

지반 오염도 조사를 위한 전기비저항/정전용량 측정콘의 적용성 평가

Applicability of Resistivity/Capacitance Measurement on CPT Module for Investigation of Subsurface Contamination

오 명 학¹ Oh, Myoung-Hak

김 용 성² Kim, Yong-Sung

박 준 범³ Park, Jun-Boum

Abstract

Resistivity cone penetrometer test (RCPT) can be employed at a relatively low cost for in-situ delineation of subsurface contamination. While the resistivity measurement has a 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. This study is focused on verifying the applicability of resistivity and capacitance measurements of CPT module to provide information on subsurface contaminated 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. Electrical measurements of the CPT module showed high applicability to be used in detecting saturated soils contaminated by heavy metal and diesel plume floating above the groundwater table.

요 지

전기비저항콘은 현장에서 지반의 오염대를 조사하는데 상대적으로 경제적인 비용으로 적용될 수 있다. 그러나, 전기비저항 결과만에 의한 해석은 정량적 데이터베이스의 부족과 함수비 등의 다른 지반공학적 영향인자들에 의해 모호한 결과를 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 지반오염조사에서의 전기비저항 측정기법을 보완하기 위하여 정전용량 측정기법을 도입하여 중금속과 유류로 오염된 지반에서의 적용성을 평가하고자 하였다. 함수비와 오염물질의 종류에 따른 전기비저항과 정전용량의 변화를 평가하기 위하여 실내모형시험을 수행하였으며, 그 결과 전기비저항과 유전상수를 동시에 측정하여 분석함으로써 오염대의 감지에 신뢰도를 높일 수 있는 것으로 나타났다. 전기비저항과 정전용량 측정기법은 중금속으로 오염된 포화지반과 지하수대 상부에 존재하는 디젤유 오염층을 감지하는 데 적용성이 높은 것으로 나타났다.

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

1 정희원, 한국해양연구원 연안개발연구본부 연구연구원 (Member, Coastal Engng. Research Dept., Korea Ocean Research & Development Institute, omyhak@kordi.re.kr, 교신저자)

2 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 (Member, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engng., Seoul National Univ.)

3 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수 (Member, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engng., Seoul National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지반의 오염도 조사에 있어서 오염대의 분포를 정확히 파악하는 것은 오염물질의 거동예측 및 오염지반의 복원설계에 있어 매우 중요하다. 최근에는 오염대의 수직적 분포 양상을 파악하기 위하여, 현장지반조사에 많이 활용되고 있는 콘관입시험기에 오염여부 판단을 위한 측정기법에 대한 연구가 많이 진행되고 있다(Brandl and Robertson 1996; Campanella and Davies 1997; Campanella and Weemees 1990; Piccoli and Benoit 1995). 콘관입시험은 관입이 가능한 지역에서 지반특성을 파악하는데 있어 중요한 현장시험으로서, 콘관입시험을 통하여 콘관입저항력, 주면마찰저항력, 간극수압을 연속적으로 측정하여 흙의 종류나 지층상태를 파악하고 분류할 수 있으며, 경험적·이론적 관계를 통하여 지반의 공학적인 특성을 파악할 수 있다. 한편, 콘관입시험기에 오염물질의 특성을 파악할 수 있는 센서를 장착하게 되면 비균질 지반에서도 오염도 조사에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대되고 있다(윤길림 등, 1998). 특히, 콘관입시험기에 전기비저항 측정 모듈을 장착한 전기비저항콘(Resistivity CPT)은 비교적 신속하고 경제적으로 CPT 데이터와 함께 연속적인 전기비저항을 측정할 수 있기 때문에 지반의 오염조사에 적용가능한 방법으로 각광받고 있다. 그러나, 전기비저항콘은 중금속과 같은 무기오염물질로 오염된 지하수 조사에는 적용성을 가지고 있는 것으로 보고된 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 제안되어 국외에서 활발한 연구가 진행되고 있다(Kaya and Fang 1997; Rowe et al. 2001; Santamarina and Fam 1997). 유전상수는 주어진 전기장에 대해 매질이 전하를 충전하는 정도를 나타내는 값으로 정전용량의 측정을 통해 구해질 수 있다(오명학 등 2005).

본 연구에서는 기존의 전기비저항만의 측정에 의한 오염대 평가의 불확실성을 보완하기 위하여 콘에 장착되는 전기비저항 측정모듈에서 전기비저항과 정전용량을 동시에 측정할 수 있는 기법을 도입하였다. 이 기법은 전기비저항콘에 추가적으로 측정 센서를 설치하지

않고 정전용량 측정기만 연결하면 된다는 장점이 있다. 본 연구에서는 대표적인 지반오염물질인 중금속과 유류로 오염된 지반을 모사하여 실내모형시험을 수행하여 전기비저항과 정전용량 측정값에 영향을 주는 인자를 분석하고, 오염도 조사에 대한 적용성을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 모형시험기

현재 사용되고 있는 콘관입시험기 중 표준콘은 콘팁의 단면적이 10cm^2 , 선단각이 60° 이고, 허용규격은 직경 $35.7\sim 36.0\text{mm}$ 이다. 전기비저항 측정모듈은 콘의 후미에 장착되며, 콘의 관입시 측정전극과 주변지반과의 접촉성을 증대시키기 위하여 콘팁보다 직경이 약간 크다. 본 연구에서 전기비저항 측정 프루브는 직경이 38mm 가 되도록 제작되었으며, 측정전극은 20mm 등간격의 웨너전극배열을 적용하였다.

본 연구는 오염지층에서의 전기적 특성 변화를 평가하는 것이 연구의 초점이기 때문에 콘의 관입에 의해 발생하는 지반의 변위와 smear 효과를 배제하고 콘이 지중으로 관입된 형태를 모사하기 위하여 그림 1과 같은 토조를 제작하였다. 토조의 중앙에는 전기비저항/정

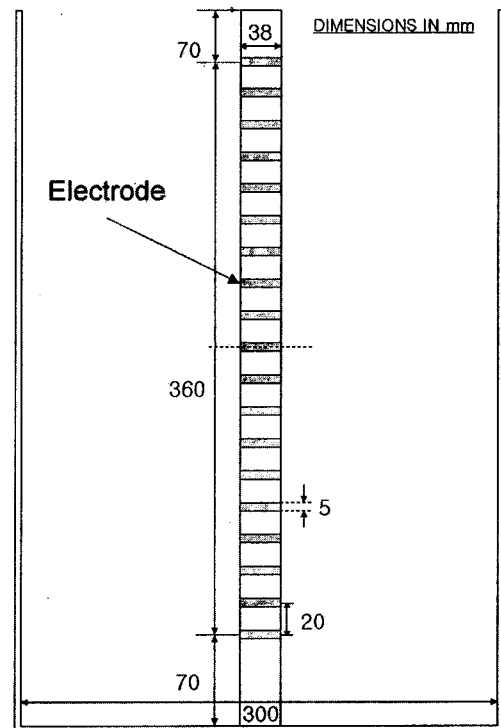


그림 1. 모형시험을 위한 토조 개요

정전용량 측정코일이 관입된 형태를 모사하기 위하여 측정 전극이 장착된 비전도성 플라스틱 재질의 기둥을 설치하였으며, 코일이 2cm/sec의 일정한 속도로 관입되면서 매초마다 전기비저항과 정전용량이 측정되는 것을 모사하여 20mm 간격으로 모두 16개의 전극을 설치하였다. 전극은 5mm 두께의 황동링으로 제작되었으며, 전극은 콘과 마찬가지로 기둥의 내부 전선을 통하여 측정기에 연결하였다.

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 20mm인 웨너배열일 경우 전류전극사이의 거리는 60mm이므로 콘의 표면으로부터의 거리가 60mm 이내에서 공급된 전류의 70% 이상이 흐르게 된다. 따라서, 토조의 벽면이 모형지반 내에서의 형성되는 전류흐름에 영향을 주지 않는 충분한 공간을 확보하기 위하여 원통형의 모형토조는 그림 1에 나타난 바와 같이 직경 300mm가 되도록 제작하였다.

2.2 전기비저항 및 정전용량의 측정

전기비저항의 측정은 그림 2(a)에 제시된 바와 같이 등간격으로 배열된 인접한 네 개의 전극을 활용하여 바깥쪽의 두 개 전극을 통해 일정한 전류를 공급하며, 안쪽의 두 개 전극을 통하여 전위차를 측정하는 방식으로 이루어진다. 전기비저항의 측정은 직류 혹은 저주파수의 교류전류를 사용하는 경우 발생할 수 있는 전극분극(electrode polarization)효과를 피하기 위하여, 1kHz의 주파수에서 측정하였다.

정전용량은 매질이 전하를 충전하는 정도를 나타내

는 값으로 식 (1)과 같이 정의된다.

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

여기서, C 는 정전용량, Q 는 매질에 충전되는 전하량, V 는 매질에 가해진 전위차, ϵ 은 유전상수, A 는 전극단면적, d 는 전극 간격이다.

본 연구에서는 그림 2(b)와 같이 인접한 두 개의 전극 사이에서의 정전용량을 LCR meter를 사용하여 측정하였다. 1kHz, 10kHz, 100kHz, 1MHz의 주파수에 대해 각각 측정을 수행하였으며, 100kHz 이하의 주파수에 대한 측정은 Agilent 4263B LCR meter, 100kHz 이상의 주파수에 대해서는 HP 4285A Precision LCR meter를 각각 사용하였다. 이때 측정된 정전용량은 그림 2(b)에 도시한 바와 같은 콘 주변 지반에서 측정되는 정전용량 뿐만 아니라 두 전극사이의 절연체의 정전용량도 함께 측정되는 등의 오차요인이 존재하게 되므로 본 연구에서는 이러한 효과를 배제하기 위하여 측정된 정전용량을 식 (2)와 같이 정의되는 상대정전용량(relative capacitance)로 변환하였다.

$$\text{Relative Capacitance} = \frac{C_m - C_0}{C_w - C_0} \quad (2)$$

여기서 C_m 은 측정매질의 정전용량, C_0 은 공기중에서 측정된 정전용량, 그리고 C_w 는 탈이온수에서 측정된 정전용량을 나타낸다. Relative capacitance는 탈이온수에 대한 특정 매질의 정전용량 또는 유전율의 비로서 선택적인 전극의 배열에서 발생하는 오차가 자동적으로 보상된다. 또한 상대정전용량의 변화는 공기 중에서의 정전용량에 대한 측정매질의 정전용량으로 정의되는 유전상수의 변화경향과도 유사하게 된다.

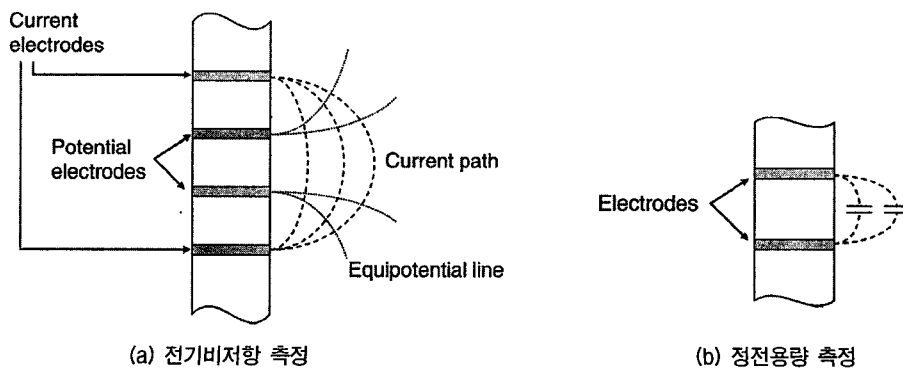


그림 2. 콘에서의 전기비저항 및 정전용량 측정 개요

2.3 모형지반 조성 조건

모형지반의 조성을 위하여 주문진표준사를 사용하였으며, 오염물질로는 대표적인 지반오염물질로 보고되고 있는 중금속 납과 유류오염물질인 디젤유를 사용하였다. 납 용액은 1000mg/L 농도의 표준용액(Kanto Chemical Co., Japan)을 희석하여 40mg/L 농도로 조제하여 사용하였으며, 디젤유는 일반 주유소에서 판매하는 것을 사용하였다. 오염되지 않은 간극수로는 탈이온수(deionized water)와 수도물(tap water)을 사용하였다. 모형시험을 위해 조성된 지반조건은 그림 3과 같다. 수행된 모형지반 조건 중 Case 1~4는 중금속 오염, Case 5와 6은 디젤유 오염에 대한 적용성을 평가하기 위하여 수행하였다. 여기서, Case 1과 2는 포화대의 중금속 오염여부를 비교하기 위한 모형지반조건이며(그림 3(a)), Case 3과 4는 포화대 및 불포화대에서의 중금속 오염여부 평가를 위해 조성된 지반조건이다(그림 3(b)). Case 5는 디젤유와 같이 밀도가 물보다 작은 유류오염물질인 LNAPL(Low-density Non-Aqueous Phase Liquids)이 지하수면 위에 존재하는 상황을 묘사한 것이며(그림 3(c)), Case 6은 불포화지반이 디젤유로 오염되어 간극내에 디젤유가 일부 존재하는 경우를 묘사한 것으로 5%의 함수비를 갖도록 흡시료를 준비하고 흡에 대한 중량비로 디젤유가 5% 되도록 조성하였다(그림 3(d)).

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). 오염도에 따른 지반의 전기적 특성변화를 평가하기에 앞서 전기비저항과 정전용량 측정시 함수비의 영향을 파악하였다. 이를 위해 토조에 노건조된 주문진표준사를 채우고, 8L의 수도물을 부어 수도물이 증력배수에 의해 하부로 스며들도록 한 후 3일이 경과된 후 전기비저항과 정전용량을 측정하였고, 임의 깊이에서 시료를 채취하여 함수비를 측정하였다.

그 결과 그림 4에 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 발현하게 되고, 이때 배

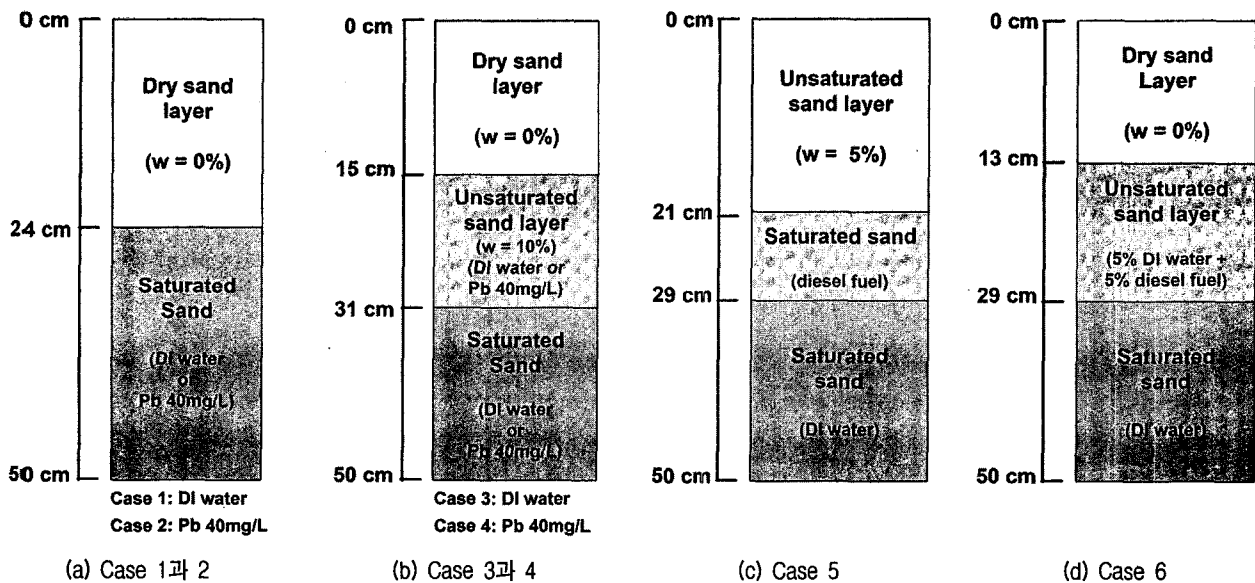


그림 3. 모형지반 조성 조건

향분극은 단위체적당 존재하는 쌍극자모멘트의 수에 비례한다(Lee et al. 2003; Oh et al. 2005). 즉, 함수비가 증가하게 되면 물분자에 의한 배향분극(orientational polarization)의 발현이 커지게 되므로 정전용량은 증가하게 되는 것이다.

사질토의 경우 MHz 범위의 주파수에서는 주파수에 따른 정전용량의 변화가 없는 것으로 알려져 있다(Campbell 1990; Santamarina et al. 2001). 그러나, 수십 MHz 이하의 주파수에서는 측정주파수가 감소함에 따라 정전용량은 크게 증가하는 경향을 나타내며, 이러한 증가경향은 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 총 계면면적이 증가하여 공간전하분극의 발현량이 증대되기 때문이다(Lee et al. 2003).

기존의 연구에 의하면 흙의 전기적 특성은 체적함수비(volumetric water content)와 상관성이 있는 것으로 보고되고 있다(이주형 등 2002; 오명학 등 2004; 오명학 등 2005). 체적함수비는 흙의 전체 부피(V_t)에 대한 간극수의 부피(V_w)의 비로 정의되는 것으로 식 (3)과 같이

표현할 수 있다.

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_t} = \frac{\gamma_d w}{\gamma_w} \quad (3)$$

여기서, γ_w 는 물의 단위중량이다.

식 (3)에서 알 수 있듯이, 체적함수비는 지반의 함수비(gravimetric water content)와 건조단위중량의 변화 영향을 모두 반영할 수 있다. 만약 건조단위중량이나 함수비 중 하나의 인자가 일정하다면, 체적함수비는 나머지 다른 인자와 직접적인 관계를 나타내게 된다. 그러므로 체적함수비의 변화는 간극내의 물의 부피의 변화를 나타낼 뿐만 아니라 다짐에 의한 흙의 구조적 변화도 반영하게 된다.

완전 건조상태($\theta_v = 0$)의 시료에서부터 포화상태($\theta_v = 0.39$)까지 체적함수비를 변화시켜가면서 주문진표준사에 대한 전기비저항과 유전상수 측정결과를 그림 5에 도시하였다.

그림 5(a)에 의하면, 전기비저항은 체적함수비 증가에 따라 지수함수적으로 감소하는 경향을 나타내었고 전기비저항과 역수의 관계에 있는 전기전도도는 선형적으로 비례하는 관계를 나타내었다. 유전상수의 경우

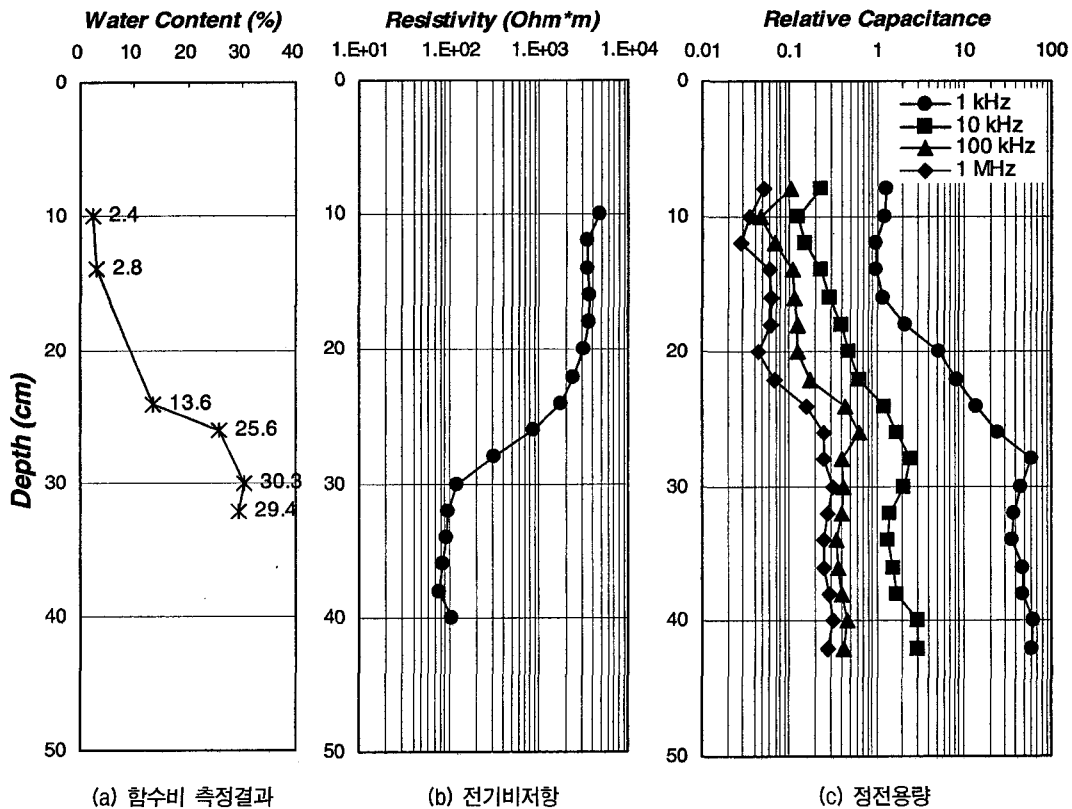


그림 4. 함수비 변화에 따른 전기비저항 및 정전용량의 변화

에는 반대수 평면에 도시한 그림 5(b)에서 알 수 있듯이 체적함수비가 증가함에 따라 유전상수가 증가하는 경향을 나타내었다. 체적함수비의 증가는 간극내 공기의 양은 감소하고 물분자 수가 증가함을 나타내고 이는 배향분극의 발현에 기여하는 쌍극자모멘트의 수가 증가되었음을 의미하므로 유전상수는 증가하게 된다. 측정 주파수의 감소에 따른 흙의 유전상수 증가는 공간전하분극의 발현 때문이다. 일반적으로 kHz 범위에서는 배향분극 이외에 추가적으로 공간전하분극이 발현되어 측정주파수의 감소에 따른 유전상수의 증가가 크게 나타난다. 반면 주파수가 높아지게 되면 공간전하분극의 효과가 작아지고 물분자와 같은 쌍극자모멘트의 분극 정도에 의해 나타나는 배향분극의 영향이 상대적으로 커지게 되므로 체적함수비 증가에 따른 유전상수 증가 경향이 더욱 뚜렷하게 나타나며 그 상관성도 높아지게 된다. 따라서, 그림 5(b)에 나타난 바와 같이 주파수가 커지게 되면 동일한 체적함수비에서 유전상수가 작은 값을 나타내게 되고, 체적함수비와 유전상수와의 상관성은 공간전하분극의 영향이 상대적으로 적은 100kHz 이상의 주파수일때 저주파수(1kHz, 10kHz)에 비해 상대적으로 높게 나타나게 된다.

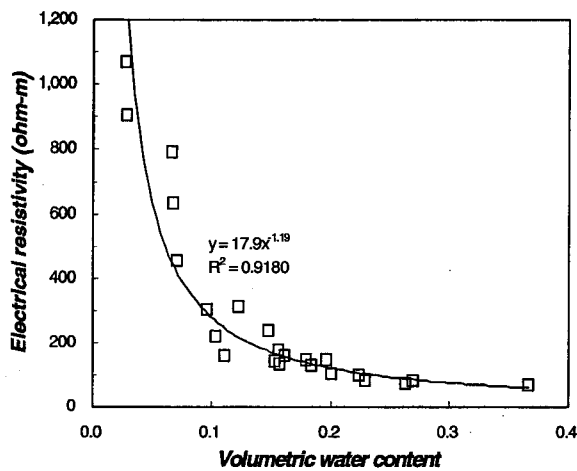
전기적 특성이 지반의 함수비에 크게 영향을 받는다 하더라도 체적함수비에 따른 전기비저항 및 유전상수의 관계 도출을 통하여 정량적 평가가 가능하므로 오염도 조사시 함수비의 효과를 고려할 수 있을 것으로 기대된다.

4.2 중금속 오염의 영향

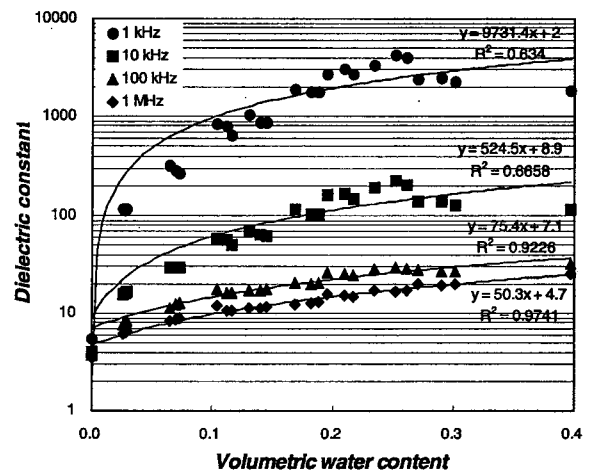
중금속의 오염여부에 따른 전기비저항 및 정전용량의 변화를 그림 6과 7에 도시하였다. 일반적으로 전기비저항 측정을 통해 신뢰성있는 측정결과를 얻을 수 있는 지반의 함수비는 10% 이상으로 제한되지만 정전용량을 측정하는 경우는 모든 함수비 범위에서 측정이 가능하다(이주형 등 2002). 본 연구결과에서도 함수비가 0%인 완전 건조된 모래층에서는 전기비저항 측정은 불가능하였나, 정전용량은 측정이 가능하였다.

그림 6과 7에서 포화된 지층에서는 납 오염으로 인하여 전기비저항이 현저하게 감소하는 경향을 확인할 수 있었으나, 불포화층에서는 그림 7에 나타난 바와 같이 납 오염으로 인한 전기비저항의 차이가 나타나지 않았다. 납으로 오염된 간극수에서는 용해된 납이온 성분이 전하운반체의 역할을 하기 때문에 전기비저항이 작아지게 되고, 이는 지반의 전기비저항을 감소시키게 된다. 그러나, 함수비가 낮은 경우에는 간극수의 전기적 특성이 지반의 전기비저항에 미치는 영향이 상대적으로 작기 때문에 불포화지반에서는 오염도를 판별하기에 어려운 것으로 사료된다.

정전용량 측정결과는 불포화층에서는 측정주파수에 관계없이 중금속의 오염여부를 판단하기가 어려웠다. 반면 포화대에서는 모든 측정주파수에서 정전용량이 다소 감소하는 경향을 나타내었으며, 이러한 감소경향은 높은 주파수에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 중금속 오염으로 인한 정전용량의 감소 경향은 이온의 수화작용(ion hydration)으로 인해 물분자의 배향분극 발현에 기



(a) 전기비저항



(b) 유전상수

그림 5. 체적함수비와 전기비저항 및 유전상수의 상관성

여하는 물분자의 수가 감소하기 때문에 나타나는 것이다(Santamarina et al. 2001; 오명학 등 2005). 즉, 물에 용해된 이온들은 물과 이온 사이의 분자간 상호작용에 영향을 주게 되는데 물 분자들은 견고하게 이온에 결합되어 전해질 분자들과 같은 거동을 하게 된다. 염(salt)의 수화는 이온들의 수화를 유도하고, 이 이온들은 물 분자들로 둘러싸이게 된다. 전해질에 존재하는 이러한 수화한 이온들을 포함한 물은 자유수(free water)보다 전

체 분극화에 미치는 영향이 더 작기 때문에 용액의 증감속 농도가 높아질수록 유전상수는 작아지게 되는 것으로 알려져 있다(Santamarina et al. 2001). 이온성분에 의한 배향분극의 감소효과는 100kHz 이상의 주파수에서 유전상수에 크게 영향을 주는 것으로 보고되고 있다(Oh et al. 2005). 따라서, 납과 같은 증감속 오염으로 인한 정전용량의 감소는 100kHz 이상의 주파수에서 측정된 경우에 비교적 뚜렷하게 나타나게 되는 것으로 판단된다.

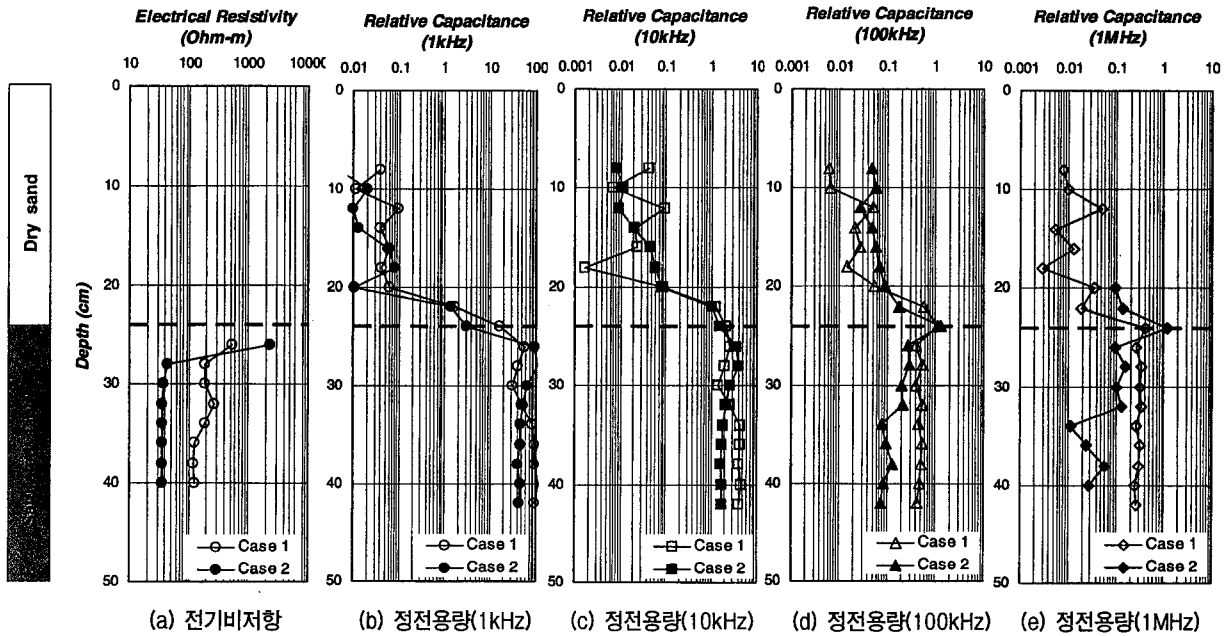


그림 6. 포화지반의 증감속 오염여부에 따른 전기비저항 및 정전용량(Case 1 & 2)

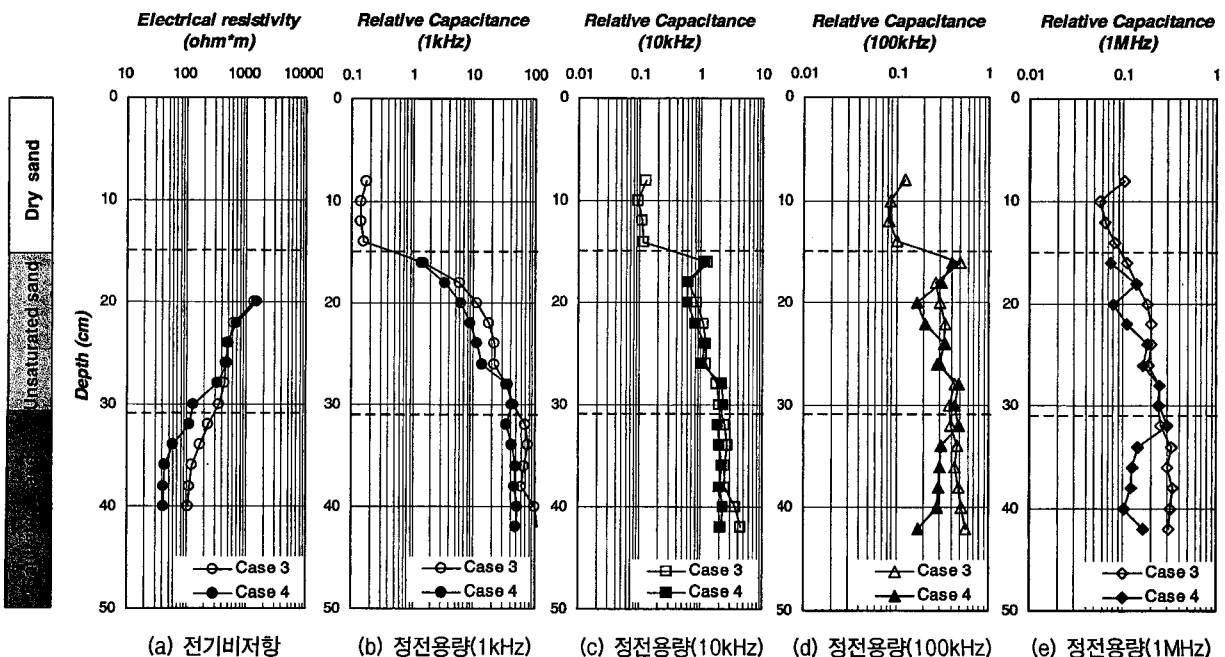


그림 7. 포화 및 불포화 지반의 증감속 오염여부에 따른 전기비저항과 정전용량(Case 3 & 4)

그림 7에서 납으로 오염된 경우(Case 4) 불포화층과 포화층의 경계에서의 전기비저항 및 정전용량 값의 변화를 살펴보면, 전기비저항의 경우(그림 7(a)) 불포화대에서 포화대로 가면서 오염여부에 관계없이 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 있다. 그러나, 100kHz와 1MHz에서 측정된 정전용량의 경우(그림 7(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 추가적으로 정전용량의 측정 및 분석을 수행하는 것은 중금속 오염여부의 정확한 평가에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, 전기비저항 및 유전상수 측정에 의한 중금속 오염도의 평가는 포화 지반에는 적용 가능하지만, 불포화 지반에서는 적용성이 낮은 것으로 나타났다. 또한, 중금속의 오염도 조사에 정전용량 측정기법을 적용하는 경우에는 100kHz 이상의 주파수에서 측정하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

4.3 디젤유 오염의 영향

그림 8은 디젤유가 누출되어 지하수면 위에 축적되는 유류오염상황을 모사한 지반조건에서 측정된 결과를 도시한 것이다. 디젤유는 전기전도성이 매우 작아서 매우 큰 전기비저항을 갖기 때문에 디젤유 자체의 전기비저항 값의 측정이 불가능하였지만, 모형시험결과에서 디젤유로 포화된 지층에서 전기비저항은 크게 증가하는 경향을 나타내어 플룸(plume) 형태로 수면위에 존재하는 디젤유층의 감지에는 적용성이 있는 것으로 사료된다. 정전용량의 경우에는 디젤유층에서 정전용량이 크게 감소하는 경향을 나타내었다. 일반적으로 불용성의 유기오염물질의 유전상수는 물에 비해 매우 작은 값을 나타낸다. 디젤유의 유전상수는 2.0~2.4 정도의 작은 값을 나타내며, 유기화합물의 그 구조적 특성 중 비극성(nonpolar)으로 인하여 전기장에 대한 분극의 정도(polarizability)가 작기 때문이다(오명학 2005). 따라서, 모형시험에서의 정전용량 감소는 이러한 디젤유의 유전특성이 반영되어 나타나는 결과로 해석될 수 있다. 측정주파수에 따른 변화경향을 살펴보면 1MHz의 경우에는 디젤유층에서 정전용량의 감소가 나타나지만 뚜렷하지는 않았고, 1kHz - 100 kHz의 주파수에서는 뚜렷한 감소경향을 나타내었다.

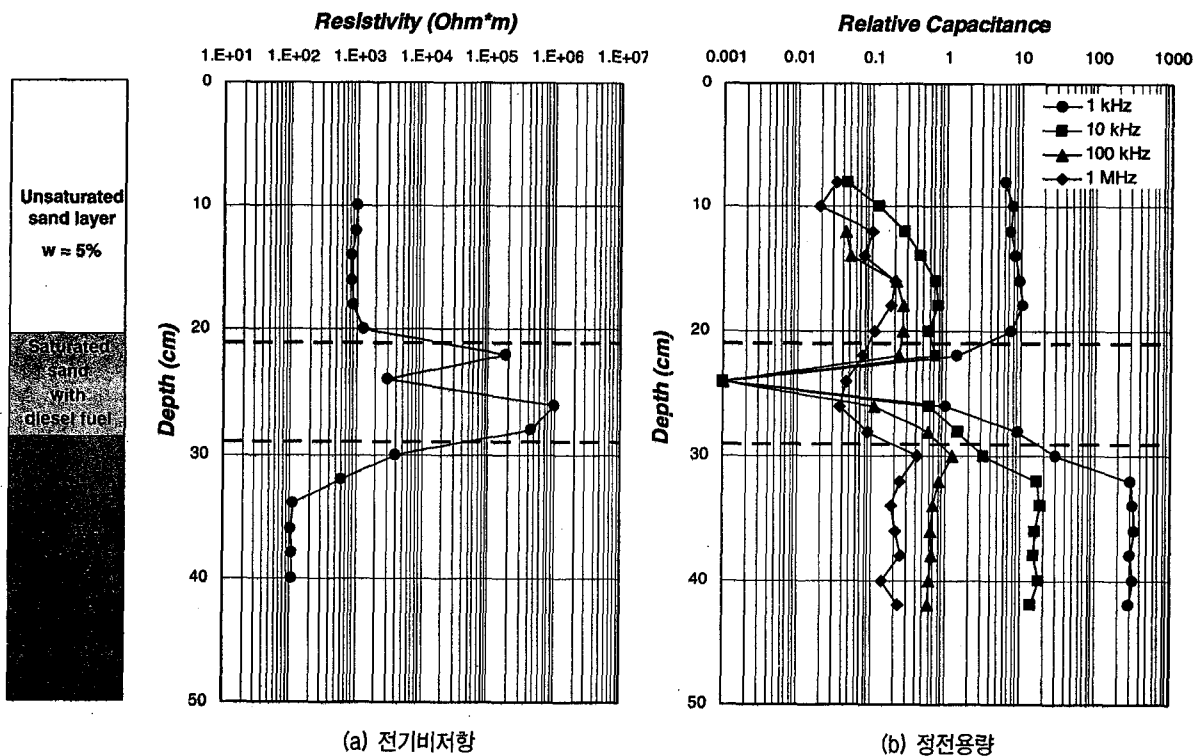


그림 8. 지하수위 상부에 디젤유가 존재하는 경우 전기비저항 및 정전용량 변화(Case 5)

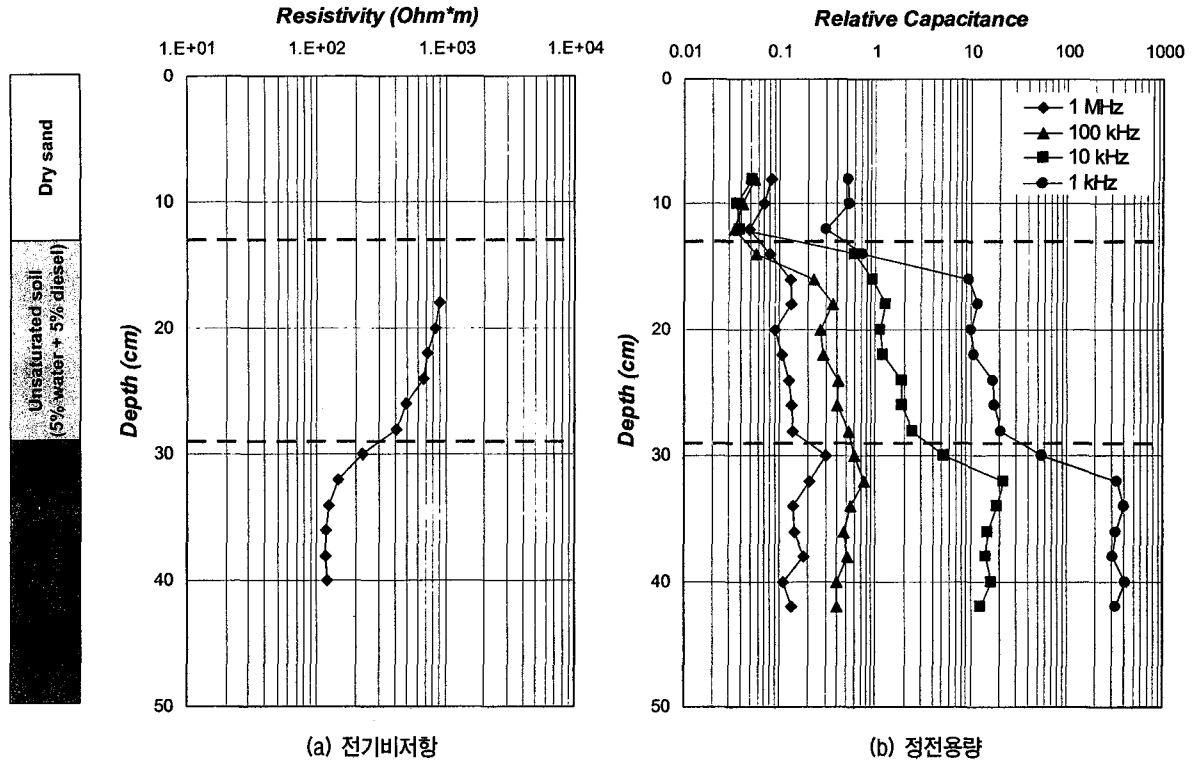


그림 9. 디젤유로 오염된 불포화지반의 전기비저항 및 정전용량(Case 6)

그림 9는 불포화지반이 디젤유로 오염된 상황에서의 전기비저항 및 유전상수 측정결과를 도시한 그림이다. 그림 9의 결과를 그림 7과 그림 8의 오염되지 않은 불포화지층에서의 측정값과 비교해볼때 디젤유 오염으로 인한 측정값의 차이는 크게 나타나지 않는 것으로 평가되었다. 이는 간극에 간극수와 디젤유가 함께 존재하는 경우 간극수를 통한 전류흐름이 형성되기 때문에 디젤유에 의한 전류흐름의 차단효과의 발현이 미비하기 때문에 나타나는 결과로 판단된다. 따라서, 전기비저항 및 정전용량 측정기법을 적용하는 경우 불포화지반의 유류 오염도 조사에는 한계가 있는 것으로 사료된다.

그림 8에서 디젤유 오염층과 포화대의 경계에서는 측정값의 연속적인 변화경향으로 인하여 그 경계면의 위치를 정확히 파악하기에는 어려움이 있는 것으로 나타났다. 이는 전극사이에서 형성되는 전기장의 수직·수평의 영향범위가 규명되지 않아 인접지반의 전기적 특성의 영향을 받기 때문에 나타나는 결과로 사료하므로 이에 대한 해석기법이 정립되어야 할 것으로 판단된다. 지층 경계에서의 정확한 해석을 위해서는 전극사이에서 형성되는 전류의 흐름형태를 평가하여 그 영향범위를 산정하고, 층경계에서 전극의 상대적 위치에 따른 상·하부 지층의 전기적 특성의 영향 정도를 정량적으로 평가

하는 등 층경계에서의 측정자료 해석기법에 대한 추가적인 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

비저항콘에 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 나타났으나, 불포화대에서는 적용이 어려운 것으로 나타났다. 특히, 정전용량 측정기법은 100kHz 이상의 주파수를 적용하게 되면 중금속으로 오염된 포화지반에서 함수비가 증가하는 경우에도 이온의 수화작용으로 인한 정전용량의 감소효과가 뚜렷하게 나타나기 때문에 전기비저항 자료를 보완하여 더욱 명확하게 중금속 오염여부를 파악할 수 있을 것으로 기대된다.
- (2) 지하수대 상부에 디젤유 오염층이 존재하는 경우 디젤유의 비전도성으로 인하여 전기비저항은 크게

증가하였으며, 유기화합물질의 비극성으로 인하여 정전용량은 감소하는 경향을 나타내어 이를 감지하는 데 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다. 그러나, 불포화대의 간극에 디젤유가 일부 존재하는 경우에는 이를 감지하는데 어려움이 있는 것으로 나타났다.

- (3) 전기비저항/정전용량 측정콘의 적용성을 높이기 위해서는 오염대의 존재 깊이를 정확히 파악하고 그 경계를 명확히 규명하기 위해서는 층경계에서 전극의 상대적 위치에 따른 상·하부 지층의 전기적 특성의 영향을 파악하여 이에 대한 해석방법이 정립되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 콘관입시험에서 도출되는 콘관입저항력과 주변마찰저항력 자료와의 연계해석을 통하여 지반의 공학적 특성과의 연계해석방법에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 오명학 (2005), 흙의 전기적 특성 평가를 통한 지반오염 감지시스템 개발, 서울대학교 박사학위논문.
2. 오명학, 김용성, 유동주, 박준범 (2005), "함수비와 중금속 오염도에 따른 유전상수의 변화", 한국지반공학회논문집, 제21권 5호, pp.231-241.
3. 오명학, 이기호, 박준범 (2004), "함수비와 간극수 오염이 불포화 사질토의 전기비저항에 미치는 영향", 대한토목학회 논문집, 제24권 1C호, pp.27-34.
4. 윤길림, 유찬, 이영남, 윤춘경, 이용길 (1998), "오염지반의 전기비저항치와 토성과의 상관성 연구", 한국지반공학회논문집, 제14권 2호, pp.79-92.
5. 이주형, 오명학, 박준범, 김형석(2002), "수분함량과 측정주파수에 따른 사질토 지반의 유전상수 변화", 한국지반공학회논문집, 제18권 6호, pp.129-139.
6. Brandl, H. and Robertson, P. K. (1996), "Geoenvironmental site

investigation and characterization", *2nd International Congress on Environmental Geotechnics*, pp.117-140.

7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Piccoli, S. and Benoit, J. (1995), "Geo-environmental testing using the envirocone", *Geoenvironment 2000*, ASCE, pp.151-166.
17. Rowe, R. K., Shang, J. Q. and Xie, Y. (2001), "Complex permittivity measurement system for detecting soil contamination", *Canadian Geotechnical Journal*, 39, pp.498-506.
18. 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.
19. Santamarina, J. C., Klein, K. A. and Fam, M. A. (2001), *Soils and Waves*, John Wiley & Sons.
20. van Nostrand R. G. and Cook K. L. (1966), *Interpretation of Resistivity Data*, U.S. Geological Survey, Professional Paper 499, USGS, Washington D.C.

(접수일자 2006. 4. 24, 심사완료일 2006. 7. 18)