

전기저항 측정기법을 이용한 오염물질 누출감지시스템의 개발: I. 오염물질에 의한 지반의 전기적 특성 변화

Development of Contaminant Leakage Detection System Using Electrical Resistance Measurement:

I. Variations of Electrical Properties of Subsurface due to Contaminants

오 명 학* ¹	Oh, Myoung-Hak	박 준 범* ²	Park, Jun-Boum
김 영 진* ³	Kim, Young-Jin	홍 성 완* ⁴	Hong, Sung-Wan
이 용 훈* ⁵	Lee, Yong-Hun		

Abstract

The concept that the electrical properties of subsurface material can be affected by the introduction of contaminants might be applicable for developing the leakage detection system for petroleum hydrocarbons of underground storage tanks and leachate coming from landfill. Investigations were conducted with diesel, NaCl solution, and leachate by laboratory tests. Simulation test was performed leaking at a certain point in the field. The measured resistance was exponentially decreased as the water content of uncontaminated unsaturated sand was increased. The resistance of soil was increased by diesel but decreased by NaCl solution or leachate. The optimum electrode spacings were found for NaCl solution, leachate and diesel. Electrolytic solutions were better detected by wider spacing than non electrolytic solution.

요 지

본 논문에서는 오염물질에 의해서 지반의 전기적 특성이 변한다는 원리에 의한 매립지의 침출수나 지하저장탱크의 유류 누출을 조기에 감지하는 시스템의 개발가능성을 확인하고자 하였다. 이를 위해 오염물질이 누출되는 상황을 모사한 실내실험을 통하여 전기저항 측정에 의한 오염물질 누출감지 가능성을 평가하였다. 불포화사질토 지반의 전기저항 측정값은 함수비가 증가함에 따라 지수적으로 감소하는 경향을 보였다. 오염물질이 지반에 주입될 경우에 디젤은 비전도성 물질로 지반의 전기저항을 크게 증가시켰으며, NaCl 용액과 침출수는 전기전도성이 좋기 때문에 지반의 전기저항을 감소시켰다. 오염물질의 누출에 의한 전기저항은 측정전극간격에 따라 감지민감도가 다르게 나타났으며, 디젤의 경우에는 전극간격이 좁을수록, NaCl 용액과 침출수의 경우에는 전극간격이 높을수록 감지민감도가 크게 나타났다.

Keywords : Contaminant detection, Diesel, Electrical resistance, Leachate, NaCl

*1 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul Nat'l Univ.)
 *2 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부, 조교수 (Member, Assistant Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul Nat'l Univ.)
 *3 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 토질 및 기초 연구그룹, 수석연구원 (Member, Senior Research Fellow, Civil Engrg., Research Division, KICT)
 *4 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 지반구조물 연구그룹, 연구위원 (Member, Research Fellow, Civil Engrg., Research Division, KICT)
 *5 한국과학기술연구원 미래기술연구본부, 선임연구원 (Future Technology Research Division, KIST)

1. 서론

1.1 연구배경

지반오염은 조사가 어렵고 심각한 상황에 이르러서야 문제를 나타내는 특성이 있기 때문에 오염을 조기에 탐지하는 것이 매우 중요하다. 지반 오염물질은 인간의 의도적인 행위나 예기치 않은 사고 또는 무관심에 의해 지반으로 침투, 유입되어 토양과 지하수를 오염시키게 된다. 토양과 지하수를 오염시킬 수 있는 잠재오염원의 종류는 무수히 많으나 크게 점오염원과 비점오염원으로 구분된다. 대표적인 점오염원은 정화조(Septic Tank System), 지하저장탱크(Underground Storage Tanks), 유해폐기물 처분장(Hazardous Waste Sites), 매립지(Landfills), 지표저류시설(Surface Impoundments), 폐공(Abandoned Wells) 등을 들 수 있으며, 비점오염원으로는 농약살포와 산성비 등이 있다(한정상, 2000). 점오염원의 경우에는 잠재오염원의 위치가 제한되므로 이에 대한 지속적인 모니터링을 통하여 오염물질의 누출이 발생할 경우 누출초기에 누출여부와 지점을 감지하여 이를 신속히 처리한다면 지반의 오염에 의한 피해를 최소화할 수 있다.

중금속과 유기화합물에 대한 토양과 지하수의 오염 조사에는 시료를 채취하여 실험실에서 분석하는 방법이 일반적이다. 현장에서 채취된 시료를 분석코자 할 때에는 이를 저장, 운반하여 실험실의 분석기기로 토양이나 지하수의 오염도를 평가하는 것이 보통이다. 그러나 시료를 채취, 운반, 저장하는 과정 중에 토양의 본래 오염도를 변화시킬 수 있고, 시료를 채취하는 동안 이차오염을 일으킬 가능성이 존재한다(Okoye et al., 1995; Kaya and Fang, 1997; Yeung and Akhtar, 1997). 또한 시료를 채취하여 분석하는 방법은 시간이 많이 소모되고 시간에 따른 지속적인 모니터링이 불가능한 단점을 가지고 있다. 최근에는 샘플링하여 분석하는 과정을 통해 발생할 수 있는 제반 문제를 최소화하기 위하여 물리탐사기법인 전기비저항탐사나 콘관입시험기에 전기비저항 측정기능을 추가시킨 환경콘을 지반오염도 조사에 활용하기 위한 연구가 많이 수행되었다. 지반오염은 흙의 비저항특성에 영향을 준다. 오염성분에 의해서 흙과 간극수의 전기적 성질이 변하기 때문에 전기비저항값의 차이에 의하여 오염대를 평가할 수 있다(윤길립 등, 1998; 윤춘경 등, 1998; Campanella and Weemees, 1990; Okoye et al., 1995). 이들 방법은 지반 내에 존재하는 전도성

물질에 의한 오염대의 조사에 효과적인 것으로 알려져 있으나, 오염물질의 누출 가능성을 가지고 있는 잠재오염원의 누출에 대한 지속적인 모니터링을 수행하는 데는 적용하기 어렵다. 따라서, 매립지나 지하저장탱크와 같은 잠재오염원의 누출에 대하여 지속적 모니터링이 가능한 누출감지시스템의 개발이 요구된다(Oh and Park, 2000).

1.2 연구의 목적

본 연구는 오염물질에 의해서 지반의 전기적 특성이 변한다는 원리를 이용하여 매립지의 침출수나 지하저장탱크의 유류 누출을 조기에 감지하는 시스템을 개발하기 위해 수행되었다. 본 논문에서는 전기저항을 측정하여 오염물질의 누출에 대한 감지가능성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 먼저 화강풍화토의 함수비 변화에 따른 전기저항 측정값의 변화경향을 도출하였다. 또한 NaCl 용액, 침출수, 디젤의 전기전도도와 전기비저항을 정량적으로 평가하였다. 지반에 오염물질이 누출되는 상황을 모사한 실내실험을 수행하여, 주입 용액의 특성에 따른 전기저항 측정값의 변화양상을 파악하고, 오염물질의 감지에 효과적인 측정센서의 전극간격을 도출하였다.

2. 전류전도기작

대전된 입자의 움직임에 의해 발생하는 전류는 세 가지 방법으로 전도된다. 첫째, 자유전자는 물질의 결정구조를 통하여 흐르게 되는데 이를 전자전도(electronic/ohmic conduction)라 한다. 이것은 주로 금속에서 발생한다. 둘째, 전류는 지하수에 용해된 이온에 의해 전달되기도 한다. 이온들은 흙이나 암반 속의 연결된 간극을 통하여 이동하게 되는데 이를 전해액전도(electrolytic conduction)라 한다. 셋째, 유전전도(dielectric conduction)가 있다. 이는 자유전자가 거의 없거나 전혀 없는 전도성이 좋지않은 매체나 절연체에서 발생한다. 외부의 변화하는 전기장에 대응하여 원자내의 전자는 핵에 대해서 미세한 변위를 일으키는데, 이와 같은 (+)전하와 (-)전하의 상대적 간격의 변화를 물질의 유전분극이라 한다. 즉, 교류 전기장의 결정구조내에서 대전된 입자의 주기적인 변화는 교류전류로 볼 수 있는 움직임이 발생하게 된다. 그러나, 유전전도에 의해서는 대전된 입자의 실질

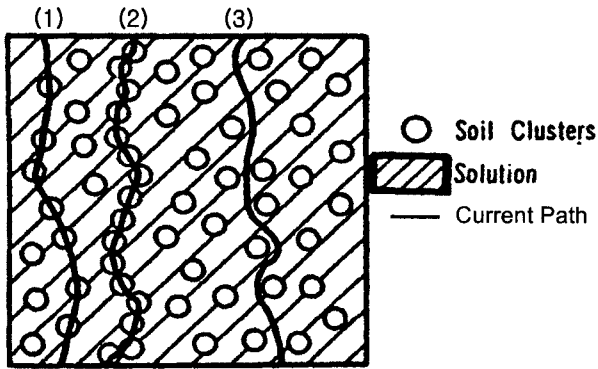


그림 1. 포화대에서의 전류흐름경로(Smith and Arulanandan, 1981)

적인 흐름이 발생하는 것은 아니다(민경덕 등, 1987; Robinson and Coruh, 1988).

지반의 전기전도 특성은 측정전극과 흡입자, 또는 압석에서 주로 발생하는 전자전도와 지하수 혹은 간극수에서 발생하는 전해액전도의 결합에 의해 결정된다. 측정전극과 지반 사이의 전하의 이동은 산화환원반응에 의해서 발생한다(Campanella and Weemeees, 1990). 전극으로부터 지반으로 전달된 전류는 포화된 지반 내에서 그림 1과 같은 세 가지 경로를 통하여 흐르게 된다. (1) 간극수와 흡입자를 연속적으로 연결하는 경로, (2) 흡입자가 서로 연결되어 이루는 경로, (3) 순수한 간극수만에 의해 형성되는 경로이다(Smith and Arulanandan, 1981). 사질토 지반의 경우 흡입자를 통한 전류의 이동은 간극수에 의해 전달되는 전류에 비해 매우 작으므로 무시될 수 있다. 따라서, 지반에서의 저항 측정값에는 세 가지 전류경로 중에서 간극수에 의해 형성되는 전류전도 경로에 의한 효과가 지배적으로 나타난다.

3. 실험재료 및 방법

3.1 실험재료

실험에 사용된 흙은 화강풍화토이며, 흙의 입도분포

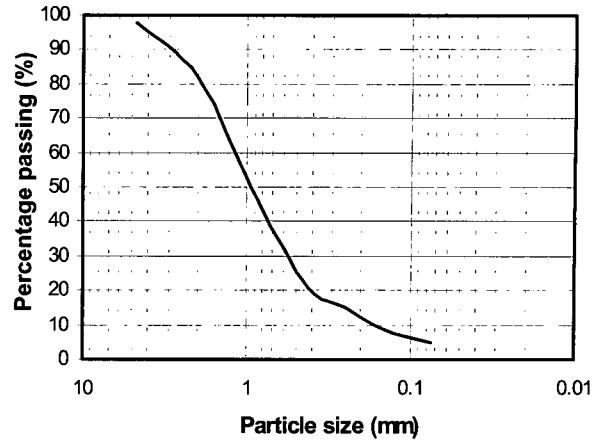


그림 2. 화강풍화토의 입도분포곡선

는 그림 2와 같고 기본물성은 표 1과 같다. 실험에 사용된 화강풍화토는 통일분류법상 입도분포가 좋은 모래(SW)로 분류되었다. 오염되지 않은 간극수로는 수도물(tap water)을 사용하였고, 이온농도에 대한 영향의 상대적인 비교, 분석을 위하여 질량농도 1%, 5%, 10%의 NaCl 용액을 조제하여 사용하였다. 실제 오염물질에 대한 누출감지도를 평가하기 위하여 비전도성 오염물질인 디젤과 전도성 오염물질인 침출수에 대한 감지도를 평가하였다. 디젤은 원유를 증류할 때 중간정도에서 분류되는 C₉에서 C₂₀까지의 탄화수소를 포함하는 유류로 동절기용과 하절기용으로 구분된다. 본 실험에서는 동절기용 디젤을 사용하였다. 침출수는 김포매립지에서 침출수 처리시설로 유입되는 침출원수를 채취하였다. 침출원수의 성분은 표 2와 같다.

표 1. 화강풍화토의 물리적 특성

Soil	Weathered granite soil
Specific gravity	2.63
Organic Content	1.97 %
Coefficient of Curvature, C _c	1.4
Coefficient of Uniformity, C _u	8.4
Unified Soil Classification System	SW
Maximum dry unit weight	1.97 t/m ³
Optimum Moisture Content	9.5 %

표 2. 김포매립지 침출수 성분 (환경부, 2000)

(단위 : mg/ℓ)

	BOD	COD _{Mn}	COD _{Cr}	T-N	T-P	NH ₃ -N	SS	TS	Cl ⁻	Cu	Cd	Pb	As	Cr ⁶⁺	Hg	Zn
최소	1,484	928	3,477	1,602	10.90	1,529	94	11,790	3,617	0.064	N.D.	N.D.	N.D.	0.044	N.D.	0.602
최대	2,976	1,171	5,291	2,148	16.59	2,018	296	16,360	5,177	1.065	0.173	0.213	N.D.	0.160	N.D.	2.152
평균	2,145	1,042	4,457	1,964	13.13	1,814	189	13,620	4,313	0.202	0.018	0.046	N.D.	0.103	N.D.	1.303

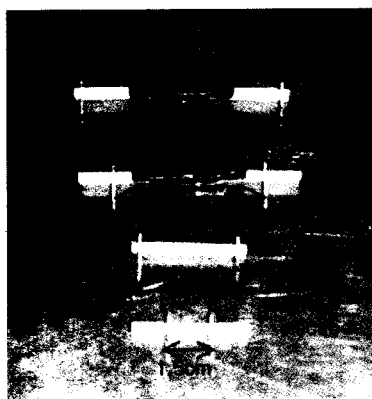
3.2 실험방법

용액의 전기전도도와 전기비저항은 전기전도도계(Orion 550A)를 사용하여 ASTM D1125-91에 의해 측정하였다. 전기전도도 측정에서는 $0.01\mu\text{S}/\text{cm} \sim 300\mu\text{S}/\text{cm}$ 범위의 낮은 전기전도도를 갖는 용액을 측정할 수 있는 셀상수 $K=0.1$ 의 측정셀(Orion 2-Electrode Cell)과 $10\mu\text{S}/\text{cm} \sim 2000\text{mS}/\text{cm}$ 범위의 전기전도도를 측정할 수 있는 셀상수 $K=0.475$ 의 측정셀(Orion DuraProbe 4Electrode Cell)을 사용하였다. $K=0.1$ 의 측정셀을 이용하여 탈이온수(deionized water)와 디젤의 전기전도도를 측정하였고, $K=0.475$ 셀을 이용하여 수돗물(tap water), NaCl 용액, 침출수의 전기전도도를 측정하였다. 용액의 전기전도도는 온도의 증가에 크게 영향을 받기 때문에 측정시 용액의 온도는 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였다(Sawyer et al., 1994; Abu-Hassanein et al., 1996).

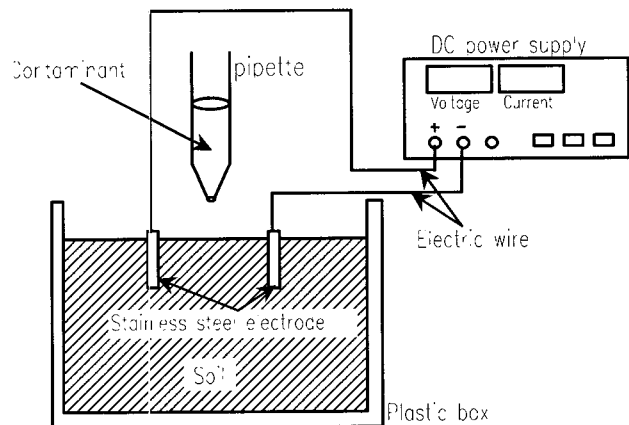
전기탐사 기법에서 겉보기 전기비저항(apparent resistivity)은 지반이 균질한 상태라는 가정하에 도출되어진다. 전기비저항 탐사에서는 전극의 위치를 측선에 따라 이동해가며 측정하여 얻은 겉보기 전기비저항 자료에 대한 역산을 통해 측선 하부 지반의 2차원 단면도 형태의 전기비저항 분포도를 도출하게 된다(유찬 등, 1999; 손호웅 등, 2000). 그러나, 오염물질이 지반내에 국부적으로 유입되는 경우 지반은 오염물질에 의하여 불균질한 상태가 된다(Binley et al., 1996). 또한 측정전극이 지반내에 설치되어 고정되는 누출감지시스템에 적용하는 경우에는 전기비저항 탐사기법과 같이 측선에 따라 전극을 이동해가며 측정하는 것이 용이하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 누출감지시스템에 설치될 수

있는 형태인 두 개의 전극으로 구성된 측정센서로 전기저항을 측정하여 지반으로 유입되는 오염물질의 감지도를 평가하고자 하였다.

흙 시료의 전기저항을 측정하기 위하여 그림 3(a)와 같이 1.2cm 길이의 스테인리스 스틸(stainless steel) 두 개가 1.5cm, 3.5cm, 5.5cm, 7.5cm의 간격을 갖는 네 종류의 측정전극을 제작하였다. 흙시료에 대한 전기저항 측정은 전류의 흐름에 영향을 주지 않을 정도로 큰 $20\text{cm} \times 14\text{cm} \times 12.5\text{cm}(\text{h})$ 크기의 절연성 플라스틱 상자에 수돗물과 골고루 혼합하여 함수비가 조절된 화강풍화토를 넣고 2.5kg의 추를 20cm 높이에서 25회 낙하시켜 다짐을 실시하였다. 동일한 방법으로 다져진 모든 경우의 시료에 대하여 네 종류의 측정전극을 각각 흙에 설치하고 DC power supply(HP E3612A)로 전압과 전류의 값을 측정하였다. 측정된 전압[V]과 전류[mA]의 값을 옴(Ohm)의 법칙에 의해 저항값[k Ω]을 계산하였다. 오염물질의 누출전후의 저항값의 변화를 비교하기 위한 실험은 실제 오염물질이 지반내로 누출이 발생하는 상황을 모사하여 그림 3(b)와 같은 방식으로 수행하였다. 함수비를 맞추어 성형한 시료에 전극을 설치하여 초기 저항값을 측정하고, 측정전극의 중심에 피펫으로 오염물질 50ml 주입한 후 시료의 저항값을 측정하였다. 본 연구에서는 디젤과 질량농도 1%, 5%, 10%의 NaCl용액, 김포매립장에서 채취한 침출수에 대하여는 오염물질의 주입에 대해 저항값을 측정하고 주입전후 저항값의 변화를 비교하여 오염물질 감지에 대한 민감도를 분석하였다.



(a) 네가지 전극간격의 측정전극



(b) 실험방법

그림 3. 전기저항 측정전극 및 실험방법

4. 결과 및 분석

4.1 용액의 전기적 특성

전기전도도계를 사용하여 측정된 용액의 전기전도도와 전기비저항은 다음의 표 3과 같다. 오염되지 않은 간극수로 사용된 수도물(tap water)의 경우 $70\Omega\text{m}(=0.14\text{mS}/\text{cm})$ 정도의 전기전기비저항을 나타내었다. 문헌에 의하면 일반수(natural water)의 전기비저항은 $20\sim 200\Omega\text{m}$ 로 제시되어 있으므로 수도물을 이용하여 오염되지 않은 일반적인 간극수로 사용한 것은 합리적인 것으로 판단할 수 있다(한정상, 1999). 탈이온수의 경우에는 이온이 거의 존재하지 않기 때문에 매우 작은 전기전도도를 나타내었다. NaCl 용액의 경우에는 NaCl 용액의 농도가 1%에서 10%로 커짐에 따라 전기전도도는 비례하여 증가하는 경향을 나타내며, 전기비저항은 반비례하는 경향을 나타내었다. 이는 용액상에 이온의 양이 증가함에 따라 운반할 수 있는 전하의 양이 증가되기 때문이다. 따라서, 이온성분의 경우에는 이온의 농도에 대한 정량적 평가도 가능하다(Sawyer et al., 1994).

디젤의 경우 $0.01\sim 300\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위에서 측정가능한 전기전도도 셀로는 측정이 불가능하였으며, 이는 디젤의 전기전도도가 $0.01\mu\text{S}/\text{cm}$ 보다 작은, 즉 전기비저항이 $1,000,000\Omega\text{m}$ 이상인 비전도성 물질임을 추론할 수 있다. 김포매립지에서 채취한 침출수의 전기비저항은 $0.5\Omega\text{m}$ 의 작은 전기비저항을 나타내었으며, 이는 침출수 성분중에 포함된 많은 이온성분들에 의한 것이다. 침출수의 전기비저항은 실험에 사용된 수도물이나 일반수의 전기비저항에 비하여 매우 작으므로 전기적 특성 조사에 의한 침출수의 감지가 가능함을 나타낸다.

표 3. 용액의 전기전도도와 전기비저항

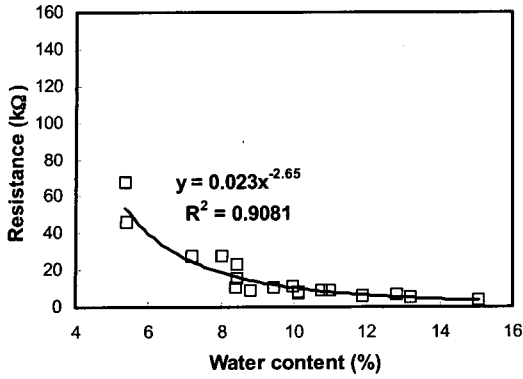
Solution	Electrical Conductivity (mS/cm)	Electrical Resistivity (Ωm)
DI water	0.45×10^{-3}	22,515
Tap Water	0.14	70.44
NaCl 1%	17.71	0.565
NaCl 5%	75.87	0.132
NaCl 10%	133.77	0.075
Leachate	20.58	0.486
Diesel	N.A.	N.A.

4.2 함수비에 따른 전기저항의 변화

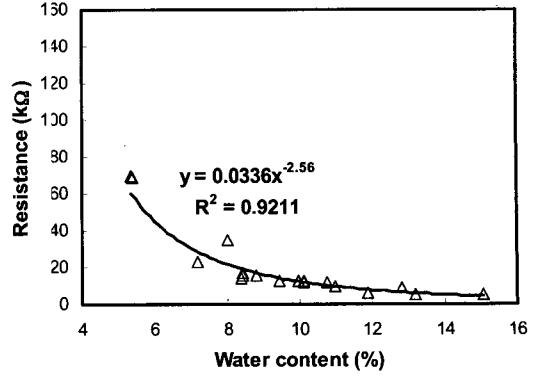
흙의 전기저항값에 가장 큰 영향을 주는 인자로 알려진 물의 영향을 알아보기 위하여 함수비의 변화에 따른 네 가지 전극간격의 센서에 의해 측정된 저항값의 변화를 그림 4에 도시하였다. 함수비가 5%이하에서는 실험에 사용된 측정기에 의하여 측정이 불가능하였으며, 함수비 15% 이상에서는 시료의 다짐이 제대로 수행되기 어려웠기 때문에 5~15% 범위의 함수비에 대하여 그 결과를 나타내었다. 그림 4에서 모든 전극간격에 대하여 함수비가 증가할수록 저항값이 지수함수적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 특히, 함수비가 최적함수비보다 작은 경우에 함수비의 변화에 대한 저항값의 변화가 매우 크며, 최적함수비보다 큰 경우에는 함수비의 증가에 따라 전기저항 측정값의 변화가 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 일반적으로 사질토의 경우에는 흙 입자의 전도성이 매우 작기 때문에 흙 입자를 통한 전류의 흐름이 없는 것으로 가정한다(Jackson, 1975; Abu-Hassanein et al., 1996). 따라서, 함수비의 변화에 따른 전기저항의 지수함수적인 감소경향은 최적함수비 근처에서 간극내에 존재하는 물에 의한 연속적인 전류흐름경로가 형성되었기 때문으로 판단된다. 즉, 그림 5와 같이 불포화지반에서 간극내에 존재하는 공기는 간극수의 연속적인 연결을 막아 전류의 흐름을 차단하거나 전류흐름의 굴곡도를 크게 하여 전하의 이동거리를 증가시켜 결과적으로 저항이 크게 나타난다(그림 5(a)). 그러나 특정 함수비 이상이 되면 물의 양이 증가하여 측정전극 내에서 간극수가 연속적으로 연결되어 여러 개의 전류 전도 경로를 제공하게 되므로 저항값이 감소하게 된다(그림 5(b)). 전기저항값은 전류 전도경로의 길이에 비례하는데 그림 7에 보인 물의 경우에 함수비가 최적함수비에 가까운 8%인 때는 전극간격과 측정저항값의 관계가 거의 직선적인데 비하여, 함수비가 작은 5%의 경우는 곡선을 나타내어 전류흐름의 굴곡도를 크게 했음을 알 수 있다.

전극간격에 따른 측정저항값의 변화를 보면, 동일함수비에 대하여 전극간격이 넓을수록 저항값이 크게 측정되었으며, 이는 저항이 전류 경로의 길이에 비례하기 때문이다. 또한 전극간격이 넓을수록 전기저항의 측정값은 함수비의 변화에 대해 더 민감한 변화를 나타내었다.

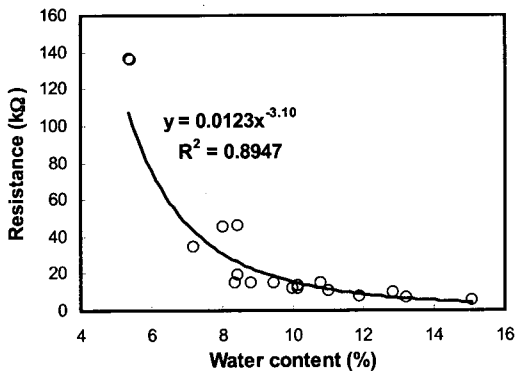
전극간격과 다짐도가 일정한 경우 함수비에 대한 저항값의 변화에 대한 회귀분석을 실시한 결과 함수비에 대한 지수함수형태로 표현되는 다음의 식(1)과 같은 관



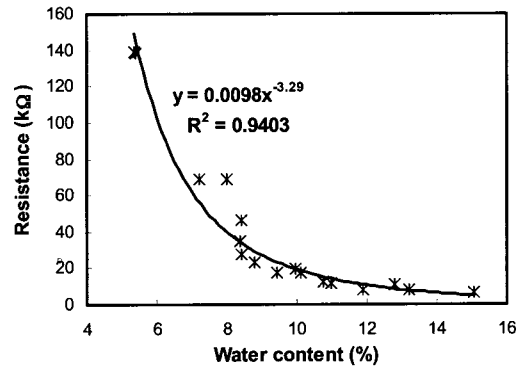
(a) Electrode spacing 1.5cm



(b) Electrode spacing 3.5cm

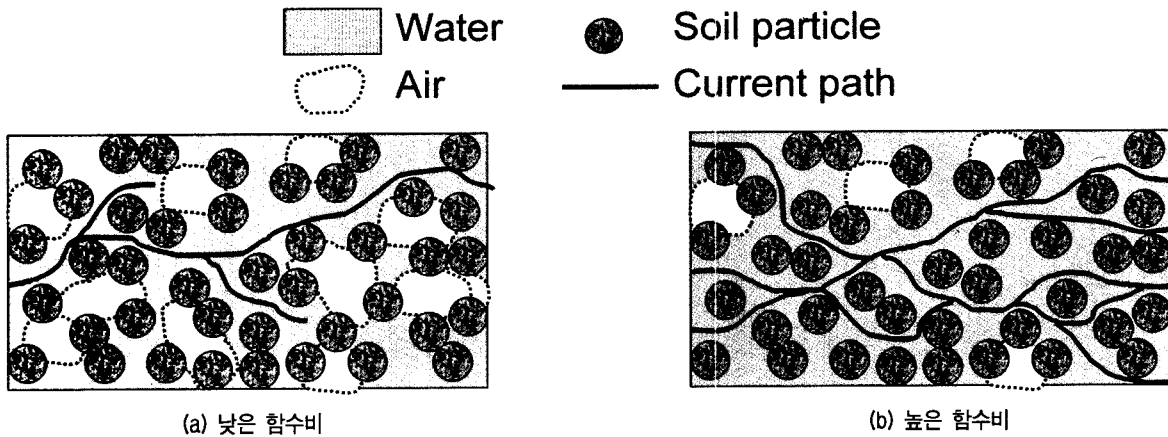


(c) Electrode spacing 5.5cm



(d) Electrode spacing 7.5cm

그림 4. 함수비의 변화에 따른 측정저항값의 변화



(a) 낮은 함수비

(b) 높은 함수비

그림 5. 함수비에 따른 전류전도경로의 비교

계식을 도출하였으며, 네 가지 전극간격에 대하여 모두 높은 상관성을 나타내었다.

$$R = a\omega^{-b} \quad (1)$$

여기서, R은 측정저항[kΩ], ω는 함수비이며, 계수 a, b는 상수이다.

식 (1)은 다짐도가 일정한 경우 함수비와 저항과의 관계를 나타내주는 식으로, 함수비의 증가에 따라 전기저항값이 지수적으로 감소함을 나타낸다. 다양한 종류의 흙에 대한 실험을 통하여 함수비와 저항과의 관계를 나타내는 데이터가 충분히 확보된다면 저항값의 측정에 의하여 함수비의 추정이 가능할 것으로 판단된다. 또한 저항값의 측정에 의한 오염도 조사에 있어서 지반에 대

한 측정저항값은 오염되지 않은 상태에서도 함수비에 대한 영향을 크게 받으므로 지반의 오염도 평가에 앞서 지반의 함수비에 대한 조사가 선행되어야 할 것으로 사료된다.

4.3 간극수의 영향

간극수 자체의 전기적 성질은 흙의 전기적 성질에 영향을 준다. 본 연구에서는 간극수의 이온농도에 따른 흙의 전기저항값의 변화를 알아보기 위하여 1%, 5%, 10% 농도의 NaCl 용액으로 함수비를 실험에 사용된 화강풍화토의 최적함수비인 9.5% 정도로 맞추어 시료를 성형한 후 전기저항값을 측정하였다. NaCl 용액의 농도에 따른 저항값의 변화는 그림 6과 같이 나타났다. 간극수의 NaCl의 농도가 높아짐에 따라 측정저항값이 감소되는 경향을 보였다. NaCl 용액의 농도가 1%만 되어도 전기비저항이 크게 작아지는 것을 알 수 있으며, 1%보다 더 커지게 되면 전기저항값의 감소는 있지만 그 변화가 그리 크진 않았다. 이는 NaCl과 같은 이온성분의 함량이 큰 오염물질이 누출되어 지반 내에 존재하는 간극수에 의하여 저농도로 희석되는 경우에도 전기저항 측정에 의하여 희석된 오염물질의 감지가 가능함을 나타내 주는 결과이다.

한편, NaCl 용액의 경우와 같은 방법으로 디젤 함유비를 최적함수비와 같은 9.5%로 맞추어 시료를 성형하여 전기저항을 측정하였으나, 디젤유가 비전도성 물질이기 때문에 전기저항의 측정이 불가능하였다.

4.4 오염물질 감지 최적 전극간격

오염물질의 누출에 대한 감지정도를 평가하고, 각 오염물질의 감지에 최적의 전극간격을 도출하기 위하여 오염물질의 주입 전후의 전기저항값을 측정하였고 그

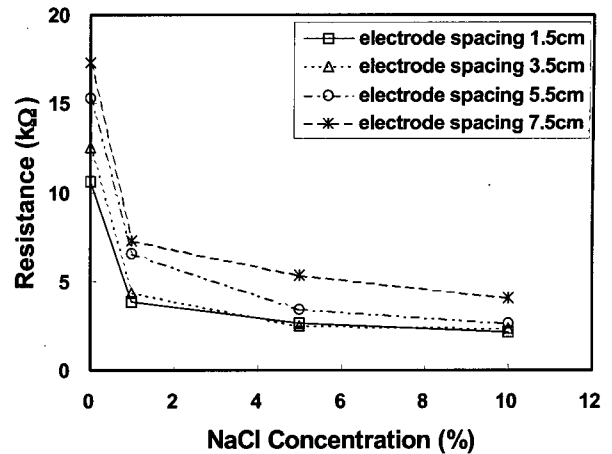


그림 6. 간극수의 이온농도 효과

결과를 표 4, 5, 6에 정리하였다. 디젤의 경우 비전도성 용액이기 때문에 디젤의 주입으로 인하여 전기저항값은 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 비전도성 물질인 디젤이 전류의 흐름을 차단하여 전류흐름의 굴곡도를 증가시키기 때문이다. 반면 NaCl 용액과 침출수의 경우에는 주입 후 전기저항이 크게 감소하였다. NaCl 용액과 침출수가 주입되면 두 가지 효과에 의하여 전기저항이 감소하게 된다. 첫째는 함수비의 증가효과이고, 둘째는 이온성분의 증가이다. 특정한 함수비를 갖는 지반에 침출수와 같은 오염물질이나 NaCl 용액과 같은 일반이온용액이 주입되면 주입된 지점의 함수비는 증가하게 된다. 함수비가 증가하게 되면 전류흐름경로가 다양해지고(그림 4), 이온성분을 함유하고 있는 오염물질이 유입되면 이온성분들이 간극수에 용해되어 간극수에는 전하를 운반할 수 있는 이온의 양이 증가하게 되므로 전기저항이 감소하는 결과를 나타낸다.

함수비의 증가에 의한 전기저항의 감소효과와 이온성분의 증가에 의한 전기저항의 감소정도를 평가하기 위하여 동일한 조건하에서 수돗물 50ml를 주입한 경우와 침출수 50ml를 주입한 경우에 측정된 전기저항값을

표 4. Diesel 주입 전후 흙의 전기저항

Electrode spacing (cm)	Measured resistance (kΩ)					
	Initial water content 8.5%		Initial water content 10%		Initial water content 13%	
	Initial (R _i)	Diesel 50ml injection (R _f)	Initial (R _i)	Diesel 50ml injection (R _f)	Initial (R _i)	Diesel 50ml injection (R _f)
1.5	13.81	46.03	7.67	27.60	4.93	23.00
3.5	17.26	34.53	11.50	17.26	5.31	15.34
5.5	19.73	23.03	13.80	19.71	6.91	11.51
7.5	27.62	34.55	17.25	19.73	8.12	13.81

표 5. NaCl 용액 주입 전후 흙의 전기저항

Electrode spacing (cm)	Measured resistance (k Ω)							
	Initial water content 5%				Initial water content 9.5%			
	Initial (R _i)	After 50ml injection (R _f)			Initial (R _i)	After 50ml injection (R _f)		
		1% NaCl	5% NaCl	10% NaCl		1% NaCl	5% NaCl	10% NaCl
1.5	45.97	3.83	2.65	2.12	12.55	1.97	2.46	2.06
3.5	68.95	4.31	2.46	2.34	15.34	2.71	2.30	2.70
5.5	91.30	6.57	3.45	2.60	19.73	3.45	2.60	2.81
7.5	137.90	7.26	5.30	4.06	23.00	5.75	3.94	3.06

표 6. 침출수 주입 전후 전기저항

Electrode spacing (cm)	Measured resistance (k Ω)			
	Initial water content 5%		Initial water content 8%	
	Initial (R _i)	leachate 50ml injection (R _f)	Initial (R _i)	leachate 50ml injection (R _f)
1.5	46.00	5.31	27.58	2.88
3.5	69.00	6.00	34.45	4.60
5.5	137.90	8.12	45.93	3.43
7.5	138.00	8.63	68.95	3.94

비교하여 그림 7에 도시하였다. 그림 7에 의하면 네 가지의 전극간격에 대하여 수돗물을 주입한 경우의 전기저항값이 침출수를 주입한 경우의 전기저항값보다 2~4배 정도 더 크게 나타났다. 수돗물이 주입된 경우에 저항값의 감소원인은 함수비의 증가로 판단할 수 있으며, 침출수가 주입된 경우에는 함수비의 증가와 이온성분의 증가에 의하여 저항값이 감소하게 된다. 즉, 수돗물을 주입한 경우의 저항값에 대하여 침출수를 주입한 경우의 저항값이 더 작게 나타나는 것은 수돗물보다 침출수가 함유하는 이온성분이 많기 때문에 발생하는 것이다. 이 결과에 의하면, 동일한 지반 조건인 경우에 대해

전기저항의 측정값에 의하여 오염되지 않은 일반수와 침출수등의 전도성 오염물질을 구분하는 것이 가능하다는 것을 나타낸다.

전기저항 측정값에 의하여 오염물질의 누출을 감지하는 경우 오염물질에 대한 감지민감도가 크려면 오염물질 누출전후의 측정값 변화량이 크게 나타나야 오염물질의 누출여부에 대한 판단이 용이하다. 그림 8은 측정전극간격에 대하여 디젤, NaCl 용액, 침출수를 주입한 경우 주입전후에 측정된 저항값의 변화량을 도시한 것이다. 그림 8(a)에 의하면 비전도성 물질인 디젤의 경우에는 네 가지의 전극간격 중에서 1.5cm의 경우 디젤의 주입전후의 저항값의 감소가 가장 큰 것으로 나타났다. 반면 그림 8 (b), (c)에 의하면 전도성 물질인 NaCl 용액과 침출수가 주입된 경우 전기저항은 감소하는 경향을 나타내며, 전극간격이 7.5cm일 때 저항값의 감소량이 크게 나타났다. 이는 전극간격이 넓어짐에 따라 전류흐름 경로는 더 넓은 영역에 대해서 다양하게 형성될 수 있기 때문이다. 또한 저항 측정에 있어서 전도성 물질의 효과가 지배적으로 나타나기 때문이다(Campanella and Weemees, 1990). 즉, 디젤과 같은 비전도성 물질이 주입된 경우 디젤은 물과 섞이지 않은 상태로 전류경로를 차단하게 되며, 이러한 경우 전극간격이 넓어짐에 따라 우회경로에 의한 전류전도가 가능하기 때문에 저항값의 증가량이 작아지는 것으로 판단된다. 반면, 침출수

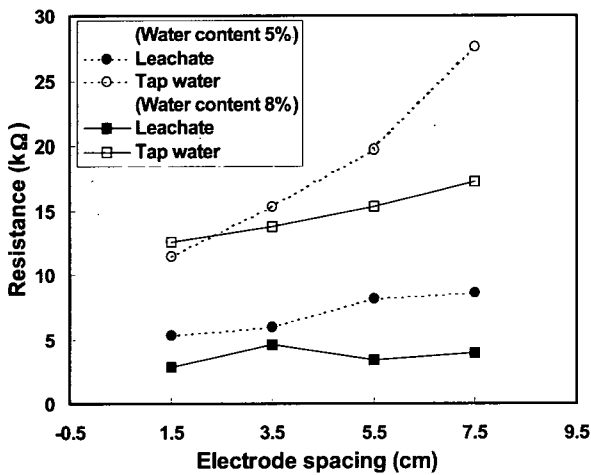
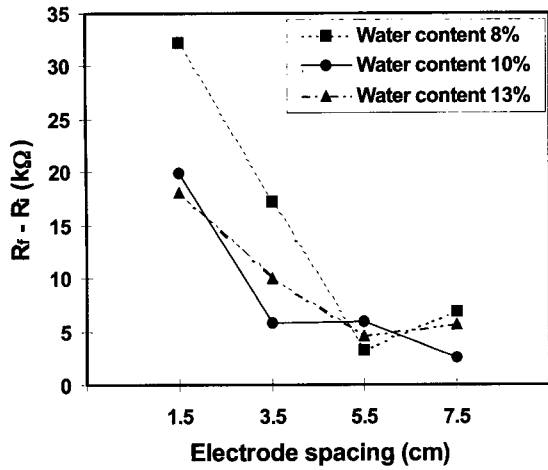
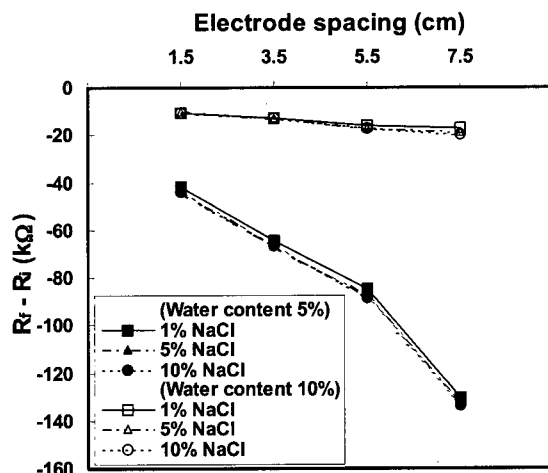


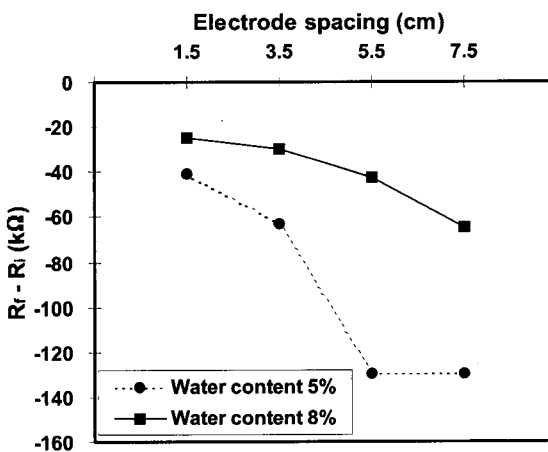
그림 7. 물과 침출수에 의한 저항변화 비교



(a) Diesel



(b) NaCl



(c) Leachate

그림 8. 측정전극간격에 따른 용액 투여 전후의 측정 저항값 변화

와 NaCl과 같은 전도성 용액을 주입한 경우에는 주입 후의 전기저항은 큰 차이가 없으나 전극간격이 넓을수록 주입 전 상태의 저항값이 크기 때문에 저항값의 감소량이 큰 것으로 보인다(표 5, 6). 이는 이온성물질이 주

입된 경우에 주입전후의 전류흐름경로에는 변화가 없으며, 단지 이온성분의 증가에 의한 전하량 증가만이 있기 때문이다.

대상 오염물질의 전기적 성질에 따라 누출에 대한 감지도가 측정전극간격의 영향을 받으므로 오염물질의 누출감지를 목적으로 전기저항 측정기법을 적용할 경우에 있어서 오염물질의 감지도를 높이기 위해서는 최적전극간격의 결정에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다.

5. 결론

전기저항 측정을 통하여 오염물질의 감지도를 평가하기 위한 실내실험에 의한 결론은 다음과 같다.

- (1) 지반의 전기적 특성은 함수비의 영향을 크게 받으며, 동일한 다짐방법에 의해 성형된 불포화 사질토에 대하여 함수비가 증가함에 따라 전기저항은 지수함수형태로 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 함수비가 증가함에 따라 간극수가 연속적으로 연결되어 형성되는 전류전도경로가 증가하기 때문이다. 회귀분석을 수행한 결과 지수함수로 표현되는 관계식을 도출하였으며, 이 식은 지반의 전기저항 측정에 의하여 함수비 평가가 가능함을 시사한다.
- (2) 간극수에 이온성분이 많아질수록 지반의 전기저항값은 감소하는 경향을 나타내었다. 특히, NaCl 용액의 농도가 1%만 되어도 일반수로 성형된 시료의 전기저항값에 비하여 급격한 전기저항값의 감소를 나타내었다. 이는 전기저항 측정에 의한 간극수의 수질에 대한 모니터링이 가능함을 나타낸다.
- (3) 디젤과 같은 비전도성 물질인 디젤에 의해 저항값은 증가하였으며, NaCl용액과 침출수와 같은 전도성 용액의 경우에는 저항값이 크게 감소하였다. 오염물질의 주입전후의 저항값을 비교하여 각 측정전극간격에 대한 오염물질의 감지민감도를 분석하였다. 실험을 수행한 1.5cm, 3.5cm, 5.5cm, 7.5cm의 전극간격에 대해서 디젤과 같은 비전도성 물질인 경우에는 전극간격이 좁을 때(1.5cm) 감지민감도가 컸으며, NaCl용액과 침출수와 같은 전도성 물질인 경우에는 전극간격이 넓을 때(7.5cm) 감지민감도가 높은 것으로 나타났다. 이는 비전도성물질의 경우 전류경로 차단효과에 의한 것이며, 전도성 물질의 경우는 동

일한 전류경로에서의 전하흐름량의 증대에 기인한다. 따라서, 누출감지시스템에 적용하는 경우에는 오염물질의 종류에 따라 감지도를 평가하여 감지민감도가 높은 측정전극간격을 결정하여 설치하는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 연구는 “98엔지니어링 핵심 기반 공통 기술/구조물의 안전성과 경제성을 높이기 위한 최첨단 특수 지반조사 기술 개발 및 DB 구축”의 일환으로 수행된 연구임을 밝히며, 연구 수행에 도움을 주신 과학기술부와 한국건설기술연구원 관계자 분들께 감사드립니다.

참고 문헌

1. 민경덕, 서정희, 권병두(1987), *응용지구물리학*, 우성문화사.
2. 손호용, 김지수, 송영수, 윤왕중, 김인수, 서만철, 김기영, 조인기, 김학수(2000), *지반환경물리탐사*, 시그마프레스.
3. 유찬, 윤춘경, 이영남, 이용길(1999), “사질토 간극수의 이온성분들에 따른 전기비저항값의 변화”, *한국지반공학회지* 제15권, 제1호, pp.185~196.
4. 윤길림, 유찬, 이영남, 윤춘경, 이용길 (1998), “오염지반의 전기비저항치와 토성과의 상관성 연구”, *한국지반공학회지* 제14권 제2호, pp.79~92.
5. 윤춘경, 유찬 (1998), “침출수로 오염된 불포화사질토의 전기비저항 변화에 대한 연구”, *한국농공학회지* 제40권 제2호, pp.112~122.
6. 한정상 (1999), *지하수 환경과 오염*, 박영사.
7. 환경부 (2000), 폐기물 매립지에서 배출되는 오염물질로 인한 환경피해의 인과관계 규명 및 피해액 산정을 위한 연구.
8. Abu-Hassanein, Z. S., Benson, C. H., and Blotz, L. R. (1996), “Electrical resistivity of compacted clays”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.122, No.5, pp.397~406.
9. ASTM (1991), Standard test methods for electrical conductivity and resistivity of water, D 1125-91, Philadelphia, Pa.
10. Binley, A. Henry-Poulter, S., and Shaw, B. (1996), “Examination of solute transport in an undisturbed soil column using electrical resistance tomography”, *Water Resources Research*, Vol.32, No.4, pp.763~769.
11. Campanella, R. G. and Weemee, I. (1990), “Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, No. pp.557~567.
12. Jackson, P. (1975), “An electrical-resistivity method for evaluating the in-situ porosity of clean marine sands”, *Marine Geotechnology*, Vol.1, No.2, pp.91~115.
13. 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.
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*, pp.151~166.
15. Oh, M. H. and Park, J. B.(2000), “Laboratory tests for the development of the contaminant leakage detection system in soil”, *Proceeding of GeoEng 2000, International Conference on Geotechnical & Geological Engineering*, Melbourne, Australia, Vol.2, p.286.
16. Robinson, E. S. and Coruh, C.(1988), *Basic Exploration Geophysics*, John Wiley & Sons.
17. Sawyer, C. N., McCarth, P. L. and Parkin, G. F. (1994), *Chemistry for Environmental Engineering*, 4th Ed. McGRAW-Hill.
18. Smith, S. S. and Arulanandan, K.(1981), “Relationship of electrical dispersion to soil properties”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 107, No. GT5, pp.591~604.
19. Yeung, A. T. and Akhtar, A. S.(1997), “Characterization of subsurface contamination by an electrical immittance cone penetrometer”, *Proceeding of 14th ICSMFE*, pp.623~626.

(접수일자 2001. 10. 8, 심사완료일 2001. 12. 16)