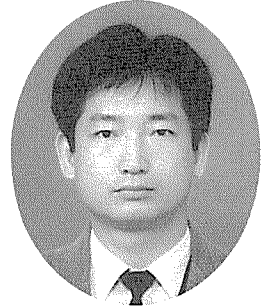


전기방식(防蝕) 기술



한국전기연구소/지중시스템연구팀
팀장 김 대 경

1. 전기방식 이론

1.1 용어의 이해

전기화학적 반응에 의한 부식을 방지하는 방법으로는 음극방식(Cathodic Protection)법과 양극방식(Anodic Protection)법이 있으며, 보통 이 두가지를 통칭하여 전기방식법이라고 부른다.

그러나 우리나라에서는 양극방식법이 실제로 적용된 사례가 없으므로 전기방식법이라 하면 음극방식법을 말하는 것으로 통용되고 있다. 따라서 이 글에서도 용어의 혼돈을 피하기 위하여 엄밀하게는 음극방식법이라고 하여야 하는 것을 전기방식법으로 부르기로 한다.

1.2 부식의 정의

물질(금속)이 화합물(광석)의 상태에서 물질로(금속으로) 되기 위해서는 외부로부터의 에너지가 필요하다. 즉, 에너지 준위가 낮은 화합물(광석)은 외부로부터 에너지를 받아 에너지 준위가 높은

물질(금속)의 상태로 존재하게 된다. 그러나 자연 상태에서는 에너지 준위가 낮을수록 더욱 안정하므로 물질(금속)은 외부로 에너지를 방출하고 보다 에너지 준위가 낮은 상태, 즉, 더욱 안정한 상태(화합물)로 되돌아 가려는 성질을 가지고 있다. 이와 같이 에너지 준위가 높은 물질에서 에너지 준위가 낮은 화합물로 되돌아가는 과정에서 물질 자체가 변질하거나 혹은 물질의 특성이 변질되는 것을 부식이라고 하며 이러한 부식은 화학적반응에 의한 부식, 전기 화학적반응에 의한 부식 및 물리적 반응에 의한 부식으로 나눌 수 있다.

간단히 정리하면 부식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

“물질이 주위 환경과 반응하여 물질 자체가 변질되거나 혹은 물질의 특성이 변질되는 것을 부식이라고 한다.”

1.3 부식 메커니즘

대부분의 부식은 전기화학적 반응에 의한 부식으로써, 전기화학적 반응이란 전자의 이동이 포함된 화학반응이라고 정의한다. 이와 같은 전기화학

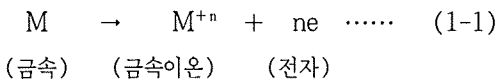
적 반응에 의한 부식이 일어나기 위해서는 다음 4가지 조건이 만족되어야 한다.

- (1) 양극(Anode)
- (2) 음극(Cathode)
- (3) 전류경로(Electronic path) 혹은 금속경로(Metallic path)
- (4) 이온경로(Ionic path) 혹은 전해질(Electrolyte)

이상과 같은 4가지로 구성된 조합을 부식전지라고 부른다. 이 부식전지의 음극-전류경로-양극-이온경로를 따라 전류의 흐름이 생기며, 전류의 흐름에 따라 다음과 같은 양극반응과 음극반응에 의해 양극에서 부식이 일어난다.

1.3.1 양극반응

양극반응은 다른말로 산화반응이라고 부르며 금속이 금속이온과 전자로 나누어지는 반응이며 식 (1-1)과 같다.



식 (1-1)과 같이 양극반응은 양으로 대전된 금속 원자가 양극을 떠나 전해질로 들어가며 전자의 흐름은 전기적인 경로를 따라 양극에서 음극으로 흐른다.

1.3.2 음극반응

음극반응은 다른 말로 환원반응이라고도 부르며 양극에서 전류경로를 따라 이동해온 전자가 전해질 내의 양이온 등과 반응하는 것을 이르며 아래와 같은 반응이 있다.

- (1) 산소 환원반응(산성 전해질)
- $$O_2 + 4H^+ + 4e \rightarrow 2H_2O \dots\dots (1-2)$$

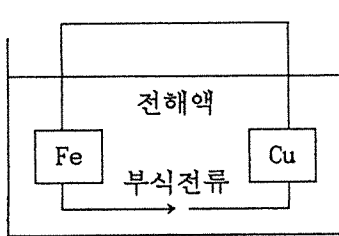
- (2) 산소 환원반응(중성 및 알칼리성 전해질)
- $$O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^- \dots\dots (1-3)$$
- (3) 수소 환원 반응
- $$2H^+ + 2e \rightarrow H_2 \dots\dots (1-4)$$
- (4) 금속이온 환원반응
- $$Fe^{+3} + e \rightarrow Fe^{+2} \dots\dots (1-5)$$
- (5) 금속 환원반응
- $$Cu^{+2} + 2e \rightarrow Cu \dots\dots (1-6)$$

1.4 전기방식의 원리

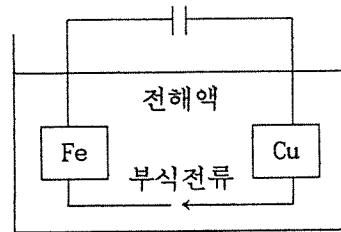
금속구조물의 부식은 토양이나 물등의 전해질의 존재하에서 부식메카니즘에 의한 양극반응과 음극반응에 의해 일어나는 것이므로

- ① 금속구조물의 표면을 전해질과 차단하거나
- ② 양극반응의 진행을 억제하거나
- ③ 양극부와 음극부를 분리하는 모든 것이 기본적인 방식법이 되지만, ①의 경우 실 적용상 완벽한 차단이 어렵고, ③의 경우 미시적 부식전지에 의한 부식에는 적용할 수 없으므로 ②의 경우가 가장 널리 채택되고 있으며 이를 전기(음극)방식법이라고 부른다.

(그림 1-1)은 전기방식법의 원리를 나타낸 그림으로써 a)와 같이 방식전에는 이종금속간의 전위차에 의해 Fe가 양극부, Cu가 음극부가 되어 부식 전류가 전해질을 통해 양극부에서 음극부로 흘러 양극반응에 의하여 양극부에 부식이 일어나나, b)와 같이 외부에서 Fe와 Cu 사이의 전위차보다도 높은 전원을 가하면 Fe를 향해 전류가 유입되어 Fe는 음극부가 되어 방식된다. 이때 Cu는 양극부가 되어 부식한다.

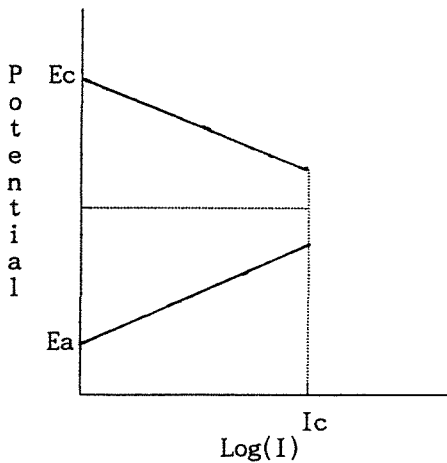


a) Fe 방식전



b) Fe 방식후

(그림 1-1) Cathodic Protection Mechanism



(그림 1-2) Polarization Diagram

이상의 원리를 (그림 1-2)와 같은 분극 다이어그램을 통해 살펴보면 다음과 같다. 즉, (그림 1-1)의 a)에서 Fe와 Cu가 금속경로를 통해 서로 연결되면 양금속의 자연전위 차이에 의한 전류가 (그림 1-1)의 b)와 같은 방향으로 흐른다. 이 전류에 의한 분극현상으로 각 전극의 전위는 최초의 값 E_a 및 E_c 에서 각각 (그림 1-2)와 같이 변한

다. 이 때 E_a 및 E_c 가 같아지면 부식전류는 더 이상 흐르지 않으며 나아가 E_c 를 E_a 보다 낮추면 (그림 1-1)의 b)와 같이 부식전류의 방향은 반대가 된다.

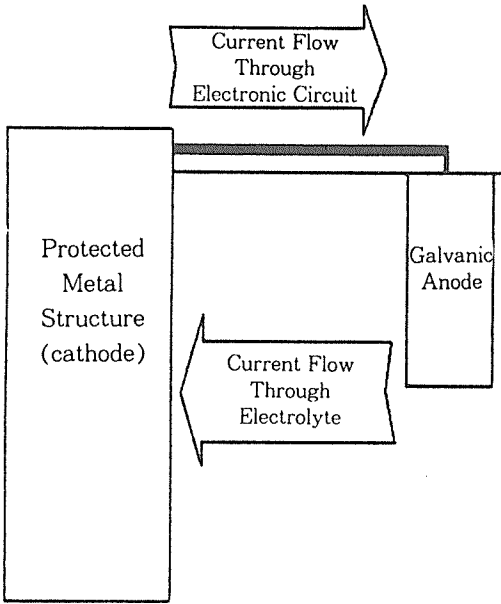
2. 전기방식법의 종류

전기방식법은 방식전류를 흘려주는 방법에 따라 크게 희생양극법과 외부전원법으로 나눈다.

2.1 희생양극법

희생양극법은 이종금속간의 전위차를 이용하여 방식전류를 얻는 방법으로써 피방식구조물보다 이온화 경향이 큰 금속을 전해질내에서 전기적으로 연결하면 이온화 경향이 큰 금속이 양극, 피방식구조물이 음극이 되어 방식전류가 양극에서 전해질을 통해 음극으로 흐르게 된다. (그림 2-1)은 희생양극법의 개념을 나타낸 그림이다.

이 방법은 전지작용에 의해서 방식전류를 얻기 때문에 방식전류에 제한이 있어 피방식구조물이 대형인 경우에는 부적합하며 또 전식의 영향이 있



(그림 2-1) Sacrificial Anode System

는 곳에서는 방식의 효과가 감소한다. 희생양극법의 양극재료로는 마그네슘, 알루미늄 및 아연등이 쓰이며 양극의 접지저항을 낮추어 발생전류를 많게 하기 위하여 비저항이 낮은 재질로 Backfill하여 사용한다.

2.1.1 희생양극법의 장점

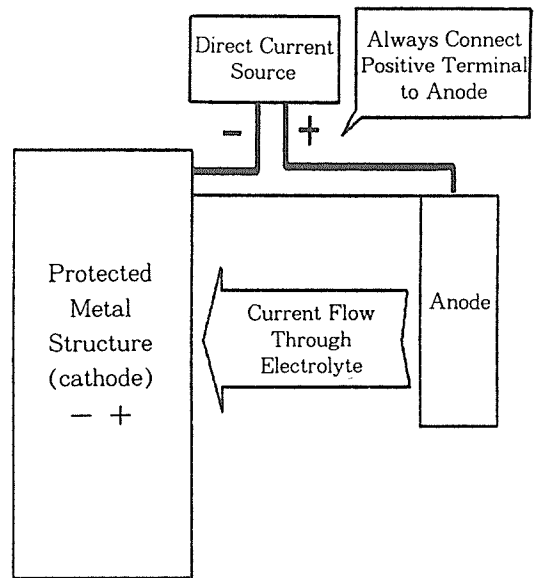
- ① 외부전원이 필요없다.
- ② 설치가 쉽다.
- ③ 외부 구조물에 대한 간섭의 영향이 적다.
- ④ 양극의 추가 설치가 쉽다.
- ⑤ 유지, 보수가 쉽다.
- ⑥ 전류의 분포가 균일하다.
- ⑦ 설치 면적을 최소화 할 수 있다.
- ⑧ 방식전류를 효과적으로 사용할 수 있다.

2.1.2 희생양극법의 단점

- ① 기전력이 제한되어 있다.
- ② 출력전류가 작고, 제한되어 있다.
- ③ 방식대상물의 코팅이 불량할 경우 양극의 수가 많아진다.
- ④ 설치 장소의 비저항율이 높은 경우 비효율적이다.
- ⑤ 외부전원법에 비해 단위전류당 경비가 높다.

2.2 외부전원법

외부전원법은 (그림 2-2)와 같이 직류전원장치의 ⊕극을 전해질내에 설치한 전극(희생양극)에 접속하고, ⊖극을 피방식구조물에 접속한 후 전압을 가하여 방식전류를 얻는 방법으로써 직류전원장치, 전극군(Anode Bed) 및 부속배선으로 구성되어 있다.



(그림 2-2) Impressed Current System

이 방법은 전원을 외부에서 얻기 때문에 큰 전류를 흘려줄 수 있어서 피방식 구조물이 대형인 경우에도 적합하나 주위의 다른 매설물에 간섭에 의한 전식을 일으킬 수 있으므로 도시 지역에서는 적용에 주의를 요한다.

2.2.1 외부전원법의 장점

- ① 전압 및 전류의 범위가 넓다.
- ② 하나의 양극으로도 전류 출력이 크다.
- ③ 방식범위가 넓다.
- ④ 전압 및 전류의 출력 조절이 가능하다.
- ⑤ 비저항이 높은 지역에도 적용이 가능하다.
- ⑥ 코팅이 불량한 구조물에도 적용이 가능하다.
- ⑦ 단위전류당 경비가 작다.

2.2.2 외부전원법의 단점

- ① 외부 구조물에 간섭의 영향을 미치기 쉽다.
- ② 외부전원 상실의 경우 미방식 상태가 된다.
- ③ 주기적인 유지, 보수가 필요하다.
- ④ 외부전원이 필요하다.
- ⑤ 과방식의 우려가 있다.
- ⑥ 전력 요금이 소요된다.

3. 전기방식 기준

피방식대상물이 방식상태에 있다고 판정할 수 있는 전기방식기준의 종류는 (그림 3-1)과 같이 크게 전위기준과 전류기준으로 나눌 수 있으며 전위기준은 다시 고정전위기준과 전위변이기준으로 나눌 수 있다.

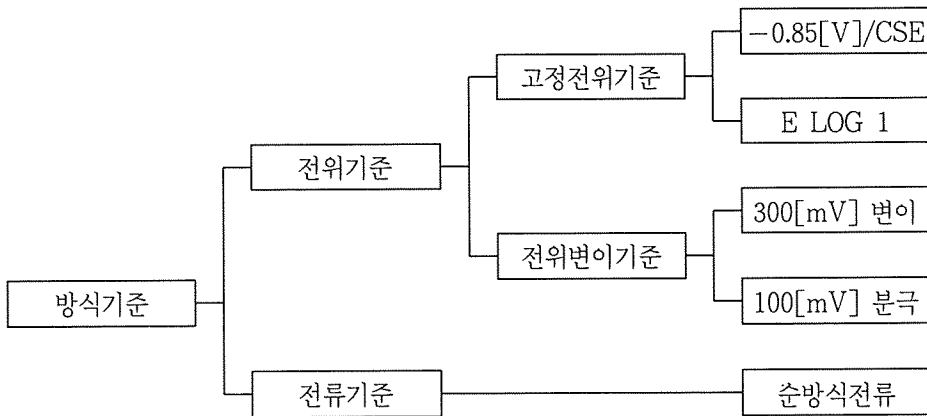
이 장에서는 가장 널리 적용되고 있는 -0.850 [V]/CSE 기준 및 100 [mV] 분극 기준에 대한 올바른 이해 및 적용법 등에 관하여 설명하고자 한다.

3.1 -0.850 [V]/CSE 기준

3.1.1 적용시 고려하여야 할 사항

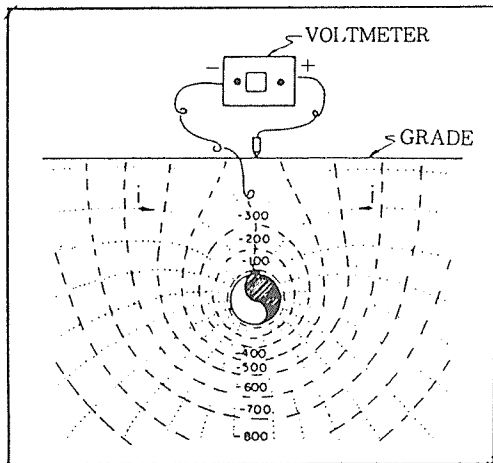
3.1.1.1 IR 강화

R. J. Kuhn이 최초로 -0.85 [V]/CSE 기준을 제시하면서, 측정시에 기준전극의 위치에 대한 중요성을 강조하기 위해 “기준전극을 배관이 통과하는 직상방의 토양표면에서 측정할 경우 거시적인 부식전지에 의한 부식전류는 제어되나 미시적 부



(그림 3-1) Cathodic Protection Criteria

식전지에 의한 부식전류는 제어되지 않는다. 따라서, 미시적 부식전지에 의한 부식전류를 제어하기 위해서는 기준전극을 가능한한 배관의 표면에 가까이 설치하여 측정하여야 한다”고 언급하였다. 즉, 기준전극의 위치가 배관의 표면에서 떨어져 있는 경우에 측정된 전위값은 (그림 3-2)에서 보는 바와 같이, 토양부분에서의 IR강하가 포함된 값이 기록계에 나타나게 된다.



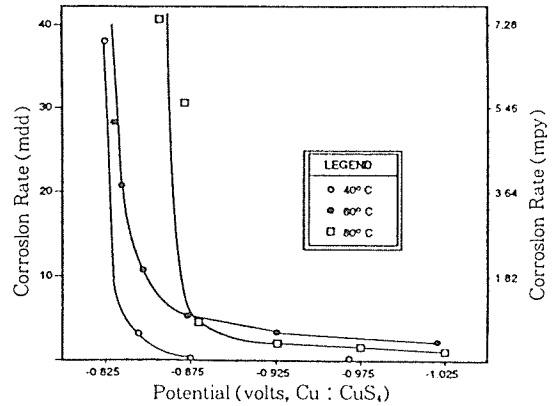
(그림 3-2) IR Drop in Soils

3.1.1.2 온도

앞에서 인용한 $-0.85[V]/CSE$ 의 타당성에 대한 실험실 실험 및 현장실험은 대부분 주변온도 $20\sim 25[^\circ C]$ (실온)의 조건에서 시행한 것으로서, 실온 이외의 온도에 대한 온도와 방식전위 사이의 상관 관계에 대한 실험 결과(1972년 Kobayashi)는 (그림 3-3)과 같다.

3.1.1.3 토양비저항

코팅이 없는 구조물 혹은 토양의 비저항이 상당히 높은 ($50,000[ohm-cm]$ 이상) 지역에 설치된



(그림 3-3) Effect of Temperature on the Protection for Steel

구조물을 $-0.85[V]/CSE$ 로 유지하는 것은 상당히 어려울 뿐만 아니라 막대한 소요전류로 인해 대단히 비경제적이게 된다.

D. Funk 및 그의 동료들은 1987년에 발표한 “Corrosion and Cathodic Protection of Unalloyed Steel in Sand Soil”이라는 논문에서 피방식 구조물의 방식기준은 토양의 비저항에 따라 (표 3-1)과 같이 달리 적용되어야 한다고 주장하였다.

독일의 경우에도 토양의 비저항이 $50,000[ohm-cm]$ 이상인 지역에서는 방식기준전위로 -0.75

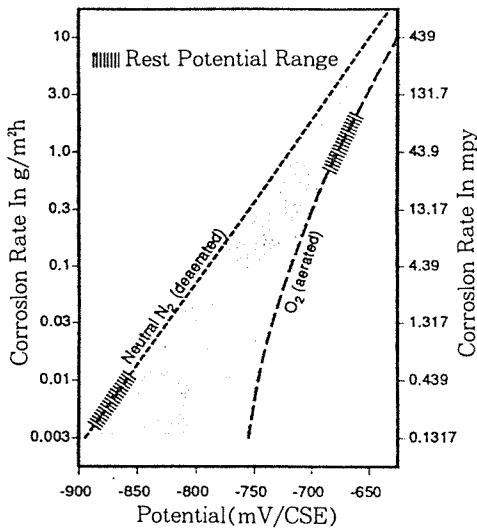
(표 3-1) Protection Potentials for Sand Soils with High Electrical Resistivity

Resistivity [ohm-cm]	Protection Potential [V]/CSE
less than 10,000	-0.850
between 10,000 and 100,000	-0.750
greater than 100,000	-0.700

[V]/CSE를 사용하고 있다. 즉, 비저항이 높은 지역에서는 $-0.85[V]/CSE$ 보다 낮은 전위를 방식기준으로 사용하는 것이 적절하다.

3.1.1.4 통기성

통기성과 방식전위의 관계는 (그림 3-4)과 같다. (그림 3-4)에서 보는 바와 같이 통기성이 양호한 경우의 $-0.75[V]/CSE$ 는 통기성이 나쁜 경우의 $-0.9[V]/CSE$ 와 같다. 즉, Balro와 Berry가 정의한 방식기준(1 [mpy])으로 볼 때 통기성이 양호한 경우에는 약 $-0.75[V]/CSE$, 통기성이 나쁜 경우에는 $-0.85[V]/CSE$ 가 방식기준이 됨을 알 수 있다.



(그림 3-4) Corrosion Rate/Potential Curves for Mild Steel in Aqueous Solutions at 25 [°C]

3.1.1.5 박테리아

Fisher가 1981년 발표한 논문 “Cathodic Protection in Saline Mud Containing Sulfate Reducing Bacteria”에서 “복해의 진흙을 사용한 실험

결과, 혐기성 박테리아의 존재하에서는 $-0.85[V]/CSE$ 에서도 상당한 부식이 진행되며, $-0.95[V]/CSE$ 에서는 부식율이 $0.25[mpy]$ 이하가 된다.”고 발표하였으며 실험을 통해 계산한 이론적인 부식율 “0”의 전위는 $-1.02[V]/CSE$ 라고 하였다.

따라서 혐기성 박테리아가 존재할 가능성이 있는 곳에서는 방식전위 기준을 $-0.95[V]/CSE$ 이하로 설정하여야 한다.

3.1.1.6 부식율 “0”

일반적으로 방식기준으로 삼는 허용할 수 있는 수준의 부식율로 $1[mpy]$ 를 사용하고 있으나 피방식구조물에 따라 이 부식율 조차도 허용할 수 없는 경우에는 더 낮은 값을 사용하여야 한다. 이 값으로 T. Sato와 그의 동료들은 보다 적절한 방식기준은 $-1.0[V]/CSE$ 이하 이어야 한다고 주장하였으며, Toncre도 IR 강하 이외의 오차를 고려하여 약 17%의 안전율을 적용하여 $-1.0[V]/CSE$ 를 방식기준으로 사용하여야 한다고 주장하였다.

3.1.2 올바른 적용법

1) 피방식구조물과 포화 황산등 기준전극사이의 전위는 $-0.85[mV]$ 이하이어야 하며, 이때 기준전극은 구조물로부터 1인치 이내에 설치하여야 한다.

2) 기준전극을 구조물로부터 1인치 이내에 설치할 수 없는 경우에는 아래식을 사용하여 IR 강하를 계산한 후 보정한다.

$$R = \frac{\rho}{2d} [\text{ohm}] \dots\dots\dots (3-1)$$

$$I = i \cdot A [A] \dots\dots\dots (3-2)$$

$$\therefore \text{전압강화} = R \cdot I [V] \dots\dots\dots (3-3)$$

여기서, ρ : 토양의 저항률 [Ω -cm]

d : 코팅 결함부의 직경 [cm]

i : 방식전류밀도 [A/cm^2]

A : 코팅결함부 면적 [cm^2]

식 (3-1)에서 코팅결함부의 직경은 일반적으로 안전율을 고려하여 5[cm]로 하는 것이 적절하다.

3) 피방식구조물의 상시온도가 상온(25[$^{\circ}C$])과 다를 때의 온도 보정은 다음과 같다.

지중 구조물 : $-2[mV/^{\circ}C]$

해수 구조물 : $-1[mV/^{\circ}C]$

4) 토양의 비저항이 50,000[Ω -cm] 이상일 경우에는 방식전위를 $-0.75[V]/CSE$ 이하로 한다.

5) 혐기성 박테리아가 예상되는 지역에서는 방식전위를 $-0.95[V]/CSE$ 이하로 한다.

3.2 100[mV] 분극 기준

3.2.1 역사적 배경

100[mV] 분극 기준에 대하여 기초로 언급한 사람은 Ewing으로서 1951년 자신의 논문 "Protential Measurements for Determining Cathodic Protection Requirements"에서 대부분의 경우 100[mV] 이하의 분극에서도 방식이 된다고 언급하였으나 이것은 자신이 시행한 일련의 실험을 통해서 증명한 것이 아니고 단순한 관찰에 의한 것이었다.

Compton도 1965년 자신의 논문 "Criteria and Their Application for Cathodic Protection of Underground Structures"에서 "철을 $-0.85[V]$

/CSE까지 분극시킬 수 없는 경우에도 분극은 존재하며 이 분극의 정도가 100[mV] 이상이면 충분히 방식상태에 있다고 보아도 좋다"라고 언급하였으나 그 역시 실험조건이나 부식으로 인한 무게 감소 혹은 부식물에 관한 언급은 없었으며, 100[mV] 분극 기준을 실험적으로 증명한 사람은 Balro와 Berry였다. Balro와 Berry는 그들의 논문 "An Assessment of the Current Criteria for Cathodic Protection of Steel Pipes"에서 NACE의 RP 01-69에 명시된 모든 종류의 방식기준을 여러가지 토양조건으로 실험한 결과 "다양한 토양 조건에서 부식방지의 기준으로 가장 타당하면서도 적용하기 좋은 기준은 100[mV] 분극 기준이다"라고 결론지었다.

3.2.2 적용시 고려하여야 할 사항

3.2.2.1 온도

Balro와 Berry의 실험에서 21% 수분함량의 통기성이 좋은 토양과, 13% 수분함량의 탈기된 토양에서 각각 시편의 온도를 60[$^{\circ}C$]로 상승시켜 실험한 결과 실온상태보다 약 100[mV] 정도의 분극이 더 필요한 것으로 나타났다. 즉, 실온상태에서 50[mV] 내지 100[mV]의 분극으로 방식이 된 경우, 60[$^{\circ}C$]에서는 150[mV] 내지 200[mV]의 분극에서 방식되는 것으로 나타났다.

3.2.2.2 박테리아

탈기된 토양에서의 실험결과 박테리아의 존재하에서는 약 200[mV]의 분극이 방식에 필요한 것으로 나타났다.