

매립지 침출수로 오염된 토양의 측정주파수에 따른 유전특성 변화

오명학^{1*} · 방선영² · 박준범¹ · 이주형³ · 이석현⁴ · 안규홍⁴

¹서울대학교 지구환경시스템공학부, ²한국전력공사 전력연구원 원자력연구실 방사선화학그룹
³한국건설기술연구원 지반연구부, ⁴한국과학기술연구원 수질환경 및 복원연구센터

Complex Dielectric Constant of Soil Contaminated by Landfill Leachate with Measured Frequency

Myoung-Hak Oh^{1*} · Sun-Young Bang² · Jun-Boum Park¹ · Ju-Hyung Lee³ · Seock-Heon Lee⁴ · Kyu-Hong Ahn⁴

¹School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University

²Radiation & Chemical Group, Nuclear Power Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

³Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute of Construction Technology

⁴Water Environment & Remediation Research Center, Korea Institute of Science and Technology

ABSTRACT

To evaluate the applicability of dielectric constant measurement method on the geoenvironmental investigation of subsurface contaminated by landfill leachate, the analysis on dielectric characteristics of sand containing contaminated pore water by landfill leachate was performed. The separate real and imaginary parts of dielectric constant were investigated in the frequency range of 75kHz to 12MHz. The real part of dielectric constant increased at the lower frequency wherea the real part of dielectric constant decreased at the higher frequency as the concentration of leachate increased. These results can be explained by the frequency dependence of space charge polarization and orientation polarization. The imaginary part of dielectric constant on the contaminated sand with leachate increased with their concentration for whole frequency range. These results are caused by the increase of energy loss due to the enhancement of conduction in soil with leachate concentration. The results in this study indicate that the dielectric constant measurement method has potential in evaluating the contaminated soil and pore water by landfill leachate.

Key words : dielectric constant, landfill leachate, contamination, frequency, polarization

요 약 문

매립지 침출수로 오염된 지반의 오염도 조사에 유전상수 측정기법의 적용성을 평가하기 위하여 매립지 침출수로 오염된 간극수를 포함한 사질토 지반의 유전특성을 분석하였다. 본 연구에서는 75kHz-12MHz 범위의 주파수에서 유전상수를 실수부와 허수부로 구분하여 분석을 수행하였다. 유전상수 실수부는 공간전하분극과 배향분극의 발현 정도에 영향을 받기 때문에 침출수 농도가 증가함에 따라 저주파 영역에서는 유전상수의 실수부 값이 증가하는 경향을 나타내었으나, 고주파 영역에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 유전상수 허수부의 경우에는 측정 주파수에 관계없이 침출수의 농도가 증가함에 따라 전류전도에 의한 에너지 손실량이 증대되어 유전상수 허수부가 증가하는 경향을 나타내었다. 유전상수의 실수부와 허수부가 간극수 내 침출수 농도에 따라 변하는 것에 기초하여 유전상수 측정기법이 침출수로 오염된 지반의 오염도 평가에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

주제어 : 유전상수, 매립지 침출수, 오염, 주파수, 분극

*Corresponding author : omyhak2@snu.ac.kr

원고접수일 : 2003. 8. 18 게재승인일 : 2004. 6. 26

질의 및 토의 : 2004. 12. 30 까지

1. 서 론

폐기물 매립장에서는 강우의 지하침투에 의해 침출수가 생성되고 이들이 하부 지하수계로 이동하여 인근 토양과 지하수를 오염시킨다¹⁾. 침출수에 의한 토양과 지하수의 오염을 방지하기 위하여 위생매립지의 경우에는 바닥층에 차수재를 설치하지만 바닥 지반과 차수재 재료의 성질, 차수재 설치 작업의 정확성, 차수재간 결합 정도에 따라서 차수재의 많은 부분이 누출이 발생할 수 있다^{2,4)}. 매립장에서 발생하는 침출수 누출에 대한 조사는 모니터링정을 설치하여 시료를 채취한후 분석하는 방법이 전형적이다. 그러나 샘플링하여 분석하는 기법은 실시간의 연속적인 모니터링이 불가능하다^{5,7)}. 또한 침출수에는 다양한 성분이 포함되어 있기 때문에 각 성분에 대한 개별적인 분석을 통해서만 오염에 대한 파악이 가능하다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 현장에서 연속적, 장기적인 모니터링을 수행하기 위한 센서 및 조사기법에 대한 연구가 미국, 영국, 네덜란드 등을 비롯한 선진국을 중심으로 많이 수행되고 있다. 특히, 전기비저항과 유전상수 측정기법은 실시간 연속적인 모니터링을 수행하는 데 매우 효과적이며 흙 속에 포함된 수분의 양을 평가하고 간극용액을 특성화하는데 매우 유용한 것으로 알려져 있다⁶⁾. 이를 토대로 흙의 전기비저항과 유전상수를 모니터링하여 토양 및 지하수의 오염도를 신속하고 경제적으로 평가하고자 하는 연구가 활발히 진행중이다⁷⁾.

전기비저항 측정에 의한 침출수 오염도 평가에 관한 연구는 지구물리탐사 기법인 전기비저항탐사나 전기비저항 콘으로 적용되어 비교적 많은 연구결과가 보고되고 있으나⁸⁻¹²⁾ 유전상수에 의한 오염도 평가에 관한 연구의 경우 아직까지는 그 연구성과가 미흡한 실정이다. 흙, 간극수, 공기의 삼상(相)으로 구성된 불포화 사질토 지반의 유전상수는 간극수에 의해 크게 영향을 받게 된다^{6,7,13-15)}. 따라서 오염된 간극유체를 포함한 토양의 경우 간극수 내에 존재하는 오염물질에 의하여 토양의 유전상수가 변하게 되므로 유전상수를 측정함으로써 토양 및 간극수의 오염도 평가가 가능하다. 실제로 중금속으로 오염된 사질토의 경우에는 중금속 이온성분이 물분자의 배향분극을 방해하여 유전상수가 감소하는 경향을 나타내는 결과가 제시되어 있다⁷⁾. 그러나, 여러 가지 성분이 복합적으로 존재하는 침출수와 같은 오염물질에 대한 유전특성은 아직까지 명확히 규명되지 않은 상태이다. 또한 기존의 연구는 유전상수 실수부에 대한 분석에 그치고 있으나 유전특성을 명확히 파악하기 위해서는 유전상수를 실수부, 허수부로

구분하여 체계적으로 분석할 필요가 있는 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 유전상수 측정기법에 의한 지반 오염도 평가에 대한 적용성을 평가하기 위하여 국내에서 토양 및 지하수를 오염시키는 대표적인 오염원 중의 하나인 매립지 침출수로 오염된 간극수를 포함한 사질토 지반의 유전특성을 분석하여 유전상수 측정을 통하여 매립지의 침출수로 오염된 지반의 오염도 조사에의 적용 가능성을 평가하고자 하였다. 또한, 유전상수 측정기법을 오염도 조사에 적용함에 있어서의 정확성을 증진시키기 위한 방안으로 복소수 유전상수(complex dielectric constant)의 개념을 도입하여 유전상수를 실수부와 허수부로 구분하여 분석하였다.

2. 이론적 배경

토양의 유전상수는 TDR(Time Domain Reflectrometer)이나 GPR(Ground Penetrating Radar)과 같은 장비에 의하여 간접적으로 구할 수 있으나 일반적으로 토양의 정전용량을 측정함으로써 구할 수 있다⁷⁾. 정전용량은 두 전극 사이에 가해진 전압 V 에 대하여 두 전극이 충전할 수 있는 전하량 Q 로 정의된다. 즉, 평행판의 면적이 A 이고 두 전극 사이의 거리가 d 인 평행판축전기(parallel plate capacitor)에서 유전률이 ϵ 인 물질이 평행판 전극 사이에 채워진다면 정전용량 C 는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$C = \frac{Q}{V} = \epsilon \frac{A}{d} \quad (1)$$

여기서, ϵ 은 유전물질의 유전률이다.

일반적으로 대상 물질의 유전상수는 진공(혹은 공기)의 유전률에 대한 대상물질의 유전률로 정의되며 이때의 ϵ_r 은 비유전상수 혹은 유전상수라 한다.

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

이상적인 유전체(ideal dielectric material)의 경우에는 교류전류를 공급하게 되면 공급된 전류는 유전체의 매질내에 모두 충전된다. 그러나 지반과 같은 매질의 경우에는 공급되는 전류가 모두 충전되지 않고 매질을 통해 전도되는 전류가 발생하게 된다¹⁶⁾. 이상적 유전체와 실제 매질에서의 전류흐름에 대한 회로도를 Fig. 1에 제시하였다. Fig. 1(a)와 같이 이상적인 유전체에서는 교류전원과 축전지가 연결된 형태의 회로로 생각할 수 있으나 Fig. 1(b)와 같이 실제 매질에서는 충전되지 않고 손실되는 전류가 발생

하게 되며 손실되는 부분을 저항으로 치환하여 나타내면 축전지와 저항의 병렬연결로 고려할 수 있다. 이와 같이 충전되는 전하량 뿐만 아니라 손실되는 정도를 고려하기 위해서는 식 (3)과 같이 유전상수를 복소수 형태로 나타내어야 한다.

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - i\epsilon_r'' \quad (3)$$

여기서, ϵ_r^* 는 복소수 유전상수(complex dielectric constant)이며, ϵ_r' 은 유전상수의 실수부로서 일반적으로 사용되는 매질의 유전상수를 나타낸다. ϵ_r'' 는 유전상수의 허수부를 나타낸다.

유전상수의 실수부는 매질의 충전거동이나 분극정도를 나타내는 값이며, 허수부는 분극이나 전도 과정 중에 발생하는 에너지의 손실을 나타내는 값이다. Fig. 1에서 충전전류(charging current) I_c 와 손실전류(loss current) I_l 은 손실각(loss angle) δ 만큼의 차이를 갖게 된다. 충전전류에 대한 손실전류의 비를 손실계수(Dissipation factor), D 혹은 손실 탄젠트(loss tangent), $\tan \delta$ 로 정의하며 다음

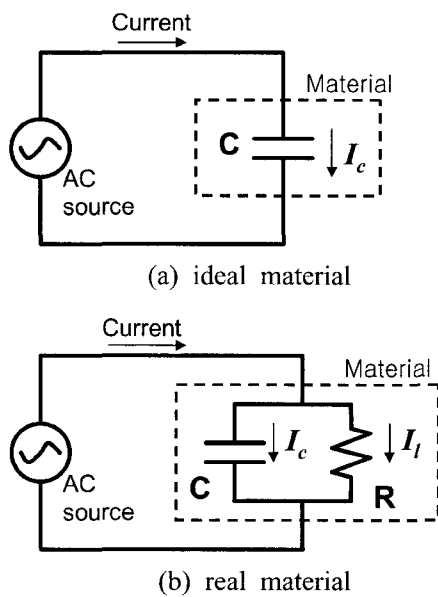


Fig. 1. Electric circuit diagram of electrical response under alternating current.

식 (4)와 같이 표현된다^{6,16}.

$$D = \tan \delta = \frac{I_l}{I_c} = \frac{1}{\omega RC} = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (4)$$

여기서, ω 는 각주파수(angular frequency, $=2\pi f$)이며, R 은 저항(resistance, Ω), C 는 정전용량(capacitance, F)을 나타낸다.

3. 실험재료 및 방법

3.1. 실험재료

본 연구에서는 토양 시료로 주문진표준사와 화강풍화토를 사용하였다. 기존의 연구에 의하면 실트, 점토와 같은 미세한 입자는 매질의 전기적 특성에 영향을 주므로 실트, 점토 입자를 함유하고 있는 토양에 대한 적용성의 검토가 필요한 것으로 판단된다. 따라서, 실제 현장에 존재하는 토양에 대한 적용성을 평가하기 위하여 국내 대표적인 토양인 화강풍화토를 서울대 구내 공사장에서 채취하여 토양 시료(SNU 화강풍화토)로 사용하였다. 두 토양의 물리적 특성은 Table 1에 요약하였으며, 입도분포 곡선은 Fig. 2와 같다. 실험에 사용된 주문진표준사는 통일분류법상 입도분포가 불량한 모래(SP)로 분류되었으며, SNU 화강풍화토는 입도분포가 양호한 모래(SW)로 분류되었다. SNU

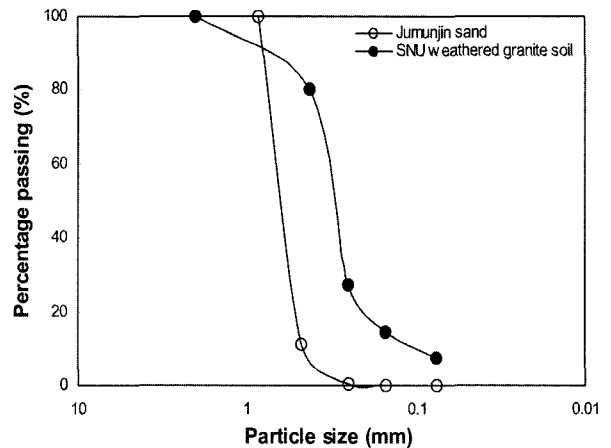


Fig. 2. Particle size distribution curve of tested soils.

Table 1. Index Properties of Jumunjin Sand and SNU Weathered Granite Soil

Soil	Coefficient of gradation	Uniformity gradation	Specific Gravity	Plastisity Index	USCS ¹⁾
Jumunjin sand	1.0	1.5	2.64	N.P. ²⁾	SP
SNU weathered granite soil	1.4	8.4	2.63	N.P. ²⁾	SW

¹⁾ USCS : Unified Soil Classification System.

²⁾ N.P. : Non-plastic.

Table 2. XRF Analysis Result of SNU Weathered Granite Soil

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	LOI ¹⁾	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

¹⁾ LOI : Loss of Ignition

Table 3. Constituents and Concentrations of Gimpo Landfill Leachate and Representative Ranges for Constituents in Sanitary Landfills

Parameter	Representative ranges ¹⁾ [mg/L]	Gimpo landfill leachate ²⁾	
		Ranges [mg/L]	Average [mg/L]
COD	1,000-90,000	3,477-5,291	4,457
Total dissolved organic carbon	200-30,000	792-1,771	1,364
Total dissolved solids	5,000-40,000	11,790-16,360	13,620
Alkalinity	500-10,000	7,345-9,704	8,829
Cl ⁻	300-3,000	3,617-5,177	4,313
NH ₄ ⁺	10-1,000	80-1,448	928
Fe	1-1,000	4.06-16.08	9.38
Mn	0.01-100	0.65-1.79	1.21
Cu	<10	0.06-1.07	0.2
Zn	0.1-100	0.6-2.1	1.3
Pb	<5	<0.2	0.02
Hg	<0.2	N.D. ³⁾	N.D. ³⁾
P	1-100	10.9-16.59	13.13

¹⁾Bedient *et al.* (1994).

²⁾환경부(2000).

³⁾N.D. : Not detected.

화강풍화토의 경우 입자크기가 0.075mm 이하인 실트, 점토 성분이 5% 정도 함유하고 있는 것을 알 수 있다. 주문진표준사에 비해 비교적 다양한 성분들로 구성된 SNU 화강풍화토의 경우 XRF(X-Ray Fluorescence Spectrometer) 분석을 통해 그 성분을 분석하였다(Table 2). 그러나 주문진표준사의 경우 주 구성성분이 SiO₂임이 잘 알려져 있기 때문에 별도의 XRF 분석을 수행하지는 않았다. 각 토양 시료는 105°C에서 24시간 이상 노건조(oven dry)하여 사용하였으며, 10번체를 통과한 시료를 사용하였다.

실험에 사용된 매립지 침출수는 김포 생활폐기물 매립지에서 채취하였다. 실제 차수재의 손상에 의해 침출수의 누출이 발생할 경우 침출원수가 지반에 직접 유입되게 되므로 본 연구에 사용된 침출수는 침출수 처리시설로 유입되기 전의 집수정에서 침출수를 채취하였다. 김포 생활폐기물 매립지에서 채취한 침출수의 성분과 농도는 표 3과 같다. 표 3에서 침출수에는 중금속 성분의 농도는 낮았으나, total dissolved solids, Cl⁻와 NH₄⁺이 다른 성분들에 비해 상대적으로 높은 농도를 나타냄을 확인할 수 있다. 이 성분들은 모두 전기장하에서 전하운반체의 역할을 하는 성분으로 높은 전기전도성을 나타나게 한다. 대부분의

성분에 대해서 표 3에서 제시된 바와 같이 김포매립지에서 채취한 침출수의 성분과 농도는 일반적인 위생매립지에서 발생하는 침출수의 성분과 농도 범위내에 존재하는 것을 확인할 수 있으며¹⁸⁾, 이는 김포매립지에서 채취한 침출수를 일반적인 위생매립지의 침출수로 고려할 수 있음을 나타낸다. 본 연구에서는 매립지 침출수로 오염된 간극수를 모사하기 위하여 침출원수를 부피비 1, 2, 3, 10%로 탈이온수에 희석하여 사용하였다.

3.2. 실험방법

정전용량은 평행판 전극을 사용하여 측정하는 것이 일반적인 방법으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 유전상수를 측정하기 위하여 평행판축전기의 원리를 이용한 아크릴몰드를 제작하였다. 아크릴몰드의 개략도를 Fig. 3에 제시하였다. LCR meter에 의해 정전용량을 측정할 때에는 전극의 면적이 넓고 전극사이의 간격이 좁아야 측정이 가능하기 때문에 원형 전극의 지름은 7cm이고, 평형하게 배치된 두 전극은 2cm의 간격을 두도록 제작하였다. 유전상수 측정을 위한 전극은 황동으로 제작되었으며, LCR meter의 clip lead와의 연결을 용이하게 하기 위하

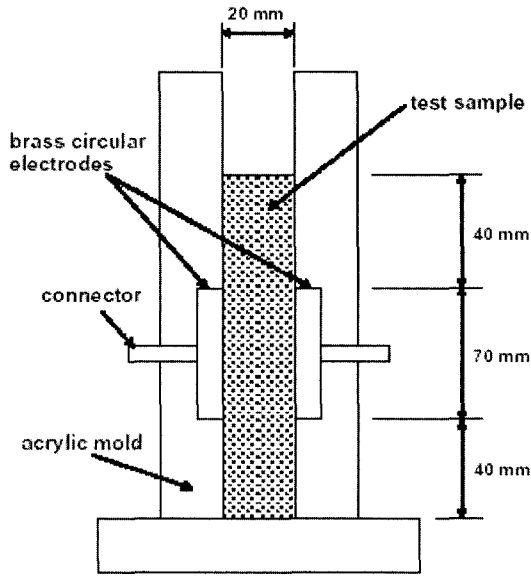


Fig. 3. Schematic diagram of acrylic mold.

여 connector를 황동으로 제작하여 전극에 부착하였다. 아크릴몰드에서 두 전극의 사이에 시료가 채워지게 되면, 시료의 양단의 전극에 의하여 평행판축전기와 동일한 형태가 된다. 이 몰드의 특징은 방수처리를 하여, 건조한 시료는 물론 포화된 흙에 대해서도 유전상수 측정이 가능하며, 연속된 지중상황을 모사하고 전극 가장자리에서의 전기장 왜곡에 의한 오차를 줄이기 위하여 전극직경의 1/2 만큼의 여유를 두었다.

시료성형 시 노건조한 흙에 물이 골고루 섞이도록 충분히 혼합한 뒤 아크릴몰드에 넣고 다짐봉을 사용하여 직접 다짐을 수행한 후 HP 4285A Precision LCR Meter의 두 개의 clip lead를 양쪽 전극에 각각 연결하여 각 시료에 대해 75kHz~12MHz 주파수 범위에서 정전용량(C)을 측정하였다. 주파수를 변화시켜가며 측정하더라도 모든 경우에 대해 LCR meter에서 전압은 항상 1V로 고정시켰다. 본 실험에서는 몰드에 부착된 전극의 단면적과 전극 사이의 간격에 대해서 흙시료의 정전용량(C)을 측정하여 토양 시료의 유전상수를 계산하였다. 제작한 몰드는 평행판 축전기와 동일한 원리이므로 토양의 유전상수 실수부와 허수부는 각각 식 (5), (6)과 같은 관계에 의하여 도출하였다.

$$\epsilon_r' = \frac{C}{\epsilon_0 \times \frac{A}{d}} \quad (5)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{\epsilon_r'}{\omega RC} \quad (6)$$

여기서, C는 정전용량, ϵ_0 는 진공의 유전율(8.854×10^{-12} F/m), A는 전극의 단면적, d는 전극 사이의 거리이다.

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.

토양의 유전상수는 수분함량에 따라 변하며, 체적함수비와 높은 상관성을 갖는 것으로 알려져 있다^{14,15,19-21}. 따라서 본 연구에서는 토양 시료에 포함된 수분함량을 체적함수비로 도출하여 제시하였다.

4. 결과 및 고찰

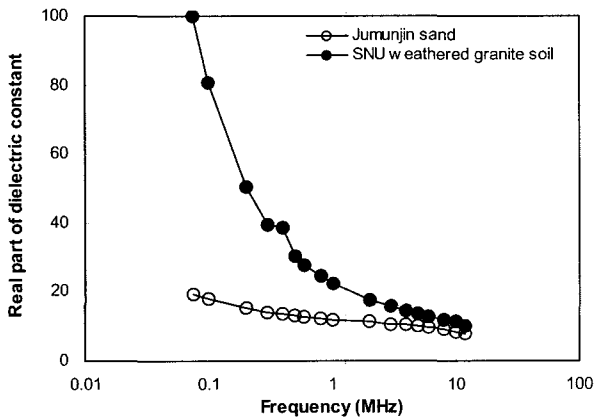
4.1. 측정주파수에 따른 토양의 유전거동

유전상수는 교류전류를 사용하여 측정하므로 측정주파수의 영향을 받는다. Fig. 4는 탈이온수와 혼합하여 체적함수비가 0.14인 경우의 주문진표준사와 화장품화토의 주파수에 따른 유전상수 실수부와 허수부의 변화를 보여준다.

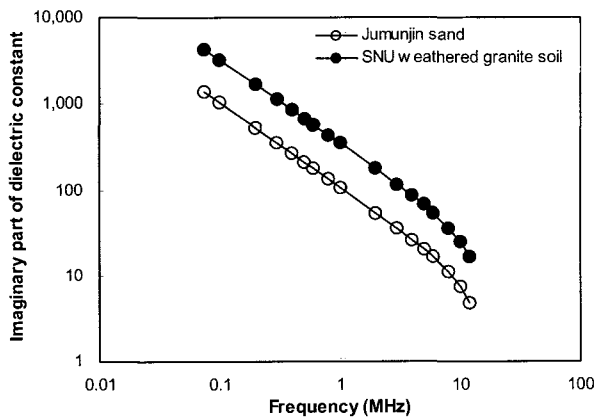
Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 토양의 유전상수 실수부는 주파수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내게 된다. 이는 서로 다른 상(相)인 물과 흙입자의 구조적인 특징과 흙의 이질성에 기인하는 것으로 알려져 있다^{22,23}. 주파수에 따른 유전상수의 변화는 주파수에 따라 발현되는 분극기작의 차이로 설명될 수 있다. 분극현상은 원자력 혹은 분자력에 의하여 발생하며 외부전기장에 의하여 물질내에 존재하는 전하들이 상대변위를 발생함으로써 나타난다. 분극현상은 전지분극(electronic polarization), 원자분극(atomic polarization), 배향분극(orientation polarization) 그리고 공간전하분극(space charge polarization)의 네 가지 형태로 발현된다^{6,7,15,16}. Fig. 5는 분극기작과 주파수에 따른 분극기작의 발현정도를 제시한 그림이다. 네 가지의 분극현상들은 외부로부터 가해진 교류전기장에 대하여 반응하는 시간이 각각 다르기 때문에 유전상수 발현에 기여하는 순분극현상은 주파수에 따라 감소하게 된다¹⁵. Fig. 4(a)에서 본 연구의 측정 주파수 범위에서 나타나는 유전상수 실수부의 주파수에 따른 변화는 Fig. 5에 제시된 바와 같이 주로 공간전하분극과 배향분극의 발현 정도에 따라 발생하는 것을 알 수 있다. 공간전하분극은 매질 내에 존재하는 전하운반체가 전기장 하에서 이동하여 각 상(phase)

의 계면(interface)에 전하가 충전되면서 나타나는 분극으로 다른 세 가지 분극기작에 비해 분극의 크기가 훨씬 크고 다상(multiphase)으로 이루어진 경우에 크게 나타난다^{7,16}. 배향분극은 매질 내에 존재하는 물분자와 같은 쌍극자가 외부의 전기장에 의해서 재배열하여 방향성을 갖게 됨으로써 나타나는 분극이다. 즉, 수백 kHz 이하의 저주파 영역에서는 공간전하분극이 크게 발현되기 때문에 높은 유전상수 값을 나타내는 것이다.

Fig. 4(b)는 주문진표준사와 화강풍화토의 주파수에 따른 유전상수 허수부의 변화를 나타낸 것이다. 유전상수의 허수부 또한 주파수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타낸다. 유전상수 허수부는 분극기작의 발현 중에 발생하는 에너지의 손실이나 전류의 전도에 의한 에너지의 손실을 반영한다. 주파수가 증가함에 따라 분극의 발현이 감소하기 때문에 유전상수 허수부는 주파수 증가에 따라 감소하는 경향을 나타낸다.



(a) real part of dielectric constant



(b) imaginary part of dielectric constant

Fig. 4. Real and imaginary part of dielectric constant of soil (volumetric water content = 0.14) with measuring frequency.

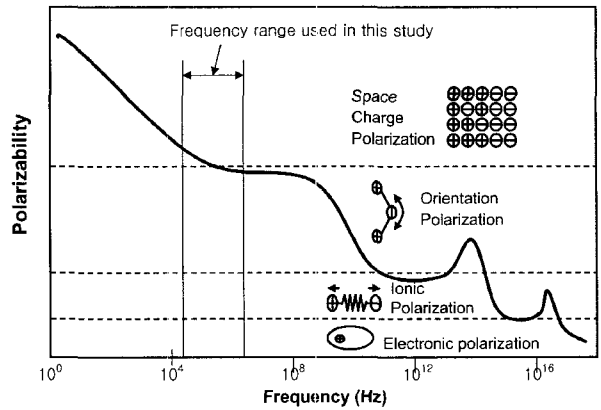


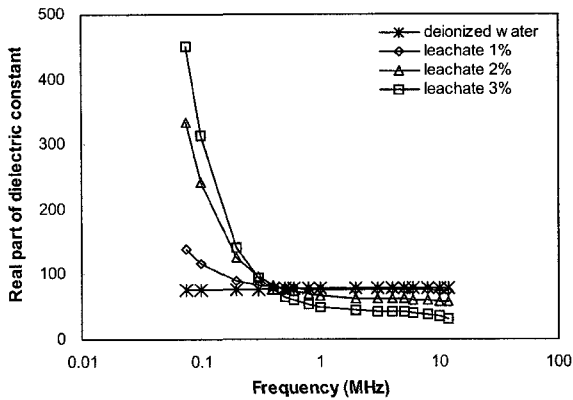
Fig. 5. Polarization mechanisms and its dependency on the frequency (modified after Von Hippel 1994).

화강풍화토와 주문진표준사의 유전거동을 비교하여 보면, Fig. 4(a)에서 화강풍화토의 유전상수 실수부가 주문진표준사의 유전상수 실수부에 비해 더 큰 값을 갖는 결과를 보인다. 특히, 공간전하분극이 발현되는 수백 kHz 이하의 저주파 영역에서 더 큰 유전상수 실수부 값의 차이를 나타내었다. 상대적으로 입도분포가 좋은 화강풍화토의 경우 주문진표준사에 비해 실트 및 점토질을 포함하는 세립자의 성분이 많고, 더 큰 비표면적을 가지게 된다. 따라서, 흙 입자와 공기 혹은 흙입자와 물의 경계면에서 발현될 수 있는 공간전하분극이 화강풍화토의 경우에 더 많이 발현될 수 있다. Fig. 4(b)에서 주문진표준사에 비해 화강풍화토의 유전상수 허수부가 모든 주파수 영역에 대하여 높은 값을 나타낸다. 이 또한 화강풍화토의 경우 더 많은 실트 및 점토 성분을 함유하고 있다는 사실에 기인한다. 실트 및 점토 성분은 토양 입자 자체가 전기 전도성을 띠고 있기 때문에 실트 및 점토 성분이 많을수록 전류전도에 의한 에너지 손실이 많이 발생하게 된다. 흙의 종류에 따른 일반적인 유전거동 특성을 분석하기 위해서는 다양한 종류의 흙에 대한 실험이 추가되어야 할 것이다.

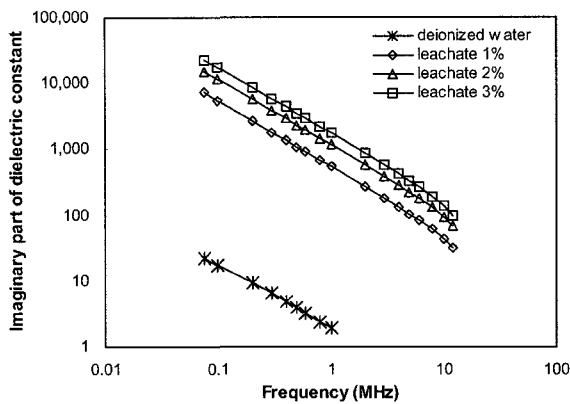
4.2. 침출수의 유전거동

Fig. 6은 침출수 희석 용액의 유전상수 측정 결과를 나타낸 그림이다. 부피비 10%로 희석된 침출수 용액의 경우에는 본 연구에서 사용한 4285A LCR meter의 측정능을 초과하여 측정이 불가능하였다.

Fig. 6(a)에서 탈이온수의 유전상수 실수부는 주파수의 증가에 관계없이 78 정도의 일정한 값을 나타내었다. 침출수의 경우 물에 대한 부피비 1% 이상의 농도에서 각



(a) real part of dielectric constant



(b) imaginary part of dielectric constant

Fig. 6. Real and imaginary part of dielectric constant of Gimpo landfill leachate.

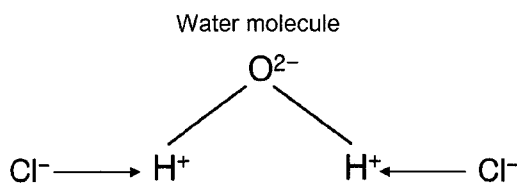


Fig. 7. Illustration of interaction of ionic constituents in leachate with water molecules (modified after Kaya and Fang 1997).

Table 4. Electrical Conductivity of Diluted Leachate Solution

	Electrical conductivity [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
Leachate 0% (Deionized water)	0.45
Leachate 1%	291
Leachate 2%	474
Leachate 3%	816
Leachate 10%	2,560

각 탈이온수의 유전거동과 뚜렷한 차이를 보였다. 측정주파수에 따라서 약 250kHz 이하의 주파수에서는 침출수

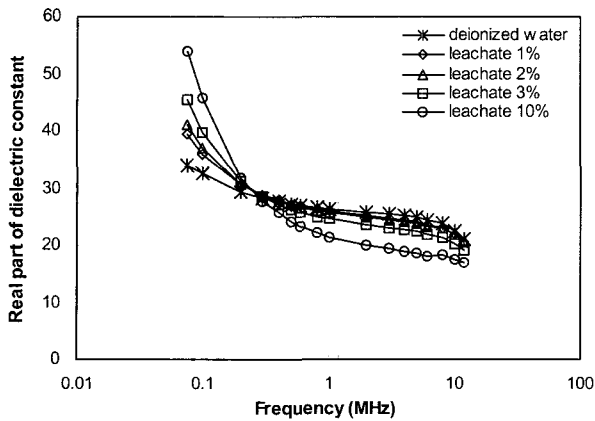
의 농도가 높아짐에 따라 유전상수 실수부가 증가하는 경향을 나타내었으며, 250kHz 이상의 주파수에서는 침출수의 농도가 높아짐에 따라 유전상수가 감소하는 경향을 나타내었다. 250kHz 이하의 저주파 영역에서는 침출수에 존재하는 많은 이온 성분들이 전하운반체로 작용하여 공간전하분극이 발현되므로 침출수 농도에 따라 유전상수가 증가하게 된다. 반면 250kHz 이상의 고주파 영역에서는 공간전하분극이 발현되지 않기 때문에 배향분극의 발현 정도가 유전상수 값에 영향을 주게 된다. 침출수 희석 용액 속에 존재하는 이온들은 물분자와 서로 상호작용을 일으킨다. Fig. 7과 같이 침출수에 많이 존재하는 Cl^- 이온들은 물분자의 양의 부분(H^+)쪽으로 이끌리게 된다⁶⁾. 이러한 상호작용에 의하여 물분자는 쌍극자모멘트(dipole moment)가 감소하고, 외부전기장에 대하여 물분자가 재배열하는 반응능력이 떨어지게 된다. 그 결과 물분자의 배향분극 발현이 줄어들어 유전상수는 감소하게 된다. 이러한 기작에 의하여 침출수의 농도가 높아질수록 유전상수의 감소는 더 커지게 된다.

Fig. 6(b)에서 유전상수 허수부의 경우에는 모든 주파수 영역에 대하여 침출수 농도가 높아짐에 따라 더 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 탈이온수의 경우에는 1MHz 이상의 주파수에서는 매우 낮은 값을 나타내므로 측정기의 측정능을 초과하여 측정이 불가능하였다. 침출수 농도에 따른 유전상수 허수부의 증가는 전류전도에 의한 손실 에너지의 증가로 설명될 수 있다. 실제로 표 4에 제시된 바와 같이 침출수 희석 용액의 전기전도도는 침출수 농도에 비례해서 증가하는 것을 확인할 수 있다. 높은 전기전도도를 갖는 매질의 경우 전기장이 가해졌을 때 더 많은 전하의 이동이 발생하여 전류전도가 많이 발생하게 된다. 즉, 침출수 희석 용액의 농도가 높을수록 전류전도에 기여하는 전하운반체가 많기 때문에 전류전도에 의한 에너지 손실량이 커지게 된다. 따라서, 에너지 손실량을 반영하는 유전상수 허수부는 침출수 희석 용액의 농도가 높을수록 더 커지게 된다.

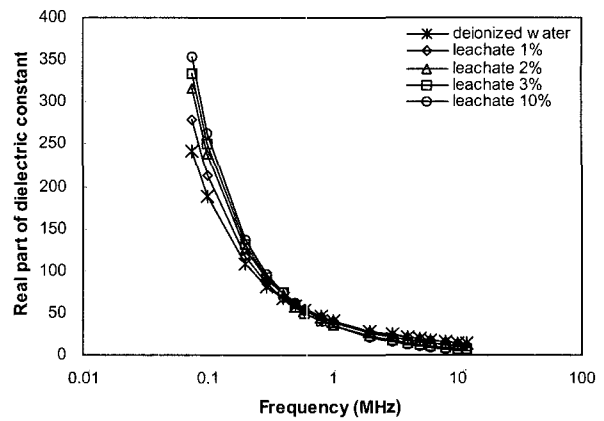
Fig. 6에 제시된 침출수 농도에 따른 유전상수 실수부, 허수부의 변화는 유전상수의 측정에 의한 모니터링 기법이 침출수 오염의 감지 기술에 유용하게 활용될 수 있음을 제시하는 결과이다.

4.3. 침출수로 오염된 간극수를 포함한 토양의 유전거동

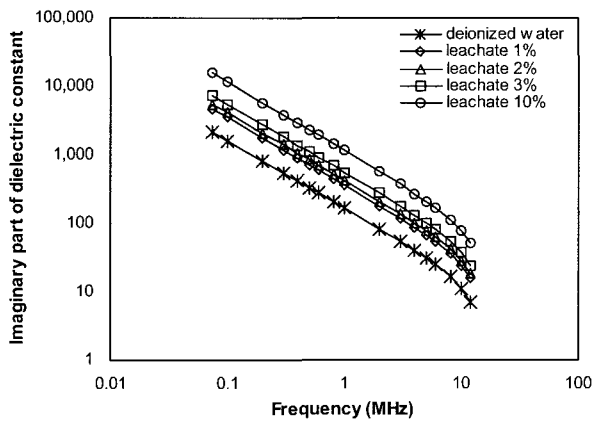
동일한 지반조건에서 침출수로 오염된 간극수를 포함한 사질토 지반의 유전거동을 분석하기 위하여 실험결과 중에서 주분진표준사의 경우 체적함수비가 0.39, 화강풍화



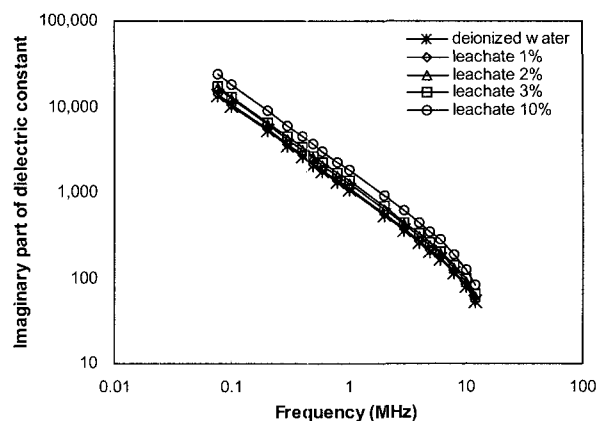
(a) real part of dielectric constant



(a) real part of dielectric constant



(b) imaginary part of dielectric constant



(b) imaginary part of dielectric constant

Fig. 8. Real and imaginary part of dielectric constant of jumnjin sand(volumetric water content=0.39) containing contaminated pore fluid by landfill leachate.

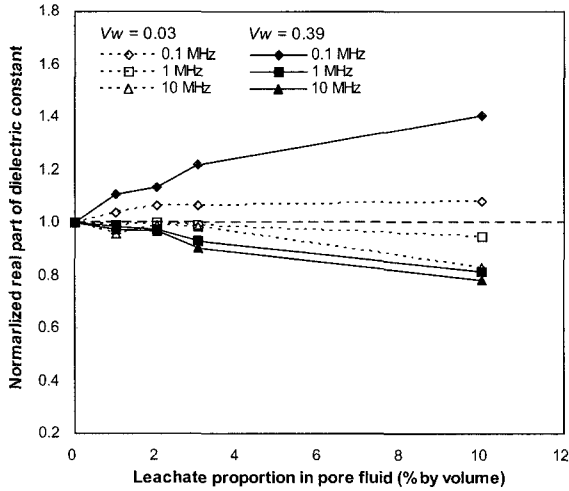
Fig. 9. Real and imaginary part of dielectric constant of SNU weathered granite soil (volumetric water content=0.32) containing contaminated pore fluid by landfill leachate.

토의 경우 체적함수비가 0.32로 성형된 시료에 대하여 침출수 오염농도에 따른 유전거동의 변화를 비교, 분석하였다. 침출수 희석용액으로 성형된 주문진표준사와 화강풍화토의 주파수에 따른 유전거동을 Fig. 8과 9에 각각 도시하였다.

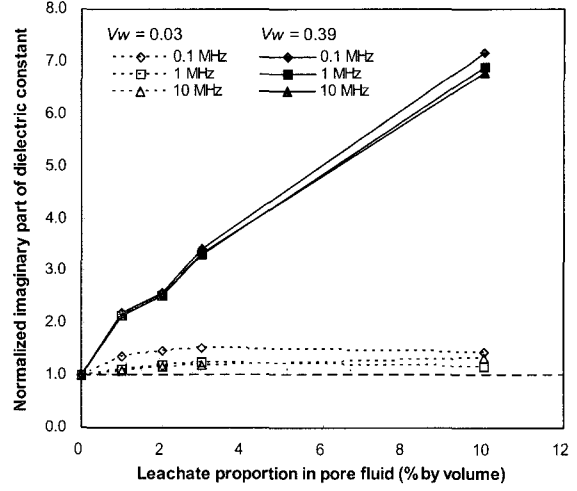
Fig. 8과 9에 의하면 흙의 종류에 관계없이 침출수로 오염된 간극수를 포함한 토양의 유전상수의 실수부와 허수부는 침출수 농도에 따라 유사한 경향을 나타낸다. Fig. 8(a)와 Fig. 9(a)에서 유전상수 실수부의 경우 약 250kHz 이하의 주파수에서는 간극수 내의 침출수 농도가 증가함에 따라 유전상수가 증가하는 경향을 나타내며, 이는 앞서 설명한 바와 같이 공간전하분극의 발현에 의한 것으로 설명될 수 있다. 250kHz 이상의 주파수에서는 침출수 농도가 증가함에 따라 유전상수가 감소하는 경향을 나타낸다. 250kHz 이하의 주파수에서는 공간전하분극의 발현이

거의 없으며, 배향분극의 발현정도가 유전상수 값에 영향을 주게 된다. 침출수의 농도가 높아짐에 따라 물분자의 배향분극의 발현을 방해하는 이온성분들이 증가하기 때문에 침출수 농도의 증가에 따라 토양의 유전상수가 감소하게 된다. Fig. 8(b)와 Fig. 9(b)에서 유전상수 허수부는 모든 주파수 범위에 대해서 침출수의 농도가 높을수록 더 큰 값을 나타내었다. 이는 시료 내에 존재하는 침출수 농도가 높을수록 침출수내에 포함된 많은 이온성분들에 의하여 시료 내의 전류전도가 증가하게 되어 전류전도에 의한 에너지 손실량이 증가하기 때문이다.

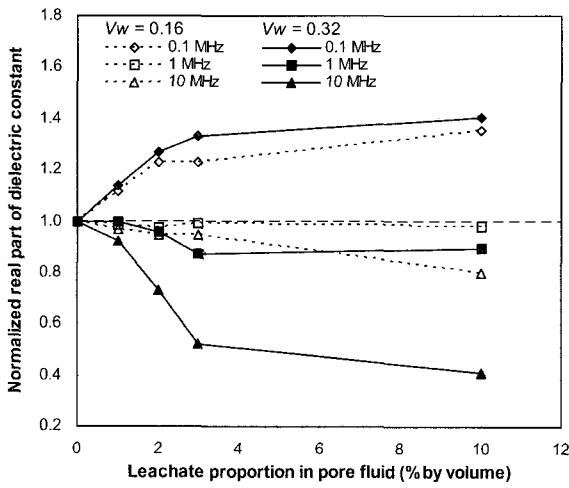
유전상수 측정에 의하여 침출수 오염도 조사의 가능성을 평가하기 위하여 침출수로 오염된 시료에 대해 0.1, 1, 10MHz에서 측정된 유전상수의 실수부와 허수부를 탈이온수로 성형된 시료의 유전상수의 실수부와 허수부로 나누어 정규화한 유전상수를 도출하여 Fig. 10과 11에 도시



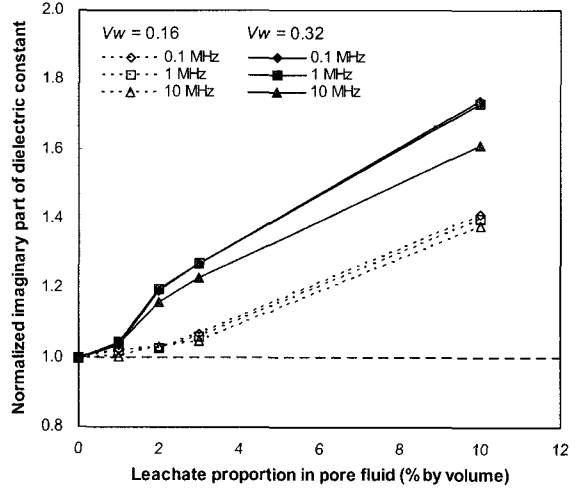
(a) Jumunjin sand



(a) Jumunjin sand



(b) SNU weathered granite soil



(b) SNU weathered granite soil

Fig. 10. Normalized real part of dielectric constant of soil with leachate proportion in pore fluid at 0.1, 1 and 10MHz.

Fig. 11. Normalized imaginary part of dielectric constant of soil with leachate proportion in pore fluid at 0.1, 1 and 10MHz.

하였다.

Fig. 10과 같이 유전상수 실수부의 경우 주문진표준사와 화강풍화도 모두 0.1 MHz의 저주파에서는 침출수 농도가 높아짐에 따라 유전상수가 증가하는 경향을 나타내었으며, 주파수가 10MHz의 고주파의 경우에는 침출수 농도 증가에 따라 유전상수가 감소하는 경향을 뚜렷하게 나타내었다. 그러나 주파수가 1MHz인 경우에는 침출수 농도 변화에 따른 유전상수의 변화가 그리 크지 않게 나타났다. 반면에 Fig. 11에서 알 수 있듯이 유전상수 허수부의 경우에는 유전상수 실수부와 달리 간극수내 침출수의 농도가 증가함에 따라 모든 측정주파수에서 유전상수 허수부가 증가하는 경향을 나타내었으며, 측정주파수에 따른 차이가 거의 나타나지 않았다.

침출수 오염도에 따른 유전상수의 실수부와 허수부의 변화를 비교하면 침출수 농도에 따른 유전상수 허수부의 변화가 더욱 명확하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 침출수가 전기전도성이 큰 오염물질이기 때문에 나타나는 현상이다. 즉, 유전상수 허수부는 시료 내에 발생하는 전류전도에 의한 유전손실을 반영하는 값이기 때문에 침출수의 농도가 높을수록 전류전도성이 증대되어 유전상수 허수부가 명확한 증가경향을 나타내는 것이다. 이는 간극수가 침출수와 같은 전도성 오염물질로 오염된 경우 유전상수 허수부에 대한 분석이 오염도 평가에 더 유용한 자료가 될 수 있음을 제시하는 결과이다.

Fig. 10과 11에서 토양의 체적함수비에 따른 유전상수의 변화경향을 분석하면, 주문진표준사와 화강풍화도 모

두 체적함수비가 높은 경우에 침출수 농도에 따른 변화경향이 더욱 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉, 주문진표준사의 경우에는 체적함수비가 0.39 일때 체적함수비가 0.03인 토양보다 농도변화에 따른 유전상수 변화가 더 크게 나타났으며(Fig. 10(a), Fig. 11(a)), 화강풍화토의 경우에는 체적함수비가 0.32일 때 더 뚜렷한 변화경향을 나타내었다(Fig. 10(b), Fig. 11(b)). 이는 체적함수비가 높을수록 침출수로 오염된 간극수의 절대량이 증가하기 때문에 나타나는 당연한 결과로 판단된다.

본 연구의 결과는 유전상수 측정에 의하여 토양 내 간극수의 침출수 오염도를 추정하는 데 활용될 수 있음을 암시한다. 다만, 유전상수는 지반 내 수분함량에 영향을 받으므로 토양의 체적함수비에 대한 평가가 선행되어야 정확한 오염도 평가를 수행할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 유전상수 측정을 통한 침출수 오염도 평가에 있어서 측정주파수에 따른 영향을 고려해야 하며, 정확한 오염도 평가를 위해서는 유전상수의 실수부 뿐만 아니라 허수부를 모두 측정하여 분석하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

5. 결 론

유전상수 측정기법의 지반 오염도 조사에의 적용성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 매립지 침출수로 오염된 간극수를 포함한 사질토 지반의 유전특성을 평가함으로써 유전상수 측정을 통하여 매립지의 침출수로 오염된 토양의 오염도 조사의 가능성을 평가하고자 하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론을 정리하면 다음과 같다.

1) 토양의 유전상수 실수부는 전기장의 주파수가 증가함에 따라 감소하는 거동을 나타내었다. 저주파 영역에서는 공간전하분극이 발현되기 때문에 높은 유전상수 값을 나타내며, 주파수가 높아짐에 따라 공간전하분극이 발현되지 않게 되므로 유전상수는 감소하는 경향을 나타낸 것으로 판단된다. 유전상수 허수부의 경우에는 주파수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, 이는 유전상수 허수부가 분극에 의한 에너지 손실량을 반영하기 때문인 것으로 판단된다.

2) 주문진표준사보다 화강풍화토의 경우에 더 큰 유전상수 실수부 및 허수부의 값을 나타내었는데 이는 화강풍화토에 더 많은 실트 및 점토 성분이 포함되어 있기 때문에 공간전하분극의 발현이 더 크고, 입자의 표면전도에 의한 전류손실 또한 더 많이 발생했기 때문인 것으로 사료된다.

3) 침출수로 오염된 간극수를 포함한 토양은 간극수의 침출수 오염도에 따라 유전상수가 변화되는 양상을 나타내었다. 유전상수 실수부는 250kHz를 기준으로 저주파 영역에서는 공간전하분극의 발현에 의하여 침출수 농도가 증가함에 따라 유전상수의 실수부 값이 증가하는 경향을 나타내었으나, 고주파 영역에서는 침출수 내에 존재하는 이온성분들이 물분자의 쌍극자 모멘트를 감소시켜 물분자에 의한 배향분극 발현을 방해하기 때문에 유전상수 실수부가 감소하는 경향을 나타내었다. 유전상수 허수부의 경우에는 측정 주파수에 관계없이 침출수의 농도가 증가함에 따라 전기전도도가 증가하기 때문에 전류전도에 의한 에너지 손실량이 증대되어 유전상수 허수부가 뚜렷하게 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 유전상수 측정기법이 토양의 침출수 오염도 조사에 활용될 수 있음을 제시한다.

4) 유전상수 측정에 의한 침출수 오염도 평가에 있어서 유전상수 허수부의 경우에는 측정주파수에 관계없이 일정한 경향을 나타내지만 유전상수 실수부의 경우에는 측정주파수에 따라 상이한 경향을 나타내므로 측정주파수에 대한 고려가 필요하다. 또한 간극수가 침출수와 같은 전도성 오염물질로 오염된 경우 유전상수 실수부에 비해 유전상수 허수부가 오염도에 따른 유전상수의 변화가 더 뚜렷하게 나타났었다. 따라서, 정확한 오염도 평가를 위해서는 유전상수 실수부 뿐만 아니라 허수부에 대한 추가적인 분석이 필요한 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국과학기술연구원(KIST) 금수강산21 연구과제로부터 연구비를 지원받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 한정상, 지하수환경과 오염, 박영사, 서울, pp. 683 (1998).
2. Colucci, P., and Lavagnolo, M.C., "Three years field experience in electrical control of synthetic landfill liners", *Proceedings Sardinia '95, 5th International Landfill Symposium*, pp. 437-452 (1995).
3. Darilek, G.T., Corapcioglu, M.Y., and Yeung, A.T., "Sealing leaks in geomembrane liners using electrophoresis", *Journal of Environmental Engineering*, **122**, pp. 540-544 (1996).
4. 오명학, 이주형, 박준범, 김형석, 강우식, "전기저항 측정기법을 이용한 오염물질 누출감지시스템의 개발: II. 현장모형시험을 통한 매립지에의 적용성 평가", 한국지반공학회논문집,

- 17, pp. 225-233 (2001).
5. Okoye, C.N., Cotton, T.R., and O'Meara, D., "Application of resistivity cone penetration testing for qualitative delineation of creosote contamination in saturated soils", *Geoenvironment 2000*, ASCE, pp. 151-166 (1995).
 6. Kaya, A., and Fang, H.Y., "Identification of contaminated soils by dielectric constant and electrical conductivity", *Journal of Environmental Engineering*, **123**, pp. 169-177 (1997).
 7. 이주형, 오명학, 박준범, "오염된 사질토 지반의 측정주파수에 따른 유전상수 변화", *대한환경공학회논문집*, **25**, pp. 385-392 (2003).
 8. 윤길립, 유 찬, 이영남, 윤춘경, 이용길, "오염지반의 전기비저항치와 토성과의 상관성 연구", *한국지반공학회논문집*, **14**, pp. 79-92 (1998).
 9. 윤춘경, 유 찬, "침출수로 오염된 불포화사질토의 전기비저항 변화에 대한 연구", *한국농공학회지*, **40**, pp. 112-122 (1998).
 10. 유 찬, 윤춘경, 이영남, 이용길, "사질토 간극수의 이온 성분들에 따른 전기비저항값의 변화", *한국지반공학회논문집*, **15**, pp. 185-196 (1999).
 11. 손호용, 김지수, 송영수, 윤왕중, 김인수, 서만철, 김기영, 조 인기, 김학수, *지반환경물리탐사*, 시그마프레스, 서울, pp. 375-376 (2000).
 12. Yoon, G.L., Oh, M.H., and Park, J.B., "Laboratory study of landfill leachate effect on resistivity in unsaturated soil using cone penetrometer", *Environmental Geology*, **43**, pp. 18-28 (2002).
 13. Arulanandan, K., and Smith, S.S., "Electrical dispersion in relation to soil structure", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **99**, pp. 1113-1133 (1973).
 14. Selig, E.T., and Mansukhani, S., "Relationship of soil moisture to the dielectric property", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, **101**, pp. 755-770 (1975).
 15. 이주형, 오명학, 박준범, 김형석, "수분함량과 측정주파수에 따른 사질토 지반의 유전상수 변화", *한국지반공학회논문집*, **18**, pp. 129-139 (2002).
 16. Von Hippel, Dielectric materials and applications, The Technology Press of M.I.T. and John Wiley & Sons, Inc., New York (1954).
 17. 환경부, 폐기물 매립지에서 배출되는 오염물질로 인한 환경 피해의 인과관계 규명 및 피해액 산정을 위한 연구 (2000).
 18. Bedient, P.B., Rifai, H.S., and Newell, C.J., *Groundwater contamination*, PTR Prentice Hall, New Jersey, pp. 89 (1994).
 19. Topp, G., Davis, J., and Annan, P., "Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines" *Water Resources Research*, **16**, pp. 574-582 (1980).
 20. Gardner, C.M.K., Dean, T.J., and Cooper, J.D., "Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor", *Journal of Agricultural Engineering Research*, **71**, pp. 395-403 (1998).
 21. Shinn, J.D., Timian, D.A., Morey, R.M., Mitchell, G., Antle, C.L., and Hull, R., "Development of a CPT deployed probe for in situ measurement of volumetric water content and electrical resistivity", *Field Analytical Chemistry and Technology*, **2**, pp. 103-109 (1998).
 22. Smith, S.S., and Arulanandan, K., "Relationship of electrical dispersion to soil properties", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **107**, pp. 591-604 (1981).
 23. Carrier, M., and Soga, K., "A Four Terminal Measurement System for the Investigation of the Dielectric Properties of Clay at Low Frequencies", *Geoenvironmental Engineering*, Thomas Telford, London, pp. 3-10 (1997).