

중금속으로 오염된 포화시질토의 저주파대에서의 유전특성

방선영 · 오명학 · 김용성 · 박준범

서울대학교 지구환경시스템공학부 (afgm5295@snu.ac.kr)

<요약문>

Laboratory tests were performed to investigate the dielectric property of saturated sands contaminated by heavy metals solution at low frequency. Differences of contamination and the real part of dielectric constant depend on heavy metal concentration was measured at low frequency, 100kHz below. The optimal frequency to develop the detection potentials of monitoring was 1kHz, 10kHz, 100kHz. At this frequency, Heavy metal contamination of saturated sands contamination can be recommended by analysis of complex dielectric constant.

Key word : dielectric constant, saturated sand, heavy metal, polarization, frequency

1. 서 론

전기비저항과 유전상수 측정기법은 실시간 연속적인 모니터링을 수행하는 데 매우 효과적이며 흙 속에 포함된 수분의 양을 평가하고 간극용액을 특성화하는데 매우 유용한 것으로 알려져 있다(Kaya and Fang 1997). 이를 토대로 흙의 전기비저항과 유전상수를 모니터링하여 토양 및 지하수의 오염도를 신속하고 경제적으로 평가하고자 하는 연구가 활발히 진행 중이다(이주형 등 2003). 전기비저항 측정에 의한 오염도 평가에 관한 연구는 지구물리탐사 기법인 전기비저항탐사나 전기비저항콘으로 적용되어 비교적 많은 연구결과가 보고되고 있으나 유전상수에 의한 오염도 평가에 관한 연구의 경우 아직까지는 그 연구성도가 미흡한 실정이다. 토양의 유전상수는 간극수에 의해 크게 영향을 받게 되므로 간극수가 오염되었을 경우 간극수 내에 존재하는 오염물질에 의하여 토양의 유전상수가 변하게 된다. 또한 유전상수는 주파수의 변화에 따른 분극(polarization)에 영향을 받는다. 현재까지의 연구 결과, 저주파 대에서 조건변화에 따른 지반의 유전적 특성이 고주파 대에서 보다 큰 차이를 보이는 것으로 알려져 있지만 명확하게 정립되지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 중금속으로 오염된 포화된 사질토의 유전적 특성을 100Hz-10MHz의 저주파대에서 규명하여 대수층의 오염모니터링 가능성을 평가하고, 중금속 오염도 평가에 적합한 최적 주파수를 알아보았다.

2. 이론적배경 및 실험방법

이상적인 유전체(ideal dielectric material)의 경우에는 교류전류를 공급하게 되면 공급된 전류는 유전

체의 매질내에 모두 충전된다. 그러나 지반과 같이 일반적인 매질의 경우에는 공급되는 전류가 모두 충전되지 않고 매질을 통과하는 전류가 발생하게 된다. 이와 같이 충전되는 전하량뿐만 아니라 손실되는 정도를 고려하기 위해 도입된 것이 식 (1)과 같이 유전상수를 복소수 형태로 나타내는 것이다.

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

여기서, ϵ^* 는 복소수 유전상수(complex dielectric constant)이며, ϵ' 은 유전상수의 실수부로서 일반적으로 사용되는 매질의 유전상수를 나타낸다. ϵ'' 는 유전상수의 허수부를 나타낸다.(Von Hippel 1954; Kaya and Fang 1997). 유전상수의 실수부는 매질의 충전거동이나 분극정도를 나타내는 값이며, 허수부는 분극이나 전도 과정 중에 발생하는 에너지의 손실을 나타내는 값이다. 주파수에 따른 유전상수의 실수부와 허수부를 측정함으로써 도출되는 물질의 유전거동은 그 물질의 특성을 파악하는 데 기초가 될 수 있다.

본 연구에 사용된 실험재료는 대표적 사질토인 화강풍화토와 주문진표준사를 사용하였다. 사용된 풍화토는 현장시료에 대한 적용성을 평가하기 위하여 관악산 인근의 토양으로 통일분류법상 입도가 좋은 모래(SW)로 분류되었으며 주문진표준사는 입도분포가 나쁜 모래(SP)로 분류되었다 토양시료는 105℃에서 24시간 이상 노건조(oven dry)하여 10번째 통과시료에 대하여 실험을 수행하였다.

중금속으로 오염된 포화된 사질토의 유전특성을 알아보기 위해 오염물질로 수은, 납, 카드뮴, 알루미늄을 선정하여 사용하였다. 중금속 용액은 수은(Hg), 납(Pb), 카드뮴(Cd), 알루미늄(Al) 1000ppm 표준 용액(standard solution)(Kanto chemical Co. Japan)을 탈이온수에 희석하여 각각 10, 20, 30, 50, 70, 100mg/l로 조제하여 사용하였다.

포화된 사질토의 유전상수 측정을 위해 평행판축전기의 원리를 이용한 사각 아크릴 몰드를 제작하여 사용하였다. 교류전류에서의 유전상수 실수부와 허수부의 측정은 100Hz, 1kHz, 10kHz, 100kHz의 저주파대 측정을 위해 Agilent 4263B LCR Meter를 이용하였으며 HP 4285A Precision LCR Meter를 사용하여 1MHz, 10MHz의 주파수에서, 시료의 정전용량(C)과 저항(R)을 측정하여 도출하였다. 주문진표준사와 화강풍화토의 유전특성 평가는 토양시료를 오염물질과 혼합하여 아크릴몰드에서 오염토양의 유전상수를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 중금속 용액, 중금속과 혼합된 주문진 표준사와 화강풍화토의 유전상수 실수부를 나타낸다

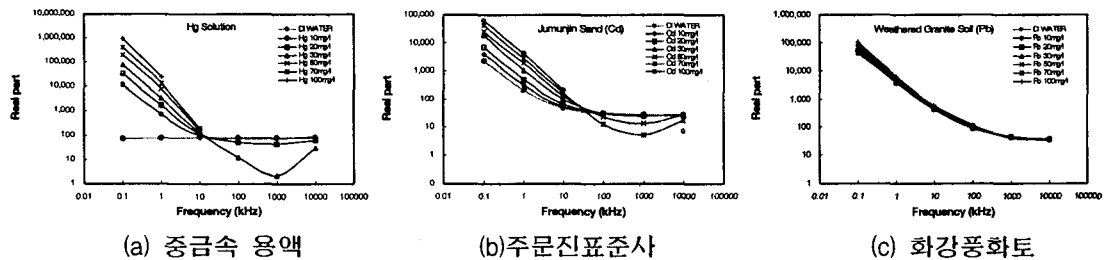


그림 1. 유전상수 실수부

그림 1에 나타나듯이 중금속 용액, 주문진표준사, 화강풍화토 모두 주파수가 증가하면서 실수부 값이 감소하는 분산 거동을 보였다. 이는 서로 다른 상(相)인 물과 흙입자의 구조적인 특징과 흙의 이질성에

기인하는 것으로 알려져 있다(Smith and Arulanandan 1981; Carrier and Soga 1997). 저주파 대에서 농도의 차이에 따른 실수부 값의 차이가 100kHz 이상의 고주파 대에서 보다 현저하였다. 100kHz 이하의 저주파에서는 공간전하분극의 발현여부가 주파수 분산거동에 영향을 주며 이 이상의 주파수 범위에서 나타나는 분산거동은 주로 배향분극이 발현정도에 따라 발생한다. 실험결과 100kHz 이하 저주파 영역에서 공간분극의 차이에 의해 오염과 비오염의 차이, 오염용액의 농도차에 따른 유전상수 실수부의 차이를 쉽게 구분할 수 있었다. 공간전하분극이 발현될 수 있는 저주파수 대에서 유전상수를 측정함으로써 모니터링 시스템의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

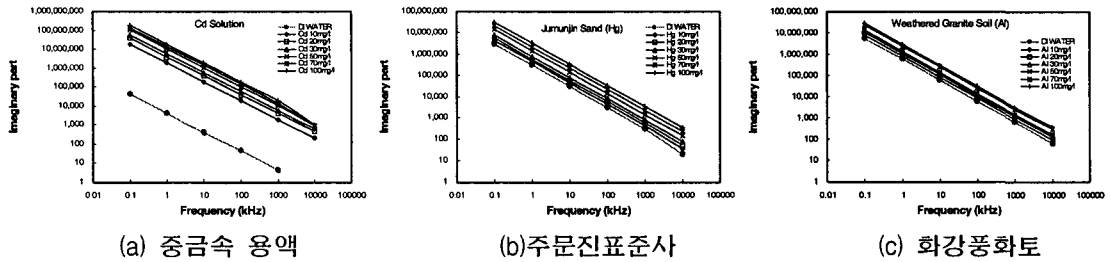


그림 2. 유전상수 허수부

허수부의 경우, 그림 2에서 보듯 중금속 농도가 증가할수록 허수부의 값이 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 유전상수의 허수부는 에너지 손실을 반영하는데 중금속의 농도가 커질수록 중금속 이온양 증가에 따른 전류전도의 증가가 유전상수 허수부 증가를 나타내는 주요 기작이기 때문이다. 중금속 농도 증가에 따른 유전상수의 변화는 허수부의 경우에는 측정주파수 전체 영역에서 그 증가가 매우 뚜렷하게 나타났다. 즉, 허수부는 비오염상태에 비해 확연히 증가하는 경향을 나타내므로 실수부 뿐 아니라 허수부의 모니터링을 통해 중금속으로 오염된 포화 사질토 토양의 오염도 평가가 가능할 것으로 판단된다.

유전상수 변화를 알아보기 위한 다양한 주파수대의 실험을 통해 모니터링의 신뢰성을 높일수 있는 최적의 주파수를 알아보았다. 그림 3과 4는 유전상수 실수부와 허수부를 정규화시켜 측정주파수에 대하여 나타낸 그래프이다. 그림3에서 보듯 농도가 증가함에 따라 저주파대 특히 1kHz, 10kHz, 100kHz 측정 주파수에서 유전상수 실수부의 값의 증가와 비오염토양과의 차이가 뚜렷하게 관찰되었다. 그림4에서 허수부의 정규화값 역시 농도증가에 따른 값의 증가가 나타났으며, 주파수 변화에 따른 값의 차이가 크지 않았지만 오염토양과 뚜렷한 차이를 보였다. 이를 통해 유전상수 실수부, 허수부의 동시 측정을 통한 모니터링 시스템에서 위 주파수를 측정주파수로 사용한다면 보다 신뢰성 있는 값을 얻을것으로 사료된다.

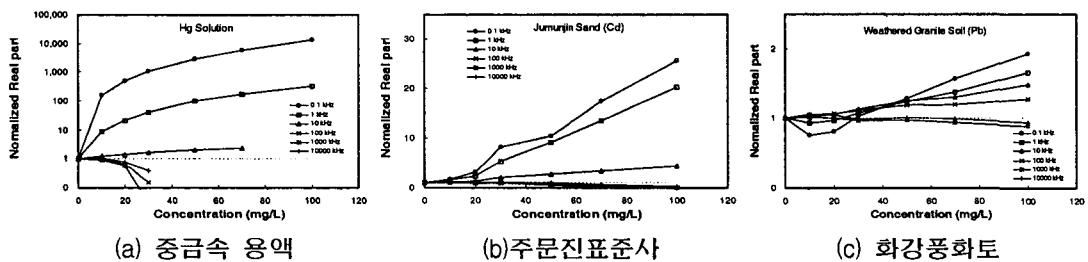


그림 3. 정규화된 유전상수 실수부

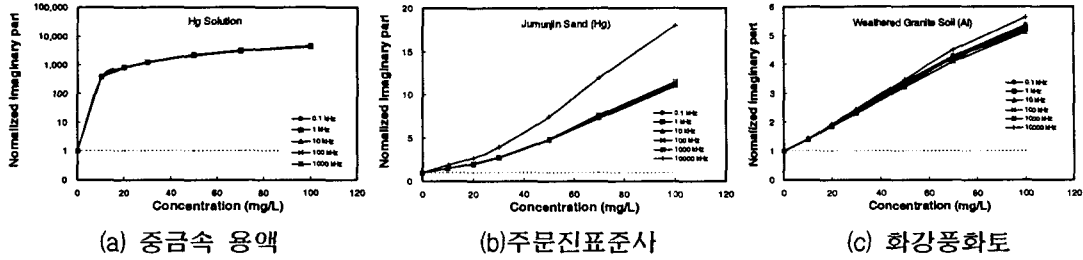


그림 4. 정규화된 유전상수 허수부

4. 결론

본 연구를 수행하여 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 중금속 용액, 주문진표준사, 화강풍화토 모두 주파수가 증가하면서 실수부 값이 감소하는 분산 거동을 보였다. 100kHz 이하 저주파 영역에서 공간전하분극의 차이에 의해 오염과 비오염의 차이, 오염 용액의 농도차에 따른 유전상수 실수부의 차이를 쉽게 구분할 수 있었다.
- 2) 허수부의 경우, 중금속 농도 증가에 따른 유전상수의 변화는 측정주파수 전체 영역에서 그 증가가 매우 뚜렷하게 나타났다. 허수부의 모니터링을 통해 중금속으로 오염된 포화 사질토 토양의 오염도 평가가 가능할 것으로 판단된다
- 3) 모니터링의 신뢰성을 높일수 있는 최적의 주파수는 유전상수 실수부의 값의 증가와 비오염토양과의 차이가 뚜렷하게 관찰된 저주파대 특히 1kHz, 10kHz, 100kHz 로 나타났다.

5. 감사의 글

본 연구는 한국과학기술연구원(KIST) 금수강산 21 연구과제로부터 연구비를 지원받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

6. 참고문헌

- 1) 오명학, 박준범, 김영진, 홍성완, 이용훈. "전기저항 측정기법을 이용한 오염물질 누출감지시스템의 개발: I.오염물질에 의한 지반의 전기적 특성 변화", 한국지반공학회논문집 제 17권 6호, (2001)
- 2) 이주형, 오명학, 박준범, 김형석, "수분함량과 측정주파수에 따른 사질토 지반의 유전상수 변화", 한국지반공학회논문집 제 18권 6호, (2002)
- 3) 이주형, 오명학, 박준범, "오염된 사질토 지반의 측정주파수에 따른 유전상수 변화, 대한환경공학회논문집 제 25권 3호, (2003)
- 4) 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, pp3-10, (1997)
- 5) Kaya, A. and Fang, H. Y. "Identification of contaminated soils by dielectric constant and electrical conductivity", Journal of Environmental Engineering, ASCE, 123(2), 169-177, (1997)
- 6) Von Hippel, A.R. "Dielectric materials and applications", New York : Wiley, (1954)
- 7) Stephens, D.B., "Vadose zone Hydrology", CRC press, (1995)