

한국부식학회지

Journal of Corrosion Science Society of Korea
Vol. 9 No. 3, Sept., 1980

〈研究論文〉

外部電源에 의한 水中鋼管의 陰極防蝕에 관한 研究

(Ⅳ) 水中鋼管의 陰極防蝕에 所要되는 電力, 最適防蝕條件, 適用限界
및 本實驗式과 在來式과의 比較

田 大 熙 · 金 垣 寧

韓國海洋大學 機關學科

A Study on the Cathodic Protection of a Steel
Pipe in Water by Impressed Current Method (Ⅳ)

Jeon Dae Hi · Kim Won Yeong

Department of Marine Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

ABSTRACT

In the previous paper(Ⅲ) (Vol. 9, No. 1, p. 1-8), the authors showed that the polarization potential at the drainage point (E_0') is related with current density (i_0), specific resistance of water (ρ) and ratio of the distance from anode to the pipe to the pipe length (h), and that the voltage of electric power source for corrosion prevention can be derived from power source current (I_0), ρ , h and the coefficient of the protected area (f).

In this paper we investigated the required electric power for cathodic prevention and the optimum condition of cathodic prevention in accordance with the empirical formulas shown in the previous paper(Ⅲ). And the already-accepted classical equation for E_0' and potential distribution(E_x) are compared with the above empirical formulas.

The following results of research has been acquired.

(1) The required electric power for cathodic prevention is presented as follows;

$$P = V_0 I_0 = I_0^2 (1.3531444 - 2.3980884 \log \log I_0) \{0.0723 + 0.0144 \log(50h)\} \times \rho \times 10^{-3} + 1.85 I_0 \quad (\text{mW})$$

where

$$I_0 = 4\pi D l i_0 \times 10^{-4} \quad (\text{mA})$$

and thus the least current density for corrosion prevention is presented as follows;

(i) at the outside parts of the two drainage points,

$$i_0(\text{min}) = [50.9424 \exp \left\{ \frac{100 \sqrt{\rho} D / \{D^2 - (D-2t)^2\}}{2253.9514h - 11.0996} \right\} + \{82.9017 / (50h)^{0.5688}\} - 0.0047225(\rho - 1950)] \times [\log(50h)]^{0.9582} \quad (\text{mA/m}^2)$$

(ii) at the part between the two drainage points,

$$i_0(\text{min}) = 25.4712 \left\{ \exp \left(\frac{100 \sqrt{\rho} D / \{D^2 - (D-2t)^2\}}{699.12h + 162.67} \right) + \exp \left(\frac{-100 \sqrt{\rho} D / \{D^2 - (D-2t)^2\}}{699.12h + 162.67} \right) \right\} + \{82.9017 / (50h)^{0.5688}\} - 0.0047225(\rho - 1950) \times [\log(50h)]^{0.9582} \quad (\text{mA/m}^2)$$

(2) The higher the specific resistance of water (ρ) is, the greater is the effect of anode location on the required minimum power.

- (3) The higher the specific resistance of water(ρ) is, or the smaller the protected area is, the greater is the h for the required minimum power.
- (4) The above empirical formulas on the optimum condition for cathodic prevention proved to be applicable to a steel pipe of up to 200m in length in case of the diameter being 2.72cm, the thickness 0.28cm and the range of ρ 960~4800 Ω -cm. And in case of the above pipe longer than 200m in length, the distance between anodes should be less than 100m.
- (5) The already-accepted classical equation for E_0' can be applicable only to relatively high specific resistance of the media surrounding the pipe or relatively high surface resistance of pipe. By applying the measured E_0' to the classical equation for the potential distribution, the potential distribution calculated from the above classical equation nearly coincide with the measured potential distribution only when h is more or less than 1.0. But from the above empirical formulas, E_0' , E_x and the optimum capacity of electric power source can be calculated for any h and i_0 .

抄 錄

(Ⅲ)報에서 排流点의 分極電位 E_0' 를 印加電流密度 i_0 , 陽極의 높이 h 및 물의 比抵抗 ρ 의 函數로 取扱해서 求하고 이를 適用해서 鋼管表面의 分極電位分布式을 表示하였다. 또한 電源裝置의 所要電壓을 印加電流 I_0 , 물의 比抵抗 ρ , 陽極의 높이 h 및 被防蝕面積의 大小影響까지 考慮해서 誘導하였다.

本報에서는 이들 實驗式에 의해서 所要防蝕電力과 最適防蝕條件을 檢討하고, 또한 排流点分極電位 및 分極電位分布에 대한 在來計算式과 本研究實驗式들을 比較하였다. 그 研究結果는 다음과 같다.

- (1) 陰極防蝕用電源裝置의 所要防蝕電力은 다음 式으로 求할 수 있다.

$$P = V_0 I_0 = I_0^2 (1.3531444 - 2.3980884 \log \log I_0) \{0.0723 + 0.0144 \log(50h)\} \times \rho \times 10^{-3} + 1.85 I_0 \quad (\text{mW})$$

$$\text{여기에서 } I_0 = 4\pi D l i_0 \times 10^{-4} \quad (\text{mA})$$

또한 最小防蝕電流密度 $i_0(\text{min})$ 는 다음 式으로 求할 수 있다.

- (i) 陽極外側鋼管表面의 경우 :

$$i_0(\text{min}) = \left\{ 50.9424 \exp \left\{ \frac{100 \sqrt{\rho_s D} / \{D^2 - (D-2t)^2\}}{2253.9514h - 11.0996} \right\} + \{82.9017 / (50h)^{0.5688}\} - 0.0047225(\rho - 1950) \right\} \times \{\log(50h)\}^{0.9582} \quad (\text{mA/m}^2)$$

- (ii) 陽極間의 鋼管表面의 경우 :

$$i_0(\text{min}) = \left\{ 25.4712 \left[\exp \left(\frac{100 \sqrt{\rho_s D} / \{D^2 - (D-2t)^2\}}{699.12h + 162.67} \right) + \exp \left(\frac{-100 \sqrt{\rho_s D} / \{D^2 - (D-2t)^2\}}{699.12h + 162.67} \right) \right] + \{82.9017 / (50h)^{0.5688}\} - 0.0047225(\rho - 1950) \right\} \times \{\log(50h)\}^{0.9582} \quad (\text{mA/m}^2)$$

- (2) 물의 比抵抗 ρ 가 큰 경우에는 陽極의 設置位置의 適正問題가 防蝕電力 P 에 크게 영향을 미치나 ρ 가 적은 경우에는 이 영향이 적다.
- (3) 最少防蝕電力을 要하는 陽極의 높이率 h 는 $\rho = 1000\Omega$ -cm 以上에서는 물의 比抵抗 ρ 의 增加에 따라 增加하는 傾向이 있고 또한 被防蝕面積에 增加할수록 減少하는 傾向이 있다.
- (4) 最適防蝕條件으로서의 實驗式의 適用限界는 물의 比抵抗 $\rho = 960 \sim 4800\Omega$ -cm 범위에서 $D = 2.72\text{cm}$, $t = 0.28\text{cm}$ 의 鋼管의 경우 $L = 200\text{m}$ 이므로 이런 次數의 長大한 鋼管을 防蝕할 때에는 陽極間의 거리를 100m 以內로 하여야 한다.
- (5) 在來式의 排流点 分極電位計算式은 設置環境의 比抵抗이 크거나 被防蝕體의 塗膜抵抗이 커서 所要防蝕電流密度가 아주 적은 경우 外에는 實用하기 困難하고, 實測排流点分極電位值를 代入해서 求한 그 電位分布도 陽極의 높이 $h = 1.0$ 内外인 경우에는 實測排流点과 거의 같으나 h 가 낮은 경우에는 큰 差異를 보인다. 그러나 本研究의 實驗式들은 모든 h 및 防蝕電流密度 i_0 에 대해서 排流点分極電位 E_0' 와 分極電位分布 뿐만 아니라 電源裝置의 實測值에 가까운 適正容量까지도 求할 수 있다.

記號說明

- x : 排流点에서 測定点까지의 거리 (cm)
- D : 試驗片의 外徑 (cm)
- t : 試驗片의 두께 (cm)
- L, l : 試驗片의 全長과 1/4길이 (cm)
- I_0, I_x : 印加電流 및 x 点を 흐르는 電流 (mA)
- i_0 : 試驗片의 平均印加電流密度 (mA/m²)
- $i_0(\min)$: 最少防蝕電流密度 (mA/m²)
- E_0, E_0' : 물의 比抵抗 $\rho=1950\Omega\text{-cm}$ 및 任意的 물의 比抵抗일 때의 排流点의 分極電位 (mV)
- ρ_s : 試驗片의 單位 길이(cm) 當의 比抵抗 ($\Omega\text{-cm}$)
- h : 陽極의 높이 率
- V_0 : 電源裝置의 負荷電壓 (V)
- f : 被防蝕面積係數
- ρ : 물의 比抵抗 ($\Omega\text{-cm}$)
- P : 防蝕電力 (mW)
- $P(\min)$: 最少防蝕電力 (mW)
- r : 試驗片의 單位 길이(cm) 當의 管導體抵抗 (Ω/cm)

- ω : 試驗片의 單位 길이 (cm) 當의 總合漏洩抵抗 ($\Omega\text{-cm}$)
- R_s : 試驗片의 單位 길이 (cm) 當의 漏洩抵抗 ($\Omega\text{-cm}$)
- R_p : 試驗片의 單位 길이 (cm) 當의 塗膜抵抗 ($\Omega\text{-cm}$)
- α : 減衰係數 ($=\sqrt{r/\omega}$) (cm⁻¹)

1. 序 論

(I)(II) 報에서는 排流点의 分極電位를 試驗片의 平均印加電流密度 i_0 와 陽極의 높이率 h 만의 函數로 取扱하였고, 電源裝置의 所要電壓을 印加電流 I_0 , 물의 比抵抗 ρ 및 陽極의 높이率 h 만의 函數로 다루어서 求하였다. 그러나 前者는 물의 比抵抗 ρ 의 영향도 考慮해야 되고 後者는 被防蝕面積의 大小의 영향도 考慮해야 한다. 따라서 (III) 報는 排流点의 分極電位를 물의 比抵抗 ρ 의 영향까지 考慮해서 求하였고 電源裝置의 所要電壓式은 被防蝕面積의 大小 영향까지 考慮해서 誘導하였다.

本 研究는 (III) 報에서 誘導한 實驗式에 의해서 電流裝置의 所要電力 實驗式을 求하고 (I)(II) 報의 試驗

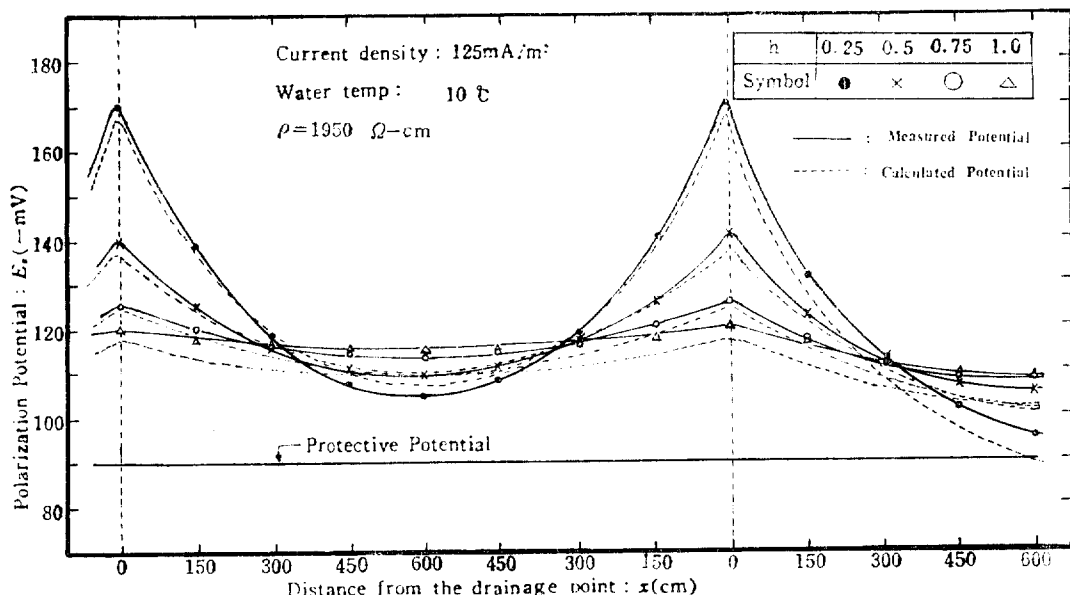


Fig. 1. Cathodic polarization potentials (two anodes: $(1/4) \times L, (3/4) \times L$)

Table 1. Relations of V_0 to i_0 ($\rho=1950\Omega\text{-cmh}$, $h=0.5$)

I_0 (mA)	21.35	64.05*	96.08*	128.11*	160.14*	192.2	256.2	320.28	448.39
V_0 (V)	5.8	10.5*	12.8*	15*	17*	19.5	22	25	23.5

*Newly measured value.

片과 (II)報의 準實用規模의 試驗片에 대해서 最適防蝕條件을 比較檢討하였으며 이 實驗式들의 適用限界를 考察하였다. 또한 排流點의 分極電位 및 分極電位分布에 대한 在來計算式과 本研究 實驗式들을 比較檢討하였다.

2. 被防蝕面積의 大小에 따른 防蝕所要電力의 補正實驗式

(III)報의 Fig. 5¹⁾의 電位分布傾向이 (I)(II)報의 傾向과 多少相異하므로 再測定하고, 또한 (III)報의 Table 2의 data²⁾가 不充分하였기 때문에 (III)報 實驗(II)에 使用한 試驗片³⁾의 1/2 길이를 새로운 試驗片으로 하여 (III)報 實驗(II)와 같은 條件下에서 印加電流 I_0 에 대한 電源裝置의 所要電壓을 調査 補充하였다. Fig. 1은 前者의 結果이고, Table 1은 後者의 結果이다.

被防蝕面積의 大小의 影響까지 考慮한 電源裝置의 所要電壓式은 (III)報의 (2.11)式 卽

$$V_0 = I_0 \{-0.5317973 \log I_0 + 1.7299687\} \{0.0723 + 0.0144 \log(50h)\} \times \rho \times 10^{-3} + 1.85 \quad (V) \quad (2.1)$$

으로 表示하였으나 Table 1의 新測定值를 代入해서 I_0

에 대한 被防蝕面積係數의 關係를 求하여 (III)報 Fig. 6⁴⁾에 補充하여 圖示하면 Fig. 2의 X標들과 같이 原直線에서 若干 下方에 表示된다. 그러므로 f 와 I_0 의 關係를 $f - \log \log I_0$ 座標로 고쳐서 圖示하면 Fig. 3과 같이 보다 좋은 直線關係가 있으므로 그들의 實測數值를 代入하여 이 直線의 方程式을 最少自乘法으로 求하면

$$f = -2.3980884 \log \log I_0 + 1.3531444 \quad (2.2)$$

으로 된다. 따라서 (2.1)式은 다시

$$V_0 = I_0 \{-2.3980884 \log \log I_0 + 1.3531444\} \{0.0723 + 0.0144 \log(50h)\} \times \rho \times 10^{-3} + 1.85 \quad (V) \quad (2.3)$$

으로 補正된다.

(I)(II)報의 所要防蝕電力의 實驗式은 被防蝕面積의 一定한 경우에 대한 것이었으나 被防蝕面積의 大小의 影響을 考慮한 所要防蝕電力 P 는 (2.3)式을 適用해서 實驗式을 補正하여야 한다. 그러므로 이 경우의 所要防蝕電力 P 는 (II)報의 (5.2)式⁵⁾에 (2.3)式을 代入하면 다음과 같이 表示된다.

$$P = V_0 I_0 = I_0^2 \{1.3531444 - 2.3980884 \log \log I_0\} \times \{0.0723 + 0.0144 \log(50h)\} \times \rho \times 10^{-3} + 1.85 I_0 \quad (mW) \quad (2.4)$$

$$\text{여기에서 } I_0 = 4\pi D l i_0 \times 10^{-4} \quad (mA) \quad (2.5)$$

3. 最適防蝕條件

물의 比抵抗까지 考慮한 排流點의 分極電位와 被防蝕面積係數를 考慮한 所要防蝕電壓式을 適用한 最適防蝕條件은 被防蝕鋼管表面을 두 陽極外側鋼管表面과 두 陽極間의 鋼管表面의 두 경우로 나누어 檢討한다.

試驗片의 最適防蝕條件은 鐵鋼의 防蝕電位가 -770 mV (SCE)이므로 試驗片의 兩端과 두 陽極間의 中央點이 다음과 같이 陰分極되어야 한다.

$$E_l = -770 - (-680) = -90 \quad (mV) \quad (3.1)$$

(i) 두 陽極外側鋼管의 경우

(III)報의 (2.4)式에서 $x=l$ 일 때 $E_x = E_l$ (防蝕에 所要되는 分極電位)을 代入하면

$$E_l = E_0' \exp \left\{ -2 \sqrt{\rho_s D} / \{D^2 - (D-2t)^2\} \cdot 50 / \sqrt{R} \right\} \quad (mV) \quad (3.2)$$

위 式에서 表面抵抗 R 은 (III)報의 (2.5)式에 $x=l$ 을 代入해서

$$\sqrt{R} \times 10^3 = (19.3889h + 1.0664)50 + 1284.5064h - 64.4196 \quad (\Omega^{1/2}\text{-cm}) \quad (3.3)$$

이 되고 E_0' 는 (III)報의 (2.6)式을 그대로

$$E_0' = \{1.7667 / [\log(50h)]\}^{0.9582} i_0 - \{146.4324 / (50h)^{0.5688}\} + 0.0083433(\rho - 1950) \quad (mV) \quad (3.4)$$

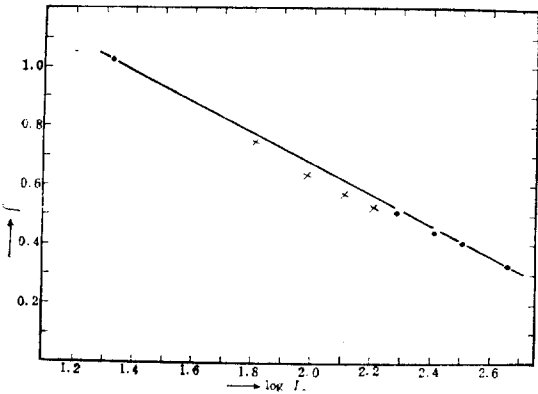


Fig. 2. Relations of f to $\log I_0$

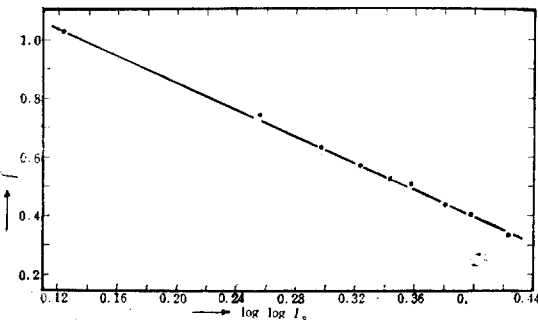


Fig. 3. Relation of f to $\log \log I_0$

을 사용하여야 한다.

(ii) 두 陽極間의 鋼管의 경우

(III)報의 (2.7)式에 $x=l$ 을 代入하면

$$E_i = E_0' / \cosh[100 \sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}} / \sqrt{R}] \quad (\text{mV}) \quad (3.5)$$

위 式에서 表面抵抗 R은 (III)報의 (2.8)式에 $x=l$ 을 代入해서

$$\sqrt{R} \times 10^3 = (1.3869h + 0.1306) \cdot 50 + 629.774h + 156.1420 \quad (\Omega^{1/2}\text{-cm}) \quad (3.6)$$

이 되고 E_0' 는 (III)報의 (2.6)式을 그대로

$$E_0' = \{1.7667 / (\log(50h))^{0.9582}\} i_0 - \{146.4624 / (50h)^{0.5688}\} + 0.0083433(\rho - 1950) \quad (\text{mV}) \quad (3.4)$$

을 사용하여야 한다

두 경우 모두 各各 最少電力으로 防蝕할 수 있는 陽極의 位置 h 를 求하기 위해서는 式(3.1)~(3.4)(陽極外側鋼管의 경우) 및 式(3.1), (3.5)~(3.6)(陽極間의 鋼管의 경우)에서 各各 $i_0 = f_1(h)$ 를 求하고 (2.5)式에서 各各 I_0 를 求한 다음 (2.4)式에서 各各의 $p = f_2(h, \rho)$ 를 求한다. 그 다음에 $\frac{\partial P}{\partial h} = 0$ 의 最少條件에서 $h = f_3(\rho)$ 를 求하면 두 경우 모두 各各의 比抵抗에 따른 最少電力으로 防蝕할 수 있는 陽極의 位置 h 가 된다. 이 때의 V_0 와 I_0 를 求하면 그것이 要求되는 電源裝置의 最少容量이 될 것이다. 그러나 이 計算은 大端히 複雜하므로 各防蝕與件을 代入하여 數值計算해서 檢討해 보는 수 밖에 없다.

이를 數值計算하기 위해서는, 두 陽極을 使用한 試驗片에 대해서 試驗片이 最少電力으로 防蝕되기 위한 條件으로서 첫째로 前述한 바와 같이 試驗片의 兩端 및 試驗片의 中央點이 (3.1)式과 같이 90mV 陰分極되어야 하고 最少防蝕電力 $P_{(min)}$ 는 最少防蝕電流密度 $i_{0(min)}$ 를 안다면 이를 (2.5)式 (2.4)式에 代入해서

$$P_{(min)} = (4\pi D l i_{0(min)} \times 10^{-4})^2 \{1.3531444 - 2.3980884 \times \log \log(4\pi D l i_{0(min)} \times 10^4)\} \{0.0723 + 0.0144 \times \log(50h)\} \times \rho \times 10^{-3} + 1.85 \times 4\pi D l i_{0(min)} \times 10^{-4} \quad (\text{mW}) \quad (3.7)$$

의 算式으로 計算하여야 한다.

이때 最少防蝕電流密度 $i_{0(min)}$ 는

(i) 陽極外側鋼管表面의 경우

(3.3)式과 (3.1)式을 (3.2)式에 代入하여

$$90 = E_0' \exp[-100 \sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}} / (2253.9514h - 11.0996)] \quad (3.2)'$$

을 얻고 이 (3.2)'式과 (3.4)式에서 E_0' 를 消去하면 다음 式과 같이 된다.

$$i_{0(min)} = \{50.9424 \exp\left[\frac{100 \sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}}}{2253.9514h - 11.0996}\right] + \{82.9017 / (50h)^{0.5688}\} - 0.0047225(\rho - 1950)\} \times [\log(50h)]^{0.9582} \quad (\text{mA/m}^2) \quad (3.8)$$

(ii) 陽極間의 鋼管表面의 경우

(3.6)式과 (3.1)式을 (3.5)式에 代入하여

$$90 = E_0' / \cosh[100 \sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}} / (699.12h + 162.67)] \quad (3.5)'$$

을 얻고 이 (3.5)'式과 (3.4)式에서 E_0' 를 消去하면 다음 式과 같이 된다.

$$i_{0(min)} = \left\{25.4712 \left[\exp\left(\frac{100 \sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}}}{699.12h + 162.67}\right) + \exp\left(\frac{-100 \sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}}}{699.12h + 162.67}\right) \right] + \{82.9017 / (50h)^{0.5688}\} - 0.0047225(\rho - 1950)\right\} \times [\log(50h)]^{0.9582} \quad (\text{mA/m}^2) \quad (3.9)$$

3.1 試驗片(I)에 대한 最適防蝕條件

두 陽極을 使用한 (I)(II)報의 試驗片($D=2.72\text{cm}$, $t=0.28\text{cm}$, $l=50\text{cm}$ 이고 $\rho_s=13.5 \times 10^{-6}\Omega\text{-cm}$)의 경우 (3.7)式~(3.9)式에 여러가지 ρ 및 h 값을 代入하여 $P(\rho, h)$ 를 電算하고 그 結果에 의하여 一定한 ρ 下에서

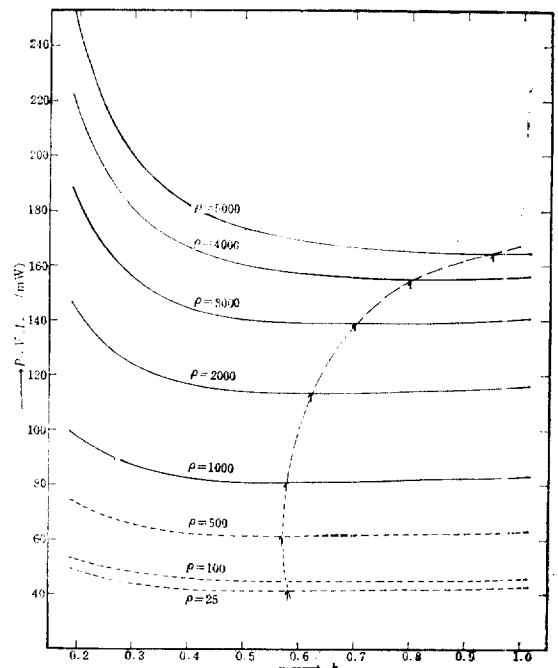


Fig. 4. Relations of P to h(The outside parts of the two drainage points)

T. P. : $\phi 2.72\text{cm} \times 0.28\text{cm} \times 200\text{cm L}$

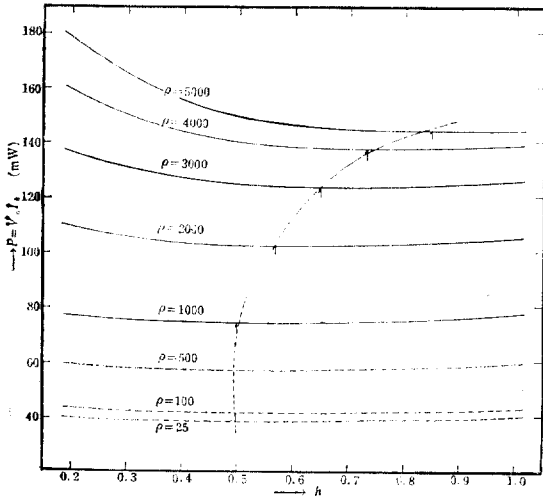


Fig. 5. Relations of P to h (The part between the two drainage points)

T. P. : $\phi 2.72\text{cm} \times 0.28\text{cm} \times 200\text{cm L}$

의 $P(\rho, h)$ 와 h 와의 關係를 圖示하면 Fig. 4(陽極外側鋼管表面의 경우)와 Fig. 5(兩 陽極間의 鋼管表面의 경우)와 같이 된다. 이들 그림에 의하면 두 경우 모두 물의 比抵抗 ρ 가 큰 경우에는 陽極의 設置位置 h 의 適正問題가 防蝕電力 P 에 크게 影響을 미치나 海水와 같이 물의 比抵抗이 작은 경우에는 이 影響이 거의 없다. 또한 水中鋼管表面에 대한 最少防蝕電力을 要하는 陽極의 높이 h 는 陽極外側의 鋼管表面에 대해서는 물의 比抵抗 ρ 에 따라 $h=0.58 \sim 0.95$ 의 範圍이고, 陽極間의 鋼管表面인 경우 $h=0.5 \sim 0.85$ 의 範圍이다. 이때에 最少電力으로 防蝕할 수 있는 陽極의 높이 h 는 ρ 가 커짐에 따라 커지는 傾向에 있다. 이 傾向은 ρ 를 考慮하지 않은 排流點의 分極電位 E_0 와 被防蝕面積係數 f 를 고려하지 않은 電源裝置의 所要電壓 V_0 를 利用한 (I)(II)報의 結果와 相反되나 理論적으로 妥當한 現象이다.

3.2 試驗片(II)에 대한 最適防蝕條件

두 陽極을 使用한 (III)報 實驗(II)에 使用된 準實用規模의 鋼管($D=3.4\text{cm}$, $t=0.32\text{cm}$, $l=600\text{cm}(L=24\text{m})$)이고 $\rho_s=13.5 \times 10^{-6}(\Omega\text{-cm})$ 의 경우 最適防蝕條件으로서 (3.7)式, (3.8)式 및 (3.9)式을 適用하여 試驗片의 寸數와 여러가지 ρ 및 h 값들의 代入에 의하여 $P(\rho, h)$ 를 計算하고 이에 의하여 一定한 ρ 에서의 $P(\rho, h)$ 와 h 와의 關係를 圖示하면 Fig. 6(陽極外側鋼管의 경우)와 Fig. 7(陽極間의 鋼管의 경우)와 같이 된다.

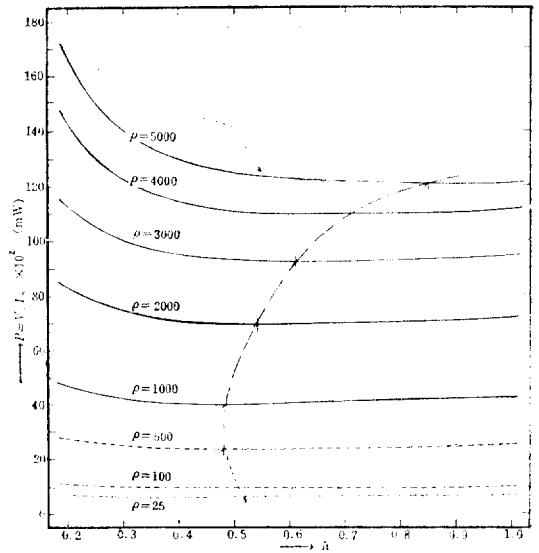


Fig. 6. Relations of P to h (The outside parts of the two drainage points)

T. P. : $\phi 3.4\text{cm} \times 0.32\text{cm} \times 2400\text{cm L}$

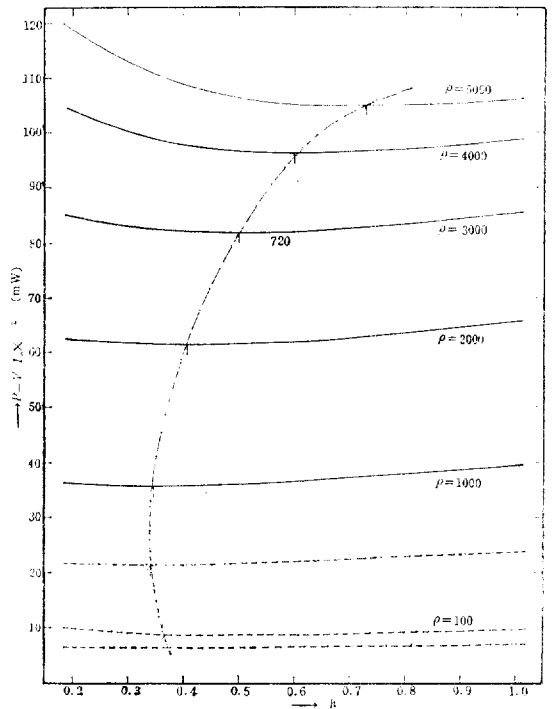


Fig. 7. Relations of P to h (The part between the two drainage points)

T. P. : $\phi 3.4\text{cm} \times 0.32\text{cm} \times 2400\text{cm L}$

이들 그림에 의하면 最少防蝕電力を 要하는 陽極의 높이율 h 는 陽極外側鋼管表面에 대해서는 Fig. 6 에 表示된 바와 같이 물의 比抵抗 $\rho=1000\sim 5000\Omega\text{-cm}$ 범위에서는 ρ 에 따라 $h=0.49\sim 0.84$, 또한 陽極間의 鋼管表面에 대해서는 위의 ρ 와 같은 範圍內에서 $h=0.35\sim 0.73$ 으로 두 경우 모두 ρ 의 增加에 따라 增加함을 알 수 있다. 그러나 $\rho=1000\Omega\text{-cm}$ 以下에 대해서는 ρ 의 增加에 따라 h 가 減少하는 傾向에 있다. 이는 本論文의 諸實驗式이 (III)報에서 밝힌 것과 같이 $\rho=960\sim 4800\Omega\text{-cm}$ 範圍에 適用되므로 問題示되지 않는다.

그리고 試驗片(I)(II)에 대한 그림 Fig. 4, 5와 Fig. 6, 7을 比較할 때 最少防蝕電력을 要하는 陽極의 높이율 h 는 被防蝕面積이 큰 鋼管에 대한 것이 被防蝕面積이 작은 것에 比하여 작아지는 것을 알 수 있다. 이 點에 대해서는 아래 4節에서 再論한다.

4. 被防蝕面積의 增加에 따른 最少防蝕條件의 適用限界

被防蝕面積의 增加에 따른 最少防蝕電式 (3.7)式的 適用限界를 求하기 위하여 $D=2.72\text{cm}$, $t=0.28\text{cm}$, $\rho_s=13.5\times 10^{-6}\Omega\text{-cm}$, 길이 $L=20\sim 240\text{m}$ 의 鋼管에 대하여 물의 比抵抗 $\rho=2000\Omega\text{-cm}$ 인 경우에 鋼管의 길이를 變更함으로써 被防蝕面積을 다르게 했을때 最適防蝕條件을 適用해 본다.

즉 一定 $\rho(\rho=2000\Omega\text{-cm})$ 下에서의 鋼管의 길이를 다르게 했을 때 最少防蝕電력을 要하는 陽極의 높이율 h 를 (3.7)式~(3.9)式을 適用한 計算에 의하여 圖示하면 Fig. 8(陽極外側鋼管의 경우)및 Fig. 9(陽極間의 鋼管의 경우)와 같이 된다.

이들 그림에 의하면 $L=200\text{m}(l=5000\text{cm})$ 까지는 最少防蝕電력을 要하는 陽極의 높이율 h 는 鋼管의 길이 L 가 길어 질수록 즉 被防蝕面積이 增加함에 따라 減少함을 나타낸다. 그러나 $L=2600\text{m}(l=5000\text{cm})$ 以上에서는 最少電력을 要하는 陽極의 높이율 h 를 찾을 수가 없다. 이것은 (2.2)式이 $f=0.1$ 以下에서는 成立하지 않기 때문이라고 생각된다.

따라서 本研究의 最適防蝕條件으로서의 實驗式 (3.7)~(3.9)式的 適用限界는 $D=2.72\text{cm}$, $t=0.28\text{cm}$ 의 鋼管의 경우 $L=200\text{m}$ 規模鋼管以下이므로 이 數値의 長大한 鋼管을 防蝕할 때는 陽極間의 距離를 100m 以下로 하여야 한다.

그러나 實際地下埋設管이나 高比抵抗의 水中에서 長期間(數10年間)防蝕하러할 때에는 所要防蝕電流密度는 比抵抗 $1000\sim 5000\Omega\text{-cm}$ 되는 地下(陸土)의 裸鋼管에 대해서는 $10\sim 20\text{mA}/\text{m}^2$ (이때는 數週日後에 完全防

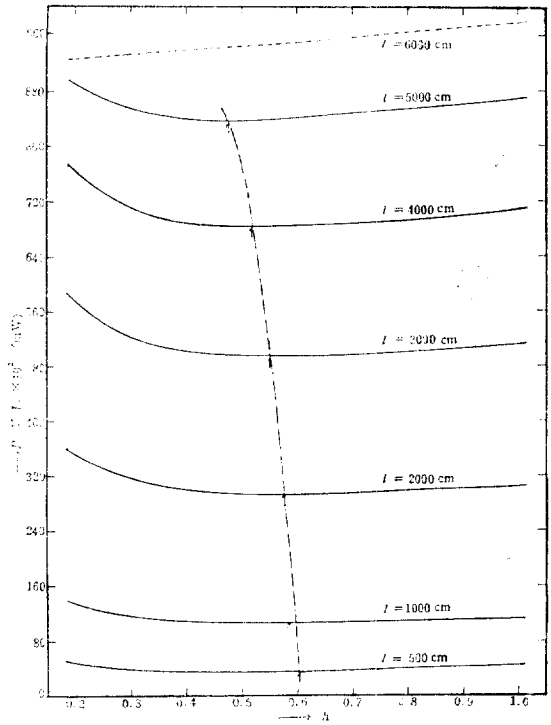


Fig. 8. Relations of ρ to h ($\rho=2000\Omega\text{-cm}$)
(The outside parts of the two drainage points)
T. P. : $\phi 2.72\text{cm} \times 0.28\text{cm} \times 4/\text{cm} L$

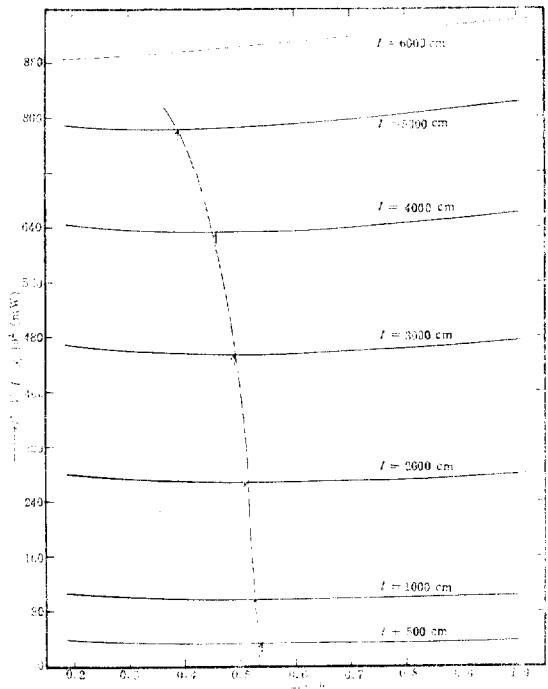


Fig. 9. Relations of P to h ($\rho=2000\Omega\text{-cm}$)
(The part between the two drainage points)
T. P. : $\phi 2.72\text{cm} \times 0.28\text{cm} \times 4/\text{cm} L$

蝕狀態로 됨)이고 같은 比抵抗範圍(1000~5000Ω-cm)의 水中에서는 30~60mA/m²이다. 그러나 10日 以內에 完全防蝕狀態로 만들기 위해서 防蝕電流密度를 각각 이 보다 6~12倍와 2~4倍가 큰 125mA/m²로 適用하였으므로 이 試驗資料는 試驗片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 2mA/m² 이하이므로 試驗片의 鋼管直徑의 60倍程度되는 被覆鋼管에까지 適用시킬 수 있으리라 생각된다.

5. 在來計算式과 本研究實驗式의 比較

在來式의 分極電位計算式들은 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과 그 外側의 諸式은 $x=0$ 일 때 $E_x=E_0$ 이고 $x=l$ 일 때 $E_x=E_1$, $(dE_x/dx)_x=l=0$ 의 條件下에서 다음과 같이 表示된다.

$$E_x = E_0 \cosh \alpha(l-x) / \cosh \alpha l \quad (5.1)$$

$$I_x = E_0 / \sqrt{r\omega} \sinh \alpha(l-x) / \cosh \alpha l \quad (5.2)$$

$$E_l = E_0 / \cosh \alpha l \quad (5.3)$$

$$\frac{1}{4} I_0 = (E_0 / \sqrt{r\omega}) \tanh \alpha l \quad (5.4)$$

$$E_0 = \frac{1}{4} I_0 \sqrt{r\omega} \coth \alpha l \quad (5.5)$$

$$I_0 = \pi D L i_0 \quad (5.4)'$$

準實用配管 $D=3.4\text{cm}$, $t=0.32\text{cm}$, $L(=4l)=2400\text{cm}$, 管導體抵抗 $\rho_c=13.5 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$, 물의 比抵抗 $\rho=1950 \Omega\text{-cm}$ 의 경우 單位길이(cm)當의 管의 塗膜抵抗 R_p ($\Omega\text{-cm}$), 漏洩抵抗 R_s ($\Omega\text{-cm}$)라 하면 單位길이(cm)當의 總合漏洩抵抗 ω ($\Omega\text{-cm}$)는

$$\omega = R_p + R_s \quad (5.6)$$

單位길이(cm)當의 管導體抵抗 r (Ω/cm)는

$$r = \frac{13.5 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}}{3.14(1.72 - 1.35^2) \text{cm}^2} = 4.3622 \times 10^{-6} (\Omega/\text{cm})$$

漏洩抵抗 R_s 는 水中抵抗의 想定距離 $r_2=536r_1^{0.5}$ (管의 半徑)이라하면

$$R_s = \rho / 2\pi \ln(r_2/r_1) \approx \rho (\Omega\text{-cm}) = 1950 (\Omega\text{-cm})$$

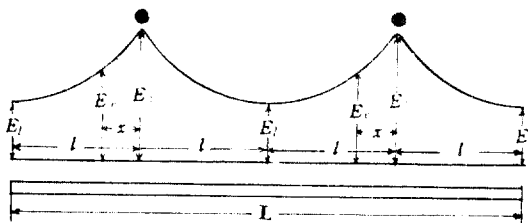


Fig. 10. Polarization potential on the pipe protected by cathodic protection.

Table 2. Polarization potential at the drainage point calculated by already accepted formula.

l (cm)	$\frac{1}{4} I_0$ (mA)	αl	$\coth \alpha l$	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	0.015384	65.01	885.46	Measured E_0 =120~170 mV
2000	266.9	0.05128	19.52	886.23	—
10000	1334.5	0.2564	3.99	905.75	—

管의 塗膜抵抗 R_p 는 無塗裝時 $5 \Omega\text{-m}^2$ 정도이므로 單位길이(cm)當은

$$R_p = 5 \times 10^4 \Omega\text{-cm}^2 / 3.14 \times 3.4 \text{cm} = 4683.4 (\Omega\text{-cm})$$

따라서 $\omega = R_p + R_s = 4683.4 + 1950 = 6633.4 (\Omega\text{-cm})$

單位길이(cm)當의 減衰係數 α 는

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

$$\text{또 } \sqrt{r\omega} = \sqrt{6633.4 \times 4.3622 \times 10^{-6}} = 0.170106 (\Omega)$$

防蝕電流密度 $i_0=125(\text{mA}/\text{m}^2)$ 일때 이 配管에 대해서 (5.5)式으로 E_0 를 求하면 Table 2와 같다.

위의 配管에 대한 E_0 의 實測値는 陽極의 높이率 h 에 따라 120~170mV인데 대하여 Table 2의 값은 무려 그 5~7倍 程度이다. 그러므로 在來式에 의한 E_0 計算式은 比抵抗 $\rho=1000\sim 5000 \Omega\text{-cm}$ 의 地下埋設 裸鋼管과 같이 所要防蝕電流密度가 $10\sim 20 \text{mA}/\text{m}^2$ 인 경우나 被防蝕體를 塗裝하여 所要防蝕電流密度가 이 보다 낮은 경우에 (5.5)式을 適用할 수 있음을 알수 있다.

따라서 E_0 에 대해서 實測値를 適用하여 (5.1)式에 의한 電位分布를 計算하고 本研究에 의한 電位分布實驗式 卽 다음 (5.7)式¹⁰⁾ (5.8)式¹⁰⁾에 의해서 電位分布를 計算한 것을 比較하면 附錄 Table 1과 같다.

(i) 兩 陽極外側鋼管表面의 경우

$$E_x = E_0' \exp \left\{ -2 \sqrt{\rho_c D} / \{D^2 - (D-2t)^2\} \times \left[\frac{50x}{l} / \sqrt{R} \right] \right\} \quad (5.7)$$

$$\sqrt{R} \times 10^3 = (19.3889 + 1.0664) \times \frac{50x}{l} + 1284.5064h - 64.4196$$

$$E_0' = \{1.7667 / [\log(50h)]^{0.9582}\} i_0 - \{146.4624 / (50h)^{0.5688}\} + 0.0083433(\rho - 1950)$$

(ii) 兩 陽極間의 鋼管表面의 경우

$$E_x = E_0' \left\{ \cosh \left[2 \sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}} \times \left(50 - \frac{50x}{l} \right) / \sqrt{R} \right] \right. \\ \left. + \cosh \left[100 \sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}} / \sqrt{R} \right] \right\} \quad (5-8) \\ \sqrt{R} \times 10^3 = (1.3869h + 0.1306) \times \\ \frac{50}{l} x + 629.774h + 156.1420 \\ E_0' = \{1.7667 / [\log(50h)]^{0.9582}\} i_0 \\ - \{146.4624 / (50h)^{0.5688}\} \\ + 0.0083433(\rho - 1950)$$

이 附錄 Table 1 에 의하면 實測值 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 h 가 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 實測值에 대한 差異가 急激히 커진다. 그러므로 在來計算式은 h 가 1.0程度로 陽極을 被防蝕體에서 멀리 떨어져 設置했을 때에 限해서 實測值 E_0' 를 適用해서 利用할 수 있는데 대해서 本研究에 의한 實驗式들은 모든 陽極의 높이 h 및 모든 防蝕電流密度 i_0 에 대해서 實測結果에 가까운 排流點分極電位 E_0' 와 分極電位分布를 計算할 수 있을 뿐만 아니라 모든 h 및 i_0 의 경우에 電源裝置의 適正容量까지도 計算할 수 있다.

5. 結 論

排流點의 分極電位 E_0' 를 加電流密度 i_0 , 陽極의 높이 h 및 물의 比抵抗 ρ 의 函數로, 電源裝置의 負荷電壓 V_0 를 印加電流 I_0 , 물의 比抵抗 ρ , 陽極의 높이 h 및 被防蝕面積係數 f 의 函數로 해서 所要防蝕電力和 最適防蝕條件을 檢討하고 또한 排流點分極電位 E_0' 와 分極電位分布에 대한 在來計算式과 本研究實驗式을 比較하여 다음의 結果를 얻었다.

(1) 極陰防蝕用電源裝置의 所要防蝕電力은 다음 式으로 求할 수 있다.

$$P = V_0 I_0 = I_0^2 (1.3531444 - 2.3980884 \log I_0) \times \\ [0.0723 + 0.0144 \log(50h)] \times \rho \times 10^{-3} + 1.85 I_0 \quad (\text{mW})$$

$$\text{여기에서 } I_0 = 4\pi D l i_0 \times 10^{-4} \quad (\text{mA})$$

또한 最少防蝕電流密度 $i_{0(\min)}$ 는 다음 式으로 求할 수 있다.

(i) 陽極外側의 鋼管表面인 경우 :

$$i_{0(\min)} = \left\{ 50.9424 \exp \left[\frac{100 \sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}}}{2253.9514h - 11.0996} \right] \right. \\ \left. + [82.9017 / (50h)^{0.5688}] - 0.0047225(\rho - 1950) \right\} \\ \times [\log(50h)]^{0.9582} \quad (\text{mA/m}^2)$$

(ii) 陽極間의 鋼管表面인 경우 ·

$$i_{0(\min)} = \left\{ 25.4712 \left[\exp \left(\frac{100 \sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}}}{699.12h + 162.67} \right) \right. \right. \\ \left. \left. + \exp \left(\frac{-100 \sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}}}{699.12h + 162.67} \right) \right] \right. \\ \left. + [82.9017 / (50h)^{0.5688}] \right. \\ \left. - 0.0047225(\rho - 1950) \right\} \times [\log(50h)]^{0.9582} \\ (\text{mA/m}^2)$$

(2) 물의 比抵抗 ρ 가 큰 경우에는 陽極의 設置位置의 適正問題가 防蝕電力 P 에 크게 영향을 미치나 ρ 가 적은 경우에는 이 영향이 적다.

(3) 最少防蝕電力을 要하는 陽極의 높이 h 는 $\rho = 960 \sim 4800 \Omega\text{-cm}$ 범위에서 ρ 의 增加에 따라 增加하는 傾向에 있고 또한 被防蝕面積이 增加할수록 減少하는 傾向에 있다.

(4) 最適防蝕條件으로서의 實驗式의 適用限界는 물의 比抵抗 $\rho = 960 \sim 4800 \Omega\text{-cm}$ 범위에서 $D = 2.72 \text{cm}$, $t = 0.28 \text{cm}$ 의 鋼管의 경우 $L = 200 \text{m}$ 이므로 이런 尺寸의 長大한 鋼管을 防蝕할 때에는 陽極間의 거리를 100 m 以下로 하여야 한다.

(5) 在來式의 排流點分極電位計算式은 設置環境의 比抵抗이 크거나 被防蝕體의 塗膜抵抗이 커서 所要防蝕電流密度가 아주 적은 경우 外에는 實用하기 困難하고, 實測排流點分極電位值를 代入해서 求한 그 電位分布도 陽極의 높이 $h = 1.0$ 內外인 경우에는 實測結果와 거의 같으나 h 가 낮은 경우에는 큰 差異를 보인다. 그러나 本研究의 實驗式들은 모든 h 및 모든 防蝕電流密度 i_0 에 대해서 實測結果에 가까운 排流點分極電位와 分極電位分布뿐만 아니라 電源裝置의 適正容量까지도 求할 수 있다.

參考文獻

1. 田大熙·金垣寧: 本誌 Vol. 9, No. 1, p. 6 (1980)
2. 前掲書 (1): p. 7
3. 前掲書 (1): p. 4
4. 前掲書 (1): p. 7
5. 田大熙·金垣寧: 本誌 Vol. 8, No. 2, p. 24 (1979)
6. 田大熙: 腐蝕과 防蝕의 管理 p. 516 太和出版社 (1979)
7. 前掲書 (6): p. 516
8. 日本電氣學會: 新版電氣土壤腐蝕ハンドブック p. 217. コロナ社東京 (1977)
9. 日本學術振興會: 新版 金屬防蝕技術便覽 p. 598 日刊工業新聞社 東京 (1972)
10. 前掲書 (1): p. 6

<Appendix>

Table 1. Calculated polarization potentials and Measured polarization potentials

$i_0=125\text{mA/m}^2$, $\rho=1950\Omega\text{-cm}$

Test pipe : $\phi 3.4\text{cm} \times 0.32\text{cm} \times 2400\text{cmL}$

$\frac{x(\text{cm})}{h}$	Surface between two anodes					drainage point	Surface of outer sides of anode				
	600	450	300	150	50	0	50	150	300	450	600
0.25	◎107.5 (2.38)	109.5 (1.39)	119.1 (0.93)	137.7 (-0.22)	156.0 (-2.5)	167.3 (-1.59)	151.2 (-0.53)	129.3 (-0.54)	109.7 (-2.05)	98.0 (-2.97)	90.2 (-5.04)
	△169.980 (61.88)	169.981 (57.39)	169.985 (44.05)	169.992 (23.18)	169.997 (6.25)	170 (0)	169.783 (11.70)	169.348 (30.26)	168.697 (50.62)	168.050 (66.39)	167.409 (76.22)
	※105	108	118	138	160	170	152	130	112	101	95
0.5	◎111.12 (1.02)	111.83 (0.75)	116.0 (0)	124.0 (-0.8)	131.9 (-2.30)	136.7 (-2.36)	130.6 (-1.80)	121.3 (-0.57)	111.8 (-0.18)	105.3 (-1.59)	100.7 (-4.1)
	△139.983 (27.26)	139.985 (26.11)	139.988 (20.68)	139.993 (11.99)	139.997 (3.70)	140 (0)	139.821 (5.13)	139.464 (14.31)	138.929 (24.04)	138.396 (29.34)	137.866 (31.30)
	※110	111	116	125	135	140	133	122	112	107	105
0.75	◎110.5 (-2.21)	110.8 (-2.81)	113.1 (-1.65)	117.5 (-2.08)	121.8 (-1.77)	124.4 (-0.48)	120.8 (-1.79)	115.1 (-1.62)	109.0 (-1.80)	104.7 (-3.05)	101.5 (-6.02)
	△124.985 (10.60)	124.986 (9.64)	124.989 (8.69)	124.994 (4.16)	124.998 (0.80)	125 (0)	124.840 (1.50)	124.521 (6.43)	124.044 (11.75)	123.568 (14.41)	123.095 (13.98)
	※113	114	115	120	124	125	123	117	111	108	108
1.0	◎108.5 (-5.65)	108.7 (-5.48)	110.1 (-5.08)	112.8 (-3.59)	115.5 (-2.94)	117.1 (-2.42)	114.6 (-3.70)	110.5 (-4.74)	106.1 (-4.41)	103.0 (-5.50)	100.6 (-6.85)
	△119.986 (4.34)	119.987 (4.34)	119.989 (3.44)	119.994 (2.56)	119.998 (0.84)	120 (0)	119.847 (0.71)	119.540 (3.05)	119.082 (7.28)	118.626 (8.83)	118.171 (9.42)
	※115	115	116	117	119	120	119	116	111	109	108

※ : Measured polarization potentials (E_m)

△ : Calculated polarization potentials by already accepted formulas (E_{cf})

◎ : Calculated polarization potentials by empirical formulas (E_{ce})

() : $\left(1 - \frac{E_c}{E_m}\right) \times 100\%$