

전기비저항 측정에서 실험체 크기의 영향에 대한 실험적 연구

임영철^{1*}

Experimental Study on the Effect of Specimen Size on Electrical Resistivity Measurement

Young-Chul Lim^{1*}

Abstract: In this study, the effect of the size of the specimen on the apparent resistivity was investigated at the laboratory level for electrical resistivity. The specimens were measured for apparent resistivity by fabricating specimens with different sides and heights. Experimental results show that the apparent resistivity increases as the side and height of the specimen become smaller. Also, it was confirmed that the influence of the size of the specimen on the electrical resistivity measurement was not linear.

Keywords: Electrical resistivity, Size of specimen, Corrosion, Diagnosis

1. 서 론

최근 이탈리아 제노바의 모란디 다리 붕괴사고는 유지관리의 중요성을 다시 한 번 일깨워 주는 사건이었다. 콘크리트의 내구성 문제가 끊임없이 제기되어 왔음에도 불구하고 이를 소극적으로 대처한 결과, 인명피해, 재산손실, 주요 연결로 차단으로 인한 불편 등 막대한 피해를 직면하게 되었다.

콘크리트 구조물에는 균열, 박리, 박락, 염해, 중성화 등의 다양한 내구성 저하 요인들이 나타날 수 있다. 특히 상기 요인은 종국적으로 콘크리트내 철근부식으로 연결되므로 이에 대한 충분한 점검 및 진단이 이루어져야 한다.

철근부식의 비파괴진단법에는 자연전위법, 분극저항법, A.C. 임피던스법의 전기화학적 진단기법이 사용되고 있으나 (ASTM C876-09, 2009; Feliu et al., 1988), 측정을 위해 콘크리트 피복의 일부를 제거해야하는 등 전처리가 필요하여 이들을 완전한 비파괴진단기법이라고 말할 수는 없을 것이다.

전기비저항법은 콘크리트 비저항 추정을 이용한 철근의 부식도 평가기법으로, 측정방법이 간단하고 측정시 표면손상이 없는 완전비파괴기법이라 할 수 있다. 하지만 콘크리트 비저항측정시, 주변철근은 순수한 콘크리트만의 평가에 영향을

미치게 된다. 이러한 철근의 영향을 정량적으로 평가하기 위해 비저항추정모델(REM: Resistivity Estimation Model)이 제안되었다. 하지만 이 REM을 이용한 비저항 평가기법이 실제 부재에 적용하기 위해서는 실험체 대상의 실험이 필요하며, 이를 위해 제작된 실험체의 크기는 전기비저항 측정에 영향을 미칠 수 있어(Gowers and Millard, 1999) 이에 대한 검토가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 실험체 크기에 따른 겉보기 비저항의 영향을 실험을 통하여 고찰하였다.

2. 연구의 이론적 배경

2.1 4극법에 의한 전기비저항

전기비저항법은 지구물리학에서 지질탐사(The Society of Exploration Geophysicists, 1967)를 위해 개발되어, 콘크리트 비저항 추정에는 2개의 통전전극과 2개의 응답전극을 사용하는 4전극법인 Wenner 전극배치(Wenner, 1915)가 일반적으로 적용된다. Wenner법에 의한 전기비저항 측정은 Fig. 1과 같이 외부에 통전전극 2개를, 내부에 응답전압 2개를 등간격(a)으로 배치하여 측정 대상물의 전기저항성을 측정한다. 측정 매질의 비저항이 ρ 로 균질하다면 비저항치는 식(1)로 정의될 수 있다. 여기서 ρ 는 측정대상물의 비저항($k\Omega \cdot cm$), V는 응답전압(V), I는 통전전류(A), 그리고 a는 전극간격(cm)이다.

하지만 대부분의 측정대상은 비저항이 서로 다른 비균질한 매질로 구성되어 있어, 식(1)을 그대로 적용할 수가 없다. 이

¹정회원, 대구가톨릭대학교 건축학부 부교수

*Corresponding author: yclim@cu.ac.kr

Hayang-Ro 13-13, Hayang-Eup, Gyeongsan-si, Gyeongbuk, 38430, Rep. of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

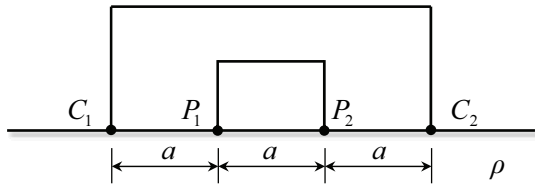


Fig. 1 Resistivity method with Wenner electrode array

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (1)$$

를 위해 식(2)와 같이 겉보기 비저항의 개념이 이용되며, ρ_a 는 겉보기 비저항($k\Omega \cdot \text{cm}$), V_a 는 겉보기 응답전압(V)이다.

$$\rho_a = 2\pi a \frac{V_a}{I} \quad (2)$$

2.2 비저항추정모델(REM)

철근의 영향을 고려한 콘크리트의 비저항 추정에는 철근의 기하학적 요소인 직경, 피복두께 등에 대한 해석이 가능하여야 하며, 측정전극의 간격에 따른 영향도 고려되어야 한다.

비저항 추정모델(REM)은 식(3)과 같이 전기영상법의 개념을 이용한 비저항 해석으로 콘크리트의 비저항 특성과 철근의 상기 영향을 고려한 수학적 해석모델(Lim et al., 2009)이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 철근 상부에 두 개의 전류전극을 외측에, 두 개의 전위전극을 내측에 등간격 a 로 배치하고, 콘크리트 비저항, 철근비저항, 철근직경, 피복두께, 전극간격의 영향을 정량적으로 평가할 수 있다. 즉 통전전류(I)에 의해 내부 응답전압(V_a)의 변화를 파악하고, 이를 식(3)에 의해 정량적으로 겉보기 비저항을 산출한다.

$$V_a = \frac{\rho_1 I}{\pi a} \left[\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left[k_n \prod_{n=1}^{\infty} \frac{Q_n}{k_n} \right] \cdot \left[\frac{1}{(1+H_n^2)^{1/2}} - \frac{1}{(4+H_n^2)^{1/2}} \right] \right] \right. \\ \left. + \left[\prod_{n=1}^{\infty} \frac{Q_n}{k_n} \right] \cdot \left[\frac{1}{(1+G_n^2)^{1/2}} - \frac{1}{(4+G_n^2)^{1/2}} \right] \right] \quad (3)$$

$$k_n = \frac{r}{(1+2(n-1))d+r} \quad (4)$$

$$Q_n = \frac{k_n(\rho_2 - \rho_1)}{\sqrt{k_n \rho_2 + \rho_1}} \quad (5)$$

$$H_n = \frac{d+r(1-k_n)}{a} \quad (6)$$

$$G_n = \frac{2nd}{a} \quad (7)$$

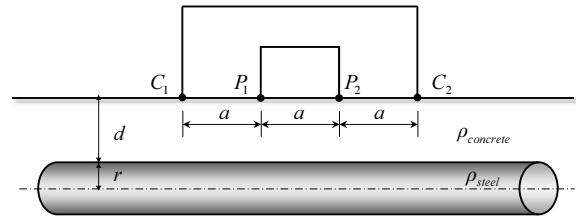


Fig. 2 Resistivity Estimation Model(REM)

V_a : 겉보기 전위차(V)

I : 전류원(A)

ρ_1 : 콘크리트 비저항($\Omega \cdot \text{m}$)

ρ_2 : 철근표면 비저항($\Omega \cdot \text{m}$)

d : 피복두께(m)

r : 철근 반경(m)

a : 전극 간격(m)

2.3 반무한 매질에서의 겉보기 비저항

Fig. 1과 같이 측정대상물 매질의 비저항이 동일하다면 식(1)의 ρ 는 어떤 측정점(표면)에서도 동일한 비저항치를 나타낸다. 만약 Fig. 2처럼 매질(ρ_1) 내부에 비저항과 형태가 다른 물질(ρ_2)이 존재한다면, 비저항 측정시 겉보기 비저항은 다른 값을 나타내게 될 것이고 이 물질(ρ_2)의 영향이 포함되지 않는 영역에서는 매질(ρ_1)의 비저항만이 측정될 것이다.

Fig. 3은 REM의 철근 직상부 해석을 확장한 A-REM(Advanced REM)을 이용(Lim et al., 2018)하여, 철근 직상부뿐만 아니라 주변 겉보기 비저항 추정을 나타낸 모식도이다. Fig. 4의 해석에서는 피복두께(d)를 2cm, 4cm, 6cm로 변화시켜 식(8)의 겉보기 비저항률(AR rate)을 산출하였다.

$$AR_{rate} = \frac{\rho_{A-REM}}{\rho_{concrete}} \quad (8)$$

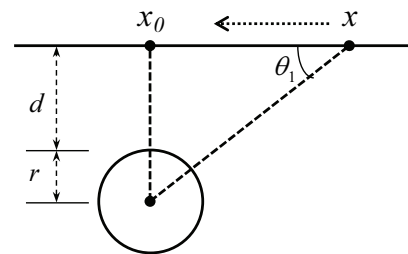


Fig. 3 Measurement line of apparent resistivity

여기서, $\rho_{concrete}$ 는 콘크리트 비저항, ρ_{A-REM} 은 A-REM에 의한 콘크리트와 철근의 영향이 포함된 겉보기 비저항치이다.

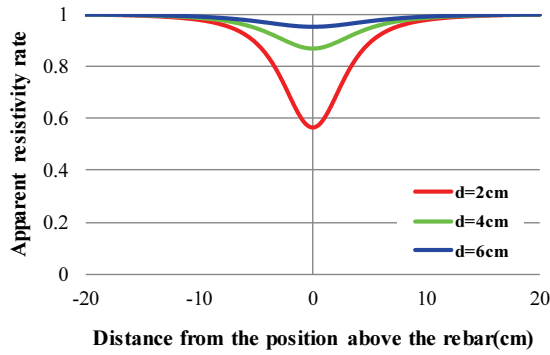


Fig. 4 Apparent resistivity rates for the rebar(Lim et al., 2018)

철근의 영향이 포함된 영역에서는 콘크리트에 비해 철근의 비저항이 낮아 콘크리트와 철근의 복합적 겉보기 비저항률이 1 보다 작은 값을 나타내지만 철근 상부에서 벗어나면 콘크리트만의 비저항의 영향만 남아 1에 수렴하는 것을 알 수 있다.

하지만 실험체의 크기가 특정지어지면 통전전류의 흐름이 제한되고, 이로 인해 측정되는 겉보기 비저항치에는 실험체의 기하학적 영향이 포함되게 된다. 즉, 실제 겉보기 비저항이 내부 비저항의 영향뿐만 아니라 실험체 규모에 따른 외적 영향을 동시에 받게 되므로 이에 대한 검토가 필요하다.

3. 전기비저항 측정

전기비저항 측정시 실험체 크기와 측정 위치의 영향을 파악하기 위해 조건별 콘크리트 실험체를 제작하여 겉보기 비저항에 미치는 각각의 영향을 실험적으로 고찰한다.

3.1 실험체 제작

Fig. 5와 Table 1과 같이 실험체는 한 변(x)를 고정하고 측변(y)와 높이(h)를 변화시켜 콘크리트로 제작되었다. 콘크리트는 포틀랜드 시멘트 1종에 물-결합재비(W/B)를 55.3%, 잔골재율(S/a)을 50.5%, 혼화재를 플라이애쉬 2종 15%와 고로슬

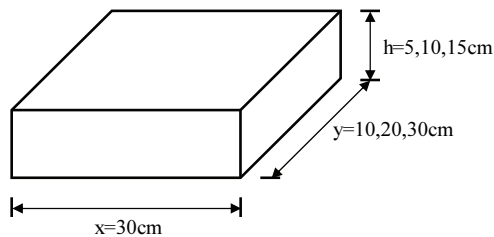


Fig. 5 Geometry of specimen

Table 1 Geometric factors of specimens

Specimens	Factor	x (cm)	y (cm)	h (cm)
C-y10-h15	Concrete	30	10	15
C-y20-h15			20	
C-y30-h15			30	
C-y30-h10			30	10
C-y30-h5				5

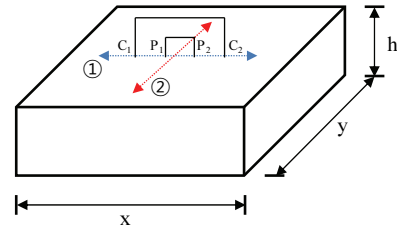


Fig. 6 Schematic of the resistivity measurement

래그 3종 20%, 굵은 골재 최대치수 25mm를 사용하였으며 28일 콘크리트 압축강도는 21.33MPa이었다.

3.2 실험체 측정

Fig. 6은 전기비저항 측정의 방향을 나타낸다. 측정선 ①번의 경우, 실험체 중심에서 양단으로 고정변(x)에 평행하게 전극을 2cm간격으로 이동시켜 실험체의 크기뿐만 아니라 측정 위치에 따른 영향을 측정하였다. 측정선 ②번의 경우, 실험체 중심에서 앞뒤로 고정변(x)에 직교하게 전극을 2cm간격으로 이동시켜 실험체의 크기뿐만 아니라 측정 위치에 따른 영향을 함께 측정하였다. 또한 전극간격(a)은 4cm, 5cm, 6cm로 변화

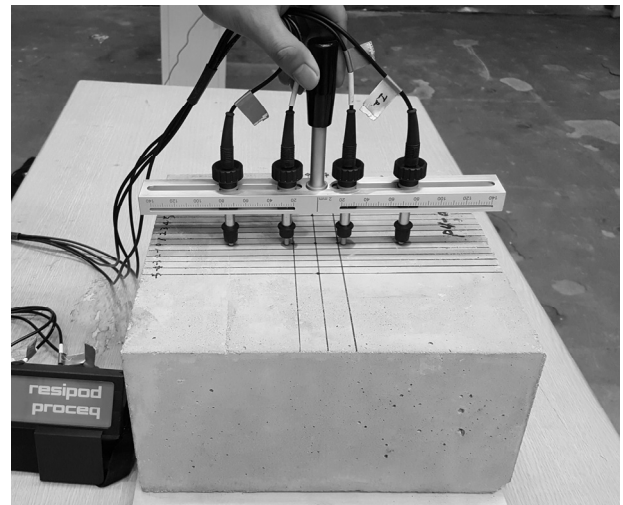
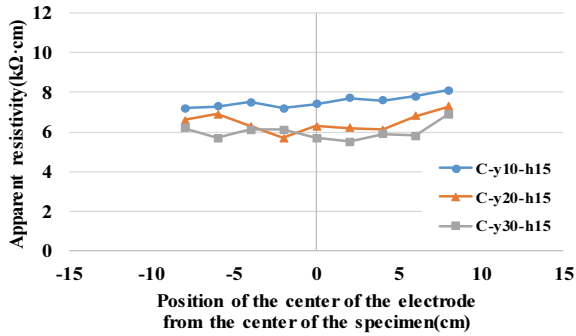
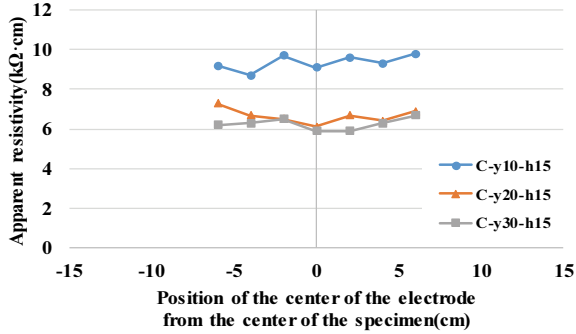


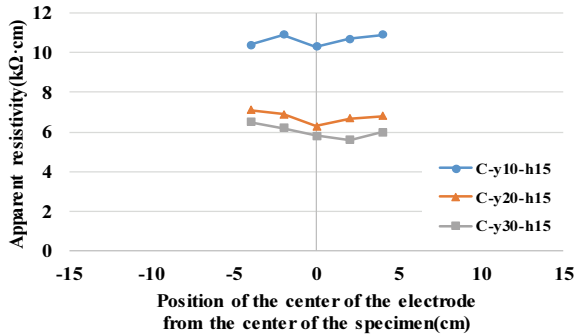
Fig. 7 Photograph of electrical resistivity measurement



(a) Electrode interval: 4cm

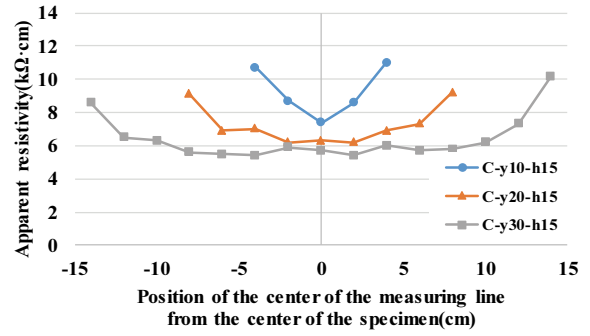


(b) Electrode interval: 5cm

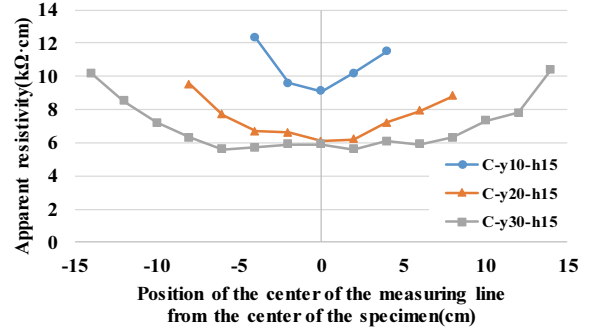


(c) Electrode interval: 6cm

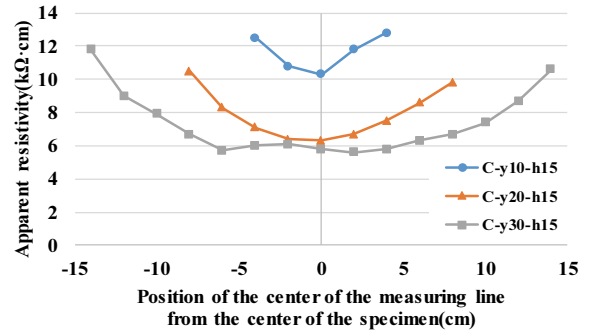
Fig. 8 Effect of side y (Parallel)



(a) Electrode interval: 4cm



(b) Electrode interval: 5cm



(c) Electrode interval: 6cm

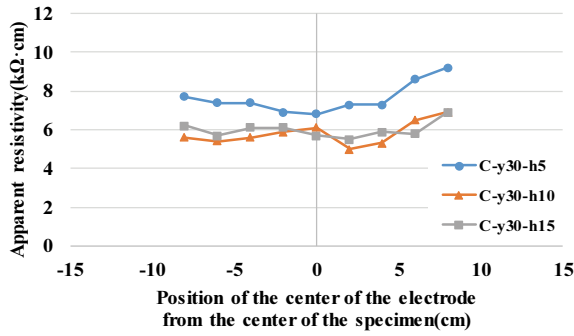
Fig. 9 Effect of side y (Perpendicularity)

시켜 전극간격과 실험체 크기와의 관계를 검토하였다. 실험체의 측면(y)이 작고, 전극간격이 커질수록 측정영역의 한계로 겹보기 측정개소는 줄어든다. 콘크리트 실험체의 겹보기 비저항 측정은 전극간격을 조절하기 위해 Fig. 7의 Proceq사의 Resipod family를 사용하였으며, AC 40Hz의 200 μ A-50 μ A의 전류가 측정시 적용되었다. 실험체는 내부 함수상태를 일정하게 유지시키기 위해 수증양생을 실시하였으며 측정전 수증에서 꺼내어 표면 수분을 제거한 후 겹보기 비저항을 측정하였다.

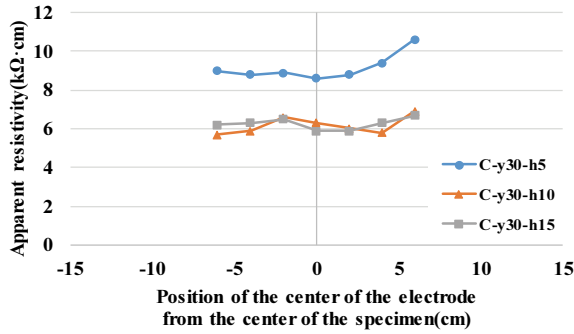
3.3 실험결과

Fig. 8와 Fig. 9는 실험체 측면(y)의 크기에 따른 겹보기 비

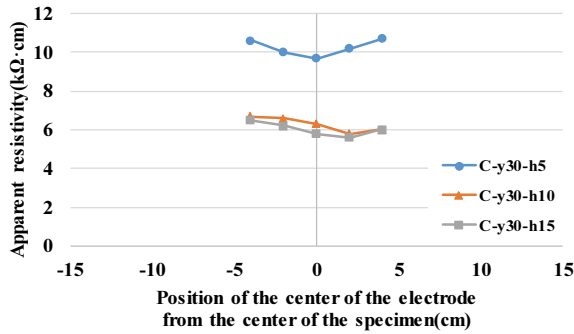
저항의 변화를 나타낸다. 전극간격(a)은 4cm(3a=12cm), 5cm(3a=15cm), 6cm(3a=18cm)의 3개 타입이 적용되었으며, 전극간격이 넓을수록 통전전류가 매질의 넓은 영역을 거쳐 흐르는 것으로 가정된다. Fig. 7의 ①번 측정방향과 같이 겹보기 비저항 측정을 실험체 중앙에서 측선을 따라 좌우 양단으로 이동시킨 Fig. 8(a)-(c)의 결과를 보면, 측면(y)이 작은 C-y10-h15가 겹보기 비저항이 가장 크게 나타났으며 전극간격이 커질수록 그 차이는 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 공시체의 크기가 통전전류의 흐름을 방해하여 콘크리트의 실제 비저항보다 큰 값을 나타낸 것으로 판단된다. Fig. 9(a)-(c)는 Fig. 7의 ②번 측정방향과 같이 측정라인에 직교된 앞뒤 양단으로 이동시켜 겹보기 비저항을 측정한 결과이다. Fig. 8과 같이 측면



(a) Electrode interval: 4cm



(b) Electrode interval: 5cm

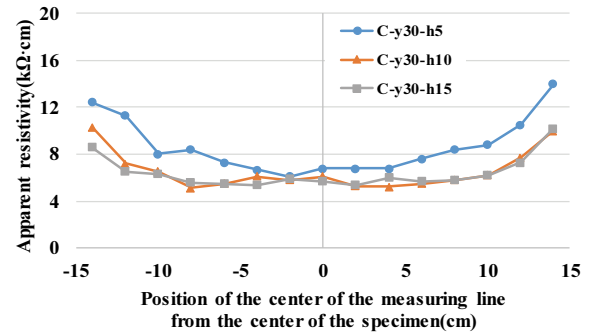


(c) Electrode interval: 6cm

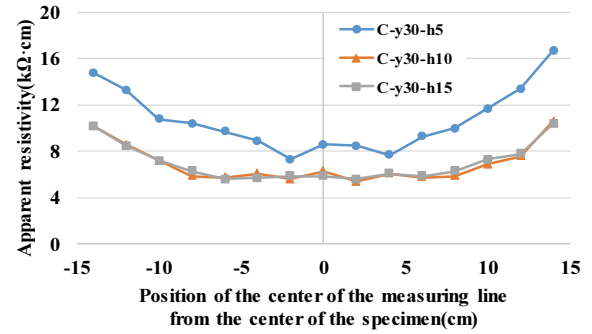
Fig. 10 Effect of height (Parallel)

(y)가 작을수록, 전극간격이 클수록 겉보기 비저항이 커지는 것을 알 수 있다. 특히, 앞뒤 양단에 가까워질수록 전류의 흐름이 영향을 크게 받아 겉보기 비저항이 급격히 증가하는 것을 알 수 있는데, 이것은 측면 크기에 따른 영향과도 유사 관계가 있을 것으로 판단된다. 또한 Fig. 8과 9의 실험체 중앙에서 측정된 비저항 결과값을 보면, 측면 y10을 제외한 측면 y20과 y30은 유사한 비저항값을 나타내고 있다.

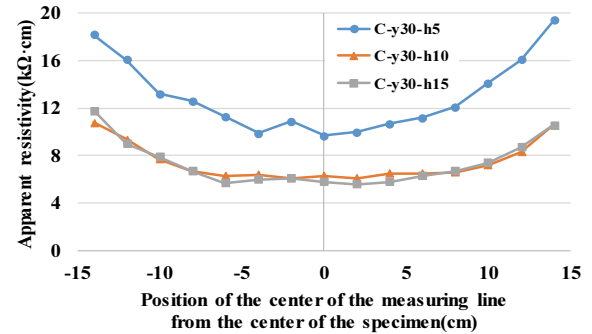
Fig. 10과 Fig. 11은 겉보기 비저항측정에서 실험체 높이(h)에 따른 영향을 나타낸다. 전극간격(a=4cm, 5cm, 6cm)과 측정방향(Fig. 7의 ①과 ②)은 Fig. 8과 9와 동일하게 적용되었다. 좌우 양단으로 측정한 Fig. 10의 결과와 앞뒤 양단으로 측정한 Fig. 11의 결과를 보면, 실험체 높이가 낮은 C-y30-h5는



(a) Electrode interval: 4cm



(b) Electrode interval: 5cm



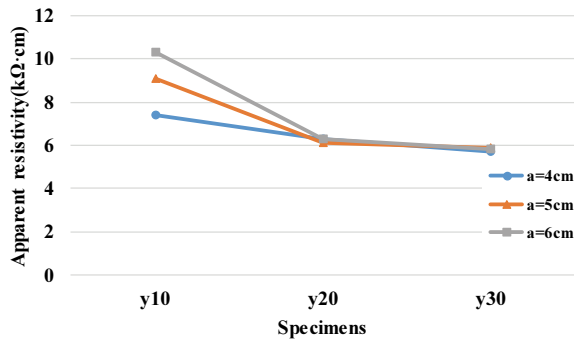
(c) Electrode interval: 6cm

Fig. 11 Effect of height (Perpendicularity)

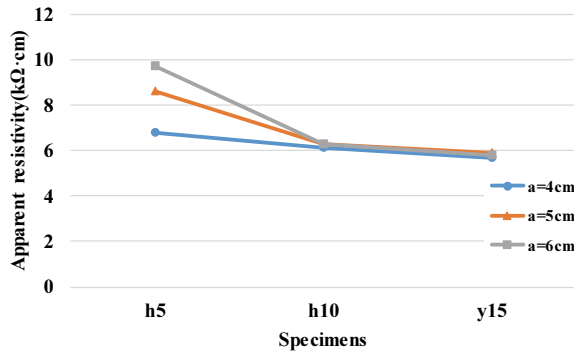
겉보기 비저항이 크나, C-y30-h10과 C-y30-h15는 거의 유사한 결과를 나타낸다. 이것은 실험체 크기와 전극간격과의 관계가 선형적이지 않음을 보여준다.

Fig. 12는 Fig. 8-Fig. 11의 실험체 중앙에서 측정된 겉보기 비저항을 측면(y) 및 높이에 따라 각각 비교한 결과이다. 앞선 결과와 같이 Fig. 12(a)와 Fig. 12(b)의 y10과 h5에서는 전극간격의 크기에 따른 영향이 확연히 차이나지만 그 이상에서는 큰 영향이 나타나지 않음을 알 수 있다.

따라서 전기비저항 연구를 위한 실험실 차원의 실험에서는 사전 실험을 통해 측정전극의 간격에 적합한 실험체의 단면 및 높이를 검토해 둘 필요가 있을 것으로 판단된다.



(a) Size of side y



(b) height

Fig. 12 Apparent resistivity at the center of the specimen

4. 결론

본 연구는 전기비저항 실험시 실험체의 크기에 대한 실험적 고찰을 통해 다음과 같은 연구결과를 확인하였다.

- 1) 전기비저항 측정시 실험체 크기에 따른 영향을 검토한 결과, 실험체 측변이 작을수록, 높이가 낮을수록 겉보기 비저항값이 크게 나타났다. 이를 통해 실험체의 크기가 통전전류의 흐름에 큰 영향을 끼치고 있음을 확인할 수 있었다.
- 2) 전극간격(a) 4cm, 5cm, 6cm에 대한 실험결과, 실험체 측변은 20cm이상, 높이는 10cm에서 안정적인 겉보기 비저항값을 확인할 수 있었으며, 이는 공시체 크기가 클수록 비저항값의 왜곡이 적어진 것으로 판단된다.

3) 실험실 단위의 전기비저항 측정시, 실험체 크기는 측정전극간격과의 관계를 사전 검토하여 결정한다면 안정된 겉보기비저항 측정결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 이공분야기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2015R1D1A1A01059285).

References

ASTM C876-09, (2009), Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, ASTM International West Conshohocken, PA.

Feliu, S., Conzalez, J. A., Andrade, C., and Feliu, V., (1988), On-Site Determination of the Polarization Research in a Reinforced Concrete Beam, *Corrosion Engineering*, 44(10), 761-765.

The Society of Exploration Geophysicists, (1967), Exploration of Geophysicists' Mining Geophysic., Oklahoma, George Banta Co., 63.

Wenner, F., (1915), Bulletin of the Bureau of Standard, 12, 469-478.

Gowers, K. R., and Millard, S. G., (1999), Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique, *ACI Materials Journal*, 96(M66), 536-541.

Lim, Y. C., Noguchi, T., and Lee, H. S., (2009), Mathematical Modeling for Corrosion Environment Estimation Based on Concrete Resistivity Measurement, *The Iron and Steel Institute of Japan International*, 49(1), 92-99.

Lim, Y. C., Noguchi, T., and Cho, C. G., (2018), Mathematical Modeling for Quantitative Estimation of Geometric Effects of Nearby Rebar in the Electrical Resistivity Measurement, *Cement and Concrete Composites*, 90, 82-88.

Received : 10/01/2018

Revised : 10/13/2018

Accepted : 10/15/2018

요 지 : 본 연구에서는 전기비저항에 대한 실험실 레벨의 측정에서 실험체 크기가 겉보기 비저항에 미치는 영향에 대해 검토하였다. 실험은 실험체의 측변과 높이가 다른 실험체를 제작하여 겉보기 비저항을 측정하였다. 실험결과, 실험체의 측변과 높이가 작을수록 겉보기 비저항이 크게 나타났다. 또한 전기비저항 측정에 미치는 실험체 크기의 영향은 선형적으로 나타나지 않음을 확인하였다.

핵심용어 : 전기비저항, 실험체 크기, 부식, 진단