

〈研究論文〉

外部電源에 의한 水中鋼管의 陰極防蝕에 관한 研究

(I) 陽極外側의 鋼管兩端防蝕

田 大 熙 · 金 垣 寧

韓國海洋大學 機關學科

(1978. 10. 27 接受)

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

Jeon Dae Hi · Kim Wonn Yeong

Department of Marine Engineering, Korea Merchant Marine College, Busan, Korea

(Received Oct. 27, 1978)

Abstract

The polarization potential distribution and the electric power for corrosion prevention are more affected by the anode location in the impressed current method than by the galvanic anode method.

However, there seem to be few researches except basic research of simple underwater steel pipe on the effect which anode location exerts on polarization potential distribution under the impressed current method.

This paper deals with a basic research which premises economical corrosion prevention on the surface of huge steel pipe underwater or underground.

In case of installing two insoluble anodes, the authors interpreted in the theoretical and experimental respects the effects which anode location exerts on polarization potential distribution and electric power for corrosion prevention, and studied an economical condition of corrosion prevention according to the above interpretation.

But this research is so extensive that this paper deals with only the corrosion prevention on the surfaces of steel pipe of the two outer sides of anodes, leaving the case on the surface of pipe between the two anodes for later research.

The results of research are as follows:

- 1) The cathodic polarization potential on the steel pipe surfaces of the two outer sides of anodes can be calculated by

$$E_x = E_0 e^{-ax} = E_0 \exp\{-2\sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}} \cdot x / \sqrt{R}\}$$

$$E_0 = \{1.7667 / (\log(lh))^{0.9582}\} i_0 - 146.4624 / (lh)^{0.5683}$$

$$\sqrt{R} \times 10^3 = (0.3877lh + 1.0664)x + 25.6901lh - 64.4196$$

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

$$V_0 = I_0 [0.0723 + 0.0144 \log(lh)] \rho \times 10^{-3} + 1.85$$

$$I_0 = 4i_0 \pi D l \times 10^{-4}$$

and the required electric power for only the corrosion prevention on the surfaces of steel pipe of the

two outer sides of anodes becomes $P = \frac{1}{2} V_0 I_0$.

- 3) The larger specific resistance of water is, the greater is the effect of anode location on the required minimum power. But the h range which requires minimum power is 0.63~0.75 without any relation with the specific resistance of water.

초 록

음극방식법중 외부전원법은 유전양극법에 비해 아주 적은 수의 큰 용량의 양극으로 방식하기 때문에 분극전위 분포상태가 불량하게 되기 쉽다. 그러므로 외부전원법은 양극의 설치위치의 적부영향이 유전양극법의 경우보다 훨씬 크게 나타난다.

그러나 외부전원법에서 양극의 설치위치가 분극전위분포 및 방식전력 등에 미치는 영향에 대해서는 단순한 수증강대에 대한 기초연구의에는 없다.

본 논문에서는 수중이나 지하에 매설된 장대한 강관표면의 경제적 방식을 전제로 한 기초연구로서, 수증강관을 시험편으로 채택하여 두개의 불용성양극을 설치한 경우 양극의 설치위치가 분극전위분포상태, 소요 방식전력 등에 미치는 영향에 관해 이론적인 면과 실험적인 면에서 해석하고, 이에 의해서 경제적인 방식조건을 고찰하였다.

그러나 이 연구는 방대하므로 이번 연구에서는 강관표면을 두 양극간과 두 양극 외측의 경우로 나누고 그 일부인 후자의 경우만을 다루었다.

그 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 양극외측 강관표면의 음분극전위는 다음식으로 계산할 수 있다.

$$E_x = E_0 e^{-\alpha x} = E_0 \exp\{-2\sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}} \cdot x / \sqrt{R}\}$$

$$E_0 = [1.7667 / (\log(lh))^{0.9582}] i_0 - 146.4624 / (lh)^{0.5688}$$

$$\sqrt{R} \times 10^3 = (0.3877lh + 1.0664)x + 25.6901lh - 64.4196$$

- 2) 음극방식용 전원장치의 소요전압은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$V_0 = I_0(0.0723 + 0.0144 \log(lh)) \rho \times 10^{-3} + 1.85$$

$$I_0 = 4i_0 \pi D l \times 10^{-4}$$

두 양극외측 강관양단표면만의 소요방식전력은 $P = \frac{1}{2} V_0 I_0$ 로 된다.

- 3) 물의 비저항(ρ)이 클수록 양극의 설치 위치(h)의 적정문제가 방식전력(P)에 미치는 영향이 커지는 경향에 있다. 그러나 최소전력으로 방식할 수 있는 양극의 높이율(h)의 범위는 물의 비저항(ρ)에 거의 관계없이 0.63~0.75이다.

기 호 설 명

- x : 배류점에서 측정점까지의 거리(cm)
- D : 시험편의 외경(cm)
- t : 시험편의 두께(cm)
- L, l : 시험편의 전장(全長)과 1/4길이(cm)
- I_0, I_x : 인가전류 및 x 점을 흐르는 전류(mA)
- i_0, i_x : 시험편의 평균인가전류밀도 및 x 점의 전류밀도(mA/m²)
- E_0, E_x : 배류점 및 x 점의 분극전위(mV)
- R : 시험편의 표면저항(Ω -cm²)
- $w(=R/\pi D)$: 시험편의 1cm 길이당의 표면저항(Ω -cm)
- $r[=4\rho_s/\pi\{D^2 - (D-2t)^2\}]$: 시험편의 1cm 길이당의 금속저항(Ω /cm)

- ρ_s : 시험편의 비저항(Ω -cm)
- $\alpha(=\sqrt{r/w})$: 감쇠계수(cm⁻¹)
- H, h : 시험편 중심선으로부터 양극까지의 높이(cm) 및 그 높이율(H/l)
- V_0 : 전원장치의 부하전압(V)
- ρ, ρ_{28} : 임의온도하의 물의 비저항 및 28°C 하의 물의 비저항(Ω -cm)
- R_{RH} : 양극의 높이 H (cm)이고 물의 비저항 ρ (Ω -cm) 일 때의 전 방식최소저항(Ω)
- P : 방식전력(mW)

1. 서 론

음극방식법은 수중이나 지하의 금속구조물에 대하여 적용했을 때 다른 어느 방식법보다도 가장 확실하고 가장 경제적이라는 정평¹⁾²⁾을 받고 있으므로 이 분야

에 널리 활용되고 있다.

이 방식법에는 유전양극법과 외부전원법이 있으며, 전자는 주로 아연이나 알루미늄 등을 희생양극으로 사용하여 소형시설의 방식에 이용되고, 후자는 지하매설관이나 고층건물의 기초최말둑 및 해양구조물 등 대형 철강체의 장기간 방식에 많이 이용되고 있다³⁾.

음극방식법중 가장 중요한 것은⁴⁾⁵⁾ 피방식체의 각부의 분극전위를 방식전위이하의 거의 균등한 값으로 유지하는 것이다. 이를 위해서는 다수의 소형양극을 채용해야 되나 양극의 설치비용관계로 일정한 크기 이상의 양극을 설치하게 된다.

특히 외부전원법은 유전양극법에 비하여 한 양극당의 용량이 크므로 피방식체의 분극전위 분포상태가 아주 나빠져, 양극의 설치위치의 적부 영향이 유전양극법에 비하여 훨씬 크게 나타난다.

또 유전양극법에서는 대형 바ラスト 탱크 등에 양극의 설치비용과 분극전위분포를 고려한 새로운 설치공법⁶⁾이 개발되어 있다. 그러나 외부전원법에는 이것의 적용이 불가능하므로 양극의 설치위치의 적부문제는 대단히 중요한 과제이다.

금속구조물을 음극방식할 때 피방식체의 분극전위분포에 대한 이론적인 해석은 관 내면의 경우^{7)~9)}와 장대한 지하매설관의 외면의 경우^{10)~12)}에 많은 진전이 있으나 이들의 연구는 피방식체의 분극전위분포를 양극의 위치관계에서 구하지 않고 배류점의 분극전위를 기준으로 해서 구하고 있다. 그러므로 이들의 연구는 양극의 적정위치 결정이나 방식용전원장치의 용량결정에는 적용할 수 없다.

불용성 양극의 설치위치에 따르는 피방식체의 분극전위 분포상태와 불용성양극의 설치 적정위치 등에 관해서는 단순한 수중강대(水中鋼帶)에 대한 연구¹³⁾가 있으나 수중이나 지중의 강관에 대해서는 연구된 바가 없다.

이 연구는 수중이나 지하에 매설된 장대한 강관표면의 경제적 방식을 전제로한 기초연구로서 수중강관을 시험편으로 채택하고 두개의 불용성양극을 설치한 경우를 대상으로 하였으며, 이 때의 피방식체의 분극전위분포, 방식에 필요한 인가전압 및 소요방식전력 등에 미치는 양극의 설치위치의 영향을 이론적인 면과 실험적인 면에서 해석하고 이를 기준으로 경제적인 방식조건을 고찰하고자 한다.

이 연구가 이루어지면 수중이나 지하에 매설된 장대한 강관표면을 외부전원법으로 방식할 때 경제적으로 방식하기 위한 불용성양극의 적정위치와 외부전원 장치의 용량을 결정하는 데 크게 기여할 것이다.

그러나 이 연구는 방대하므로 두 양극간(陽極間)의 강관방식과 그 양극의측 강관의 양단 방식의 두 경우로 나누고 이번 연구에서는 그 일부분인 두 양극의측의 강관양단의 방식만을 다루기로 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

(1) 수조

시험수조는 240cm×120cm×120cm의 강판제탱크로서 내면에 Zinc Rich Primer를 2회, 에폭시타알도료를 4회 칠하여 완전 절연시켰으며, 실험용수를 수심 1m 10cm 되도록 채웠다.

(2) 시험편

주 시험편으로는 외경 2.72cm, 두께 0.28cm, 길이 2m 10cm의 배관용 탄소강관(KSD3507-SGP)을 채택하였으며 양단을 용접밀폐했다. 또한 양단에 전두단자를 붙인 후 유효노출 길이가 2m로 되게 양단으로부터 5cm 씩은 시험수조의 내면과 같은 방법으로 절연시켰다.

시험편의 노출면은 와이어 브러쉬와 샌드페이퍼로 탈수(脫銹)하고 아세톤으로 탈지한 후에 시험편을 수조에 침지시켰다.

또한 보조시험편으로는 주 시험편과 같은 재질의 외경 2.17cm, 두께 0.28cm, 길이 2m(유효노출길이)의 강관과 외경 3.40cm, 두께 0.32cm, 길이 2m(유효노출길이)의 강관을 각각 1개씩 채택하고 주 시험편과 같은 요령으로 가공하였다.

(3) 실험장치의 배치

이 연구에서 실험장치는 Fig. 1과 같이 배치하였다. 즉 시험편은 수조내의 2개의 사발 위에 올려 놓았으며, 불용성양극은 시험편의 1/4분점 및 3/4분점 상방에 높이만을 조절할 수 있도록 설치하였고, 기준전극

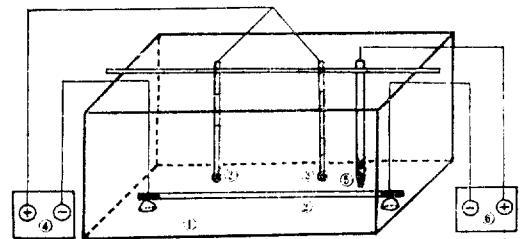


Fig. 1. Schematic drawing of experimental equipment

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

Table 1. Qualities of water used for the experiments

Water temp. °C	pH	Total hardness ppm as CaCO ₃	Total alkalinity ppm as CaCO ₃	Chloride ppm as Cl ⁻	Specific resistance Ω-cm	Specific gravity
28	6.2	66	25 (p=0)	106.5	1950	1.0015

은 시험편 상면에 연하여 길이 방향으로 이동시킬 수 있도록 설치하였다. 그리고 이 시험편을 전원장치와 전위차계에 각각 배선하였다.

2.2 측정기기

- (1) 전위차계 : VTVM(Vacuum Tube Voltmeter), KYORITSU K142
- (2) 전원장치 : 직류정전압장치
용량 45V×1A(한국해양대학제작),
V-A meter: SANWA, A-303 TR-D II
- (3) 불용성양극 : 직경 1cm 구형(球形) 백금전극, 부산 친육당 제작
- (4) 기준전극 : 포화카로멜 전극, CORNING cat. No. 47610900

2.3 실험용수의 질

실험용수의 질은 청수에 해수를 섞어서 Table 1. 과 같이 조절(調質)하였으며, 실험중 수온은 26~29°C 의 범위였다.

2.4 실험방법

실험수조에 수심 1m 10cm 정도로 물을 채우고 시험편을 잠지시킨 후에 처음 3주간은 주간(晝間) 6시간 전류밀도 150mA/m²로 방치하고 그 외의 시간은 무방식상태로 방치하였다. 이렇게 함으로서 시험편을 안정화시켰으며, 이 환경에서 충분히 안정되기까지 약 1개월을 기다린 후에 통전시험을 개시하였다. 이 때의 시험편의 자연전위는 -680mV(SCE)이었다.

외부전원에서 방식전류를 통전하여 시험편표면의 분극전위가 안정되는 20분 후에 분극전위를 측정하였고, 측정이 끝난 후는 전원을 끊고 다시 시험편표면이 자연부식상태[-680mV(SCE)]로 복극되기까지 약 1시간씩 기다렸다.

두 불용성 양극의 위치는 각각 시험편의 1/4분점과 3/4분점의 상방에 시험편 중심선으로부터 높이(H=lh, l: 시험편의 길이)×1/4, h: 높이율)를 12.5cm(h=0.25), 18.75cm(h=0.375), 25cm(h=0.5), 37.5cm(h=0.75) 및 50cm(h=1.0)로 바꿔가면서, 또 외부전원으로 부터의 인가전류(I₀)를 17.08mA(i₀=100mA/m²), 21.35mA(i₀=125mA/m²), 25.62mA(i₀=150mA/m²), 29.89mA(175mA/m²) 및 34.16mA(i₀=200mA/m²)로 바꿔가면서 시험편표면의 분극전위를 측정하였다. 이

때 측정위치는 배류점(불용성 양극의 직하점)으로부터 5cm 간격으로 하였다.

또한 참고적인 보조실험도 두 개의 보조시험편에 대하여 각각 본 실험과 같은 방법으로 불용성양극의 위치와 인가전류를 바꿔가면서 시험편표면의 분극전위를 측정하였다.

3. 분극전위의 이론식과 실측분극전위

3.1 분극전위의 이론적 분포식(표면저항이 비전류할수일 때)

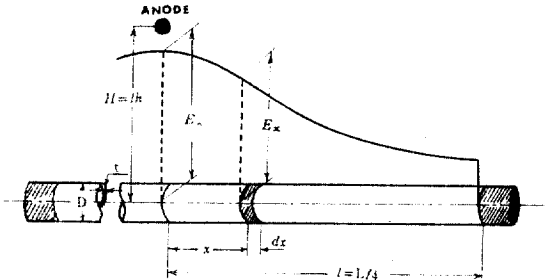


Fig. 2. Polarization potential on the pipe protected by cathodic protection

Fig. 2의 배류점(x=0)에서 xcm 떨어진 곳의 시험편의 표면적 πDdx(cm²)에 유입하는 전류를 dI_x(A)라 하면 그전류밀도 dI_x/πDdx(A/cm²)에 의하여 일어나는 시험편 표면의 전위변화 즉 분극치(=실측전위-자연전위) E_x(V)와 단위표면적의 표면저항 R(Ω-cm²)간에는

$$dI_x/\pi Ddx = -E_x/R \quad \dots\dots(3.1)$$

단위 길이(cm)당의 시험편의 표면저항을 w(Ω-cm)라 하면

$$w = R/\pi D \quad \dots\dots(3.2)$$

따라서

$$dI_x/dx = -E_x/w \quad \dots\dots(3.3)$$

또 x점의 시험편을 흐르는 전류 I_x(A)는 dx 간에서 dE_x(V)의 전위변화를 생기게 하므로 시험편의 비저항을 ρ_s(Ω-cm), 그 단위 길이(cm) 당의 금속저항을 r(Ω/cm)라 하면

$$dE_x = -I_x \rho_s dx / \frac{\pi}{4} \{D^2 - (D-2t)^2\} \quad \dots\dots(3.4)$$

$$r = \rho_s / \frac{\pi}{4} \{D^2 - (D-2t)^2\} \quad \dots\dots(3.5)$$

따라서

$$dE_x = -I_x r dx \quad \dots\dots (3.6)$$

(3.6)식을 x 로 미분하면

$$d^2 E_x / dx^2 = -r dI_x / dx \quad \dots\dots (3.7)$$

(3.3)식과 (3.7)식에서

$$d^2 E_x / dx^2 = (r/w) E_x = \alpha^2 E_x \quad \dots\dots (3.8)$$

$$\text{단 } \sqrt{r/w} = \alpha (\text{감쇠계수}) \quad \dots\dots (3.9)$$

Uhlig¹⁴⁾나 Sato¹⁵⁾ 등과 같이 R 가 전류밀도에 따라 변하지 않고 전시험편표면에 대하여 일정하다고 가정하면 α 는 정수이므로 (3.8)식의 일반해는

$$E_x = A \cosh \alpha x + B \sinh \alpha x \quad \dots\dots (3.10)$$

다시 이를 변형하면

$$E_x = \frac{1}{2} [A(e^{\alpha x} + e^{-\alpha x}) + B(e^{\alpha x} - e^{-\alpha x})] \quad \dots\dots (3.11)$$

경계조건으로서 시험편의 길이를 무한장이라 간주하여 $x = \infty$ 일 때 $dE_x/dx = 0$ 이라 하고 $x = 0$ (배류점)에서 $E_x = E_0$ 라 하면

$$\text{후자의 조건에서 } A = E_0$$

전자의 조건에서는 (3.10)식을 x 로 미분하여 이 조건을 대입하면

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

에서 $B = -A = -E_0$ 로 된다.

$$\therefore E_x = E_0(\cosh \alpha x - \sinh \alpha x) = E_0 e^{-\alpha x} \quad \dots\dots (3.12)$$

3.2 분극전위의 계산치와 실측치와의 비교

시험편의 치수가 $D = 2.72\text{cm}$, $t = 0.28\text{cm}$ 및 $L = 4l = 200\text{cm}$ 이고 탄소강의 비저항 $\rho_s = 13.5 \times 10^{-6} (\Omega\text{-cm})$ 정도¹⁶⁾이므로 단위 길이당의 금속저항 $r (\Omega/\text{cm})$ 와 표면저항 $w (\Omega\text{-cm})$ 및 감쇠계수 $\alpha (\text{cm}^{-1})$ 는

$$\begin{aligned} r &= \rho_s / \frac{\pi}{4} [D^2 - (D-2t)^2] \\ &= (13.5/2.145) \times 10^{-6} (\Omega/\text{cm}) \quad \dots\dots (3.13) \end{aligned}$$

$$w = R/\pi D = R/8.5408 (\Omega\text{-cm}) \quad \dots\dots (3.14)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt{r/w} = 2\sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}} / \sqrt{R} \\ &= 7.331 \times 10^{-3} / \sqrt{R} (\text{cm}^{-1}) \quad \dots\dots (3.15) \end{aligned}$$

또한 (3.12)식을 x 로 미분하여 (3.6)식에 대입하면

$$dE_x/dx = -\alpha E_0 e^{-\alpha x} = -r I_x$$

$$\therefore I_x = \frac{\alpha}{r} E_0 e^{-\alpha x} = (E_0 / \sqrt{r w}) e^{-\alpha x} \quad \dots\dots (3.16)$$

윗 식에서 $x \rightarrow 0$ 일 때 $I_x = \frac{1}{4} I_0$ 라 할 수 있으므로

$$\frac{1}{4} I_0 = E_0 / \sqrt{r w} \quad \dots\dots (3.17)$$

(3.13), (3.14) 및 (3.17)식에서

$$\sqrt{r w} = r/\alpha = 0.8584 \times 10^{-3} \sqrt{R} = 4E_0/I_0 \quad \dots\dots (3.18)$$

따라서 이 시험편상의 분극전위분포식은 (3.12) 및 (3.15)식에서

$$\begin{aligned} E_x &= E_0 e^{-\alpha x} \\ &= E_0 \exp\{-2\sqrt{\rho_s D / \{D^2 - (D-2t)^2\}} \cdot x / \sqrt{R}\} \\ &= E_0 e^{-7.331x / \sqrt{R} \times 10^3} \quad \dots\dots (3.19) \end{aligned}$$

이 때의 R 값은 (3.18)식에서

$$\sqrt{R} = 1.165 \times 10^3 (4E_0/I_0) (\Omega^{1/2} \cdot \text{cm}) \quad \dots\dots (3.20)$$

이 식은 앞의 가정과 같이 R 가 비전류함수일 때의 R 값을 나타내는 식으로서 이 경우의 R 은 E_0/I_0 만의 함수로 된다.

Fig. 3은 본 실험장치에서 두개의 양극을 시험편의 1/4분점과 3/4분점 상방에 두고 양극의 높이와 전류밀도를 변화시켜가며 분극전위를 실측하고 그것을 도시한 것이다.

실험결과와 한 예로서 두개의 양극을 본 시험편의 1/4분점과 3/4분점 상방에 두고 전류밀도를 150mA/m²로 하였을 때 양극의 높이 $h (= \frac{H}{l})$ 에 대한 E_0/I_0 (실측치)와 \sqrt{R} (계산치)를 Table 2의 좌반부에 표시하였다. 그리고 이 실험에서 측정된 시험편상의 분극전위와 (3.19)식으로 계산한 분극전위를 동표의 우반부에 비교하여 표시하였다.

Table 2.에서 분극전위의 실측치와 계산치의 양자간에는 큰 차이를 보이고 있다. 이것은 계산의 간략화 때문에 시험편의 길이를 무한장으로 취급한 것과 표면저항 R 을 시험편 각부 전류밀도의 비함수, 즉 시험편 전장에 걸쳐 R 가 일정이라 간주하였기 때문이다. 그러므로 표면저항 R 은 각 측정점의 전류밀도 i_x 에 따라 변하는 것으로 보고, 이 측정점의 전류밀도 i_x 는 양극의 높이 h 및 배류점에서 측정점까지의 거리 x 의 함수로 다루어야 한다. 따라서 임의점의 분극전위 E_x 는 일정 전류밀도 i_0 하에서 R 을 h 와 x 의 함수로, 배류점에서의 분극전위 E_0 를 i_0 와 h 의 함수로 취급하여 계산해야 한다.

4. 분극전위의 계산치를 실측치와 동일하게 하는 조건

(3.19)식인 $E_x = E_0 e^{-7.331x / \sqrt{R} \times 10^3}$ 에서 계산되는 분극전위를 그 실측치와 동일하게 하기 위해서는 전술한 바와 같이 표면저항 R 을 양극의 높이 h 와 배류점에서 측정점까지의 거리 x 의 함수로 표시해야 하고, 배류점에서의 분극전위 E_0 를 평균전류밀도 i_0 와 양극의 높이 h 의 함수로 표시해야 된다.

4.1 표면저항(R)의 실험식

(3.19)식을 변형하면

$$\sqrt{R} \times 10^3 = 7.331x / \ln(E_0/E_x) \quad \dots\dots (4.1)$$

이 된다.

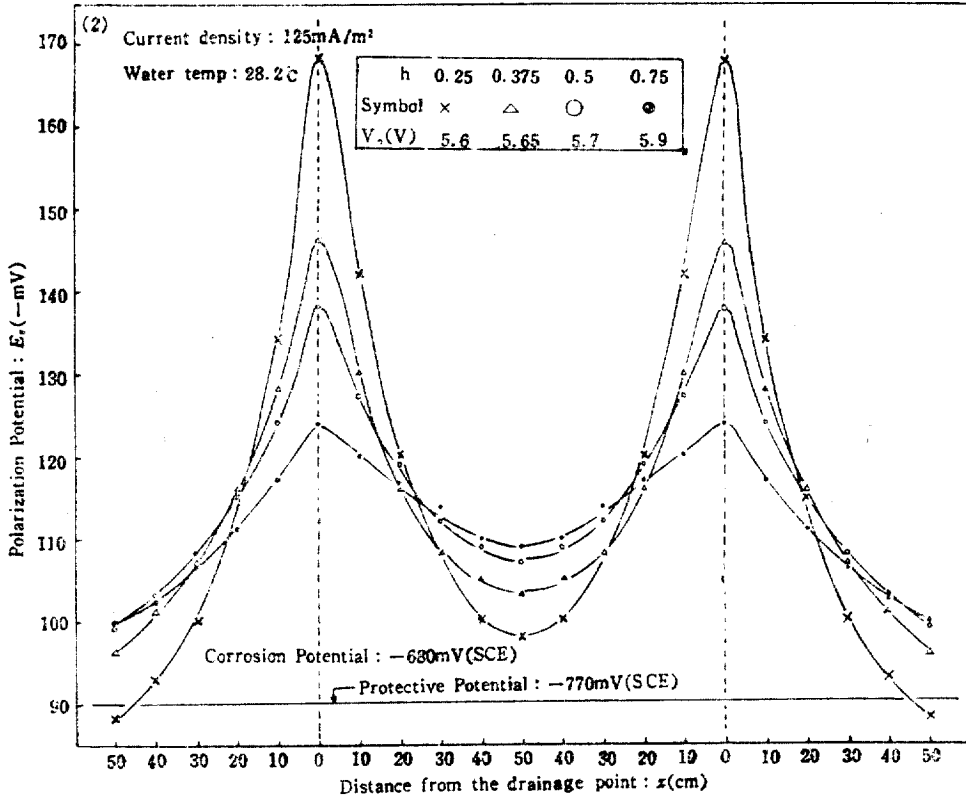
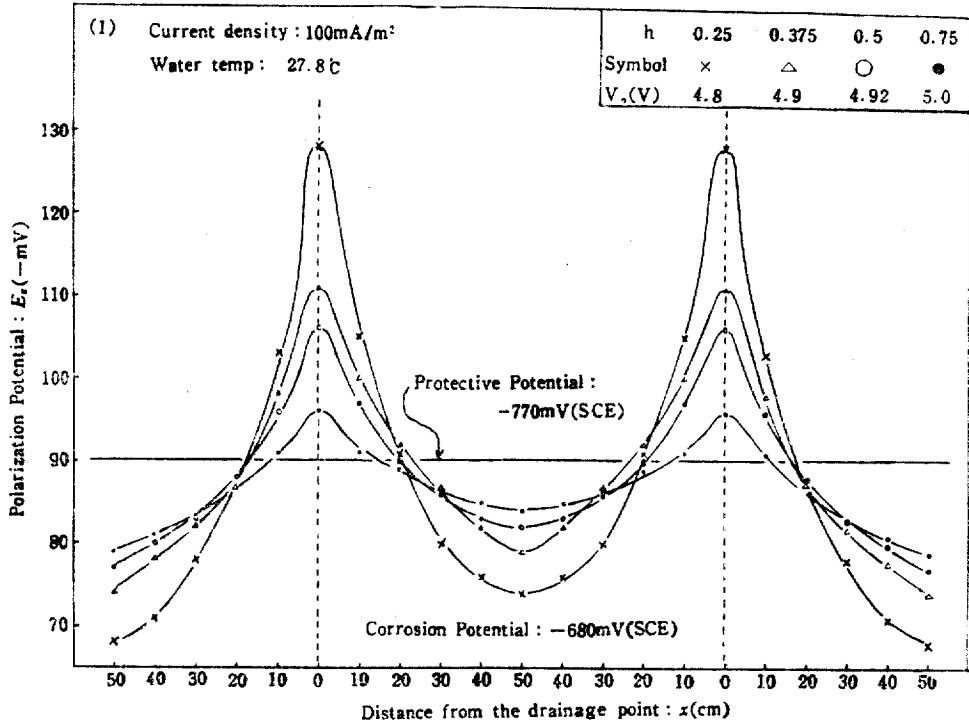


Fig. 3 Cathodic polarization potentials(two anodes; (1/4)×L, (3/4)×L upper points)

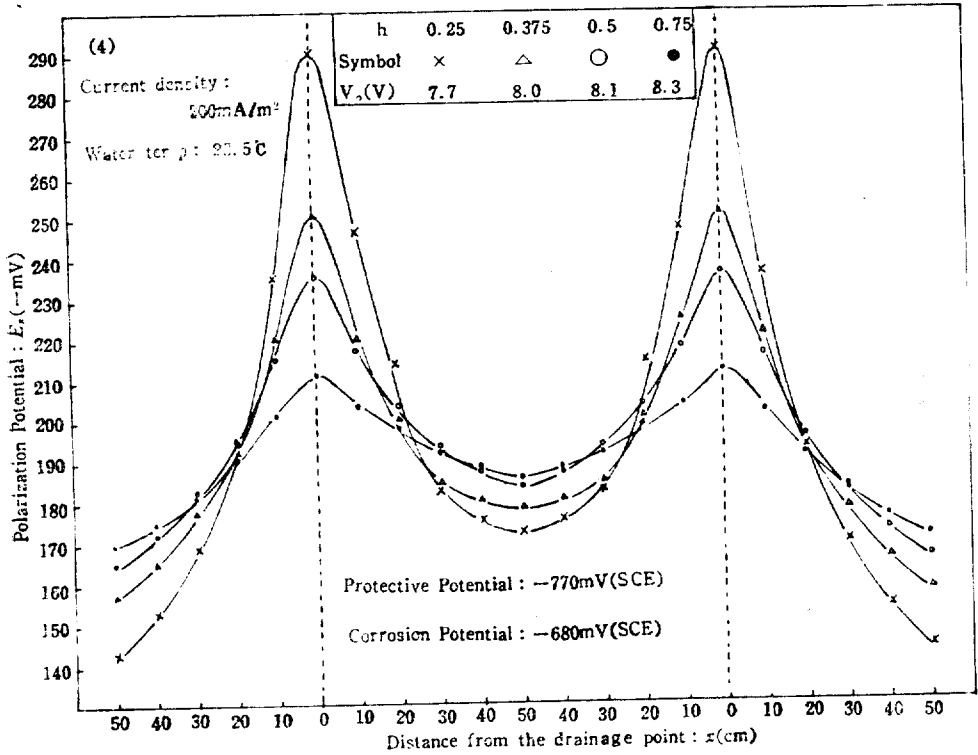
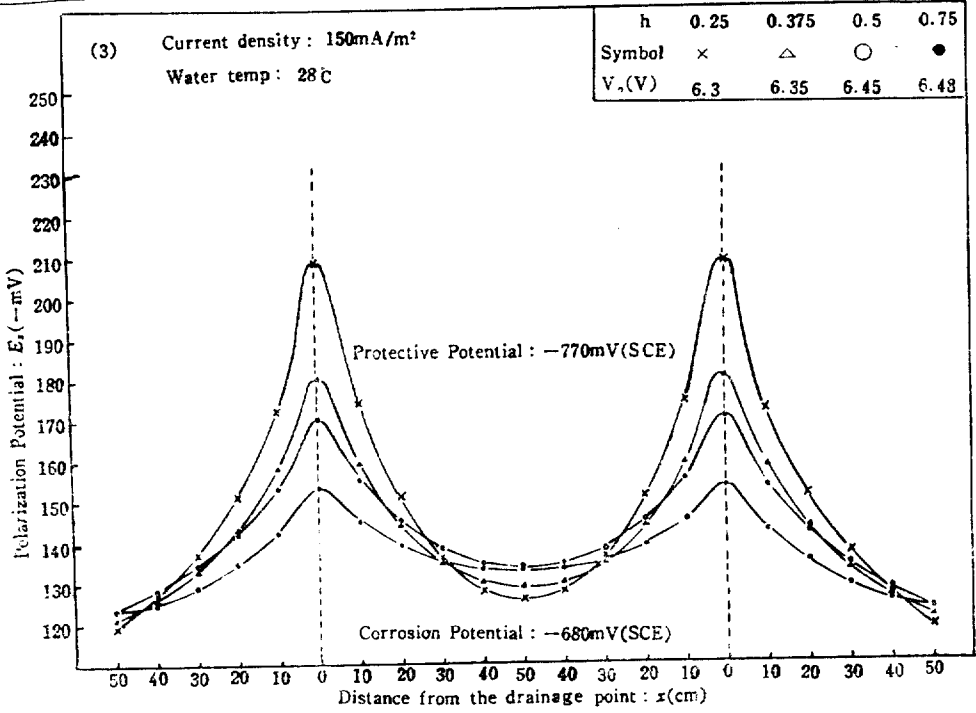


Fig 3. Cathodic polarization potentials(two anodes; $(1/4) \times L$, $(3/4) \times L$ upper points)

Table 2. Cathodic polarization potentials(protected area 0.1708m² i₀=150mA/m²)

$h = \frac{H}{l}$ (H cm)	E_0/I_0 Ω	$\sqrt{R} \times 10^3$ $\Omega^{1/2} \cdot \text{cm}$	M/xcm C	0	10	20	30	40	50
0.25 (12.5)	8.12	37.84 $\times 10^3$	M*	208	172	151	137	127	119
			C*	208	207.59	207.19	206.79	206.39	205.99
0.375 (18.75)	7.03	32.76 $\times 10^3$	M	180	158	143	133	126	121
			C	180	179.60	179.20	178.80	178.39	178.00
0.5 (25)	6.64	30.94 $\times 10^3$	M	170	153	142	134	128	123
			C	170	169.60	169.20	168.80	168.40	168.00
0.75 (37.5)	5.97	27.82 $\times 10^3$	M	153	142	135	129	125	123
			C	153	152.60	152.20	151.80	151.40	151.00
1.0 (50)	5.62	26.19 $\times 10^3$	M	144	136	131	127	123	121
			C	144	143.59	143.20	142.80	142.40	142.00

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

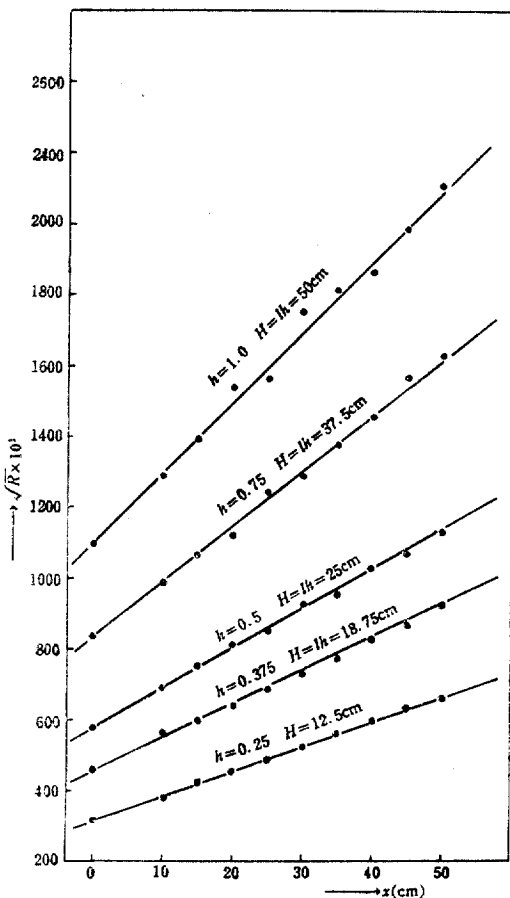


Fig. 4. Relations of \sqrt{R} to x

표면저항 R 은 일정한 i_0 와 일정한 h 하에서 (4.1)식의 E_0 와 E_x 에 실측치를 대입하여 구하고, 다시 이 R 과 주어진 h 와의 관계를 구하면 일정한 i_0 하에서의 R 의 일반식이 구해진다.

한 예로서 $i_0=150\text{mA/m}^2$ 일 때 각각 일정한 h 하에서의 R 을 (4.1)식의 E_0 와 E_x 에 실측치를 대입하여 구하고 이 R 과 x 와의 관계를 도시하면 Fig. 4와 같이 직선적으로 된다. 그러므로 그 일반식은

$$\sqrt{R} \times 10^3 = ax + b \quad \dots\dots (4.2)$$

또 (4.2)식의 a 와 b 는 주어진 h 에 대하여 Fig. 5와 같이 거의 직선관계가 있으므로 (4.2)식은

$$\sqrt{R} \times 10^3 = (ch+d)x + (eh+f) \quad \dots\dots (4.3)$$

으로 표시할 수 있으며 (4.3)식의 c, d, e 및 f 는 측정치를 대입하여 최소자승법으로 결정하면 표면저항식은

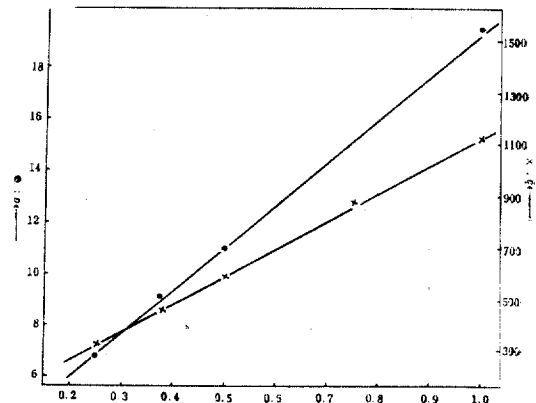


Fig. 5. Relations of a and b to h

다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \sqrt{R} \times 10^3 &= (19.3889h + 1.0664)x + 1284.5064h \\ &\quad - 64.4195 \\ &= (0.3877lh + 1.0664)x + 25.6901lh \\ &\quad - 64.4195 \quad \dots\dots(4.4) \end{aligned}$$

4.2 배류점의 분극전위 (E_0)의 실험식

일정한 양극높이 h 에 대한 평균전류밀도 i_0 와 배류점에서의 분극전위 E_0 의 관계는 실측치(Fig. 3. 참조)에 의하여 Fig. 6과 같이 직선적이므로

$$E_0 = g i_0 + k \quad \dots\dots(4.5)$$

(4.5)식의 g 와 k 는 h 에 대하여 Fig. 7과 같은 관계가 있으므로 이들 값을 최소자승법에 의하여 구하면 배류점의 분극전위 E_0 는

$$\begin{aligned} E_0 &= [1.7667/(\log(lh))^{0.9582}] i_0 \\ &\quad - 146.4624/(lh)^{0.5688} \quad \dots\dots(4.6) \end{aligned}$$

4.3 분극전위의 보정계산치와 실측치와의 비교

분극전위의 계산치 E_x 는 (3.19)식의 $\sqrt{R} \times 10^3$ 이 (4.4)식으로, E_0 가 (4.6)식으로 표시될 때 실측치와 근사적으로 같게 될 것이다. 이 분극전위의 계산치를 보정계산치라 하자.

Table 3은 본 실험의 분극전위의 실측치와 그 보정

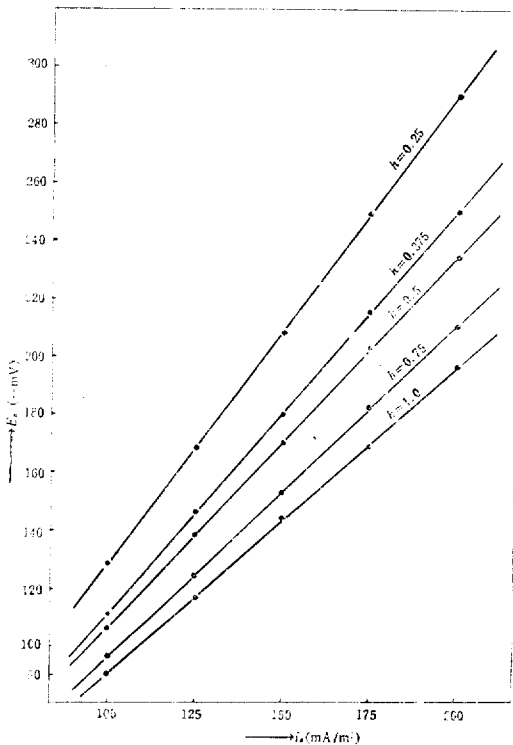


Fig. 6. Relations of E_0 to i_0

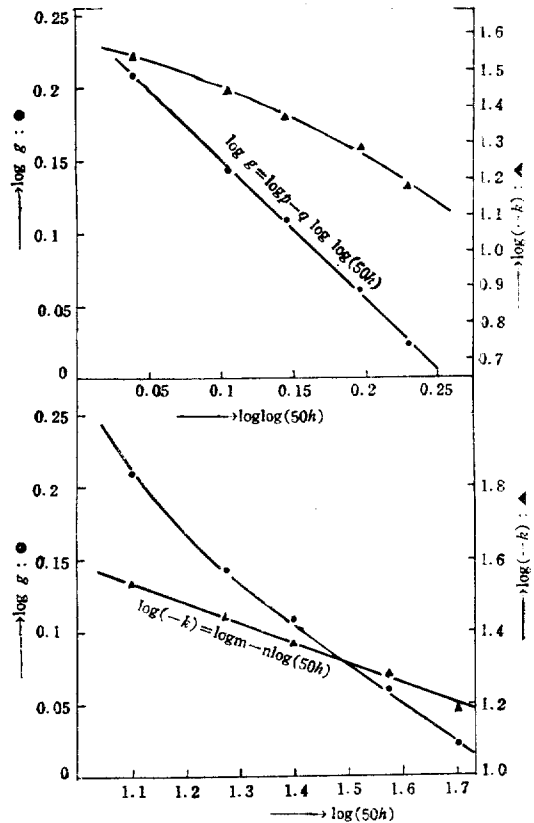


Fig. 7. Relations of g and k to h

계산치의 비교이고 Table 4는 다시 그 실측치에 대한 보정계산치의 비율을 나타낸 것이다. Table 4에 의하면 $\pm 5\%$ 이내의 정도(精度)를 나타내고 있다. 또 참고적인 두 보조실험에서의 실측치에 대한 그 보정계산치의 비율도 Table 5에 표시한 바와 같이 $\pm 7\sim 8\%$ 이내의 정도를 나타낸다.

따라서 두 양극외측의 강관표면의 음분극전위 계산의 일반식은 다음 3식으로 요약할 수 있다.

$$\begin{aligned} (3.19) : E_x &= E_0 e^{-\alpha x} \\ &= E_0 \exp[-2\sqrt{\rho_a D / \{D^2 - (D-2t)^2\}} \\ &\quad \cdot x / \sqrt{R}] \end{aligned}$$

$$(4.4) : \sqrt{R} \times 10^3 = (0.3877lh + 1.0664)x + 25.6901lh - 64.4195$$

$$(4.6) : E_0 = [1.7667/(\log(lh))^{0.9582}] i_0 - 146.4624/(lh)^{0.5688}$$

5. 전원장치의 소요전압과 방식의 소요전력 및 최적방식조건

5.1 전원장치의 소요전압의 실험식

철강의 방식에 불용성양극으로 백금전극을 사용할 때 Pt-Fe 간의 이론적 물 분해 전압이 1.85V¹⁷⁾이므로 방식전류 I_0 (mA)를 흘리기 위한 소요전압 V_0 (V)는

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

전 방식회로저항 $R_{pH}(\Omega)$ 는 (5.1)식에서 $R_{pH} = \{(V_0 - 1.85) / I_0\} \times 10^3 \quad \dots\dots(5.2)$

Table 3. The calculated potentials and measured potentials(-mV)
(protected area; 0.1708m², length of pipe; 2.0m)

i_0 (mA/m ²)	x (cm) h	0	10	20	30	40	50
		125	167.3(168)	132.6(134)	113.2(115)	100.8(100)	92.3(93)
	0.25	147.6(146)	127.5(128)	114.8(116)	106.2(107)	99.9(101)	95.1(96)
	0.375	136.7(138)	122.9(124)	113.7(115)	107.1(108)	102.2(103)	98.5(99)
	0.5	124.4(124)	116.0(117)	110.2(111)	105.9(107)	102.6(103)	100.0(101)
	0.75	117.1(117)	111.2(112)	107.0(108)	103.8(104)	101.4(102)	99.4(100)
	1.0	248.1(249)	196.7(200)	167.8(172)	149.5(155)	136.9(142)	127.8(135)
175	0.25	217.6(215)	188.0(189)	169.3(171)	156.5(158)	147.2(150)	140.2(143)
	0.375	200.8(203)	180.4(182)	166.9(168)	157.3(159)	150.1(152)	144.6(146)
	0.5	181.5(182)	169.4(168)	160.8(160)	154.6(154)	149.8(150)	145.9(148)
	0.75	170.2(169)	161.7(160)	155.6(155)	151.0(151)	147.4(147)	144.6(145)
	1.0						

() ; Measured potentials

Table 4. (Calculated potential/Measured potential) × 100, %
(protected area; 0.1708m², length of pipe; 2.0m)

i_0 (mA/m ²)	x (cm) h	0	10	20	30	40	50
		125	99.6	99.0	98.4	100.8	99.3
	0.25	101.1	99.6	99.0	99.3	98.9	99.1
	0.375	99.1	99.1	98.9	99.2	99.2	99.5
	0.5	100.3	99.2	99.3	102.3	99.6	99.0
	0.75	100.1	99.3	99.1	99.8	99.4	99.4
	1.0	99.6	98.4	97.6	96.5	96.4	94.7
175	0.25	101.2	99.5	99.0	99.1	98.1	98.0
	0.375	98.9	99.1	99.4	98.9	98.8	99.0
	0.5	99.7	100.8	100.5	100.4	99.9	98.6
	0.75	100.7	101.1	100.4	100.0	100.3	99.7
	1.0						

Table 5. (Calculated potential/Measured potential) and the ratio(%)
Secondary experiment (I) protected area; 0.2135m²
(II) " " ; 0.1362m²

i_0 (mA/m ²)	expe- riment	x (cm) h	0	10	20	30	40	50
			100	(I)	0.375	$\frac{112.5}{111}$ (101.4)	$\frac{98.2}{94}$ (104.5)	$\frac{89.1}{85}$ (104.8)
		0.75	$\frac{95.8}{96}$ (100)	$\frac{89.8}{89}$ (100.9)	$\frac{85.6}{85}$ (100.7)	$\frac{82.5}{81}$ (101.9)	$\frac{80.1}{78}$ (102.7)	$\frac{78.2}{76}$ (102.9)
125	(II)	0.375	$\frac{147.6}{146}$ (101.1)	$\frac{127.2}{125}$ (101.8)	$\frac{114.4}{111}$ (103.1)	$\frac{105.6}{102}$ (103.5)	$\frac{99.3}{95}$ (104.5)	$\frac{94.5}{89}$ (106.2)
		0.75	$\frac{124.4}{125}$ (99.5)	$\frac{115.9}{119}$ (97.4)	$\frac{110.0}{113}$ (97.3)	$\frac{105.7}{109}$ (97.0)	$\frac{102.3}{105}$ (97.4)	$\frac{99.7}{103}$ (96.8)

Table 6. Relations of V_0 to lh and I_0

I_0 (mA) \ lh (cm)	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 7. Relations of $R_{\rho H}$ to lh and I_0

I_0 (mA) \ lh (cm)	17.08	21.35	25.62	29.89	34.16	Mean $R_{\rho H}$	$\log(lh)$
12.5	172.7	175.6	173.6	165.6	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

본 실험에서 불용성양극의 높이 $H(=lh)$ (cm)와 전방식전류 $I_0(=i_0\pi DI \times 4 \times 10^{-4})$ (mA)에 대하여 소요전압 V_0 는 Table 6과 같으므로 이를 (5.2)에 대입하여 전방식회로저항 $R_{\rho H}$ 와 그 평균치를 구하면 Table 7과 같이 된다. Fig. 8은 Table 7을 도식한 것이다.

Fig. 8에 의하면 $R_{\rho H}$ 는 $\log(lh)$ 에 비례하므로, 28°C에 있어서의 물의 비저항을 $\rho_{28}(\Omega\text{-cm})$ 이라 하면

$$R_{\rho H} = [A + B \log(lh)] \rho_{28} = A\rho_{28} + B\rho_{28} \log(lh) = C + D \log(lh) \quad \dots\dots(5.3)$$

(5.3)식의 C, D 를 Table 7의 수치에 의하여 최소자승법으로 결정하면 $C=141.03987, D=28.047832$ 이다. 또 $\rho_{28}=1950\Omega\text{-cm}$ 이므로

$$A = C/\rho_{28} = 141.03987/1950 \approx 0.0723 \quad \dots\dots(5.4)$$

$$B = D/\rho_{28} = 28.047832/1950 \approx 0.0144 \quad \dots\dots(5.5)$$

(5.4), (5.5)식을 (5.3)식에 대입하면 방식회로의 전저항 $R_{\rho H}$ 는, 임의온도하의 물의 비저항을 $\rho(\Omega\text{-cm})$

라 하면

$$R_{\rho H} = [0.0723 + 0.0144 \log(lh)] \rho \quad (\Omega) \quad \dots\dots(5.6)$$

(5.6)식을 (5.1)식에 대입하면 소요전압 V_0 는

$$V_0 = I_0 [0.0723 + 0.0144 \log(lh)] \rho \times 10^{-3} + 1.85 \quad (\text{V}) \quad \dots\dots(5.7)$$

(5.7)식으로 계산되는 값과 실측치에 대한 비율은 Table 8과 같다.

Table 8에 의하면 (5.7)식의 소요전압은 양극의 높이를 h 나 방식전류 I_0 에 관계없이 $\pm 3\%$ 이내의 정도를 갖는다.

또한 2가지 보조실험에서 소요전압의 실측치에 대한 계산치의 비율도 Table 9에 나타낸 바와 같이 역시 양극의 높이율이나 방식전류 I_0 에 관계없이 $\pm 3\%$ 이내의 정도(精度)를 나타낸다.

5.2 방식의 소요전력의 실험식

방식에 소요되는 전력 P 는 (5.7)식에서

$$P = V_0 I_0 = I_0^2 [0.0723 + 0.0144 \log(lh)] \rho \times 10^{-3} + 1.85 I_0 \quad (\text{mW}) \quad \dots\dots(5.8)$$

(5.7)식이나 (5.8)식에서 I_0 는 소요방식 전류밀도 i_0 에 경험치를 사용한다면 그 전류밀도와 피방식면적의 상승적으로 구하여 활용할 수 있다. 즉,

$$I_0 = i_0 \pi DI \times 4 \times 10^{-4} \quad (\text{mA}) \quad \dots\dots(5.9)$$

5.3 최적방식조건

(3.19)식에서 $x=l$ 일 때 $E_x = E_l$ (방식에 소요되는 분극치)를 대입하면

$$E_l = E_0 \exp\{-2\sqrt{\rho_s D} / \{D^2 - (D-2l)^2\} \cdot l / \sqrt{R}\} \quad \dots\dots(5.10)$$

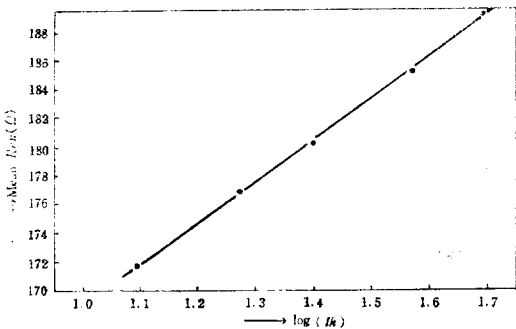


Fig. 8. Relations of mean $R_{\rho H}$ to lh

Table 8. The calculated voltage and $\frac{\text{Calculated voltage}}{\text{Measured voltage}} \times 100(\%)$

h	$I_0(\text{mA})$ $lh=H(\text{cm})$	$\frac{\text{Calculated voltage}}{\text{Measured voltage}} \times 100(\%)$				
		17.08	21.35	25.62	29.89	34.16
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 9. (Calculated Voltage/Measured Voltage) and the ratio(%)
Secondary experiment (I) protected area; 0.2135m²
(II) " " ; 0.1362m²

experiment	h $i_0(\text{mA}/\text{m}^2)$	0.375		0.5		0.75	
		$\frac{\text{Calculated}}{\text{Measured}}$	Ratio(%)	$\frac{\text{Calculated}}{\text{Measured}}$	Ratio(%)	$\frac{\text{Calculated}}{\text{Measured}}$	Ratio(%)
(I)	100	$\frac{5.62}{5.7}$	98.6	$\frac{5.7}{5.8}$	98.3	$\frac{5.8}{5.9}$	98.3
(II)	125	$\frac{4.85}{4.9}$	99.2	$\frac{4.91}{5.0}$	98.2	$\frac{5.0}{5.1}$	98.0
	175	$\frac{6.06}{6.1}$	99.3	$\frac{6.14}{6.0}$	102.3	$\frac{6.26}{6.3}$	99.4

(4.4)에 $x=l$ 을 대입하면
 $\sqrt{R} \times 10^3 = (19.3895h + 1.0664)l$
 $+ 1284.505h - 64.4196$ (5.11)

(4.6)식은 그대로
 $E_0 = \{1.7767 / (\log(lh))\}^{0.9582} i_0$
 $- 146.4624 / (lh)^{0.5688}$ (5.12)

(5.10)~(5.12)식에서 $i_0=f_1(h)$ 를 구하고 (5.9)식에서 I_0 를 구한 다음에 (5.8)식에서 $P=f_2(h, \rho)$ 를 구한다. 그 다음에 $\partial P/\partial h=0$ 의 최소조건에서 $h=f_3(\rho)$ 를 구하면 최소전력으로 방식할 수 있는 양극의 위치 h 가 된다. 이 때의 V_0 와 I_0 를 구하면 그것이 전원장치에 요구되는 최소용량이 될 것이다.

그러나 계산이 대단히 복잡하므로 각 방식여건을 대입하여 수치계산하는 것이 편리하다. 예로서 본 실험에 사용되었던 시험편을 생각하면,

$D=2.72\text{cm}$, $t=0.28\text{cm}$ $l=L/4=50\text{cm}$ 이고 $\rho_1=13.5 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ 의 시험편이 방식되기 위해서는 시험편의 끝 부분이 다음과 같이 90mV 음분극되어야 한다.
 즉

$E_l = E_{50} = -770 - (-680) = -90\text{mV}$ (5.13)

따라서 방식전력 P 의 산식은

$P = (4\pi D l i_0 \times 10^{-4})^2 \{0.0723 + 0.0144 \log(lh)\} \rho$
 $\times 10^{-3} + 1.85 \times 4\pi D l i_0 \times 10^{-4}$

$= \{21.095769 + 4.201647 \log(50h)\} i_0^2 \rho \times 10^{-7}$
 $+ 0.316 i_0$ (5.14)

$i_0 = \{50.9415 e^{366.55 / (2253.9514h - 11.0995)} + 82.9011 / (50h)^{0.5688}\} \times \{\log(50h)\}^{0.9582}$
(5.15)

위의 조건하에서 여러가지 ρ 및 h 값을 대입하여 $P(\rho, h)$ 을 전산하고 일정 ρ 하에서의 $P(\rho, h)$ 와 h 의 관계를 도시하면 Fig. 9와 같이 된다. Fig. 9에 의하면 물의 비저항 ρ 가 큰 경우에는 양극의 설치위치 h 의 적정문제가 방식전력 $P(\rho, h)$ 에 크게 영향을 미치나 해수와 같이 ρ 가 적은 경우에는 이 영향이 아주 적다. 그러나 수중강관표면의 최소방식전력을 요하는 양극의 높이 h 는 물의 비저항 ρ 에 거의 관계없이 $h=0.63 \sim 0.75$ 의 범위이다.

6. 결 론

외부 전원에 의한 수중강관의 음극방식에 관한 연구 중 강관양단의 경우에 대한 이상의 연구에서 다음의 결론을 얻었다.

1) 강관을 두 개의 불용성양극으로 방식할 때 양극 외측 강관양단표면의 음분극전위는 다음 식으로 계산할 수 있다.

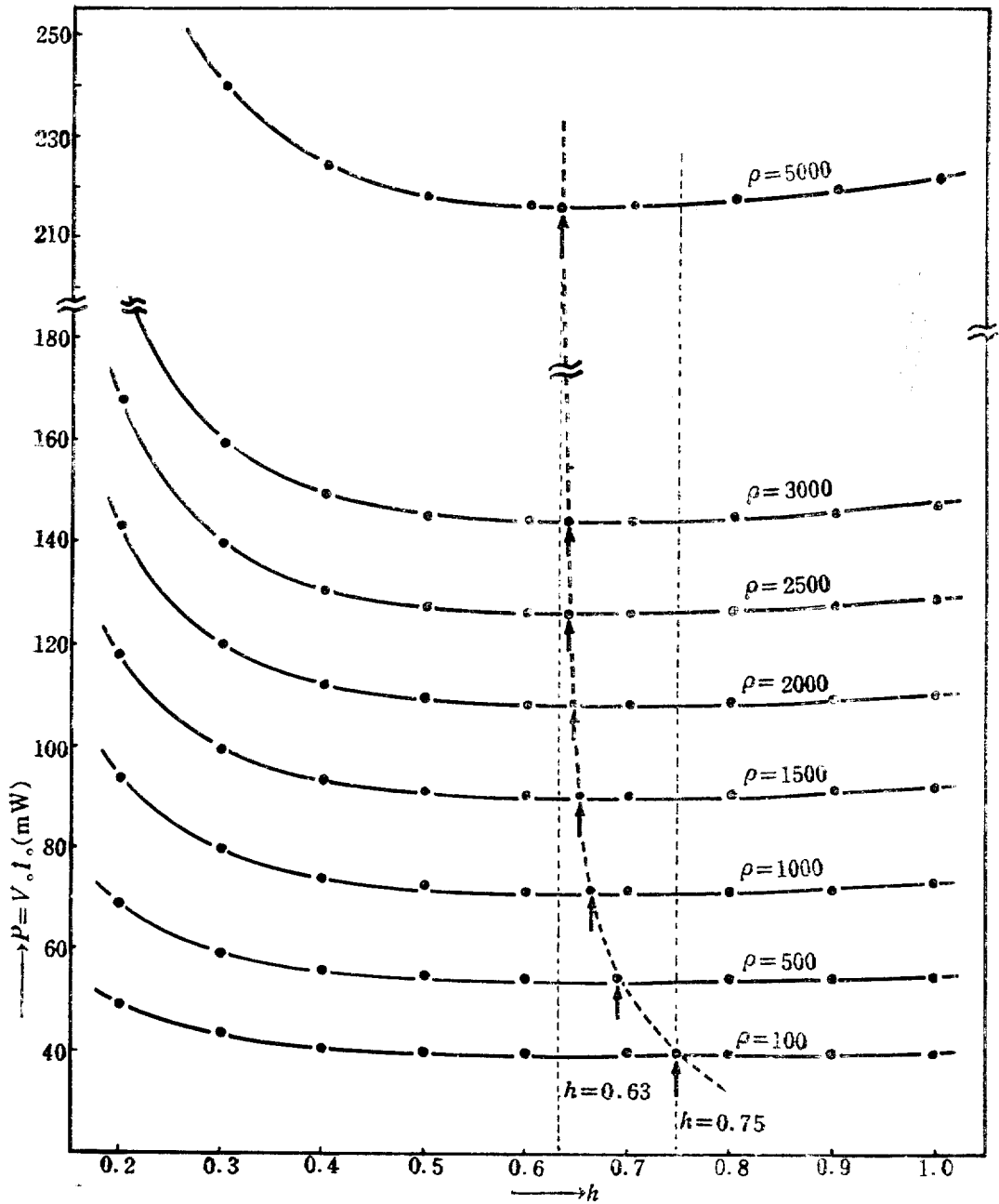


Fig. 9.

$$E_1 = E_0 e^{-\alpha x} = E_0 \exp \left[-2 \sqrt{\rho, D / \{D^2 - (D-2t)^2\}} \cdot x / \sqrt{R} \right]$$

$$E_0 = \{1.7667 / [\log(lh)]^{0.9582}\} i_0 - 146.4624 / (lh)^{0.5688}$$

$$\sqrt{R} \times 10^3 = (0.3877lh + 1.0664)x + 25.6901lh$$

-64.4196

2) 음극방식용 전원장치의 소요전압은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$V_0 = I_0 [0.0723 + 0.0144 \log(lh)] \rho \times 10^{-3} + 1.85$$

$$I_0 = 4\pi D l i_0 \times 10^{-4}$$

두 양극외측 강관 양단표면만의 소요방식전력은 $P =$

$\frac{1}{2} V_0 I_0$ 로 된다.

3) 물의 비저항(ρ)이 클수록 양극의 설치위치(h)의 적정문제가 방식전력(P)에 미치는 영향이 크게 나타나나 비저항이 작은 경우에는 그다지 크지 않다. 그러나 최소전력으로 방식할 수 있는 양극의 높이율(h)의 범위는 물의 비저항(ρ)에 거의 관계없이 0.63~0.75이다.

참 고 문 헌

1. G.L. Daly: 防蝕技術, 15(8) p.372, (1963)
2. H.H. Uhlig: Corrosion and Corrosion Control, p.195, John Wiley and Sons Inc., New York (1965)
3. 田大熙: 腐蝕과 防蝕, 實用編, p.87, 韓國海洋大學圖書出版部 (1975)
4. 中川雅夫: 電氣防蝕의 實際, p.133~134, 地人書館, 東京 (1967)
5. R. Pope: Uhlig's Corrosion Handbook, p.942, John Wiley and Sons Inc., New York(1963)
6. 筧建彦: 金屬, Vol. 45, No. 8, p.19, アダネ, 東京(1975)
7. J.H. Morgan: Corrosion Vol. 15, August, p.417~422, NACE (1954)
8. 田大熙: 韓國海洋大學論文集, Vol. 10, p.55~76 (1975)
9. 佐藤山内: 防蝕技術, Vol. 25, No.10, p.611~617 (1976)
10. 前掲書(2): p.352.
11. D.A Jones: Shreir's Corrosion-2, p.11, 13~17, Newnes-Butterworths, London-Boston(1976)
12. 前掲書(5): p.942~946
13. 田大熙·閔丙彦: 韓國海洋大學論文集, Vol. 13, p.111~130 (1978)
14. 前掲書(2): p.352
15. 前掲書(9): p.613
16. 日本金屬學會編: 金屬データブック, F.105, 丸善, 東京(1974)
17. 外島 忍: 基礎電氣化學, p.333, 朝倉書店, 東京 (1965)