

오염토양의 전기 비저항치 변화 연구
Electrical Resistivity Variations of Contaminated Soils

윤길립 · 이용길*

한국해양연구소 연안항만공학센터, 선임연구원, glyoon@kordi.re.kr
현대건설(주), 기술연구소, 토목기술부, 주임연구원

ABSTRACT

Parametric studies based on laboratory pilot tests were performed to investigate the relationships between electrical resistivity and contaminated soil properties. Three kinds of sandy soils sampled and leachates from a industrial waste landfill were mixed to model the contaminated soils. Electrical resistivity of soils were measured by using a simulated resistivity cone penetrometer probe. In the experiments, the electrical resistivity were observed with changing the water content, void ratio, unit weight, degree of saturation, and concentration of the leachate. The test results show that the electrical resistivity of soils depends largely on the water content and the electrical property of pore water rather than unit weight and types of soils.

Keywords : Soil properties, Electrical resistivity, Leachate, Contaminated soils, CPT,

1. 서론

흙의 비저항치는 흙입자나 암석의 전기적성질, 흙 간극에 함유하고 있는 간극수의 전기적성질에 따라서 변한다. 즉, 지반을 구성하고 있는 흙이나 암석이 완전한 고체일 경우에는 절연체이지만 대부분은 다공질체이므로 어느 정도의 전도성 간극수가 함유되어 있다. 따라서 그 비저항성 및 분극성은 흙이나 암석을 구성하고 있는 광물의 성분, 입자의 종류, 함유하고 있는 간극수의 전기전도도, 간극의 용적, 간극의 배치, 입자의 결합방향, 그리고 온도 및 압력등에 따라서 달라질 수 있다. 지반오염은 흙의 비저항특성에 영향을 주는데 오염성분에 의해서 흙의 전기적 성질이 변하기 때문이다. 즉, 오염성분이 비전도성이면 비저항값이 크게 나타날 것이며 오염성분이 전도성이면 비저항값이 감소할 것이다. 그러나 대부분의 오염지반은 이들이 혼합되어 있는 경우가 많으며 또한 전도성 성분이 비전도성 성분보다는 지반의 비저항값에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 이들 오염성분들은 주로 대수층을 중심으로 전기전도도가 높은 층을 형성하게 된다.

물리탐사기법으로 전기 비저항법은 인위적으로 지하에 전류를 흐르게 하여 이때 발생하는 저항을 측정하는데, 이때 토양의 간극수가 오염되어 있으면 정상적인 경우보다는 현저히 낮은 비저항값을 나타내게 되므로 쉽게 지하의 오염여부를 판별할 수 있다. 전기비저항 측정이 가능하도록 만들어진 콘을 비저항콘이라고 하며 기존의 연구성과에 따르면 비저항콘은 비균질지반에서도 상당한 정확도를 가지고 적용될 수 있으므로 매우 활용성이 큰 장비라고 할 수 있다. 이와 같은 방법을 지반의 오염원탐사에 적용시키면 적은 비용으로 신뢰성 있는 분석이 가능하지만 아직 흙의 비저항성질이나 비저항콘에 대한 연구성과는 미흡한 상태이다(Campanella and Weemees, 1990; Campanella and Davies, 1997).

본 논문은 모형 비저항콘을 제작하여 전기비저항 탐사기와 연결하고, 대수층을 형성할 수 있는 사

질토를 사용하여 간극비와 함수비를 변화시키면서, 간극유체는 침출수를 희석시켜 오염농도를 변화시키는 방법으로 전기비저항값을 측정하여 그 변화양상을 고찰하였다.

II. 실험재료 및 방법

2.1 실험 재료 및 방법

본 연구 수행을 위해서 사용한 전기비저항탐사기는 Advanced Geosciences, Inc.의 “STING-R1”이며, 모형실험에 사용된 시료는 균등질 입자로 구성되어 있다. 첫번째 시료는 일반 모래로 세사(이후, SAND)로 표현하며 서울시 모진동 근처의 공사현장에서 채취했다. 두번째 시료는 화강암풍화토로 마사토(이후, MASA)로 표현하며 대관령근처의 도로공사현장에서 채취했다. 그리고 세번째 시료는 실트질성분이 약 8%정도 함유되어 있는 산토(이후, SAN-TO)로 표시하며 안양시 근처 공사현장에서 채취했다. 각각의 시료에 대한 입도분포곡선은 그림 1에 나타냈다. 채취된 시료에 대해서 6종의 중금속의 함유량을 조사하여 Table 1에 제시하였는데 Cd와 Cu는 검출되지 않았다. 또한 간극유체의 성분에 따른 전기 비저항특성을 알아보기 위하여 지하수의 성분을 변화시킬 필요가 있어 산업폐기물 매립장에서 수거한 침출수를 5%, 10%, 30%로 지하수에 희석시켜서 실험에 이용하였다. 침출수에 대해서도 사전에 중금속 성분에 대한 함유량조사를 실시하였다.

실험은 직경 30cm, 높이 70cm의 PVC관으로 제작된 모형토조를 이용하여 실시하였다. 토조의 바닥면은 함수비의 변화를 방지하기 위하여 방수처리하였다. 그리고 전기비저항값 측정은 CPT와 유사한 길이 60cm의 비저항콘을 플라스틱 재질로 모형제작하여 절연이 되게 하였다. 공시체는 적절한 간극비의 차이가 발생하도록 일정한 체적의 모형토조에 시료의 양을 각각 달리하여 밀도를 다르게 하였고 하나의 밀도에 대해서 함수비를 변화시키면서 시료를 준비하였다. 시료와 지하수의 배합은 토조 밖에서 하였으며, 실제 공시체 제작시에는 모형콘을 시료성형전에 토조의 중앙에 위치시켜 그 주위로 사전에 준비된 시료를 넣었다. 이때 별도의 다짐은 실시하지 않았으며, 일정한 체적의 토조안에 준비된 시료가 다 채워질 수 있도록 하였다. 간극수가 오염된 경우를 모사하기 위하여 침출수를 희석시켜 사용한 실험도 위와 동일하며, 이때는 흙의 함수비 조절을 위해 사용했던 지하수에 침출수를 5%, 10%, 30%첨가하여 공시체를 제작하였다.

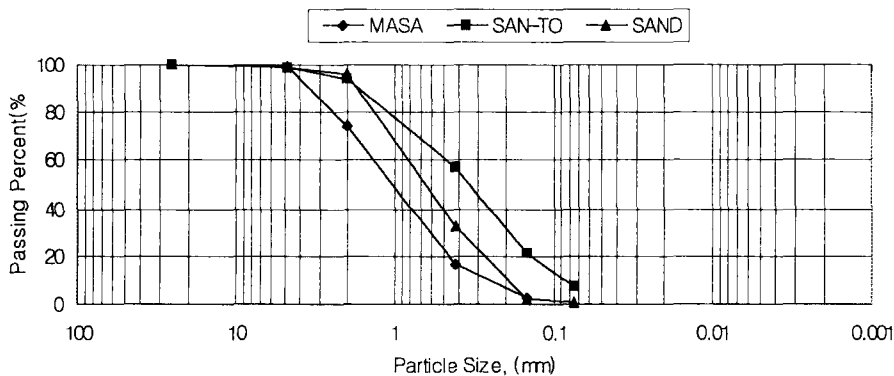


Fig. 1. Grain Size Distribution

Table 1. Heavy Metal Concentrations in Soils and Leachate

Item	Soils (ppm)			Leachate (mg/ℓ)	Environmental Standard (ppm)	Typical Resistivity (10 ⁻⁸ Ω · m)
	MASA	SAN-TO	SAND			
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

III. 실험결과

3.1 함수비의 변화에 따른 전기비저항치의 영향

간극수의 함수비에 따른 비저항치의 변화를 알아보기 위한 실험을 실시하였다. 실험결과는 그림 2와 같다. 그림에서 알 수 있는 것은 침출수가 전혀 섞이지 않은 지하수(Leachate 0%)만으로 함수비를 조절하면서 실험했을 경우에 SAND와 MASA의 비저항값이 SAN-TO보다 큰 것으로 나타났다. 함수비가 증가하면서 SAND와 MASA는 비저항치가 낮은 비율로 일정하게 감소하나, SAN-TO의 경우는 함수비의 변화에 대한 비저항치의 영향은 거의 알 수 없었다. 이러한 결과는 실트질 성분을 다른 시료에 비해 비교적 많이 함유한 SAN-TO가 함수비를 증가시키면서 측정된 비저항치에 대해서 영향을 받지않은 결과가 되겠다. 그러므로 세가지 시료에 대한 전기전도성은 SAN-TO, MASA, SAND의 순서로 모래질 성분을 가장 많이 함유한 SAND가 가장 전기적 성질이 낮음을 확인할 수 있다.

3.2 간극수의 오염에 따른 비저항값의 변화

지반이 침출수로 오염됐을 경우를 가상적으로 모사하기 위하여 지하수에 침출수를 5%, 10%, 30%로 희석시켜 함수비를 조절하면서 실험을 수행하였다. 그림 2에 2가지 시료가 나타내는 비저항치를 나타냈다. 그림 3는 그림 2의 기본 조건에 침출수를 첨가한 결과로서 침출수가 전기비저항치에 어느 정도 영향을 미치는 가를 조사한 결과이다. 그림 3에서는 침출수로 오염된 간극수에 의한 함수비를 증가하면서 측정된 시료들의 비저항치는 그림 2에 비해서 크게 감소했으며 2가지 시료가 함수비 증가에 따라서 매우 유사한 경향을 보였다.

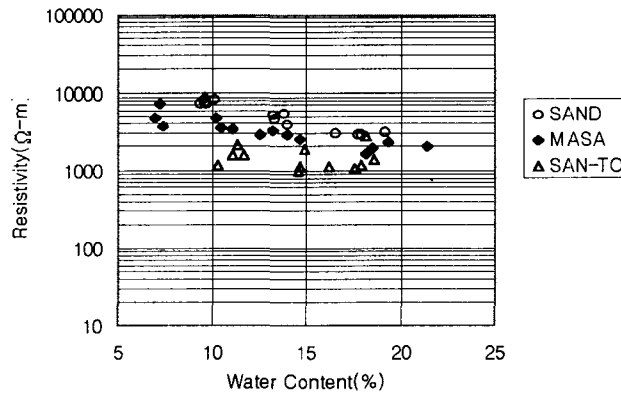


Fig. 2. The Variation of Resistivity According to the Water Content

침출수 5%(그림 3a)를 첨가한 경우는 세가지 시료의 비저항값이 함수비에 따라서 거의 유사한 값을 나타내고 있다. 이것은 오염되지 않은 경우 보다 오염된 간극유체의 전기전도적 성질이 흙의 비저항값에 직접적으로 큰 영향을 미치고 있음을 나타내는 것이며, 침출수가 5%정도만 함유되어도 비저항값은 오염되지 않은 경우에 비해 현저히 낮아지므로 이러한 성질은 비저항법을 이용한 오염지반 탐사의 적용가능성을 제시하는 것이라 하겠다. 침출수 10%(그림 3b)를 첨가한 경우는 5%를 첨가한 경우보다 전체적으로 비저항치의 감소는 약간 있었고 SAN-TO의 경우가 역시 실트질흙을 함유한 관계로 함수비증가에 대해 가장 민감했다.

침출수 30%에서는 SAND의 비저항값 감소가 현저하였으며, MASA도 비저항값이 약간 감소하였다. 그러나 산토는 침출수 10%와 비교해서 거의 감소되지 않은 것으로 나타났다. 따라서 흙의 비저항값은 간극유체의 전기전도도에 민감하게 반응하지만 흙의 종류에 따라서 그 반응정도에 차이가 있어 비저항값의 변화양상은 매우 복잡한 특성을 보이거나 어느정도 경향을 가지고 있다는 사실을 알 수 있었다.

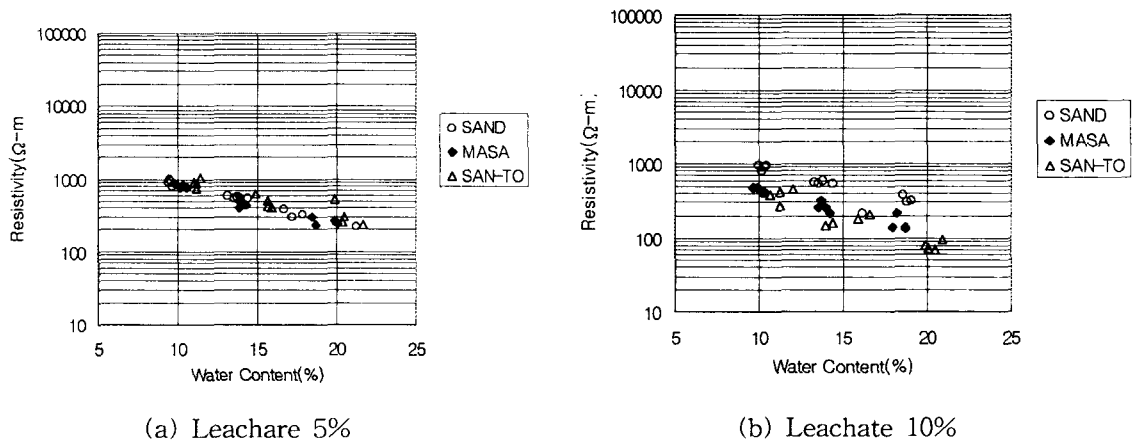


Fig. 3. The Variation of Resistivity with Pollution of the Pore Water

3.3 포화도와 비저항의 관계

흙의 포화도에 따른 비저항값의 변화를 알아보기 위하여 간극비를 0.7로 일정하게 조절하여 동일한 방법으로 포화도에 따른 비저항치의 변화를 침출수 농도별로 측정하여 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서는 동일한 간극비에서 3가지 흙의 비저항치는 포화도와 오염농도에 비례하여 감소함을 알 수 있다. SAND의 경우 침출수 농도에 따른 비저항값의 감소가 가장 크게 나타나고 있으며 그 다음이 MASA이고 SAN-TO도 포화도와 침출수 농도의 증가에 따라 비저항값은 감소하지만 SAND나 MASA에 비해서는 그 변화경향이 달랐다. 그림 3와 같이 침출수의 첨가(침출수 0% → 5%)로 가장 민감도가 작은 것은 SAN-TO임을 알 수 있었다.

일정한 침출수 농도에 대해서 포화도 증가에 따른 오염농도별 비저항값 변화를 알아보기 위해서 실험을 한 결과, 침출수를 0%에서 5%로 증가한 결과, 비저항치는 현격히 감소하여 전기전도도가 현격히 증가한 현상을 알 수 있었다.

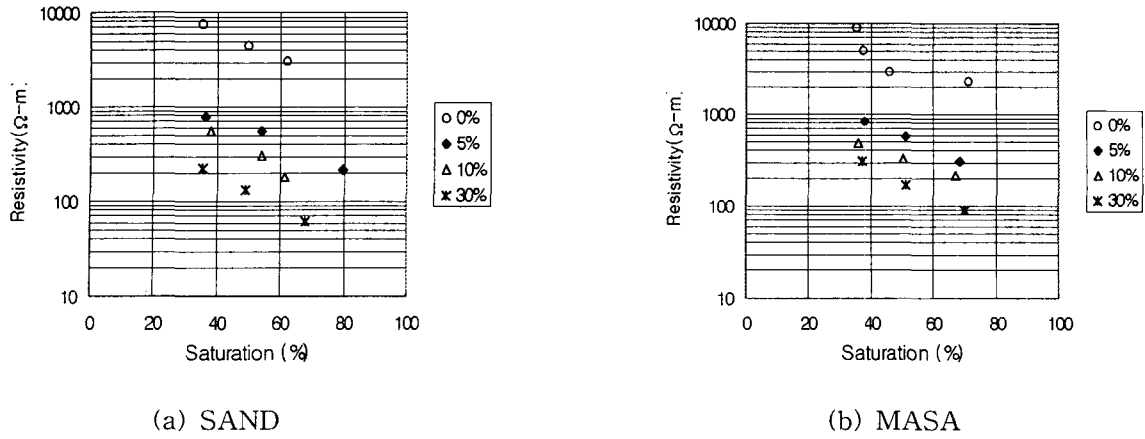


Fig. 4. The Relationship between the Resistivity and the Degree of Saturation

전체적으로 세가지 시료가 침출수 및 포화도의 증가와 함께 비저항치가 감소하는 경향을 보였다. 침출수가 없는 경우 즉, 0%와 약 10%를 첨가한 경우에 SAND는 포화도와 관계없이 일정한 경향으로 비저항치가 가장 높게 측정됐으나 침출수가 5%와 30%인 경우에는 MASA와 SAN-TO가 SAND보다 비저항치가 컸다. 그러므로 침출수의 농도와 흙의 종류에 따라서 비저항치는 다른 경향을 보인다고 할 수 있다. SAND와 MASA의 경우는 포화도 60%에 도달하면 두가지 시료의 절대 비저항값이 유사하게 나타나고 있어 두가지 시료가 사질토에 가까운 흙이기 때문으로 판단된다. 포화도 60% 이전에는 흙에서의 이온전달이 간극내의 유체와 흙입자가 분담하게되고 비전도체에 가까운 각 시료의 구성광물의 전기적성질이 비저항값에 영향을 주어서 두가지 시료의 비저항값이 달랐으며 포화도가 증가되면 이온의 전달이 완전히 유체를 통해서만도 가능하기 때문에 이때부터는 유체의 전기전도적 성질이 흙의 비저항값에 미치는 영향이 커지게 되었다고 판단된다. 하지만 포화도 60%이상에서도 흙의 종류에 따라서 비저항값에 약간에 차이가 발생하는 것은 흙입자 고유의 전기적성질이 일부 영향을 미치고 있기 때문이라고 판단된다(Abu-Hassanein et al., 1996). 이러한 사실은 침출수의 농도가 높아지면서 흙에 따라서 비저항값의 변화양상이 달라지고 있다는데서도 찾아볼 수 있다. 즉 침출수 5%의 경우, 세가지 시료의 비저항값은 비슷하게 나타나고 있으나 침출수 10%에서는 다시 흙의 종류에 따라서 비저항값에 차이가 발생하고 있다. 그리고 침출수 30%에서 다시 비슷한 비저항값을 나타내고 있는데, 이는 사질토에 가까운 흙은 간극유체의 전기전도도가 동일하다고 보았을 때 침출수가 흙의 구성입자들의 전기적 특성에 영향을 주고 있기 때문으로 사료된다. SAN-TO는 포화도 60%전후에서 비저항값의 변화양상이 달라지고 있음이 관찰되었다. 즉 포화도가 60%에 도달하면 비저항값의 감소경향이 약간 둔화되는 양상을 보이고 있다.

IV. 결 론

- 1) 오염된 지반의 조사기법이 선진국을 중심으로 활발히 연구/개발되어 실용화되고 있으므로 국내 실정에 적합한 선진국의 기술을 도입하여 실용화하여 심각히 오염된 국내의 산업단지 및 불량매립지의 복원에 적극적으로 적용하는 연구가 본 연구소에서 진행되고 있다. 국내에서도 장차 환경중심의 시대가 돌입하면 아파트건설이나 토목공사의 수행을 위해서 반드시 대상부지에 대해서 오염 여부를 조사하게된다.
- 2) 흙의 물리적특성에 따른 전기비저항값의 변화를 조사하였는데, 전기비저항에 가장 크게 영향을 미치는 요인은 함수비와 오염물질의 함유여부였다. 세가지 시료 모두 함수비의 증가에 따라서

비저항치가 감소되는 경향을 보였다. 간극유체를 증금속을 함유한 침출수로 오염시켜 실험한 결과, 비저항값이 현격하게 감소되어 비저항값이 증금속에 매우 민감하게 반응함을 발견할 수 있었다.

- 3) 입도분포가 유사한 세가지 시료의 비저항값을 측정한 결과, 흙의 종류에 따라서는 비저항치에 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 연구결과를 분석한 결과, 모래를 많이 함유한 순서로 비저항치가 컸으며 실트질 흙을 함유한 경우는 비저항치가 작아 전기전도성이 큰 것으로 확인되었다.
- 4) SAND와 MASA는 포화도가 60%에 도달하면 비저항치가 유사하게 나타나고 있어 두가지 시료의 입도분포가 순수사질토에 가까운 흙이기 때문으로 판단된다. 하지만 포화도를 60%보다 작게 한 경우, 흙에서의 이온전달이 간극내의 유체와 흙입자가 분담하게 되고, 비전도체에 가까운 각 시료의 구성광물의 전기적 성질이 비저항치에 영향을 주기 때문에 두가지 시료의 비저항치가 달라진 것으로 판단되었다. 포화도가 증가되면 이온의 전달이 완전히 유체를 통해서만도 가능하기 때문에 유체의 전기전도적 성질이 흙의 비저항값에 미치는 영향이 커지게 되었다고 판단된다. 그러나 포화도 60%이상에서도 흙의 종류에 따라서 비저항치에 약간에 차이가 발생하는 것은 흙입자 고유 전기적 성질이 일부 영향을 미치고 있기 때문이라고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 1996년도 건설교통부 선정 국책과제(과제번호 R/D-96-0022)인 “오염지반의 거시적 분포 및 오염원의 형태조사기법 개발,”의 연구결과임을 밝히며 연구수행이 가능하도록 지원하여 주신 건설교통부 및 한국건설기술연구원의 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

1. 윤길립, 이용길, 정연문, 윤춘경, 유찬 (1999), “오염지반의 거시적 분포 및 오염원의 형태조사 기법 개발,” 1996년도 건설교통부 산학연 연구 최종보고서 번호 RD-0022, 건설교통부
2. Abu-Hassanein Z. S., Benson C. H. and Boltz, L. R.(1996), Electrical resistivity of Compacted Clays, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No. 5, pp. 397~406
3. 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.
4. Campanella, R. G. and Weemees, I.(1990), “Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies,” Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, pp. 557~567.
5. Jackson, P.D., Taylor-Smith, D., and Stanford, P.N., (1978), “Resistivity-Porosity-Particle Shape relationships for marine sands,” Geophysics, Vol. 43, No. 6, pp. 1250-1268.
6. Thevanayagam, S.(1993), “Electrical Response of Two-Phase Soil: Theory and Applications,” Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No. 8, pp. 1250~1275
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.