

콘크리트의 탄산화가 전기저항에 미치는 영향

Influence of Carbonation of Concrete on Electrical Resistivity

윤인석^{1)*}

In-Seok Yoon

Abstract

Electrical resistivity of concrete can be measured in a more rapid and simple way for estimating durability of the concrete, however, carbonation causes a result of misleading for durability testing because carbonation leads to a significant reduction in the permeability and porosity of concrete.

The purpose of this study is to estimate and quantify the effect of carbonation of concrete on a surface electrical resistivity measurement. Samples of three mixes with difference w/c were prepared and exposed in a carbonation chamber for 330 days. The results show that carbonation leads high electrical resistivity. The increase is substantial and has been shown to be proportional to the extent of the carbonation by some extent. The relationship between electrical resistivity and carbonation depth is taken in the study. Resistivity ratio of carbonated concrete to air concrete decreased significantly from the specific carbonation depth, however, resistivity ratio of carbonated concrete to air concrete had a linear relation with carbonation depth.

From the relationship between electrical resistivity and carbonation depth, it is expected that the result should be subsequently used as a calibration curve for estimating carbonated concrete to overcome the interruption effect of carbonation on regular measurements of the electrical resistivity.

Keywords : Electrical resistivity, Carbonation, Durability, Micro-structure properties

1. 서론

콘크리트의 전기저항은 측정 실시간 콘크리트의 내구성을 평가할 수 있는 간편한 방법이다 (Gjørsv, 2009). 특히, 전기저항은 미세구조와 밀접한 관계가 있어서, 염소이온의 침투성을 판단할 수 있는 간접적 지표로서 활용될 수 있다 (Andrade et al., 2000; Tang et al., 2012). 콘크리트의 미세구조는 많은 공극고체의 프랙탈로 간주되는데, 공극량이 작은 콘크리트는 전기저항이 높고, 일정 수준이하의 공극량에서 공극량 대비 전기저항 수치가 민감하게 가파른 추이를 보인다 (Buenfeld et al., 1986). 또한, 전기저항은 철근부식과도 연관되는데 부식은 전기흐름이 애노드와 캐소드 구간내 콘크리트를 통해서 전류가 흐를 때 발생할 수 있기 때문에 콘크리트의 전기특성

은 철근부식에 영향을 미친다 (Hope et al., 1985; Frederiksen et al., 1997). 이미 저자의 기존연구에서 전기저항 측정의 장점을 제시하며 단점으로는 측정 결과에 영향을 미치는 많은 간섭인자를 지적한 바 있다 (Yoon, 2013). 또한, 전기저항을 정확히 측정하기 위한 가장 적절한 전처리 방법으로 콘크리트를 완벽히 포화상태에서 정련된 데이터가 획득됨을 제한한 바 있다 (Yoon, 2013; Liu et al., 2010).

전기저항에 영향을 미치는 요소중 콘크리트의 탄산화는 수중에 영구적으로 노출된 콘크리트를 제외하고 모든 구조물에 발생하는 필연적 현상으로서, 시간의 경과함에 따라 콘크리트 표면에서 내부로 진행된다. 콘크리트의 탄산화가 물성에 미치는 영향을 Table 1에 정리하였는데, 가장 중요한 것은 알칼리성을 상실시켜 철근부식을 유발한다는 점이 보

1) 정회원, 인덕대학교 건설정보공학과 교수, 교신저자

* Corresponding author : isyoon@induk.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2014년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Effect of carbonation on concrete durability

Effect	Consequences for durability of structures	Consequences for durability testing
Reduction of alkalinity	causes reinforcement corrosion	detected with phenolphthalein solution
Decrease in transport coefficients	causes carbonation rate to decrease. Reduction of chloride and sulphate transport is significant	Surface durability tests such as Initial Surface Absorption will give misleading indication of improved durability
Decrease in chloride adsorption	causes chloride adsorption to decrease. Risk of reinforcement corrosion is very severe.	Determined from ratio of total chloride content to free chloride content.
Decrease in electrical resistivity	questions	Measurements of resistivity and rest potential give misleading results. Reliability of electrical chloride migration tests could be affected
Shrinkage	can cause cracking	threaten durability, in particular, penetration of harmful substances through micro-cracks

편적으로 인식되어 왔다.

한편, 콘크리트의 탄산화는 공극량을 감소시켜 궁극적으로는 콘크리트 표면부와 염소이온 침투성, 공극률 및 흡수율을 감소시키는 결과를 초래한다 (Leber and Blakey, 1956; Ngla and Page, 1997; Dia, 2000). 따라서 표면에서 내부로 진행되는 탄산화는 콘크리트 표면에 전극을 접지시켜서 측정되는 전기저항에 당연히 영향을 미칠 수 밖에 없으므로 탄산화 진행에 따른 전기저항 데이터의 변화량과 추이를 관찰할 필요가 있다.

본 논문의 목적은 콘크리트의 탄산화가 진행됨에 따른 전기저항 변화의 특성을 고찰하는 것이다. 콘크리트의 물-시멘트비 및 양생조건을 다르게 하여 콘크리트 시험체를 제작하고 탄산화의 진행과 유관시켜 전기저항의 변화율을 관찰하였다. 본 연구를 기초로, 탄산화에 대한 영향을 보정할 수 있는 방법과 탄산화된 콘크리트의 전기저항의 해석방법에 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험방법

2.1 시험편의 제작 및 노출조건

보통포틀랜드 시멘트를 사용하여, Table 2와 같이 물-시멘트비 0.45, 0.50, 0.55의 수준에서 콘크리트를 배합한 후, 28일 동안 수중양생하였다. 이때 시험편의 크기는 100 × 100 × 200 mm이다.

Table 2 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

2.2 콘크리트의 탄산화

28일 동안 콘크리트 시험편을 표준양생하여 종료후, 탄산화가 전기저항에 미치는 영향을 고찰하고자 촉진조건을 조성하였는데 온도 20℃, 습도 65%, CO₂ 농도 5%의 촉진 조건에서 탄산화 촉진기를 가동시켰다. 탄산화 깊이는 1% 페놀프탈레인-알코올 용액을 콘크리트 파단면에 살포하고 버니어 캘리퍼스를 이용하여 측정하였다.

콘크리트의 탄산화는 칼슘성분이 CO₂에 의하여 탄산칼슘이 생성되는 현상으로서 탄산화 과정은 CO₂가 공극수내에서 해리되어 탄산을 형성하기 때문에 수분이 필요하며 과정에서도 수분이 형성된다. 따라서, 수분에 대한 영향을 무시하고 순수하게 탄산화로 인한 전기저항의 영향을 파악하기 위하여 탄산화된 콘크리트 시험편은 공극내 수분량의 영향을 배제하고자 포화상태로 가공하였다. 이때 시험편은 Fig. 1의 진공챔버에서 50 kPa 압력으로 3시간 동안 진공시키고 7시간 동안 물에 침지하여 완전포화상태를 유도하였다.



Fig. 1 Vacuum chamber

2.3 콘크리트의 전기저항

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 오음의 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 표면에 접지시켜 데이터를 획득하였다. 전기저항값은 시험편의 크기 및 형상에 따라서 바뀔 수 있는데, Table 3은 염소이온 침투율에 준한 전기저항의 기준치를 제시한 것이다.

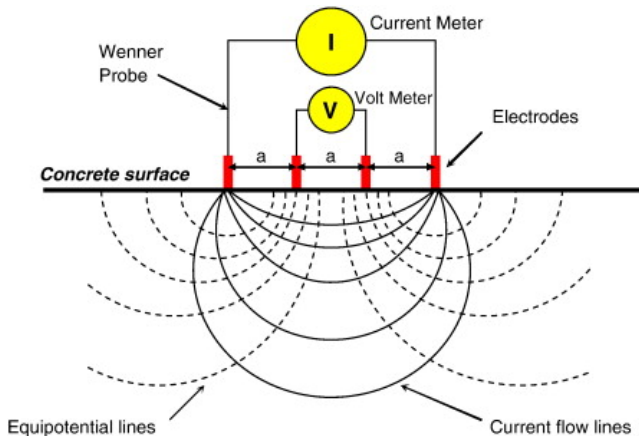


Fig. 2 Measurement of electrical resistivity in concrete

Table 3 Chloride ions penetrability (AASHTO TP 95)

Chloride ion penetrability	100mm × 200mm Cylinder ($K\Omega \cdot cm$)	150mm × 300mm Cylinder ($K\Omega \cdot cm$)
High	< 12	< 9.5
Moderate	12 ~ 21	9.5 ~ 16.5
Low	21 ~ 37	16.5 ~ 29
Very low	37 ~ 254	29 ~ 199
Negligible	> 254	> 199

3. 결과 및 고찰

3.1 탄산화가 진행됨에 따른 콘크리트의 전기저항

Fig. 3은 시간 경과에 따른 콘크리트의 탄산화 깊이를 보인 그림이다. 물-시멘트비에 따라 뚜렷하게 탄산화의 진전을 확인할 수 있으며, 시간의 경과에 따라 진전속도는 다소 완만한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 탄산화된 콘크리트의 전기저항 측정치를 측정된 결과이다. 시간이 경과함에 따라 전기저항이 상승하는 경향을

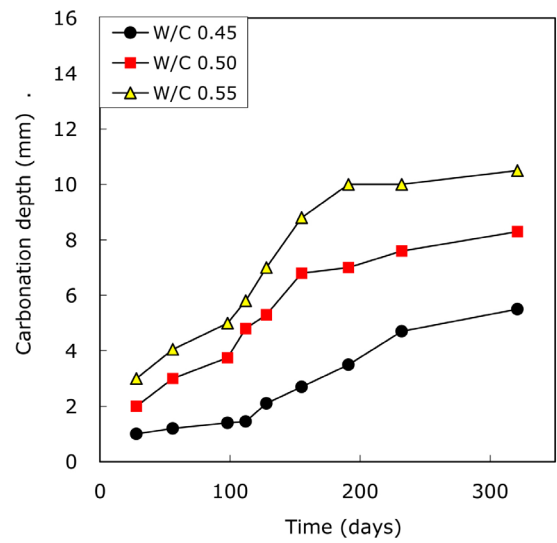


Fig. 3 Carbonation depth of concrete specimen

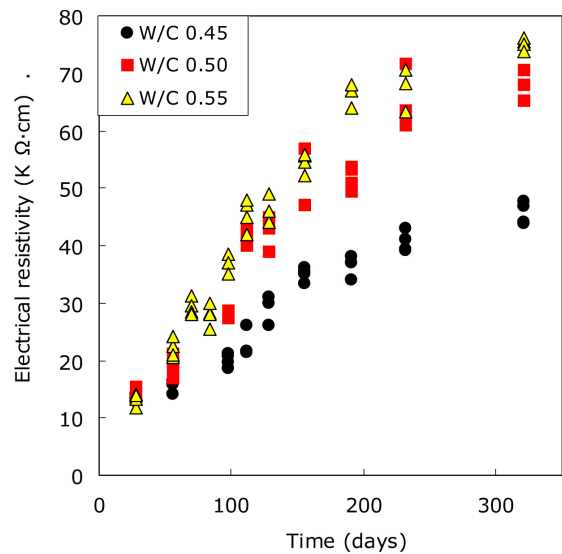


Fig. 4 Electrical resistivity of carbonated concrete

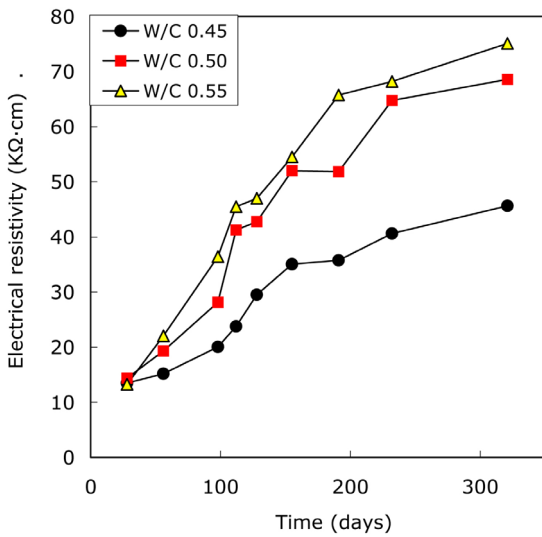


Fig. 5 Electrical resistivity of carbonated concrete (average value)

보였는데, 이는 탄산화로 인하여 치밀해진 공극구조 및 시간이 경과함에 따라 탄산화깊이가 더욱 진전되기 때문에 기인된 현상으로 사료된다 (De Ceukelaire and Van Niewwenburg, 1993). 또한, 시간이 경과됨에 따라 콘크리트의 수화도 향상으로 수화물의 생성 및 공극구조가 발현되어 전기저항이 지속적으로 상승하였기 때문이다 (Yoon, 2013). 초기재령에서는 전기저항치가 낮게 나타났으며, 물-시멘트비에 따른 차이도 뚜렷하지 않았으나 시간이 경과되면서 전기저항 측정치도 지속적으로 상승하되 완만한 추이를 보였다.

Fig. 5는 앞서 서술한 Fig. 4의 콘크리트 시험편당 4회의 측정 데이터를 평균화하여 보인 것이다. 탄산화되기전과 비교하여 탄산화된 후 콘크리트의 전기저항도 물-시멘트비에 따라 뚜렷한 추이를 보였다. 또한, 물-시멘트비 0.55와 0.50에 대비하여 물시멘트비 0.45가 뚜렷한 차이를 보였다. 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 모든 시험체가 약 50일 재령이 경과하였을 때 이 수치를 초과하였다.

3.2 노출조건이 전기저항에 미치는 영향

Fig. 6은 본 연구에서 얻은 탄산화된 콘크리트 대비 기존 연구 (Yoon, 2013)된 기중노출된 비탄산화된 콘크리트의 전기저항과의 비율을 재령에 따라 보인 결과이다. 물-시멘트비와 무관하게 전 콘크리트에서 초기재령 128일까지 탄산화

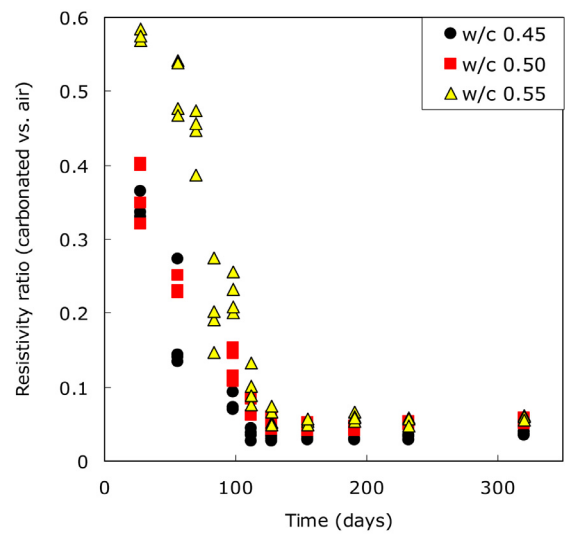


Fig. 6 Relationship between electrical resistivity ratio of carbonated concrete to air concrete with elapsed time

로 인하여 뚜렷하게 전기저항 비율이 감소하되, 128일을 경과하면서 일정한 추이를 보였다. 이는 기존 연구 (Yoon, 2013)에서 기중조건에서는 전기저항의 측정치가 100일 이후로 급격히 상승하는 것에서 기인된 결과이다. 기중조건을 포화조건과 비교하면, 100일 이전까지는 기중상태 전기저항 데이터의 폭이 비교적 작았으나, 100일이 경과하면서 전기저항 데이터가 기하급수적으로 상승하였다. 이러한 현상은 실험 종료되는 시점까지 계속되면서 탄산화 깊이와의 비율에서도 같은 추이를 보인 것으로 생각된다.

일반적으로 기중 및 현장에서 측정되는 전기저항은 실내 측정보다 더 큰 영향을 받는데, 특히 온, 습도에 의한 변동이 큰 것으로 알려졌다 (Millard, 1991; Millard and Gowers, 1992). Osterminski et al. (2012)이 행한 17년 장기폭로시험 결과에 의하면, 완전건조된 콘크리트는 절연체처럼 이온이나 전하의 이동을 실질적으로 불허하며, 반면 공극수내 충분한 수분은 전기저항을 크게 감소시킨다. 시멘트 경화체내 상대 습도 40% 수준까지의 수분은 비유동성을 가지며, 시멘트 페이스트의 내부표면에 강하게 부착된다. 일반적으로 수분량이 낮을수록 콘크리트의 통전성이 작아져서 전기저항이 커지는 것으로 알려져 있다. 또한, 탄산화는 콘크리트내 수분량에도 영향을 미치며 이는 전기저항 측정결과에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 기중조건에서 측정한 전기저항 측정 결과는 수분량이 적으므로 포화시킨 탄산화된 콘크리트 값보다 더 낮은 추이를 보인 것으로 판단된다. 그러므로 콘크리트의 전기저항은 탄산화로 인한 공극감소보다 수분량에 의해 더 큰 영향을 받는 것으로 추정된다.

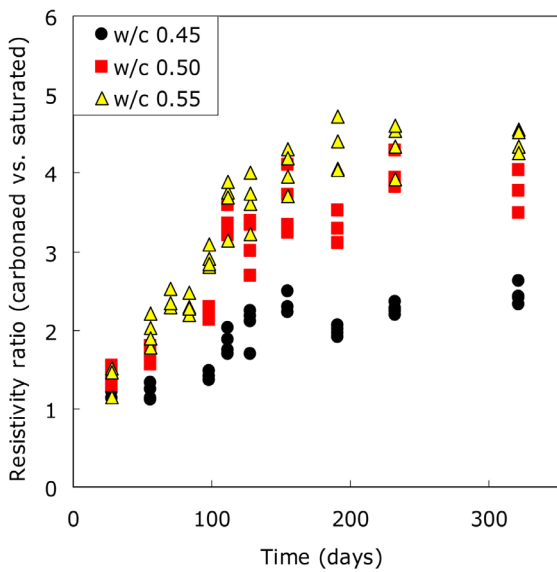


Fig. 7 Relationship between electrical resistivity ratio of carbonated concrete to saturated concrete with elapsed time

Fig. 7은 본 연구에서 얻은 탄산화된 콘크리트 대비 기존에 연구된 포화된 비탄산화된 콘크리트의 전기저항 (Yoon, 2013)과의 비율을 보인 결과이다. 물-시멘트비와 무관하게 모든 콘크리트에서 초기재령에서 전기저항 비율이 증가하되 장기재령으로 갈수록 일정한 추이를 보였다. 또한, 물-시멘트비에 따라 전기저항 비율의 대소가 뚜렷한 추이를 보였는데, 물-시멘트비가 클수록 전기저항 비율도 높게 나타났다. 이는 기존의 연구 결과와 대비할 때 탄산화로 인한 공극량 감소가 물-시멘트비가 높은 콘크리트일수록 뚜렷하게 발생한다는 연구결과와 상응한다 (De Ceukelaire and Van Nieuwenburg, 1993).

3.3 탄산화가 전기저항에 미치는 영향

Fig. 8은 탄산화된 콘크리트와 기존 연구 (Yoon, 2013)의 기중노출된 콘크리트의 전기저항 비를 탄산화 깊이와 관계하여 보인 그림이다. 기중보다 탄산화된 상태에서 콘크리트의 전기저항이 더 높을 것으로 추정되나, 본 연구에서는 탄산화된 콘크리트를 전기저항 측정의 표준상태인 포화상태로 유도하여 기중상태 콘크리트보다 전기저항 값이 더 낮은 것으로 생각된다. 탄산화 깊이에 따른 기중 콘크리트 대비 탄산화 콘크리트의 전기저항 비율은 물-시멘트비에 따라서 구분되는 추이를 보였는데, 물-시멘트비 0.45인 콘크리트는 1.5 mm, 0.50인 콘크리트는 5 mm, 0.55인 콘크리트는 7 mm의

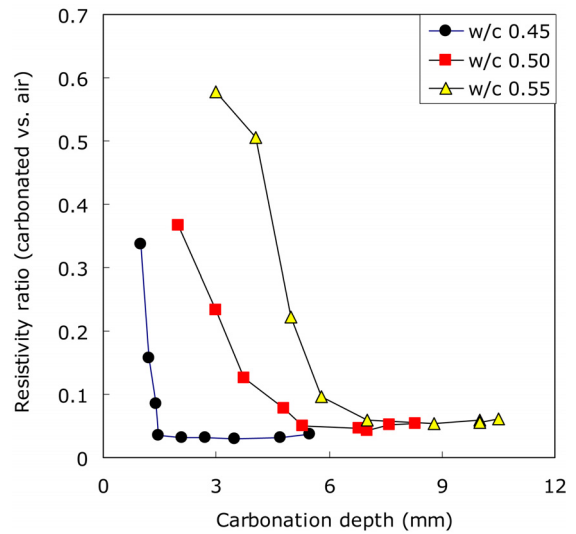


Fig. 8 Relationship between electrical resistivity ratio of carbonated concrete to air concrete and carbonation depth

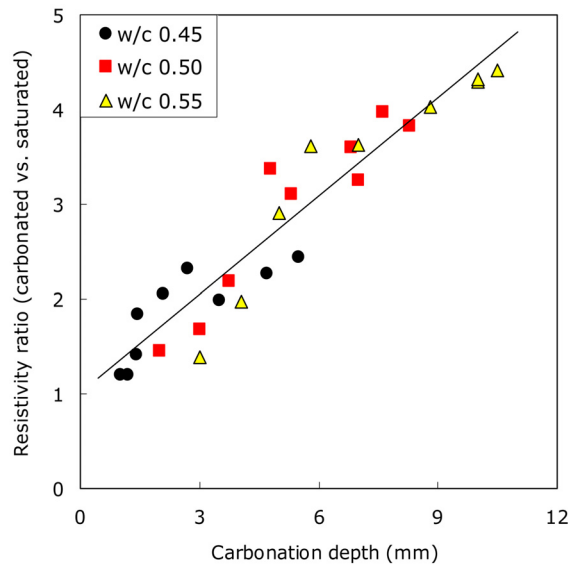


Fig. 9 Relationship between electrical resistivity ratio of carbonated concrete to saturated concrete and carbonation depth

탄산화깊이 이전까지는 급격하게 전기저항비가 감소하였고 이를 초과하면서는 일정한 추이를 보였다.

Fig. 9는 탄산화된 콘크리트와 비탄산화된 콘크리트의 전기저항 비를 탄산화 깊이와 관계하여 보인 결과이다. 탄산화가 전기저항에 미치는 요인은 크게 두가지로 생각할 수 있다. 첫째는 탄산화로 인한 공극률 감소로 콘크리트의 전도성이 감소될 수 있다 (Simon and Vass, 2012). 둘째는 탄산화로 인하여 시멘트 경화체내 전하량 이동의 주된 통로인 OH⁻

농도가 감소되어 전도성이 약화되고 궁극적으로 전기저항이 높아지는 결과를 초래할 수 있다 (Claisse, 1988). 본 연구에서는 물-시멘트비와는 무관하게 모든 콘크리트에서 탄산화로 인하여 전기저항 비가 선형으로 상승하는 현상을 보였다. 즉, 탄산화 깊이가 3 mm ~ 6 mm 수준으로 미소하게 진행되었어도 전기저항은 약 2 ~ 3배 상승하였다. 이를 회귀식으로 도출한 것이 식 (2)로서 이때 결정계수 0.90의 수준이었다. 이 식은 포화상태에서 탄산화된 콘크리트의 전기저항을 보정하는데 의미 있을 것으로 생각된다.

$$\frac{\rho_c}{\rho_{sat}} = 0.357 \cdot d_c + 0.962 \quad (2)$$

여기서, ρ_c : 포화상태에서 탄산화된 콘크리트의 전기저항 ($K\Omega \cdot cm$),

ρ_{sat} : 포화상태에서 비탄산화된 콘크리트의 전기저항 ($K\Omega \cdot cm$),

d_c : 탄산화깊이 (mm)이다.

4. 결론

- (1) 탄산화된 콘크리트의 전기저항은 시간이 경과함에 따라 전기저항이 상승하는 경향을 보였는데, 이는 탄산화로 인하여 치밀해진 공극구조의 영향과 콘크리트의 수화도가 진행됨에 따라 기인된 현상이다. 특히, 시간이 경과되면서 이러한 현상은 지속적이며 뚜렷한 추이를 보였다.
- (2) 탄산화된 콘크리트와 기중노출된 콘크리트의 전기저항 비를 탄산화 깊이와 관계한 결과, 탄산화와 기중 콘크리트간의 전기저항 비율은 일정한 탄산화 깊이까지 뚜렷히 감소하였지만 이를 초과하면서는 일정한 추이를 보였다.
- (3) 물-시멘트비와는 상관없이 모든 콘크리트에서 탄산화로 인하여 전기저항 비가 크게 상승하였다. 탄산화 깊이가 커지면서 전기저항은 선형으로 상승하는 추이를 보였다. 따라서, 탄산화가 진행된 구조물은 탄산화 깊이가 작더라도 전기저항 측정시 큰 영향을 받을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 인덕대학교 교내 학술연구에 의하여 수행한 것으로 이에 감사드립니다.

References

1. AASHTO TP 95 (2011), Standard Method of Test for Surface Resistivity of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
2. Andrade, C., Castellote, M., Alonso, C., and Gonzalez, C. (2000), Nonsteady-State Chloride Diffusion Coefficients Obtained from Migration and Natural Diffusion Tests, Part I: Comparison between Several Methods of Calculation, *Materials and Structures*, 33(225), 21-28.
3. Broomfield, J. P. (1997), *Steel Corrosion in Concrete*, E & FN Spon, London.
4. Buenfeld, N. R., Newman, J. B., Page, C. L. (1986), The Resistivity of Mortar Immersed in Sea Water, *Cement and Concrete Research*, 16, 511-524.
5. Clisse, P. A. (1988), Properties and Performance of High Strength Silica Fume Concrete, Ph.D. Thesis, University of Leeds, UK.
6. De Ceukelaire, L., and Van Nieuwenburg, D. (1993), Accelerated Carbonated of a Blast Furnace Cement Concrete, *Cement and Concrete Research*, 23, 442-452.
7. Dias, W. P. S. (2000), Reduction of Concrete Sorptivity with Age through Carbonation, *Cement and Concrete Research*, 30, 1255-1261.
8. Frederiksen, J. M., Sørensen, H. E., Andersen, A., and Klinghoffer, O. (1997), The Effect of the W/C Ratio on Chloride Transport into Concrete: Immersion, Migration, and Resistivity Tests, HETEK Report No. 54, Danish Road Directorate.
9. Gjov, O. E. (2009), *Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments*, Taylor & Francis, New York.
10. Hope, B. B., Ip, A. K., and Manning, D. G. (1985), Corrosion and Electrical Impedance in Concrete, *Cement and Concrete Research*, 15, 525-534.
11. Leber, I., and Blakey, F. A. (1956), Some Effects of Carbon Dioxide on Mortars and Concrete, *Journal of American Concrete Institute*, 53, 295-308.
12. Liu, Y., Suarez, A., and Presuel-Moreno, F. J. (2010), Characterization of New and Old Concrete Structures Using Surface Resistivity Measurements, Florida Department of Transportation Research Center, Final Report, Florida.
13. Millard, S. G. (1991), Reinforced Concrete Resistivity Measurement Techniques, *Proceedings of Civil Engineers*, Part 2, 91, 71-78.
14. Millard, S. G., and Gowers, K. R. (1992), Resistivity Assessment of In-Situ Concrete: the Influence of Conductivity and Resistivity Layers, *Proceedings of Civil Engineering Structures and Building*, 94, 389-395.
15. Ngala, V. T., and Page C. L. (1997), Effect of Carbonation on Pore Structure and Diffusion Properties of Hydrated Cement

Pastes, Cement and Concrete Research, 27(7), 995-1007.

16. Ostermiski, K., Polder R. B., and SchieBl, P. (2012), Long Term Behavior of the Resistivity of Concrete, HERON, 57, 211-230.

17. Simon, Tamas K., and Vass, V. (2012), The Electrical Resistivity of Concrete, Concrete Structures, 61-65.

18. Tang, L., Nilsson, L. O., and Basheer, P. A. M. (2012), Resistance of Concrete to Chloride Ingress, Spon Press, London.

19. Yoon, I. S. (2013), Influence of Micro-Structural Characteristics

of Concrete on Electrical Resistivity, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 17(6), 122-129 (in Korean, with English Abstract).

Received : 01/29/2014
 Revised : 03/03/2014
 Accepted : 03/06/2014

요 지

전기저항은 콘크리트의 내구성을 판단하기 위하여 빠르고 간단히 측정하여 활용될 수 있으나, 탄산화가 진행되면 콘크리트의 미세구조가 크게 변화하기 때문에 측정의 오차를 초래한다.

본 연구의 목적은 콘크리트의 탄산화가 전기저항에 미치는 영향을 분석하고 정량화 하는데 있다. 다양한 물시멘트비 조건에서 시험편을 제조하여 330일동안 탄산화 촉진을 시키면서 전기저항의 변화율을 고찰하였다. 탄산화된 콘크리트에서 전기저항 측정치가 높은 것으로 나타났다으며, 이러한 경향은 탄산화가 진행됨에 따라 더욱 뚜렷한 경향을 보였다. 전기저항과 탄산화깊이와의 상관관계를 도출하였으며, 기중 상태 대비 탄산화된 콘크리트의 전기저항 비율은 일정한 탄산화깊이까지는 급격히 낮아지는 경향을 보였으나, 포화상태 대비 탄산화된 콘크리트의 전기비율은 탄산화 깊이와 선형관계를 보였다. 본 연구를 토대로 탄산화로 인하여 전기저항치의 측정오차를 보정할 수 있는데 실질적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심 용어 : 전기저항, 탄산화깊이, 내구성, 미세구조 특성