



시멘트 모르타르의 수분변화에 따른 평균화된 전자기 특성에 대한 실험적 연구

권성준¹⁾ · Maria, Q. Feng¹⁾ · 나웅진^{2)*}

¹⁾University of California, Irvine ²⁾국토해양부

An Experimental Study on Characteristics of Averaged Electromagnetic Properties considering Moisture Changes in Cement Mortar

Seung-Jun Kwon,¹⁾ Maria, Q. Feng,¹⁾ and Ung-Jin Na^{2)*}

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of California Irvine, Irvine CA 92697, USA

²⁾Busan Port Construction Office, Ministry of Land, Transport and Maritime affairs, Busan 601-726 Korea

ABSTRACT Many researches on electromagnetic (EM) properties like dielectric constant and conductivity are performed since they can be characterized in nonmetallic cement-based material such as mortar and concrete. However, they are much affected by the moisture so that the behaviors of EM properties are to be clearly understood. In this paper, measurements for saturation and EM properties are performed for cement mortar specimens with five different water to cement (W/C) ratios including basic tests like compressive strength and porosity measurement. Every saturated specimens are exposed to room condition and the changes in EM properties caused by decreasing saturation are analyzed. In the saturated condition, higher measurement of EM properties are evaluated in the specimens with higher porosity, however this relationship is adversely changed with drying process. Since the pores without filled water causes the decreases in EM properties, the measurements show stable and linear increment with the lower W/C ratios. Furthermore, the increasing ratios of EM measurements with W/C ratio are shown with saturation and the relationships between them are derived through regression analysis.

Keywords : electromagnetic properties, dielectric constant, conductivity, porosity, saturation

1. 서 론

콘크리트는 다공질 매체로서 공극률을 가지게 되고 노출환경에 따라 수분을 포함하게 된다. 또한 콘크리트 내의 공극률은 배합조건에 따라 민감하게 결정되며, 양생 방법, 노출환경 등에 따라 변화하게 된다.^{1,2)} 콘크리트에 존재하는 공극률과 수분은 외부의 유해이온(염화물, 이산화탄소)이 저장될 수 있을 뿐 아니라, 내부로 침투하게 되는 주된 통로가 되므로 많은 열화해석 모델에서 주요한 인자로 고려되고 있다.³⁻⁵⁾

비파괴 기술(non-destructive technique : NDT)은 구조물에 손상을 거의 입히지 않으며, 육안으로 확인이 불가능한 영역까지도 성능을 평가할 수 있으므로 RC 구조물(reinforced concrete)의 역학적 또는 내구적 성능평가에 많이 사용되고 있다.⁶⁾ 특히 전자기 특성을 이용한 비파괴 기술은 콘크리트 손상 및 기포의 탐지에 많이 사용

되고 있다.⁶⁻⁸⁾ 전자기 특성을 콘크리트와 같은 시멘트계 재료에 직접적으로 적용할 수 있는 가장 큰 기본 배경은 절연성 재료 내에서 전자기 측정값들이 특성화될 수 있기 때문이다.^{9,10)} 이미 다공질 매체를 통과하는 전자기 특성에 대해서는 수분의 특성을 고려한 모델링과 해석적 연구가 수행되었으나,^{8,11,12)} 배합특성이 고려되지 않았으며 단순히 공극률과 포화도의 관계를 이용하여 모델링되고 있다. 한편 이러한 모델링은 유전상수와 손실계수를 포함하는 복소함수를 이용해야 하므로, 사용이 매우 불편하다.

전자기를 이용한 비파괴 연구는 주로 시멘트 재료에 따라 변화하는 전자기 특성에 대한 연구가¹³⁻¹⁷⁾ 진행되고 있는데, 점차 실제 구조물에 적용하여, 성능변화를 평가하려는 기법(non-destructive evaluation : NDE)으로 변화하고 있다.^{7,8,18)} 경화하면서 변화하는 시멘트 특성을 평가하기 위해 전자기 특성들이 적용되기도 하였으며,^{13,19,20)} 최근에는 유리섬유로 보강된 콘크리트의 건전성 평가 또는 경화된 유리섬유와 콘크리트 표면의 박리 평가에도 적극적으로 사용되고 있다.^{10,21,22)} 공극률과 관련지어 콘크리트의 내구적 특성을 분석하려는 연구 역시 활발하게

*Corresponding author E-mail : conport@hanmail.net

Received November 9, 2008, Revised February 12, 2009

Accepted March 9, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

진행되고 있다.²³⁻²⁶⁾ 기존의 연구에서도 포화도의 영향을 고려하여 회귀분석을 수행하였으나,²⁷⁾ 이러한 연구는 단지 일정시간에서 일정한 포화도를 기준으로 전자기특성을 평가한 것이므로, 포화도에 따른 전자기특성을 대표하지 못한다.

본 연구는 5가지의 물-시멘트비를 가지는 시멘트 모르타르 시편에 대하여 공극률과 포화도를 분석하고 각 포화단계에 따른 전자기 특성 변화를 분석한 것이다. 수분의 변화 또는 물-시멘트비의 변화에 따라 전자기 특성이 변화하는 것에 대한 연구는 이미 1970년대부터 많이 시도되어 왔으나, 단순한 측정값의 변화만을 도시하고 있을 뿐 정량적인 배합인자 또는 물리적인 특성치와의 비교 분석이 결여되어 있었다. 또한 광대역 주파수를 사용하지 않았으며, 일정구간의 저주파만 (1 GHz 이하)을 사용하므로, 주파수 변화에 따른 전자기 특성 (유전상수, 손실계수)의 변화를 나타내지 못하였다. 실제로 포화도는 가장 큰 영향인자인데, 이에 따라서 변화하는 전자기 특성을 정량적으로 제시한 연구는 희박하다고 할 수 있다.

이를 위하여, 서로 다른 물-시멘트비를 가진 시멘트 모르타르 시편을 수중에 침지시킨 후 (20°C), 변화하는 포화도에 따른 전자기 특성을 정량화하였으며, 배합특성인 물-시멘트비와의 비교를 수행하였다. 본 연구는 측정된 전자기 특성과 포화도, 배합특성, 그리고 공극률에 대한 정량적 비교가 수행될 것이며, 이를 이용한 비파괴 연구에 기본적인 정보를 제공할 것이다.

2. 시멘트 모르타르내의 전자기 특성화

모든 절연성 재료는 독립적인 두 가지 변수로 특성화될 수 있는데 복소 유전율 (ϵ^*)과 복소 투자율 (μ^*)로 구분되어 질 수 있다.⁹⁾ 물체의 유전율과 투자율의 실수부와 허수부를 구성하기 위해서는 일반적으로 4개의 독립적인 매개변수가 필요한데, 콘크리트의 투자율은 진공상태의 투자율 ($\mu_0: 4 \times 10^{-7}$ Henry/meter)과 거의 같게 되므로 복소유전율 (ϵ^*)은 식 (1)과 같이 나타내어 질 수 있다.^{9,10)}

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

여기서, ϵ' 은 복소유전율의 실수부를, ϵ'' 은 복소전도율의 허수부를, 그리고 $j = \sqrt{-1}$ 을 나타낸다. 진공중의 유전율 ($\epsilon_0: 8.854 \times 10^{-12}$ Farad/m)를 고려하면 식 (1)은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.¹⁰⁾

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} - j\frac{\epsilon''}{\epsilon_0} \quad (2)$$

여기서, ϵ_r^* 은 복소비유전율이고, ϵ_r' 은 유전상수 (dielectric constant)를, ϵ_r'' 은 손실계수 (loss factor)를 나타낸다. 식 (2)에서 나타난 실수부 허수부 인자는 매우 중요하게 평

가된다. 복소 비유전율의 실수부 ($\epsilon_r' > 1.0$)는 매질 내에서 어느 정도로 전자가 흡수되어지는 가를 나타내는 척도이며, 허수부 ($\epsilon_r'' > 0$)는 전자가 매질 내에서 어느 정도로 소산되어지는 가를 나타내는 척도이다 전도율 (conductivity : σ)는 복소 비유전율의 허수부를 포함한 함수로 나타나는데, 식 (3)과 같이 정의되어 진다.^{9,28)}

$$\sigma = \epsilon''\omega = (\epsilon_r'\epsilon_0 \tan \delta)(2\pi f) \quad (3)$$

여기서, σ 는 전도율 (mhos/m)을, ω 는 각속도 (rad/sec)를, $\tan \delta$ 는 유전체 손실탄젠트 (loss tangent)로서 매질내에서 소산된 에너지와 흡수된 에너지의 비를, f 는 주파수 (Hz)를 나타내고 있다.

이러한 전자기 특성은 일정한 것이 아니라, 주파수, 온도, 습도, 수분함유량, 염화물 이온량, 콘크리트의 배합비등에 따라 다르게 변화 한다.^{8,11)} 전자기 특성 (electromagnetic properties)의 범주에는 많은 변수들이 있지만, 본 논문에서 다루어지는 전자기 특성은 유전상수 및 전도율에 국한하여 설명하였다.

3. 실험 계획

3.1 실험의 개요

본 연구에서는 보통포틀랜드시멘트를 기본으로 5가지 물-시멘트비를 고려하여 시멘트 모르타르를 제조하였으며, 완전히 경화되었다고 가정할 수 있는 91일 재령 이상의 시편을 대상으로 전자기 측정을 수행하였다. Table 1에서는 본 실험에서 사용된 배합표를 나타내고 있다. 각 시편은 91일까지 수중양생 (20°C) 상태로 존치되었으며, 91일 이후 MIP (mercury intrusion porosimetry) 실험을 통한 공극률 평가, 중량측정을 통한 포화도 실험, 그리고 네트워크 분석기를 통한 전자기 측정을 수행하였다. 한편 재령 4주차에서는 공극률 평가와 압축강도 실험을 수행하였다. 압축강도 실험을 위해서 100 × 200 mm의 실린더 시편이 제조되었으며, 전자기 측정을 위해서 50 × 50 × 50 mm의 육면체 시편이 사용되었다. 전자기 측정을 위해서는 평면이 용이하므로 육면체 시편을 사용하였다.

Table 1 Mix proportions of cement mortar

W/C (%)	Cement (kg/25liter)	fine aggregate (kg/25liter)	Water (kg/25liter)	Flow (mm)
40	8.5	25	3.4	250
45	8.5	25	3.83	280
50	8.5	25	4.25	300
55	8.5	25	4.68	330
60	8.5	25	5.1	36

·Cement : sand = 1 : 3.125

·Physical properties of sand :

- Specific gravity (2.60 g/cm³)

- Absorption (= 1.05%), FM (= 2.65)

3.2 측정 장비의 개요 및 측정 방법

본 논문에서 사용된 장비는 Agilent 8722ES로서 개방형 동축선로 측정기 (open ended coaxial probe : OECP)를 이용하여 측정하였다. 네트워크 분석기는 0.2~20 GHz의 주파수 대역을 가지고 있으며, 0.4 GHz 간격으로 유전상수와 전도율을 평가할 수 있다. Fig. 1에서는 본 실험에서 사용된 장비의 구성을 나타내고 있으며, Fig. 2에서는 측정 장비 및 실험 모습을 사진으로 나타내었다.

OECP를 사용한 시스템에서의 보정은 그 특성이 잘 알려진 매질을 이용하여 수행하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 측정 전에 25°C의 물과 공기에 대해서 보정을 수행하였다. Fig. 3에서는 물과 공기에 대한 보정 결과를 나타내고 있다. 보정 결과는 기존의 보정 결과와^{9,10)} 거의 일치하는 보정값을 가지고 있었으며, Fig. 3에서는 본 연구에서 도출된 실험값만을 수록하였다.

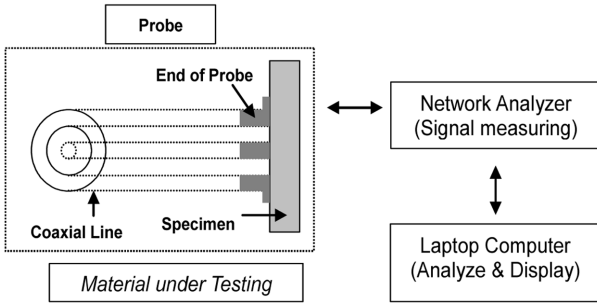


Fig. 1 Set-up and measurements of OECP^{10,26)}



Fig. 2 Photos for test

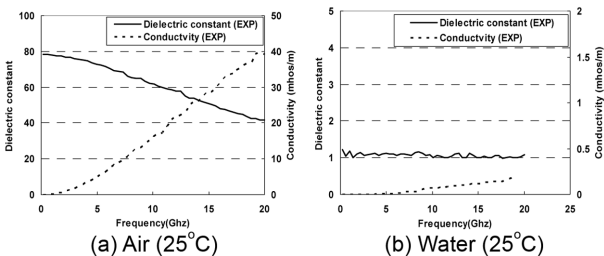


Fig. 3 Results of calibration

Table 2 Conditions for MIP test

Evacuation pressure	Evacuation time (min)	Mercury filling pressure (psia)	Contact angle (degrees)	Hg surface tension (dynes/cm)	Hg density (g/ml)
50 μmHg	5	1.27	130	485.0	13.5512

4. 포화도에 따른 전도율 및 유전상수

4.1 압축강도 및 공극률 평가

수중양생 4주차 이후에 측정된 압축강도는 Fig. 4와 같으며 물-시멘트비가 작아짐에 따라 증가하는 전형적인 압축강도 증가를 보이고 있었다. 공극률 측정을 위한 MIP 실험을 위해서 Table 2와 같은 조건이 준비되었으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 재령의 증가에 따라서 모든 시편에 대해서 공극률이 감소하였는데, 재령이 28일에서 91일로 증가함에 따라 공극률은 34~42% 수준으로 감소하였다. 최종적으로 평가된 91일 재령시의 공극률은 4.3 절에서 수행될 전자기 특성과 관련지어 진다. 재령의 증가에 따라 공극이 감소하는 것은 동일한 배합을 가진 콘 크리트로도 지속적인 수분과 온도의 공급에 따라 시멘트 입자의 수화도가 증가하고 이로 인해 내적 및 외적으로 팽창이 발생하기 때문이다.^{1,27)}

4.2 수분증발량 및 포화도 평가

포화도는 전자기적 특성에 가장 큰 영향을 주는 인자

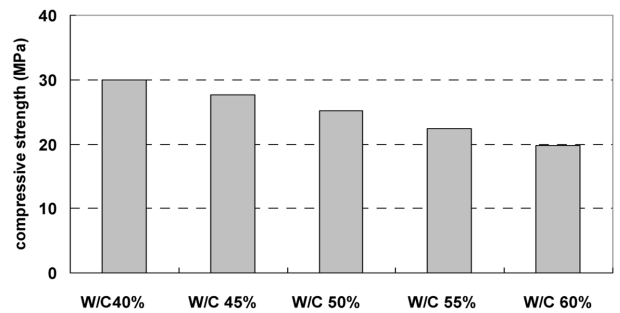


Fig. 4 Results for compressive strength

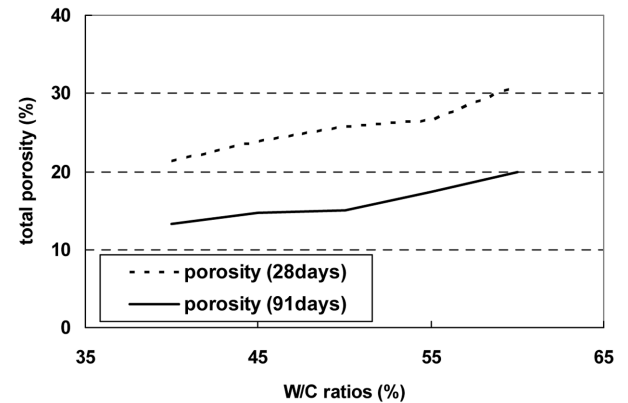


Fig. 5 Changes of total porosity with age

로 알려져 있다. 포화도 평가를 위해서 시간에 따른 수분증발량을 측정하였는데, 정육면체 시편 (50×50×50 mm) 을 수중에서 침지된 상태에서 꺼낸 뒤, 표면의 물을 닦아내고 바로 중량을 측정하였다. 절건 상태의 시편중량은 104°C 건조로에서 24시간 존치 후 중량을 측정하였으며, 식 (3)에 의해서 포화도를 계산하였다. 이후 각 시편은 실내상태 (온도 20~22°C, 상대습도 55~60%)에 존치하였으며, 존치시간 및 각 측정시의 중량이 측정하였다.

$$S = \frac{(W_{act} - W_{dry})}{(W_{sat} - W_{dry})} \times 100 \quad (4)$$

여기서, S는 포화도 (%), W_{act} 는 측정시의 무게, W_{sat} 는 포화상태의 무게, W_{dry} 는 절건건조상태에서의 중량을 나타낸다. 식 (4)를 통해 도출된 포화도는 시편전체에 대한 포화도를 나타내고 있지만, 표면과 시편 내부의 건조 상태가 다르므로 전자기 측정면에서 영향을 미치는 유효포화도와는 차이가 있다. 본 연구에서 사용된 OCEP의 유효깊이는 대략 5 mm 정도로 알려져 있는데,²⁸⁾ 얇은 시편을 이용할 경우 시편의 제도가 어려우며, 측정시 반대면의 영향을 받을 수 있다. 본 연구에서는 시편의 포화도를 측정면의 포화도로 가정하였다. Fig. 6에서는 건조 시간에 따라 변화하는 중량변화와 포화도의 변화를 나타내고 있다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, 물-시멘트비가 높을수록 공극이 많이 형성되고 그 안에 공극수가 많이 존재하게 되므로 건조에 따라 중량이 크게 차이가 나고 있다. 이러한 특성을 이용하여 중량차이를 이용한 확산계수의 평가 또는 공극률 평가 방법도 제시되어 있다.²⁹⁾ 이

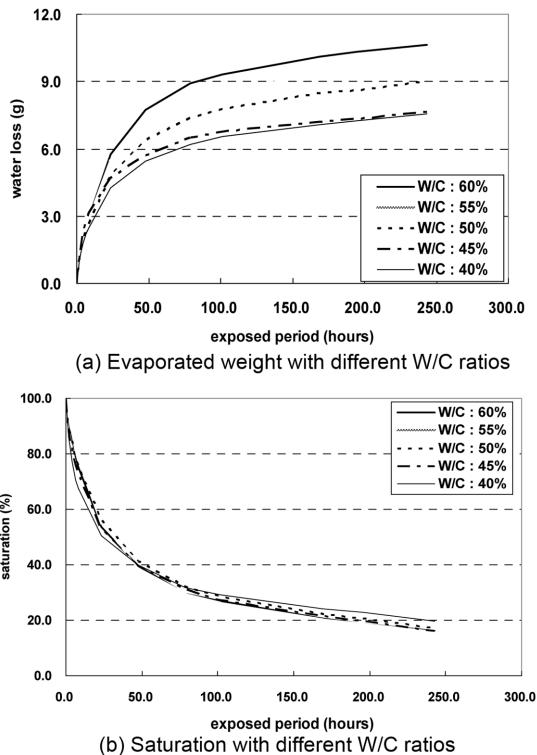


Fig. 6 Water loss and saturation with W/C ratios

러한 실험 결과는 기존에서 연구된 실험 결과와 동일한 경향을 보이고 있는데, 포화도의 경우 각 물-시멘트비의 경우에서 뚜렷한 차이를 보이지는 않았다. 그 이유는 수분증발량이 많은 시편은 공극에 따른 자유수를 많이 가지고 있으므로 그 비율이 거의 일정해지는 것으로 판단된다. 실제로 배합에 따라서 공극분포가 달라지며, 이에 따라 화학적 결합수 및 자유수가 변화하게 된다.^{1,2)} 또한 시편의 형태 (비표면적)에 따라서도 수분증발량이 다르게 평가되므로 이에 따라 포화도 역시 다르게 평가될 것이다. 수분 발산량과 포화도의 관계에 대해서는 좀 더 세밀한 분석이 요구되지만, 본 연구에서는 Fig. 5에 측정된 공극량에 기초한 차이만을 분석하였다.

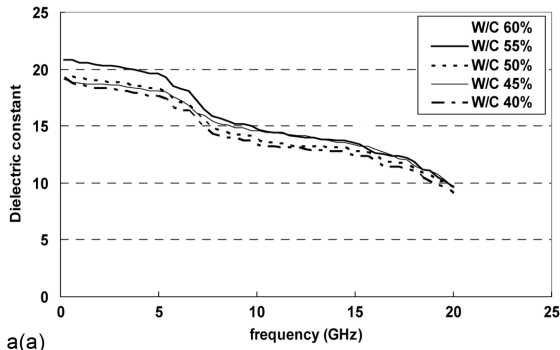
4.3 전자기 특성 평가

4.3.1 유전율 및 전도율 평가

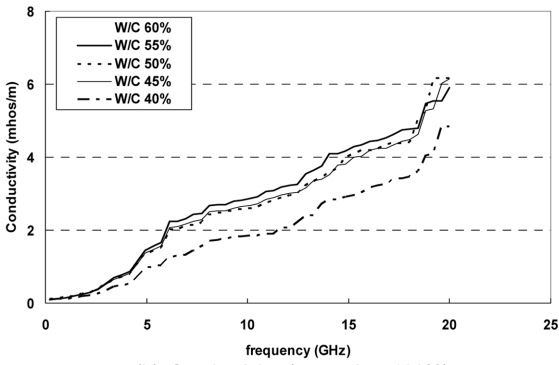
본 절에서는 서로 다른 물-시멘트비를 가지는 시편에 대하여 측정된 유전상수 및 전도율을 평가하도록 한다. OPEP를 사용하여, 전자기 특성을 측정하기 위해서는 시편의 표면이 일정하게 처리되어야 한다. 완전치 밀착되지 않는 부분이 있을 경우 매우 작은 값이 측정되므로, 본 연구에서는 측정면을 그라인더로 처리하여 표면을 매끄럽게 하였다. 각 시편은 하나의 면에 대하여 5번을 측정하였으므로 총 30회에 대한 평균값이 하나의 시편을 대표하게 된다. 일반적으로 전도율의 경우는 주파수가 커질수록 증가하고 유전상수의 경우는 감소하는 것으로 알려져 있다. 대표적으로 포화도 100%인 경우와 240시간 경과 후 포화도가 20% 수준인 경우에 대한 전자기 측정 결과를 Fig. 7에 나타내었는데, 기존의 실험 결과와 동일한 경향을 보이고 있다.^{9,10,26,27)}

Fig. 7에서와 마찬가지로 포화도가 감소함에 따라 유전상수와 전도율이 매우 크게 감소하고 있음을 알 수 있다. 실제로 0.2 GHz에서 고체상의 수화물 (콘크리트)의 유전상수는 대략 5~8정도로 알려져 있는데, 이 값은 물의 유전상수인 78인 경우에 비해 매우 작은 수준이다. 콘크리트와 같은 다공성 매체가 물에 포화되어 있을 경우, 전자기 특성은 크게 증가하게 되는데 이는 배합마다 차이가 있을 수 있다.^{8,11)} 기존의 실험값에서¹¹⁾ 공극률이 0.15이고, 포화도가 100%가 되었을 때 포화도가 0%인 상태에 비해서 2.4배의 유전상수의 증가를 나타내고 있다. 한편 표면이 포화이상으로 수분을 가지고 있을 경우 유전상수와 전도율은 각각 5배와 10배 이상 증가한 실험 결과를 기존의 연구에서 확인할 수 있다.¹⁰⁾

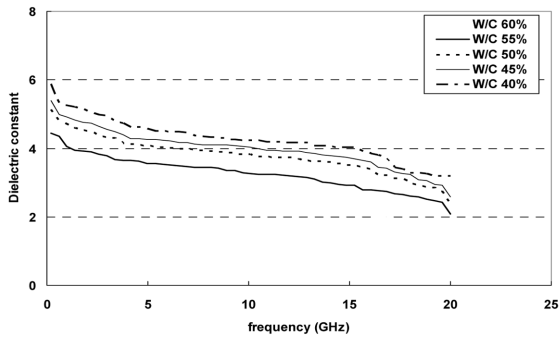
흥미로운 것은 포화상태에서는 물-시멘트비가 낮은 시편에서 최소값이 측정되었으나, 건조가 진행됨에 따라 물-시멘트비가 높은 시편에서 최소값이 측정되었다. 그 이유는 초기상태 (포화상태)에서는 공극률이 큰 시편에 수분이 더 많이 포함되어 있으므로 수분의 영향에 의하여, 유전상수 및 전도율이 증가하는 것으로 평가된다.



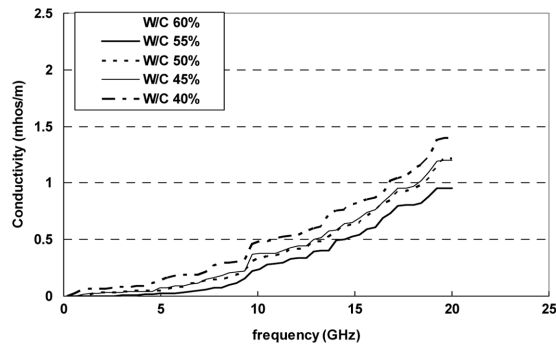
(a) Dielectric constant (saturation 100%)



(b) Conductivity (saturation 100%)



(c) Dielectric constant (saturation 20%)



(d) Conductivity (saturation 20%)

Fig. 7 Dielectric constant and saturation with different saturation

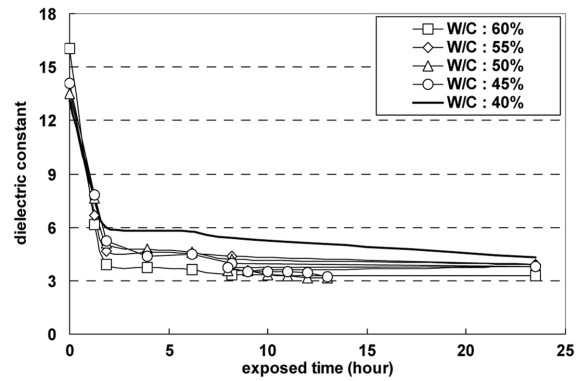
4.3.2 평균화기법을 통한 전자기 특성 평가

1) 물-시멘트비 및 공극률 따른 전자기특성의 변화 분석
본 연구에서 사용된 네트워크 분석기는 0.2에서 20 GHz까지의 전자기적 특성을 연속적으로 평가할 수 있다. 각 배합에 따른 특성을 평가하기 위해서 상대적으로 일정한 경향을 보이는 5~20 GHz 영역의 값을 하나의 평균값으

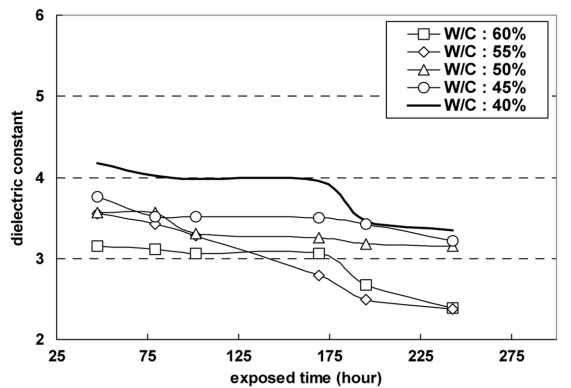
로 나타내었다. 하나의 주파수를 선정하여 해당하는 측정값을 이용하여 비교하게 될 경우 오차가 발생하면 전체적인 경향을 반영할 수 없으므로 측정 영역중 비교적 안정적인 영역 (5~20 GHz)의 38개 측정값의 평균을 도출한 것이다. 이러한 평균화 기법은 기존의 연구에서도 시도되었으며, 각 배합특성 또는 역학적 특성과 전자기 특성을 직접적으로 비교하는데 매우 편리하다.^{26,27,30,31)}

물-시멘트비의 변화에 따른 평균화된 전자기 특성은 Figs. 8 및 9와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 8에서는 유전상수의 변화를 24시간 이내 (a)와 이후 (b)로 분류하여, 노출시간에 따라 도시하였고, Fig. 9에서는 전도율의 거동을 24시간 이내 (a) 및 이후 (b)로 분류하여 도시하였다. 각 배합간의 측정값의 차이를 잘 나타내기 위해서 24시간 이후의 값은 로그 스케일로 도시하였다. 건조 후 3시간 이내의 값은 너무 차이가 많이 나며, 그 크기가 건조에 따라 변화되므로 일정하게 평가할 수가 없다.

그림에서 알 수 있듯이 건조 후 수 시간 이내에서는 뚜렷한 경향을 찾기가 어렵다. 그러나 24시간 경과 후에는 상대적으로 안정된 측정값의 변화를 보이고 있으며, 물-시멘트비가 낮은 배합에서 높은 유전상수 및 전도율을 보이고 있다. 이는 기존의 실험 결과와 같은 경향을 보이고 있는데, 표면이 건조해짐에 따라 높은 전자기 에너지를 흡수하려는 수분이 없어지면서 공극과 고체 수화물의 영향이 커지기 때문이다. Fig. 10(a)에서는 포화도의 변화에 따른 유전상수의 변화를, Fig. 10(b)에서는 포

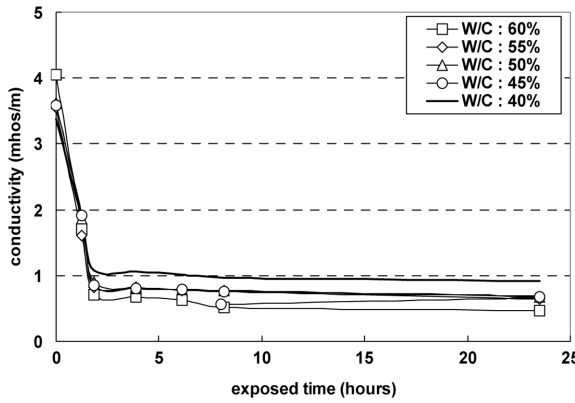


(a) Changes of dielectric constant with exposed time (less than 24 hours)

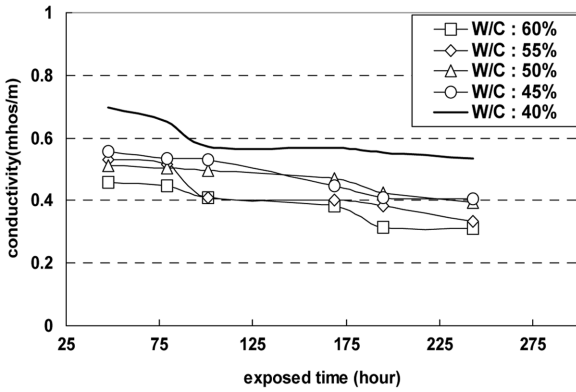


(b) Changes of dielectric with exposed time (longer than 24 hours)

Fig. 8 Averaged dielectric constant with W/C ratios

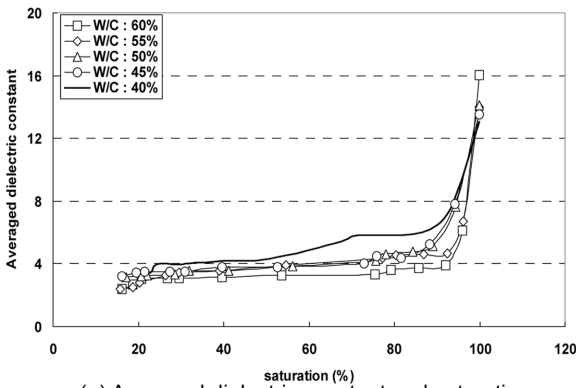


(a) Changes in conductivity with exposed time (less than 24 hours)

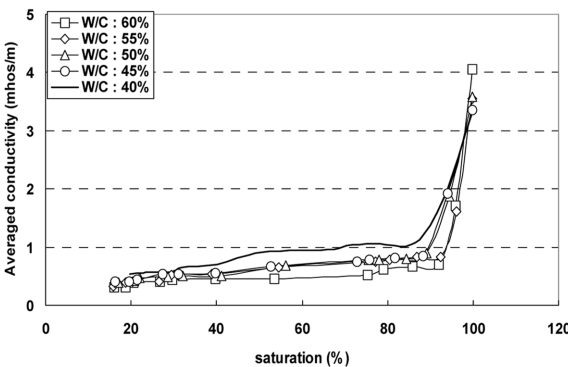


(b) Changes in conductivity with exposed time (longer than 24 hours)

Fig. 9 Averaged conductivity with W/C ratios



(a) Averaged dielectric constant and saturation



(b) Averaged conductivity and saturation

Fig. 10 Saturation and EM properties

화도의 변화에 따른 전도율의 변화를 나타내고 있다. 포화도가 85% 이하가 될 때 유전상수 및 전도율이 상대적으로 안정적인 범위를 가지고 있음을 알 수 있다.

24시간 이후의 측정된 값들을 하나의 값으로 평균하면 물-시멘트비에 따른 유전상수 및 전도율의 회귀분석을 수행할 수 있다. Fig. 11에서는 24시간 이후, 건조된 시편에 대하여 평균화된 전자기 특성을 선형 회귀분석결과와 함께 나타내었다. 식 (5) 및 (6)은 유전상수 및 전도율의 회귀분석 결과를 나타내고 있다. 회귀분석 결과 물-시멘트비의 증가에 따라서 전자기 특성은 높은 상관성을 가지며 선형으로 감소하고 있음을 알 수 있다.

$$A_D = -0.0455W/C + 5.6551, R^2 = 0.97 \quad (5)$$

$$A_C = -0.0107W/C + 1.035, R^2 = 0.89 \quad (6)$$

여기서, A_D 와 A_C 는 평균화된 유전상수 및 전도율이며, w/c 는 물-시멘트비 (%)를 나타낸다.

물-시멘트비는 배합시의 인자이므로, 실제로 물리적 의미를 가지고 있는 공극률과 전자기 특성과의 비교가 필요하다. Fig. 5에서 알 수 있듯이, 물-시멘트비의 증가에 따라서 공극률이 선형으로 증가하고 있으므로 공극률의 증가에 따라 전자기 특성이 선형적으로 감소할 것으로 예상할 수 있다. Fig. 12에서는 평균화된 유전상수 및 전도율과 공극률의 변화를 분석하였으며, 이를 식 (7) 및 (8)에 나타내었다. 도출된 결과 역시 상관성이 높은 선형 관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

$$A_D = -0.1318P + 5.5011, R^2 = 0.9048 \quad (7)$$

$$A_C = -0.0307P + 0.995, R^2 = 0.8125 \quad (8)$$

여기서, P 는 공극률 (%)을 나타낸다.

2) 포화도에 따른 전자기 특성의 변화 분석

포화도의 변화는 전자기 특성 평가에 있어서 가장 큰

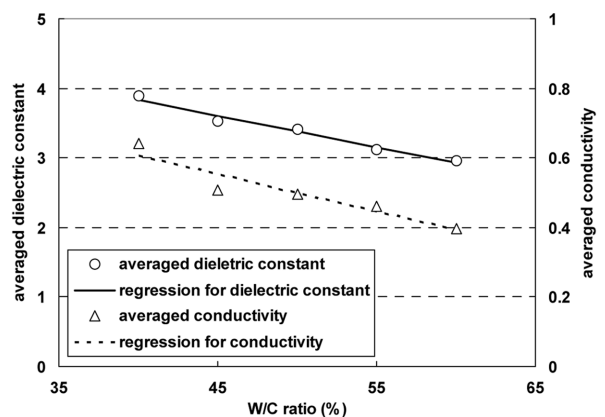


Fig. 11 Relationship between averaged EM properties and W/C ratios

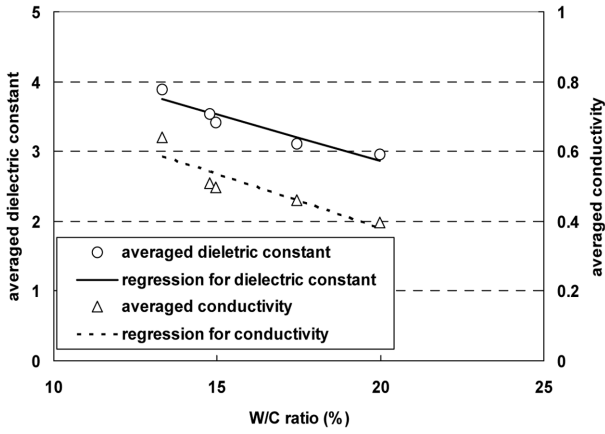


Fig. 12 EM properties and porosity

영향인자라고 할 수 있다. 포화도에 따라 변화하는 전자기 거동을 쉽게 나타내기 위하여, 평균화된 전자기 특성이 건조 상태에서 가장 크게 평가된 경우 (물-시멘트비 40%인 경우의 값)으로 정규화 시키면 물-시멘트비에 따른 정규화 된 유전상수를 Fig. 13과 같이 나타낼 수 있다.

한편 Fig. 13에서의 물-시멘트비에 따른 정규화된 유전상수의 변화비율이 선형이라고 가정한다면 이 기울기는 포화도에 따라 변화하게 된다. 선형으로 증감을 가정할 경우, 회귀분석 기울기를 포화도에 따라서 나타낼 수 있기 때문이다. 실제로 선형회귀분석에서도 상관계수 (R^2)는 0.60~0.95로 나타났다. 포화상태에서는 물-시멘트비가 높아질수록 유전상수의 값이 크므로 (+)의 기울기를 가지지만 이후 점차 작아지므로 건조가 진행됨에 따라 (-) 기울기를 가지게 된다. 이 기울기를 포화도에 따라 도시하면 Fig. 14와 같은 그림으로 나타낼 수 있고, 회귀분석 결과는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{GD} = -728(100 - S)^{0.171}, R^2 = 0.72 \quad (9)$$

여기서, Y_{GD} 는 물-시멘트비의 변화에 따른 정규화된 유전상수의 기울기, S 는 포화도 (%)를 나타낸다.

이와 같은 방법을 이용하면 포화도에 따라 변화하는

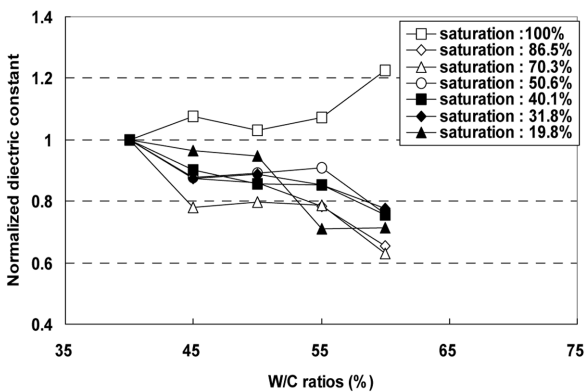


Fig. 13 Normalized dielectric constant ratios with W/C ratios and saturation

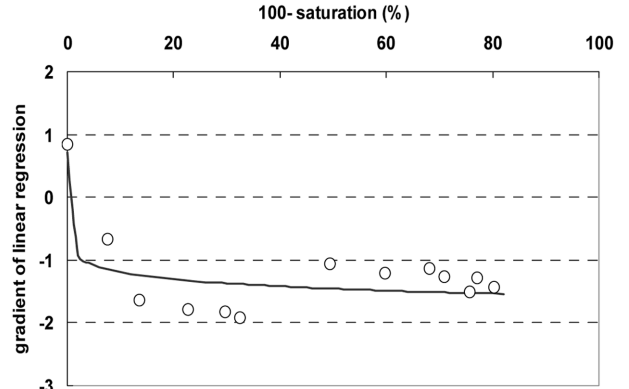


Fig. 14 Saturation and gradient of W/C ratios for dielectric constant

유전상수의 변화비율을 쉽게 분석할 수 있다. 동일한 방법으로 정규화 된 전도율과 물-시멘트비의 관계를 Fig. 15와 같이 도시할 수 있으며, 선형을 가정한 전도율의 증가비율과 포화도의 관계를 Fig. 16에 나타낼 수 있다. 한편, 포화도에 대하여 회귀분석을 수행한 결과는 식 (10)에 나타내었다.

$$Y_{GC} = -0.911(100 - S)^{0.197}, R^2 = 0.865 \quad (10)$$

여기서, Y_{GC} 는 물-시멘트비의 변화에 따른 정규화된 전

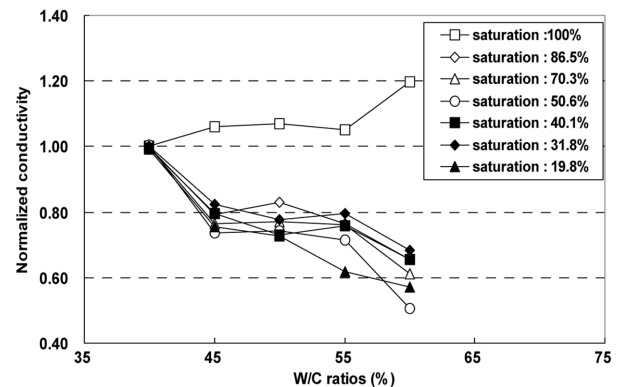


Fig. 15 Normalized conductivity ratios with W/C ratios and saturation

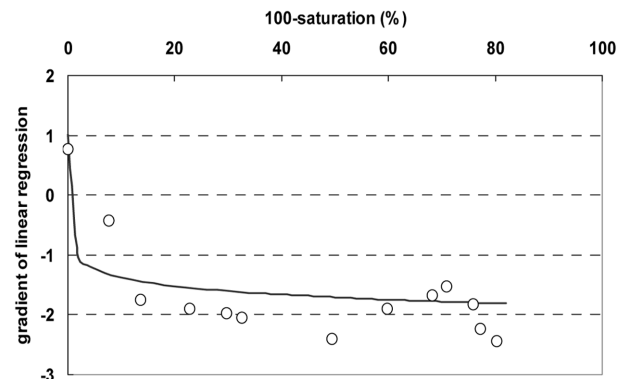


Fig. 16 Saturation and gradient of W/C ratios for conductivity

도율의 기울기, S 는 포화도 (%)이다. Figs. 14 및 16에서 포화도가 95% 이하로 감소할 경우, 전체적인 기울기가 (+)값을 가지고 있음을 알 수 있다.

본 연구는 시멘트 모르타르의 수분변화에 따른 평균화된 전자기 특성을 분석한 것이다. 측정된 전자기특성과 공극률과의 관계 그리고 수분영향에 따라 변화하는 전자기 거동은 콘크리트 시편의 특성파악에 도움을 줄 것으로 평가된다. 다양한 배합을 가진 시편에 대한 적용과 실 구조물에서 채취된 코어에 대한 적용이 이루어진다면, 표면의 수분측정 및 공극률 평가를 위한 비파괴기법으로 사용될 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 정량적인 평가를 위해, 5~20 GHz의 영역에서 측정된 유전상수 및 전도율을 각각 하나의 값으로 평균화하였으며, 이를 물-시멘트 및 공극률과 비교하였다. 전자기 특성은 물-시멘트비 및 공극률의 증가에 따라 선형적인 감소를 하였는데, 0.81~0.97의 높은 상관성 (R^2)을 보였다.
- 2) 실내상태에서 감소하는 포화도를 측정하였으며, 이에 따라 변화하는 전자기 특성을 평가하였다. 포화상태에서는 공극이 많은 시편 (물-시멘트비 60%)에서 전자기특성이 크게 평가되었으나 3시간 건조가 진행됨에 따라 물-시멘트비가 낮은 시편에서 전자기 특성이 크게 평가되었다. 높은 물-시멘트비에 상대적으로 많이 존재하는 자유수가 건조에 따라 유전상수 및 전도율이 감소한 것이다. 한편 포화도가 85% 이하로 감소할 경우, 측정된 전자기 측정값들은 일정수준으로 감소하였다.
- 3) 물-시멘트비에 따라 변화하는 전자기 특성 변화율을 도출하였으며, 이 변화율은 포화도에 따라 분석되었다. 각각의 측정값은 회귀분석을 통하여 지수함수로 도출하였는데, 도출된 결과는 포화도 95% 정도를 기점으로 물-시멘트비에 따른 전자기 특성 증가율이 (+)에서 (-)로 감소하는 것을 나타내고 있다.

감사의 글

이 논문은 2008년 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구 (이공분야: KRF-2008-357-D00266)로, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Maekawa, K., Chaube, R. P., and Kishi, T., *Modeling of Concrete Performance-hydration, Microstructure Formation and Mass Transport*, London and New York, Routledge, 1999, pp. 1~15.

2. Ishida, T., Chaube, R. P., and Maekawa, K., "Modeling of Pore Content in Concrete Under Generic Drying Wetting Conditions," *Concrete Library of JSCE*, Vol. 18, 1996, pp. 113~118.
3. Song, H. W., Kwon, S. J., Byun K. J., and Park, C. K., "Predicting Carbonation in Early-Aged Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, Issue 5, 2006, pp. 979~989.
4. Song, H. W. and Kwon, S. J., "Permeability Characteristics of Carbonated Concrete considering Capillary Pore Structure," *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, Issue 6, 2007, pp. 909~915.
5. 송하원, 권성준, 변근주, 박찬규, "혼화재를 사용한 고성능 콘크리트의 배합특성을 고려한 염화물 확산 해석기법에 관한 연구," *대한토목학회 논문집*, 25권, 1A호, 2005, pp. 213~223.
6. Glanville, J. and Nevile, A., "Prediction of Concrete Durability," *Proceedings of STAS 21st Anniversary Conference*, E&FN SPON, 1995, pp. 16~36.
7. Rhim, H. C., "Condition Monitoring of Deteriorating Concrete Dams Using Radar," *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001, pp. 363~373.
8. Halabe, U. B., *Condition Assessment of Reinforced Concrete Structures Using Electromagnetic Waves*, Doctoral thesis, Department of Civil Eng., MIT, Cambridge, 1990.
9. Rhim, H. C. and Buyukozturk, O., "Electromagnetic Properties of Concrete at Microwave Frequency Range," *ACI Materials Journal*, Vol. 95, 1998, pp. 262~271.
10. Rhim, H. C., Kim, Y. J., Feng, M. Q., Woo, S. K., and Song, Y. C., "Measurements of Electromagnetic Properties of Concrete and Fiber Reinforced Polymer for Nondestructive Testing," *US-Korea Joint Seminar/Workshop on Smart Structures Technologies*, Sheraton Walker Hill Hotel, Seoul, Korea, September 2, 2004, pp. 14~18.
11. Halabe, U. B., Sotoodehnia, A., Maser, K. R., and Kausel, E. A., "Modeling the Electromagnetic Properties of Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 90, 1993, pp. 552~563.
12. Feng, S. and Sen, P. N., "Geometrical Model of Conductive and Dielectric Properties of Partially Saturated Rocks," *Journal of Applied Physics*, Vol. 58, 1985, pp. 3236~3243.
13. McCarter, W. J., Chrisp, T. M., and Starrs, G., "The Early Hydration of Alkali-Activated Slag: Developments in Monitoring Techniques," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21, 1999, pp. 277~283.
14. McCarter, W. J., Chrisp, T. M., Starrs, G., and Blewett, J., "Characterization and Monitoring of Cement-Based Systems Using Intrinsic Electrical Property Measurements," *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, 2003, pp. 197~206.
15. McCarter, W. J., Starrs, G., and Chrisp, T. M., "The Complex Impedance Response of Fly-Ash Cement Revisited," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, pp. 1837~1843.
16. Neithalath, N., "Extracting the Performance Prediction of Enhanced Porosity Concrete from Electrical Conductivity Spectra," *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, 2007, pp. 796~804.
17. Soutsos, M. N., Bungey, J. H., Millard, S. G., Shaw, M. R., and Patterson, A., "Dielectric Properties of Concrete and Their Influence on Radar Testing," *NDT&E International*, Vol. 34, 2001, pp. 419~425.

18. Chrisp, T. M., McCarter, W. J., Starrs, G., Basheer, P. A. M., and Blewett, J., "Depth-Related Variation in Conductivity to Study Cover Zone Concrete During Wetting and Drying," *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, 2002, pp. 415~426.
19. Wittmann, F. H., "Micro Wave Absorption of Hardened Cement Paste," *Cement and Concrete Research*, Vol. 5, 1975, pp. 63~71.
20. Zhang, W., Ding, X. Z., Lim, T. H., Ong, C. K., Tan, B. T. G., and Yang, J., "Microwave Study of Hydration of Slag Cement Blends in Early Period," *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 5, 1995, pp. 1086~1094.
21. Kim, Y. J., Jofre, L., De Flaviis, F. D., and Feng, M. Q., "Microwave Reflection Tomography Array for Damage Detection of Concrete Structures," *Proc of IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium Digest*, Seattle, WA, June 2-7, 2002, pp. 651~654.
22. Feng, M. Q., Kim, Y. J., and De Flaviis, F. D., "Use of Microwaves for Damage Detection of FRP-Wrapped Concrete Structures," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 128, 2001, pp. 172~183.
23. McCarter, W. J., Starrs, G., and Chrisp, T. M., "Electrical Conductivity, Diffusion, and Permeability of Portland Cement-Based Mortar," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 2000, pp. 1395~1400.
24. Shi, C., Stegemann, J. A., and Caldwell, E. J., "Effect of Supplementary Cementing Materials on the Specific Conductivity of Pore Solution and Its Implications on the Rapid Chloride Permeability Test (AASHTO T277 and ASTM C1202) Results," *ACI Materials Journal*, Vol. 95, 1988, pp. 389~394.
25. Garboczi, E. J., Schwartz, L. M., and Bentz, D. P., "Modelling the D.C. Electrical Conductivity of Mortar," *Material Research Symposium Proc.*, Vol. 370, 1995, pp. 429~436.
26. 권성준, 나웅진, Feng, M. Q., "염화물을 혼입한 OPC 모르타르의 전자기적 특성에 대한 연구," 대한토목학회 논문집, 28권, 4A호, 2008, pp. 565~71.
27. 권성준, 송하원, Feng, M. Q., "양생조건에 따른 초기재령 시멘트 모르타르의 전자기 특성에 대한 실험적 연구," 대한토목학회 논문집, 28권, 5A호, 2008, pp. 737~746.
28. 임홍철, 정성훈, "비파괴 시험을 위한 콘크리트의 유전상수의 측정," 콘크리트학회 논문집, 12권, 3호, 2000, pp. 115~123.
29. 오병환, 정상화, 이명규, "공극률을 고려한 콘크리트중의 이산화탄소 확산특성에 대한 연구," 콘크리트학회 논문집, 15권, 3호, 2003, pp. 443~453.
30. Kwon, S. J., Feng, M. Q., Park, T. W., Glassman, J., and Na, U. J., "An Experimental Evaluation of Compressive Strength in Cement Mortar Using Electromagnetic Characterization," ASCE, International Committee, Los Angeles Section, *5th International Engineering and Construction Conference (IECC'5)*, August 27-29, 2008, pp. 433~441.
31. Kwon, S. J., Feng, M. Q., and Na, U. J., "An Experimental Study on Electromagnetic Properties in Chloride-Contaminated Cement Mortar," ASCE, International Committee, Los Angeles Section, *5th International Engineering and Construction Conference (IECC'5)*, August 27-29, 2008, pp. 673~680.

요 약 콘크리트 또는 시멘트 모르타르와 같은 비금속성 재료에서 유전상수와 전도율과 같은 전자기 평가는 특성화 될 수 있으므로 최근 들어 많은 연구가 수행되고 있다. 그러나 이러한 전자기 특성은 수분에 의하여 매우 큰 영향을 받으므로 이에 대한 전자기 거동이 명확하게 이해되어야 한다. 본 논문에서는 5가지 물-시멘트비를 가지는 시멘트 모르타르에 대하여, 포화도 및 전자기 특성 측정이 압축강도와 공극률 평가와 함께 수행되었다. 각각의 포화된 시편은 실내상태에 존치되었으며, 포화도의 변화에 따른 전자기 특성이 분석되었다. 포화상태에서는, 공극률이 높은 시편에서 높은 전자기 특성이 평가되었지만, 이러한 관계는 건조가 진행됨에 따라 반대로 평가되었다. 공극수가 없는 공극에서 전자기 특성이 감소되므로, 물-시멘트비가 낮아질수록 안정적이고 선형적인 전자기 특성 증가를 나타내었다. 한편, 물-시멘트비에 따른 전자기 특성 증가율이 포화도와 함께 제시되었으며, 회귀분석을 통하여 그 상관관계가 도출되었다.

핵심용어 : 전자기 특성, 유전상수, 전도율, 공극률, 포화도