919 (273) | 171.70 (160) | 157.538 (155) | 133.070 (147) | 120.192 (140) | 116.77 (130) |
| | 1.0 | 134.31 (10) | 127.59 (119) | 122.22 (117) | 118.192 (110) | 110.13 (106) | 104.76 (108) |
| 150 | 0.1 | 1959.926 (2012) | 519.765 (472) | 207.906 (189) | 161.127 (146) | 114.348 (98) | 88.360 (75) |
| | 0.2 | 1269.84 (1214) | 441.674 (484) | 252.385 (235) | 182.289 (165) | 143.719 (128) | 122.867 (115) |
| | 0.4 | 651.56 (647) | 330.327 (335) | 222.184 (230) | 176.961 (170) | 153.369 (140) | 141.569 (130) |
| | 0.6 | 352.694 (323) | 209.552 (213) | 192.26 (213) | 162.403 (199) | 146.687 (160) | 136.289 (143) |
| | 1.0 | 182.13 (178) | 173.000 (170) | 165.72 (167) | 160.26 (163) | 149.534 (160) | 142.050 (154) |

() : Measured potentials

Table B. $\frac{\text{Calculated Potential}}{\text{Measured Potential}} \times 100 (\%)$ (Protected area: 0.7854m²)

| i_o (mA/m ²) | x (cm) h | x (cm) | | | | | |
|----------------------------|-----------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| 50 | 0.1 | 92.6 | 119.2 | 108.5 | 118.6 | 117.0 | 98 |
| | 0.2 | 97.7 | 103.2 | 106.8 | 111.8 | 111.9 | 115.7 |
| | 0.4 | 104.1 | 103.9 | 100.4 | 88.9 | 99.1 | 111.2 |
| | 0.6 | 100.3 | 109.0 | 93.6 | 84.0 | 90.5 | 87.9 |
| | 1.0 | 107.4 | 108.0 | 108.0 | 103.4 | 100.0 | 86.4 |
| 75 | 0.1 | 92.0 | 113.8 | 101.4 | 116.4 | 116.6 | 106.6 |
| | 0.2 | 98.2 | 90.0 | 106.8 | 108.2 | 108.3 | 119.0 |
| | 0.4 | 107.3 | 102.5 | 103.4 | 102.5 | 105.1 | 115.3 |
| | 0.6 | 109.1 | 115.6 | 110.1 | 109.4 | 112.0 | 108.4 |
| | 1.0 | 105.8 | 103.9 | 99.5 | 97.9 | 94.4 | 93.1 |
| 100 | 0.1 | 101.6 | 107.2 | 108.7 | 107.0 | 116.8 | 114.4 |
| | 0.2 | 98.7 | 94.6 | 107.5 | 104.5 | 111.5 | 114.3 |
| | 0.4 | 101.9 | 101.7 | 100.8 | 107.5 | 94.0 | 96.3 |
| | 0.6 | 101.4 | 109.7 | 104.9 | 108.1 | 93.7 | 93.5 |
| | 1.0 | 103.8 | 112.5 | 110.0 | 109.7 | 103.3 | 99.3 |

| | | | | | | | |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 125 | 0.1 | 103.7 | 107.2 | 108.7 | 113.4 | 118.1 | 112.1 |
| | 0.2 | 102.8 | 92.9 | 107.9 | 119.5 | 115.2 | 107.1 |
| | 0.4 | 101.5 | 102.4 | 106.7 | 106.2 | 100.7 | 108.0 |
| | 0.6 | 107.3 | 107.3 | 101.6 | 90.5 | 85.8 | 89.7 |
| | 1.0 | 103.3 | 107.2 | 104.5 | 107.4 | 101.0 | 96.9 |
| 150 | 0.1 | 97.4 | 110.1 | 110.0 | 110.3 | 116.6 | 117.7 |
| | 0.2 | 104.6 | 91.3 | 107.4 | 110.4 | 112.3 | 106.7 |
| | 0.4 | 100.7 | 98.6 | 96.6 | 104.1 | 109.2 | 108.8 |
| | 0.6 | 109.0 | 98.4 | 96.6 | 101.5 | 91.6 | 95.2 |
| | 1.0 | 102.3 | 101.8 | 97.2 | 98.1 | 93.1 | 92.2 |

Table C. Calculated voltage (Voc)/Measured voltage (Vom) and the ratio

| h | I _o (mA) | 39.25 | | 58.91 | | 78.54 | | 98.18 | | 117.81 | |
|-----|---------------------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|
| | | Voc/Vom | % | Voc/Vom | % | Voc/Vom | % | Voc/Vom | % | Voc/Vom | % |
| 0.1 | 5 | $\frac{12.79}{12.05}$ | 106.0 | $\frac{18.27}{18.20}$ | 100.3 | $\frac{23.75}{24.00}$ | 99.0 | $\frac{29.22}{29.05}$ | 100.5 | $\frac{34.70}{34.00}$ | 102.0 |
| | | $\frac{12.88}{12.23}$ | 105.3 | $\frac{18.41}{18.60}$ | 98.9 | $\frac{23.92}{24.10}$ | 99.3 | $\frac{29.44}{29.27}$ | 100.5 | $\frac{34.96}{34.80}$ | 100.4 |
| 0.2 | 10 | $\frac{13.05}{12.50}$ | 104.4 | $\frac{18.67}{19.30}$ | 96.7 | $\frac{24.26}{24.25}$ | 100.1 | $\frac{29.87}{29.43}$ | 101.4 | $\frac{35.47}{34.91}$ | 101.6 |
| | | $\frac{13.22}{12.98}$ | 101.8 | $\frac{18.92}{19.42}$ | 97.4 | $\frac{24.61}{24.35}$ | 101.0 | $\frac{30.31}{30.95}$ | 97.9 | $\frac{35.99}{35.10}$ | 102.5 |
| 0.4 | 20 | $\frac{13.57}{13.84}$ | 98.0 | $\frac{19.44}{20.01}$ | 97.2 | $\frac{25.30}{25.24}$ | 100.2 | $\frac{31.17}{31.83}$ | 97.9 | $\frac{37.03}{35.95}$ | 103.0 |
| | | | | | | | | | | | |

Table D. Calculated potential/Measured potential and the ratio (%)
Secondary experiment (protected area: 1.5m²)

| i_o (mA/m ²) | h | D | Secondary experiment (protected area: 1.5m ²) | | | | |
|----------------------------|-----|---|---|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | | 0 | 10 | 30 | 40 | 50 |
| 1 mA/m ² | 0.1 | H | $\frac{1360.6}{147.0}$ (92.5) | $\frac{299.3}{325}$ (92.1) | $\frac{102.1}{129}$ (79.1) | $\frac{54.4}{62}$ (87.1) | $\frac{40.8}{48}$ (85.0) |
| | | V | $\frac{1360.6}{1470}$ (92.5) | $\frac{299.3}{370}$ (80.1) | $\frac{102.1}{140}$ (72.9) | $\frac{54.4}{78}$ (70.2) | $\frac{40.8}{54}$ (80.2) |
| | 0.2 | H | $\frac{818.7}{860}$ (92.5) | $\frac{316.8}{362}$ (91.0) | $\frac{207.2}{245}$ (84.5) | $\frac{129.4}{115}$ (12.4) | $\frac{106.4}{85}$ (124.7) |
| | | V | $\frac{881.7}{860}$ (95.2) | $\frac{316.8}{362}$ (87.5) | $\frac{207.2}{72}$ (76.1) | $\frac{129.4}{140}$ (92.4) | $\frac{106.4}{105}$ (102.1) |
| 0.4 | 0.4 | H | $\frac{447.4}{480}$ (93.1) | $\frac{257.3}{278}$ (92.5) | $\frac{208.0}{215}$ (96.7) | $\frac{165.5}{140}$ (118.2) | $\frac{155.6}{128}$ (120.1) |
| | | V | $\frac{447.4}{480}$ (93.1) | $\frac{257.3}{310}$ (83.0) | $\frac{208.0}{230}$ (90.4) | $\frac{155.5}{179}$ (92.4) | $\frac{155.6}{168}$ (92.2) |
| | 0.6 | H | $\frac{233.1}{250}$ (93.2) | $\frac{157.1}{184}$ (85.3) | $\frac{135.4}{159}$ (84.9) | $\frac{155.4}{118}$ (97.8) | $\frac{112.3}{100}$ (11.2) |
| | | V | $\frac{233.1}{250}$ (93.2) | $\frac{157.1}{192}$ (76.2) | $\frac{135.4}{170}$ (79.4) | $\frac{115.4}{125}$ (92) | $\frac{112.3}{118}$ (94.5) |

D: Measured direction
H: Horizontal direction
V: Vertical direction

Table E. Calculated Voltage/Measured Voltage and ratio (%)
Secondary experiment (protected area: 1.5m²)

| i_o (mA/m ²) | h | Secondary experiment (protected area: 1.5m ²) | | | | |
|----------------------------|-----|---|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 1.0 |
| 100 | 100 | $\frac{43.85}{40.6}$ (107.8) | $\frac{44.3}{41.8}$ (106.2) | $\frac{45.3}{42.7}$ (106.2) | $\frac{46.3}{43.7}$ (106.1) | $\frac{48.3}{47.2}$ (102.2) |
| | | | | | | |

