

# 두개의 不溶性 陽極에 의한 水中 鋼帶의 陰極防蝕에 관한 研究

田 大 熙 · 文 慶 萬

## A Study on the Cathodic Protection of a Steel Strip in the Water by the Double Insoluble Anodes

Jeon Daehi · Moon Kyungman

### 目 次

Abstract	5. 電源裝置의 所要電壓, 防蝕의 所要電力 및 最 適防蝕條件
記號說明	5.1 電源裝置의 所要電壓의 實驗式
1. 序 論	5.2 防蝕의 所要電力 實驗式
2. 實驗裝置와 實驗方法	5.3 最適防蝕條件
3. 兩 陽極間의 分極電位의 理論式과 實測分極電位	6. 結 論
3.1 分極電位의 理論的 分布式	參考文獻
3.2 分極電位의 計算値와 實測値의 比較	附錄 I. 表面抵抗( $R$ )의 實驗式 誘導
4. 兩 陽極間의 分極電位의 計算値를 實測値와 同 一하게 하는 條件	附錄 II. 排流點의 分極電位의 實驗式 誘導
4.1 表面抵抗의 實驗式	附錄 III. 附表 Table A~C
4.2 排流點의 分極電位의 實驗式	附錄 IV. Programming
4.3 分極電位의 補正計算値와 實測値와의 比較	

### Abstract

There are two ways on corrosion protection for the metal structures in the water. One is the impressed current method and the other the galvanic anode method. The former has been more used than the latter in the larger metal structures.

In case of protecting a steel strip in the water with the single insoluble anode by the impressed current method, the polarization potential distribution, the influence of the anode location affecting the potential distribution and the required minimum electric power for corrosion protection etc. have been already investigated by Jeon *et al.* But the protection method using the double insoluble anodes has not been studied sufficiently in the theoretical aspect.

The authors have investigated the polarization potential distribution and the influence of the anode location on the minimum electric power for corrosion protection in theoretical and experimental aspects in case of protecting the metal strip in the water with

double insoluble anodes. And the results of this work are as follows;

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

$$E_x = E_0 \cosh \alpha(l-x) / \cosh \alpha l$$

$$= E_0 \cosh \{ (\sqrt{m_0 \rho_s / mt} / \sqrt{R}) (l-x) \} / \cosh l (\sqrt{m_0 \rho_s / mt} / \sqrt{R})$$

$$E_0 = \frac{0.532 i_0}{(\log 35h)^{0.5774}} - \frac{3.36}{(35h)^{0.5417}}$$

$$\sqrt{R} \times 10^3 = (3.019h + 0.406)x + (274.6h + 84.98)$$

Where, when the anode height rate is 0.29~0.57, the accuracy of calculated potential approaches approximately to the measured values.

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

$$V_0 = I_0 (0.733 + 0.069 \log [lh]) \rho \times 10^{-4} + 1.7$$

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

3) The required power for cathodic protection can be determined by

$$P = V_0 I_0 = I_0^2 (0.733 + 0.069 \log [lh]) \rho \times 10^{-4} + 1.7 I_0$$

4) The larger the specific resistance of water is, the greater becomes the effect of anode location on the required minimum power for cathodic protection. But when  $h$  range is 0.5714~0.6286, the required power is minimum with the specific resistance. And considering the required minimum powers and accuracy of calculated potentials, it is generally desirable that  $h$  value is about 0.57, which corresponds approximately to the result of research by Jeon *et al.*

## 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 1/4長과 全長(cm)
$t$ ;	試驗片의 實두께(cm)
$I_0, I_x$ ;	全 防蝕電流와 $x$ 点을 흐르는 電流(mA)
$E_0, E_x$ ;	排出点과 $x$ 点의 分極電位(mV)
$R, \omega (=R/m_0)$ ;	試驗片의 表面抵抗( $\Omega$ -cm <sup>2</sup> )과 1cm 길이當의 試驗片의 表面抵抗( $\Omega$ -cm)
$\rho_s, r (= \rho_s / mt)$ ;	試驗片의 比抵抗( $\Omega$ -cm)과 1cm 길이當의 試驗片의 金屬抵抗( $\Omega$ /cm)
$\alpha = \sqrt{r/\omega}$ ;	減衰係數(cm <sup>-1</sup> )
$H, h$ ;	試驗片부터 陽極까지의  높이(cm) 및  높이率( $H/l$ )
$V_0$ ;	電源裝置의 負荷電壓(V)
$i_0, i_x$ ;	試驗片의 平均印加電流密度(mA/m <sup>2</sup> ) 및 $x$ 点의 電流密度(mA/m <sup>2</sup> )
$\rho, \rho_{27}$ ;	任意溫度와 27°C下의 물의 比抵抗( $\Omega$ -cm)
$R_{pH}$ ;	比抵抗 $\rho$ ( $\Omega$ -cm)의 水中에서 陽極높이 $H$ cm일 때의 防蝕回路抵抗( $\Omega$ )
$P$ ;	防蝕電力(mW)

## 1. 序 論

陰極防蝕法은水中이나地中の 모든金屬체에 대하여適用시킬 수 있는防蝕法이며, 모든防蝕法中에서 가장確實하고 가장經濟인防蝕法으로定評이 나 있다.<sup>1),2)</sup> 이防蝕法에는外部電源法과流電陽極法이 있으나,大型鐵鋼體의長期間의防蝕에는外部電源法이 많이利用되고 있다.<sup>3)</sup>

陰極防蝕法에서 가장 중요한 것은被防蝕體의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.<sup>4),5)</sup> 이렇게 하기 위해서는 많은數의小型의陽極을設置하여야 하나, 이 경우에는陽極의設置費用이 많이 들게 되므로,設置費用을輕減하기 위해서는大型陽極을設置하지 않을 수 없다. 그러나 이 때는被防蝕體의分極電位の分布狀態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. 특히外部電源法은經濟적으로流電陽極法에比하여少數의大型陽極으로防蝕하므로被防蝕體의分極電位分布狀態가 아주 나쁘며,陽極設置位置의適否如何의 영향이流電陽極法의 경우보다 훨씬 더 크게 나타난다. 또流電陽極法에서는大型발라스트탱크 등에陽極의設定費用을節減하고同時에分極電位の分布狀態도 좋게 하는 새로운陽極設置工法<sup>6)</sup>이開發되었으나外部電源法에는이것의適用이不可能하므로陽極의設置位置의適否는 더욱重要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理論的解釋은管內面의 경우와<sup>7),8)</sup>長大한地下埋設管의外面의 경우에는<sup>10)-12)</sup> 많은進前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. 그러나 짧은鋼帶의外面에 대해서 한개의不溶性陽極으로防蝕할 경우의分極電位分布, 그리고陽極의位置가防蝕電力에 미치는 영향 등에 관해서는理論的인面과實驗的인面에서田・関의共同研究가<sup>16)</sup> 있다. 그러나 이것은 어디까지나 한개의不溶性陽極을使用한 경우이므로 상당히 긴파이프에 대해서 몇개의不溶性陽極으로防蝕할 경우에는適用할 수가 없다. 그러므로 이研究는 가장簡單한被防蝕體에 대한研究로서比較的 짧은水中의鋼帶를試料로採擇하고 두개의不溶性陽極을設置한 경우 두陽極사이의被防蝕體의分極電位分布, 防蝕에必要的인印加電壓 및所要防蝕電力에 미치는陽極의位置의 영향을理論的인面과實驗的인面에서考察하였다.

그러므로 이研究는 상당히 긴鐵鋼製의配管外面을 몇개의不溶性陽極을利用한外部電源法으로防蝕할 때陽極의位置에 따라그防蝕狀態가 어떻게變하며 또 가장經濟적으로防蝕시킬 수 있는適正陽極位置가 어느 곳인가 등을究明하는데 도움을 줄 것이다.

## 2. 實驗裝置와 實驗方法

### 2-1. 實驗裝置

本研究를 하기 위한實驗裝置는 Fig.1과 같이配置하였다. 即試驗片은試驗水槽內的3個의絶緣體(砂器사말)위에 놓았으며, 不溶性陽極은試驗片의4等分點의1,3分點上方에서 높이만을調節할 수 있도록固定하였고, 基準電極은試驗片上面에 따라서 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.

이實驗裝置의詳細는 다음과 같다.

#### 1) 試驗片(Fig.2 參照)

試驗片은 길이 145cm, 폭 5cm, 두께 0.3cm의構造物炭素鋼帶를使用하여 와이어 브러쉬와 샌드페이퍼로 녹을除去하고 아세톤으로脫脂한 후에有効作用面積이 140cm×3cm가 되도록露出시키고 그밖의表面과裏面은 ZRP(Zinc Rich Primer)를 1회와 에폭시타안塗料를 4회 칠하여絶緣시켰다.

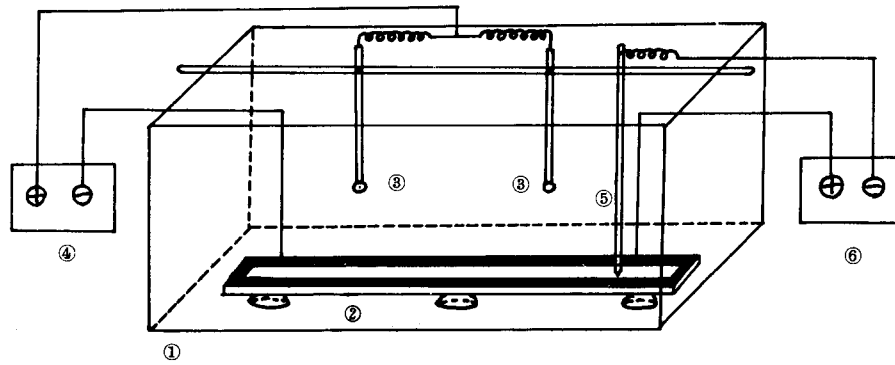


Fig. 1. Experimental equipment

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

이 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  $0.042\text{m}^2$ 이다.

## 2) 測定機器

- (1) 電位差計 : High resistance D. C. voltmeter  
Internal resistance:  $100,000 \Omega/\text{V}$   
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 5L 64 tester
- (3) 不溶性陽極 : 含銀鉛(Pb-4Ag)電極  
φ10 mm球形 : 本大學 製作
- (4) 基準電極 : 飽和카로멜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  
크기 :  $180\text{cm} \times 120\text{cm} \times 60\text{cm}$   
容量 : 1톤(水深 : 50cm)

## 2.2 實驗用水의 質

用水는 淸水를 使用하였으나 쇠녹이 많으므로 150g/톤의 黃酸알루미늄粉末을 加하여 淸淨시켰다. 이 實驗用水의 質은 Table 1과 같았으며, 實驗中의 水溫은  $24.6^\circ \sim 28.6^\circ\text{C}$ 의 範圍였다.

Table 1. Qualities of fresh water used for the experiments

water temp. °C	pH	Total hardness ppm $\text{CaCO}_3$	Total alkalinity ppm $\text{CaCO}_3$	Chloride ppm $\text{Cl}^-$	Specific resistance $\Omega\text{-cm}$	Specific gravity
27	5.8	700	8	58.5	2210	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  $100\text{mA}/\text{m}^2$ 로 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 1個月間 放置한 後부터 通電試驗을 開始하였다. 이 때의 試驗片의 自然電位는  $-650\text{mV}$  (SCE)였다.

試驗片 表面의 分極電位는 外部電源에서 防蝕電流을 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 卽 自然電位가  $-650\text{mV}(\text{SEC})$ 로 復極되도록 約 50分間씩 기다렸다.

試驗片의 分極電位는 不溶性陽極의 位置를 試驗片의 兩끝에서 35cm되는 地点에서 높이  $H=hl$  ( $l$ ; 두 不溶性 陽極間의 거리/ $2=35\text{cm}$ )를 5, 10, 20, 30 및 40cm로 바꾸어가면서, 또 外部에서 印加하는 電流密度를  $208.3, 260.4, 312.5\text{mA}/\text{m}^2$  및  $416.7\text{mA}/\text{m}^2$ 로 바뀌가면서 分極시켜, 각 경우마다 不溶性陽極 直下의 點에서 10cm간격으로 飽和카로멜電極(SCE) 基準으로 測定해서 記錄하였다.

### 3. 두 陽極間의 分極電位의 理論式과 實測分極電位

#### 3.1 分極電位의 理論의 分布式 (表面抵抗이 非電流函數일 때)

그림과 같이 2개의 陽極을 被防蝕體의 길이를 四等分한 1, 3分點 卽 A, B의 두 地点의 上方에 設置해서 防蝕하였을 경우 兩 排流點 사이의 分極電位 分布狀態를 考察한다.

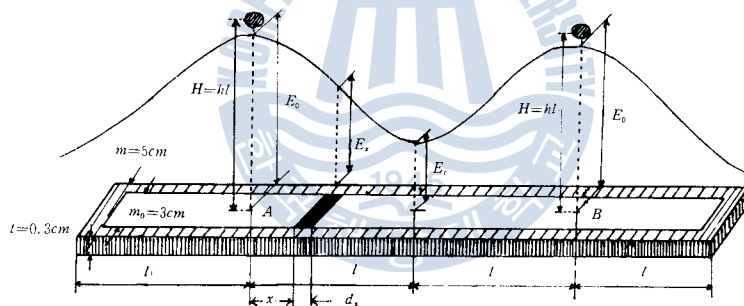


Fig. 2. Polarization potential on the strip protected by cathodic protection

한개의 排流點(A)에서 안쪽으로  $x$  cm 떨어진 곳의 試驗片의 表面積  $m_0 dx(\text{cm}^2)$ 에 流入하는 電流을  $dI_x(\text{A})$ 라 하면 그 電流密度  $dI_x/m_0 dx(\text{A}/\text{cm}^2)$ 에 의해서 일어나는 試驗片 表面의 電位變化, 卽 分極值(=實測電位-腐蝕電位)  $E_x(\text{V})$ 와 單位 表面積의 表面抵抗( $\Omega\text{-cm}^2$ )間에는

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

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

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

(3-1)과 (3-2)式에서

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

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

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

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

또 (3-4), (3-5)式에서

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

로 된다. (3-6)式을 微分하면

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

그리고 (3-3)式을 (3-7)式에 代入하면

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

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

Uhlig<sup>13)</sup>나 Sato<sup>14)</sup> 등과 같이  $R$ 가 電流密度에 따라 變하지 않고 全試驗片 表面에 대해서 一定이라 假定하면  $\alpha (\text{cm}^{-1})$ 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

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

排流点(陽極直下点)의 電位를  $E_0$ , 두 排流点間의 中央点( $x=l$ 点)의 電位를  $E_c$ 라 하면 (3-10), (3-11)式의 未知數는 다음의 境界條件에서 求할 수 있다.

$$(1) x=l \text{에서 } E_x = E_c$$

$$(2) x=l \text{에서 } \frac{dE_x}{dx} = 0$$

$$(3) x=0 \text{에서 } E_x = E_0$$

여기에서 먼저 (1)의 境界條件을 利用하면

$$A \cosh \alpha l + B \sinh \alpha l = E_c \dots\dots\dots (a)$$

(2)의 境界條件을 利用하면

$$A \sinh \alpha l + B \cosh \alpha l = 0 \dots\dots\dots (b)$$

(a), (b)를 연립方程式으로 풀면

$$A = E_c \cosh \alpha l$$

$$B = -E_c \sinh \alpha l$$

$$\therefore E_x = E_c \cosh \alpha (l-x) \dots\dots\dots (3-12)$$

(3)의 境界條件을 利用하여 (3-12)式을 變形하면

$$E_x = E_0 = E_c \cosh \alpha l$$

$$\therefore E_c = E_0 / \cosh \alpha l \dots\dots\dots (c)$$

(c)式을 (3-12)式에 代入하면, 두 陽極間의 分極電位分布式은

$$E_x = E_0 \cosh \alpha (l-x) / \cosh \alpha l \dots\dots\dots (3-13)$$

(3-13)式을  $x$ 로 微分하여 (3-6)式에 代入하면

$$I_x = \alpha E_0 \sinh \alpha (l-x) / r \cosh \alpha l$$

$$= \frac{1}{\sqrt{wr}} E_0 \sinh \alpha (l-x) / \cosh \alpha l \dots\dots\dots (3-14)$$

(3-14)式에서  $x \rightarrow 0$ 일 때  $I_x = \frac{1}{4} I_0$ 라 생각할 수 있으므로

$$\frac{1}{4} I_0 = \frac{E_0}{\sqrt{wr}} \sinh \alpha l / \cosh \alpha l = \frac{E_0}{\sqrt{wr}} \tanh \alpha l \dots\dots\dots (d)$$

(d)를 變形하면

$$E_0 = \frac{I_0 \sqrt{wr} \cosh \alpha l}{4 \sinh \alpha l} = \frac{I_0 \sqrt{wr}}{4} \coth \alpha l \dots\dots\dots (e)$$



(e)式을 (3-14)式에 代入하면

$$I_x = \frac{I_0}{4} \sinh\alpha(l-x)/\sinh\alpha l \dots\dots\dots(3-15)$$

**3.2 分極電位の 計算値와 實測値의 比較**

試驗片의 寸수가  $m=5\text{cm}$ ,  $m_0=3\text{cm}$ ,  $t=0.3\text{cm}$  및  $L=4l=140\text{cm}$ 이고 炭素鋼의 比抵抗  $\rho_s=13.5 \times 10^{-6}(\Omega\text{-cm})$  程度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

$$r = \rho_s/m_t = (13.5/1.5) \times 10^{-6} = 9 \times 10^{-6} (\Omega/\text{cm}) \dots\dots\dots(3-16)$$

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

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

(3-16)~(3-18)式과 (d)式에서

$$\sqrt{r \cdot w} = r/\alpha = 1.732 \times 10^{-3} \sqrt{R} = \frac{4E_0}{I_0} \tanh\alpha l (\Omega) \dots\dots\dots(3-19)$$

(3-18)式을 (3-13)式에 代入하면 이 試驗片上의 兩 陽極間의 分極電位 分布式은

$$\begin{aligned} E_x &= E_0 \cosh\alpha(l-x)/\cosh\alpha l \\ &= E_0 \cosh\left(5.196 \times 10^{-3} / \sqrt{R}\right) (l-x) / \cosh\left(5.196 \times 10^{-3} / \sqrt{R}\right) (\text{mV}) \end{aligned} \dots\dots\dots(3-20)$$

이 때의  $R$ 의 값은 (3-19)式에서

$$\sqrt{R} = 0.5774 \times 10^3 \left(\frac{4E_0}{I_0}\right) \tanh\alpha l (\Omega^{1/2} \cdot \text{cm}) \dots\dots\dots(3-21)$$

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.

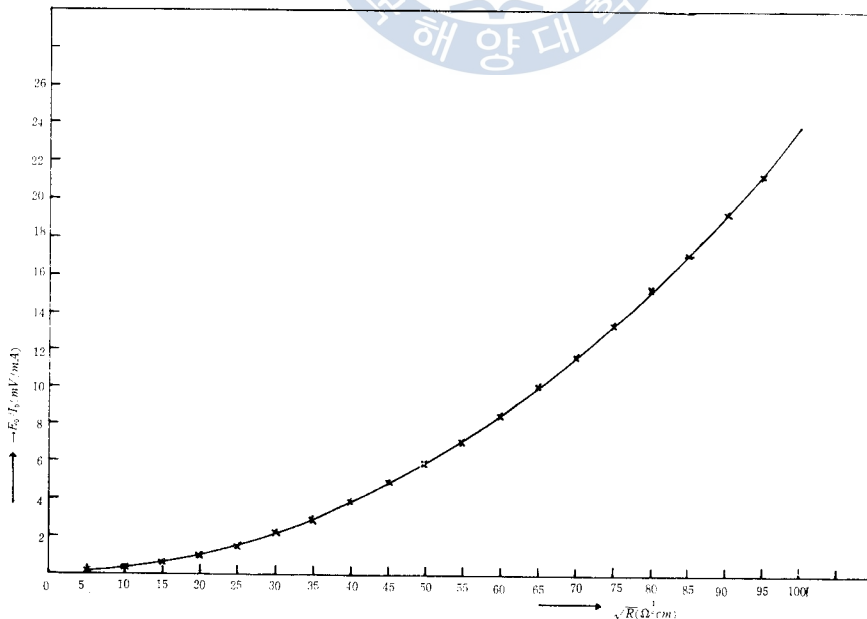


Fig. 3. Relation of  $E_0/I_0$  to  $\sqrt{R}$

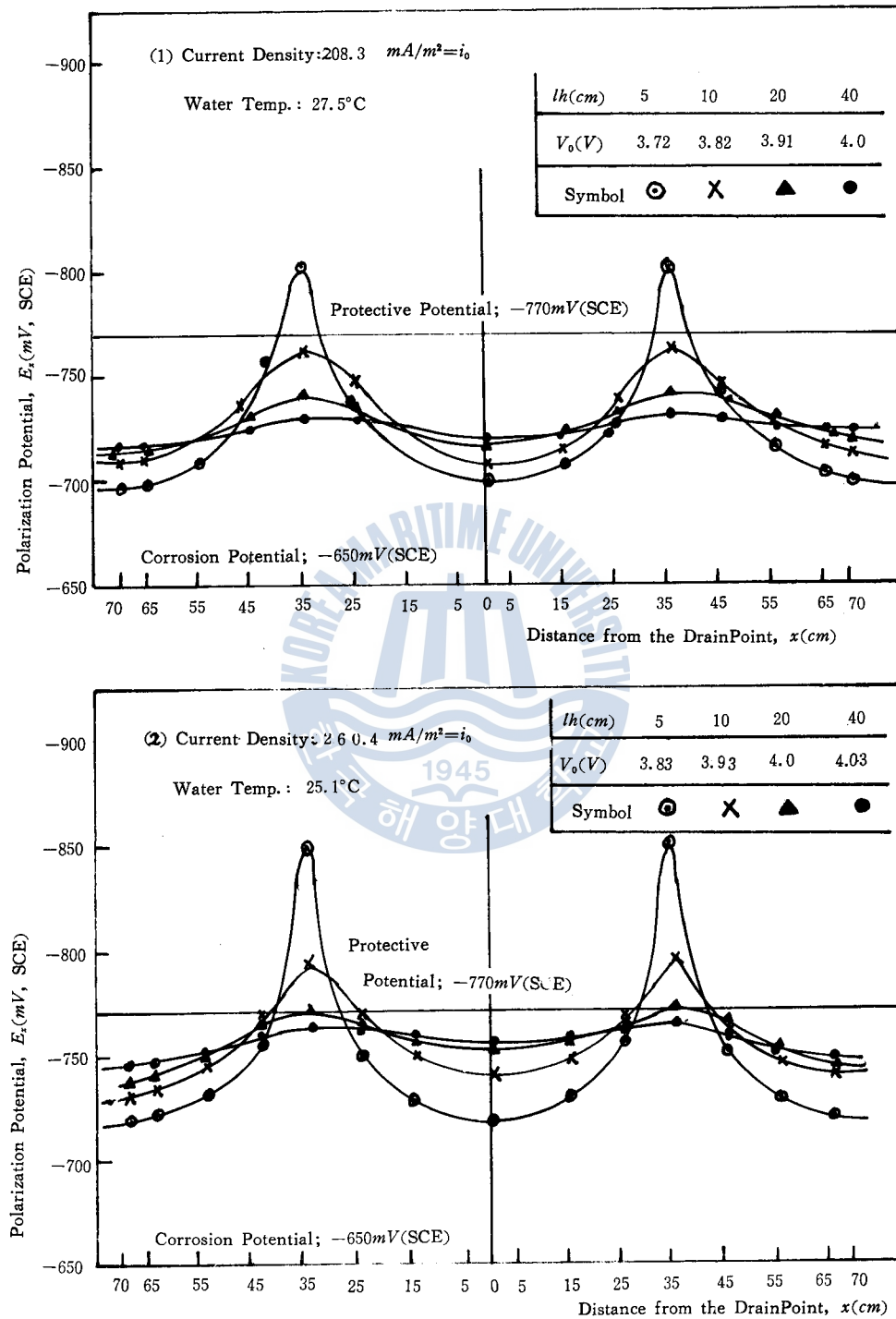


Fig. 4. Cathodic polarization potentials on a steel strip in the water (Fig. 1. Reference)



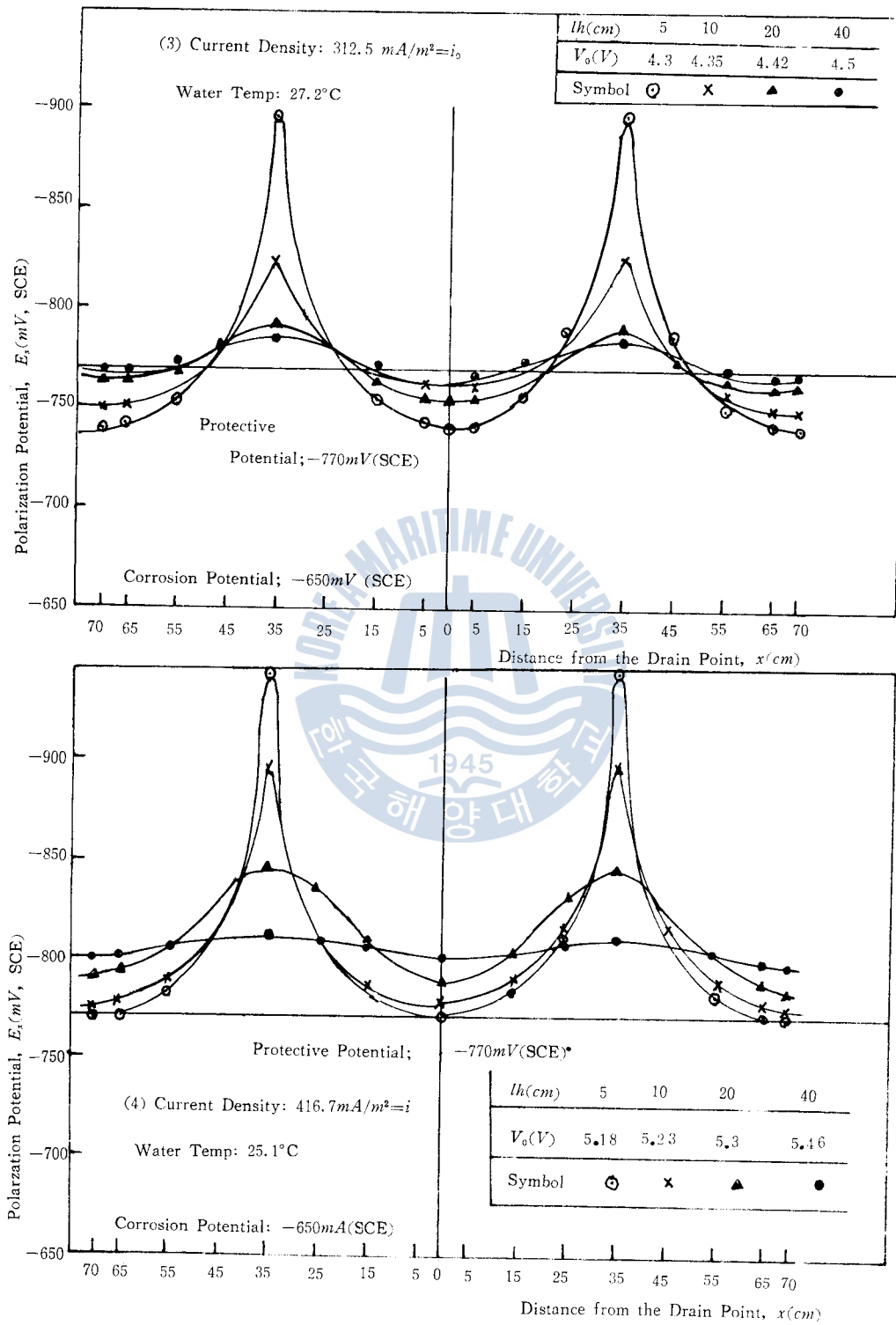


Fig. 4 Cathodic polarization potentials on a steel strip(Continued)

여기에서  $\sqrt{R}$ 의 값을 求하기 위해서 임의의  $\sqrt{R}$ 의 값에 대한  $E_0/I_0$ 의 값을 求하여 Fig. 3과 같이 圖示하였다. 그러므로  $E_0/I_0$ 의 값을 알면 Fig. 3에서 그 값에 해당하는  $R$ 의 값을 알 수 있다.

Fig. 4는 試驗片의 4等分点上의 1, 3分点 即 A, B点 上方에 各 한個의 陽極을 設置한 경우에 實測한 分極電位 分布狀態이며, 兩極의 높이率과 陽極의 電流密度에 따라 分極電位의 分布狀態가 어떻게 變하는가를 보여주고 있다.

實驗結果의 한 例로서 2個의 陽極을 試驗片의 4等分点의 1, 3分点 上方에 設置하고 電流密度  $i_0$ 를  $312.5 \text{ mA/m}^2$ 로 하였을 때 陽極 높이率  $h = \frac{H}{l}$ 에 대한  $\frac{E_0}{I_0}$  (實測值)와  $\sqrt{R}$  (計算值)를 Table 2의 左半部에 表示했고, 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를 同表의 右半部에 表示하였다.

Table 2에서 分極電位의 測定值와 計算值의 兩者間에 큰差가 있는 것은 表面抵抗  $R$ 을 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 때문이며 또한  $R$ 의 값이 Table 2에서 보는 바와 같이 比較的 적기 때문이다. 그러므로 이 差異는 陽極의 높이率  $h$ 를 增加시키거나  $R$ 의 값이 커서 試驗片上의 分極電位分布가 고를수록 減少된다. 即, 유도된 公式은 陽極의 높이率  $h$ 가 一定值 以上으로 클 경우 또는 表面抵抗  $R$ 의 값이 一定值 以上으로 클 경우에만 適用된다.

따라서 試驗片의 길이  $4l$ 과 陽極 높이率  $h$ 가 比較的 작고 피막 저항  $R$ 의 값이 작은 경우에는 表面抵抗  $R$ 은 各 測定点의 電流密度에 따라 變하고 이 測定点의 電流密度  $i_x$ 는 陽極 높이率  $h$  및 排流点에서 測定点까지의 거리  $x$ 의 函數로 다루어야 한다. 따라서 任意点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해서 計算하여야 한다.

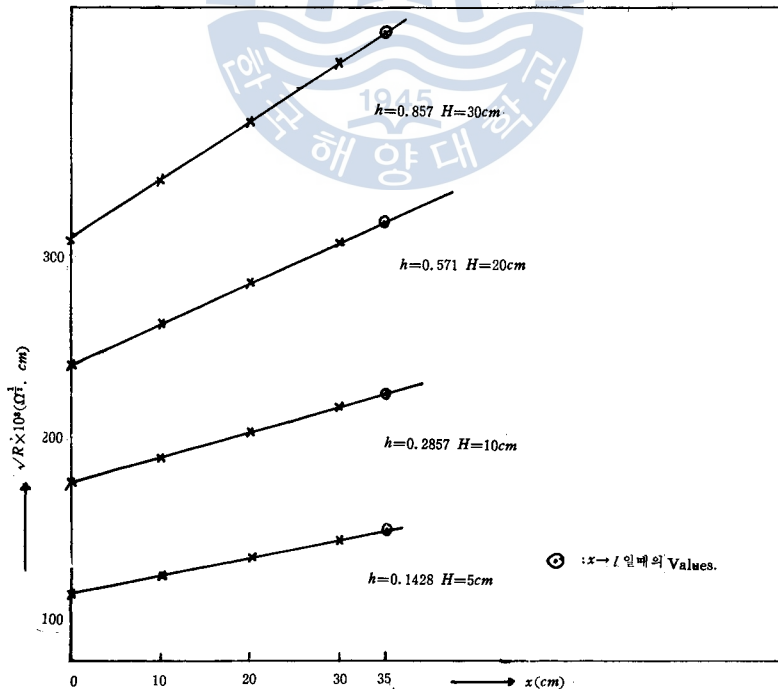


Fig. 5. Relation of  $x$  to  $\sqrt{R_x}$  when  $i_0 = 312.5 \text{ mA/m}^2$

Table 2. Cathodic polarization potentials ( $l=140\text{cm}$   $i_0=312.5\text{mA/m}^2$ )

$h=H/l_2$	$E_0/I_0$ ( $\Omega$ )	$\sqrt{R}$ ( $\Omega^{\frac{1}{2}}\cdot\text{cm}$ )	$x(\text{cm})$ M. C.*	0	10	20	30	35
				0.14285	15.3	80	M	230
			C	230.000	222.999	222.999	222.998	222.997
0.28571	11.3	69.8	M	170	130	120	115	110
			C	170.000	169.999	169.998	169.998	169.997
0.571	9.3	62.5	M	140	130	125	120	115
			C	140.000	139.999	139.998	139.998	139.997
0.857	9.0	62	M	140	135	130	125	120
			C	140.000	139.999	139.998	139.998	139.997

\* M; Measured potential(mV) C; Calculated potential(mV) from the Formula(3-20)

#### 4. 두 陽極間의 分極電位の 計算値를 그 實測値와 同一하게 하는 條件

(3-20)式의  $E_x=E_0\cosh\{(5.196\times 10^{-3}/\sqrt{R})(l-x)\}/\cosh l(5.196\times 10^{-3}/\sqrt{R})$ 에서 計算되는 分極電位가 그 實測値와 同一하게 되기 위해서는 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 距離  $x$ 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 (3-12)式의  $E_c$ 와  $E_x$ 에 實測値를 代入하여 求하고, 다시  $R$ 과 주어진  $h$ 와의 關係를 求하면 一定한  $i_0$ 下의  $R$ 의 一般式이 求해진다. 即 (3-12)과 (3-18)式에서 다음의 式을 얻을 수 있다.

$$\sqrt{R}\times 10^3 = \frac{5.196(l-x)}{\log\left\{\frac{E_x}{E_c} + \sqrt{\left(\frac{E_x}{E_c}\right)^2 - 1}\right\}} \dots\dots\dots(4-1)$$

한 例로서 一定 電流密度  $i_0=312.5\text{mA/m}^2$  下의 各 陽極높이率  $h$ 에 대하여  $\sqrt{R}$ 과  $x$ 의 關係는 (4-1)式에  $E_c$ 와  $E_x$ 의 實測値를 代入해서 圖示하면 Fig. 5와 같이 直線的으로 된다.

그러므로 그 一般式은

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

또 (4-2)式의  $a$ 와  $b$ 는 주어진  $h$ 에 대하여 Fig. 6과 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 測定値를 代入하여 最少自乘法으로 決定하면 表面抵抗式(附錄 I 參照)은 다음과 같이 된다.

$$\sqrt{R} \times 10^3 = (3.019h + 0.406)x + (274.6h + 84.98) \dots\dots\dots(4-4)$$

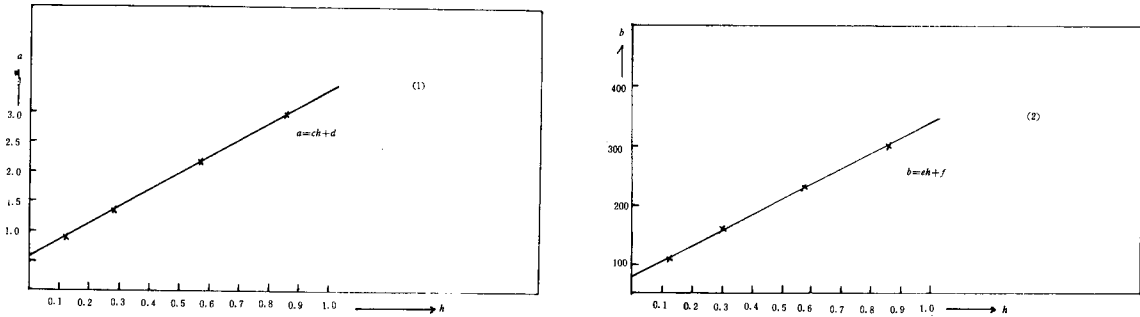


Fig. 6. Relations of *a* and *b* to *h*

### 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. 4 參照)에 의하여 Fig. 7과 같이 直線의이므로.

$$E_0 = ki_0 + p \dots\dots\dots(4-5)$$

(4-5)式의  $k$ 와  $p$ 는  $h$ 에 대해서 Fig. 8과 같은 關係가 있으므로 이들 값을 最少自乘法에 의하여 求하면 排流点의 分極電位  $E_0$ (附錄 II 參照)는

$$E_0 = \frac{0.532i_0}{(\log 35h)^{0.5774}} - \frac{3.36}{(35h)^{0.5417}} \dots\dots\dots(4-6)$$

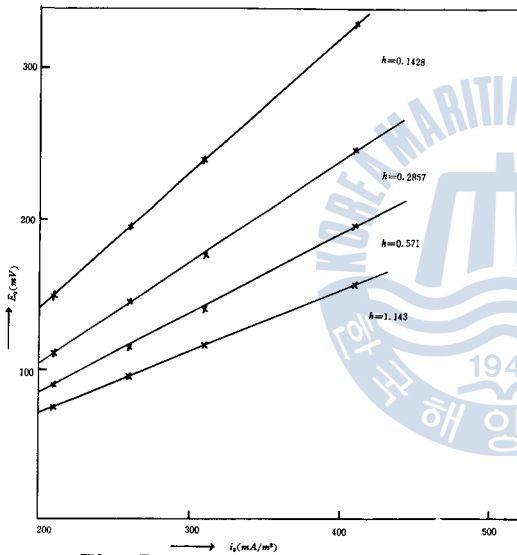


Fig. 7. Relations of *h* and  $i_0$  to  $E_0$

### 4.3 分極電位의 補正計算値와 實測値와의 比較

分極電位의 計算値  $E_x$ 는 (3-20)式의  $\sqrt{R} \times 10^3$ 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의 計算値를 補正計算値라고 한다.<sup>15)</sup>

附錄 III의 Table A는 本 實驗의 分極電位의 實測値와 그 補正計算値의 比較이고, Table B는 다시 그 實測値에 대한 補正計算値의 比率를 表示한 것이다.

Table B에 의하면 陽極높이率  $h$ 가 0.29~0.57일 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 대하여 若干의 特異한 點을 除外하고는  $\pm 10\%$  以內의 精度를 갖는다는 것을 알 수 있다. 따라서 鋼帶面의 陰分極 電位計算의 一般式은 다음의 세式으로 要約되며, 陽極높이率  $h$ 가 0.29~0.57일 때에 精度가 높고 그 誤差는 약  $\pm 10\%$  以內이다.

$$(3-20); E_x = E_0 \cosh\{\alpha(l-x)\} / \cosh \alpha l$$

$$= E_0 \cosh\{(\sqrt{m_0 \rho_s / mt} / \sqrt{R})(l-x)\} / \cosh l (\sqrt{m_0 \rho_s / mt} / \sqrt{R})$$

$$(4-4); \sqrt{R} \times 10^3 = (3.019h + 0.406)x + (274.6h + 84.98)$$

$$(4-6); E_0 = \frac{0.532i_0}{(\log 35h)^{0.5774}} - \frac{3.36}{(35h)^{0.5417}}$$

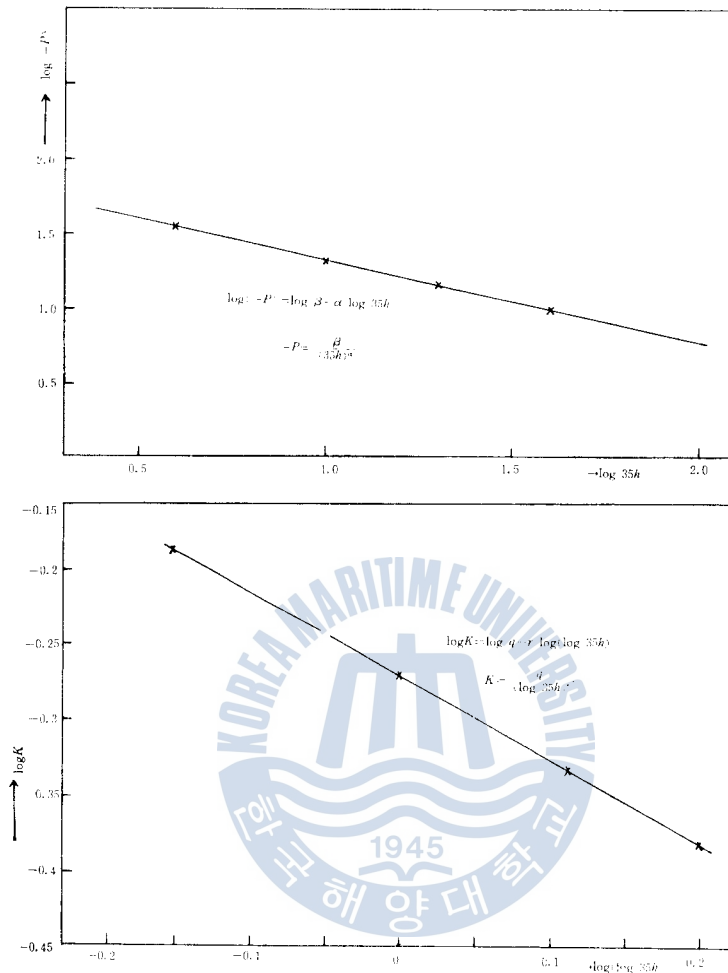


Fig. 8. Relations of  $\log 35h$  and  $\log(\log 35h)$  to  $p$  and  $k$

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  $1.7V^{10)}$ 이므로 防蝕電流  $I_0(mA)$ 를 흘리기 위한 所要電壓  $V_0(V)$ 는

$$V_0 = I_0 R_{pH} \times 10^{-3} + 1.7 \dots \dots \dots (5-1)$$

全防蝕回路抵抗  $R_{pH}(\Omega)$ 는 (5-1)式에서

$$R_{pH} = [(V_0 - 1.7) / I_0] \times 10^3 \dots \dots \dots (5-2)$$

本 實驗에서 不溶性 陽極의 높이  $lh$ 와 全防蝕電流  $I_0 (= 4i_0 m_0 l \times 10^{-4} mA)$ 에 대하여 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. 9는 Table 4를 圖示한 것이다. Fig. 9에 의하면  $R_{\rho H}$ 는  $\log[lh]$  ( $[lh]$ 는  $lh$ 의 數值, 但  $l$ 은 cm 單位)에 比例하므로

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

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

$$D = 162.1666 \quad E = 15.3484$$

Table 3 Relations of  $V_0$  to  $lh$  and  $I_0$

$I_0$ (mA) / $lh=H$ (cm)	12.5	15	17.5	20	$h$
5	3.83	4.3	4.78	5.18	0.1428
10	3.93	4.35	4.83	5.23	0.2857
20	4.0	4.42	4.90	5.32	0.571
40	4.03	4.5	5.02	5.46	1.143

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

$I_0$ (mA) / $lh=H$ (cm)	12.5	15	17.5	20	mean $R_{\rho H}$ ( $\Omega$ )	$\log[lh]$
5	170.4	173	176	174	173	0.699
10	178.4	176	178.8	176	177.3	1.000
20	184	181	182	181	182	1.301
40	187	186	189	188	187	1.602

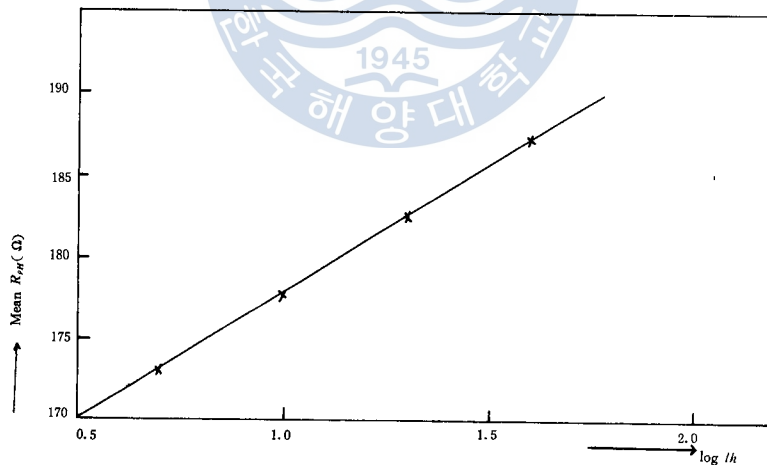


Fig. 9. Relations of mean  $R_{\rho H}$  to  $\log[lh]$

$$B = D / \rho_{27} = 162.166 / 2210 = 0.733 \times 10^{-1} \dots\dots\dots(5-4)$$

$$C = E / \rho_{27} = 15.3484 / 2210 = 0.069 \times 10^{-1} \dots\dots\dots(5-5)$$

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

$$R_{\rho H} = (0.733 + 0.069 \log[lh]) \times \rho \times 10^{-1}, (\Omega) \dots\dots\dots(5-6)$$

(5-6)式을 (5-1)式에 代入하면 所要電壓  $V_0$ 는

$$V_0 = I_0(0.733 + 0.069 \log[lh])\rho \times 10^{-4} + 1.7, \text{ (V)} \dots\dots\dots(5-7)$$

(5-7)式으로 計算되는 값과 實測值에 대한 %는 附錄 III의 Table C와 같다.

Table C에 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.

### 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

$$P = I_0 V_0 = I_0^2(0.733 + 0.069 \log[lh])\rho \times 10^{-4} + 1.7I_0, \text{ (mW)} \dots\dots\dots(5-8)$$

(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해서 活用할 수 있다. 即

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

### 5.3 最適防蝕條件

(3-20)式에서  $x=l$ 일 때  $E_x = E_l$ (防蝕에 所要되는 分極值)를 代入하면

$$E_l = E_0 / \cosh l (\sqrt{m_0 \rho_s / mt} / \sqrt{R}) \dots\dots\dots(5-10)$$

(4-4)式에  $x=l$ 을 代入하면

$$\sqrt{R} \times 10^3 = (3.019h + 0.406)l + (274.6h + 84.98) \dots\dots\dots(5-11)$$

(4-6)式은 그대로

$$E_0 = \frac{0.532i_0}{(\log 35h)^{0.5774}} - \frac{3.36}{(35h)^{0.5417}} \dots\dots\dots(5-12)$$

(5-10)~(5-12)式에서  $i_0 = f_1(h)$ 를 求하고 (5-9)式에서  $I_0$ 를 求한 다음에 (5-8)式에서  $P = f_2(h, \rho)$ 를 求한다.

그 다음에  $\frac{\partial P}{\partial h} = 0$ 의 最少條件에서  $h = f_3(\rho)$ 를 求하면 가장 電力를 省게 하여서 防蝕할 수 있는 陽極의 位置  $h$ 가 된다. 이 때의  $V_0$ 와  $I_0$ 를 求하면 그것이 電源裝置에 要求되는 最少容量이 될 것이다.

例로서 本 實驗에 使用되었던 試驗片을 생각하자.

$m=5\text{cm}$ ,  $m_0=3\text{cm}$ ,  $t=0.3\text{cm}$ ,  $l=35\text{cm}$ ,  $\rho_s=13.5 \times 10^{-6}(\Omega\text{-cm})$ 의 試驗片에서 두 不溶性 陽極의 中央點이 다음과 같이 120mV 負分極되야 한다. 即,

$$E_l = E_{35} = -770 - (-650) = -120\text{mV} \dots\dots\dots(5-13)$$

따라서 防蝕電力  $P$ 의 算式은 (5-8)式과 (5-9)式에서

$$P = (1.689 + 0.159 \log[35h])\rho i_0^2 \times 10^{-7} + 0.0816i_0 \dots\dots\dots(5-14)$$

(5-10) ~ (5-13)式에서

$$i_0 = 225.6 \cosh \beta (\log 35h)^{0.5774} + \frac{6.3168 (\log 35h)^{0.5774}}{(35h)^{0.5417}} \dots\dots\dots(5-15)$$

$$\beta = \frac{181.86}{380.27h + 99.19} \dots\dots\dots(5-16)$$

위의 條件下에서 여러가지  $\rho$  및  $lh$ 값을 代入한  $P(l, \rho)$ 에 대해서  $lh$  即  $h$ 의 影響을 電算해서 表示하면 Fig. 10과 같다. 이 그림에 의하면 물의 比抵抗  $\rho$ 가 큰 경우는 陽極의 設置位置  $h$ 의 適正問題가 防蝕電力  $P(h, \rho)$ 에 상당히 크게 影響을 미치나 海水와 같이 比抵抗이 작은 경우에는  $h$ 의 增加에 그다지 影響을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나 水中鋼帶의 最少 防蝕電力은 一般的으로 물의 比



抵抗  $\rho$ 에 따라서 不溶性陽極의 높이率  $h$ 가 0.5714~0.6286의 範圍일 때이다. 이것은 한個의 不溶性 陽極으로 防蝕할 때의 田·閔의 研究結果인  $h=0.5625\sim 0.6875^{17)}$ 와 잘 一致한다. 그러므로 鋼帶를 두 個의 不溶性陽極으로 防蝕할 때 두 不溶性陽極間에는 本法을 適用하고 두 不溶性 陽極의 바깥쪽은 田·閔의 方法을 利用하면 좋겠다.

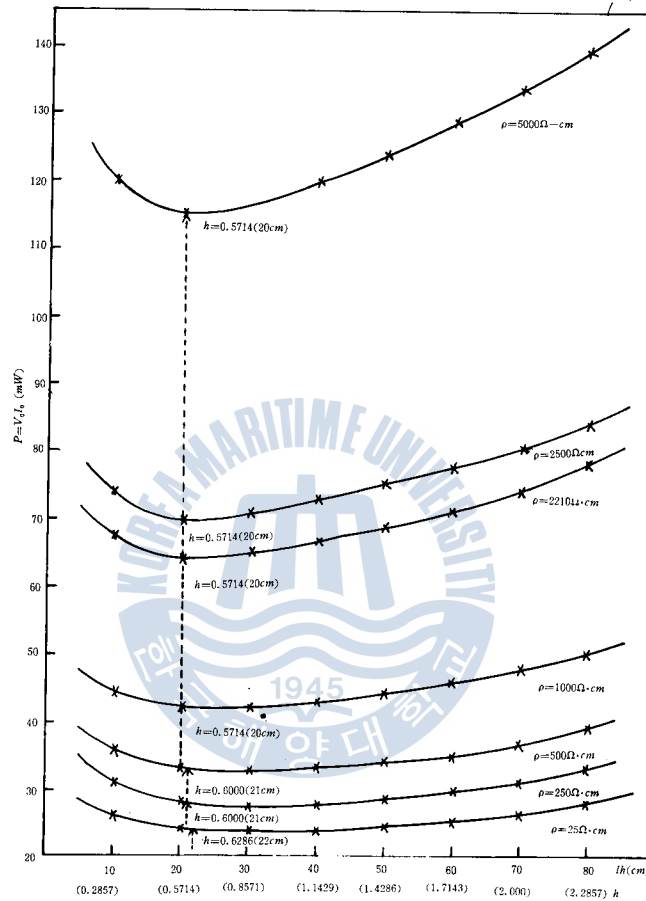


Fig. 10. Relations  $\rho$  and  $h$  to  $P(\rho, h)$

## 6. 結 論

두개의 不溶性 陽極에 의한 水中鋼帶의 陰極防蝕에 관한 以上の 研究에서 다음의 結論을 얻었다.

1) 鋼帶面을 2個의 不溶性 陽極으로 防蝕할 때 두 陽極間의 陰分極電位는 다음式으로 計算할 수 있고, 그 精度는 陽極 높이率  $h$ 가 0.29~0.57의 범위에서 높다.

$$E_s = E_0 \cosh \alpha (l-x) / \cosh \alpha l$$

$$= E_0 \cosh \{ (\sqrt{m_0 \rho_s} / mt) / \sqrt{R} \} ((l-x)) / \cosh l (\sqrt{m_0 \rho_s} / mt) / \sqrt{R}, \text{ (mV)}$$

$$E_0 = \frac{0.532 i_0}{(\log 35h)^{0.5774}} - \frac{3.36}{(35h)^{0.5417}}, \text{ (mV)}$$

$$\sqrt{R \times 10^3} = (3.019h + 0.406)x + (274.6h + 84.98), (\Omega^{\frac{1}{2}}\text{cm})$$

2) 陰極防蝕用 電源裝置의 所要電壓은 다음 式으로 求할 수 있다.

$$V_0 = I_0(0.733 + 0.069 \log[lh])\rho \times 10^{-4} + 1.7, (\text{V})$$

$$I_0 = 4i_0m_0l \times 10^{-4} = im_0L \times 10^{-4}, (\text{mA})$$

3) 陰極防蝕의 所要電力은 다음式으로 求할 수 있다.

$$P = V_0I_0 = I_0^2(0.733 + 0.069 \log[lh])\rho \times 10^{-4} + 1.7I_0, (\text{mW})$$

4) 물의 比抵抗( $\rho$ )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, 比抵抗이 작은 경우는 그다지 영향을 미치지 않는다. 그러나 最少防蝕電力으로 防蝕할 수 있는  $h$ 는  $\rho$ 에 따라서 0.5714~0.6286의 범위이다. 그러므로 最少防蝕電力과 計算式 精度와를 고려하면 陽極높이率  $h$ 는 0.57內外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, 韓國海洋大學 圖書出版部, p. 87(1975).
4. 中川雅夫: 電氣防蝕法の實際, 地人書館, pp. 133~134(1967).
5. R. Pope; Uhlig's Corrosion Handbook, John Wiley, p. 942(1963).
6. 笈建彦: 金屬, Vol. 45, No. 8, アクネ, 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: 防蝕技術, 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. 田大熙·閔丙彦: 韓國海洋大學 論文集, Vol. 13, pp. 120(1978).
16. 外島忍: 基礎電氣化學, 朝倉書店, p. 333(1965).
17. 前掲書(15); Vol. 13, pp. 123(1978).

附錄 I. 表面抵抗(R)의 實驗式 誘導

(3-12)式 및 (3-18)式을 組合해서 變形하면

$$\sqrt{R} \times 10^3 = \frac{5.196 \times (l-x)}{\log \left\{ \frac{E_x}{E_c} + \sqrt{\left(\frac{E_x}{E_c}\right)^2 - 1} \right\}} \dots\dots\dots(4-1)$$

(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  $R$ 을 求하고 다시 이  $R$ 과 주어진  $h$ 와의 關係를 求하면 一定  $i_0$ 下의  $R$ 의 一般式을 求할 수 있다. 여기에서  $x=l$ 의 경우  $\sqrt{R}$ 의 값은 理論上 求하여 질 수 없으므로  $x$ 는  $l$ 에 無限히 수렴하는 것으로 생각하여  $\sqrt{R}$ 의 값을 求하였다.

Fig. 5는 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  $h$ 의 경우에  $x$ 와  $\sqrt{R} \times 10^3$ 의 關係가 直線的이므로 다음의 一般式이 成立한다.

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

그러므로 ①式에 各  $h$ 下의  $x$ 에 대한  $\sqrt{R} \times 10^3$ 의 計算值를 代入하여 最少自乘法으로 未知數를 決定한다. 但  $ax+b$ 에서  $\sqrt{R} \times 10^3$ 의 절편  $b$ 는 (4-1)式에  $x=0$ 을 代入해서 求하면 Table 5와 같이 된다.

(1)  $h=0.14285(H=5\text{cm})$ 의 경우

$$P(\sqrt{R} \times 10^3, x) = (10a + 114.3 - 120)^2 + (20a + 114.30 - 132)^2$$

$$+ (30a + 114.3 - 142)^2 + (35a + 114.3 - 145)^2$$

$$\frac{\partial P}{\partial a} = 0 \text{ 일 때 } 2625a = 2317 \therefore a = 0.881$$

$$\therefore \sqrt{R_1} \times 10^3 = 0.881x + 114.3 \dots\dots\dots(2)$$

(2)  $h=0.28571(H=10\text{cm})$ 의 경우

①의 경우와 같은 要領으로

$$\sqrt{R_2} \times 10^3 = 1.1782x + 177.6 \dots\dots\dots(3)$$

(3)  $h=0.5714(H=20\text{cm})$ 의 경우

$$\sqrt{R_3} \times 10^3 = 2.2174x + 238.5 \dots\dots\dots(4)$$

(4)  $h=0.8571(H=30\text{cm})$ 의 경우

$$\sqrt{R_4} \times 10^3 = 2.974x + 319.6 \dots\dots\dots(5)$$

②~⑤式의  $a, b$ 를 整理하면 Table 5와 같고 이를 圖示하면 Fig. 6의 (1), (2)와 같다.

Table 5. Relations of  $a$  and  $b$  to  $h$

$h$	0.14	0.29	0.57	0.857
$lh(\text{cm})$	5	10	20	30
$a$	0.881	1.1782	2.217	2.974
$b$	114.3	177.6	238.5	319.6

Fig. 5에 의하여 다음의 一般式이 成立한다.

$$a = ch + d \dots\dots\dots(6)$$

$$b = ef + f \dots\dots\dots(7)$$

⑥, ⑦式에 Table 5의 數值를 代入하여 最少自乘法으로  $c$ 와  $d$  및  $e$ 와  $f$ 를 決定할 수 있다.

即  $a=3.019h+0.406$  .....(6')

$b=274.6h+84.98$  .....(7')

그러므로 ①式에 ⑥', ⑦'式을 代入하면

$\sqrt{R} \times 10^3 = (3.019h+0.406)x + (274.6h+84.98)$  .....(8)

附錄 II. 排流点的 分極電位の 實驗式 誘導

Fig. 7은 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의  $E_0$ 와  $i_0$ 는 다음의 直線關係가 있다.

$E_0 = ki_0 + p$  .....(1)

그러므로 各  $h$ 下에서 測定結果를 代入하여 最少自乘法으로 未知數  $k$ 와  $p$ 를 求한다. 例로서  $h=0.14285(H=5cm)$ 의 경우  $P(E_0, i_0)$ 가 最少로 되기 위해서는  $\partial P/\partial p=0$ 와  $\partial P/\partial k=0$ 이 成立되어야 한다.

(1)  $h=0.14285(H=5cm)$ 일 때

$P(E_0, i_0) = (208.3k+p-150)^2 + (260.4k+p-195)^2$   
 $+ (312.5k+p-245)^2 + (416.7k+p-335)^2$  .....(2)

$\partial P/\partial p=0$  일때

$382491 k + 1197.9p = 298180$  .....(3)

$1197.9 k + 4p = 925$  .....(4)

③, ④式을 聯立方程式으로 풀면  $k=0.6599, p=-34.1$  이므로

$E_{01} = 0.6599 i_0 - 34.1$  .....(5)

(1)과 同一한 方法으로 (2)~(4)의 경우는

(2)  $h=0.28571(H=10cm)$ 일 경우

$E_{02} = 0.492i_0 - 22.5$  .....(6)

(3)  $h=0.571(H=20cm)$ 의 경우

$E_{03} = 0.457i_0 - 15.3$  .....(7)

(4)  $h=1.143(H=40cm)$ 의 경우

$E_{04} = 0.408i_0 - 11.1$  .....(8)

⑤~⑦式에서  $h$ 에 대한  $k$ 와  $p$ 의 關係를 表示하면 Table 6의 上半部와 같이 된다.

Table. 6. Relations of  $p$  and  $k$  to  $35h$

$h(Hcm)$	0.14285(5)	0.28571(10)	0.571(20)	1.143(40)
$k$	0.6599	0.492	0.457	0.4087
$p$	-34.1	-22.5	-15.3	-11.1
$\log h$	-0.84512	-0.544075	-0.243364	0.058046
$\log 35h$	0.6987	1	1.30103	1.60206
$\log \log 35h$	-0.1554	0	0.114287	0.20468
$\log k$	-0.180462	-0.3080349	-0.3490838	-0.38933
$\log(-p)$	1.5327544	1.3521825	1.1840914	1.045323

Table 6의 關係를 圖示하면 Fig. 8과 같이 되므로 다음의 關係가 成立한다.

$$\log(-p) = \log\beta - \alpha \log 35h \dots\dots\dots ⑨$$

$$\log k = \log q - r \log \log 35h \dots\dots\dots ⑩$$

⑨式 및 ⑩式의  $\alpha$  및  $\beta$ , 그리고  $q$ ,  $r$ 를 最少自乘法으로 求하면

$$\log(-p) = \log 3.36 - 0.5417 \log 35h = \log \frac{3.36}{(35h)^{0.5417}}$$

$$\therefore -p = \frac{3.36}{(35h)^{0.5417}} \dots\dots\dots ⑪$$

$$\log k = -0.2741 - 0.5774 \log(\log 35h)$$

$$= -\{0.2741 + 0.5774 \log(\log 35h)\} = -\{\log 1.88 + \log(\log 35h)^{0.5774}\}$$

$$= -\{\log 1.88(\log 35h)^{0.5774}\}$$

$$-\log k = \log 1.88(\log 35h)^{0.5774}$$

$$\frac{1}{k} = 1.88(\log 35h)^{0.5774}$$

$$\therefore k = \frac{0.532}{(\log 35h)^{0.5774}} \dots\dots\dots ⑫$$

그러므로 ⑪式과 ⑫式에서

$$E_0 = \frac{0.532i_0}{(\log 35h)^{0.5744}} \frac{3.36}{(35h)^{0.5417}} \dots\dots\dots ⑬$$

### 附錄 III. 附 表

Table A. The calculated potentials and measured potentials(mV)

[ Protected area: 0.042m<sup>2</sup>  
Length of strip: 1.40m ]

$i(\text{mA}/\text{m}^2)$	$x(\text{cm})$ $h$	0	10	20	30	35
208.3	0.14	134.82 (150)	97.35 (80)	79.28 (70)	73.9 (60)	74.88 (55)
	0.29	109.8 (110)	89.14 (90)	79.4 (70)	77.11 (60)	77.95 (60)
	0.57	94.51 (90)	85.08 (85)	80.92 (75)	80.19 (70)	80.75 (70)
	1.143	84.4 (80)	80.49 (80)	79.00 (75)	78.87 (75)	79.16 (75)
260.4	0.14	169.8 (200)	122.61 (115)	99.85 (90)	93.1 (90)	94.31 (70)
	0.29	137.5 (145)	111.62 (120)	99.52 (110)	96.5 (105)	97.6 (90)
	0.57	118.32 (115)	106.79 (115)	101.31 (110)	100.40 (105)	101.10 (100)
	1.143	105.05 (120)	100.25 (115)	98.34 (110)	98.17 (105)	98.53 (100)

312.5	0.14	206.54 (245)	149.11 (130)	121.44 (100)	113.22 (95)	114.72 (90)
	0.29	165.32 (175)	134.19 (130)	119.66 (120)	116.1 (115)	117.37 (110)
	0.57	141.12 (125)	127.06 (130)	120.83 (125)	119.75 (120)	120.58 (115)
	1.143	126.16 (140)	120.40 (135)	118.10 (130)	117.90 (125)	118.33 (120)
416.7	0.14	273.62 (335)	197.57 (170)	160.90 (130)	150.06 (130)	151.97 (120)
	0.29	220.74 (245)	179.20 (175)	159.78 (150)	155.02 (140)	156.72 (130)
	0.57	189.74 (195)	170.79 (175)	162.43 (170)	160.9 (165)	162.09 (160)
	1.143	168.39 (160)	160.71 (155)	157.63 (155)	157.37 (150)	157.94 (150)

\* ( ): Measured potentials

Table B.  $\frac{\text{Calculated Potential}}{\text{Measured Potential}} \times 100(\%)$  [ Protected area: 0.042m<sup>2</sup> ]  
[ Length of strip: 1.40m ]

$i(\text{mA/m}^2)$	$x(\text{cm})$ $h$	$x(\text{cm})$				
		0	10	20	30	35
208.3	0.14	89.8	121.6	113.2	123.1	136.1
	0.29	99.8	99.3	113.4	128.3	129.8
	0.57	105.0	100.0	107.8	114.2	89.7
	1.143	105.5	100.6	105.3	105.0	105.5
260.4	0.14	89.36	105.6	110.9	103.4	134.7
	0.29	94.8	92.9	90.45	91.9	108.4
	0.57	102.8	92.8	92.0	95.2	101.1
	1.143	87.9	86.9	89.3	93.4	98.5
312.5	0.14	84.3	113.8	121.4	119.1	127.4
	0.29	94.4	103.2	99.6	100.9	106.6
	0.57	112.89	97.6	96.6	99.7	104.3
	1.143	90.1	88.8	90.7	94.32	98.58
416.7	0.14	81.4	116.2	123.0	115.3	124.9
	0.29	90.0	102.2	105.9	110.7	120.5
	0.57	96.92	97.5	95.5	97.5	105.2
	1.143	105.2	103.2	101.6	104.9	105.2

Table C. [Calculated voltage( $V_{OC}$ )/Measured voltage( $V_{OM}$ )] and the ratio

$h$	$I_0$ (mA) $lh=H$ (cm)	12.5	15	17.5	20
		$V_{OC}/V_{OM}$ %	$V_{OC}/V_{OM}$ %	$V_{OC}/V_{OM}$ %	$V_{OC}/V_{OM}$ %
0.14	5	$\frac{3.85}{3.83}$ 100.5	$\frac{4.28}{4.3}$ 99.5	$\frac{4.72}{4.78}$ 98.7	$\frac{5.15}{5.18}$ 99.4
0.29	10	$\frac{3.91}{3.93}$ 99.4	$\frac{4.358}{4.35}$ 100.1	$\frac{4.80}{4.83}$ 99.3	$\frac{5.24}{5.23}$ 100.1
0.57	20	$\frac{3.97}{4.0}$ 99.2	$\frac{4.427}{4.42}$ 100.1	$\frac{4.88}{4.90}$ 99.6	$\frac{5.33}{5.32}$ 100.1
1.143	40	$\frac{4.031}{4.03}$ 100.0	$\frac{4.496}{4.5}$ 99.9	$\frac{4.96}{5.02}$ 98.8	$\frac{5.43}{5.46}$ 99.5

## 附錄 IV. Programming

PANAFACOM UMO5/D E004 FORTRAN V01/L05 --760101--

ISM STNO. SOURCE STATEMENT  
 CALCULATION OF FUNCTION  
 1 REAL I0  
 2 40 READ(7,10) RHO  
 3 10 FORMAT(F6.0)



312.5	0.14	206.54 (245)	149.11 (130)	121.44 (100)	113.22 (95)	114.72 (90)
	0.29	165.32 (175)	134.19 (130)	119.66 (120)	116.1 (115)	117.37 (110)
	0.57	141.12 (125)	127.06 (130)	120.83 (125)	119.75 (120)	120.58 (115)
	1.143	126.16 (140)	120.40 (135)	118.10 (130)	117.90 (125)	118.33 (120)
416.7	0.14	273.62 (335)	197.57 (170)	160.90 (130)	150.06 (130)	151.97 (120)
	0.29	220.74 (245)	179.20 (175)	159.78 (150)	155.02 (140)	156.72 (130)
	0.57	189.74 (195)	170.79 (175)	162.43 (170)	160.9 (165)	162.09 (160)
	1.143	168.39 (160)	160.71 (155)	157.63 (155)	157.37 (150)	157.94 (150)

\* ( ): Measured potentials

Table B.  $\frac{\text{Calculated Potential}}{\text{Measured Potential}} \times 100(\%)$  [ Protected area: 0.042m<sup>2</sup>  
{ Length of strip: 1.40m } ]

$i(\text{mA/m}^2)$	$h$	$x(\text{cm})$				
		0	10	20	30	35
208.3	0.14	89.8	121.6	113.2	123.1	136.1
	0.29	99.8	99.3	113.4	128.3	129.8
	0.57	105.0	100.0	107.8	114.2	89.7
	1.143	105.5	100.6	105.3	105.0	105.5
260.4	0.14	89.36	105.6	110.9	103.4	134.7
	0.29	94.8	92.9	90.45	91.9	108.4
	0.57	102.8	92.8	92.0	95.2	101.1
	1.143	87.9	86.9	89.3	93.4	98.5
312.5	0.14	84.3	113.8	121.4	119.1	127.4
	0.29	94.4	103.2	99.6	100.9	106.6
	0.57	112.89	97.6	96.6	99.7	104.3
	1.143	90.1	88.8	90.7	94.32	98.58
416.7	0.14	81.4	116.2	123.0	115.3	124.9
	0.29	90.0	102.2	105.9	110.7	120.5
	0.57	96.92	97.5	95.5	97.5	105.2
	1.143	105.2	103.2	101.6	104.9	105.2

Table C. [Calculated voltage( $V_{OC}$ )/Measured voltage( $V_{OM}$ )] and the ratio

h	$I_0$ (mA) $lh=H$ (cm)	12.5		15		17.5		20	
		$V_{OC}/V_{OM}$	%	$V_{OC}/V_{OM}$	%	$V_{OC}/V_{OM}$	%	$V_{OC}/V_{OM}$	%
0.14	5	$\frac{3.85}{3.83}$	100.5	$\frac{4.28}{4.3}$	99.5	$\frac{4.72}{4.78}$	98.7	$\frac{5.15}{5.18}$	99.4
0.29	10	$\frac{3.91}{3.93}$	99.4	$\frac{4.358}{4.35}$	100.1	$\frac{4.80}{4.83}$	99.3	$\frac{5.24}{5.23}$	100.1
0.57	20	$\frac{3.97}{4.0}$	99.2	$\frac{4.427}{4.42}$	100.1	$\frac{4.88}{4.90}$	99.6	$\frac{5.33}{5.32}$	100.1
1.143	40	$\frac{4.031}{4.03}$	100.0	$\frac{4.496}{4.5}$	99.9	$\frac{4.96}{5.02}$	98.8	$\frac{5.43}{5.46}$	99.5

## 附錄 IV. Programming

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

```

ISM      STNO.      SOURCE STATEMENT
                                 CALCULATION OF FUNCTION
1                   REAL I0
2                   40 READ(7,10) RHO
3                   10 FORMAT(F6.0)
4                   WRITE(8,100)
5                   100 FORMAT(5X, 1HI, 5X, 5H RHO, 7X, 5H BETA, 9X, 2HIO, 9X,
                                 2HHI, 9X, 1HP)
6                   IF(RHO-0.0)50, 50, 60
7                   60 DO 30 J=1,80
8                   H=1.0*FLOAT(J)
9                   H1=H/35.
10                   BETA=181.86(380.27*H1+99.19)
11                   X=(EXP(BETA)+EXP(-BETA))/2.
12                   Y=ALOG10(35.*H1)
13                   IO=225.6*X*Y**0.5774+6.3168*Y**0.5774/(35.*H1)**0.5417
14                   P=(1.689+0.159*ALOG10(35.*H1)*RHO*I0**2*1.0E-07+0.0816*I0
15                   WRITE(8,20)J, RHO, BETA, I0, H1, P
16                   20 FORMAT(5X, I2, 5(2X, F10.4))
17                   30 CONTINUE
18                   GO TO 40
19                   50 STOP
20                   END

```