

# 수분함량과 측정주파수에 따른 사질토 지반의 유전상수 변화

## Variation of Dielectric Constant of Sand due to Water Content and Measuring Frequency

이 주 형\*<sup>1</sup> Lee, Ju-Hyung

오 명 학\*<sup>2</sup> Oh, Myoung-Hak

박 준 범\*<sup>3</sup> Park, Jun-Boum

김 형 석\*<sup>4</sup> Kim, Hyeong-Seok

### Abstract

Dielectric constant measurement has drawn much attention in the investigation of the properties and contaminations of subsurface. In this study, by varying the frequency from 75 kHz to 12 MHz, dielectric constant was measured for the weathered granite soil and Jumunjin sand having different water contents and dry density. The dielectric constant of sand showed the dispersive behavior indicating that dielectric constant decreased with frequency of an electric field. And the dielectric constant of soil increased as water content and/or dry density increased due to the decrease of air portion and/or the increase of amount of water molecules which could contribute to the development of orientation polarization. The dielectric constant of sand showed a linear relationship with the moisture density, considering both water content and dry density. At low frequency, the dielectric constants calculated by Maxwell's, Topp's and CRIM equation deviated from measured values. It could be explained by the fact that those equations did not consider dispersive behavior of dielectric constant with the frequency.

### 요 지

최근 지반 특성과 지반 오염도의 조사를 위해 유전상수 측정기법을 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 다양한 함수비와 건조단위중량을 갖는 화강풍화토와 주문진표준사의 유전상수를 75kHz~12MHz의 주파수 범위에서 측정하였다. 사질토의 유전상수는 주파수가 증가함에 따라 감소하는 분산거동을 보였다. 또한 함수비나 건조단위중량이 증가함에 따라 배향분극에 기여하는 물분자의 양이 증가하고 유전상수가 1인 공기의 양이 감소하여 유전상수가 증가하였다. 흙의 유전특성은 함수비와 건조단위중량을 모두 고려한 수분밀도에 선형적으로 비례하는 경향을 나타내었다. Maxwell식, Topp식, CRIM식에 의한 계산값과 측정된 값을 비교한 결과 기존의 식은 유전상수의 분산거동을 고려하지 못하고 있기 때문에 저주파에서는 측정값과 차이를 나타내었다.

**Keywords :** Dielectric constant, Frequency, Moisture density, Polarization

### 1. 서 론

지반의 오염도 조사에 있어서 침투수의 양과 이에 용해되어 이동하는 오염물의 양을 파악하기 위해 지반의

특성조사는 필수적이다. 현장특성화를 위한 지반조사는 주로 현장에서 시료를 채취한 후, 실험실에서 분석하는 방법이 전형적이었다. 그러나 샘플링하여 분석하는 기법은 실시간의 연속적, 장기적인 모니터링이 불

\*1 정희원, 한국건설기술연구원 연구원 (Member, Researcher, Korea Institute of Construction Technology)

\*2 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사수료 (Member, School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul Nat'l Univ.)

\*3 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul Nat'l Univ., junpark@gong.snu.ac.kr)

\*4 중앙대학교 전자전기공학부 부교수 (Associate Prof., School of Electrical & Electronic Eng., Chungang Univ.)

능하다(Okoye et al., 1995; Kaya and Fang, 1997; 오명학 등, 2001). 이러한 문제점들을 보완하여 현장에서 연속적, 장기적인 모니터링을 수행하기 위한 센서 및 조사기법에 대한 연구가 최근 미국, 영국, 네덜란드 등을 비롯한 선진국을 중심으로 많이 수행되고 있다. 이러한 방법에는 전기비저항 측정법, 유전을 측정법, 근적외선의 반사와 투과를 측정하는 방법, 마이크로파의 감쇠를 측정하는 방법, 중성자 산란법 등이 있다(Stephens, 1995). 그 중에서 비교적 측정이 용이하고 측정장비의 가격이 저렴한 전기비저항 측정법과 유전상수 측정법이 많이 사용되고 있다. 전기비저항 측정법은 직류전류나 낮은 주파수의 교류전류를 사용하여 시료의 전기비저항을 측정하는 방법으로 적용 가능한 지반의 함수비가 10~20% 정도로 제한되어 있다. 이 범위를 벗어나는 함수비에서는 전기비저항 측정에서의 많은 오차가 유발될 수 있다(TJI Report, 1993). 이에 반해 유전상수 측정법은 교류전류를 사용하여 시료의 정전용량(capacitance)을 측정하고 유전상수를 구하는 방법으로 이론적으로 모든 함수비 범위에 대해 측정이 가능하다. 또한 유전상수 측정기법은 전류의 공급만 있으면 실시간 측정 및 분석이 가능하기 때문에 실시간의 연속적인 모니터링을 수행하는데 경제적으로도 매우 효과적이다. 최근에는 흙의 유전상수를 모니터링하여 토양 및 지하수의 오염도 조사에 활용하는 방향으로 연구가 확대되고 있는 실정이다(Kaya and Fang, 1997).

일반적으로 radio frequency(RF) 범위에서 사질토의 경우 흙입자의 유전상수는 2~4 정도이고, 공기의 유전상수는 1 정도인 반면에 물의 유전상수는 이들에 비해 훨씬 큰 78~81의 값을 가진다. 그러므로 흙, 간극수 그리고 공기로 구성된 불포화토의 유전상수는 간극수에 의해 크게 영향을 받으며, 더 나아가 간극용액이 물이 아닌 soil-fluid 시스템의 유전상수는 간극에 포함된 간극용액의 유전상수가 지배적이다. 이러한 개념에 의하여 지반의 유전상수 측정기법이 현장 지반특성조사에 적용될 수 있음이 보고되고 있다(Arulanandan and Smith, 1973; Kaya and Fang, 1997; Selig and Mansukhani, 1975). 유전상수는 수분의 함유량이나 다짐도와 같은 지반의 조건에 따라 그 값의 차이가 발생하기 때문에 지반의 조건에 따른 유전상수의 변화에 대한 평가가 선행되어야 한다. 그러나 아직까지 지반조건에 따른 유전상수의 변화특성이 명확하게 정립되지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 함수비와 건조단위중량

을 갖는 화강풍화토와 주문진표준사에 대한 유전상수 측정을 통하여 지반 내에 포함된 수분의 양, 다짐도 등이 흙의 유전상수에 미치는 영향을 조사하여 지반조건과 유전특성과의 관계를 규명하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 유전상수의 기본개념

유전상수란 외부에서 가해진 전기장 하에서 전기에너지를 축적할 수 있는 물질의 능력을 나타내는 값으로 그 시스템의 정전용량(capacitance)으로부터 구할 수 있다. 정전용량은 두 전극사이에 가해진 전압  $V$ 에 대하여 두 전극이 충전할 수 있는 전하량  $Q$ 로 정의된다. 즉, 평행판의 면적이  $A$ 이고 두 판(전극) 사이의 거리가  $d$ 인 평행판축전기(parallel plate capacitor)에서 두 판 사이에 아무 물질도 포함하지 않을 경우(진공일 경우) 정전용량  $C_0$ 는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$C_0 = \frac{Q}{V} = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1)$$

여기서  $A$ 는 극판 면적,  $d$ 는 극판 사이의 거리,  $\epsilon_0$ 는 진공의 유전율(permittivity)을 나타낸다(그림 1).

만약 유전율이  $\epsilon$ 인 물질이 극판 사이에 채워진다면 정전용량  $C$ 는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$C = \epsilon \frac{A}{d} = C_0 \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = C_0 \epsilon_r \quad (2)$$

여기서,  $\epsilon$ 은 극판사이에 포함된 물질의 유전율이고  $\epsilon_r$ 은 비유전상수 혹은 일반적으로 유전상수라 한다. 두 경우의 정전용량을 비교하면 유전상수  $\epsilon_r$ 은 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

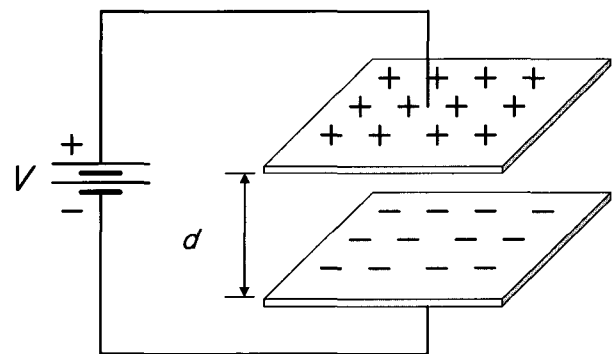


그림 1. 평행판 축전기

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3)$$

즉, 유전상수  $\epsilon_r$ 은 진공의 유전률에 대한 유전체의 유전률로 정의되며, 전기비저항과 마찬가지로 전극의 기하학적인 모양에 영향을 받지 않는 물질의 고유한 특징이다. 일반적으로 cgs 단위계에서  $\epsilon_0 = 1$ 이므로  $\epsilon_r$ 과  $\epsilon$ 은 동일하게 사용될 수 있다.

## 2.2 분극현상

외부에서 가해진 전기장에 대하여 물질내의 전하들이 재배열하는 현상을 유전분극(dielectric polarization) 혹은 분극(polarization)이라고 한다. 분극현상은 원자력(atomic force) 혹은 분자력(molecular force)에 의하여 발생하며 외부전기장에 의하여 물질내에 존재하는 전하들이 상대변위를 발생함으로써 나타난다. 분극현상은 전자분극(electronic polarization), 원자분극(atomic polarization), 배향(혹은 쌍극자) 분극(orientation/dipole polarization) 그리고 공간전하분극(space charge polarization)의 네 가지

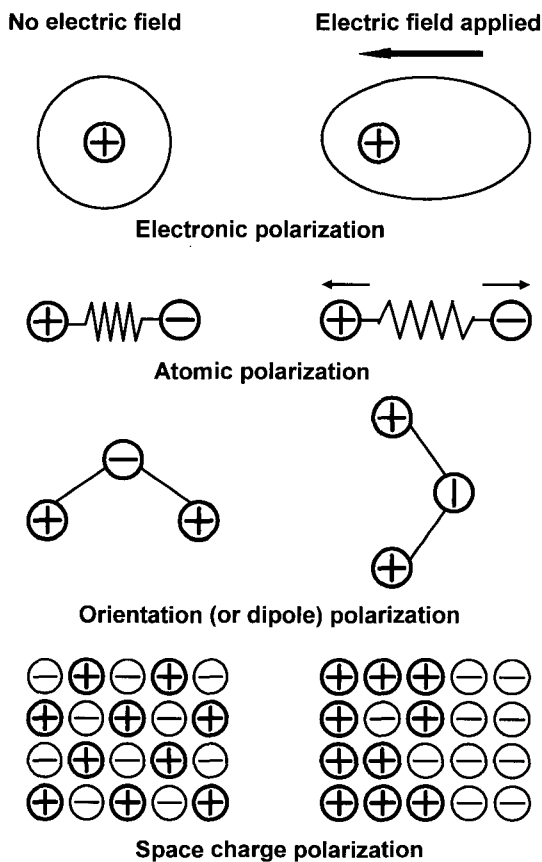


그림 2. 다양한 분극의 형태(Von Hippel, 1954)

형태로 발현된다(그림 2).

전자분극(electronic polarization)은 원자에 전기장을 가하면 핵의 (+) 전하 중심이 전자구름의 (-) 전하 중심으로부터 상대적으로 이동하면서 발생한다. 원자분극(atomic polarization)은 양이온과 음이온이 일정거리를 두고 결합하고 있는 이온결합 고체나 전자를 대칭적으로 공유하고 있지 않는 공유결합 고체에서 주로 발생하며, 외부에서 가해진 전기장에 대하여 원자의 평형 위치가 달라져 유도쌍극자(induced electric dipole)가 생기면서 나타나는 분극을 말한다. 배향분극(orientation polarization)은 재료 안에 존재하는 영구쌍극자(permanent electric dipole)가 외부의 전기장에 의해서 재배열하여 방향성을 갖게 됨으로써 나타나는 분극이다. 공간전하분극(space charge polarization)은 재료 안에 존재하는 전하운반체(charge carrier)가 전기장 하에서 이동하면서 나타나는 분극으로, 다른 세 가지 분극기구에 비해 분극의 크기가 훨씬 크고 다상(multiphase)으로 이루어진 경우에 주로 나타난다. 배향분극과 공간전하분극은 하전입자의 기동성이 비교적 낮기 때문에 매우 높은 주파수(GHz)에서는 거의 무시할 만큼 작은 양이다(Von Hippel, 1954).

네 가지의 분극현상들은 외부로부터 가해진 교류전기장에 대하여 반응하는 시간이 각각 다르기 때문에 유전상수 발현에 기여하는 순 분극현상은 주파수에 의존하게 된다. 그림 3에서는 주파수에 따른 네 가지 분극현상의 분산특성을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 각 주파수에서 발현되는 분극기작의 종류와 분극정도의 차이에 의하여 물질의 유전상수는 주파수가 증가함에 따라 감소하게 된다. 예를 들면 전자분극은 모든 주파수 영역에 대하여 발현되지만, 공간전하분극은 저주파에서만 나타난다.

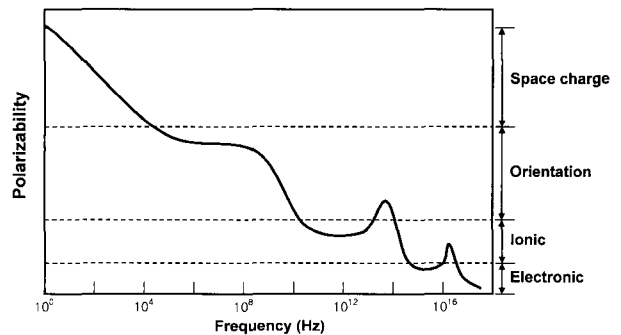


그림 3. 주파수의 변화에 따른 분극기작의 발현 개요도(Kingery, 1963)

표 1. 시료의 물리적 특성

Soil	Dry density (t/m <sup>3</sup> )		Coefficient of gradation	Coefficient of uniformity	Specific gravity	USCS
Weathered granite soil	Max.		1.4	8.4	2.63	SW
	$\gamma_{dmax.} = 1.98$ at $w_{opt.} = 11.4\%$					
Jumunjin sand	Max.	Min.	1.0	1.5	2.64	SP
	$\gamma_{dmax.} = 1.66$	$\gamma_{dmin.} = 1.33$				

표 2. 화강풍화토의 XRF분석결과

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI <sup>1)</sup>	Total
Weight %	67.65	18.27	0.10	1.44	0.26	0.27	4.26	4.85	0.10	0.02	2.29	99.50

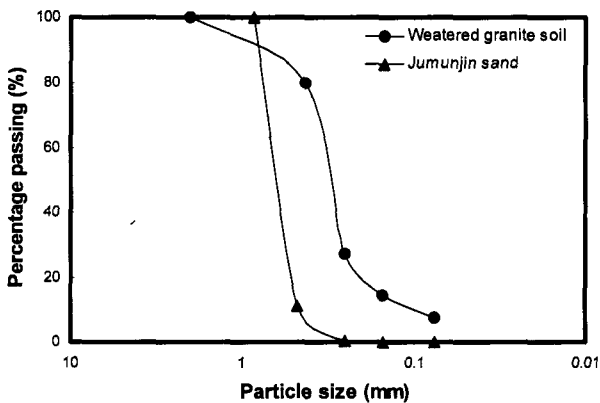
<sup>1)</sup> LOI : Loss of Ignition

### 3. 실험재료 및 방법

#### 3.1 실험재료

본 실험을 위하여 대표적인 사질토인 화강풍화토와 주문진표준사를 사용하였다. 실험에 사용된 화강풍화토는 통일분류법상 입도분포가 좋은 모래(SW)로 분류되었으며, 주문진표준사는 입도분포가 나쁜 모래(SP)로 분류되었다. 두 흙의 물리적 특성은 표 1과 같으며 그림 4는 입도분포곡선을 보여준다. 주문진사에 비해 비교적 다양한 성분들로 구성된 화강풍화토의 경우 XRF(X-Ray Fluorescence Spectrometer)분석을 통해 그 성분을 명확히 분석하였다(표 2). 각 토양시료는 105℃에서 24시간 이상 노건조(oven dry)하여 사용하였으며, 10번체를 통과한 시료를 사용하였다.

자연상태의 지반을 모사하기 위하여 지하수와 전기적 특성이 비슷한 수돗물(tap water)을 간극수로 사용하였다. 일반적으로 지하수의 전기전도도(electrical conductivity) 범위는 30 $\Omega$ m~150 $\Omega$ m이며(한정상, 1998), 본 실험에서



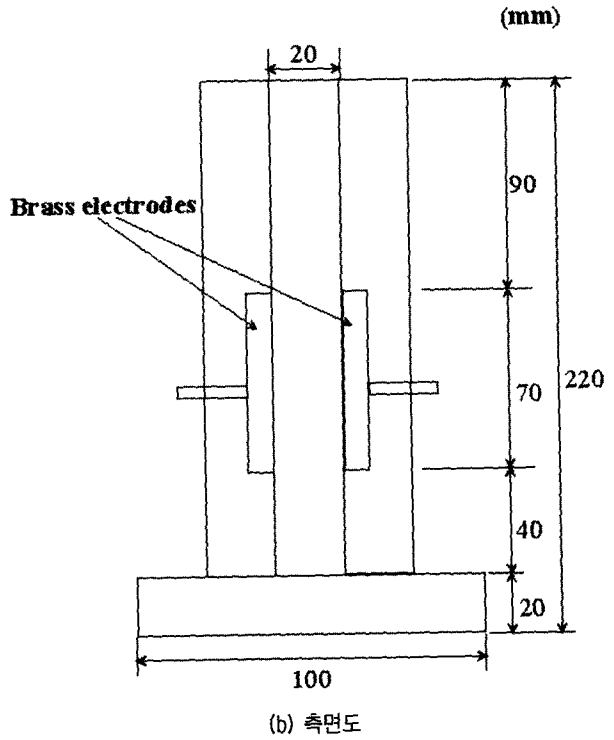
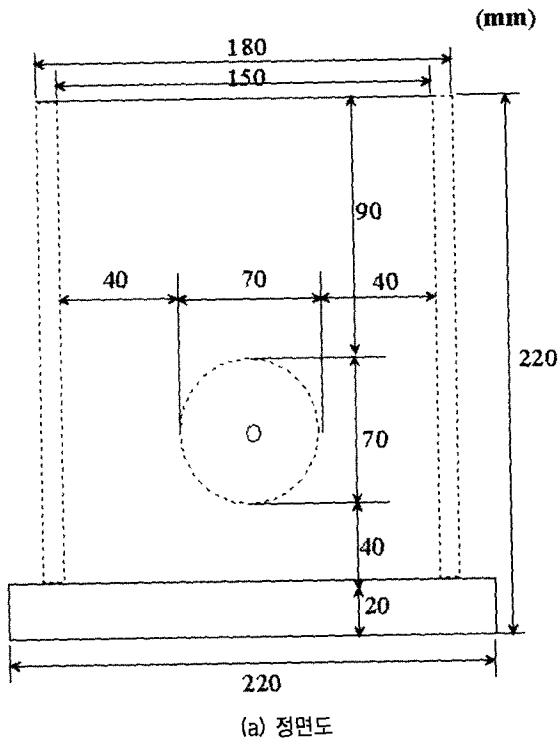


그림 5. 유전상수 측정몰드의 개요도

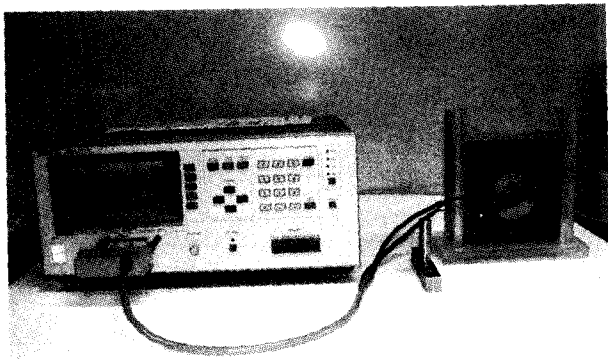


그림 6. 흙의 유전상수 측정을 위한 몰드와 LCR meter

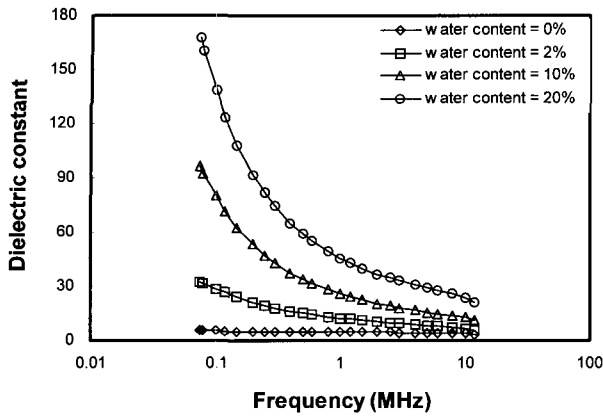
여기서,  $C$ 는 정전용량,  $\epsilon_0$ 는 진공의 유전율( $8.854 \times 10^{-12}$  F/m),  $A$ 는 전극의 단면적,  $d$ 는 시료의 높이이다.

시료표면의 수분증발을 최소화하고 저주파 전기장의 장시간 공급시 이온전도 등에 의한 시료내부의 온도상승을 막기 위하여 시료 성형 후 신속하게 유전상수를 측정하였다. 실험실 온도는 항상  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하였으므로 온도변화에 따른 영향은 무시하였다. 측정몰드와 LCR meter에서의 측정오차를 배제하기 위하여 공기와 탈이온수(deionized water)의 유전상수를 측정하여 측정값을 보정하였다.

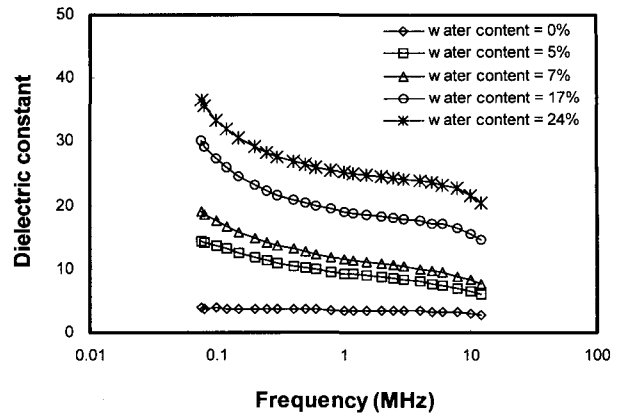
## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 주파수에 따른 유전거동(Dielectric dispersion characteristics)

그림 7은 건조단위중량을  $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 성형한 화강 풍화토와 주문진표준사의 주파수에 따른 유전특성을 보여준다. 일반적으로 흙의 유전상수는 그림에서 보는 바와 같이 주파수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 그림 3에 제시된 바와 같이 본 실험에서의 측정주파수 범위에서 나타나는 분산거동은 주로 배향분극의 발현정도에 따라 발생하며, 100kHz 이하의 저주파에서는 공간전하분극의 발현여부가 주파수의 분산거동에 영향을 줄 수 있다. 외부로부터 전기장이 가해지면 흙 속에 존재하는 물분자(쌍극자)들이 전기장 방향으로 나란하게 배열하면서 배향분극을 발현한다. 이때 흙 시료에 가해지는 전기장의 주파수가 점점 증가하면 분극에 기여하던 물분자들이 전기장에 반응하여 재배열할 시간이 충분치 않아 배향분극에 기여할 수 있는 물분자들의 양이 점점 감소하기 때문에 흙의 유전상수는 주파수 증가에 따라 점진적으로 감소하게 된다. 전기장의 주파수가 더욱더 증가하여 이 분극기구의 한계주파수에 이르게 되면 물분자의 배향분극은 더 이상 외부 전기장에



(a) 화강풍화토



(b) 주문진표준사

그림 7. 측정주파수의 변화에 따른 사질토의 유전상수 변화( $\gamma_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ )

대해 반응하지 못하고 완전히 기능을 상실하게 된다. 따라서 이 한계주파수 이상에서 흙의 유전상수는 주파수 증가에 따른 큰 감소 없이 일정한 값을 유지하게 된다. 그림 7에 의하면 동일한 건조단위중량을 갖는 시료는 함수비가 증가함에 따라 유전상수의 값이 증가함을 보여준다. 물의 유전상수는 80(25°C)으로 불포화지반에 존재하는 흡입자나 공기에 비해 매우 크기 때문에 흙의 유전상수에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 흙 속에 존재하는 물의 양이라는 것은 잘 알려진 사실이다(Campbell, 1990; Curtis & Narayanan, 1998; Eller & Denoth, 1996). 이는 함수비가 증가함에 따라 배향분극을 발현할 수 있는 물분자의 양이 많아지기 때문이다. 또한 함수비가 높은 시료에서 주파수에 따른 유전상수의 감소경향이 더 뚜렷하게 나타나는 경향을 보인다. 이는 함수비가 높을수록 물분자의 양이 많기 때문에 주파수가 증가함에 따라 배향분극의 발현에 기여하지 못하는 물분자의 수도 더 많기 때문이다.

화강풍화토와 주문진표준사의 유전거동을 비교하여 보면, 화강풍화토의 유전상수가 주문진표준사의 유전상수에 비해 더 큰 값을 갖는 결과를 보인다. 상대적으로 입도분포가 좋은 화강풍화토의 경우 주문진표준사에 비해 세립자의 성분이 많고, 더 큰 비표면적을 가지게 된다. 따라서, 흙 입자와 공기 혹은 흡입자와 물의 경계면에서 발현될 수 있는 공간전하분극이 화강풍화토의 경우에 더 많이 발현될 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 흙의 종류에 따른 일반적인 유전거동 특성을 분석하기 위해서는 다양한 종류의 흙에 대한 실험이 추가되어야 할 것이다.

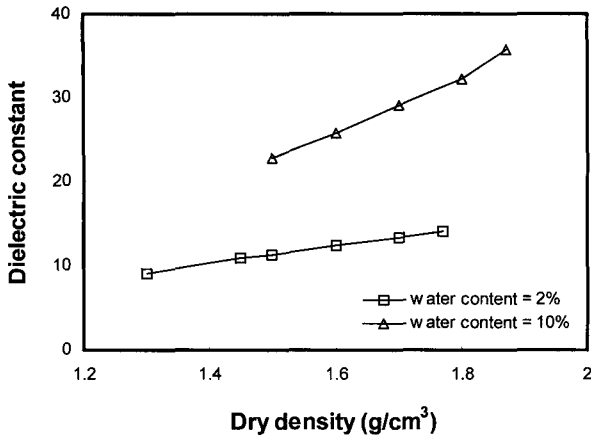
#### 4.2 수분밀도에 따른 유전상수의 변화

그림 8은 특정 함수비를 갖는 흙시료에 대해 건조단위중량을 변화시켜가면서 성형한 화강풍화토와 주문진표준사의 유전상수를 1MHz 주파수에서 측정한 결과이다. 동일한 함수비의 시료에 대해 유전상수는 건조단위중량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 주문진표준사의 경우에는 유전상수의 증가량이 크지 않았으나, 화강풍화토의 경우에는 동일한 함수비라 하더라도 건조단위중량의 증가에 따른 유전상수의 증가경향이 뚜렷하였다. 다짐정도에 따라 흡입자의 접촉 면적이거나 간극의 크기가 달라지기 때문에 흙의 유전상수는 밀도에도 영향을 받게 된다. 불포화 사질토 지반에서 건조단위중량이 증가하면 간극 속의 공기의 양은 줄어들고 단위부피에 대한 물의 양이 증가하는 효과가 있기 때문에 흙의 유전상수는 건조단위중량이 증가함에 따라 증가하는 것으로 판단된다.

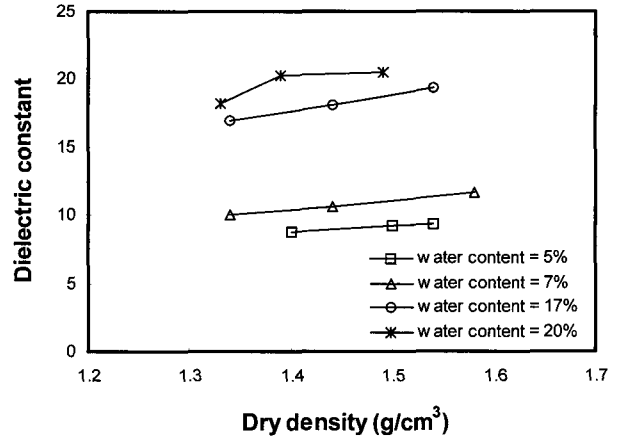
앞서 살펴본 바와 같이 사질토 지반의 유전상수는 함수비와 건조단위중량의 영향을 받기 때문에 본 논문에서는 흙 속에 포함된 수분의 양과 다짐도의 영향을 모두 고려하기 위하여 수분밀도(moisture density)에 대하여 사질토 지반에서의 유전상수를 평가하였다. 수분밀도  $m_d$ 는 단위부피의 토체(soil mass)에 대한 물의 질량비로 정의되며, 다음 식 (5)와 같이 함수비와 건조단위중량의 곱으로 계산될 수 있다(Selig and Mansukhani 1975).

$$m_d = \frac{W_w}{V_t} = \omega \gamma_d \quad (5)$$

여기서,  $W_w$ 는 물의 무게,  $V_t$ 는 토체의 전체 부피,  $\omega$ 는 함



(a) 화강풍화토



(b) 주문진표준사

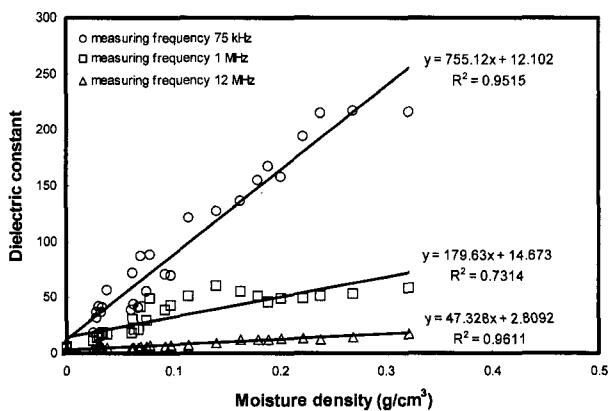
그림 8. 건조단위중량의 변화에 따른 유전거동(1MHz)

수비,  $\gamma_d$ 는 건조단위중량이다. 물의 단위중량이  $1\text{g/cm}^3$  이라고 가정하면 다음 식 (6)과 같이 수분밀도는 간극율 (porosity)  $n$ 과 포화도  $S$ 의 곱으로 표현될 수 있다.

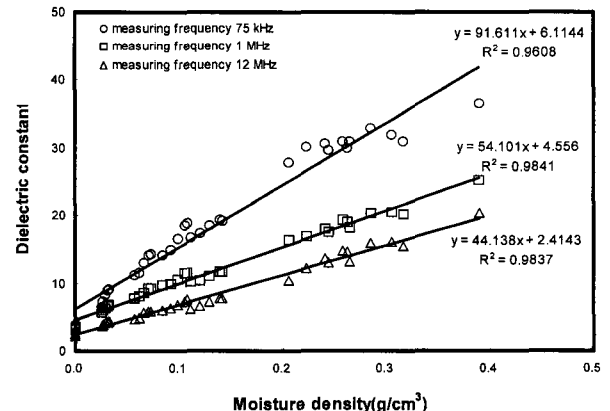
$$m_d = \frac{W_w}{V_t} = \frac{V_w \gamma_w}{V_t} = \frac{V_w}{V_t} = nS \quad (6)$$

여기서,  $V_w$ 는 물의 부피,  $\gamma_w$ 는 물의 단위중량이다. 수분 밀도는 함수비와 다짐도의 변화를 모두 반영하는 인자이며, 특정 부피의 전체 토체내에 존재하는 물의 부피를 나타낸다. 즉, 수분밀도는 유체의 단위중량이  $1\text{g/cm}^3$ 인 경우 전체 토체의 부피에 대한 간극수의 부피로 정의되는 체적함수비(volumetric water content)와 동일한 값을 나타낸다.

그림 9는 75kHz, 1MHz 및 12MHz의 3가지 주파수에 대하여 수분밀도에 따른 유전상수의 변화를 보여준다.



(a) 화강풍화토



(b) 주문진표준사

그림 9. 다양한 주파수에서 흙의 수분밀도와 유전상수의 관계

화강풍화토와 주문진표준사 모두 측정된 수분밀도 범위에서 수분밀도가 증가할수록 유전상수가 선형적으로 증가함을 보여주고 있다. 이는 수분밀도가 클수록 배향 분극에 기여할 수 있는 물분자(쌍극자)의 절대적인 양이 많아지고 간극에 존재하는 공기의 부피가 줄어들게 되기 때문이다. 즉, 수분밀도는 함수비의 증가에 따른 유전상수의 증가경향과 건조단위중량의 증가에 의한 유전상수의 증가경향을 모두 반영하는 것으로 볼 수 있다. 본 실험에서의 수분밀도 범위에 대해서 각 주파수에 대한 회귀분석결과를 정리하면 식 (7)과 같은 형태로 표현될 수 있다.

$$\epsilon = Am_d + B \quad (7)$$

여기서,  $A$ ,  $B$ 는 회귀분석을 통해 결정되는 상수로서  $A$ 는 수분밀도에 대한 의존도를 반영하며,  $B$ 는 흡입자의

표 3. 수분밀도에 따른 유전거동의 회귀분석 결과

Soil type	Function	Frequency	Regression equation	R <sup>2</sup>
Weathered granite soil		75 kHz	$y = 755.1m_d + 12.1$	0.952
		1 MHz	$y = 179.6m_d + 14.7$	0.731
		12 MHz	$y = 47.3m_d + 2.8$	0.961
Jumunjin sand		75 kHz	$y = 91.6m_d + 6.1$	0.961
		1 MHz	$y = 54.1m_d + 4.6$	0.984
		12 MHz	$y = 44.1m_d + 2.4$	0.984

유전상수를 나타낸다.

75kHz, 1MHz, 12MHz에서의 선형회귀분석결과를 표 3에 정리하였다. 본 실험에서 측정된 주파수 범위에서 선형회귀직선에 대한 R<sup>2</sup>값이 매우 큰 높은 상관성을 나타내고 있으며, 이는 사질토 지반의 유전상수의 변화를 수분밀도와의 관계로 분석하는 것이 효과적임을 나타낸다. 주파수 증가에 따른 회귀직선 기울기의 감소는 흙의 유전상수 값의 주파수에 따른 감소경향에 기인한 것이다.

#### 4.3 문헌에 제시된 관계식들과 비교

서로 다른 유전상수를 갖는 고체와 액체가 섞여있는 시스템의 유전상수 예측을 위해 제시된 관계식을 표 4에 함께 정리하였다.

Maxwell 식은 구형의 입자가 용액상에 존재하는 경우에 대하여 이론적으로 도출된 식이다. Maxwell은 입자가 희석된 현탁액에 존재하며, 각 입자에 작용하는 전기장은 다른 입자에 영향을 주지 않는 것으로 가정하였으며, 측정주파수에 따른 변화는 고려하지 않았다. Topp 식은 모래질 롬(sandy loam), 점토질 롬(clay loam), 유리구슬(glass bead)에 대하여 1MHz~1GHz 주파수 범위에

서 함수비를 변화시켜가며 실내실험을 수행하여 도출된 경험식이다. CRIM(Complex Refractive Index Method) 식은 삼상(three phase)의 mixing model을 토대로 유도된 식으로서, 삼상(공기, 흙입자, 물)으로 구성된 불포화토의 유전상수를 각 성분의 유전상수가 토체의 유전상수에 기여하는 정도를 식 (8), (9)와 같이 부피비의 관계로 나타내었다.

$$\epsilon^a = \epsilon_a^a f_a + \epsilon_s^a f_s + \epsilon_w^a f_w \quad (8)$$

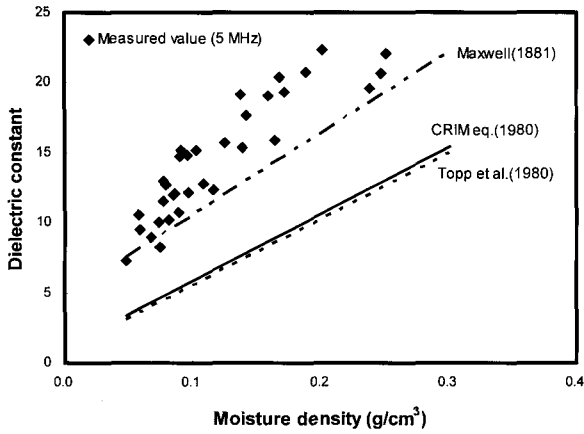
$$f_a + f_s + f_w = 1 \quad (9)$$

여기서,  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_s$  그리고  $\epsilon_w$ 는 각각 공기, 흙입자, 물의 유전상수이고,  $f_a$ ,  $f_s$  그리고  $f_w$ 는 각각 그들의 부피비이다. 또한  $a$ 는 0과 1사이 값을 가진다. Roth 등(1990)은 Time Domain Refractometry(TDR)을 이용하여 다양한 흙에 대하여 실험한 결과  $\alpha = 0.46$ 을 제시하였으며 Jacobsen & Schjonning(1994)는  $\alpha = 0.66$ 을 제안한 바 있으나 Whalley(1980)에 의하여 제안된  $\alpha = 0.5$ 가 보편적으로 사용되고 있으며 이 식이 CRIM(Complex Refractive Index Method)식으로 알려져 있다(Gardner 등, 1998). 그러나 CRIM 식은 측정주파수에 따른 유전상수의 변화를 고려하지는 않았다.

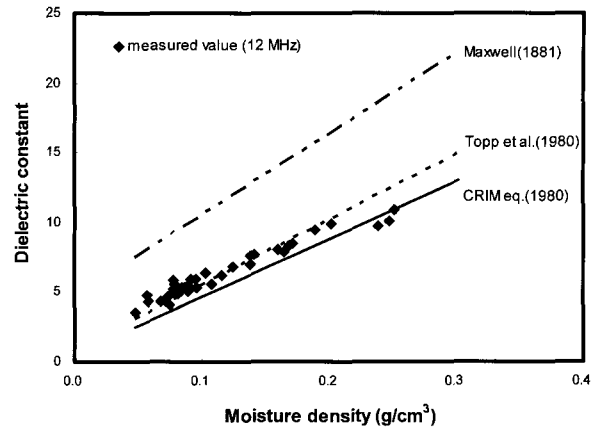
표 4. 문헌에 제시된 유전상수에 대한 관계식(Kaya & Fang 1997; Maxwell, 1873; Shen et al., 1985; Topp et al., 1980)

	Formula	Parameters
Maxwell (1873)	$\epsilon = \frac{v_1 \epsilon_1 \left( \frac{2}{3} + \frac{\epsilon_2}{3\epsilon_1} \right) + (v_2 \epsilon_2)}{v_1 \left( \frac{2}{3} + \frac{\epsilon_2}{3\epsilon_1} \right) + v_2}$	$\epsilon$ = dielectric constant of sample $v_1$ = volume of liquid $v_2$ = volume of solid $\epsilon_1$ = dielectric constant of liquid $\epsilon_2$ = dielectric constant of solid
CRIM eq. (Wharton et al., 1980)	$\sqrt{\epsilon} = nS\sqrt{\epsilon_1} + (1-n)\sqrt{\epsilon_2} + n(1-S)\sqrt{\epsilon_3}$	$\epsilon$ = dielectric constant of sample $n$ = porosity $S$ = degree of saturation of liquid 1 $\epsilon_1$ = dielectric constant of liquid 1 $\epsilon_2$ = dielectric constant of soil particle $\epsilon_3$ = dielectric constant of liquid 2 (or gas)
Topp et al. (1980)	$\epsilon = 3.03 + 9.3\theta + 146.0\theta^2 - 76.7\theta^3$	$\epsilon$ = dielectric constant $\theta$ = volumetric water content



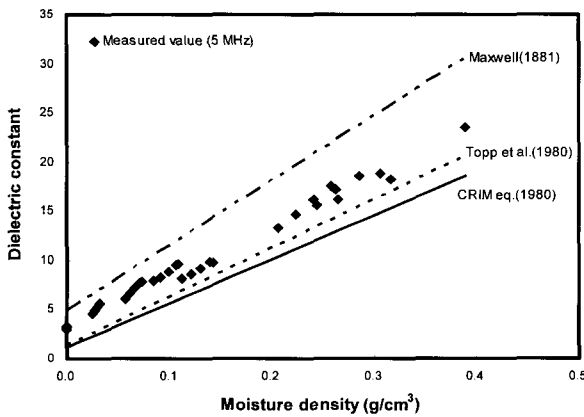


(a) 5MHz

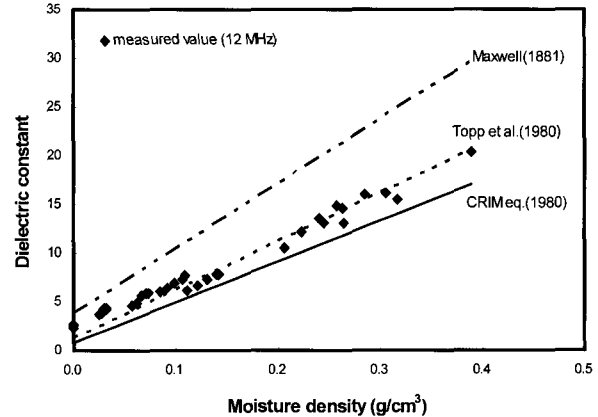


(b) 12MHz

그림 10. 화강풍화토의 유전상수 측정값과 계산값의 비교



(a) 5MHz



(b) 12MHz

그림 11. 주문진사의 유전상수 측정값과 계산값의 비교

식 (8)에 불포화지반에서의 간극률과 포화도를 대입하여 식을 정리하면 식 (10)과 같은 CRIM식이 도출된다.

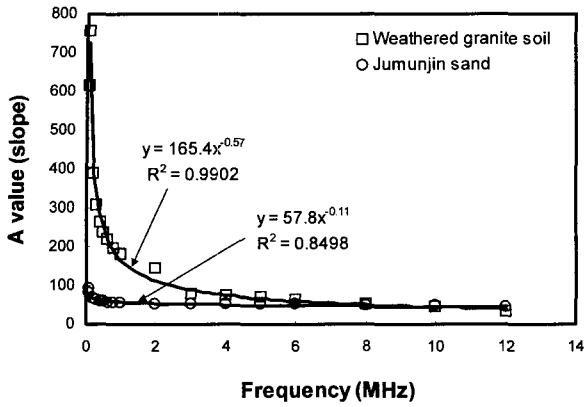
$$\begin{aligned} \sqrt{\epsilon} &= \sqrt{\epsilon_a} (1-f_s-f_w) + \sqrt{\epsilon_s} f_s + \sqrt{\epsilon_w} f_w \\ &= \sqrt{\epsilon_a} n(1-S) + \sqrt{\epsilon_s} (1-n) + \sqrt{\epsilon_w} nS \quad (10) \end{aligned}$$

5MHz와 12MHz의 주파수에 대하여 실험에서 구한 측정값과 표 4에 제시된 각각의 관계식으로부터 유도된 계산값을 비교하였다(그림 10과 11). CRIM식과 Maxwell 식 적용시  $\epsilon_1$ 의 값은 물의 유전상수 81(20°C)을 사용하였고, 흙입자의 유전상수인  $\epsilon_2$ 는 실험에서 측정된 값들을 각각의 흙에 대하여 대입하였으며, 공기의 유전상수  $\epsilon_3$ 에는 1을 대입하였다. 그 외의 관계식들에 포함된  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $n$ ,  $S$ ,  $w$ 는 각 실험단계에서 구한 결과를 적용하였다.

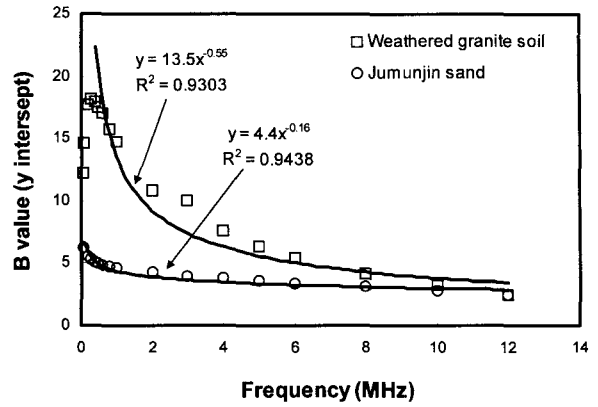
두 흙에 대한 결과 모두 12MHz에서는 실험을 통한 측정치와 Topp식, CRIM식에 의해 도출된 유전상수와

잘 일치하는 경향을 보였다. 그러나, 이론적으로 도출된 Maxwell 식은 유전상수를 과대평가하는 것으로 나타났다. 이는 Maxwell 식의 가정조건인 희석된 현탁액 속에 구형의 입자가 존재하는 것이 실제 지반과는 차이가 있기 때문이다. 그러나 5MHz의 결과를 살펴보면 측정치와 계산치가 다소 차이를 보이는 것을 알 수 있으며, 특히 주파수에 따른 유전상수의 변화가 큰 화강풍화토의 경우 그 차이가 더 크게 나타났다. 이는 흙의 유전상수가 측정하는 주파수에 따라 변하는 분산거동을 보임에도 불구하고, 기존의 관계식들은 측정 주파수에 따른 유전상수의 감소 경향을 반영하지 못하고 있기 때문이다.

본 논문에서는 각 측정주파수에 대하여 도출된 수분 밀도와 유전상수의 관계를 나타내는 회귀분석식(식 (7))에서 주파수에 대한 영향을 평가하기 위하여 식 (7)의 기울기  $A$ 값과  $y$ 절편  $B$ 값에 대한 회귀분석을 수행하였다(그림 12). 그림 12에 의하면 화강풍화토와 주문진표



(a) 기울기 A



(b) y 절편 B

그림 12. 식 (7)의 기울기와 y절편의 주파수에 대한 상관성

표 5. 회귀분석을 통한 실험식

	Experimental formula	Remarks
Weathered granite soil	$\epsilon = 165.4m_d f^{-0.57} + 13.5f^{-0.55}$	$\epsilon$ : dielectric constant $f$ : frequency (MHz) $m_d$ : moisture density
Jumunjin sand	$\epsilon = 57.8m_d f^{-0.11} + 4.4f^{-0.16}$	

준사 모두 주파수가 증가함에 따라서 식 (7)의 기울기인 A값과 y절편 B값이 모두 지수적으로 감소하는 경향을 보였으며 높은 상관성을 나타내었다. 이는 식 (7)의 기울기와 y절편이 주파수에 따라 영향을 받으며, 본 실험에서의 주파수 범위에 대해서 주파수에 의한 유전상수의 분산적 거동에 대한 정량적인 고려가 가능함을 보여 준다. 주문진표준사와 화강풍화토에 대해 그림 12에서 도출된 회귀분석식을 식 (7)에 각각 대입하여 주파수의 영향을 반영한 식을 표 5에 제시하였다. 표 5에 의하면 주문진표준사와 화강풍화토 모두 식 (11)과 같은 동일한 형태로 도출됨을 알 수 있다.

$$\epsilon = C f^{-\alpha} m_d + D f^{-\beta} \quad (11)$$

여기서, C와 D는 회귀분석을 통해 결정되는 상수로서 각각 주파수에 따른 수분밀도의 영향과 흡입자의 유전상수의 변화를 반영한다. 또한, f는 측정주파수(MHz)이며,  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 회귀분석에 의해 결정된 상수이다.

표 5에서 각각의 식에서  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 흙의 종류가 동일한 경우 유사한 값을 가지는 것으로 나타났으며,  $\alpha$ ,  $\beta$ 가 근사적으로 같은 값을 갖는다고 가정하면, 식 (11)은 식 (12)와 같은 형태로 단순화시킬 수 있다.

$$\epsilon = (C m_d + D) f^{-\alpha} \quad (12)$$

이때,  $\alpha$ 는 흙의 종류에 따라 다른 값을 갖는 상수

이다.

이 식은 지반 내 수분밀도와 유전상수의 관계를 나타내며, 이와 더불어 주파수에 따른 유전상수의 분산적 거동을 고려한 식이다. 그러나 주파수의 영향을 고려한 일반화된 관계식 제시를 위해서는 더 넓은 주파수 범위에 대하여 다양한 종류의 흙에 대한 많은 추가적인 실험과 분석이 요구된다. 앞으로 많은 실험결과를 바탕으로 흙의 수분함량과 유전상수의 일반화된 관계식이 제시된다면 유전상수의 측정으로 불포화 사질토에 대한 함수비나 건조단위중량의 정량적인 평가가 가능하며, 현장 적용을 위한 센서의 개발에 기초가 될 것으로 사료된다.

## 5. 결론

지반의 함수비와 건조단위중량의 변화에 따른 유전상수의 변화특성을 파악하기 위하여 화강풍화토와 주문진표준사의 유전상수를 75kHz~12MHz의 주파수 범위에서 측정하였다. 실내실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 사질토의 유전상수는 외부에서 가해진 전기장의 주파수가 증가함에 따라 감소하는 분산거동을 보이며, 이는 주파수가 증가함에 따라 물분자가 전기장 방향으로 나란히 배열되면서 발현되는 배향분극이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 함수비가 증가

하면 배향분극을 발현할 수 있는 물분자량이 증가하기 때문에 유전상수가 증가하게 되며, 주파수의 증가에 따른 유전상수의 감소량이 커지게 된다.

- (2) 동일한 함수비에서 사질토의 유전상수는 건조단위중량이 증가함에 따라 증가하였다. 이는 건조단위중량이 증가함에 따라 시료내에 존재하는 공기부분이 감소하게 되고 상대적으로 유전상수의 증가를 유발하는 배향분극기작에 기여할 수 있는 물의 비율이 많아지기 때문이다.
- (3) 함수비와 건조단위중량의 변화를 고려한 인자인 수분밀도(moisture density)는 사질토의 유전상수와 높은 상관성을 가지며, 본 실험에서 측정된 주파수 범위(75kHz~12MHz)에서는 수분밀도에 선형적으로 비례하였다. 이 결과는 지반의 유전상수 평가를 통하여 함수비나 건조단위중량의 평가가 가능함을 제시한다.
- (4) Maxwell식은 가정조건이 실제지반의 조건과 상이하기 때문에 계산값과 측정값에 큰 차이를 보였으며, Topp식과 CRIM식은 비교적 잘 일치하는 경향을 보였다. 그러나 기존에 제시된 유전상수 예측식은 주파수에 따른 분산거동을 고려하지 못하고 있어 저주파에서는 실험값과 잘 맞지 않는 경향을 나타내었다. 수분밀도에 대한 유전상수 관계식의 기울기와 y 절편에 대한 주파수 변화에 대한 영향에 대한 회귀 분석을 수행한 결과 주파수 영향의 정량적 고려가 가능함을 보였다. 그러나, 유전상수의 주파수에 따른 변화거동을 고려한 유전상수 예측식을 개발하기 위해서는 넓은 주파수범위에서 다양한 종류의 흙에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 금수강산 21 연구사업 중 “상수원 오염 자동감시 온라인 센서 및 시스템 개발”에 관한 연구의 일환으로 수행된 것임을 밝히며, 본 연구수행에 도움을 주신 한국과학기술연구원(KIST)의 관계자 분들께 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 오명학, 박준범, 김영진, 홍성완, 이용훈(2001), “전기저항 측정 기법을 이용한 오염물질 누출감지시스템의 개발: I. 오염물질에 의한 지반의 전기적 특성 변화”, 한국지반공학회는논문집 제17권

- 6호, pp.215-224.
2. 한정상(1998), *지하수 환경과 오염*, 박영사.
3. Arulanandan, K. and Smith, S. S.(1973), “Electrical dispersion in relation to soil structure”, *Journal of the Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.99, No.SM12, pp.1113-1133.
4. ASTM(1991), Standard test methods for electrical conductivity and resistivity of water, D 1125-91, Philadelphia, Pa.
5. Campbell, J. E.(1990), “Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz”, *Soil Science Society American Journal*, Vol.54, pp.332-341.
6. Curtis and Narayanan(1998), “Effects of laboratory procedures on soil electrical property measurements”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.47, No.6, pp.1474-1480.
7. Eller, H. and Denoth, A.(1996), “A capacitive soil moisture sensor”, *Journal of Hydrology*, Vol.185, pp.137-146.
8. Gardner, C. M. K., Dean, T. J. and Cooper, J. D.(1998), “Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor”, *Journal of agricultural Engineering Res.*, Vol.71, pp.395-403.
9. Jacobsen, O. H. and Schjonning, P.(1994), “A laboratory calibration of time-domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture”, *Journal of Hydrology*, Vol.151, pp.147-157.
10. Kaya, A. and Fang, H. Y.(1997), “Identification of contaminated soils by dielectric constant and electrical conductivity”, *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, Vol.123, No.2, pp.169-177.
11. Kingery, W. D.(1963), Introduction to Ceramics, John Wiley & Sons.
12. Maxwell, J. C.(1873), A treaties on electricity and magnetism, Oxford Univ. Press.
13. Okoye, C. N., Cotton, T. R., and OMeara, D.(1995), “Application of resistivity cone penetration testing for qualitative delineation of creosote contamination in saturated soils”, *Geoenvironment 2000, ASCE*, pp.151-166.
14. Roth, K., Schulin, R., Fluhler, H. and Attinger, W.(1990) “Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach”, *Water Resources Research*, Vol.26, pp.2267-2273.
15. Selig, E. T. and Mansukhani, S.(1975), “Relationship of soil moisture to the dielectric property”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the ASCE*, Vol.101, No.GT8, pp.755-770.
16. Shen, L. C., Savre, W. C., Price, J. M. and Athavale, K.(1985), “Dielectric properties of reservoir at ultra-high frequency”, *Geophysics*, Vol.50, pp.692-704.
17. Stephens, D. B.(1995), *Vadose Zone Hydrology*, CRC Press.
18. TJI Report(1993), New Development in Moisture Measurement, TJI May.
19. Topp, G., Davis, J. and Annan, P.(1980), “Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines”, *Water Resources Research*, Vol.16, pp.574-582.
20. Von Hippel, A. R.(1954), *Dielectric materials and applications*, New York : Wiley.
21. Wharton, R. P., Hazen, G. A., Rau, R. N. and Best, D. L.(1980), “Electromagnetic propagation logging: advances in technique and interpretation”, Soc. Petr. Eng. Paper 9267, 55th Annual Fall Tech. Conf., Dallas.

(접수일자 2002. 9. 14, 심사완료일 2002. 12. 14)