

전기 비저항법에 의한 모르타르 속의 철근 부식 측정

이 상 호 · 한 정 섭

동아대학교 해양공학과

Measurement of Rebar Corrosion in Mortar by Electrical Resistivity Method

Sang-Ho Lee, Jeong-Seb Han

Department of Ocean Engineering, Dong-A University, Pusan 604-714, Korea

To study measurement of rebar corrosion in mortar, a electrical resistivity method was adapted. The Wenner array was used as electrode array. The rebars were corroded by the salt spray and then they were embedded in mortar. The obtained results showed that the apparent resistivity was decreased with increasing a pseudo-depth(up to 1.8cm) and then at near the surface of rebar(2cm), it was increased abruptly and then it was decreased again(after 2cm). And it was confirmed that the resistivity values were changed by the type and the amount of corrosion products.

1. 서 론

철근콘크리트 구조물을 장기간 사용하기 위해서는 그 구조물의 안정성을 판단하여 필요한 조치를 취하는 것이 요구되지만 대부분 철근콘크리트 구조물은 강구조물과는 달라 강도만 충분하면 유지 관리 없이 반영구적으로 사용할 수 있다고 생각해 왔기 때문에 안전성을 진단하지 않고 이용해 왔다고 해도 과언이 아니다.

그러나 최근에 일어난 대형 참사인 성수대교, 삼풍백화점 붕괴 이후 강구조물뿐만 아니라 철근콘크리트 구조물의 안전성에도 큰 관심을 보이고 있다.

철근콘크리트 구조물의 안전성 진단에는 강도(압축, 휨, 인장), 피복 두께, 변위, 강성, 균열, 콘크리트 속의 수분, 철근 위치, 철근 직경, 철근 부식 등을 대상으로 하고 있다. 이중 철근

부식은 해양구조물이나 폐수 처리 설비 등에서 매우 중요한 요소이다.

콘크리트 속의 철근 부식을 측정하는 방법으로는 half cell을 이용하여 potential map을 작성하여 부식된 부분을 찾아내는 방법이 주로 사용되고 있다.¹⁻⁴⁾ 그러나 이 방법은 콘크리트를 깨뜨린 후 철근을 노출시켜 연결해야 하는 단점을 가지고 있다. 이런 단점을 극복하기 위해서 본 연구에서는 전기 비저항법으로⁵⁻⁶⁾ 모르타르 속의 철근 부식을 측정하고자 한다.

전기 비저항법은 인공적으로 대지 혹은 매질에 전류를 보내어 형성되는 전위분포를 측정함으로써, 전기 비저항의 변화 양상을 탐지하고 이를 해석하여, 대지나 매질 내부의 구조를 규명하는 방법으로 일반적으로 거시적인 지하 구조나 지하수 조사, 광물 탐사 등에 널리 이용되고 있는 방법 중의 하나이다.

이 방법을 철근 콘크리트의 철근 부식 측정 장치로써 사용하고 있으나 현재 시판되는 것은 4개의 전극 간격을 5cm로 고정시켜 철근 콘크리트의 깊이 5cm 지점의 비저항만을 측정하여 철근의 부식을 평가하는 방법으로⁷⁾ 사용하고 있다. 이 경우에는 콘크리트의 성질에 따라 매우 큰 차이를 나타낼 뿐 아니라 철근 부식 상태를 정확하게 파악하기 어렵다는 단점을 갖고 있다.

그러므로 본 연구에서는 전극의 간격을 변화시켜 철근 표면 가까이에서 철근 표면의 비저항을 측정하여 모르타르 속의 철근 부식 거동을 연구하고자 한다.

2. 측정원리 및 실험방법

2.1 전기 비저항 측정원리

전기 비저항 측정방법의 일반적인 원리⁵⁻⁶⁾는 다음과 같다.

균질 등방성 매질 위에 전류가 흐르는 경우, 전기장내지 전위는 Laplace 방정식을 만족한다.

$$\nabla^2 V = 0 \tag{1}$$

단일 전극의 경우, 전위 V 는 좌표의 대칭성 때문에 r 만의 함수가 되며, 따라서 (1)식은 구면 좌표에서 다음과 같이 된다.

$$\nabla^2 V = \frac{d^2 V}{dr^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{dV}{dr} \tag{2}$$

Fig. 1과 같이 균질 등방성 매질의 표면에 정전극을 고정하고, 전류 I 를 공급할 때 전류전극 C_1 으로부터 거리 r 인 점의 전위 V 는

$$V = \left(\frac{I\rho}{2\pi}\right) \cdot \frac{1}{r} \quad \text{또는} \quad \rho = 2\pi r \cdot \frac{V}{I} \tag{3}$$

이 된다. 여기서 ρ 는 전기 비저항이다.

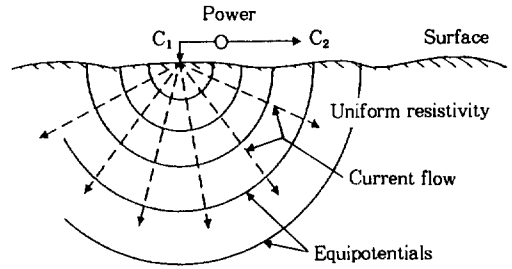


Fig. 1. Point source of current at the surface of a homogeneous medium.

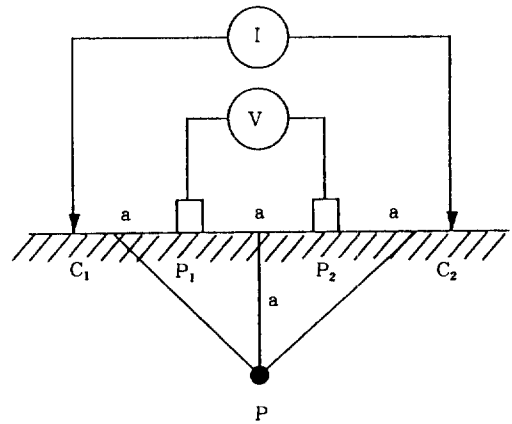


Fig. 2. The Wenner electrode array.

본 실험에 이용한 Wenner 전극배열의 경우 (Fig. 2. 참조) P점의 겉보기 비저항 ρ_a 는

$$\rho_a = 2\pi a \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

여기서 a 는 그림에서와 같이 전극간격이며, ΔV 는 P_1, P_2 간의 전위차, 그리고 I 는 C_1, C_2 에 흐르는 전류의 세기이다.

2.2 실험방법

본 실험에 사용된 철근은 건설 현장에서 많이 사용하는 직경 13mm, 길이 30cm인 이형철근을 사용하였다. 철근의 중앙부 10cm를 제외한 모든 부분은 테프론 테이프로 감아 부식이 전혀 일어나지 않도록 하였다. 부분적으로 감겨진 철근을

5% NaCl과 35℃로 조절된 염수분무기 안에 넣어 부식시켰다. 부식시킨 후 테프론 테이프를 제거한 뒤 조사한 결과 테프론 테이프로 감은 부분은 테프론 테이프를 감기 전의 상태와 동일한 것을 확인하였다. 부식량을 조절하기 위해서 염수분무기로 3, 7, 25일 동안 계속하여 부식시켰다. 염수분무기에서 철근을 꺼낸 뒤 철근 표면의 염수를 완전히 제거하기 위해서 흐르는 물로 철근을 충분히 세척하였다. 부식시킨 후 테프론 테이프를 완전히 제거한 철근을 거푸집에 넣은 뒤 모래, 시멘트 및 물의 비율이 2:1:0.45로 배합하여 거푸집에 타설한 후 진동테이블로 공기를 제거시킨 뒤 시편을 제작하였다. 철근이 묻힌 깊이는 1.9mm이며, 제작된 시험편의 개략적인 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 콘크리트의 양생은 공기중 양생(30일)과 수중 양생(50일) 2가지 방법으로 하였다.

겉보기 비저항은 BRGM 회사의 SYSCAL-RE2를 사용하여 측정하였고 이때 전극은 콘크리트 못을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Pseudo-depth에 따른 전기 비저항의 변화

공기중과 수중에서 양생한 시험편의 중앙에서 전극간격에 따른 겉보기 비저항을 측정한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

전극간격이 클수록 탐사 심도가 깊어지므로 지금부터는 전극간격이라는 말 대신에 pseudo-depth(擬似깊이)라는 용어를 사용하는 것이 내용 전달이 쉬우므로 이 용어를 사용하기로 한다.

Pseudo-depth 1cm인 지점은 모르타르 자체의 비저항을 나타낸다고 볼 수 있다. 그런데 이 지점의 겉보기 비저항값이 공기중과 수중에서 양생한 시편에서 차이가 있음을 알 수 있다. 그것은 공기중과 수중에서 양생한 모르타르의 전기 저항이 함수량에 의해 차이가 나기 때문에 겉보

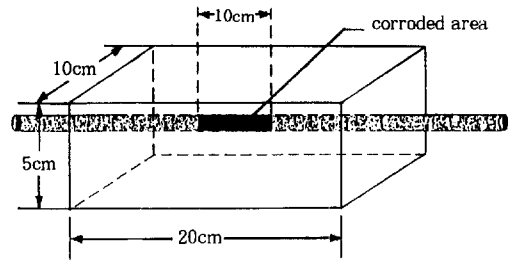


Fig. 3. Shape and dimensions of specimen.

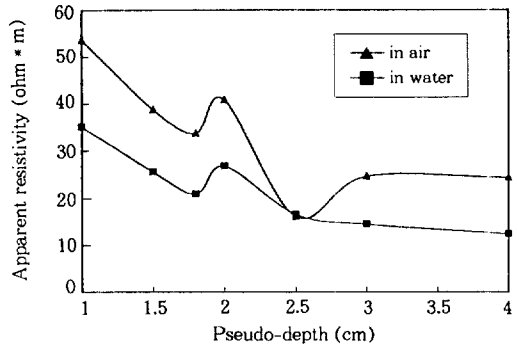


Fig. 4. The behavior of apparent resistivity with the mortar pseudo-depth.

기 비저항값이 달라졌기 때문이다.

Pseudo-depth가 깊어지면 질수록 겉보기 비저항값이 감소하다가 2cm 부근에서 약간 증가하는 현상을 보이고 있다. 이것은 철근 표면 부식층의 비저항값에 의한 것으로 보여진다. 그 이후에는 철근 자체의 비저항값이 포함된 값을 보이고 있다. Pseudo-depth 3cm 이후의 겉보기 비저항값이 일정한 것을 볼 때 철근 자체의 비저항값은 대체로 일정한 것을 알 수 있다.

이 그림에서 알 수 있는 특이점은 철근의 표면부식층의 겉보기 비저항값과 모르타르의 겉보기 비저항값과 철근 내부의 겉보기 비저항값이 뚜렷이 구분되는 점이다. 특히 2cm 부근에서 최대값을 보인 것은 피복두께와 일치한다. 실제 철근이 묻힌 지역은 깊이 1.85~1.95cm 이므로 Wenner 배열인 경우 겉보기 비저항값이 최대값을 나타내는 pseudo-depth와 피복두께가 거의

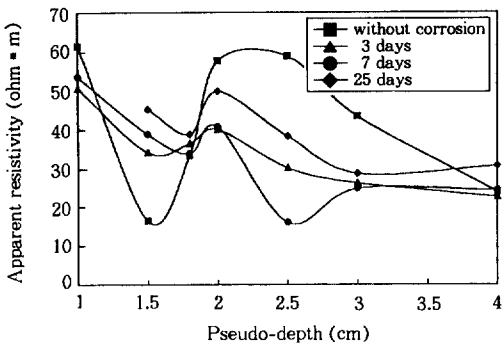


Fig. 5. The behavior of apparent resistivity with the pseudo-depth.

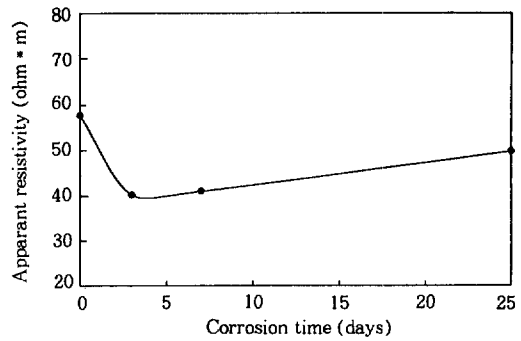


Fig. 6. The behavior of apparent resistivity with the corrosion time.(pseudo-depth:2cm).

일치함을 알 수 있다. 따라서 pseudo-depth로부터 피복두께의 예측이 가능할 것으로 보이며 전극의 간격을 좀더 미세하게 조절하면 더욱 정확한 피복 두께를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

일반적으로 철근 위의 모르타르의 피복 두께를 측정하는 것은 자기 감응식이나 레이더 탐지기로 측정하고 있으나 본 실험에서 알 수 있듯이 pseudo-depth별 전기 비저항값을 측정함으로써 가능함을 알 수 있다.

3.2 부식정도에 따른 비저항의 변화

Fig. 5는 부식정도가 다른 공기중에서 양생한 시편들을 깊이별로 조사한 것으로 앞절에서 언급한 것처럼 깊이가 깊어짐에 따라 처음에는 감소하다가 철근 표면 근처에서 겔보기 비저항값이 최대값을 보이는 현상을 나타내고 있다. Fig. 6은 Fig. 5의 결과에서 pseudo-depth가 2cm인 지점의 겔보기 비저항값을 분리하여 나타낸 것이다. Fig. 6에서 보면 염수분무기로 전혀 부식을 시키지 않은 시편의 산화 피막의 비저항값이 크기 때문에 겔보기 비저항값이 가장 높고 그 이후 겔보기 비저항값은 급격히 감소한 뒤 부식 정도에 따라 다시 증가하는 거동을 보이고 있다. 염수분무기로 전혀 부식을 시키지 않은 피막은 철근 제조시에 생기는 Fe_3O_4 로서 매우 치밀한 산화 피막이기 때문에 전기 비저항이 가장

큰 것으로 사료된다. 그러나 일단 부식되기 시작하면 이러한 치밀한 부식층은 파괴되고 전혀 부식되지 않은 철근이 노출되기 때문에 3일 부식한 경우의 겔보기 비저항값이 매우 적게 나타난 것으로 생각된다. 계속 부식이 진행되면 $Fe(OH)_3$ 혹은 $\gamma-FeOOH$ ⁸⁾ 등이 형성되고 그 두께 혹은 면적비가 점점 증가하여 피막의 겔보기 비저항값은 부식 정도에 따라 증가하는 것으로 생각된다. 3일과 7일간 부식시킨 시편은 붉은 색을 띠는 노란 색의 녹이 형성되었으나, 25일간 부식시킨 시편은 부식시킨 뒤 흐르는 물에 철근을 씻은 후 육안 관찰시 새롭게 형성된 검은 녹이 표면을 뒤덮고 있었다. 그러므로 본 실험 결과에 의하면 철근의 표면 산화 피막의 겔보기 비저항값을 측정함으로써 철근의 부식 정도를 예측할 수 있는 것으로 사료된다.

3.3 철근 길이 방향의 겔보기 비저항의 변화

Fig. 7은 7일동안 부식시킨 철근을 피복두께가 1.9cm가 되도록 양생한 시편을 사용한 것이다. Pseudo-depth가 각각 2, 2.5, 3cm에서의 모르타르에 묻힌 철근 길이방향(0-20cm)에 따른 겔보기 비저항값을 나타낸 것이다. 부식된 가운데 부분(5~15cm)은 대체로 겔보기 비저항 값이 적고 염수분무기로 부식되지 않은 바깥 부분으로 갈수록 일반적으로 겔보기 비저항값이 높은

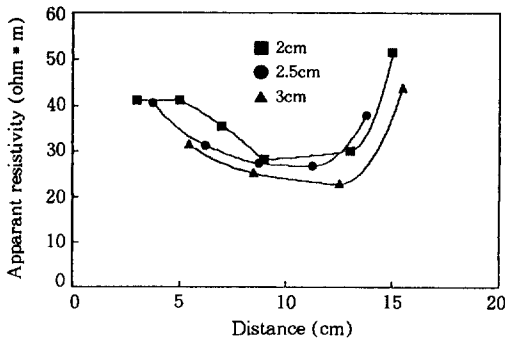


Fig. 7. The behavior of apparent resistivity with the distance of axial rebar.(pseudo-depth:2, 2.5, 3cm).

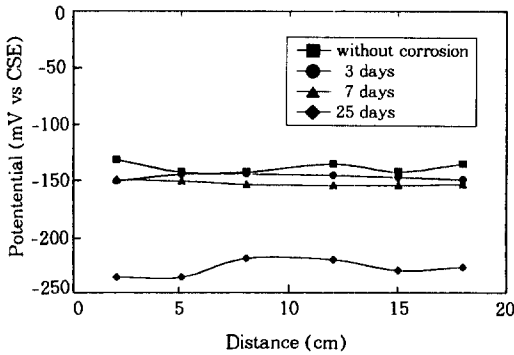


Fig. 8. The behavior of corrosion potential with the distance of axial rebar.⁹⁾(half cell method).

양상을 나타낸다. 이것은 앞에서 언급한 것처럼 바깥부분은 Fe_3O_4 의 치밀한 산화 피막의 비저항값이 부식된 안쪽의 $\gamma-FeOOH$ 등의 산화 피막의 비저항값보다 크기 때문에 사료된다. Pseudo-depth가 2cm에서 3cm로 갈수록 비저항값이 적어지는 것은 철근 내부의 비저항의 영향으로 생각된다. Pseudo-depth가 2cm인 경우는 산화 피막의 비저항값이 나타나고, pseudo-depth가 더욱 깊어질수록 철근 내부의 비저항값이 반영되기 때문으로 생각된다. 이상에서 볼 때 전기 비저항법으로 부식된 위치를 정확히 찾을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 8⁹⁾은 half cell로서 공기중에서 양생한 시편들을 모르타르의 피복두께 1.9cm에서 철근 길

이 방향으로 부식전위를 측정한 결과이다. 전기 비저항 측정을 한 시편과 같은 형상의 시편을 사용한 것이었다. 부식된 부분과 부식되지 않은 부분의 부식전위의 차이는 크게 나타나지 않았다. 그 이유는 부식된 부분의 부식전위가 미치는 범위가 크기 때문으로 생각된다. 시편의 길이가 매우 길다면 부식된 부분과 부식되지 않은 부분의 부식전위 차이가 크게 나타날 것으로 생각된다. Fig. 7과 8을 비교해 볼 때, 부식된 철근의 정확한 위치를 조사하기 위해서는 half cell 보다는 전기 비저항 방법이 우수함을 알 수 있다.

4. 결 론

전기 비저항 측정 방법을 이용하여 미리 부식된 철근을 사용한 모르타르의 경우 전극의 간격을 변화시켜 철근 부식을 조사한 결과는 다음과 같다.

1) 공기중과 수중에서 양생한 시편의 모르타르의 겔보기 비저항값은 함수량의 차이로 그 값이 크게 다르게 나타났고, pseudo-depth가 철근에 가까워질수록 모르타르의 겔보기 비저항값은 적어지다가 철근 표면의 산화층 근처에서는 그 값이 갑자기 튀는 현상을 보였다.

2) 부식 정도에 따라 철근 표면의 산화층의 종류와 산화정도가 다르기 때문에 겔보기 비저항값도 다르게 나타났다. 부동태를 형성하는 Fe_3O_4 는 염수분무기에 의해 생긴 녹들 ($Fe(OH)_2$), 혹은 $\gamma-FeOOH$ 보다 비저항값이 큰 것으로 나타났다.

3) 철근의 길이 방향의 겔보기 비저항값은 부식된 가운데 부분은 겔보기 비저항값이 적고 바깥으로 갈수록 높은 양상을 나타내었다. 이것은 산화층의 종류에 따른 것으로 사료된다.

이상의 결과에서 볼 때, 전기 비저항 측정 방법을 이용하여 모르타르의 피복 두께와 철근부식 상태를 조사할 수 있음을 알 수 있었고 실제

부식이 진행되고 있을 때 나타나는 양상에 대해서는 앞으로의 연구과제라고 생각된다.

참 고 문 헌

1. J. A. Gonzales, E. Ramirez, "The Behaviour of Pre-Rusteeled Steel in Concrete", *Cem. Concr. Res.*, vol. 26, No. 3, pp. 501~511, 1996.
2. R. E. Spears, "The 80 Percent Solution to Inadequate Curing Problems", *Concrete International*, April, pp. 15~18, 1993.
3. W. Lopez, "Influence of Degree of Pore Saturation on the Resistivity of Concrete and the Corrosion Rate of Steel Reinforcement", *Cem. Concr. Res.*, vol. 23, pp. 368~376, 1993.
4. ASTM C-876, "Standard Test Method for Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete", 1980.
5. Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. and Keys, D. A., *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, pp. 632~656, 1976.
6. Kellers, G. V. and Frischknecht, F. C., "Electrical Methods in Geophysical Prospecting", Pergamon Press, Oxford, pp. 90~96, 1966.
7. Fig, I. W. and Marsden, A. F., "Development of Inspection Techniques for Reinforced Concrete", *Offshore Technology Report OTH 84205*, 1985.
8. Misawa, T., Hashimoto, K. and Shimodaira, S., "The Mechanism of Formation of Iron Oxide and Oxyhydroxides in Aqueous Solutions at Room Temperature", *Corrosion Science*, vol. 14, pp. 131~149, 1974.
9. 이상호, 한정섭, "부식된 철근을 사용한 모르타르의 환경에 따른 부식전위의 거동", *한국해양공학회지*, 제10권 제4호, pp. 103~108, 1996.