

오염지반 조사를 위한 전기비저항/정전용량 측정콘의 적용성 평가 Applicability of Resistivity/Capacitance Measurement on CPT Module for Investigation of Subsurface Contamination

오명학¹⁾, Myoung-Hak Oh, 김용성²⁾, Yong-Sung Kim, 유동주³⁾, Dong-Ju Yoo, 박준범⁴⁾, Junboun Park

¹⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사후 연구원, Post-doc., Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University(E-mail: omyhak2@snu.ac.kr)

²⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University

³⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University

³⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University

SYNOPSIS : Resistivity cone penetrometer test (RCPT) can be employed at a relatively low cost for delineation of subsurface contamination in situ, and then be supplemented with a minimum confirmatory sampling and laboratory testing program. While the resistivity measurement have potential to investigate the subsurface contamination, resistivity measurements alone will lead to some degree of ambiguity in the results. In this study, capacitance measurement was incorporated into the RCPT to overcome the ambiguity inherent in electrical resistivity measurements for delineating the subsurface contamination. This study is focused on verifying the applicability of resistivity and capacitance measurements on CPT module to provide information on contaminated subsurface by heavy metal and petroleum hydrocarbon. Laboratory model tests were performed to evaluate the sensitivity of the measured resistivity and relative capacitance on the water content and different types of contaminants. Test results show that simultaneous measurement of electrical resistivity and capacitance can give more reliable information on subsurface contamination.

Key words : Capacitance, Cone penetrometer test, Diesel fuel contamination, Electrical resistivity, Heavy metal contamination

1. 서 론

지반의 오염도 조사에 있어서 오염대의 분포를 정확히 파악하는 것은 오염물질의 거동예측 및 오염지반의 복원설계에 있어 매우 중요하다. 오염대의 수직적 분포 양상을 파악하기 위하여 현장에서 지반조사에 많이 이용되고 있는 콘관입시험기에 오염여부를 판단할 수 있는 측정장치를 장착하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다(Brandl and Robertson, 1996; Campanella and Davies, 1997; Campanella and Weemees, 1990; Piccoli and Benoit, 1995). 콘관입시험에서는 콘관입저항력, 주면마찰저항력, 간극수압 등이 연속적으로 측정되어 지반공학적 분석이 가능하기 때문에 비균질 지반에서도 오염도 조사에 적

용될 수 있는 높은 활용성을 가지고 있다(윤길림 등, 1998). 특히, 콘관입시험기에 전기비저항 측정 모듈을 장착한 전기비저항콘(Resistivity CPT)은 콘관입시험시 추가적인 시험 및 비용없이 지반의 오염조사에 적용가능한 방법으로 각광받고 있다. 그러나, 전기비저항콘은 중금속과 같은 무기오염물질로 오염된 포화 지반에서는 적용성을 가지고 있는 것으로 보고 된 바 있으나, 전기비저항은 지반의 함수비, 간극률 등의 조건에도 크게 영향을 받기 때문에 자료의 해석이 명확하게 이루어지지 않을 수도 있다(Campanella and Weemees, 1990; Fukue et al., 2001; Morabito et al., 1998; Okoye et al., 1995). 이러한 문제를 해결하기 위해서 전기비저항 외에 유전상수를 측정하는 기법이 제안되었다(Kaya and Fang, 1997; Rinaldi and Redolfi, 1996; Santamarina and Fam, 1997). 유전상수는 주어진 전기장에 대해 매질이 전하를 충전하는 정도를 나타내는 값으로 정전용량의 측정을 통해 구해질 수 있다(오명학 등, 2005). 따라서, 본 연구에서는 기존의 전기비저항만의 측정에 의한 오염대 평가의 불확실성을 보완하기 위하여 전기비저항과 정전용량을 동시에 측정할 수 있는 콘을 개발하였다. 콘관입시험시 전기비저항과 정전용량의 동시측정을 통한 지반 오염도 조사의 적용성을 평가하기 위하여 납과 디젤유로 오염된 지반을 모사한 실내모형시험을 수행하였다.

2 실험방법

2.1. 실험장비 및 측정방법

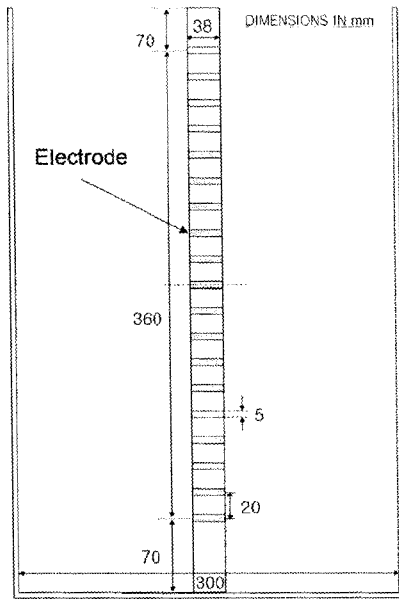
본 연구에서는 CPT에 장착되는 전기비저항 측정모듈의 직경이 38mm이고, 측정전극이 20mm 간격의 웨너배열을 적용한 전기비저항콘을 모사하여 실험을 수행하고자 하였다. Van Nostrand and Cook (1966)은 두 개의 전류전극을 통해 공급된 전류의 침투량에 대한 분석에서 공급된 전류의 70%는 전류전극사이의 간격과 동일한 거리내에서 흐름이 발생하는 것으로 보고한 바 있다. 즉, 전극간격이 20mm 인 경우 전류전극사이의 거리는 60mm이므로 콘에서부터의 거리가 60mm 이내에서 공급된 전류의 70% 이상이 흐르게 된다. 따라서, 토조의 벽면이 전류흐름경로에 영향을 주지 않는 충분한 공간을 확보하기 위하여 원통형의 모형토조는 그림 1(a)와 같이 직경 300mm가 되도록 제작하였다. 콘이 지중으로 관입된 형태를 모사하기 위하여 토조의 중앙에 측정전극이 장착된 비전도성 플라스틱 재질의 기둥을 설치하였으며, 콘이 2cm/sec의 일정한 속도로 관입되면서 매초마다 전기비저항과 정전용량이 측정되는 것을 모사하기 위하여 20mm 간격으로 16개의 전극을 설치하였다. 전극은 5mm 두께의 황동링으로 제작되었으며, 전극을 측정기에 연결시키기 위해 기둥의 내부를 통하여 전선을 연결하였다.

전기비저항의 측정은 그림 1(b)에 제시된 바와 같이 등간격으로 배열된 인접한 네 개의 전극을 활용하여 바깥쪽의 두 개 전극을 통해 전류를 공급하며, 안쪽의 두 개 전극을 통하여 전위차를 측정하는 방식으로 이루어진다. 정전용량은 인접한 두 개의 전극사이에서 직접 측정하였다. 전기비저항의 측정은 저주파수의 교류전류에서 발생하는 전극분극효과를 피하기 위하여 1kHz의 주파수에서 측정하였으며, 정전용량은 1kHz, 10kHz, 100kHz, 1MHz의 주파수에 대해 각각 측정되었다. 100kHz 이하의 주파수에 대한 측정은 Agilent 4263B LCR meter를 사용하였고, 100kHz 이상의 주파수에 대해서는 HP 4285A Precision LCR meter를 사용하였다.

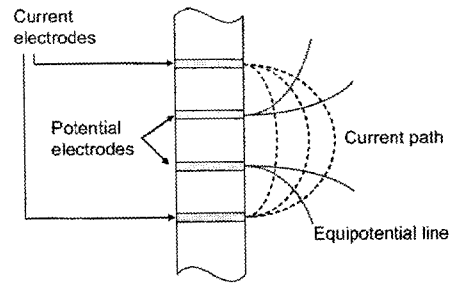
본 연구에서는 측정된 정전용량을 식 (1)과 같이 정의되는 relative capacitance로 변환하였다.

$$\text{Relative Capacitance} = \frac{C_m - C_0}{C_w - C_0} \quad (1)$$

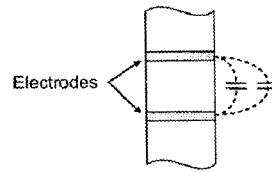
여기서 C_m 은 측정매질의 정전용량, C_0 는 공기중에서 측정된 정전용량, 그리고 C_w 는 탈이온수에서 측정된 정전용량을 나타낸다. Relative capacitance는 탈이온수에 대한 특정 매질의 정전용량 또는 유전율의 비율로서 선택적인 전극의 배열에서 발생하는 오차가 자동적으로 보상된다.



(a) 토조



Electrical resistivity measurement



Capacitance measurement

(b) 전기비저항 및 정전용량의 측정 개념

그림 1. 모형시험을 위한 토조 개요와 전기비저항 및 정전용량의 측정 방법

2.2. 모형지반 조성 조건

모형지반의 조성을 위하여 주문진표준사를 사용하였으며, 오염물질로는 중금속 오염물질로는 납 용액을, 유류오염물질로는 디젤유를 사용하였다. 납 용액은 1000mg/L 농도의 표준용액(Kanto Chemical Co., Japan)을 희석하여 40mg/L 농도로 조제하여 사용하였으며, 디젤유는 주유소에서 구입한 것을 사용하였다. 오염되지 않은 간극수로는 탈이온수(deionized water)를 사용하였다. 모형시험을 수행하기 위하여 조성된 지반조건은 그림 2와 같다. Case 1과 2는 포화대의 중금속 오염여부를 모사한 것이며(그림 2 (a)와 (b)), Case 3과 4는 포화대 및 불포화대에서의 중금속 오염여부를 나타낸 것이며(그림 2 (c)와 (d)), Case 5는 디젤과 같이 밀도가 물보다 작은 유기오염물질인 LNAPL(Low-density Non-Aqueous Phase Liquids)이 지하수면 위에 존재하는 상황을 모사한 것이다(그림 2 (e)).

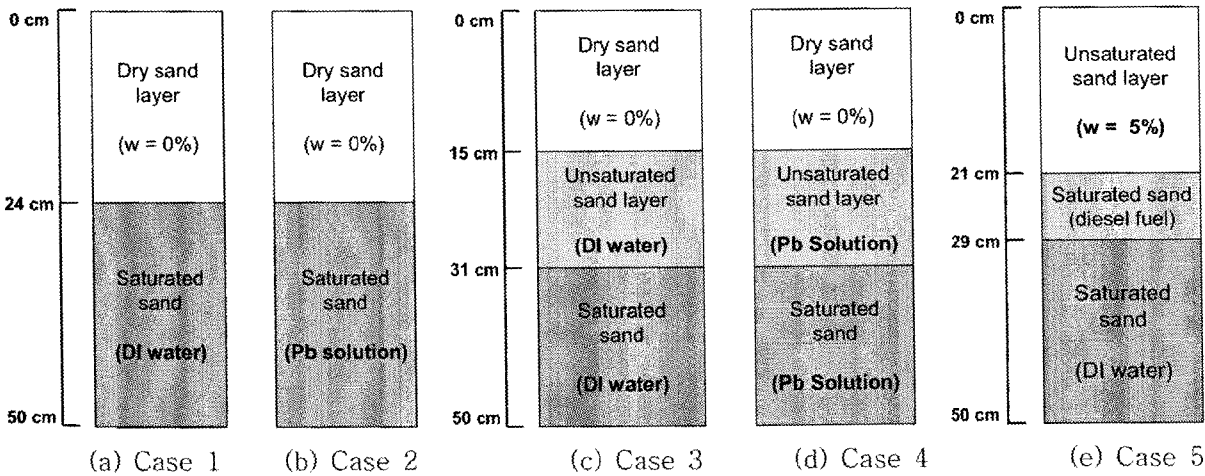


그림 2. 모형지반 조성 조건

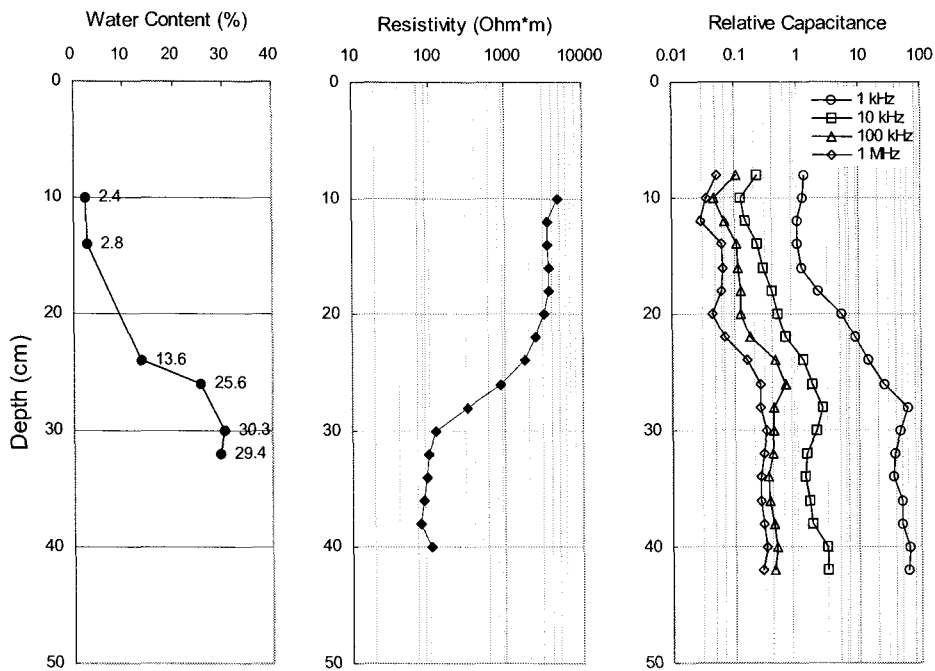
3. 결과 및 분석

3.1 함수비의 영향

지반의 전기적 특성은 함수비에 따라 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다(오명학, 2005; Santamarina et al. 2001). 전기비저항과 정전용량 측정시 함수비의 영향을 파악하기 위하여 토조에 건조된 주문진표 준사를 채우고, 40L의 수돗물을 부어 수돗물이 하부로 스며들도록 한 후 3일이 경과된 후 전기비저항과 정전용량을 측정하고, 깊이별로 시료를 채취하여 함수비를 평가하여 그림 3에 도시하였다.

그림 3에 나타난 바와 같이 전기비저항과 정전용량 측정결과 모두 지반의 함수비의 변화 경향과 유사한 변화를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 전기비저항은 함수비 증가에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 이는 사질토에서 흡입자에 의한 표면전도 효과는 거의 나타나지 않고 간극수를 통해서만 전류의 흐름이 발생하기 때문에 나타나는 결과이다. 정전용량의 경우 측정주파수에 따라 발견되는 분극의 상대적인 크기가 달라지기 때문에 측정주파수에 따라 각기 다른 값을 나타내지만, 전반적으로 함수비가 증가함에 따라 정전용량도 증가하는 경향을 나타냄을 확인할 수 있다. 전기장이 가해질 때 극성의 물분자는 전기장의 방향에 따라 재배열하는 배향분극을 발견하게 되고, 이때 배향분극은 단위체적당 존재하는 쌍극자 모멘트의 수에 비례한다(Lee et al., 2003; Oh et al. 2005). 즉, 함수비가 증가하게 되면 물분자에 의한 배향분극(orientational polarization)의 발견이 커지게 되므로 정전용량은 증가하게 되는 것이다.

측정주파수에 따른 정전용량 측정값의 변화를 그림 4에 도시하였다. 사질토의 경우 MHz 범위의 주파수에서는 주파수에 따른 정전용량의 변화가 없는 것으로 알려져 있다(Campbell 1990; Santamarina et al. 2001). 그러나, 1MHz 이하의 주파수에서는 측정주파수가 증가함에 따라 정전용량은 감소하는 경향을 나타내며, 이러한 감소경향은 함수비가 높을수록 더욱 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 저주파수 영역에서 흡과 간극수의 계면에 전하가 충전되면서 나타나는 공간전하분극(spatial polarization)에 의한 효과로서 함수비가 높을수록 흡과 간극수의 계면 총면적이 증가하여 공간전하분극의 발견량이 증대되기 때문이다(Lee et al. 2003).



(a) 함수비 측정 결과 (b) 전기비저항 (c) relative capacitance

그림 3. 함수비 변화에 따른 전기비저항 및 정전용량의 변화

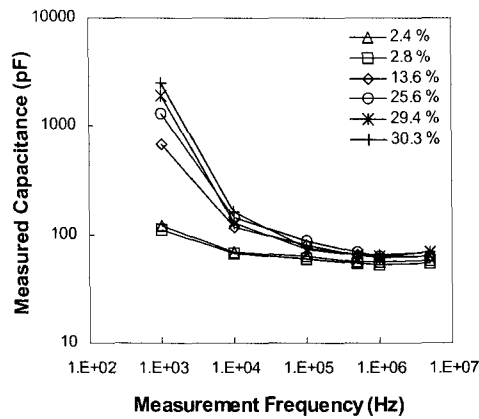


그림 4. 측정주파수에 따른 함수비별 정전용량의 변화

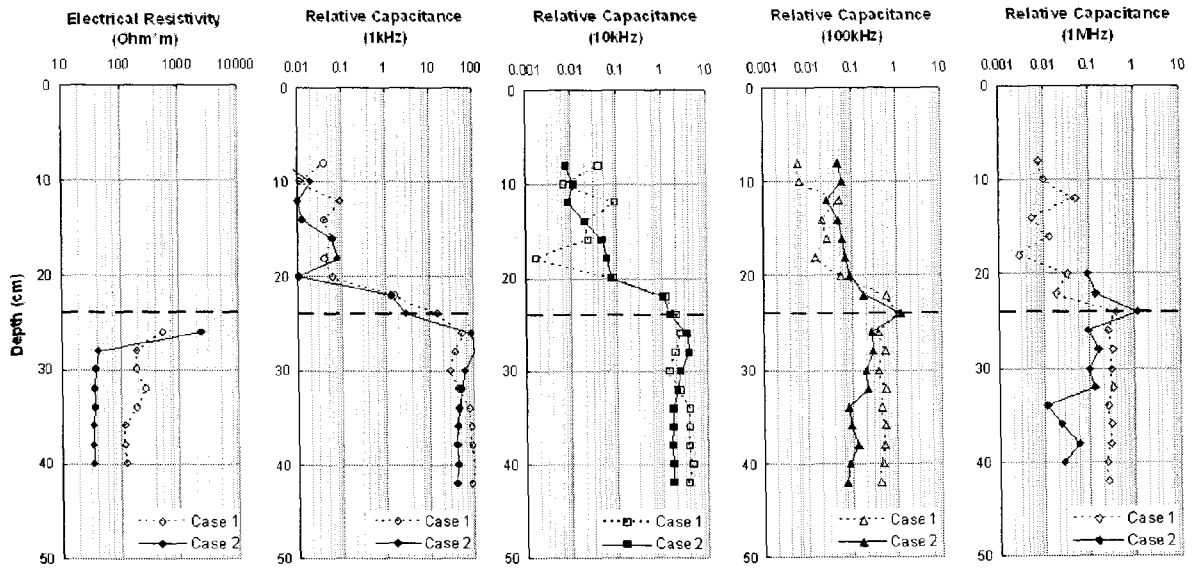
3.2 중금속 오염의 영향

중금속의 오염여부에 따른 전기비저항 및 정전용량의 변화를 그림 5와 6에 도시하였다. 일반적으로 전기비저항 측정을 통해 신뢰성있는 측정결과를 얻을 수 있는 지반의 함수비는 10% 이상으로 제한되지 만 정전용량을 측정하는 경우는 모든 함수비 범위에서 측정이 가능하다(이주형 등, 2002). 본 연구결과 에서도 전기비저항은 함수비가 0%인 완전 건조된 모래층에서는 측정이 불가능하였나, 정전용량은 모든 함수비 범위에서 측정이 가능하였으며, 반복 측정시에도 비교적 신뢰성있는 측정값을 도출할 수 있었다.

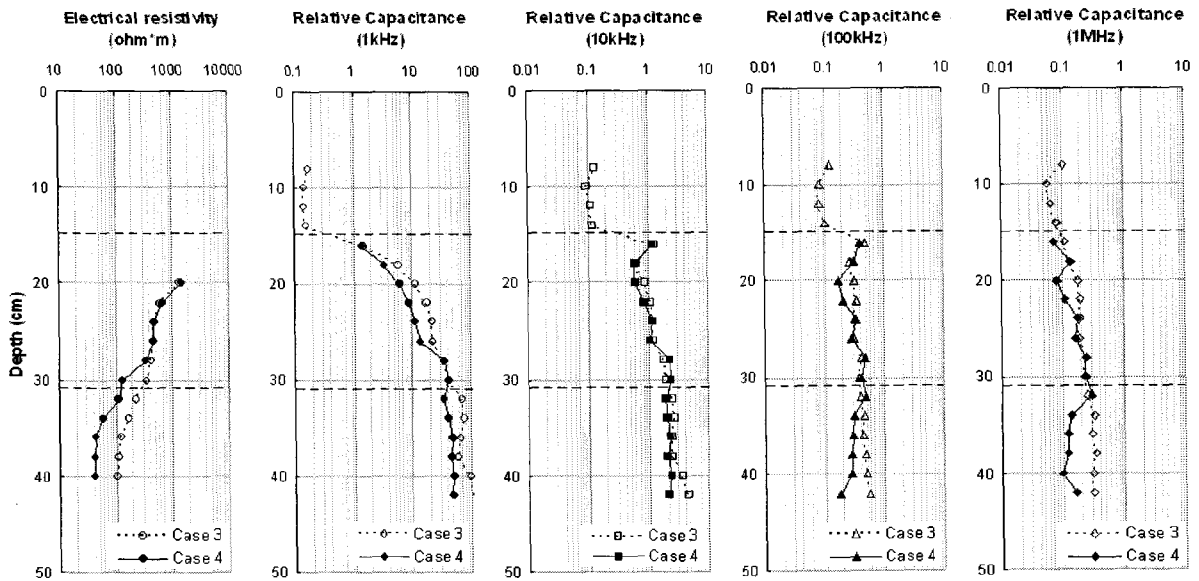
그림 5와 6에서 포화된 지층에서는 납 오염으로 인하여 전기비저항이 현저하게 감소하는 경향을 확인 할 수 있었으나, 불포화층에서는 그림 6에 나타난 바와 같이 납 오염으로 인한 전기비저항의 차이가 나 타나지 않았다. 납으로 오염된 간극수에서는 용해된 납이온 성분이 전하운반체의 역할을 하기 때문에 전기비저항이 작아지게 되고, 이는 지반의 전기비저항을 감소시키게 된다. 그러나, 함수비가 낮은 경우 에는 간극수의 전기적 특성이 지반의 전기비저항에 미치는 영향이 상대적으로 작기 때문에 불포화지반 에서는 오염도를 판별하기에 어려운 것으로 사료된다.

정전용량 측정결과는 불포화층에서는 측정주파수에 관계없이 중금속의 오염여부를 판단하기가 어려웠 다. 반면 포화대에서는 모든 측정주파수에서 정전용량이 다소 감소하는 경향을 나타내었으며, 이러한 감 소경향은 높은 주파수에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 중금속 오염으로 인한 정전용량의 감소 경향은 이 온의 수화작용(ion hydration)으로 인해 배향분극의 발현에 기여하는 물분자의 수가 감소하기 때문에 나타나는 것이다(Santamarina et al., 2001; 오명학 등, 2005). 배향분극은 MHz 이상의 주파수에서 크 게 나타나기 때문에 납 오염으로 인한 정전용량의 감소는 100kHz 이상의 주파수에서 측정된 경우에 비 교적 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

그림 6에서 납으로 오염된 경우(Case 4) 불포화층과 포화층의 경계에서의 전기비저항 및 정전용량 값의 변화를 살펴보면, 전기비저항의 경우(그림 6(a)) 불포화대에서 포화대로 가면서 오염여부에 관계없 이 모두 전기비저항이 감소하는 경향을 나타낸다. 즉, 정량적인 값의 차이는 있지만 함수비가 증가하게 되어 나타나는 전기비저항의 감소 효과와 중금속의 오염에 의한 감소효과를 구분하는 것이 어려울 수 있 다. 그러나, 100kHz와 1MHz에서 측정된 정전용량의 경우(그림 6(d)와 (e))에는 함수비의 증가 영향에도 불구하고, 납이온의 수화작용에 의한 영향으로 정전용량이 상부 불포화층보다 더 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 포화대의 중금속 오염여부를 판단할 수 있다. 따라서, 전기비저항 측정에 추가적인 정전용량의 측정 및 분석을 수행하는 것은 중금속 오염여부의 정확한 평가에 기여할 수 있을 것으로 판 단된다. 그러나, 전기비저항 및 유전상수 측정에 의한 중금속 오염도의 평가는 포화 지반에는 적용 가능 하지만, 불포화 지반에서는 적용성이 낮은 것으로 나타났다. 또한, 중금속의 오염도 조사에 정전용량 측 정기법을 적용하는 경우에는 100kHz 이상의 주파수에서 측정하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.



(a) 전기비저항 (b) 정전용량(1kHz) (c) 정전용량(10kHz) (d) 정전용량(100kHz) (e) 정전용량(1MHz)
 그림 5. 포화지반의 중금속 오염 여부에 따른 전기비저항 및 정전용량 (Case 1 & 2)



(a) 전기비저항 (b) 정전용량(1kHz) (c) 정전용량(10kHz) (d) 정전용량(100kHz) (e) 정전용량(1MHz)
 그림 6. 포화 및 불포화 지반의 중금속 오염 여부에 따른 전기비저항과 정전용량 (Case 3 & 4)

3.3 디젤유 오염의 영향

그림 7은 디젤유가 누출되어 지하수면 위에 축적되는 유류오염을 모사한 지반조건에서 측정된 결과를 도시한 것이다. 전기비저항은 디젤유로 포화된 지층에서 크게 증가하는 경향을 나타내어 플룸(plume) 형태로 수면위에 존재하는 디젤유층의 감지에는 적용성이 있는 것으로 사료된다. 정전용량의 경우에는 디젤유층에서 정전용량이 크게 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 디젤유가 비극성이므로 2 - 6 정도의 작은 유전상수 값을 갖기 때문이다. 측정주파수에 따른 변화경향을 살펴보면 1kHz의 경우에는 디젤유층에서 정전용량의 감소가 나타나지만 뚜렷하지는 않았고, 10kHz 이상의 주파수에서는 뚜렷한

감소경향을 나타내어 디젤유 감지에는 최소 10kHz 이상의 주파수가 적용되어야 할 것으로 판단된다.

그림 7에서 디젤유 오염층과 포화대의 경계에서는 측정값의 연속적인 변화경향으로 인하여 그 경계면의 위치를 정확히 파악하기에는 어려움이 있는 것으로 나타났다. 이는 전극사이에서 형성되는 전기장의 영향범위가 넓어 인접지반의 전기적 특성의 영향을 받기 때문에 나타나는 결과로 사료된다. 이에 대한 정확한 해석을 위해서는 전극사이에서 형성되는 전류의 흐름형태를 평가하여 그 영향범위를 산정하고, 층경계에서의 측정자료 해석기법에 대한 추가적인 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

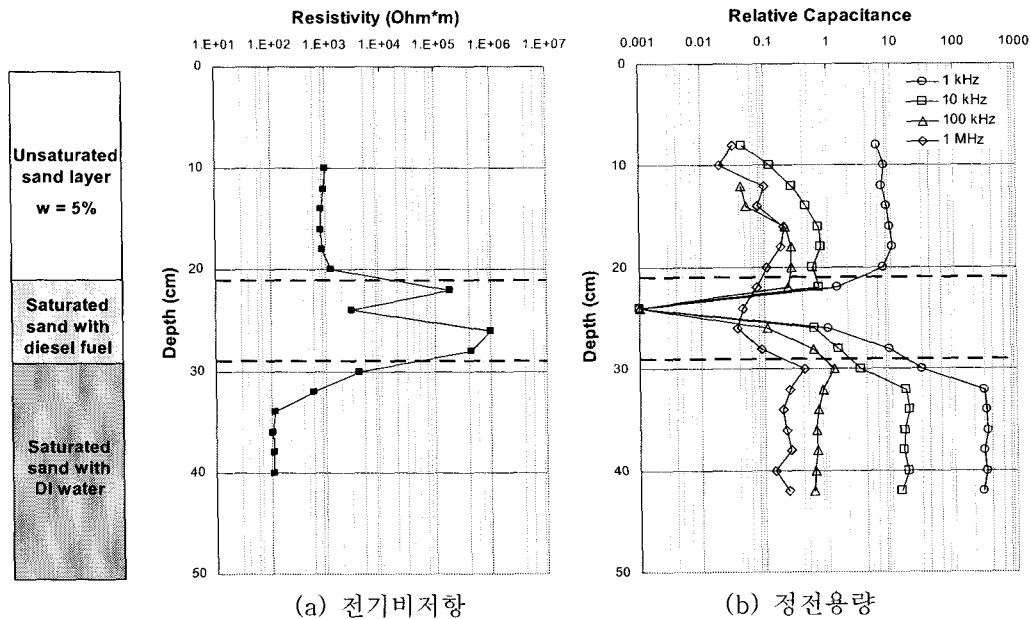


그림 7. 지하수위면 상부에 디젤유가 존재하는 경우의 전기비저항 및 정전용량 변화 (Case 5)

4. 결론

비저항론에 정전용량을 추가적으로 측정하는 기법을 도입하여 오염도 조사에 대한 적용성을 검토하기 위한 실내모형시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 전기비저항과 정전용량 측정기법은 중금속으로 오염된 포화지반에서는 적용성이 높은 것으로 나타났다으나, 불포화대에서는 적용이 어려운 것으로 나타났다. 특히, 정전용량 측정기법은 100kHz 이상의 주파수에서 중금속으로 오염된 포화지반에서 함수비가 증가하였음에도 정전용량은 감소하는 경향을 나타내어 전기비저항보다 명확하게 오염여부를 파악할 수 있었다.
- (2) 전기비저항과 정전용량 측정값은 모두 지하수대 상부에 존재하는 디젤유 오염층을 감지하는 데 효과적으로 적용될 수 있는 것으로 나타났으며, 정전용량 측정의 경우에는 10kHz 이상의 주파수에서 적용성이 높은 것으로 나타났다. 그러나, 오염대의 존재 깊이를 정확히 파악하고 그 경계를 명확히 규명하기 위해서는 층경계에서 전극의 상대적 위치에 따른 상·하부 지층의 전기적 특성의 영향을 파악하여 이에 대한 해석기법이 정립되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R01-2002-000-00136-0) 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 오명학(2005) 흙의 전기적 특성 평가를 통한 지반오염 감지시스템 개발, 서울대학교 박사학위논문.
2. 오명학, 김용성, 유동주, 박준범(2005), "함수비와 증감속 오염도에 따른 유전상수의 변화", *한국지반공학회논문집*, 제21권 5호, pp.231-241.
3. 윤길립, 유찬, 이영남, 윤준경, 이용길(1998), "오염지반의 전기비저항치와 토성과의 상관성 연구", *한국지반공학회논문집*, 제14권 2호, pp.79-92.
4. 이주형, 오명학, 박준범, 김형석(2002), "수분함량과 측정주파수에 따른 사질토 지반의 유전상수 변화", *한국지반공학회논문집*, 제18권 6호, pp.129-139.
5. Brandl, H. and Robertson, P. K.(1996), "Geoenvironmental site investigation and characterization", *2nd International Congress on Environmental Geotechnics*, pp.117-140.
6. Campanella, R. G. and Davies, M. P.(1997), "In-situ testing for geo-environmental site characterization: A mine tailings example", *14th ICSMFE*, pp. 43-46.
7. Campanella, R. G. and Weemees, I.(1990), "Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies", *Canadian Geotechnical Journal*, 27, pp.557-567.
8. Campbell, J. E.(1990), "Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz", *Soil Science Society of American Journal*, 54, pp.332-341.
9. Kaya, A. and Fang, H. Y.(1997), "Identification of contaminated soils by dielectric constant and electrical conductivity", *Journal of Environmental Engineering*, Vol.123, No.2, pp.169-177.
10. Fukue, M., Minato, T., Matsumoto, M., Horibe, H. and Taya, N.(2001), "Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers", *Engineering Geology*, 60, pp.361-369.
11. Lee, J. H., Oh, M. H., Park, J., Lee, S. H. and Ahn, K. H.(2003) "Dielectric dispersion characteristics of sand contaminated by heavy metal, landfill leachate and BTEX", *Journal of Hazardous Materials*, 105, pp.83-102.
12. Morabito, P., Lanciani, I. and Benoit, J.(1998), Electrical resistivity cone penetration(ERCPTU) testing at the Treasure island national geotechnical experimentation site in San Francisco, California, NSF Report.
13. Oh, M. H., Kim, Y. S., Park, J. and Yoon, H. S.(2005) "Complex permittivity of sand at low frequency", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.21, No.2, pp.93-103.
14. Okoye, C. N., Cotton, T. R. and O'Meara, D.(1995), "Application of resistivity cone penetration testing for qualitative delineation of creosote contamination in saturated soils", *Geoenvironment 2000*, ASCE, pp.93-104.
15. Piccoli, S. and Benoit, J.(1995), "Geo-environmental testing using the envirocone", *Geoenvironment 2000*, ASCE, pp.151-166.
16. Rinaldi, V. A. and Redolfi, E. R.(1996), "The dielectric constant of soil-NAPL mixtures at low frequencies (100Hz-10MHz)", *Proc. of Nonaqueous Phase Liquids (NAPLs) in the Subsurface Environment: Assessment and Remediation*, ASCE, Washington D.C., pp.163-174.
17. Santamarina, J. C. and Fam, M.(1997), "Dielectric permittivity of soils mixed with organic and inorganic fluids(0.2 GHz to 1.30 GHz)", *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2(1), pp.37-51.
18. Santamarina, J. C., Klein, K. A. and Fam, M. A.(2001), *Soils and Waves*, John Wiley & Sons.
19. Van Nostrand R. G. and Cook K. L.(1966), Interpretation of Resistivity Data, U.S. Geological Survey, Professional Paper 499, USGS, Washington D.C.