

흙의 구성광물과 간극수의 성분이 비저항값에 미치는 영향에 관한 연구

윤춘경·유 찬·윤길림¹⁾
건국대학교 농공학과, ¹⁾현대건설 기술연구소

A Study on the Effect of Soil Mineral and Component of the Pore Fluid to the Electrical Resistivity

Chun-Gyeong Yoon, Chan Yu and Gil-Lim Yoon (Dept. of Agricultural Eng., Kon-Kuk University, Seoul, 143-701;
¹⁾HYUNDAI Institute of Construction Technology, Kyunggi-DO, 449-910

Abstract : The environmental problem of the rural area has been accelerated in soil as well as water. Soil contamination is usually caused by improper operation of landfills, abandoned mine fields, accidental spills, and illegal dumpings. Once soil contamination is initiated, pollutants migrate and may cause groundwater contamination which takes much effort for remediation. Early detection, therefore, is important to prevent further contamination. Electrical resistivity method was used to detect soil contamination, but it was not effective to the heterogeneous condition. Static cone penetrometer test (CPT) has been used widely to investigate geotechnical properties of the underground. In this study, electrical resistivity method and CPT are combined to improve the applicability of it. The pilot test was performed to examine the variation of electrical resistivity with different soil minerals and pore fluid characteristics. Soil samples used were poorly graded sand, silty sandy soil, and weathered granite soil. For all the cases, electrical resistivity decreased with increasing of moisture content. Soil mineral also affected the electrical resistivity significantly. Above all, leachate addition in the pore fluid was very sensitive and caused decreasing of electrical resistivity markedly. It implies that electrical resistivity method can be applied to investigate pollutant plume effectively.

This is specially sure when the sensors contact the contaminated soils directly. The CPT method involves cone penetration to the ground, therefore, underground contamination around the cone could be investigated effectively even for heterogeneous condition as it penetrates if electrical resistivity sensors are attached on the cone.

서론

우리나라 농촌의 환경문제는 도시지역에 비하여 상대적으로 관심을 적게 받으며 오염이 가속화되어 근래에는 더 이상 방치할수 없을 정도로 심각성이 더해가고 있다. 농촌지역에서의 수질 및 토양의 오염등은 영향권이 단순히 농촌에만 국한되는 것이 아니고 인접한 도시지역에도 피해가 미치므로 국토의 종합적인 환경관리를 위해서는 농촌지역의 환경오염방지가 도시지역의 공해배출 억제에 못지 않게 중요하다. 농촌환경오염의 주요 원인으로는 비료, 토질형질개량제, 축산폐수정도로 인식되고 있다. 그러나 이는 영농활동에 의해서 주로 발생하는 경우이며, 1980대 후반 이전에 설치된 800여개가 넘는 각종 불량쓰레기 매립장중 대부분이 도시외부의 농촌지역에 집중되어 있으며, 2000여개 이상의 폐광된 금속광산등에서 발생하는 오염문제등은 영농활동에서 발생하는 오염문제보다 더 심각한 영향을 줄 수 있다.²⁾ 특히 이들중에는 인체에 치명적인 중금속성분들이 다량 함유되어 있으며, 이러한 성분들은 지반속에 장기간 잔류하면서 인체에 악영향을 미칠 수 있다. 환경은 일단 오염되면 복원이 용이하지 않다. 또한 오염성분이 노출되지 않더라도 마되지 않은 경우에는 그 오염전파의 예측이나 처리대책의

수립이 비교적 용이하지만, 오랜 기간동안 오염이 진행된 경우에는 오염영역과 오염성분의 파악에도 많은 시간과 경비, 그리고 노력을 필요로 하며 더 한층 어렵게 된다. 특히 지반오염의 경우는 토양뿐만 아니라 지하수까지 오염이 확산되는 것을 방지하기 위해서는 신속하고 정확한 탐사가 매우 중요하다.

그러나 현재까지 전세계적으로 지반오염탐사에 사용되고 있는 물리탐사방법들은 지반조건을 균질체로 가정하고 있어 실제로는 비균질인 지반조건을 충분히 반영하지 못하고 있는 실정이다. 물리탐사방법의 하나인 비저항법은 중금속과 같이 이온을 띠는 성분들의 특성을 이용해서 지질탐사 및 지반오염탐사에 많이 사용되고 있으나, 여러개 층으로 구성된 지역의 탐측곡선을 해석할 경우에는 탐측곡선에 반응을 나타내는 인자가 많기 때문에 단일(unique)한 해석이 어렵다는 문제점이 있다. 이 문제점을 보완하기 위하여 최근에는 기존에 지반의 지지력을 측정하던 정적 콘 관입시험기(static cone penetration test, CPT)에 Fig. 1과 유사한 형태로 여러 가지 측정장치를 부착하여 오염된 지반의 탐사에 사용하기 위한 노력이 몇 년전부터 외국에서 시작되고 있다.²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾

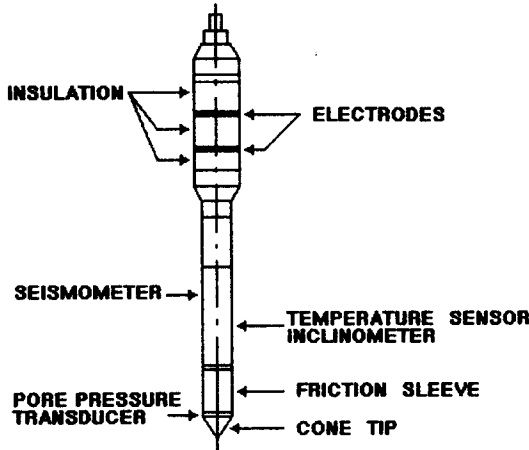


Fig. 1. Example of two ring electrode resistivity cone penetrometer(woeller et al, 1991)

전기비저항 측정장치(electrical resistivity sensor)는 흙의 전기전도성질이 광물의 조성과 간극사이를 메우고 있는 간극수의 성분에 따라서 달라진다는 사실에 착안하여 흙의 오염여부와 오염의 정도를 파악할 수 있는 장치로서 최근에 오염지반 탐사에 많이 적용되고 있다. CPT에 측정장치를 부착하여 탐사하는 방법은 기존의 방법에 비해서 국부적인 탐사가 가능하기 때문에 비균질적인 지반조건을 반영할 수 있는 장점이 있다. 또한 비저항법만 이용하였을 경우에는 비저항이 이온을 띠는 성분에만 주로 반응한다는 한계점을 극복하기 위하여 온도, pH 측정장치등 뿐만아니라 지하수를 샘플링할 수 있는 장치도 부착하여 종합적인 해석이 가능하도록 개선해 나가고 있다. 지구물리학적 특성만으로는 파악하기 어려운 지반의 성질도 CPT자료를 함께 검토하면 파악이 용이해진다. 지반오염탐사에 CPT자료와 부착된 측정장치의 자료를 함께 사용하여 해석하면 적은 비용으로 신뢰성 있는 분석이 가능해진다.

본 연구에서는 앞으로 활용도가 증가될 것으로 예상되는 콘 관입에 의한 오염지반 탐사의 실제적용에 필요한 자료를 구하기 위하여 흙의 조성광물과 간극수의 성분에 따른 비저항값의 변화를 실내 모형실험을 통하여 조사하였다. 물리탐사장비의 하나인 전기비저항탐사기를 이용하였으며, 우리나라의 대표적 토질에 대해서 토양의 구성광물의 종류를 X-선회절분석을 통하여 파악하고, 간극수 성분의 변화에 따른 전기비저항값의 변화를 측정하여 토양오염측정에 적용 가능성을 분석하였다.

전기비저항과 측정방법

전기비저항법²⁾

저항(R, resistance)은 ohms로 표시하며 길이(L)에 정비례하고 단면적(A)에 반비례한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 다시 말하면 $R \propto \frac{L}{A}$ 에서

$$R = \rho \frac{L}{A} \dots\dots\dots (1)$$

인데, 여기에서 ρ 는 비례상수로서 전기비저항 (electrical resistivity)이라고 불리며 이것은 모양이나 크기에 상관없이

그 물질의 고유한 특성을 나타내게 된다. Ohm's 법칙에서

$$R = \frac{\Delta V}{I} \dots\dots\dots (2)$$

이며 여기에서 ΔV 는 저항사이의 전위차이며, I 는 저항을 통과하는 전류이다. 그러나 흙이 균질재료이고 전극이 완전한 전도체라고 가정하면, 측정장치에서 전류를 일정하게 통과시키면 측정조건인 A/L은 일정하기 때문에 이 값을 K로 나타낸다. 따라서 전기저항값은 기본적인 흙의 성질이며, 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho = \frac{A}{L} R = KR = K \frac{\Delta V}{I} \dots\dots\dots (3)$$

K는 전극의 배열형태에 따라 영향을 받는 보정계수로 활용되며, K값은 사전에 비저항값을 알고 있는 항온의 용액속에 측정장치를 넣고 비저항값을 측정함으로써 구할 수 있다²⁾.

직류(Direct Current; DC) 법

DC 비저항법은 지하수자원의 탐사에 1930년대부터 적용해 오고 있으며 근래에는 오염지반의 탐사에 이르기까지 다양하게 사용하고 있다. 직류 비저항법은 인위적으로 지하에 전류를 흐르게 하여 발생하는 저항을 측정하는데, 여기에는 전류를 주입시키기 위해 사용하는 두 개의 전류전극과 전류에 의해 발생하는 전위의 반응측정을 voltmeter로 측정하기 위한 두 개의 전위전극을 합하여 총 4개의 전극이 사용된다. DC 비저항법은 전류전극과 전위전극의 배치형태에 따라 구분되는데, 본 연구에서는 최근에 많이 이용되고 있는 DC비저항법인 Wenner방법과 Schlumberger방법을 이용하여 비저항값을 측정하였으며, 이들의 배열은 Fig. 2와 같다.⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾

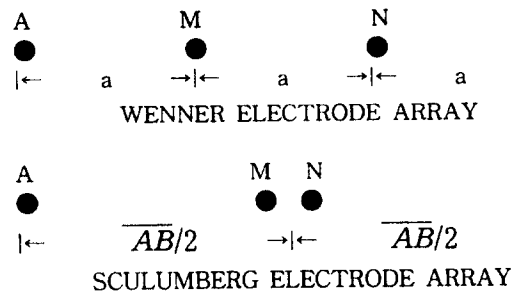


Fig. 2. Wenner and Schlumberger electrode arrays

재료 및 방법

실험 재료의 특성

실험에 사용된 시료는 일반 강모래, 실트질모래 그리고 마사토이다. 각각의 흙에 대한 물리적 성질과 입도분포곡선은 Table-2와 Fig. 3과 같다.

실험 대상 토양과 침출수의 중금속함유량에 대한 분석결과는 Table-3과 같다. Table-3에서는 우리나라 토양보전법

상에 규정되어 있는 대체기준과 분석한 중금속성분들의 일반적인 비저항값을 함께 표시하였다.⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ 분석결과에 의하면 실험에 사용된 시료들은 모두 토양환경보전법상의 우려기준보다 모두 낮음을 알 수 있다. 또한 중금속성분의 비저항값은 상당히 작다는 사실도 알 수 있다.

Table-2. Physical Characteristics of Soils Used

Soil Type	Gs	Passing #200 (%)	LL(%)	Pl(%)	$\gamma_{d,max}$ (g/cm ³)	O.M.C (%)	USCS
SAND	2.64	1.5	-	N.P.	1.67	15.9	SP
SILTY SAND	2.66	7.5	-	N.P.	1.88	9.5	SP-SM
MASA	2.68	0.66	-	N.P.	1.90	8.1	SP

* A,E,Y; Aeouri, Eunhari, Yulsori, respectively.

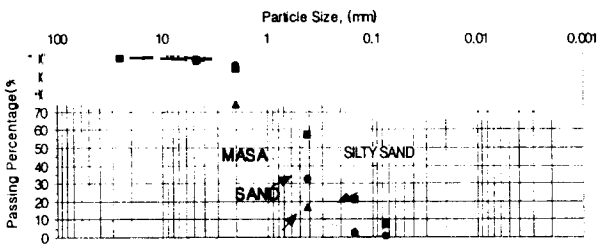


Fig. 3. Grain-size Distribution

Table-3. Heavy Metal Concentrations in Soils and Leachate used

Item	MASA	SILTY SAND	SAND	Leachate (mg/l)	Environmental Standard (ppm)	Typical Resistivity (10 ⁻⁸ Ω·m)
Cr	0.75	1	0.75	1.015	4	12.5
As	5	5	5	0.215	6	-
Cd	0	0	0	0.030	1.5	6.8
Pb	14.75	12	17	0.440	100	5.9
Cu	0	0	0	0.030	50	1.7
Hg	0.25	0	0	0.005	4	94.1

* A,E,Y; Aeouri, Eunhari, Yulsori, respectively.

사용된 시료의 광물조성은 X-선회절분석방법을 이용하여 분석하였다. X-선회절법은 세립의 토양광물을 구별하고 그들의 결정구조를 연구하는데 광범위하게 사용되는 방법이다. X-선은 전자 스펙트럼의 수 많은 파장중에 하나이고 0.01~100Å 범위의 파장을 가진다.⁽¹²⁾ 일반적인 흙의 X-선회절곡선은 Fig. 4(a)와 같으며⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾, 본 실험에서 사용하는 시

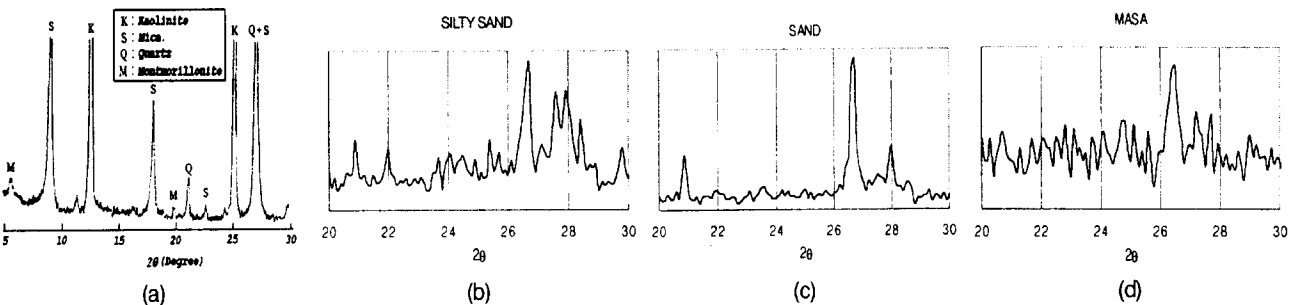


Fig. 4. Results of X-ray Diffraction Analysis of Soils

료의 분석결과는 Fig. 4(b)~(d)와 같다. 강모래와 실트질 모래의 경우에는 석영과 운모가 주성분을 이루고 있으며, 마사토의 경우에는 석영과 운모가 주성분을 이루고 있으나 카올리나이트나 몬모리로나이트등도 함유되어 있는 것으로 나타났다. 흙의 간극수의 성분이 전기 비저항값에 주는 영향을 알아보기 위하여 지하수와 산업폐물 매립장에서 발생하는 침출수를 지하수에 5%, 10%, 30%로 희석시켜서 농도를 달리하며 Advanced Geosciences, Inc.의 "STING-R1" 전기비저항탐사기를 이용하여 비저항값의 변화를 측정하였다.

실험방법

실험은 직경 30cm, 높이 70cm의 PVC관으로 제작된 모형토조를 이용하여 실시되었는데, 바닥면은 함수비의 변화를 방지하기 위하여 방수처리하였다. 그리고 전기비저항 측정용은 CPT와 유사한 길이 65cm의 모조콘을 플라스틱 재질로 제작하여 절연이 되게 하였으며, 내부에 전선으로 배선을 하여 한번 성형한 시료를 교란시키지 않고 외부에서 전극의 간격을 20cm, 10cm, 5cm로 조절하여 전기비저항치를

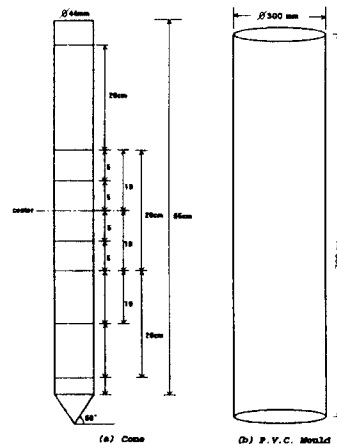


Fig. 5. Specification of Cone and P.V.C. Mould

측정할 수 있도록 특별히 제작하였다.(Fig. 5. 참조)

공시체의 제작방법은 모조콘을 시료를 성형하기 전에 토조의 중앙에 위치시켜 그 주위로 사전에 밀도와 함수비를 조절하여 준비된 시료를 넣었다. 이때 별도의 다짐은 실시하지 않았으며, 일정한 모형토조의 체적에 일정량의 습윤시료가 다 채워질 수 있도록 하였다. 전기비저항값은 Schlumberger방법과 Wenner방법으로 측정하였는데,

Wenner방법의 경우에는 전극의 간격을 20cm, 10cm, 5cm로 조절하여 측정하였다. 간극수의 성분변화를 조절하기 위해서 지하수와 침출수를 사용했는데, 침출수는 매립장에서 정화단계를 거치지 않은 침출수 원수를 채취하여 침출수를 5%, 10%, 30%로 희석시켜 공시체를 제작하여 비저항값을 측정하였다.

또한 실제 현장에서 비저항 측정에 사용되는 콘의 전극간격이 실제실험과는 다르기 때문에 보정이 이루어져야 하며, 그 방법은 각각의 콘에 대해서 이미 비저항값을 알고있는 항온의 용액에 수침시켜 비저항값을 측정해서 측정된 비저항값과 이미 알고있는 그 용액의 비저항값의 비로서 보정계수 K값을 구하여 사용하였다. 본 연구에서는 지하수를 대상으로 K값을 산정하였다. 일반적으로 물은 10~100 Ω m, 지표수의 경우 100~300 Ω m, 지하수의 경우 200~800 Ω m 정도의 비저항값을 나타내는 것으로 알려져 있다.¹⁵⁾ 실험에서 사용된 모조콘은 모두 3개이며, 3개의 콘에 대해서 각각 지하수를 이용하여 계산한 보정계수 확인 실험을 실시하였다. 실험결과는 Schlumberger방식과 Wenner방식의 전극간격이 20cm일때는 K=1, Wenner-10cm일때는 K=4, Wenner-5cm 일때는 K=8로 나타났다.(Fig. 6. 참조)

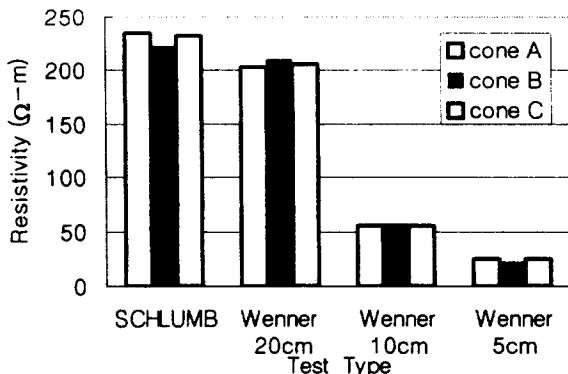


Fig. 6. Resistivity of Groundwater

실험결과 및 고찰

흙의 비저항은 크게 (1) 지반을 구성하고 있는 흙이나 암석의 전기적성질, (2) 흙의 구조내에 함유하고 있는 간극수의 전기적성질에 따라서 달라질 수 있다. 일반적으로 지반을 구성하고 있는 많은 흙이나 암석이 완전한 고체일 경우에는 절연체이지만, 대부분은 다공질체이므로 어느 정도는 전도성 간극수가 함유되어 있으며, 그 비저항 및 분극성은 흙이나 암석을 구성하고 있는 광물의 성분, 입자의 종류, 함유하고 있는 간극수의 전기전도도, 간극의 용적, 간극의 배치, 입자의 결합방향, 그리고 온도 및 압력등의 요인에 따라서 변화한다. 특히 간극수의 경우에는 무기물질의 성분에 크게 좌우되는 것으로 알려져 있다. 흙이나 광물, 암석의 비저항값은 분포범위가 매우 넓다. 일반적으로 금속광물의 비저항값은 낮고, 다른 광물은 높은 비저항값을 보인다. 또한 흙이나 암석은 구성광물의 종류, 구조, 풍화, 변질작용, 함유상태 및 지역적인 차이에 따라서 비저항값에 큰 차이를 나타낸다. 본 연구에서는 강 모래, 실트질모래 그리고 마사토 세가지 시료에 대해서 지하수와 침출수의 농도를 변화시켜 간극수의 성분을 인위적으로 조절하면서 광물조성과 간극수의 전기전도도 차이에 따른 전기비저항값을 측

정하였다. 실험결과 분석시에는 앞에서 구한 K값으로 실험값들을 보정하여 사용하였다.

비저항값과 함수량의 관계

일반적으로 흙의 함수량이 증가함에 따라서 비저항값은 감소한다. 또한 함수량이 미소하게 증가해도 비저항값은 현저하게 감소되며, 그 한계값에서는 흙의 구성광물의 종류와 조성이 비저항값을 지배한다고 알려져 있다.¹⁶⁾¹⁶⁾ 퇴적층의 경우에 海水로 포화상태인 진흙이나 모래의 비저항은 1 Ω-m보다 작으며 건조한 현무암, 모래, 또는 자갈의 경우에는 1,000 Ω-m이상까지 나타내기도 한다. 민물로 포화된 모래나 자갈의 비저항은 약 15~60 Ω-m정도의 분포를 나타낸다고 알려져 있다. 건조한 상태의 흙의 비저항값은 주로 그 흙중의 광물의 양과 전도성광물에 영향을 받는다. 흙의 용적비저항은 전도성광물의 존재에 따라서 큰 영향을 받지만, 전도성광물이 5%이하인 경우에는 흙의 비저항은 절연성광물의 값에 근사하게된다. 전도성광물이 절연성광물에 의해서 완전히 둘러쌓인 경우에 전기전도도는 증가하지 않는다. 그러나 일반적인 흙에서는 수분을 함유하고 있기 때문에 105 Ω-m이하의 값을 나타낸다고 알려져 있다.¹⁸⁾ 아래의 Fig. 7은 마사토, 실트질 모래, 강모래를 간극율은 41.2%로 일정하게 유지하면서 지하수만으로 함수비를 증가시키며 비저항을 측정한 결과이다.

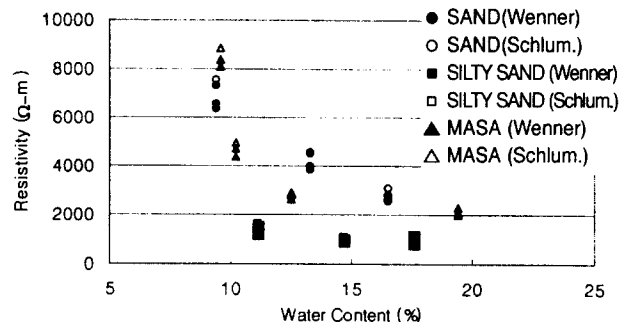


Fig. 7. Relation of Water Content of Soils vs. Resistivity

Fig. 7에서와 같이 3가지 시료 모두 함수비의 증가에 따라서 비저항값은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 마사토의 경우에는 다른 시료에 비하여 비저항값이 비교적 크며, 함수비 증가에 따른 비저항값의 감소경향이 더욱 뚜렷하였다. 강모래의 경우에는 함수비가 낮은 경우에 비저항값은 마사토보다 작았지만 함수비가 증가하면서 그 차이는 감소하는 것으로 나타났으며, 함수비 변화에 따른 비저항값의 감소는 마사토와 유사한 형태를 나타내었다. 그러나 실트질 모래의 경우에는 다른 2가지 시료에 비해서는 전체적으로 비저항값이 낮았고 함수비증가에 따른 비저항값의 감소정도도 다른 2가지 시료에 비해서는 작았다.

구성광물과 비저항값의 관계

흙의 비저항값에 영향을 주는 인자들은 간극율(porosity), 포화도, 간극수의 전도도, 입자의 크기와 모양, 입자표면의 전도도등 광물의 성질, 흙의 구조 그리고 지반의 온도등으로 알려져있다. 그러나 이와 같이 많은 인자들을 함수로하여 흙의 비저항값을 예측할 수 있는 이론적인 공식은 아직 제시되지 못하고 있다. 이것은 흙과 간극수사이에 복잡성 때문이고 또한 흙입자 자체가 크기와 모양, 조성등이 일정하

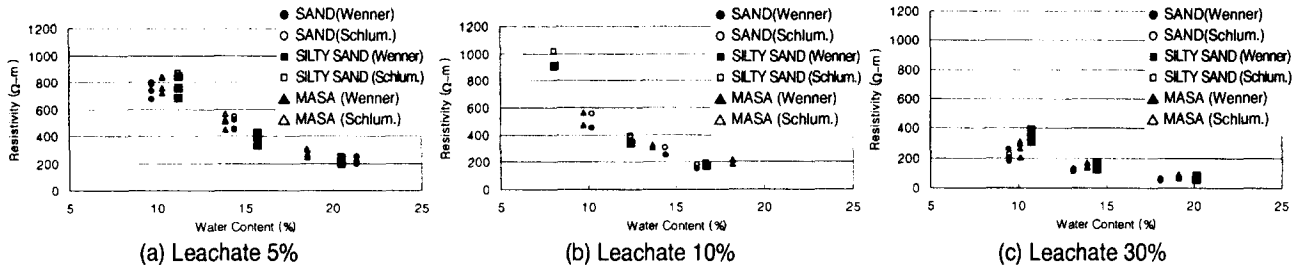


Fig. 8. Resistivity Variation with Leachate Addition

지 않고 매우 다양하기 때문이다.¹⁷⁾¹⁰⁾ 따라서 본 연구에서는 간극율을 일정하게 하면서 항온을 유지할 수 있는 실내에서 간극수의 전기적성질을 개선할 수 있도록 중금속 성분이 다량 함유된 침출수를 지하수에 희석시켜 전과 동일한 방법으로 실험을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 3가지 시료 모두에서도 Fig. 7에서와 같이 함수비가 증가할수록 비저항값이 감소하는 경향이 뚜렷하였으며, 특히 침출수의 농도가 증가할수록 비저항값은 감소되는 경향을 나타내고 있다. 침출수농도가 5%인 경우에는 간극수가 침출수가 포함되지 않은 지하수인 Fig. 7과 비교해 비저항값이 현저히 낮아서 약 1/10정도 감소되었으며, 침출수농도가 30%인 경우에는 비저항값이 1/30로 감소하였다. 일반적으로 이러한 성질은 지하수가 약간만 오염되어도 비저항값의 측정으로 지반의 오염정도를 용이하게 탐지할 수 있다는 사실을 알 수 있다. 또한 이는 일정한 함수비(포화도) 이상에서는 흙의 전기전도도가 구성광물의 전기적성질보다는 간극수의 전기적성질에 더 많은 영향을 받는 사실을 말해주는 것이며, 강모래와 실트질 모래의 구성광물인 석영의 비저항값이 109 Ω·m이라는 사실을 감안하면, 간극수가 침출수로 오염되었을 경우 흙의 전기전도도에 미치는 영향은 매우 큰 것으로 판단된다. 이런 경우에 대해서 Archie(1942)는 포화된 모래와 사암(sandstone)에 대한 실험에서 흙-물 혼합체의 전도도는 간극수에 직접적으로 비례함을 보인바도 있다.¹¹⁾

흙의 조성과 비저항값의 관계

앞질의 Fig. 7과 Fig. 8에서 실트질 모래의 경우는 지하수만을 사용했을 경우와 침출수를 섞어서 실험했을 경우에 다른 2가지 시료와는 다른 양상을 보였다. 즉, 지하수만을 이용하였을 경우에는 비저항값이 가장 작고 함수비증가에 대해서도 비저항값의 감소가 상대적으로 작게 나타났다. 그러나 침출수를 섞어서 실험했을 경우에는 실트질 모래의 비저항값이 다른 2가지 시료의 비저항값보다는 컸으며, 함수비의 증가에 따른 비저항값의 변화는 다른 시료들과 비슷한 경향을 나타내게 되었다. 이 원인은 실트질 모래와 강모래의 구성광물이 동일하다는 사실을 감안하면 흙을 구성하는 구성광물의 성분보다는 흙 조성의 차이에서 기인된 것이라고 판단된다. 즉, 구성광물의 성분이 같은 실트질 모래와 강모래의 경우에 실트질 모래는 Fig. 3. 입도분포곡선을 참고하면 입자자체에 전기적 이온을 나타낼 가능성이 있는 실트성분이 약 8%정도 함유되어 있어 강모래보다는 전기비저항값이 낮았으며, 또한 미립자가 큰 입자사이의 간극을 매워 수분의 이동이 원활하지 않게 되므로 함수비증가에 따른 비저항값의 감소가 크지 않았던 것으로 판단되었다.

한편 강모래와 마사토를 비교해보면 두 시료는 구성광물 상에 차이가 있는데도 유사한 비저항값 변화의 양상을 나타내고 있다. 그러나 지하수만으로 실험한 경우에 함수비가 낮을때는 마사토의 비저항값이 강모래보다 크지만 함수비가 증가하기 시작하면서 급격히 감소하여 오히려 강모래보다 낮은 비저항값을 나타내었다. 침출수를 섞어서 실험했을 경우에는 전반적으로 강모래가 마사토보다는 낮은 비저항값을 나타내면서 함수비가 증가함에 따라서 비슷한 경향으로 비저항값이 감소하는 것으로 나타났다. 이 원인은 두 시료가 입자의 조성이 비슷하지만 마사토의 구성광물중에는 점토광물로서 입자표면에 이온을 띠고 있는 카올리나이트와 몬모리로나이트가 일부 섞여 있어서 이러한 광물들이 높은 함수비에서는 마사토의 전기적 전도도를 크게 하는 역할을 해주기 때문이라고 판단된다. 따라서 두 시료가 입자의 조성이 비슷해도 구성광물중에서 전도성광물의 함유량에 따라서는 비저항값이 달라짐을 알 수 있다.

결론

흙의 비저항값은 간극율(porosity), 포화도, 간극수의 전도도, 입자의 크기와 모양, 입자표면의 전도도등 광물의 성질, 흙의 구조 그리고 지반의 온도등으로 알려져있다. 그러나 아직까지 이 인자들을 모두 함수로하여 흙의 비저항값을 예측하기는 힘들다. 본 연구에서는 흙의 구성광물과 조성, 함수비 그리고 간극수의 성분변화에 따른 비저항값의 변화에 대한 실험을 실시하였다. 주요 구성광물이 석영과 운모인 강모래와 실트질 모래, 그리고 주요 구성광물이 석영과 운모, 카올리나이트, 몬모리로나이트인 마사토를 간극률 41.2%로 유지시키면서 실내실험을 실시하였는데, 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 3가지 시료 모두 함수비의 증가에 따라서 비저항값이 감소하는 경향을 뚜렷하게 나타내었다. 마사토의 경우에는 비저항값이 다른 시료에 비해 가장 크며, 함수비 증가에 따른 비저항값의 감소경향이 뚜렷하게 나타났다. 강모래의 경우에는 함수비가 낮은 경우에 비저항값이 실트질 모래보다 작았지만 함수비가 증가하면서 그 차이는 감소하는 것으로 나타났다. 실트질 모래의 경우에는 다른 2가지 시료에 비해서는 전체적으로 비저항값이 낮았고 함수비증가에 따른 비저항값의 감소정도도 다른 2가지 시료에 비해서는 상대적으로 작은 것으로 나타났다.
2. 침출수를 5%, 10%, 30% 지하수에 희석시켜 실험하였을 경우에는 지하수만 사용하였을 경우에 비하여 침출수 5%에서는 1/10, 30%에서는 1/30정도로 비저항값이 현저

히 낮아 졌으며, 함수비와 침출수의 농도가 증가할수록 비저항값은 감소되는 경향을 나타내고 있다. 이는 간극수의 전기전도적성질이 침출수가 들어감으로서 증진되는 것을 의미하며 이러한 성질은 비저항값의 측정으로 지반 오염정도를 용이하게 파악할 수 있다는 사실을 확인할 수 있었다.

3. 지하수만을 이용한 실험결과와 비교해서 침출수를 섞어서 실험한 경우에 함수비 증가에 따른 비저항값 감소형태는 유사하나 3가지 시료의 구성광물에 차이가 있음에도 불구하고 시료사이의 비저항값의 차이가 현저히 적었다. 특히, 함수비가 약 15%이상 초과하면 전기전도적 성질이 구성광물보다는 간극수의 전기적성질에 크게 영향을 받아서 서로 다른 종류의 시료들의 비저항값이 거의 동일해짐을 알수있었다.
4. 구성광물이 같은 강모래와 실트질 모래사이에도 지하수만을 이용하여 실험하였을 경우에 비저항값의 차이가 컸다. 이는 실트질 모래와 강모래의 경우에 구성광물의 성분은 같지만 실트질 모래는 입도분포곡선상에서 입자자체에 전기적 이온을 띠고있을 가능성이 있는 실트성분이 약 8%정도 함유되어 있어 강모래나 마사토보다는 전기 비저항값이 낮았다고 판단되며, 또한 미립자의 존재가 큰 입자사이의 간극을 메우기 때문에 수분의 이동이 원활하지 않게 되므로 함수비증가에 따른 비저항값의 감소가 크지 않았던 것으로 판단되었다. 따라서 이것은 흙 조성의 차이에서 기인된 것이라고 판단되었다.
5. 구성광물상에 차이가 있는 강모래와 마사토를 비교해보면 두 시료는 지하수만을 이용해 실험한 경우와 침출수를 이용해 실험했던 경우 유사한 비저항값 변화의 양상을 나타내고 있다. 이는 이 두 시료의 입도분포가 비슷하기 때문이라고 판단된다.
6. 강모래와 마사토의 실험결과에서 지하수만으로 실험한 경우에 함수비가 낮을때는 마사토의 비저항값이 강모래보다 크지만 함수비가 증가하기 시작하면서 급격히 감소하여 오히려 강모래보다 낮은 비저항값을 나타내었다. 침출수를 섞어서 실험했을 경우에는 전반적으로 강모래가 마사토보다는 낮은 비저항값을 나타내면서 함수비가 증가함에 따라서 비슷한 비저항값으로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 두 시료가 입자의 조성이 비슷하지만 마사토의 구성광물중에는 점토광물로서 입자표면에 이온을 띠고 있는 카올리나이트와 몬몰리로나이트가 일부 섞여 있어서 이러한 광물들이 높은 함수비에서는 마사토의 전기적 전도도를 크게 하는 역할을 해주기 때문이라고 판단된다. 따라서 두 시료가 입자의 조성이 비슷해도 구성광물중에서 전도성광물의 함유량에 따라서도 비저항값이 달라짐을 알 수 있다.

본 연구에서와 같이 전기비저항센서를 콘에 부착하여 지반에 관입시키는 방법으로 지반을 탐사할 경우에는 기존의 CPT 실험의 자료와 전기비저항센서를 통한 자료를 동시에 판독할 수 있으므로 지반의 물리·화학적인 성질뿐만 아니라 오염상태도 효과적으로 파악할 수 있다. 근래에 폐광산이나 매립지 침출수등으로 농지가 오염되는 사례가 증가하

고 있는데 이와 같은 방법은 오염원의 발견, 오염정도, 그리고 오염확산의 정도를 파악하는데 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 이 방법의 본격적인 적용을 위해서는 구성광물, 오염원, 그리고 지반의 특성 등에 따른 전기비저항의 반응들을 광범위하게 조사하여 탐측곡선의 정확한 해석을 위한 추가 연구가 필요하다고 생각된다.

참고문헌

1. KICT(1995), A study on Remedial Technology for Contaminated Soil and Groundwater
2. Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell, J. J. M.(1997), Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, Blackie Academic & Professional
3. Das, B. M.(1995), Principles of Foundation Engineering 3/e, PWS
4. Brandl, H. and Robertson, P. K.(1996), Geo-environmental site investigation and characterization, 2nd Intl' Congress on Environmental Geotechnics, State-of-the-art Reports, pp. 117~140
5. Lambe, T. W. & Withman, R. V.(1979), Soil Mechanics SI version, Wiley
6. Min, B. D., Seo, J. H. and Kweun, B. D. (1987), Applied Geophysics, Woo Sung press, pp. 252~309
7. Zohdy, A. A. R., Eaton, G. P. and Mabey D. R.(1974), Application of surface Geophysics to Ground-Water Investigations, Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Chapter D1, Collection of Environmental Data
8. Ministry of science and Technology (1996), Environmental Geophysics and Geochemistry for contamination Mapping and Monitoring(III)
9. AASHTO(1988), Manual on Subsurface Investigation, pp. 92~93
10. Ministry of Environment (1996), The Regulation for the conservation of the Soils.
11. Lid, D. R.(1996), Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press
12. Mitchell, J. K.(1993), Fundamentals of Soil Behavior 2/e, John Wiley & Sons
13. 土質工學會(1995), 環境地盤工學入門, 入門ツリ-ス20, pp. 54~56
14. 土質工學會(1986), 粘土の不思議, 入門ツリ-ス12, pp. 40
15. 土質工學會(1981), 土質基礎工學ライフ러리 21 - 土と基礎の物理探査, pp. 97~115
16. Kim, J. J. (1985), Fundamentals of Soil Physics, DAE HAN Press, Seoul, pp. 285~321
17. 土質工學會(1992), 技術手帳2 - 實務に役立つ土質工學用語の解説
18. Yong, R. N., Mohamed, A. M. O. & Warkentin, B. P.(1992), Principles of Contaminant Transport in Soils, Elsevier