콘크리트의 미세구조 특성이 전기저항에 미치는 영향

Influence of Micro-Structural Characteristics of Concrete on Electrical Resistivity

윤 인 석^{1)*}

In-Seok Yoon

Abstract

Since electrical resistivity of concrete can be measured in a more rapid and simple way than chloride diffusivity, it should be primarily regular quality control of the electrical resistivity of concrete which provides the basis for indirect of quality control of chloride diffusivity during concrete construction. If this is realized, the electrical resistivity of concrete can be a crucial parameter to establish maintenance strategy for marine concrete structures.

The purpose of this study is to develop, design and test a surface electrical resistivity measurement protocol. Microstructural affecting factors such as capillary water, porosity, tourtousity, and so on, on the electrical resistivity of concrete were examined taking into account for mixing proportion properties, and hydration stage.

This study can provide a non-destructive approach for durability design of marine concrete. From the relationship between electrical resistivity and chloride diffusivity, it is expected that the result is subsequently used as a calibration curve for an indirect control of the chloride diffusivity based on regular measurements of the electrical resistivity during concrete construction.

Keywords : Electirical resistivity, Chloride diffusivity, Micro-structure properties

1. 서 론

전기저항법은 1920년대에 프랑스의 Schlumberger 사에서 광물학적 관측의 용도로 고안된, 가장 오래된 재료물리 관측 법중 하나이다. 전기저항은 관수로의 부식을 관측하거나 변 전소의 설계 등을 위한 토질의 전기저항을 관측하는 목적으로 사용되었으며, 콘크리트 및 건설재료의 물성 추정에 사용 된 것은 비교적 최근으로서 1980년대부터 연구되고 있다 (Hope et al., 1985).

콘크리트의 전기저항은 전류를 콘크리트에 인가하였을 때 미세구조내 공극수를 통한 이온의 전류 흐름을 콘크리트가 저항할 수 있는 정도를 의미한다. 전기저항은 전도성의 역함 수로서 공극내 이온의 확산성과 연관되며, 결과적으로 염소 이온의 침투성을 판단할 수 있는 간접적 지표로서 활용할 수 있다 (Simon and Vass, 2012).

전기저항 측정의 장점은 비파괴 측정이므로, 구조물에 전 혀 손상을 입히지 않으면서 측정비용의 절감, 실험시간 절약, 측정 실시간내 데이터 확인, 측정방법의 초간편성 등의 많은 장점을 갖는다.

즉, 전기저항은 기존의 내구성 평가 방법에 대비하여 시간 과 노력을 절략하며 정량적인 데이터를 얻을 수 있다는 장점 이 있다.

콘크리트 구조물의 수명은 Fig. 1과 같이 일반적으로 잠복 기와 부식 진전기로 나뉘어진다 (Tuutti, 1982). 잠복기간과 부식진전기를 결정하는 정량적 실험지표로서 각각 염소이온 확산계수, 철근의 부식 전류밀도가 있는데, 이 두 지표는 구 조물의 수명계산에 실질적으로 중요한 항목이다. 그러나 두 실험방법은 현장에서 측정하기에 난해하고 많은 노력이 필 요하다. 반면, 전기저항은 잠복기관과 부식진전기 양쪽 다 정량적으로 평가할 수 있는 중요한 지표로서 전기저항만으

1) 정회원, 인덕대학교 건설정보공학과 교수, 교신저자

* Corresponding author : isyoon@induk.ac.kr

· 본 논문에 대한 토의를 2013년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2014년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Fig. 1 Engineering meaning of electrical resistivity

로 구조물의 건전도 평가 및 철근부식 속도 추정은 물론, 더 발전되면 구조물의 수명까지 추정할 수 있다.

그러나 전기저항 측정은 많은 장점 못지 않게 단점도 많은데, 데이터의 간섭효과를 유발하는 인자들이 지나치게 많다. 전기저항에 영향을 미치는 요인들을 살펴보면 (a) 공극량, 공극 크기 및 공극 연결성 등과 관련된 미세구조 특성 및 배합 조건, (b) 전해질 용액으로서 공극수의 성분, (c) 콘크리트의 탄산화, (d) 콘크리트내 염소이온량, (e) 철근위치 및 피복두께, (f) 온습도의 환경요인 등을 들 수 있다 (Liu et al., 2010).

본 논문의 목적은 콘크리트의 수화가 진행됨에 따른 전기저항 변화의 특성을 고찰하는 것이다. 물-시멘트비가 다른 콘크리트의 양생조건을 다르게 하여 콘크리트 시험체를 제작하고 전기저항의 변화율을 관찰하였다. 본 연구를 기초로, 전기저항의 향후 활용가능성과 내구성 설계에 미치는 영향이 후속적으로 연구될 것이다.

2. 실험방법

2.1 시험편의 제작 및 노출조건

보통포틀랜드 시멘트를 사용하여, 물-시멘트비 0.45, 0.50, 0.55의 수준에서 콘크리트를 배합한 후, 28일 동안 수중양생하였다. 시험편의 크기는 10×10×20cm이다. 이후, 양생조건 및 수분함량이 전기저항에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 시험체를 기중노출 조건과 수중침지의 표준 조건으로 구분

Table 1 Mixing proportion of concrete

Air (%)	Slump (cm)	W/C	Unit weight (kg/m ³)			
			Water	Cement	Sand	Gravel
4.5±0.5	15±1	0.45	185	411	706	1001
4.5±0.5	15±1	0.50	185	370	720	1021
4.5±0.5	15±1	0.55	185	336	732	1038

Fig. 2 Measurement of electrical resistivity in concrete

하여 양생하였다.

2.2 콘크리트의 전기저항

전기저항의 측정전, 수조에서 침지된 시험편 표면의 수분은 제거하였으며, 기중 양생된 시험편은 표면의 수분을 살포하고 수분 경과후 측정하였다.

각 재령마다 콘크리트의 전기저항의 측정을 위하여 Fig. 2와 같이 Wenner 방식의 4전극 실험장비가 이용되었다. 콘크리트의 전기저항은 인가된 전류 (I)와 반비례하는데, 전위차 (V)가 내부 안 전극에서 측정되며 오옴의 법칙에 의하여 겉보기 전기저항이 다음 식에 의하여 측정된다.

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

여기서, ρ : 콘크리트의 전기저항,

a : 전극사이 간격이다.

측정방법은 측정전 전극에 물을 접촉한 후, 전극을 콘크리트 표면 4면에 접지시켜 한 시험편에서 실험치를 4회 획득하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시간에 따른 콘크리트의 전기저항

Fig. 3은 포화조건에서 측정한 전기저항 측정치이다. 시간이 경과됨에 따라 콘크리트의 수화도가 진행됨에 따라 수화물의 생성 및 공극구조의 발현으로 전기저항이 지속적으로 상승하였다. 초기재령에서는 전기저항치가 낮게 나타났으며, 물-시멘트비에 따른 차이도 크지 않았다. 그러나 시간이 경과되면서 콘크리트의 미세구조가 지속적으로 발전되면서 전기저항값은 지속적으로 상승하는 추이를 보였다.

Fig. 4는 기중조건에서 측정한 전기저항 측정 결과이다. 현장에서 측정되는 전기저항은 실내측정보다 많은 영향을 받는데, 특히 온, 습도에 의한 변동이 높은 것으로 알려져 있다 (Millard, 1991; Millard and Gowers, 1992). Fig. 3의 포화조건에서는 전기저항이 일정한 증가폭과 변동이 심하지 않았으나, 기중조건에서는 측정치가 100일 이후로 급격히 상승하면서, 측정폭도 큰 추이를 보였다. 즉, 포화조건과 비교해 보았을 때, 100일 이전까지는 전기저항 데이터의 폭이 비교적 작았으나, 100일이 경과하면서 전기저항 데이터가 기하급수적으로 상승하였고, 이러한 현상은 실험 종료되는 시점에서는 계속되면서 1,400 KΩ·cm까지 이르렀다.

앞서 서술한 바와같이 콘크리트 시험편당 4회의 측정 데이터를 획득하였는데, 이 평균값을 산정하여 보인 것이 Fig. 5와 Fig. 6이다. 이 두 그림에서는 물-시멘트비에 따른 전기저항

의 분명한 추이를 확인할 수 있다. RESI 비저항 측정 기준에 의하면 12 KΩ·cm 이상, Broomfield (1997)는 20 KΩ·cm 이상이면 철근부식에 대한 우려가 거의 없는 것으로 제안하였는데, 두 제안치의 공통 제안치는 12 KΩ·cm으로서 약 70일 재령이 경과하였을 때 이 수치를 초과하였다.

3.2 콘크리트의 미세구조가 전기저항에 미치는 영향

Fig. 7은 콘크리트의 공극량과 전기저항의 관계를 보인 것으로, 여기서 공극량은 Van Breugel (1991)이 제안한 방법에 의하여 계산한 결과이다. 공극량이 적어지면서 전기저항이 상승하는 당연한 결과를 보였는데, 공극량 대비 전기저항 수치가 민감하게 가파른 추이를 보였다.

한편, 콘크리트의 미세구조는 많은 공극고체의 프랙탈로 간주되며 유체 흐름의 굴곡특성은 공극간 수축성을 반영하는 주요지표이다. 그래서 저자가 기존 연구에서 제안한 방법 (Yoon et al., 2007)에 의하여 공극량으로부터 굴곡특성 계수를 추정하고 이를 전기저항에 미치는 영향과 상관성을 고찰한 것이 Fig. 8이다. 굴곡특성 계수가 작아질수록 전기저항도 급격히 증가하는 결과를 보였다.

3.3 수분량이 전기저항에 미치는 영향

수분은 대부분의 비파괴 시험에 영향을 미친다. 시멘트 경화체내 상대습도 40% 수준까지의 수분은 비유동성을 가지

Fig. 3 Electrical Resistivity of saturated concrete

Fig. 4 Electrical Resistivity of air dried concrete

Fig. 5 Electrical resistivity of saturated concrete (average value)

Fig. 6 Electrical resistivity of air dried concrete (average value)

Fig. 7 Relation between volumetric fraction of pore and electrical resistivity

Fig. 8 Relation between tortuosity factor and electrical resistivity

며, 시멘트 페이스트의 내부표면에 강하게 부착된다. 이를 본 콘크리트의 배합에 대응하여 콘크리트의 수분으로 환산하면 약 15~23%의 수준의 공극률에 상응한다. 공극수 자체의 전기저항은 약 $5 \times 10^{-2} \text{ K}\Omega \cdot \text{cm}$ 로 알려졌다 (Buenfeld et al., 1986; Goni and Andrade, 1990), 일반적으로 수분량이 낮을수록 콘크리트의 통전성이 작아져서 전기저항이 커지는 것으로 알려져 있다.

그래서 수분량을 보다 정량화하기 위하여, 수화모델로부터

콘크리트의 수분량을 추정하고 이를 본 연구에서 얻은 실험 결과인 기중 콘크리트의 전기저항 ρ_{air} 과 포화 콘크리트의 전기저항 ρ_{sat} 과의 비율과의 상관성을 보인 것이 Fig. 9이다. 여기서 기중 콘크리트내의 공극수량 V_{water} 은 수분의 강제 증발 및 외기의 상대습도와 같은 외부 환경조건은 배제하고, 시멘트 페이스트의 단위 공극 V_{pore} 내에 존재하는 공극수량으로서, Van Breugel (1991)이 제안한 방법에 의하여 구하였다. 이 결과에 의하면 콘크리트 공극수량이 전기저항에

Fig. 9 Relation between volumetric fraction of capillary water in pore and electrical resistivity of concrete

큰 영향을 미치는 것은 분명한 것으로 사료된다. 특히, 단위 공극내 공극수의 체적율은 0.60까지 존재하되 공극수가 감소할수록 포화조건대비 기중 콘크리트의 전기저항치의 비율이 대폭적인 감소를 보였다. 특히, 단위 공극수의 체적율이 0.45 수준 이하에서 기하급수로 감소하되, 데이터의 상관성도 큰 폭의 차이를 보였다. 그러나 0.40 이하의 공극수량에서 전기 저항은 가파르게 상승하는 추이를 보였다.

한편, 공극내 공극수의 체적비율과 기중대비 포화조건 전기저항 비율의 상관성을 보인 것이 Eq. (2)이다. 결정계수는 0.64의 수준이지만 공극수량에 따른 기중콘크리트의 전기 저항을 대략적이지만 결정적으로 추정하는데 의미가 있다고 생각된다.

$$\rho_{air} = 1.822 \times 10^4 \exp \left[-17.079 \left(\frac{V_{water}}{V_{pore}} \right) \right] \cdot \rho_{sat} \quad (2)$$

3.4 전기저항과 염소이온 확산계수의 관계

서론에서 제시한 바와 같이 전기저항은 염소이온 확산계수와의 상관성이 높은 것으로 알려져 염소이온 확산계수로 대체하여 내구성 설계에 반영할 수 있을 것으로 기대된다. 그래서 콘크리트의 전기저항이 염소이온과의 상관관계를 얻고자 이론적 고찰을 통하여 실험결과와 확산계수와의 상관관계를 얻고자 하였다. Nernst-Einstein 방정식에 따르면 확

산계수는 다음과 같다.

$$D_i = \frac{RT}{z_i F^2} \lambda_i = \frac{RT}{z_i F^2} t_i \Lambda_m \quad (3)$$

여기서, D_i : i 번째 이온의 확산계수,
 λ_i : i 번째 이온의 몰전도성,
 t_i : i 번째 이온의 이동수율이다.

다공질성 재료에서 유효확산계수는 다음과 같다 (Atkins and De Paula, 2006).

$$D_{eff} = \frac{RT}{z_i F^2} t_i \sigma = \frac{RT}{z_i F^2} \frac{t_i}{\rho} \quad (4)$$

여기서, σ : 콘크리트의 전도성,
 ρ : 콘크리트의 전기저항이다.

상기 식에서 염소이온의 이동 수율을 알고 있다면, 염소이온 확산계수와 전기저항의 관계는 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$D_{eff} \frac{k_{Cl}}{\rho} = k_{Cl} \cdot \sigma \quad (5)$$

k_{Cl} 은 상수로서 실험자마다 상이한 결과를 보이고 있다. 정상흐름 상태에서의 염소확산계수와 비교한 Andrade et al. (2000)의 연구에서는 k_{Cl} 이 $1.2 \times 10^{-7} \text{ K}\Omega \cdot \text{cm}^3/\text{s}$ 으로 제안되고 있으나, Tang (2012)은 $1.0 \times 10^{-7} \sim 2.0 \times 10^{-7} \text{ K}\Omega \cdot \text{cm}^3/\text{s}$ 제안하였다. 비정상 흐름상태의 확산계수와 비교에서는 연구자마다 매우 상이한 값을 보고하고 있는데, Frederiksen et al. (1997)은 $2.1 \times 10^{-7} \text{ K}\Omega \cdot \text{cm}^3/\text{s}$, Romer (2005)는 $3.04 \times 10^{-7} \text{ K}\Omega \cdot \text{cm}^3/\text{s}$ 등을 보고 한 바 있다. 이 식으로부터 겉보기 확산계수 D_{Cl} , 유효 전기저항 ρ_{es} 및 염소이온 고정화 계수 γ_{Cl} 의 관계를 다음과 같이 재표현된다.

$$D_{Cl} = \frac{k_{Cl}}{\rho_{es} \cdot \gamma_{Cl}} \quad (6)$$

본 연구에서 얻은 전기저항을 토대로 Fig. 10의 기존의 염소이온 확산계수 모델 (Yoon et al., 2007)과 비교하여 물-시

Fig. 10 Formation of Chloride diffusivity to consider various affecting parameters (Yoon et al., 2007)

Fig. 11 Relationship between electrical resistivity and chloride diffusivity in concrete with W/C ratio 0.45

Fig. 12 Relationship between electrical resistivity and chloride diffusivity in concrete with W/C ratio 0.50

멘트비별로 얻은 결과가 Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13이다. 콘크리트의 전기저항은 확산계수와 관계에서 선형보다는 비선형일 때 다소 결정계수가 높은 추이를 보였으나 그 차이는 대등소이하였다. 그러나 이는 기존에 연구된 바와 달리, Eq. (5)의 선형 반비례 관계를 갖는 것과 상이한 결과이다. 그러나 Gjörv (2009)의 연구에서도 두 데이터의 상관성은 비선형으로 나타났으며, 본 연구는 이와 유사한 결과를 보였다.

그러나 Fig. 14에서 보인 바와 같이 전체 실험대상 콘크리트를 대상으로 염소이온 확산계수 ($10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)와 전기저항

($K\Omega \cdot \text{cm}$)과의 상관관계 관계는 비선형이라기 보다는 이론적인 선형식 Eq. (5)와 대체적으로 근사하게 맞았음을 알 수 있다. 이에 대한 선형식을 도출한 것이 Eq. (7)로서 이때 이 결정계수 0.7443의 비교적 높은 관계형성이 도출되었다. 이 식은 보통 콘크리트의 포화 조건에서 전기저항으로 확산계수를 추정하는데 유익할 것으로 생각된다.

$$D_{Cl} = -0.889 \rho + 19.632 \quad (7)$$

Fig. 13 Relationship between electrical resistivity and chloride diffusivity in concrete with W/C ratio 0.55

Fig. 14 Relationship between electrical resistivity and chloride diffusivity in concrete with W/C ratio 0.55

4. 결 론

- (1) 시간이 경과됨에 따라 콘크리트의 전기저항은 지속적으로 상승하였는데, 포화조건에서 약 70여일 재령이 경과하면서 $12 \text{ K}\Omega \cdot \text{cm}$ 을 초과하여 철근부식에 대한 안전한 콘크리트의 물성치를 보였다.
- (2) 기중 콘크리트의 전기저항은 포화조건과 큰차이를 보였는데, 100일 이후로 측정치가 급격히 상승하면서, 실험 종료되는 시점까지 대폭적으로 상승하였다.
- (3) 콘크리트의 공극량 대비 전기저항 수치가 민감하게 가파른 추이를 보였다. 단위 공극내 공극수의 체적율은 0.45 수준 이하에서 포화조건대비 기중 콘크리트의 전기저항치의 비율이 대폭적인 감소를 보였다. 그러나 0.40 이하의 공극수량에서 전기저항은 가파르게 상승하는 추이를 보였다.
- (4) 물-시멘트비에 구분하여 콘크리트의 전기저항과 확산계수의 상관성은 비선형 특성을 보였으나, 전체 콘크리트 시험편에 대해서는 기존의 선형관계가 성립되었다. 본 연구의 결과를 토대로, 염소이온 확산계수와 전기저항의 상관관계식을 도출하였다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 인덕대학교 교내 학술연구비에 의하여 수행한 것으로 이에 감사드립니다.

References

1. Andrade, C., Castellote, M., Alonso, C. and Gonzalez, C., Nonsteady-State Chloride Diffusion Coefficients Obtained from Migration and Natural Diffusion Tests, Part I: Comparison between Several Methods of Calculation, Materials and Structures, Vol. 33, No. 225, 2000, pp.21-28.
2. Atkins, P. W. and De Paula, J., Physical Chemistry, 8th edition, Oxford University Press, Oxford, 2006.
3. Broomfield, J. P., Steel Corrosion in Concrete, E & FN Spon, London, 1997.
4. Buenfeld, N. R., Newman, J. B., Page, C. L., The Resistivity of Mortar Immersed in Sea Water, Cement and Concrete Research, Vol. 16, 1986, pp.511-524.
5. Frederiksen, J. M., Sørensen, H. E., Andersen, A. and Klinghoffer, O., The Effect of the W/C Ratio on Chloride Transport into Concrete: Immersion, Migration, and Resistivity Tests, HETEK Report No. 54, Danish Road Directorate, 1997.
6. Gjorv, O. E., Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments, Taylor & Francis, New York, 2009.
7. Goni, S. and Andrade, C., Synthetic Concrete Pore Solution Chemistry and Rebar Corrosion Rate in the Presence of Chlorides, Cement and Concrete Research, Vol. 20, 1990, pp.525-539.
8. Hope, B. B., Ip, A. K. and Manning, D. G., Corrosion and Electrical Impedance in Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 15, 1985, pp.525-534.
9. Liu, Y., Suarez, A. and Presuel-Moreno, F. J., Characterization of New and Old Concrete Structures Using Surface Resistivity Measurements, Florida Department of Transportation Research Center, Final Report, Florida, 2010.
10. Millard, S. G. and Gowers, K. R., Resistivity Assessment of In-Situ Concrete: the Influence of Conductivity and Resistivity

-
- Layers, Proceedings of Civil Engineering Structures and Building, Vol. 94, 1992, pp.389-395.
11. Millard, S. G., Reinforced Concrete Resistivity Measurement Techniques, Proceedings of Civil Engineers, Part 2, Vol. 91, 1991, pp.71-78.
 12. Ngala, V. T. and Page C. L., Effect of Carbonation on Pore Structure and Diffusion Properties of Hydrated Cement Pastes, Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 7, 1997, pp.995-1007.
 13. Romer, M., Recommendation of RILEM TC 189-NEC, Non-destructive Evaluation of the Concrete Cover: Comparative Test - Part I - Comparative Test of Peneability Methods, Materials and Structures, Vol. 38, No. 284, 2008, pp.895-906.
 14. Simon, Tamas K. and Vass, V., The Electrical Resistivity of Concrete, Concrete Structures, 2012, pp.61-65.
 15. Tang, L., Nilsson, L. O. and Basheer, P. A. M., Resistance of Concrete to Chloride Ingress, Spon Press, London, 2012.
 16. Tuutti, K., Corrosion of Steel in Concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI), Stockholm, 1982.
 17. Van Breugel, K., Simulation of Hydration and Formation of Structures in Hardening Cement-Based Materials, Ph.D. Dissertation of Delft University of Technology, The Netherlands, 1991.
 18. Yoon, I. S., Kim, E. K. and Lee, C. S., "Material Modeling of Concrete for Chloride Diffusivity Considering Carbonation of Concrete", Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 27, No. 4-A, 2007, pp.617-625 (in Korean, with English Abstract).
- Received : 07/15/2013
Revised : 08/08/2013
Accepted : 08/12/2013

요 지

콘크리트의 전기저항은 염소이온 확산계수와 비교하여 빠르고 간단히 측정할 수 있기 때문에, 염소이온 확산계수를 제어하기 위한 간접적인 지표로서 활용될 수 있다. 전기저항은 해양구조물의 유지관리 전략을 수립하는데 매우 중요하다.

본 연구의 목적은 전기저항측정의 프로토콜을 설계하는 것이다. 본 연구는 염소이온과의 관계성을 토대로 콘크리트의 성능을 파악하는 중요한 비파괴 접근방법을 제시하였다. 수분, 공극량, 공극간 굴곡특성 등과 같은 미세구조 특성이 전기저항에 미치는 영향을 배합조건별 수화단계별로 고찰하였다. 전기저항과 염소이온 확산계수의 관계로부터 정규적인 전기저항의 측정을 토대로 염소이온 확산계수를 간접적으로 통제하는데 본 성과가 이용될 수 있다.

핵심 용어 : 전기저항, 염소확산계수, 미세구조 특성