

전자기 특성을 이용한 시멘트 모르타르의 압축강도 평가

김동백[†] · 권성준^{*}

한경대학교 토목공학과 · *얼바인 주립대학교 토목공학과
(2008. 3. 4. 접수 / 2008. 6. 10. 채택)

The Evaluation of Compressive Strength in Cement Mortar using Electromagnetic Properties

Dong-Baek Kim[†] · Seung-Jun Kwon^{*}

Department of Civil Engineering, Hankyong National University

^{*}Department of civil and Environmental Engineering, University of California, Irvine

(Received March 4, 2008 / Accepted June 10, 2008)

Abstract : NDT(Non-Destructive Testing Evaluation) using electromagnetic(EM) properties can be used for evaluation of physical performance in cement-based materials. In this study, a technique for strength evaluation in cement mortar is proposed through the measured EM properties(conductivity and dielectric constant). For this research, cement mortar specimens with 5 W/C ratios are made for evaluation of compressive strength and they are also utilized for tests of EM properties in the range of 0.2~20GHz frequency considering exposure condition and curing period. The averaged conductivity and dielectric constant in 5~20GHz frequency are reduced to 83~93% and 81~87%, respectively with increasing water to cement ratios. Through the linear regression analysis, relationships between EM properties and results from the compressive strength are obtained, which shows higher correlated factor(0.93~0.94) in the specimens exposed to room condition. The gradients in dielectric constant for strength results is measured to be higher than those in conductivity by 3.9~5.1 times. The results from dielectric constant in room condition shows the most efficient relation for evaluation of strength.

Key Words : electromagnetic properties, conductivity, dielectric constant, compressive strength, cement mortar

1. 서론

최근들어, 콘크리트와 같은 건설재료의 상태평가를 위하여, 비파괴 기법이(NDT : Non-Destructive Technique) 많이 이용되고 있다. 이러한 비파괴기법은 구조물에 손상을 거의 입히지 않으면서, 구조물의 구조적, 내구적 특성을 평가할 수 있으므로, 구조물 건전성 평가를 위하여 다양하게 이용되고 있다^{1,2)}. 특히 전자기 특성을 이용하여, 시멘트 건설재료(콘크리트, 모르타르)에 대한 연구가 진행되고 있는데 이는 시멘트 건설재료가 금속재료와는 다르게 절연성을 가지고 있으므로, 유전상수 및 전도율이 특성화될 수 있기 때문이다^{2,3)}. 전자기 특성을 이용하여 시멘트재료(콘크리트, 모르타르)를 연구하는 분야는 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫째,

전자기 특성화에 대한 연구는 기존에 많이 수행되어 왔으며⁴⁾, 최근에는 투수특성 또는 확산특성과 같이 내구적 특성과 연결되어 진행기도 한다⁵⁾. 이러한 연구는 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement 이하 OPC) 뿐 아니라 플라이애시 또는 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 특성화에 적용 된다^{6,7)}. 두 번째는 대상구조물의 모니터링기법이나 영향평가에 전자기 특성을 적용시키는 기법으로 분류할 수 있다⁸⁾. 이러한 기법은 콘크리트를 다공질체로 가정하여 공극을 고려한 전자기 모델링을 포함 한다^{2,9)}. 한편 콘크리트 부재 뿐 아니라 유리섬유복합체와 같이 보강된 부재에 전자기 특성을 적용하여 특성을 분석한 연구가 수행되기도 하였다^{10,11)}.

본 연구에서는 대상 시편을 시멘트 모르타르로 설정하였으며, 물-시멘트비(water to cement ratio, 이하 W/C)를 5가지로 분류하여 1,2 그리고 4주차 재

[†]To whom correspondence should be addressed.
dbkim@hknu.ac.kr

령에 따른 압축강도를 평가하였다. 콘크리트를 사용할 경우, 굵은 골재의 영향으로 인해, 측정값의 변화가 예상되므로 시멘트 모르타르를 사용하여 전자기 특성을 평가하였다. 동일한 조건에 노출된 시편에 대하여, 0.2~20GHz의 주파수 대역에 걸쳐서 전자기 특성을 평가하였는데, 노출환경에 따라 전자기 특성이 분석되었다. 또한 본 연구에서는 시멘트 모르타르의 재령, W/C, 전자기 특성간의 상관성이 분석될 것이며, 강도특성을 직접적으로 나타낼 수 있는 회귀 분석식을 도출하도록 한다. 전자기 특성을 이용한 시멘트 모르타르의 성능평가기법은 관련 실험 자료의 축적, 환경조건의 정량화 등에 대한 연구가 추가적으로 제공되면, 새로운 강도 평가기법으로 사용될 수 있을 것이다.

2. 유전상수 및 전도율

유전상수와 전도율은 전자기 특성(Electromagnetic properties, EM)을 대표하므로 많은 연구에서 이용되고 있다. 모든 절연성 재료는 독립적인 두 가지 변수로 특성화될 수 있는데 복소 유전율(ϵ^*)과 복소 투자율(μ^*)로 나타내어진다³⁾. 물체의 유전율과 투자율을 나타내기 위해서는 일반적으로 4개의 독립적인 매개변수가 필요한데, 콘크리트와 같은 절연재료의 경우, 투자율은 진공상태의 투자율($\mu_0 : 4 \times 10^{-7}$ Henry/meter)과 거의 같게 된다. 그러므로 복소 유전율(ϵ^*)은 식 (1)과 같이 나타내어 질 수 있다.

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

여기서 ϵ' 는 복소 유전율의 실수부를, ϵ'' 는 복소 유전율의 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^{3,11)}.

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

여기서, ϵ_r^* 는 복소 비유전율이고, ϵ_r' 는 유전상수(Dielectric constant)를, ϵ_r'' 는 손실계수(Loss factor)를 나타낸다. 복소 비유전율의 실수부($\epsilon_r' > 1.0$)는 매질내에서 어느 정도로 전자기파가 흡수되어지는가를 나타내는 척도이며, 허수부($\epsilon_r'' > 0$)는 전자기파 매질내에서 어느 정도로 소산되어지는가를 나타내는 척도이다³⁾. 전도율(conductivity : σ)은 복소 비유전율의 허수부를 포함한 함수로 나타나는데, 식 (3)

과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, σ 는 전도율(mhos/m)을, ω 는 각속도(rad/sec)를, $\tan \delta$ 는 loss tangent로서 매질 내에서 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 변화한다²⁾. 본 논문에서, 전자기 특성은 주어진 주파수대역에서 유전상수(Dielectric constant)와 전도율(Conductivity)로 정의하였다.

3. 시멘트 모르타르의 전자기파와 압축강도 실험

3.1. 실험계획

3.1.1. 시편의 제조

시편은 OPC 모르타르로 제조되었으며, 5가지 W/C (40%, 45%, 50%, 55%, 60%)를 가지도록 하였다. 각 시편들은 배합 후 3일간 기중양생을 수행하였으며, 이후 4주간 20°C의 온도에서 수중양생을 수행하였다. 대상 시편의 배합표와 골재특성은 Table 1에 나타내었다.

압축강도 실험을 위해서는 실린더 시편(10×20cm)이 사용되었고, 전자기특성을 평가하기 위해서는 직육면체 시편(8cm×15cm×4cm)형태의 시편이 사용되었다. 시멘트 모르타르의 강도 평가를 위해서는 입방체 시편이 주로 사용되지만, 최종적으로 콘크리트의 강도 평가를 위해서는 실린더 몰드가 사용되므로 본 연구에서는 콘크리트의 강도 평가와 같은 시편이 사용되었다. 본 연구의 기존의 연구에 의하면 두께는 5mm 이상의 모르타르 시편의 경우, 반사되는 전자파와의 간섭은 없는 것으로 평가되었으므로 본 실험에서의 사용된 시편의 두께는 충분하다고 할 수 있다¹²⁾.

Table 1. Mix proportions and characteristics of sand (C : S = 1 : 3.125)

W/C(%)	Cement(kg/25liter)	Sand(kg/25liter)	Water(kg/25liter)
40	8.5	25	3.4
45	8.5	25	3.83
50	8.5	25	4.25
55	8.5	25	4.68
60	8.5	25	5.1

Physical properties of aggregate :

- Specific gravity(=2.60g/cm³) - Absorption(=0.95%), F.M.(=2.64)

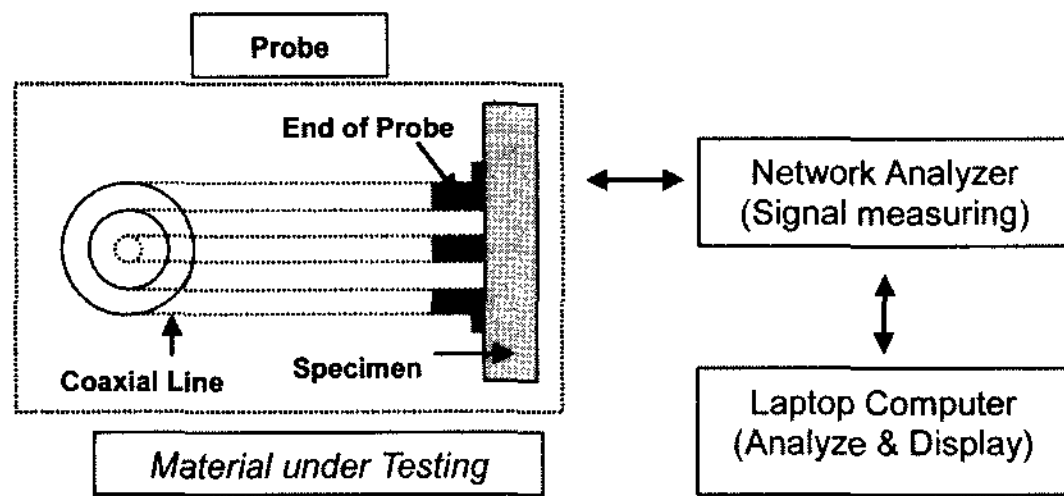


Fig. 1. Set-up of OECP and measurements.

3.1.2. 측정장비의 set-up

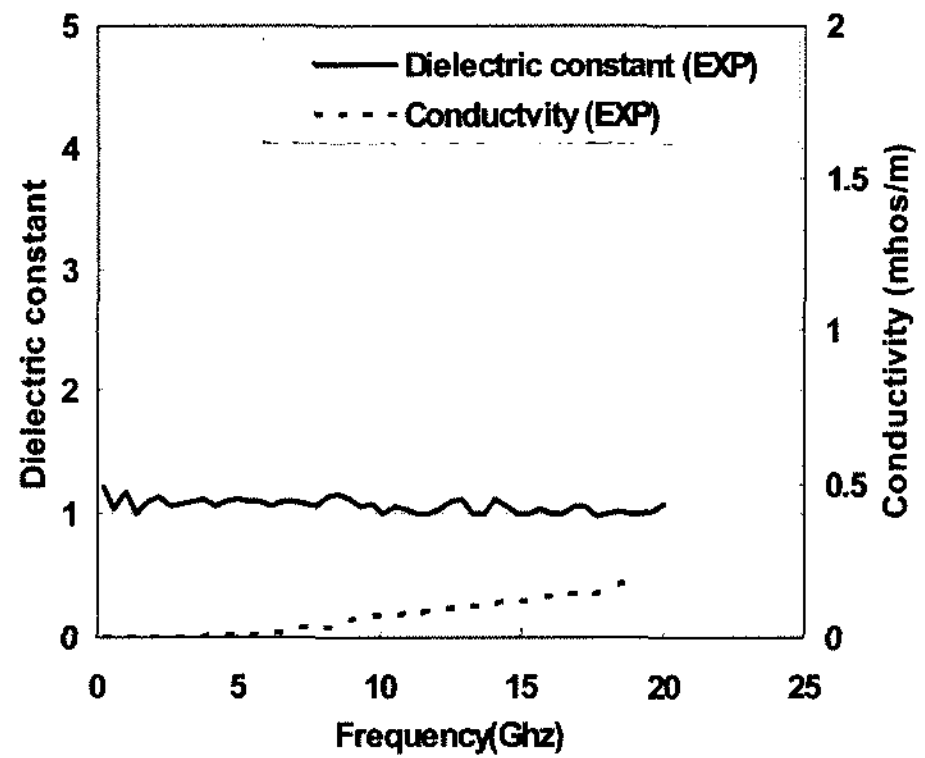
본 논문에서 사용된 장비(Agilent 8722ES)는 개방형 동축선로 측정기(Open Ended Coaxial Probe, 이하 OECP)와 네트워크 분석기 등으로 구성되어 있다. OECP는 송출되는 전선의 단면모양이며, 측정 대상 시편의 표면 또는 액체의 침지상태에서 반사되는 전자기파를 측정하도록 구성되어 있다. 네트워크 분석기는 대용량 정보 저장카드를 통해서 노트북에 연결되어 있으며 이를 통해 측정된 전자기 특성을 평가하게 된다¹¹⁾. 네트워크 분석기는 0.2~20GHz의 주파수 대역을 가지고 있으며, 0.4GHz 간격으로 절연상수와 전도성을 평가하였다. Fig. 1에서는 OECP의 구성과 측정 장비의 set-up를 나타내고 있다.

3.1.3. 보정

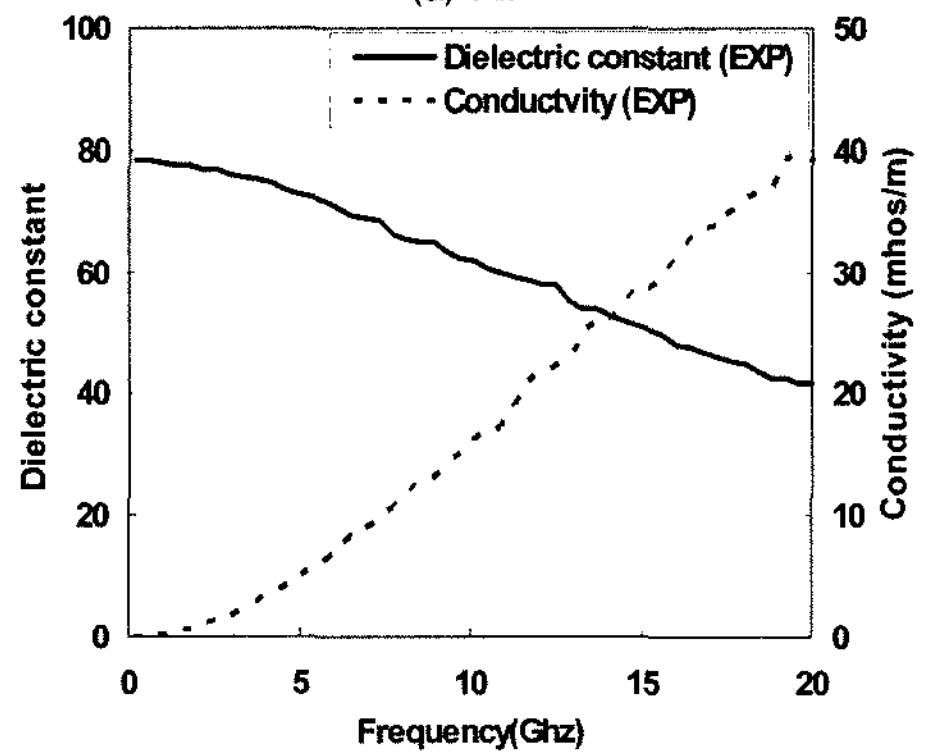
일반적으로 OECP를 사용한 시스템에서의 보정은 그 특성이 잘 알려진 매질을 이용하여 수행하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 측정 전에 25°C의 물과 공기에 대해서 보정을 수행하였는데, Fig. 2와 같이 나타낼 수 있으며 기존의 측정값과 잘 일치하고 있었다^{3,11)}.

3.2. 압축강도실험 및 전자기 측정

각 시편은 재령 1,2,그리고 4주차에 기중에서 2일 건조 후 관련규격¹³⁾을 참고하여 압축강도 실험을 수행하였다. 전자기 측정을 위한 시편은 추가적으로 그라인딩을 통해 표면을 매끄럽게 하여, 블리딩(bleeding) 또는 이물질에 의한 오차를 줄이도록 하였다. 전자기 측정을 위한 시편은 36시간 동안 실내조건(20 ~22°C, R.H. 55~62%)에 존치하였으며, 실내 건조 상태 뿐 아니라 수중존치상태에 따른 전자기파 측정을 같이 수행하였다. 한 개의 시편에 대하여 절연상수 및 전도성을 10번 측정하였으며, 그 평균값을 본 논문에서 사용하였다. 실험 계획 및 노출환경을 Table 2와 같다.



(a) Air



(b) Water(25°C)

Fig. 2. Calibration of Dielectric constant and conductivity.

Table 2. Condition of test and exposure

W/C (%)	Compressive strength		EM properties	
	Cylindrical specimen (D:10 × L:20cm)		Cubic specimen (W:10 × L:15 × H:4cm)	
	Number of specimens			
	Room condition	Submerged condition	Room condition	
40	3	2	2	
45	3	2	2	
50	3	2	2	
55	3	2	2	
60	3	2	2	

- Room condition: Temp.(22~25°C), R.H.: (55~62%)

4. 시멘트 모르타르의 전자기특성과 강도특성 평가

4.1. 물-시멘트비에 따른 시멘트 모르타르의 압축강도 평가

실험결과는 W/C의 증가에 따라 감소하고 재령에 따라 증가하는 전형적인 강도곡선을 나타내고 있었다. 양생기간이 증가하고, W/C가 감소하면 수화

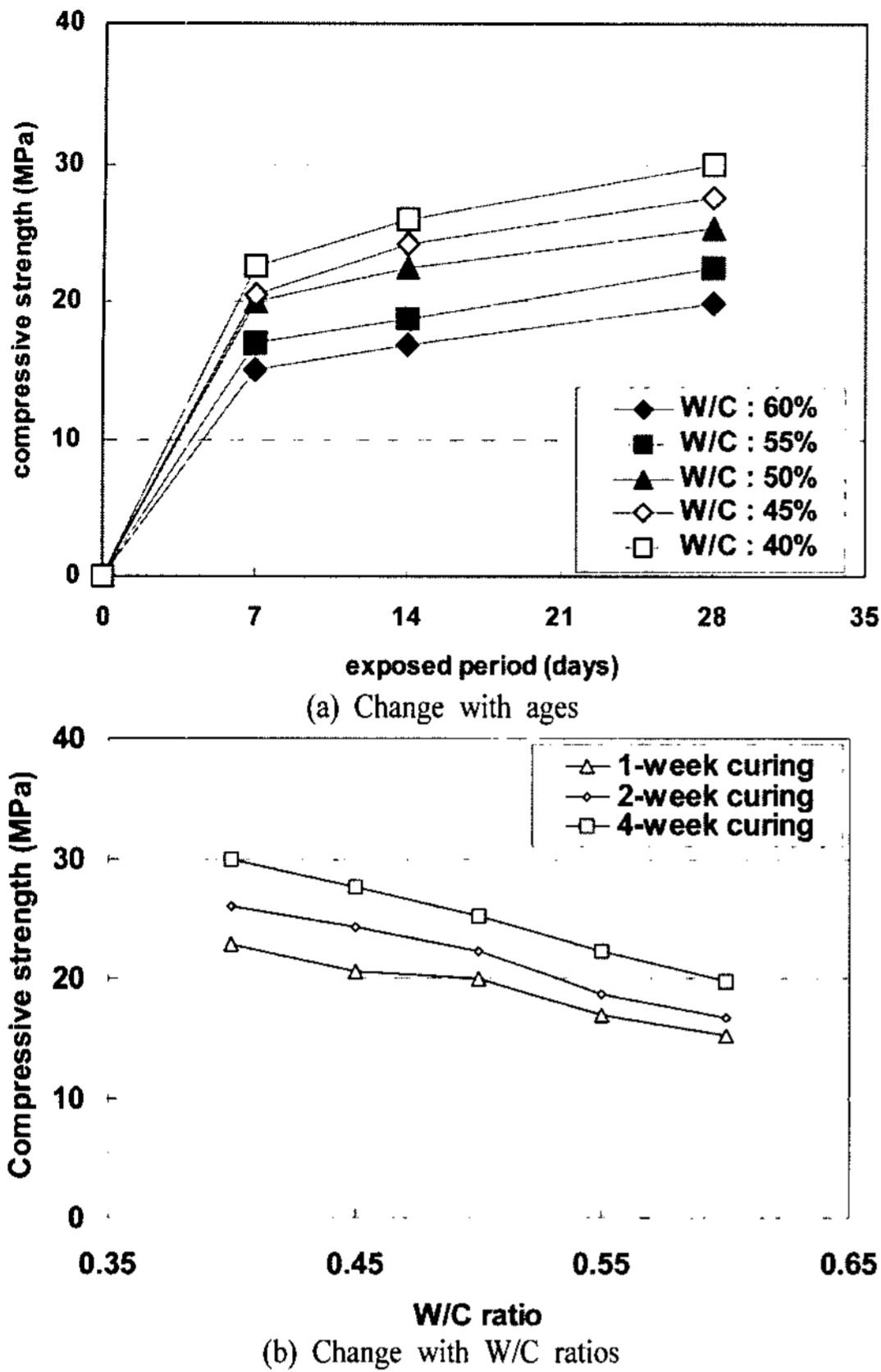


Fig. 3. Compressive strength in OPC mortar.

물생성이 많아지고 이에 따라 공극률이 감소하게 되는데, 이러한 공극률감소는 강도변화와 밀접한 관계가 있다^{14,15)}. 재령과 W/C에 따른 압축강도 실험결과는 Fig. 3에 나타내었다.

4.2. 시멘트 모르타르의 전자기 특성 평가

4.2.1. W/C에 따른 전자기 특성 변화

건조상태에서는, 공극률이 감소할수록 OECF가 측정 표면에 더 많이 접촉하게 되므로 절연상수 및 전도성이 증가하게 된다. 기존의 연구에서는 콘크리트 영역에서의 유전상수는 5~10으로 공기(=1)보다 더욱 크게 평가 된다²⁾. 물시멘트비의 감소에 따라 건조 상태에서 전자기적 특성이 증가하는 경향은 실험뿐 아니라¹¹⁾ 해석결과에서도 확인할 수 있다^{2,9)}. Fig. 4에서는 4주 경과 후 측정된 유전상수 및 전도율에 대해 나타내고 있다.

Fig. 4에서, 주파수 대역이 증가할수록, W/C에 상관없이 유전상수는 감소하고 전도율은 증가하고 있음을 알 수 있다. 주어진 주파수에서는, 낮은 W/C를 가진 모르타르에서 높은 유전상수 및 전도율이

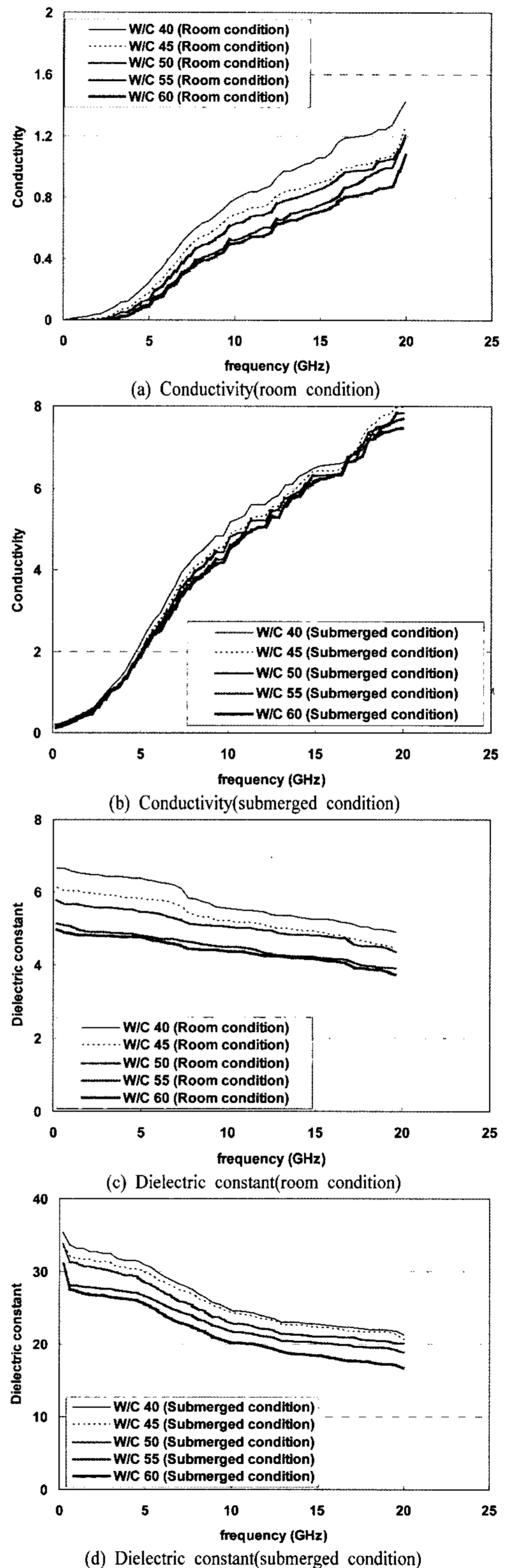


Fig. 4. Characteristics in EM properties.

평가되고 있음을 알 수 있다. 이러한 실험결과는 기존의 비금속재료의 실험결과와 같은 경향을 보이고 있다¹¹⁾.

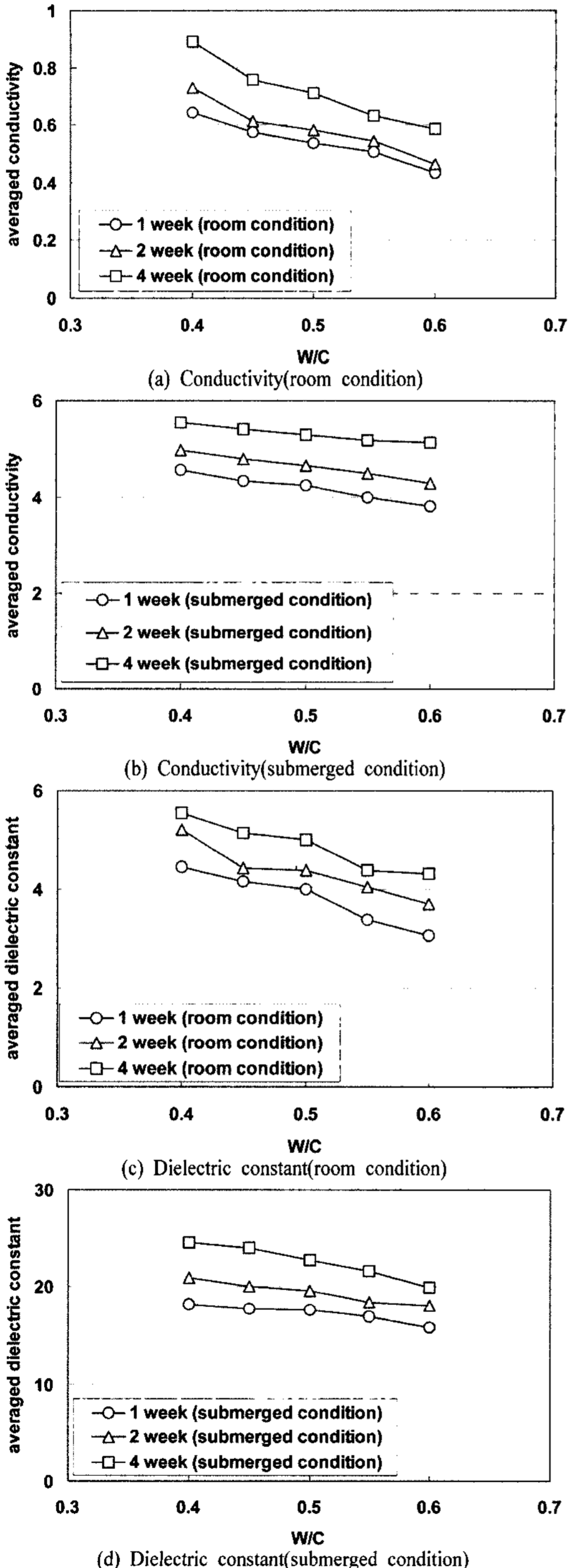


Fig. 5. Averaged EM properties with different exposure condition.

4.2.2. 전자기적 특정값의 평균화

측정된 전자기값의 명확한 비교를 위해서 5~20 GHz 영역의 전자기 측정값을 하나의 평균값으로 나타내었으며 W/C에 따라 변화하는 평균값을 Fig. 5에 도시하였다. 최대값은 모두 W/C 40%인 경우에 나타났으며, W/C의 증가에 따라 전도율의 경우 83~93% 수준으로, 유전상수의 경우, 87~81% 수준으로 감소하였다. 계산된 평균값은 노출환경에 따라 OPC 모르타르에서 측정된 압축강도 결과와 관련지어 진다.

각각의 평균값을 최대값(W/C 40%, 재령 4주)으로 나누어 보면 재령에 따라 변화하는 비율을 알 수 있다. 모든 경우에 대해서 실내조건을 가진 W/C 60%, 재령 1주차의 경우에서 최소값이 평가되었으며, 전도성은 48.7% 수준으로, 절연상수는 55.0% 수준으로 감소하였다. Table 3에서는 측정 최대값(4주차 측정값)에 따른 비율을 나타내고 있다.

4.3. 압축강도와 전자기적 특성의 상관관계 분석

Fig. 3에서 평가된 압축강도와 측정된 전자기 특성을 비교하면, 물-시멘트비의 변화와 재령에 따라

Table 3. Reduced ratio to the maximum measurement

W/C (%)	C/R : conductivity in room condition C/S : conductivity in submerged condition D/R : dielectric constant in room condition D/S : dielectric constant in submerged condition											
	1 week(%)				2 week(%)				4 week(%)			
	C/R	C/S	D/R	D/S	C/R	C/S	D/R	D/S	C/R	C/S	D/R	D/S
40	72.3	82.5	80.2	74.1	82.0	89.7	93.7	85.1	100.	100.	100.	100.
45	64.5	78.2	74.8	72.4	68.8	86.7	79.9	81.5	84.8	97.5	92.8	97.8
50	60.1	76.7	72.1	71.7	65.5	84.1	79.2	79.7	79.8	95.4	90.0	92.8
55	56.7	71.9	60.8	69.1	61.2	81.0	73.0	75.2	70.7	93.5	79.1	88.0
60	48.7	68.8	55.0	64.6	52.0	77.6	66.7	73.9	65.7	92.6	77.9	81.3
60	48.7	68.8	55.0	64.6	52.0	77.6	66.7	73.9	65.7	92.6	77.9	81.3

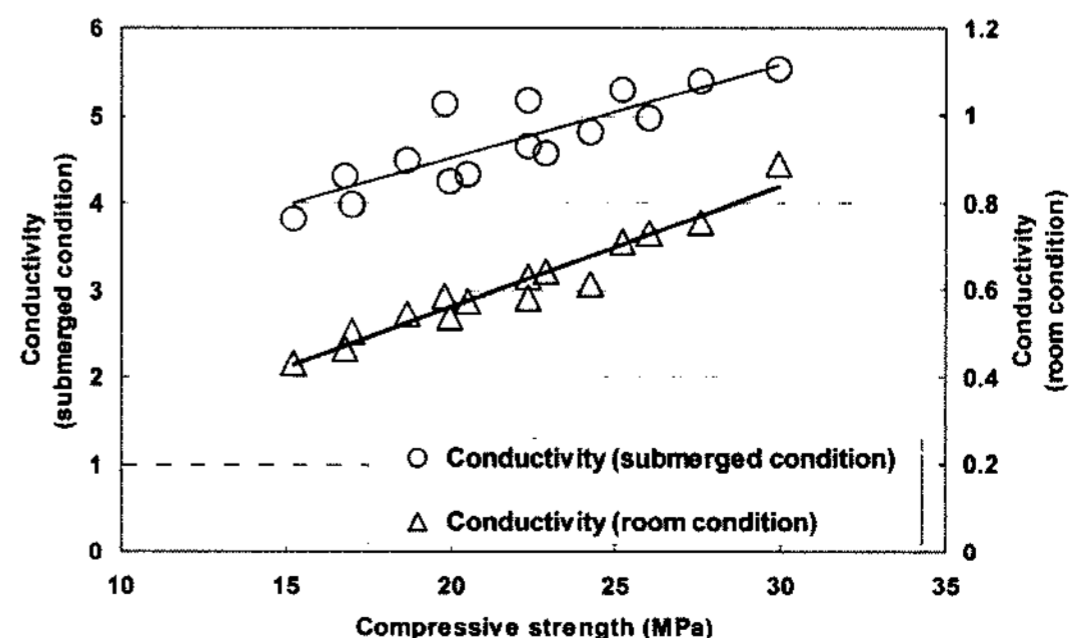


Fig. 6. Relationship between averaged conductivity and compressive strength.

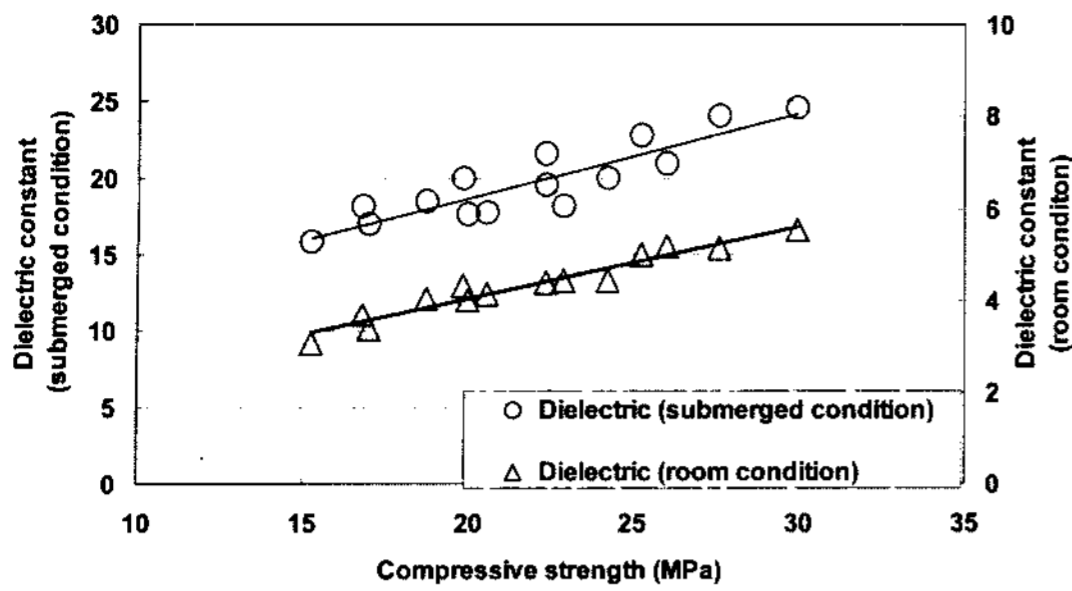


Fig. 7. Relationship between averaged dielectric constant and compressive strength.

서 두가지 특성(유전상수 및 전도율)이 밀접하게 변화하고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 실내 및 수중존치환경을 고려하여 각각의 회귀분석이 수행되었다. Fig. 6과 7에서는 전도율과 유전상수에 대한 회귀분석결과를 각각 나타내고 있으며, 그 관계식을 상관계수와 함께 식 (4)~(7)에 나타내었다.

$$C_{sub} = 0.1083 \times S + 2.3401, \quad R^2 = 0.7422 \quad (4)$$

$$C_{room} = 0.0278 \times S + 0.0053, \quad R^2 = 0.9401 \quad (5)$$

$$D_{sub} = 0.5502 \times S + 7.7156, \quad R^2 = 0.8011 \quad (6)$$

$$D_{room} = 0.1074 \times S + 0.8932, \quad R^2 = 0.9355 \quad (7)$$

여기서, C 와 D 는 평균화된 전도율과 유전상수를 각각 나타내고 있으며, S 는 OPC 모르타르의 압축강도(MPa)를, 첨자(sub, room)는 측정시의 시편 노출환경을 의미한다. 회귀분석 결과 전자기적 특성은 압축강도와 선형적인 상관성이 있음을 알 수 있다. 한편, 하나의 시편에 대해 30회 이상을 측정하여 측정값의 신뢰도를 높이는 연구가 수행되었으나¹¹⁾, 본 논문에서는 하나의 W/C에 대해 20회 측정 후 평균값이 사용되었다. 보다 높은 신뢰성을 확보하기 위해, 많은 시편을 제조하여 측정횟수를 증가시키면, 보다 높은 상관성을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 5가지 W/C를 가진 시멘트 모르타르 시편에 대하여 재령에 따른 압축강도와 전자기 특성(전도율 및 유전상수)을 평가하였다. 0.2~20GHz의 주파수 대역에 걸쳐, 실내에서 노출된 시편과 수중 포화상태인 시편을 대상으로 전자기 특

성이 분석되었으며, 강도특성을 직접적으로 나타낼 수 있는 회귀 분석식을 도출하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

1) OPC 모르타르에서 측정된 전자기적 특성은 재령이 증가함에 따라, 그리고 W/C가 감소함에 따라 증가하였다. 5~20GHz 영역에서 평균화된 전자기 특성은 W/C가 40%에서 60%로 증가함에 따라 전도율의 경우 83~93% 수준으로, 유전상수의 경우, 81~87% 수준으로 감소하였다.

2) 도출된 절연상수 및 전도성은 시멘트 모르타르 압축강도와 선형적인 상관성을 가지고 있었는데, 실내조건에 존치된 시편의 경우, 0.9 이상의 높은 상관성을 보이고 있었다.

3) 측정시 최소값은 W/C 60%, 재령 1주차에 나타났으며, 최대값(W/C 40%, 재령 4주)과 비교시, 전도성은 48.7% 수준으로, 절연상수는 55.0% 수준으로 감소하였다.

4) 유전상수에 대한 강도 기울기가 전도율에 대한 강도 기울기보다 3.9~5.1배 크게 나타났으며, 강도를 평가하기 위해서는 실내건조시편에 대해 유전상수를 평가하는 것이 가장 효과적임을 알 수 있었다. 포화된 시편을 이용할 경우 표면의 국부적인 수분 영향으로 인해, 측정값 분산이 클 수 있기 때문이다.

감사의 글 : 본 연구는 국립한경대학교 연구지원에 의해 수행되었으며, 본 저자일동은 이에 대해 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Glanville, J. and Neville, A. Prediction of Concrete Durability, Proceedings of STATS 21st Anniversary Conference, E&FN SPON, pp. 16~36, 1995.
- 2) Halabe, U. B., Sotoodehnia, A. Maser, K. R., and Kausel, E. A., "Modeling the Electromagnetic Properties of Concrete", ACI Material Journal, Vol. 90, pp. 552~563, 1993.
- 3) Rhim, H. C., Buyukozturk, O., "Electromagnetic Properties of Concrete at Microwave Frequency Range", ACI Mater J., Vol. 95, pp. 262~271, 1998.
- 4) Soutsos, M. N., Bungey, J. H. Millard, S. G., Shaw, M. R. Patterson, "A. Dielectric Properties of Concrete and Their Influence on Radar Testing", NDT & E Inter., Vol. 34, pp. 419~425, 2001.

- 5) McCarter, W. J., Starrs, G, Chrisp, T. M., "Electrical Conductivity, Diffusion, and Permeability of Portland Cement-Based Mortar", *Cem. Conc. Res.*, Vol. 30, pp. 1395 ~1400, 2000.
- 6) McCarter, W. J., Chrisp, T. M., Starrs, G., Blewett, J., "Characterization and Monitoring of Cement-Based Systems using Intrinsic Electrical Property Measurements", *Cem. Concr. Res.*, Vol. 33, pp. 197 ~206, 2003.
- 7) McCarter, W. J., Starrs, G., Chrisp, T. M., "The Complex Impedance Response of Fly-Ash Cement Revisited", *Cem. Concr. Res.*, Vol. 34, pp. 1837 ~1843, 2004.
- 8) Rhim, H. C., "Condition Monitoring of Deteriorating Concrete Dams using Radar", *Cem. Concr. Res.*, Vol. 31, pp. 363 ~373, 2001.
- 9) Halabe, U. B., "Condition Assessment of Reinforced Concrete Structures Using Electromagnetic Waves", Doctoral thesis, Department of Civil Eng. MIT, Cambridge, 2000.
- 10) Feng, M. Q., Kim, Y. J., De Flaviis, F. D., "Use of Microwaves for Damage Detection of FRP-Wrapped Concrete Structures", *J. of Eng. Mech. ASCE*, Vol. 128, pp. 172 ~183, 2001.
- 11) Rhim, H. C., Kim, Y. J., Feng, M. Q., Woo, S. K., 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.
- 12) 임홍철, 정성훈, "비파괴 시험을 위한 콘크리트의 전자기적 특성의 측정", *한국콘크리트학회 논문집*, 제12권, 제3호, 2000, pp. 115 ~123, 2000.
- 13) Korean Standard, Method of test for compressive strength of concrete: KSF 2405, 2005.
- 14) Maekawa, K., Chaube, R., Kishi, T., *Modeling of Concrete Performance*, E&FN SPON, 1999.
- 15) Neville, A. M., *Properties of Concrete*, Longman, 4th Ed. pp. 272 ~282, 1998.