

# 陰極防蝕時의 鋼配管의 分極電位, 所要防蝕電力 및 最適防蝕條件에 관한 研究

金 垣 寧

The Polarization Potentials, the Required Electric Power and the Optimum Condition of the Steel Piping To Be Protected by the Cathodic Protection Method

Kim Wonyeong

〈目 次〉

1. 序 論
2. 分極電位와 防蝕電力에 관한 理論
  - 2.1 分極電位分布
  - 2.2 防蝕所要電力
3. 實驗裝置 및 實驗方法
  - 3.1 實驗裝置(Ⅰ) 및 實驗方法
    - 3.1.1 實驗裝置
    - 3.1.2 測定機器
    - 3.1.3 實驗用水
    - 3.1.4 實驗方法
  - 3.2 實驗裝置(Ⅱ) 및 實驗方法
    - 3.2.1 實驗裝置
    - 3.2.2 實驗方法
  - 3.3 實驗裝置(Ⅲ) 및 實驗方法
    - 3.3.1 實驗裝置
    - 3.3.2 實驗方法
4. 分極電位 計算式의 補正
  - 4.1 分極電位에 관한 在來式의 檢討
  - 4.2 表面抵抗의 實驗式
  - 4.3 排流點에서의 分極電位의 實驗式
  - 4.4 分極電位의 補正計算値와 實測値와의 比較
  - 4.5 물의 比抵抗을 考慮한 排流點에서의 分極電位 實驗式
5. 所要電壓과 所要電力
  - 5.1 電源裝置의 所要電壓과 防蝕電力의 實驗式
  - 5.2 電源裝置의 所要電壓과 防蝕電力에 미치는 被防蝕面積의 영향
6. 最適防蝕條件
  - 6.1 實驗(Ⅰ)의 試驗片에 대한 最適防蝕條件
  - 6.2 實驗(Ⅱ)의 試驗片에 대한 最適防蝕條件
  - 6.3 被防蝕面積의 增加에 따른 最適防蝕條件의 適用限界
7. 在來計算式과 本研究 實驗式의 比較
8. 結 論
  - 參考文獻
  - 附 錄

### Abstract

In the cathodic protection method, the arrangement of anodes should be made so that polarization potentials lower than protection potential may be maintained uniformly if available on the surface of the whole metal to be protected. To do so, it is desirable to increase the number of anodes. The number of anodes, however, is to be limited due to the cost of anodes and their installations. Especially, the polarization potential distributions under the impressed current method using several number of large capacity anodes are less uniform than that of the galvanic anode method. Therefore, the polarization potential distributions and the required electric power for corrosion prevention are more affected by the anode location in the impressed current method compared with the galvanic anode method.

In this paper, for the cathodic protection of a steel piping in water by the impressed current method installing two insoluble anodes, the author has interpreted theoretically and experimentally the effect of the anode location on the polarization potential distributions and on the required electric power for corrosion prevention. The author also has obtained the empirical formulae, determining the optimum condition of cathodic protection.

The results of this research are as follows:

- (1) In the range of specific resistance of water 960~4800  $\Omega$ -cm, the cathodic polarization potentials on the steel pipe surface can be calculated by

$$\begin{aligned}
 E_x &= E'_o \cos h \alpha \left( 50 - \frac{50}{l} x \right) / \cos h 50 \\
 &= E'_o \cos h \left\{ \left[ 2 \sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}} / \sqrt{R} \right] \left( 50 - \frac{50}{l} x \right) \right\} \\
 &\quad \div \cos h \left[ 100 \sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}} / \sqrt{R} \right] \quad (\text{mV}) \\
 E_o' &= [1.7667 / \{\log(50h)\}^{0.9582}] i_o - \{146.4624 / (50h)^{0.5688}\} \\
 &\quad + 0.0083433(\rho - 1950) \quad (\text{mV}) \\
 \sqrt{R} \times 10^3 &= (1.3869h + 0.1306) \cdot \frac{50}{l} x + 629.7737h + 156.1420 \quad (\Omega^{1/2}\text{-cm})
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 V_o &= I_o (1.3531444 - 2.3980884 \log \log I_o) \times \{0.0723 + 0.0144 \log(50h)\} \\
 &\quad \times \rho \times 10^{-3} + 1.85 \quad (\text{V}) \\
 I_o &= 4\pi D l i_o \times 10^{-4} \quad (\text{mA})
 \end{aligned}$$

and the required electric power for cathodic protection becomes

$$\begin{aligned}
 P &= V_o I_o = I_o^2 (1.3531444 - 2.3980884 \log \log I_o) \\
 &\quad \times \{0.0723 + 0.0144 \log(50h)\} \times \rho \times 10^{-3} + 1.85 I_o \quad (\text{mW})
 \end{aligned}$$

- (3) The higher the specific resistance of water is, the greater is the effect of anode location on the required electric power for cathodic protection.
- (4) In the range of 960~4800  $\Omega$ -cm, the higher the specific resistance of water, and the smaller the protected area is, the greater is the height rate of anodes for the required minimum power.

## Nomenclature

$x$	=distance from drainage point to measuring point	(cm)
$D$	=outside diameter of test pipe	(cm)
$t$	=thickness of test pipe	(cm)
$L, l$	=total length and a quarter of it of test pipe	(cm)
$E_s, E'_s$	=polarization potential at drainage point under specific resistance of water, 1950 $\Omega$ -cm and arbitrary specific resistance of water	(mV)
$E_x, E_l$ or $E_s$	=polarization potential at distance $x$ and $l$	(mV)
$I_o$	=external current	(mA)
$I_x$	=current in test pipe at distance $x$	(mA)
$i_o$ or $\bar{J}$	=average current density on test pipe	(mA/m <sup>2</sup> )
$i_x$	=current density at distance $x$	(mA/m <sup>2</sup> )
$\Delta_M$	=current density at center between anodes on test pipe	(mA/m <sup>2</sup> )
$R$	=surface resistance of test pipe	( $\Omega$ -cm)
$w$	=surface resistivity of test pipe	( $\Omega$ -cm)
$r$	=resistance of metallic pipe per unit length	( $\Omega$ /cm)
$\rho_s$	=resistivity of test pipe	( $\Omega$ -cm)
$\alpha$	=attenuation constant	(cm <sup>-1</sup> )
$H, h$	=distance from center line of test pipe to anode and its height(distance) rate( $H/l$ )	(cm)
$V_o$	=voltage of electric power source	(V)
$\rho$	=specific resistance of water	( $\Omega$ -cm)
$R_{pH}$	=total circuit resistance	( $\Omega$ )
$f$	=protected area coefficient	
$P$	=electric power for corrosion prevention	(mW)
$P_{min.}$	=minimum electric power for corrosion prevention	(mW)
$i_{o,min.}$	=minimum current density for corrosion prevention	(mA/m <sup>2</sup> )
$R_p$	=resistivity of pipe coating of test pipe	( $\Omega$ -cm)
$R_s$	=leakage resistivity of test pipe	( $\Omega$ -cm)
$r_1$	=radius of test pipe	(cm)
$r_2$	=imaginary effective distance of resistance under water	(cm)

## 1. 序 論

陰極防蝕法에는 流電陽極法과 外部電源法이 있으며 이들은 水中이나 地下의 金屬構造物에 대하여 다른 어느 防蝕法보다도 가장 確實하고 經濟的이라는 定評<sup>1)-4)</sup>을 얻고 있는데, 前者는 小形施設, 後者는 大形施設의 防蝕에 많이 活用되고 있다<sup>5)-6)</sup>.

陰極防蝕法에서 가장 重要的 것은 被防蝕體의 各部의 分極電位를 防蝕電位以下の 값으로 거의 均等하게 維持하는 것이다<sup>7)-8)</sup>. 이를 위해서는 小形陽極을 多數 採用하여야 하나 設置하는 데에 費用이 많이 所要되므로 一定한 크기 以上の 容量이 큰 少數의 陽極으로 防蝕하고 있다. 이러한 경우에 外部電源法은 流電陽極法에 比하여 한 陽極當의 容量이 크므로 被防蝕體의 分極電位分布狀態가 나빠지며 流電陽極法에 比하여 陽極의 設置位置의 適否에 따라 그 영향이 훨씬 크게 나타난다. 또 流電陽極法에는 大形 알라스트 탱크 등에 陽極의 設置費用과 分極電位分布를 考慮한 새로운 設置工法인 슬라이딩 애노드(sliding anode)등<sup>9)</sup>이 開發되어 있으나, 外部電源法에는 이러한 方法의 適用이 不可能하므로 陽極의 設置位置의 適否問題는 더욱 重要的 意味를 갖게 된다.

金屬配管의 陰極防蝕에 있어서 被防蝕體의 分極電位分布에 대한 理論的인 解析은 管内面의 경우<sup>10)-13)</sup>와 長大한 地下埋設管의 外面의 경우<sup>14)-18)</sup>에 대해서 많이 이루어져 있으나 이들의 研究는 電位分布를 金屬配管의 導體抵抗, 表面抵抗, 土壤의 比抵抗 및 排流點으로부터의 거리 등을 變數로 하고 排流點의 分極電位를 기준으로 하여 解析하고 있으며 配管에 대한 陽極의 位置關係는 전혀 考慮하지 않고 있다. 따라서 이들의 研究는 陽極의 適正位置決定이나 防蝕用電源裝置의 容量決定에 適用할 수 없다. 한편 被防蝕體에 流入하는 電流密度를 기준으로 하여 最少電流로 防蝕할 수 있는 陽極의 設置位置를 求한 研究<sup>19)</sup>도 있으나 이것도 水中이나 地下配管의 防蝕에 있어서 電位分布나 電源裝置의 所要容量을 決定하는 데 利用할 수 없다.

實際防蝕에 있어서 配管의 電位分布는 金屬의 導體抵抗, 表面抵抗, 土壤의 比抵抗 및 排流點으로부터의 거리 뿐만 아니라 排流點과 陽極間의 거리의 영향까지 考慮해야 하고, 表面抵抗은 各部의 電流密度, 即 排流點으로부터의 거리와 排流點으로부터 陽極까지의 거리의 函數로 表示되어야 한다. 또 電源裝置의 所要電壓에 대해서는 印加電流, 被防蝕面積의 大小 및 排流點으로부터 陽極까지의 거리의 영향까지 考慮하여 誘導해야 하며, 이러한 영향까지 考慮하여서 最適防蝕條件을 檢討하여야 될 것으로 생각된다.

本研究에서는 在來式을 基本으로 하고 이것에 前述한 變數들의 影響을 考慮하여 被防蝕體의 分極電位分布, 防蝕에 必要的 電源裝置의 電壓 및 電力 등에 미치는 陽極의 設置位置의 影響을 理論 및 實驗的인 側面에서 解析하고 이것을 基準으로 하여 經濟的인 防蝕條件을 提示하고자 한다.

本研究는 水中이나 地下에 埋設된 長大한 鋼管表面의 經濟的 防蝕을 目標로 하고 있는데, 地下埋設管에 대해서는 均質土壤을 얻기가 어렵고 陽極 및 電位測定用 比較電極의 移動이 困難할 뿐 아니라 比抵抗이 다른 여러 種類의 土壤을 얻기가 至難하므로 이들의 條件을 容易하게 調節할 수 있는

水中環境을 採擇하였다. 또 長大한 配管에 있어서는 그 길이 方向으로 多數의 陽極을 設置하여 防蝕하지만 本附圖에 示여지는 兩 個의 陽極을 設置한 경우만을 對象으로 하였다.

따라서 本附圖은 水中이나 地下에 埋設된 長大한 鋼管表面을 外部電源法으로 防蝕하고자 할 때, 陽極의 適正位置와 配管의 電位分布를 求하고 電源裝置의 容量을 決定하는 데 크게 도움을 줄 것으로 생각된다.

## 2. 分極電位와 防蝕電力에 關한 理論

### 2.1 分極電位分布

Fig. 1 및 Fig. 2에 示인 것과 같은 鋼管을 試驗片으로 採擇하면 排流點( $x=0$ )에서  $x$  cm 떨어진 곳의 試驗鋼管의 表面積  $\pi D dx$  (cm<sup>2</sup>)에 流入하는 電流를  $dI_x$  (mA)라 하면 그 電流密度  $dI_x/\pi D dx$  (mA/cm<sup>2</sup>)에 의하면 該處에서 試驗鋼管表面의 電位變化 즉 分極值 [= (實測電位) - (自然電位)]  $E_x$  (mV)를 單位表面積의 表面抵抗  $R$  ( $\Omega$ -cm)間에는 다음 式이 成立한다.

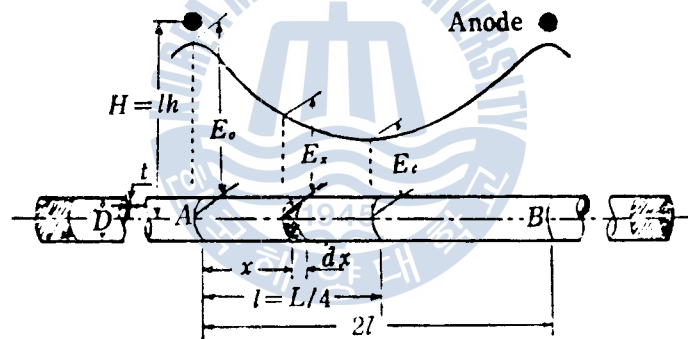


Fig. 1. Polarization potential on the pipe protected by cathodic protection

$$dI_x/\pi D dx = -E_x/R \quad (2.1)$$

單位 길이 (cm) 당의 試驗鋼管의 表面抵抗을  $w$  ( $\Omega$ -cm)라 하면

$$dI_x/dx = -E_x/w \quad (2.2)$$

이 된다.

$$w = R/\pi D \quad (2.3)$$

또  $x$ 點에 있어서 試驗鋼管을 따라 흐르는 電流  $I_x$  (mA)는  $dx$ 間에서  $dE_x$  (mV)의 電位變化를 생각해 하므로 試驗鋼管의 比抵抗을  $\rho_s$  ( $\Omega$ -cm), 그 單位 길이當의 金屬抵抗을  $r$  ( $\Omega/cm$ )라 하면

$$dE_x = -I_x \rho_s dx / \frac{\pi}{4} \{D^2 - (D-2t)^2\} \quad (2.4)$$

$$r = \rho_s / \frac{\pi}{4} \{D^2 - (D-2t)^2\} \quad (2.5)$$

이 되며, 따라서

$$dE_x = -I_x r dx \quad (2.6)$$

이 成立한다. (2·6)式을  $x$ 로 微分하면

$$d^2 E_x / dx^2 = -r dI_x / dx \quad (2·7)$$

이 되고 (2·2)式과 (2·7)式에서 다음 式을 얻는다.

$$d^2 E_x / dx^2 = (r/w) E_x = \alpha^2 E_x \quad (2·8)$$

$$\text{단, } \sqrt{r/w} = \alpha \quad (2·9)$$

表面抵抗  $R$ 은 電流의 函數이고 電流는 排流點으로부터의 거리  $x$  (cm)와 排流點에서 陽極까지의 거리  $H$  (cm)의 函數라고 생각되나 計算이 困難하므로 Uhlig<sup>20)</sup>나 Sato<sup>21)</sup>등과 같이  $R$ 가 電流密度에 따라 變化하지 않고 全試驗片表面에 대하여 一定하다고 假定하면  $\alpha$ 는 定數이므로 (2·8)式의 一般解는 다음과 같다.

$$E_x = A \cosh \alpha x + B \sinh \alpha x \quad (2·10)$$

排流點의 分極電位를  $E_0$ , 두 排流點間의 中央點( $x=l$ )의 分極電位를  $E_c$ 라 하면 境界條件 :

- (1)  $x=l$ 에서  $E_x = E_c, dE_x/dx = 0$   
 (2)  $x=0$ 에서  $E_x = E_0$  } 에서

$$\begin{aligned} A &= E_c \cosh \alpha l, \quad B = -E_c \sinh \alpha l \\ \therefore E_x &= E_c \cosh \alpha(l-x) \end{aligned} \quad (2·11)$$

이 된다. (2)의 條件과 위 式에서

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

이며, 따라서 두 陽極間의 分極電位分布式은

$$E_x = E_0 \cosh \alpha(l-x) / \cosh \alpha l \quad (2·12)$$

로 表示된다.

또한 陽極外側兩端表面의 경우 Fig. 2에서 境界條件으로서 試驗片의 길이를 無限長이라 看做하여  $x=\infty$ 일 때  $dE_x/dx=0$ 이라 하고  $x=0$ (排流點)에서  $E_x=E_0$ 라 하면

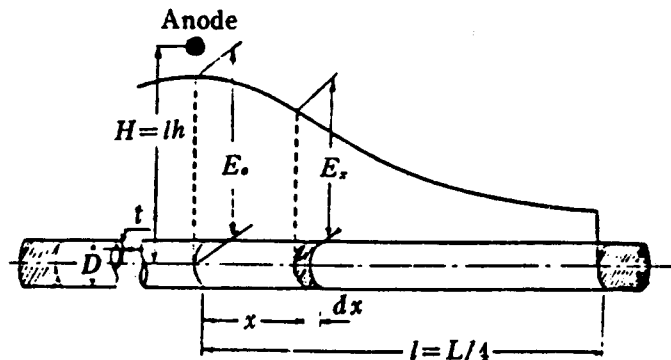


Fig. 2. Polarization potential on the pipe protected by cathodic protection

後者の 條件에서  $A = E_0$ 가 되고,

前者의 條件에서는 (2·10)式을  $x$ 로 微分하여 이 條件을 代入하면  $B = -A = -E_0$ 로 된다.

따라서 陽極外側兩端表面의 分極電位分布式은

$$E_x = E_o(\cos h \alpha x - \sin h \alpha x) = E_o e^{-\alpha x} \quad (2.13)$$

로 表示된다.

長大한 配管에 있어서는 管端이 全配管에 미치는 영향이 적고 管端이 無限長이 다니므로 陽極間의 表面과 같은 電位分布가 되는 것으로 看做한다.

## 2.2 所要防蝕電力

電源裝置의 所要電壓  $V_o$ 는 印加電流  $I_o$ , 全防蝕回路抵抗  $R_{o,H}$  및 陽極—被防蝕體間의 물의 理論的 分解電壓의 函數로 表示된다. 不溶性陽極으로 白金電極을 使用할 때 Pt-Fe 間의 물의 理論的 分解電壓은 1.85 V 정도이다. 그러므로 防蝕電流  $I_o$ (mA)를 흘리기 위한 所要電壓  $V_o$ (V)는

$$V_o = I_o R_{o,H} \times 10^{-3} + 1.85 \quad (V) \quad (2.14)$$

로 表示된다. 따라서 防蝕에 所要되는 電力  $P$ (mW)는

$$P = V_o I_o = I_o^2 R_{o,H} \times 10^{-3} + 1.85 I_o \quad (mW) \quad (2.15)$$

로 表示된다.

## 3. 實驗裝置 및 實驗方法

本研究에는 다음 3種의 實驗裝置를 使用하였다.

### 3.1 實驗裝置(I) 및 實驗方法

#### 3.1.1 實驗裝置

實驗裝置(I)은 물의 比抵抗을 特定한 값인 1950  $\Omega$ -cm 로 하였을 때 陽極의 設置位置에 따른 分極電位分布狀態, 電源裝置의 所要電壓 등을 調査하기 위한 裝置이다.

##### (1) 水 槽

試驗水槽는 240 cm  $\times$  120 cm  $\times$  120 cm 의 鋼板製 탱크로서 內面에 징크 리퀴 프라이머(ZRP)를 2회, 에폭시타알 塗料를 4회 칠하여 完全絶緣시켰으며, 實驗用水의 水深은 1.10 m 로 維持하였다.

##### (2) 試驗片

主試驗片으로는 外徑 2.72 cm, 두께 0.28 cm, 길이 2.10 m 의 配管用 炭素鋼管(KS D3507—SGP)을 採擇하였으며 兩端을 熔接 密閉하였다. 또한 兩端에 電流端子를 붙인 後 有効露出 長이가 2 m 의 兩端으로 부터 5 cm 씩은 試驗水槽의 內面과 같은 方法으로 絶緣시켰다.

試驗鋼管의 露出面은 와이어 브러쉬와 샌드페이퍼로 脫銹하고 아세톤으로 脫脂한 후에 試驗片을 水中에 浸漬시켰다.

또한 補助試驗片으로는 主試驗片과 같은 材質의 外徑 2.17 cm, 두께 0.28 cm, 길이 2 m(有効露出 長이)의 鋼管과 外徑 3.40 cm, 두께 0.32 cm, 길이 2 m(有効露出 長이)의 鋼管을 各各 1 個씩 2 個 採擇하고 主試驗片과 같은 要領으로 加工하였다.









으로 하여 自然電位가  $-680\text{ mV(SCE)}$  되게 하였다. 外部電源에서 防蝕電流를  $125\text{ mA/m}^2$  로 通電하여 約 20分 후에 分極電位가 安定된 후 各點의 分極電位를 測定하였고 測定이 끝난 후에는 電源을 끊고 물의 比抵抗를 調節하였다.

물의 比抵抗은 海水( $10^\circ\text{C}$ 에서  $28\ \Omega\text{-cm}$ )와 清水( $10^\circ\text{C}$ 에서  $7000\ \Omega\text{-cm}$ )를 適當量 混合시켜서  $28\sim 4800\ \Omega\text{-cm}$  範圍의 數種의 값이 되게 調節하였다. 그리고 各 比抵抗의 水中에서 試驗鋼管의 自然電位가  $-680\text{ mV(SCE)}$ 로 復極되게 數時間씩 기다린 후 通電하여 20分後에 各部의 分極電位를 測定하였다.

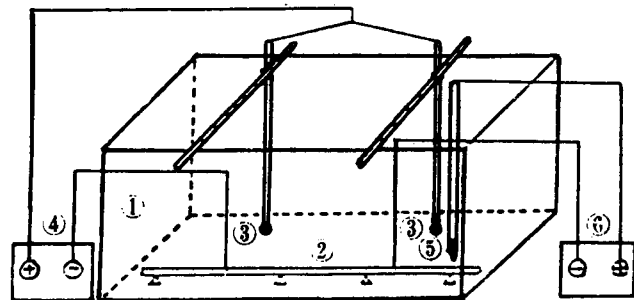
### 3.3 實驗裝置(Ⅲ) 및 實驗方法

#### 3.3.1 實驗裝置

實驗裝置(Ⅲ)은 實驗(I), (Ⅱ)에서 誘導한 諸實驗式의 精度를 確認하고, 被防蝕面積의 增加에 따른 電源裝置의 所要電壓의 實驗式을 補正하기 위한 裝置이다. 이 實驗에서는 實驗(I)에서 採擇한 試驗鋼管代身에 準實用規模의 大 試驗鋼管을 採擇하였으므로 水槽로서는 韓國海洋大學 室內물 ( $25\text{ m}$  길이  $\times$   $12\text{ m}$  幅  $\times$   $2\text{ m}$  깊이)을 利用하였다.

試驗鋼管으로는 準實用配管으로서 外徑  $3.4\text{ cm}$ , 두께  $0.32\text{ cm}$  이고 길이  $2400\text{ cm}$ (主試驗片) 및 같은 寸數의 길이  $1200\text{ cm}$ (補助試驗片)의 配管用炭素鋼管(KS D 3507-SGP)을 採擇하였으며 試驗鋼管의 加工과 表面處理는 實驗裝置(I)에서와 같이 하였다.

이 實驗裝置는 不溶性陽極을 試驗鋼管의  $1/4$ 分點 및  $3/4$ 分點에서 鋼管의 中心線과 같은 깊이(水深)에서 거리만을 調節할 수 있도록 設置하였고, 基準電極은 試驗鋼管에 沿하여 길이 方向으로 移動시킬 수 있도록 하였다. 測定機器는 實驗(I)에서 使用한 것들과 같으나 基準電極은 大型 飽和카로멜電極을 使用하였다.



① Water tank  
② Test piece  
③ Pt-insoluble electrode  
④ Electric power source  
⑤ Reference electrode(SCE)  
⑥ Potentiometer  
Fig. 5. Schematic drawing of experimental equipment(Ⅲ)

#### 3.3.2 實驗方法

試驗鋼管은 實驗(I)에서와 같은 方法으로 安定化시켰으며 試驗鋼管의 自然電位는 역시  $-680\text{ mV(SCE)}$ 이었다.

外部電源에서 防蝕電流를 通電하여 試驗鋼管表面의 分極電位가 安定되는 40分 후에 各點의 分極

電位를 測定하였고 測定이 끝난 후에는 電源을 끊고 다시 試驗鋼管 表面이 自然電位로 復極되기가 지 約 1時間씩 기다렸다. 이 때 물의 比抵抗을 1050, 1400 및 1950  $\Omega\text{-cm}$ 의 3 경우로 調節하여 各 各의 경우에 대하여 實驗하였다.

두 不溶性 陽極의 位置는 各各 試驗鋼管의 1/4分點과 3/4分點에서 試驗鋼管中心線으로부터의 거리가 1.5 m( $h=0.25$ ), 3.0 m( $h=0.5$ ), 4.5 m( $h=0.75$ ) 및 6.0 m( $h=1.0$ )로 되게 바뀌가면서, 印加 電流 320.28 mA( $i_0=125\text{ mA/m}^2$ )로 하여 試驗鋼管表面의 分極電位를 測定하였다. 또한 分極電位 測定位置는 排流點으로부터 1.5 m 間隔으로 하였다.

그리고 電源裝置의 所要電壓에 미치는 被防蝕面積의 영향을 調査하기 위하여 主試驗片 및 補助試驗片에 대해서 各各 平均印加電流密度를 50~175 mA/m<sup>2</sup>의 6段階로 바뀌가면서, 또 陽極의 높이率(거리率)을 0.25~1.0 까지 4段階로 變化시키면서 各各의 경우에 대하여 電源裝置의 所要電壓을 測定하였다.

#### 4. 分極電位 計算式의 補正

##### 4.1 分極電位에 關한 在來式의 檢討

實驗裝置(I)에서 試驗片의 寸數가  $D=2.72\text{ cm}$ ,  $t=0.28\text{ cm}$  및  $L=200\text{ cm}$  이고, 炭素鋼의 比抵抗이  $13.5 \times 10^{-6}\ \Omega\text{-cm}$  程度<sup>2)</sup> 이므로 單位 길이當의 金屬抵抗과 表面抵抗 및 減衰係數는 다음 式으로 表示된다.

$$r = \rho_s / \frac{\pi}{4} [D^2 - (D-2t)^2] \\ = (13.5/2.145) \times 10^{-6} \quad (\Omega/\text{cm}) \quad (4.1)$$

$$w = R/\pi D = R/8.5408 \quad (\Omega\text{-cm}) \quad (4.2)$$

$$\alpha = \sqrt{r/w} = 2\sqrt{\rho_s D / [D^2 - (D-2t)^2]} / \sqrt{R} \\ = 7.331 \times 10^{-3} / \sqrt{R} \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (4.3)$$

또한 (2.12)式을  $x$ 로 微分하여 (2.6)式에 代入하면

$$dE_x/dx = -\alpha E_0 \sin h \alpha(l-x) / \cos h \alpha l = -I_x \cdot r$$

이며 따라서 다음 式을 얻는다.

$$I_x = \frac{\alpha}{r} E_0 \sin h \alpha(l-x) / \cos h \alpha l \\ = (E_0 / \sqrt{rw}) \sin h \alpha(l-x) / \cos h \alpha l \quad (4.4)$$

排流點 근방( $x \rightarrow 0$ ,  $x \neq 0$ )에서  $I_x = \frac{1}{4} I_0$  이므로 (4.4)式은

$$\frac{1}{4} I_0 = (E_0 / \sqrt{rw}) \tan h \alpha l \quad (4.5)$$

이 된다. (4.1), (4.2) 및 (4.5)式에서

$$\sqrt{rw} = r/\alpha = 0.8584 \times 10^{-3} \sqrt{R} = \frac{4 E_0}{I_0} \tan h \alpha l \quad (4.6)$$

을 얻으며, 따라서 이 試驗鋼管의 分極電位分布式은 (2.12)式 및 (4.3)式에서

$$\begin{aligned}
 E_x &= E_0 \cos h \alpha(l-x) / \cos h \alpha l \\
 &= E_0 \cos h \{ [2\sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}} / \sqrt{R}] (l-x) \} \\
 &\div \cos h \{ [2\sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}} / \sqrt{R}] \cdot l \} \\
 &= E_0 \cos h \{ [7.331 \times 10^{-3} / \sqrt{R}] (l-x) \} \\
 &\div \cos h \{ [7.331 \times 10^{-3} / \sqrt{R}] \cdot l \}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

이 되고 이 때의 表面抵抗의 값은 (4.6)式에서

$$\sqrt{R} = 1.165 \times 10^{-3} (4 E_0 / I_0) \tan h \alpha l \quad (\Omega^{1/2}\text{-cm}) \tag{4.8}$$

으로 된다. 이 式은 前述한 假定과 같이 表面抵抗이 電流密度에 關係없이 全試驗鋼管表面에서 一定하다고 看做할 때의 表面抵抗의 값을 나타내는 式이다. 이 값을 求하기 위하여 (4.8)式에서 임의  $\sqrt{R}$ 의 값에 대한  $E_0/I_0$ 의 값을 求하니 Fig. 6 과 같이 圖示하였다. 그러므로  $E_0/I_0$ 의 값을 알면 Fig. 6에서 그 값에 該當하는  $\sqrt{R}$ 의 값을 알 수 있다.

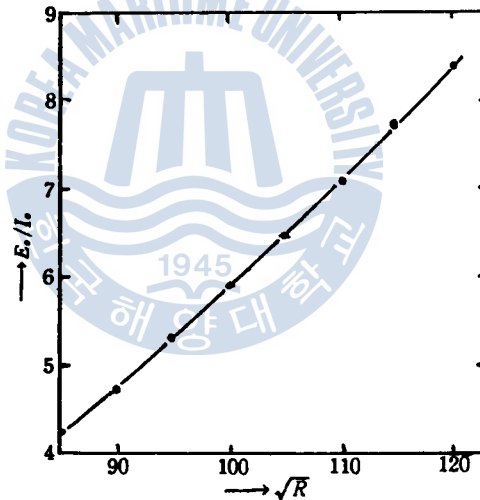


Fig. 6. Relations of  $E_0/I_0$  to  $\sqrt{R}$

Fig. 7은 本實驗裝置(I)에서 두 個의 陽極을 試驗鋼管의 1/4分點과 3/4分點 上方에 두고 陽極의 높이와 電流密度를 變化시켜 가면서 分極電位를 實測하고 그것을 圖示한 例이다.

實驗結果의 代表的인 경우로서 電流密度를  $150 \text{ mA/m}^2$ 로 하였을 때 陽極의 높이率에 대한  $E_0/I_0$  (實測值)와  $\sqrt{R}$  [(4.8)式에 의한 計算值], 그리고 이 實驗에서 測定한 試驗鋼管上의 分極電位와 (4.7)式으로 計算한 分極電位를 Table 2에 比較하여 表示하였다. 이 表에서 分極電位の 實測值와 計算值의 兩者間에는 큰 差異를 보이고 있다. 이것은 表面抵抗이 試驗鋼管 各部 電流密度와 關係없이 一定하다고 한 假定의 모순에 基因한 것으로 思料된다. 그러므로 (4.7)式을 補正하기 위해서는 表面抵抗이 各 測定點의 電流密度에 따라 變하는 것으로 보아야 하며, 이를 求하기 위하여 電流密度를 陽極의 높이率 및 排流點에서 測定點까지의 거리의 函數로 表示하기로 한다.

또한 排流點에서의 分極電位는 平均電流密度와 陽極의 높이率 및 물의 比抵抗의 函數로 表示하기.

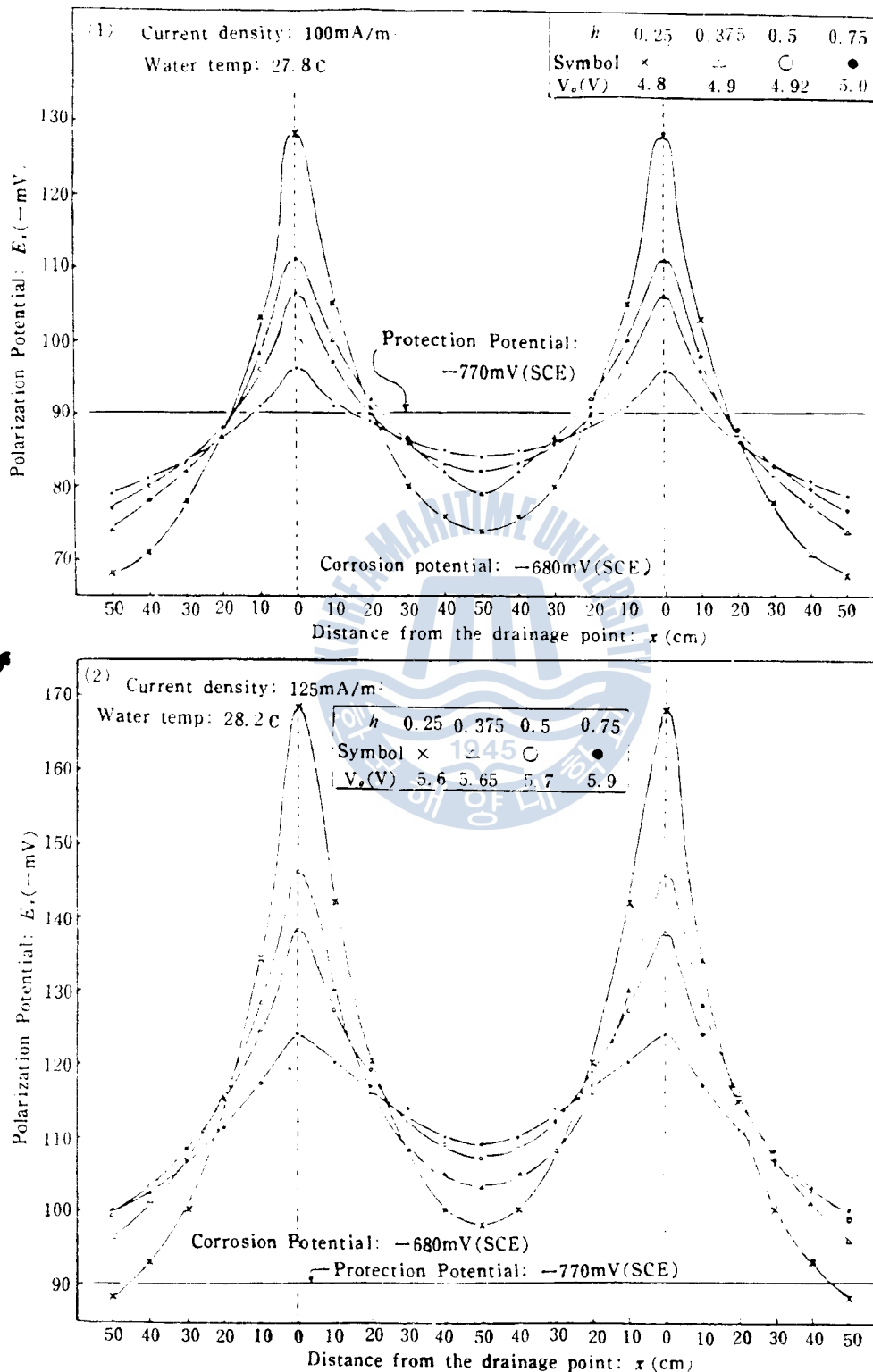


Fig. 7. Cathodic polarization potentials(two anodes:  $(1/4) \times L$ ,  $(3/4) \times L$  upper points)

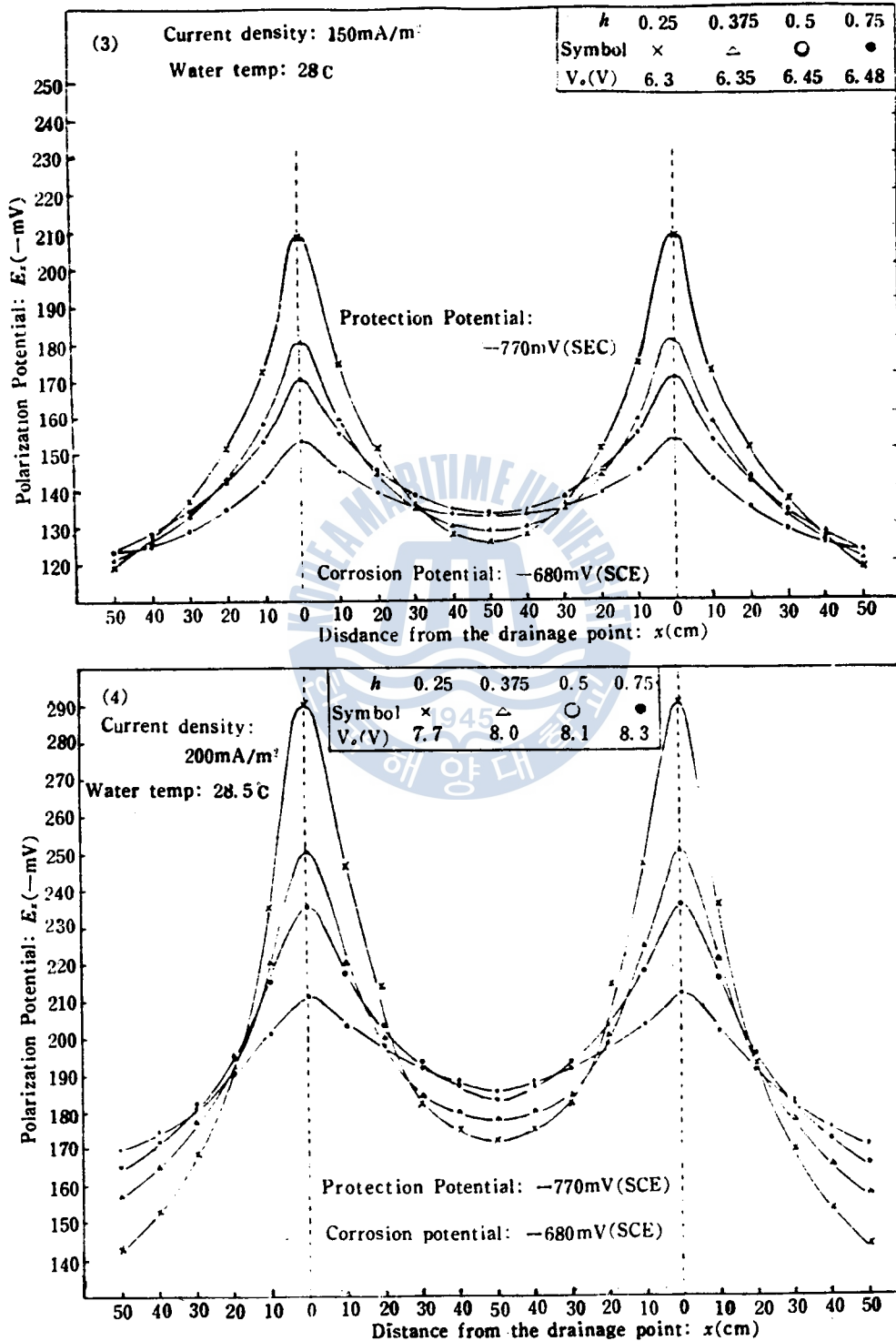
Fig. 7. Cathodic polarization potentials(two anodes;  $(1/4)\times L$ ,  $(3/4)\times L$  upper points)

Table 2. Cathodic polarization potentials ( $i_0 = 150 \text{ mA/m}^2$ )

$h = H/L$	$E_0/E_c \times \sqrt{R} \times 10^3$	$M/x$	0	10	20	30	40	50
0.25	8.1568 $118.3 \times 10$	M*	208	174	151	136	128	126
		C*	208	207.9996	207.9994	207.9994	207.9991	207.9990
0.375	7.058 $109.9 \times 10$	M	180	159	144	135	130	129
		C	180	179.99996	179.9994	179.9992	179.9990	179.9989
0.5	6.667 $106.8 \times 10$	M	170	155	145	138	134	134
		C	170	169.9996	169.9994	169.9992	169.9990	169.9989
0.625	6.2745 $103.6 \times 10$	M	160	149	142	137	134	134
		C	160	159.9993	159.9993	159.9992	159.9990	159.9989
0.75	6.0 $101.3 \times 10$	M	153	145	139	135	134	133
		C	153	152.9996	152.9994	152.9992	152.9990	152.9990
1.0	5.647 $98.3 \times 10$	M	144	139	135	133	132	132
		C	144	143.9996	143.9994	143.9992	143.9990	143.9990

\* M: Measured polarization potentials (-mV)      C: Calculated polarization potentials (-mV)

고 한다.

#### 4.2 表面抵抗의 實驗式

表面抵抗은 一定한  $i_0$  와 一定한  $h$  下에서 (4.7) 式의  $E_0$  와  $E_x$  에 實測值를 代入하여 求하고, 다시 이  $R$  와 一定한  $h$  下의 關係를 求하면 一定한  $i_0$  下에서의  $R$  의 一般式이 求해진다.

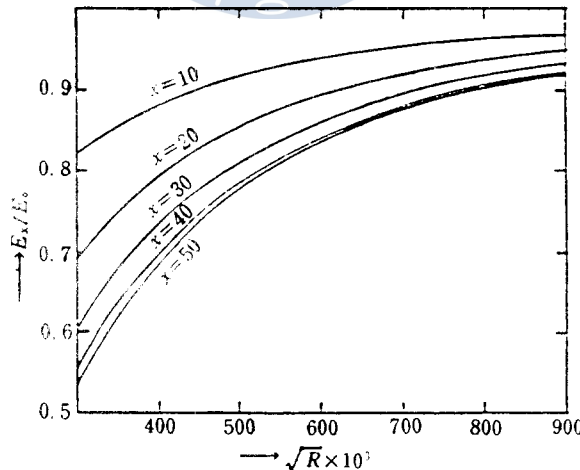


Fig. 8. Relations of  $E_x/E_0$  to  $\sqrt{R}$

代表的인 경우로서  $i_0 = 150 \text{ mA/m}^2$  일 때 각  $h$  의 값에 대한  $R$  을 求하기 위해서 一定 測定點에서 의  $\sqrt{R}$  에 대한  $E_x/E_0$  의 關係를 圖示하면 Fig. 8 과 같이 된다. 이 그림에서 一定한  $h$  에 대한  $\sqrt{R}$  의 값을 求하고 이  $\sqrt{R}$  와  $x$  와의 關係를 圖示하면 Fig. 9 와 같이 直線의으로 된다. 그러므로 그



般式을

$$\sqrt{R} \times 10^5 = ax + b \quad (4.9)$$

로 表示한다. 또 Fig. 9의 各 直線에서  $a$ 와  $b$ 를 求하고 이를  $h$ 에 대하여 圖示하면 Fig. 10와 같이 거의 直線으로 나타나므로 (4.9)式은

$$\sqrt{R} \times 10^5 = (ch+d)x + (eh+f) \quad (4.10)$$

으로 表示할 수 있다. (4.10)式의  $c, d, e$  및  $f$ 를 Fig. 9에서 求한  $h$ 에 대한  $a, b$ 의 값을 代入하여 最小自乘法으로 決定하면 表面抵抗의 實驗式은 다음과 같이 된다.

$$\sqrt{R} \times 10^5 = (1.3869h + 0.1306)x + 629.7737h + 156.1420 \quad (\Omega^{1/2}\text{-cm}) \quad (4.11)$$

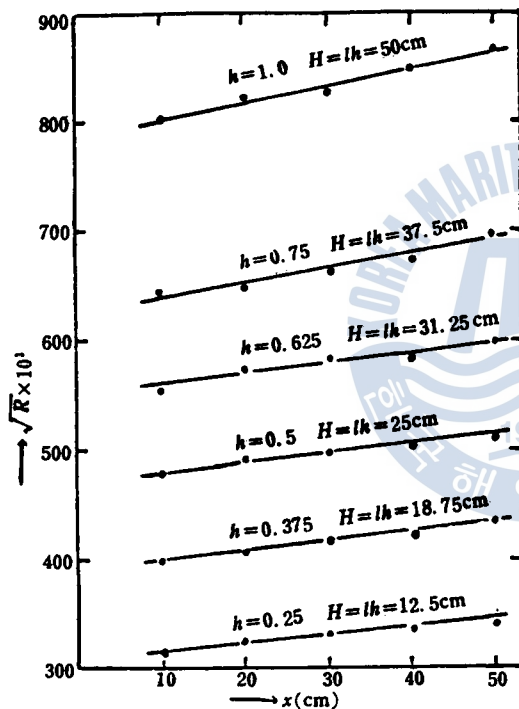


Fig. 9. Relations of  $R$  to  $x$

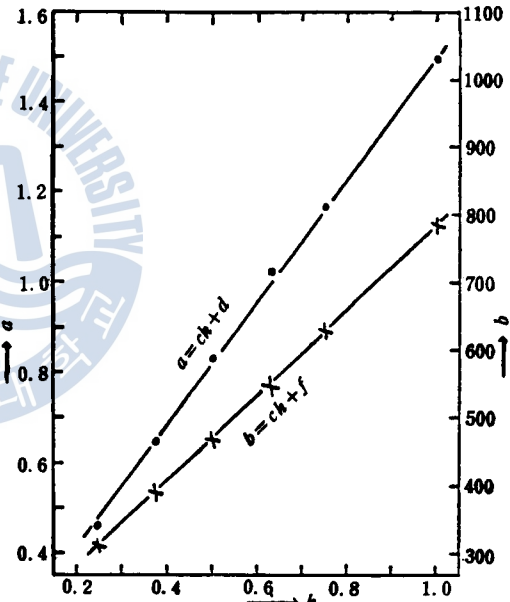


Fig. 10. Relations of  $a$  and  $b$  to  $h$

#### 4.3 排流點에서의 分極電位の 實驗式

앞서 說明한 바와 같이 排流點에서의 分極電位는 平均電流密度와 陽極의 높이率 및 물의 比抵抗의 函數로 表示되어야 한다. 그러나 여기에서 우선 물의 比抵抗이  $1950\Omega\text{-cm}$ 로 一定한 경우에 대하여 檢討한다.

一定한 陽極의 높이率에 대한 平均電流密度와 排流點에서의 分極電位の 關係는 實測值(Fig. 7 參照)에 의하여 Fig. 11와 같이 直線의 形式으로 나타나므로 다음과 같이 表示한다.

$$E_o = gi_o + k \quad (4.12)$$

(4.12)式의  $g$ 와  $k$ 는  $h$ 에 대하여 Fig. 12와 같은 關係가 있으므로 이들 값을 最小自乘法에 의하

의 求하면 排流點의 分極電位는

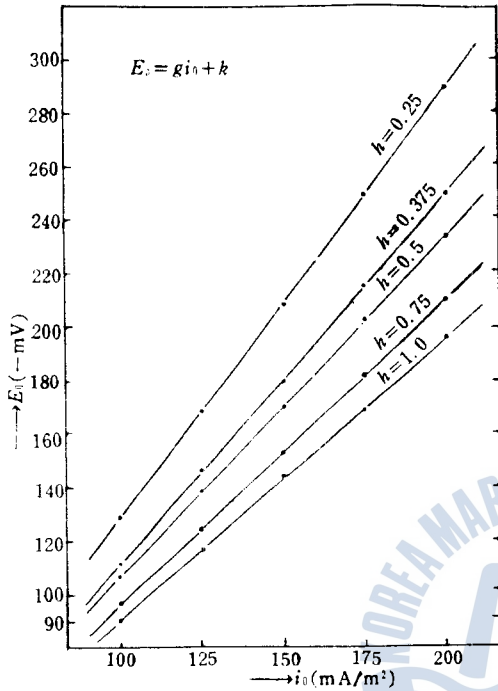


Fig. 11 Relations of  $E_s$  to  $i_0$

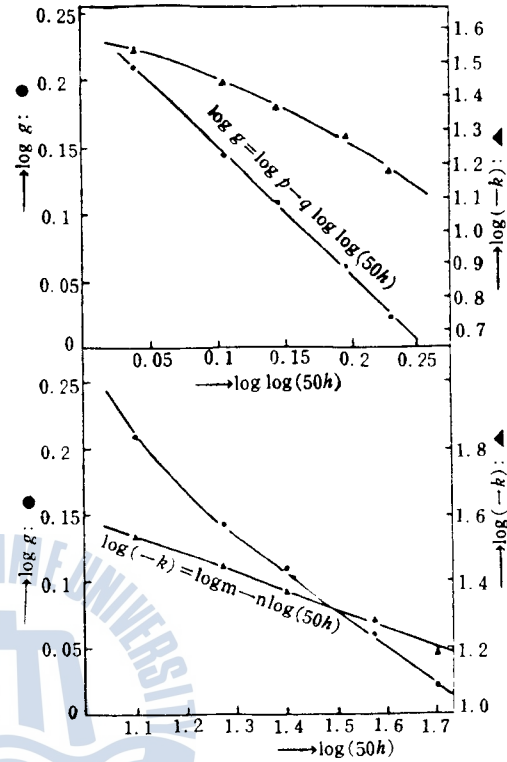


Fig. 12. Relations of  $g$  and  $k$  to  $h$

$$E_s = [1.7667/\log(50h)^{0.9599}]i_0 - 146.4624/(50h)^{0.9599} \quad (\text{mV}) \quad (4.13)$$

로 된다.

#### 4.4 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는 (4.7)式의  $\sqrt{R} \times 10^3$  및  $E_0$ 를 (4.11)式 및 (4.13)式으로 表示하면 實測値와 比를 比較할 事이다. 이렇게 求한 分極電位의 計算値를 補正計算値라 한다.

附錄 Table 1은 本實驗(1)의 分極電位의 實測値와 그 補正計算値 및 實測値에 對한 補正計算値의 比를 示한 事이다. 이 表에 의하면 補正計算値의 實測値에 對한 誤差는  $\pm 4\%$  以內임을 示해 준다. 또 參考의 爲 두 補助實驗에서의 實測値에 對한 그 補正計算値의 比를 附錄 Table 2에 表示한 바와 같이  $\pm 7\%$  以內의 精度를 나타낸다.

本實驗式들은  $l=50$  cm인 場合에서 求하였으므로 (4.7)式 및 (4.11)式을 任意의 길이의 鋼管에 對하여 適用할 때에는 次式에서 보이는 바와 같이 (4.7)式의  $\alpha$  및 (4.11)式의  $x$ 의 係數를  $50/l$ 으로 正規化(normalizing)시켜야 된다.

$$E_s = E_0 \cos h \alpha \left( 50 - \frac{50}{l} x \right) / \cos h \alpha 50$$

$$= \frac{E_0 \cos h \left\{ [2\sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}} / \sqrt{R}] \left( 50 - \frac{50}{l} x \right) \right\}}{\cos h [100\sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}} / \sqrt{R}]} \quad (\text{mV}) \quad (4.7')$$

$$\sqrt{R} \times 10^3 = (1.3869h + 0.1306) - \frac{50}{l}x + 629.7737h + 156.1420 \quad (\Omega^{1/2}\text{-cm}) \quad (4 \cdot 11')$$

#### 4.5 물의 비저항을考慮한 排流點의 分極電位の 實驗式

實驗(I)에서는 물의 비저항이  $1950\Omega\text{-cm}$ 인 一定한 경우에 대해서 分極電位分布式을 求하였으나 分極電位는  $\rho$ 의 函數이기도 하므로 이 영향을 考慮한 電位分布式으로 補正하여야 한다.

實驗(II)에서는 一定한 印加電流  $125\text{mA/m}^2$  下에서 물의 비저항을  $28\sim 4800\Omega\text{-cm}$ 의 數段階로 變化시켜 물의 비저항에 따른 分極電位分布를 調査하였다. 그 結果는 Fig. 13 과 같다.

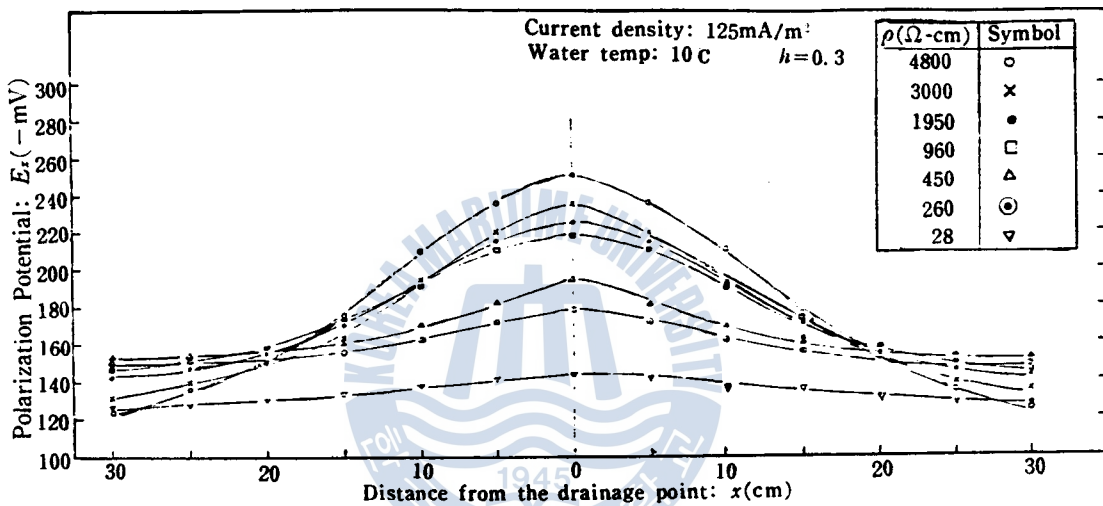


Fig. 13. Cathodic polarization potentials(one anode:center)

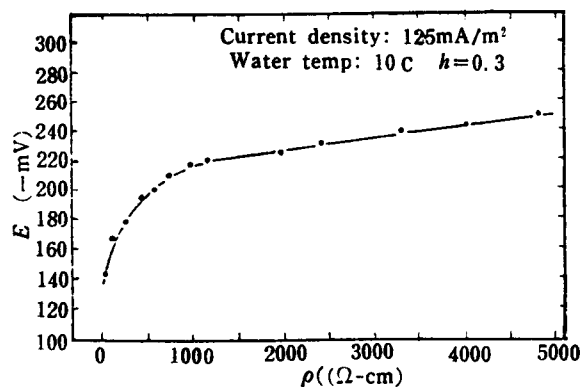


Fig. 14. Relations of  $E$  to  $\rho$

이에 의하면  $28\sim 430\Omega\text{-cm}$  範圍에서는 分極電位分布狀態가 良好하므로 陽極의 適正位置의 영향이 거의 없다. 그러나 물의 비저항이  $960\sim 4800\Omega\text{-cm}$ 의 範圍에서는 分極電位分布狀態가 不良하므로 陽極을 適正位置에 設置한다는 것이 重要な 問題임을 알 수 있다.

또한 이 實驗에서 물의 비저항의 變化에 따른 排流點의 分極電位の 變化는 Fig. 14 와 같다. 즉 물

의 比抵抗이 960~4800Ω·cm 인 範圍에서 排流點의 分極電位의 값( $E$ )은 完滿하게 直線의 變化的 變화를 示할 수 있다. 故로 一般式은

$$E = \alpha\rho + \beta \quad (4.14)$$

로 表示할 수 있으며  $\alpha$  및  $\beta$ 는 測定值를 用서 最小自乘法으로 決定하면 다음 式으로 表示된다.

$$E = 0.0083433\rho + 209.87 \quad (\text{mV}) \quad (4.15)$$

(4.15)式은 實驗(I)에서 求한 排流點의 分極電位式 즉 (4.13)式의 適用치인 鋼의 比抵抗을 考慮한 排流點의 分極電位의 實驗式은

$$E' = E + 0.0083433(\rho - 1950) \quad (\text{mV}) \quad (4.16)$$

但,  $E$ :  $\rho = 1950\Omega\text{-cm}$  일 때의 排流點의 分極電位

를 示할 수 있다.

$E$ 의 求한  $E'$ 의 比抵抗은 第3表의 表示한 바와 같이  $\rho = 1200\sim 2700\Omega\text{-cm}$ 에서  $\pm 5\%$  以內,  $\rho = 470\sim 3400\Omega\text{-cm}$ 에서도  $\pm 10\%$  以內의 變화를 示하는데 不適當하다.

그러나  $\rho = 1200\sim 2700\Omega\text{-cm}$  라면 實驗(I)에서 誘導한 實驗式을 그대로 使用해도 큰 支障은 없을 것으로  $\rho$ 의 影響을 考慮하면  $\rho = 960\sim 4800\Omega\text{-cm}$ 의 範圍에서 鋼管表面의 分極電位의 實驗式은 實驗(I)에서 誘導한 分極電位의 實驗式에  $E$  대신  $E'$ 를 代入해서 補正하면 다음 式으로 表示된다.

$$E_s = E' \cos h \left\{ 2 \sqrt{\frac{\rho D}{D - (D - 2t)}} \sqrt{\frac{1}{R}} \cdot \left( 50 - \frac{50}{l} x \right) \right\} + \cos h \left\{ 100 \sqrt{\frac{\rho D}{D - (D - 2t)}} \sqrt{\frac{1}{R}} \right\} \quad (\text{mV}) \quad (4.17)$$

$$E' = \left[ 1.7667 (\log 50 h) \right]^{-0.5} i_0 - \left[ 146.4624 / (50 h) \right]^{-0.5} + 0.0083433(\rho - 1950) \quad (\text{mV}) \quad (4.18)$$

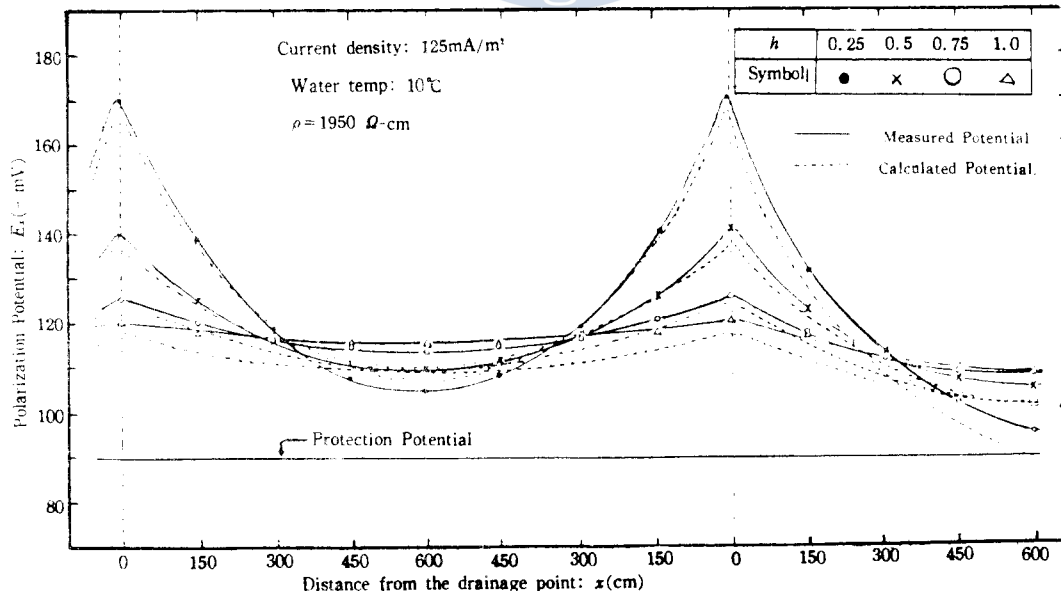


Fig. 15. Cathodic polarization potentials(two anodes:(1/4)L, (3/4)L)

實驗(Ⅲ)에서 印加電流가 320.28 mA ( $i_0 = 125 \text{ mA/m}^2$ )일 때 各 물의 比抵抗에 대한 準實用規模의 試驗鋼管表面의 實測分極電位分布와 위 實驗式으로 計算한 分極電位分布를 附錄 Table 4에 表示하였다. 또 그 代表的인 例를 Fig. 15에 圖示하였다.

여기에서 實測値와 計算値는  $\pm 6.9\%$  以內의 精度로 一致함을 알 수 있다.

## 5. 所要電壓과 所要電力

### 5.1 電源裝置의 所要電壓과 防蝕電力의 實驗式

電源裝置의 所要電壓은 印加電流와 全防蝕回路抵抗 및 陽極—被防蝕體間의 물의 理論的 分解電壓의 函數로 表示된다. 이때 被防蝕體의 表面積이 增加하면 回路抵抗이 減少한다. 그러나 여기에서는 우선 被防蝕面積이 一定한 경우에 대하여 所要電壓의 實驗式을 求하기로 한다.

鐵鋼의 防蝕에 不溶性 陽極으로 白金電極을 使用할 때 Pt-Fe 間의 물의 理論的 分解電壓이 1.85 V<sup>(2)</sup>이므로 印加電流를 흘리기 위한 所要電壓 및 全防蝕回路抵抗은 다음 式으로 表示된다.

$$V_0 = I_0 R_{pH} \times 10^{-3} + 1.85 \quad (\text{V}) \quad (5.1)$$

$$R_{pH} = \{(V_0 - 1.85) / I_0\} \times 10^3 \quad (\Omega) \quad (5.2)$$

實驗(I)에서 不溶性陽極의 높이와 全防蝕電流에 대하여 所要電壓은 Table 3과 같으므로 이를 (5.2)式에 代入하여 全防蝕回路抵抗과 그 平均値를 求하면 Table 4와 같이 된다. Fig. 16은 Table 4의 右半을 圖示한 것이다.

Table 3. Relations of  $V_0$  to  $h$  and  $I_0$ .

$50h$	$I_0$ (mA)	17.08	21.35	25.62	29.89	34.16
12.5		4.8 V	5.6	6.3	6.8	7.7
18.75		4.9	5.65	6.35	7.0	8.0
25		4.92	5.7	6.45	7.2	8.1
37.5		5.0	5.9	6.48	7.3	8.3
50		5.1	5.95	6.5	7.4	8.5

Table 4. Relations of  $R_{pH}$  to  $h$  and  $I_0$ .

$50h$	$I_0$ (mA)	17.08	21.35	25.62	29.89	34.16	Mean $R_{pH}$	$\log 50h$
12.5		172.7	175.6	173.6	163.6	171.2	171.7	1.096
18.75		179.2	177.7	175.6	172.2	180.0	176.9	1.273
25.0		179.7	180.3	179.5	178.9	182.9	180.2	1.397
37.5		184.4	189.6	180.7	182.3	188.8	185.1	1.574
50.0		190.2	192.0	181.4	185.6	194.6	188.7	1.698

Fig. 16에 의하면  $R_{pH}$ 는  $\log(50h)$ 에 比例하므로

$$R_{pH} = \{A + B \log(50h)\} \rho = A\rho + B\rho \log(50h)$$

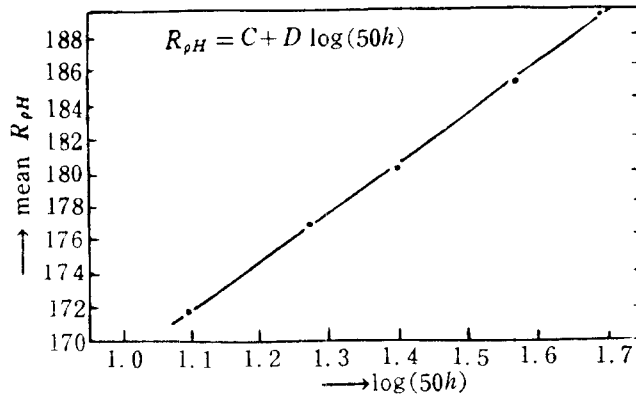


Fig. 16. Relations of mean  $R_{pH}$  to  $h$

$$= C + D \log(50h) \quad (5.3)$$

이 되며,  $C, D$ 를 Table 4의 數值에 의하여 最小自乘法으로 決定하면  $C = 141.03987$ ,  $D = 28.047832$  이 된다. 이때  $28^\circ\text{C}$ 에 있어서의 물의 比抵抗이  $1950 \Omega\text{-cm}$  이므로

$$A = C/\rho = 141.03987/1950 \approx 0.0723 \quad (5.4)$$

$$B = D/\rho = 28.047832/1950 \approx 0.0144 \quad (5.5)$$

이다. 이들을 (5.3)式에 代入하면 全防蝕回路抵抗은

$$R_{sH} = \{0.0723 + 0.0144 \log(50h)\} \rho \quad (\Omega) \quad (5.6)$$

이 되고 이를 (5.1)式에 代入하면 所要電壓은

$$V_s = I_s \{0.0723 + 0.0144 \log(50h)\} \rho \times 10^{-3} + 1.85 \quad (\text{V}) \quad (5.7)$$

이 된다. 以上式으로 計算되는 값과 實測値는 附錄 Table 5에 보인 바와 같이 實驗(I)에서 採擇한 높아후과 印加電流의 全範圍에서  $\pm 3\%$  以內의 差異를 나타낸다.

또한 2種의 補助實驗에서 所要電壓의 實測値와 計算値도 附錄 Table 6과 같이 역시  $\pm 3\%$  以內의 精度로 一致함을 알 수 있다.

크리크 防蝕에 必要하는 電力은 다음과 같이 表示된다.

$$P = V_s I_s = I_s^2 \{0.0723 + 0.0144 \log(50h)\} \rho \times 10^{-3} + 1.85 I_s \quad (\text{mW}) \quad (5.8)$$

印加電流는 所要防蝕電流密度의 實驗値를 使用한다면 그 電流密度와 被防蝕面積의 相乘積으로 求하여 다음과 같이 活用할 수 있다.

$$I_s = i \pi D l \times 4 \times 10^{-3} \quad (\text{mA}) \quad (5.9)$$

### 5.2 電源裝置의 所要電壓과 防蝕電力에 미치는 被防蝕面積의 영향

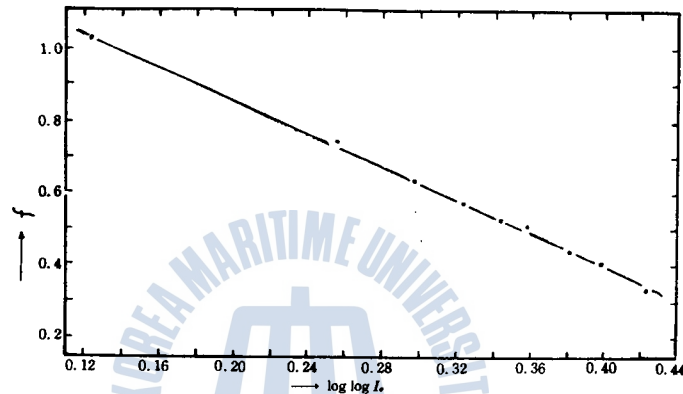
實驗(I)에서 用いた 電源裝置의 所要電壓의 實驗式은 被防蝕面積이 一定한 小規模의 試驗鋼管에 대한 것이었는데 被防蝕面積이 增加할 때에는 全回路抵抗이 減少하므로 그 영향을 考慮하여야 한다.

따라서 任意의 被防蝕面積의 試驗鋼管의 경우는 實驗(I)에서의 電源裝置의 所要電壓實驗式의 印加電流項에 被防蝕面積係數를 考慮하여야 한다. 그러므로 所要電壓式은

$$V_s = I_s f \{0.0723 + 0.0144 \log(50h)\} \rho \times 10^{-3} + 1.85 \quad (\text{V}) \quad (5.10)$$

Table 5. Relations of  $V_o$  to  $I_o$  ( $\rho=1950\Omega\text{-cm}$ ,  $h=0.5$ )

test piece	main T. P. of exp. (I)	aux. T. P. of exp. (II)				main T. P. of exp. (III)			
$i_o$ (mA/m <sup>2</sup> )	125	50	75	100	125	75	100	125	175
$I_o$ (mA)	21.35	64.05	96.08	128.11	160.14	192.2	256.2	320.28	448.38
$V_o$ (V)	5.8	10.5	12.8	15	17	19.5	22	25	28.5
prot. area (m <sup>2</sup> )	0.1708	1.28112				2.56224			

Fig. 17. Relations of  $f$  to  $\log \log I_o$ 

이 된다. 여기에서 實驗(I)의 主試驗片 및 實驗(III)의 主, 補助 두 試驗片에 대하여 印加電流에 대한 電源裝置의 所要電壓을 測定한 結果 Table 5와 같이 되었다. 그러므로 Table 5의 數值를 (5·10)式에 代入하여  $I_o$ 에 대한  $f$ 의 關係를 求하면 Fig. 17과 같이  $f=a \log \log I_o+b$ 의 一般式으로 表示된다. 이것을 最小自乘法으로 求하면

$$f = -2.3980884 \log \log I_o + 1.3531444 \quad (5\cdot11)$$

로 된다. (5·11)式을 (5·10)式에 代入하면 電源裝置의 所要電壓의 實驗式은 다음과 같이 補正된다.

$$V_o = I_o(1.3531444 - 2.3980884 \log \log I_o) \times \{0.0723 + 0.0144 \log(50h)\} \times \rho \times 10^{-3} + 1.85 \quad (\text{V}) \quad (5\cdot12)$$

$\rho=1950\Omega\text{-cm}$  일 때의 所要電壓의 實測值에 대한 (5·12)式의 計算值의 差는 附錄 Table 7과 같이  $\pm 3\%$  以內임을 나타낸다. 또한  $\rho=1050, 1400$  및  $1950\Omega\text{-cm}$ 의 各 경우, 準實用配管의 主試驗鋼管에 대한 所要電壓의 實測值와 計算值의 差異도 附錄 Table 8과 같이  $\pm 4\%$  以內임을 나타낸다.

따라서 電源裝置의 所要電力( $P$ )의 實驗式은 (5·12)式과 (5·8)式에서

$$P = V_o I_o = I_o^2(1.3531444 - 2.3980884 \log \log I_o) \times \{0.0723 + 0.0144 \log(50h)\} \times \rho \times 10^{-3} + 1.85 I_o \quad (\text{mW}) \quad (5\cdot13)$$

$$I_o = 4\pi D l i_o \times 10^{-4} \quad (\text{mA}) \quad (5\cdot14)$$

으로 表示된다.



### 6. 最適防蝕條件

最適防蝕條件이란 주어진 被防蝕體에 對하여 最少의 費用으로 最大의 防蝕效果를 얻는 條件을 뜻하며 防蝕設備의 架設費用은 周圍環境에 따라 變하며 豫測하기 困難하므로 本論文에서는 被防蝕體의 全表面을 防蝕하는 데 所要되는 防蝕電力을 最少로 하는 條件을 다루기로 한다. 鐵鋼의 防蝕電位가  $-770 \text{ mV}^{24,26}$  (SCE)이고 自然電位가  $-680 \text{ mV}$  (SCE)이므로 全鋼管이 防蝕되기 위해서는 적어도 두 陽極間의 試驗鋼管의 中央點이 다음과 같이 陰分極되어야 한다.

$$E_t = -770 - (-680) = -90 \quad (\text{mV}) \quad (6.1)$$

(4.17)式에  $x=l$ 을 代入하면

$$E_t = E'_o / \cos h [100 \sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}} / \sqrt{R}] \quad (\text{mV}) \quad (6.2)$$

윗式에서 表面抵抗은 (4.11')式에  $x=l$ 을 代入해서

$$\begin{aligned} \sqrt{R} \times 10^3 &= (1.3869h + 0.1306) \cdot 50 \\ &+ 629.7737h + 156.1420 \quad (\Omega^{1/2}\text{-cm}) \end{aligned} \quad (6.3)$$

이 되고  $E'_o$ 는 (4.18)式 그대로

$$\begin{aligned} E'_o &= [1.7667 / \{\log(50h)\}^{0.9582}] i_o - [146.4624 / (50h)^{0.5688}] \\ &+ 0.0083433(\rho - 1950) \quad (\text{mV}) \end{aligned} \quad (6.4)$$

을 使用한다. 最少電力으로 防蝕할 수 있는 陽極의 높이率을 求하기 위해서는 (6.1)~(6.4)式에서  $i_o$ 의  $h$  依存性을 求하고 (5.4)式에서  $I_o$ 를 求한 다음 (5.13)式에서  $P$ 의  $h$  및  $\rho$ 의 依存性을 求한다. 그 다음에  $\frac{\partial P}{\partial h} = 0$ 의 最少條件에서  $h$ 의  $\rho$  依存性을 求하면 各 물의 比抵抗에 따른 最少電力으로 防蝕할 수 있는 陽極의 높이率이 된다. 이 때의  $V_o$ 와  $I_o$ 를 求하면 그것이 要求되는 電源裝置의 最少容量이 될 것이다. 그러나 이 計算은 대단히 複雜하므로 各 防蝕條件을 代入하여 數值計算해서 檢討해 보기로 한다.

이를 數值計算하기 위하여 (5.14)式 및 (5.13)式을 써서 最少防蝕電力  $P_{(min)}$ 와 最少防蝕電流密度  $i_{o(min)}$ 와의 關係式

$$\begin{aligned} P_{(min)} &= (4\pi D l i_{o(min)} \times 10^{-4})^2 \{1.3531444 - 2.3980884 \\ &\times \log \log(4\pi D l i_{o(min)} \times 10^{-4})\} \cdot \{0.0723 + 0.0144 \log(50h)\} \\ &\times \rho \times 10^{-3} + 1.85 \times 4\pi D l i_{o(min)} \times 10^{-4} \quad (\text{mW}) \end{aligned} \quad (6.5)$$

을 求한다.

이 때 最少防蝕電流密度는 (6.3)式과 (6.1)式을 (6.2)式에 代入하여

$$90 = E'_o / \cos h [100 \sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}} / (699.12h + 162.67)] \quad (6.6)$$

을 얻고 이 (6.6)式과 (6.4)式에서  $E'_o$ 를 消去하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} i_{o(min)} &= \left[ 25.4712 \left\{ \exp\left( \frac{100 \sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}}}{699.12h + 162.67} \right) \right. \right. \\ &\left. \left. + \exp\left( \frac{-100 \sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}}}{699.12h + 162.67} \right) \right\} + \{82.9017 / (50h)^{0.5688}\} \right] \end{aligned}$$

$$-0.0047225(\rho - 1950)] \times \{\log(50h)\}^{0.9582} \quad (\text{mA/m}^2) \quad (6.7)$$

### 6.1 實驗(I)의 試驗片에 대한 最適防蝕條件

두 陽極을 使用한 實驗(I)의 主試驗片의 경우, (6.5)式과 (6.7)式에 여러가지  $\rho$  및  $h$  값을 代入하여 所要防蝕電力을 計算하고 그 結果에 의하여 一定한  $\rho$ 에 대한 所要防蝕電力과  $h$ 의 關係를 圖示하면 Fig. 18과 같이 된다. 이 그림에 의하면 물의 比抵抗이 큰 경우에는 陽極의 設置位置의 適正如否가 所要防蝕電力에 크게 영향을 미치나 海水와 같이 물의 比抵抗이 적은 경우에는 이 영향이 거의 없다.

또 最少電力을 要하는 陽極의 높이率은 물의 比抵抗에 따라  $h=0.5\sim 0.85$ 의 範圍이고,  $\rho$ 가 커짐에 따라  $h$ 가 커지는 傾向이 있다.

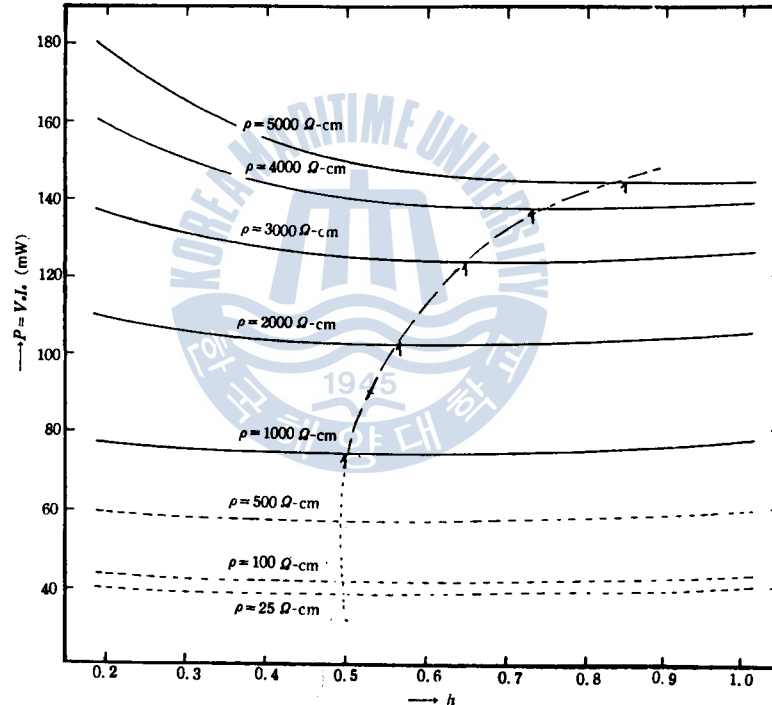


Fig. 18. Relations of  $P$  to  $h$  (T. P. : 2.72 cm  $D.$  × 0.28 cm  $t.$  × 200 cm  $L.$ )

### 6.2 實驗(II)의 試驗片에 대한 最適防蝕條件

實驗(II)에 使用된 準實用規模의 主試驗片의 경우, 6.1에서와 같은 方法으로 여러가지  $\rho$  및  $h$  값에 대한 所要防蝕電力을 計算하여 圖示하면 Fig. 19와 같이 된다. 이 그림에 의하면 最少防蝕電力을 要하는 높이率은 물의 比抵抗 1000~5000  $\Omega$ -cm 範圍에서  $h$ 가 0.35~0.73의 範圍이고  $\rho$ 의 增加에 따라  $h$ 가 增加함을 알 수 있다. 그리고 前述한 Fig. 18과 Fig. 19를 比較할 때 最少電力을 要하는 陽極의 높이率은 被防蝕面積이 큰 鋼管에 대한 것이 被防蝕面積이 적은 것에 比하여 각아지는 것 을 알 수 있다. 이 點에 대해서는 다음 6.3에서 再論한다.

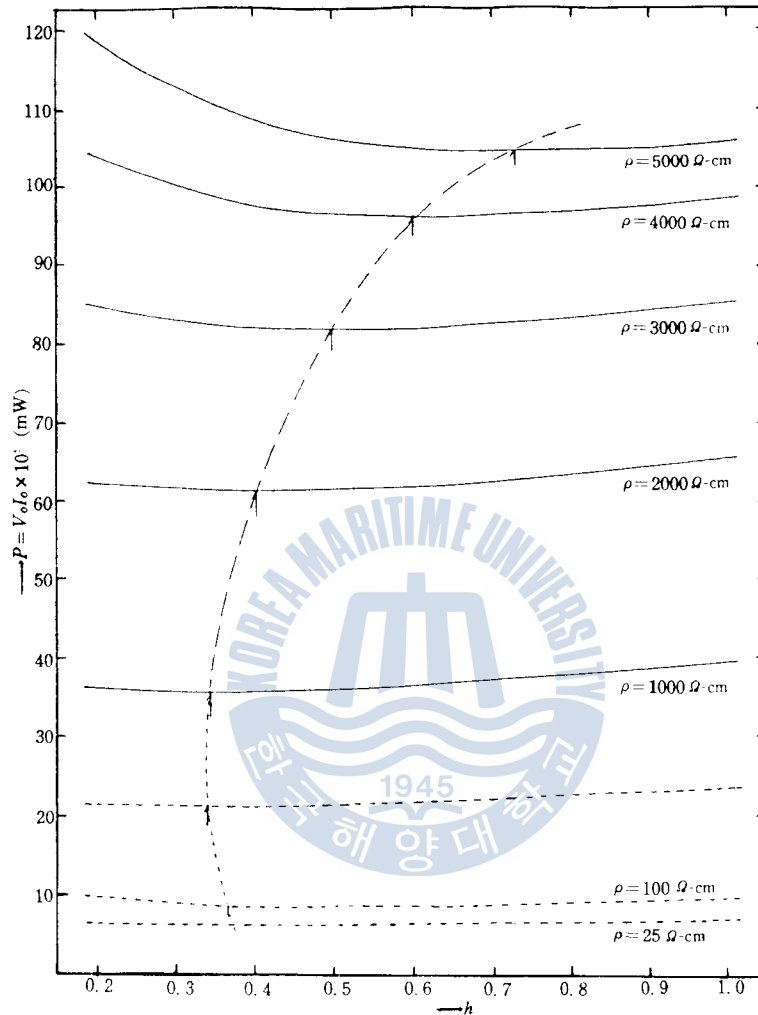


Fig. 19. Relations of  $P$  to  $h$  ( $T, W$ : 3.4 cm  $D$ ,  $\times$  0.32 cm  $t$ ,  $\times$  2460 cm  $L$ .)

6.3 被防蝕面積의 增加에 따른 最適防蝕條件의 適用限界

被防蝕面積의 增加에 따른 最少防蝕電力式(6.5式)의 適用限界를 求하기 위하여 물의 比抵抗을 2000 $\Omega$ -cm로 하고  $D=2.72$  cm,  $t=0.28$  cm,  $\rho_s=13.5 \times 10^{-6}$   $\Omega$ -cm인 鋼管의 長이를 20m에서 240m까지 變更시켜서 被防蝕面積을 增加시켜 갔을 때의 最適防蝕條件을 計算하여 Fig. 20에 圖示하였다.

이 그림의 의하면  $L$ 가 200m( $l=5000$  cm)까지는 最少電力을 要하는 陽極의 높이率은 鋼管의 長이가 長어질수록, 즉 被防蝕面積이 增加할수록 減少함을 나타낸다. 그러나  $L$ 가 200m( $l=5000$  cm)以上에서는 最少電力을 要하는 陽極의 높이率을 求하기 困難하다. 이것은 實驗式인 (5.11)式이  $f=0.1$ 以下까지 成立된다고 볼 수 없기 때문이다.

따라서 本研究의 最適防蝕條件으로서의 實驗式 (6.5)式과 (6.7)式의 適用限界는  $D=2.72$  cm,  $t=$

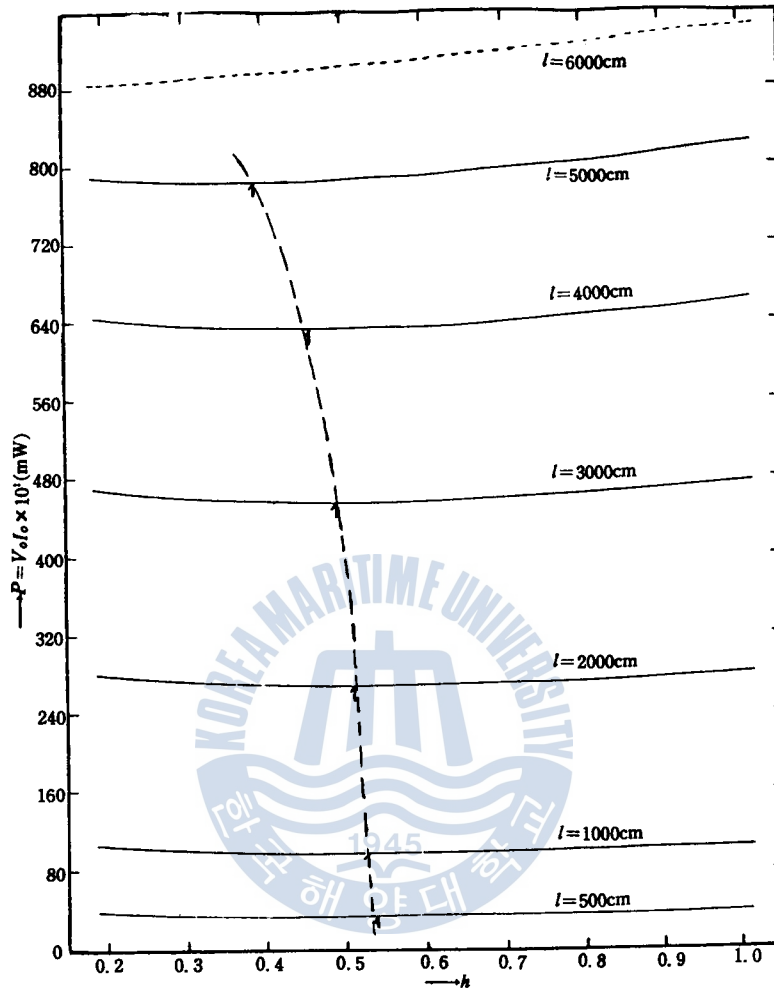


Fig. 20. Relations of  $P$  to  $h$  ( $\rho=2000 \Omega\text{-cm}$ , T.P.:  $2.72 \text{ cm } D. \times 0.28 \text{ cm } t. \times 4 l \text{ cm } L.$ )

0.28 cm의 鋼管의 경우  $L=200\text{m}$  規模以下이므로 이 數의 長大한 鋼管을 防蝕할 때는 陽極間의 距離를 100m 以下로 하녀야 한다.

그러나 實際 地下埋設管이나 比抵抗이 큰 水中에서 長期間(數 10 年間) 防蝕하려 할 때에는 所要 防蝕電流密度는 比抵抗이  $1000\sim 5000 \Omega\text{-cm}$  되는 地下(陸上)의 裸鋼管에 대해서는  $10\sim 20 \text{ mA/m}^2$ <sup>27)</sup> (이 때는 數週日後에 安全防蝕狀態로 됨)이고 같은 比抵抗範圍( $1000\sim 5000 \Omega\text{-cm}$ )의 水中에서는  $30\sim 60 \text{ mA/m}^2$  程度를 採擇하고 있다. 그러나 本論文에서는 10 日以內에 完全防蝕狀態로 만들기 위해서 防蝕電流密度를 各各 上記한 값의 6~12 倍와 2~4 倍가 큰  $125 \text{ mA/m}^2$  로 適用하였으므로 이 試驗資料는 試驗鋼管의 鋼管直徑이 地下埋設管인 경우는 6~12 倍가 큰, 그리고 水中鋼管인 경우는 2~4 倍가 큰 實際裸鋼管까지 適用이 되고, 地下埋設管表面에 글라스매스틱이나 플라스틱 테이프를 施工한 경우는 所要防蝕電流密度가  $2 \text{ mA/m}^2$ <sup>27)</sup> 以下이므로 試驗鋼管의 直徑의 60 倍 程度되는 被覆鋼管에까지 適用시킬 수 있으리라 생각된다.

7. 在來計算式과 本研究實驗式의 比較

陰極防蝕에 있어서 被防蝕體의 分極電位分布의 在來式에 있어서는 Pope<sup>15)</sup>와 Jones<sup>16)</sup>등에 의하면 分極電位分布를 金屬配管의 導體抵抗, 表面抵抗, 土壤의 比抵抗 및 排流點으로부터의 距離를 變數로 取扱하고 排流點으로부터 陽極까지의 距離의 影響은 考慮하지 않고 處理하고 있으며, 이따의 式

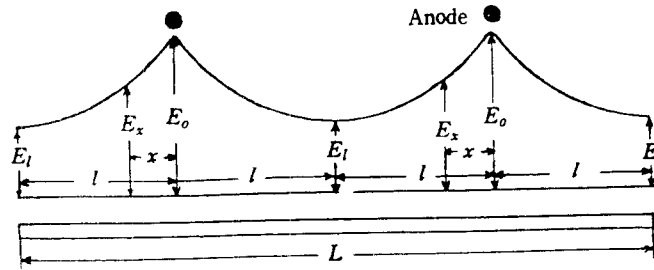


Fig. 21. Polarization potential on the pipe protected by Cathodic protection

은 表面抵抗을 크게 하고 被防蝕體에서 陽極을 멀리 設置함으로써 配管 各部의 電流密度가 그 位置에 關係없이 全長에 걸쳐 一定하다고 假定할 수 있는 경우에 成立한다고 하였다.

이 分極電位計算式들은 Fig. 21 과 같이 管長의 1/4 分點과 3/4 分點에 陽極을 設置하고 防蝕하면  $L=4l$  로 되고 排流點間의 諸式은  $x=0$  일 때  $E_x=E_0$  이고  $x=l$  일 때  $E_x=E_t$ ,  $(dE_x/dx)_l=0$  의 條件에서 다음과 같이 表示된다.

$$E_x = E_0 \cos h \alpha(l-x) / \cos h \alpha l \tag{7.1}$$

$$I_x = (E_0 / \sqrt{rc}) \sin h \alpha(l-x) / \cos h \alpha l \tag{7.2}$$

$$E_t = E_0 / \cos h \alpha l \tag{7.3}$$

$$\frac{1}{4} I_0 = (E_0 / \sqrt{rc}) \tan h \alpha l \tag{7.4}$$

$$E_0 = \frac{1}{4} I_0 \sqrt{rc} \cot h \alpha l \tag{7.5}$$

$$I_0 = \pi D L i_0 \tag{7.4'}$$

如實用配管  $D=54$  cm,  $c=0.2$  cm,  $L(=4l)=2400$  cm, 管의 導體抵抗  $13.5 \times 10^{-6} \Omega$ -cm, 土壤의 比抵抗의  $1950 \Omega$ -cm의 경우 單位 길이(cm)當의 管의 塗膜抵抗  $R_s(\Omega$ -cm), 漏洩抵抗  $R_l(\Omega$ -cm)의 比를 算出하여 1.7當의 管의 總合漏洩抵抗  $w(\Omega$ -cm)는

$$w = R_s + R_l \tag{7.6}$$

이 되고 單位 길이(cm)當의 管의 導體抵抗은

$$\frac{13.5 \times 10^{-6}}{1.7 - (1.38)^2} = 4.3622 \times 10^{-6} \quad (\Omega/cm)$$

이 된다. 漏洩抵抗  $R_l$ 은 水中抵抗의 想定距離  $r_2=536 r_1$  (管의 半徑)이 되면

$$R_l = (\rho/2\pi) \ln(r_2/r_1) \approx \rho(\Omega$$
-cm) = 1950( $\Omega$ -cm)

이 되고, 管의 塗膜抵抗  $R_s$ 는 無塗裝時  $5 \Omega$ -m<sup>2</sup><sup>39)</sup>程度이므로 單位 길이(cm)當 塗膜抵抗은

$$R_s = (5 \times 10^4) / (3.14 \times 3.4) = 4683.4 \quad (\Omega$$
-cm)

이며, 따라서

$$w = R_1 + R_2 = 4683.4 + 1950 = 6633.4 \quad (\Omega\text{-cm})$$

이다. 單位 길이 (cm)의 減衰係數는

$$\alpha = \sqrt{r/w} = \sqrt{(4.3622 \times 10^{-6})/6633.4} = 2.564 \times 10^{-5} \quad (\text{cm}^{-1})$$

이고

$$\sqrt{rw} = \sqrt{6633.4 \times 4.3622 \times 10^{-6}} = 0.170106 \quad (\Omega)$$

이므로 防蝕電流密度가 125 mA/m<sup>2</sup> 일 때 이 配管에 대해서 (7.5)式으로  $E_0$ 를 求하면 Table 6과 같다.

Table 6. Polarization potential at the drainage point calculated by the already-accepted former formula.

$l$ (cm)	$\frac{1}{4}I_0$ (mA)	$\alpha l$	$\cot h \alpha l$	$E_0$ (mV)	Remark
50	6.6725	0.00128	781.25	886.74	—
100	13.345	0.00256	390.63	886.75	—
600	80.07	0.01538	65.01	885.46	measured $E_0 = 120 \sim 170$ (mV)
2000	266.9	0.05128	19.52	886.23	—
10000	1334.5	0.2564	3.99	905.75	—

이 配管에 대한  $E_0$ 의 實測値는 陽極의 높이率에 따라 120~170(mV)인데 대하여 Table 6의 값은 무려 그 5~7倍 程度이다. 그러므로  $E_0$ 의 計算을 위한 在來式[(7.5)式]은 塗裝鋼管인 경우나 配管 環境이 高比抵抗인 裸鋼管의 경우와 같이 所要防蝕電流密度가 10~20 mA/m<sup>2</sup> 以內일 때에만 適用할 수 있음을 알 수 있다.

따라서 (7.1)式의  $E_0$ 에 實測値를 適用하여 電位分布를 計算하고 本研究에 의한 電位分布實驗式에 의하여 電位分布를 計算한 것을 比較하면 附錄 Table 9와 같다. 이 附錄 Table 9에 의하면 實測値  $E_0'$ 를 適用하여 在來式의 電位分布計算式으로 求한 電位分布와 本研究 實驗式에 의해 求한 電位分布는 陽極의 높이率이 1.0인 경우에는 거의 같고 實測電位分布와도 거의 같으나,  $h$ 가 낮아질수록 在來計算式에 의한 값은 實測値에 대하여 差異가 急激히 커진다. 그러므로 在來計算式은  $h$ 가 1.0 程度로 큰 경우에 限하여 實測値  $E_0'$ 를 適用해서 利用할 수 있으리라 생각된다.

C. L. Wilson<sup>19)</sup>에 의하면 陰極面上에 流入하는 電流密度는 陽極으로부터의 거리의 3乘에 反比例한다고 假定하여 所要電流를 最小로 하는 陽極의 設置位置를 求하고 있다. 이에 의하면 陰極面上으로부터 陽極까지의 最短距離를  $a$ 라 하고, 두 陽極間의 거리  $L$ 를  $2al$ 로 할 때 平均電流密度  $\bar{I}$ 와 두 陽極間의 中央點의 電流密度  $\Delta M$ 間에는 다음 關係가 成立한다고 報告되어 있다.

$$\bar{I}/\Delta M = (1+l^2)^{3/2}/2l \quad (7.7)$$

(7.7)式의  $\bar{I}/\Delta M$ 의 最小값은  $l=1/\sqrt{2}$ 일 때이고 이 때의 陽極의 높이率은  $\sqrt{2}$ 로 된다.

$\bar{I}/\Delta M$ 의 값이 最小라는 것은 全印加電流의 最小를 뜻하며 本研究의  $P=V_0I_0$ 에서의  $I_0$ 의 最小를 뜻한다. 여기에서  $I_0$ 가 最小일 때 반드시  $P$ 가 最小로 되지는 않지만 本研究의 結果와 比較하면 이

結果는 配管環境의 比抵抗이 比較的 낮을 때에는 큰 差異를 보이나 比抵抗이 아주 높은 경우에는 거의 一致한다.

그러나 本研究에 의한 實驗式들은 在來式들과는 달리 任意의 陽極의 높이率 및 모든 防蝕電流密度에 대하여 實測結果에 가까운 排流點의 分極電位, 分極電位分布 및 電源裝置의 適正容量까지도 計算할 수 있을 뿐 아니라 모든 環境의 配管에 대하여 最適防蝕條件도 檢討할 수 있다.

## 8. 結 論

外部電源에 의한 水中鋼管의 陰極防蝕時에 分極電位分布과 所要防蝕電力 및 最適防蝕條件에 關한 研究에서 다음의 結論을 얻었다.

1) 鋼管을 2個의 不溶性陽極으로 防蝕할 때 鋼管表面의 分極電位는 물의 比抵抗 960~4800Ω-cm 範圍에서 다음 式으로 計算할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_x &= E_o' \cos h \alpha \left( 50 - \frac{50}{l} x \right) / \cos h \alpha 50 \\ &= E_o' \cos h \left\{ 2 \sqrt{\rho_s D / \{ D^2 - (D-2t)^2 \} / \sqrt{R}} \right\} \left( 50 - \frac{50}{l} x \right) \\ &\quad + \cos h \left[ 100 \sqrt{\rho_s D / \{ D^2 - (D-2t)^2 \} / \sqrt{R}} \right] \quad (\text{mV}) \\ E_o' &= \left[ 1.7667 / \{ \log(50h) \}^{0.277} \right] i_o - \{ 146.4624 / (50h)^{0.008} \} \\ &\quad + 0.0083433(\rho - 1950) \quad (\text{mV}) \\ \sqrt{R} \times 10^3 &= (1.3869h + 0.1306) \cdot \frac{50}{l} x \\ &\quad + 629.7737h + 156.1420 \quad (\Omega^{1/2}\text{-cm}) \end{aligned}$$

2) 陰極防蝕用 電源裝置의 所要電壓과 所要電力은 다음 式으로 求할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_o &= I_o (1.3531444 - 2.3980884 \log \log I_o) \\ &\quad \times \{ 0.0723 + 0.0144 \log(50h) \} \times \rho \times 10^{-4} + 1.85 \quad (\text{V}) \\ P &= V_o I_o = I_o^2 (1.3531444 - 2.3980884 \log \log I_o) \\ &\quad \times \{ 0.0723 + 0.0144 \log(50h) \} \times \rho \times 10^{-4} + 1.85 I_o \quad (\text{mW}) \\ I_o &= 4 \pi D l i_o \times 10^{-4} \quad (\text{mA}) \end{aligned}$$

3) 陽極의 設置位置가 防蝕電力에 미치는 영향은 물의 比抵抗이 클수록 크고, 比抵抗이 적은 경우에는 그다지 크지 않다.

4) 最少電力으로 防蝕할 수 있는 陽極의 높이率은 물의 比抵抗이 960~4800Ω-cm의 範圍에서 물의 比抵抗의 增加에 따라 增加하는 傾向이 있고 또한 被防蝕面積이 增加할수록 減少하는 傾向이 있다.



## 參 考 文 獻

- 1) 中川雅夫：電氣防食の實際，地人書房，東京，pp.293~297(1967).
- 2) G. L. Daly：陰極防食の經濟的考察，防食技術，vol.15, No.8, p.372(1966).
- 3) H. H. Uhlig：Corrosion and Corrosion Control, John Wiley and Sons Inc., New York, p.195(1965).
- 4) 木村朝夫：船體の腐食と防食の問題點(船體外板の腐食量と電氣防食の經濟性)，造船技術，Vol.7, No.10, pp.65~66(1974).
- 5) 田大熙：腐蝕斗 防蝕斗 管理，太和出版社，p.286(1979).
- 6) 寬 建彦：電氣防食技術の最近の話題(電氣防食の適用分野)，金屬，Vol.45, No.8, p.19(1975).
- 7) 前掲書(1)：pp.133~134.
- 8) R. Pope：Uhlig's Corrosion Handbook, John Wiley and Sons Inc., New York, p.942(1963).
- 9) 前掲書(6)：p.19.
- 10) J. H. Morgan：The internal cathodic protection of large steel pipes carrying sea water, Corrosion, Vol.15, Aug. pp.417~422, NACE(1954).
- 11) 田大熙：外部電流에 의한 海水冷却細管内面の 陰極防蝕에 관한 研究，韓國海洋大學論文集，Vol.10, pp.55~76(1975).
- 12) 佐藤史郎・山内重徳：復水器の分極特性について，防食技術，Vol.25, No.10, pp.611~617(1976).
- 13) 花田政明：電氣防食設計の手順と問題點，防食技術，Vol.19, No.2, p.77(1970).
- 14) 前掲書(3)：pp.352~354.
- 15) D. A. Jones：Shreir's Corrosion-2, Newnes-Butterworths, London-Boston, pp.11:13~11:17(1976).
- 16) 前掲書(8)：pp.942~946.
- 17) 瀧原幹夫：電氣・土壤腐食ハンドブック，日本電氣學會，コロナ社，pp.215~217(1977).
- 18) 梅野秀夫：新版 金屬防食技術便覽，日本學術振興會，日本工業新聞社，pp.597~599(1972).
- 19) C. L. Wilson：The distribution of current densities at the cathode Surfaces of cathodic protection Systems, Anti-Corrosion, Vol.17, No.2, pp.23~26(1970).
- 20) 前掲書(3)：p.352.
- 21) 前掲書(12)：p.613.
- 22) 外島 忍：基礎電氣化學，朝倉書店，東京，p.333(1965).
- 23) 日本金屬學會：金屬データブック，丸善，p.105(1974).
- 24) NACE standard：RP-01-69.
- 25) 伊藤伍郎：金屬の防食技術と表面處理，地人書房，東京，p.310(1970).
- 26) 福谷英二：金屬の防食規程，防食基準ならびに關連規格について，防食技術，Vol.28, No.9, p.507(1979)..
- 27) 前掲書(5)：p.516.
- 28) 前掲書(17)：p.217.
- 29) 前掲書(18)：p.598.

Appendix

Table 1. (Calculated potential/Measured potential) and the ratio(%)

[Protected area: 0.1708 m<sup>2</sup>]

$i_a$ (mA/m <sup>2</sup> )	$x$ (cm)	0	10	20	30	40	50
100	0.25	$\frac{126.87}{128}$ (99.1)	$\frac{106.13}{105}$ (101.1)	$\frac{91.75}{91}$ (100.8)	$\frac{82.57}{80}$ (103.2)	$\frac{77.78}{76}$ (102.3)	$\frac{76.88}{74}$ (103.9)
	0.375	$\frac{112.54}{111}$ (101.4)	$\frac{99.35}{100}$ (99.4)	$\frac{90.1}{92}$ (92.9)	$\frac{84.15}{87}$ (96.7)	$\frac{81.1}{82}$ (98.9)	$\frac{80.62}{79}$ (102.1)
	0.5	$\frac{104.69}{106}$ (98.8)	$\frac{95.57}{97}$ (98.5)	$\frac{89.12}{90}$ (99.0)	$\frac{84.99}{86}$ (98.8)	$\frac{82.84}{83}$ (99.9)	$\frac{82.62}{82}$ (100.8)
	0.75	$\frac{95.75}{96}$ (99.7)	$\frac{90.69}{91}$ (99.6)	$\frac{87.11}{89}$ (97.8)	$\frac{84.82}{86}$ (98.6)	$\frac{83.68}{85}$ (98.4)	$\frac{83.57}{84}$ (99.5)
	1.0	$\frac{90.49}{90}$ (100.5)	$\frac{87.32}{88}$ (99.2)	$\frac{85.07}{87}$ (97.8)	$\frac{83.64}{86}$ (97.2)	$\frac{82.93}{85}$ (97.5)	$\frac{82.88}{84}$ (98.6)
175	0.25	$\frac{248.13}{249}$ (99.6)	$\frac{207.57}{206}$ (100.7)	$\frac{179.46}{178}$ (100.8)	$\frac{161.49}{161}$ (98.4)	$\frac{152.12}{150}$ (101.4)	$\frac{150.36}{148}$ (101.6)
	0.375	$\frac{217.59}{215}$ (101.2)	$\frac{192.10}{193}$ (99.5)	$\frac{174.12}{177}$ (98.4)	$\frac{162.71}{164}$ (99.2)	$\frac{156.8}{157}$ (99.8)	$\frac{155.88}{153}$ (101.9)
	0.5	$\frac{200.81}{203}$ (98.9)	$\frac{183.31}{187}$ (98.0)	$\frac{170.95}{173}$ (98.8)	$\frac{163.03}{165}$ (98.8)	$\frac{159.0}{160}$ (99.3)	$\frac{158.47}{158}$ (100.3)
	0.75	$\frac{181.51}{182}$ (99.7)	$\frac{171.95}{173}$ (99.4)	$\frac{165.16}{166}$ (99.5)	$\frac{160.82}{163}$ (98.6)	$\frac{158.66}{162}$ (97.9)	$\frac{158.45}{161}$ (98.4)
	1.0	$\frac{170.23}{169}$ (100.7)	$\frac{164.27}{167}$ (98.3)	$\frac{160.01}{164}$ (97.6)	$\frac{157.34}{162}$ (97.1)	$\frac{156.02}{161}$ (96.9)	$\frac{155.91}{160}$ (97.4)

Table 2. (Calculated potential/Measured potential) and the ratio(%)

Secondary experiment (I) protected area: 0.2135 m<sup>2</sup>

(II) protected area: 0.1362 m<sup>2</sup>

$i_a$ (mA/m <sup>2</sup> )	$x$ (cm)	0	10	20	30	40	50
100	I	$\frac{112.5}{111}$ (101.4)	$\frac{100.73}{98}$ (102.7)	$\frac{92.43}{89}$ (103.8)	$\frac{87.09}{83}$ (104.9)	$\frac{81.35}{80}$ (101.7)	$\frac{83.94}{79}$ (106.2)
	II	$\frac{95.8}{96}$ (100.0)	$\frac{91.36}{90}$ (101.5)	$\frac{88.20}{87}$ (101.4)	$\frac{86.19}{84}$ (102.6)	$\frac{85.18}{83}$ (102.6)	$\frac{85.09}{82}$ (103.7)
125	I	$\frac{147.6}{146}$ (101.1)	$\frac{129.91}{127}$ (102.3)	$\frac{117.49}{114}$ (103.0)	$\frac{109.53}{106}$ (103.3)	$\frac{105.43}{102}$ (103.3)	$\frac{104.79}{98}$ (106.9)
	II	$\frac{124.4}{125}$ (99.5)	$\frac{117.66}{122}$ (96.4)	$\frac{112.88}{116}$ (97.3)	$\frac{109.83}{112}$ (98.0)	$\frac{108.3}{110}$ (98.4)	$\frac{108.15}{109}$ (99.2)

Table 3. Calculated polarization potential for the drainage point and the ratio of ( $E_p'/E_o$ )

$\rho$ (Ω-cm)	$h$	470	800	1000	1200	1950	2700	2800	3000	3200	3400
0.25	0.25	$\frac{154.9}{92.5}$	$\frac{157.7}{94.2}$	$\frac{159.3}{95.2}$	$\frac{161.0}{95.2}$	$\frac{167.3}{100}$	$\frac{173.5}{103.7}$	$\frac{174.3}{104.2}$	$\frac{176.0}{105.2}$	$\frac{177.7}{106.2}$	$\frac{179.3}{107.2}$
	0.5	$\frac{124.35}{90.9}$	$\frac{127.1}{92.9}$	$\frac{128.7}{94.2}$	$\frac{130.4}{95.4}$	$\frac{136.7}{100}$	$\frac{142.9}{104.5}$	$\frac{143.7}{105.1}$	$\frac{145.4}{106.4}$	$\frac{147.1}{107.6}$	$\frac{148.7}{108.8}$
	0.75	$\frac{112.05}{90.0}$	$\frac{114.8}{92.2}$	$\frac{116.47}{93.6}$	$\frac{118.14}{94.9}$	$\frac{124.4}{100}$	$\frac{130.6}{105.0}$	$\frac{131.4}{105.7}$	$\frac{133.1}{107.0}$	$\frac{134.8}{108.3}$	$\frac{136.4}{109.7}$

Table 4.  $\frac{\text{Calculated polarization potential}}{\text{Measured polarization potential}}$  and the ratio  
 ( $i_0=125\text{mA/m}^2$ , protected area;  $2.56224\text{m}^2$ )

$\rho(\Omega\text{-cm})$	$\frac{x(\text{cm})}{h}$	0	300	600
		$h$		
1050	0.25	$\frac{159.8}{155}$ (103.1)	$\frac{113.8}{110}$ (103.5)	$\frac{102.7}{98}$ (104.8)
	0.5	$\frac{129.2}{135}$ (95.7)	$\frac{109.6}{114}$ (96.1)	$\frac{105.0}{100}$ (105.0)
	0.75	$\frac{116.8}{123}$ (95.0)	$\frac{106.2}{113}$ (94.0)	$\frac{103.7}{107}$ (96.9)
	1.0	$\frac{109.6}{112}$ (97.9)	$\frac{103.0}{109}$ (94.5)	$\frac{101.5}{109}$ (93.1)
1400	0.25	$\frac{162.7}{165}$ (98.6)	$\frac{115.9}{113}$ (102.6)	$\frac{104.6}{103}$ (101.6)
	0.5	$\frac{132.1}{138}$ (95.7)	$\frac{112.1}{110}$ (101.9)	$\frac{107.4}{105}$ (102.3)
	0.75	$\frac{119.8}{120}$ (99.8)	$\frac{108.9}{110}$ (99.0)	$\frac{106.4}{108}$ (98.5)
	1.0	$\frac{112.5}{115}$ (97.8)	$\frac{105.7}{111}$ (95.2)	$\frac{104.2}{111}$ (93.9)
1950	0.25	$\frac{167.3}{170}$ (98.4)	$\frac{119.1}{118}$ (100.9)	$\frac{107.5}{105}$ (102.4)
	0.5	$\frac{136.7}{140}$ (97.6)	$\frac{116.0}{116}$ (100.0)	$\frac{111.1}{110}$ (101.0)
	0.75	$\frac{124.4}{125}$ (99.5)	$\frac{113.1}{115}$ (98.3)	$\frac{110.5}{113}$ (97.8)
	1.0	$\frac{117.1}{120}$ (97.6)	$\frac{110.1}{116}$ (94.9)	$\frac{108.5}{115}$ (94.3)

Table 5. The calculated voltage and  $\frac{\text{Calculated voltage}}{\text{Measured voltage}} \times 100(\%)$

$h$	$\frac{I_0(\text{mA})}{lh=H(\text{cm})}$	17.08	21.35	25.62	29.89	34.16
		$h$				
0.25	12.5	4.78 (99.6)	5.52 (98.6)	6.25 (99.2)	6.98(102.6)	7.72(100.3)
0.375	18.75	4.87 (99.4)	5.62 (99.5)	6.38(100.5)	7.13(101.9)	7.89 (98.6)
0.5	25	4.93(100.2)	5.70(100.0)	6.47(100.3)	7.24(100.6)	8.01 (98.9)
0.75	37.5	5.01(100.4)	5.80 (98.3)	6.59(101.7)	7.39(101.2)	8.18 (98.6)
1.0	50	5.07 (99.4)	5.88 (98.8)	6.68(102.8)	7.49(101.2)	8.30 (97.6)

Table 6. (Calculated Voltage/Measured Voltage) and the ratio(%)

Secondary experiment (I) protected area: 0.2135 m<sup>2</sup>  
(II) " " : 0.1362 m<sup>2</sup>

experiment	$i_o$ (mA/m <sup>2</sup> )	$h$		
		0.375	0.5	0.75
(I)	100	$\frac{5.62}{5.7}$ (98.6)	$\frac{5.7}{5.8}$ (98.3)	$\frac{5.8}{5.9}$ (98.3)
		$\frac{4.85}{4.9}$ (99.2)	$\frac{4.91}{5.0}$ (98.2)	$\frac{5.0}{5.1}$ (98.0)
(II)	175	$\frac{6.06}{6.1}$ (99.3)	$\frac{6.14}{6.0}$ (102.3)	$\frac{6.26}{6.3}$ (99.4)

Table 7. Calculated voltage  
Measured voltage and the ratio(%) $(\rho=1950 \Omega\text{-cm}, h=0.5)$ 

$I_o$ (mA)	21.35	64.05	128.11	192.2	448.38
$\frac{V_{oc}}{V_{om}}$ (V)	$\frac{5.92}{5.8}$ (102.06)	$\frac{10.36}{10.5}$ (98.67)	$\frac{15.17}{15}$ (101.13)	$\frac{18.93}{19.5}$ (97.07)	$\frac{29.13}{28.5}$ (102.21)

Table 8. Calculated voltage  
Measured voltage and the ratio(%) $(I_o=320.28 \text{ mA}, \text{ protected area: } 2.56224 \text{ m}^2)$ 

$\rho$ ( $\Omega\text{-cm}$ )	$h$		
	0.25	0.5	0.75
1050	$\frac{13.60}{14.1}$ (96.45)	$\frac{14.18}{14.7}$ (96.46)	$\frac{14.51}{15}$ (96.73)
1400	$\frac{17.51}{18.2}$ (96.21)	$\frac{18.28}{19}$ (96.21)	$\frac{18.74}{19.5}$ (96.10)
1950	$\frac{23.67}{24}$ (98.63)	$\frac{24.74}{25}$ (98.96)	$\frac{25.37}{26}$ (97.58)

Table 9 Calculated polarization potential and measured polarization potential  
 ( $i_0=125 \text{ mA/m}^2$ ,  $\rho=1950 \Omega \cdot \text{cm}$ ,  
 T. P. : 3.4 cm D. 0.32 cm t, 2400 cm L.)

h	x(cm) ※	0	150	300	600
		0.25	$C_f$	170	169.992
	$C_e$	167.3	137.7	119.1	107.5
	M	170	138	118	105
0.5	$C_f$	140	139.993	139.988	139.983
	$C_e$	136.7	124.0	116.0	111.12
	M	140	125	116	110
0.75	$C_f$	125	124.994	124.989	124.985
	$C_e$	124.4	117.5	113.1	110.5
	M	125	120	115	113
1.0	$C_f$	120	119.994	119.989	119.986
	$C_e$	117.1	112.8	110.1	108.5
	M	120	117	116	115

※  $C_f$ : calculated polar. poten. by the already-accepted former formulae.

$C_e$ : calculated polar. poten. by the empirical formulae.

M: measured polarization potential.