

불포화 사질토 지반의 지반조건 및 침출수 오염도에 따른 전기비저항의 변화

오명학 · 이주형 · 박준범, 김형석*
서울대학교 지구환경시스템공학부
*순천향대학교 정보기술공학부
Email : omyhak@gong.snu.ac.kr

요 약 문

The laboratory tests were performed to investigate the relationship between electrical resistivity and the unsaturated subsurface condition and to evaluate the contamination due to leachate based on measuring electrical resistivity. For weathered granite soil, the electrical resistivity of soil decreases as moisture density increases. The electrical resistivity of soil decreases as the concentration of leachate in pore fluid increases since leachate contains various ionic constituents. And the modified Archie's equation for applying to unsaturated sand is derived by regression analysis.

key word : Electrical resistivity, Moisture density, Leachate, Formation factor

1. 서론

토양과 지하수의 오염조사시에 현장에서 채취된 시료를 분석코자 할 때에는 이를 저장, 운반하여 실험실의 분석기기를 통하여 토양이나 지하수의 오염도를 평가하여야 한다. 그러나 이 방법은 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). 최근에는 이러한 문제를 최소화하고 신속한 오염도 평가를 위하여 전기비저항 측정기법을 지반오염도 조사에 활용하기 위한 연구가 많이 수행되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 불포화사질토 지반에서 지반조건의 변화에 따른 전기비저항의 변화를 파악하고, 침출수에 의한 오염지반의 전기비저항 변화경향을 고찰하여 전기비저항에 의한 지반오염도 조사 기법의 적용성을 평가하였다.

2. 문헌연구

포화토의 전기비저항(electrical resistivity)은 Formation Factor(FF)의 항으로 표현될 수 있으며, Archie(1942)의 식이 일반적으로 알려져 있다(식 1).

$$FF = \frac{\text{resistivity of the porous medium}}{\text{resistivity of the pore fluid}} = an^{-m} \quad (1)$$

여기서, n 은 간극률(porosity)이며, a 는 상수이다. m 은 보통 cementation factor라고 불리며,

pore network의 tortuosity와 interconnectivity에 관련된 값으로 깨끗한 모래의 경우 1.4~2.2의 값을 갖는 것으로 알려져 있다(Jackson et al., 1978). Formation Factor는 현장에서 지반의 전기비저항과 유체의 전기비저항을 측정하여 구할 수 있으며 앞서 제시된 경험식들을 통해 포화대에서 간극률을 추정하기 위하여 활용되어 왔다. 그러나 아직까지 불포화대에 적용할 수 있는 식은 개발되어 있지 않다.

3. 실험재료 및 방법

실험에 사용된 토양은 화강풍화토로서 통일분류법상 입도분포가 좋은 모래(SW)로 분류되었으며 기본물성은 표 1과 같다. 오염되지 않은 지반의 간극수로는 수돗물(tap water)을 사용하였다. 오염물질은 김포매립지에서 채취한 침출수로 탈이온수(deionized water)를 이용하여 질량비 10%, 20%, 30%로 희석하여 사용하였 용액의 전기전도도는 conductivity meter(Orion 550A)를 사용하여 측정하였으며, 실험에 사용된 침출수와 수돗물에 대한 측정 결과는 표 2와 같다.

불포화 사질토 지반을 모사하여 전기비저항을 측정하기 위하여 Harvard miniature 다짐몰드와 동일한 규격의 아크릴 몰드를 제작하였다. 흙과 용액을 골고루 혼합하여 원하는 함수비의 시료를 만들어 측정몰드에 넣고 다짐을 한 후 구리전극을 설치하였다. Stable Current Source(Keithley 220)로 1mA의 직류(DC)를 공급하고 Multimeter로 전위차를 측정하여 전기비저항을 구하였다. 직류를 오랜 시간 작용하게 되면 분극현상(polarization)과 온도상승을 일으켜 시료의 전기비저항값을 변화시킬 수 있기 때문에 전류의 공급과 전위차의 측정은 짧은 시간에 완료하여 분극과 온도상승 효과를 배제하였다(Shang et al., 1995).

표 1 화강풍화토의 기본물성

Gravel fraction	2.1%
Sand fraction	93.2%
Silt/clay fraction	4.7%
Specific gravity	2.63
Organic content	1.97%
USCS	SW

표 2 용액의 전기전도도 및 전기비저항

	Conductivity (mS/cm)	Resistivity (Ω m)
Tap water	142×10^{-3}	70.44
Leachate 10%	2.36	4.24
Leachate 20%	4.54	2.20
Leachate 30%	6.54	1.53
Leachate 100%	20.58	0.49

4. 실험결과 및 분석

그림 1은 moisture density와 전기비저항과의 관계를 보여주는 그림이다. moisture density는 단위 부피의 토체에 대한 물의 질량으로 정의되며 함수비와 건조단위중량의 곱으로 계산될 수 있다(Selig and Mansukhani, 1975). moisture density는 함수비의 증가에 의한 영향과 다짐정도의 증가에 의한 간극수의 connectivity 증가를 모두 고려할 수 있으므로 불포화 사질토의 지반조건을 대표할 수 있는 인자로 고려될 수 있다. moisture density가 증가함에 따라 전기비저항은 지수함수적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 회귀분석을 수행한 결과 moisture density에 대한 지수함수형태의 곡선을 나타내었으며 그 상관성은 매우 높았다. moisture density의 증가는 함수비의 증가 혹은 건조단위중량의 증가로 나타나는 간극수의 connectivity의 증가를 반영하므로 전기비저항은 감소하게 된다. 따라서, 전기비저항 측정에 의한 지반의 오염도 조사시 moisture density의 평가가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

그림 2는 침출수 희석 용액으로 성형된 시료의 moisture density에 따른 전기비저항의 변화를 도시한 그래프이다. 그림 1의 경우와 비교하면, 침출수로 오염된 시료의 전기비

저항은 수돗물로 성형된 시료의 전기비저항보다 작은 값을 나타내었으며, 이는 침출수의 전기비저항이 수돗물에 비해 매우 작기 때문이다. 사질토 지반이 침출수로 오염된 경우에도 moisture density의 증가에 따라 전기비저항은 지수함수적으로 감소하는 경향을 보였으며, 또한 높은 상관성을 나타내었다. 그리고, 동일한 moisture density에 대하여 침출수 농도가 높을수록 더 낮은 전기비저항값을 나타내었다.

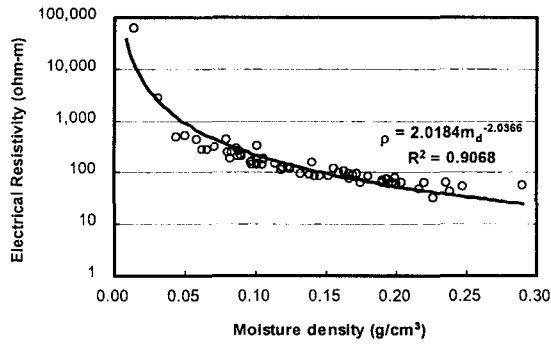


그림 1 moisture density와 전기비저항의 상관성

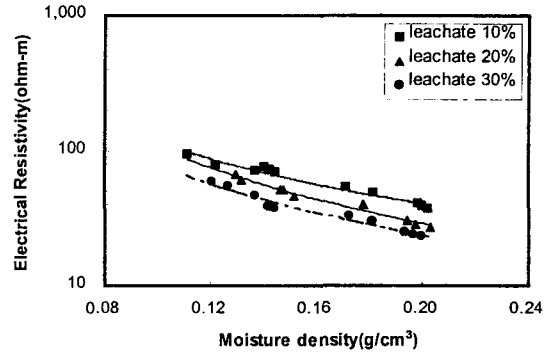


그림 2 침출수로 오염된 불포화 사질토 지반의 전기비저항 변화

침출수의 농도 증가에 따른 전기비저항의 변화경향을 그림 3에 도시하였다. 그림 3에서 일정한 moisture density를 갖는 사질토 지반에서 침출수의 농도가 증가함에 따라 전기비저항의 감소 경향이 확연하게 나타남을 알 수 있다. 이를 통해 전기비저항의 평가를 통하여 침출수에 의한 지반의 오염도 평가가 가능함을 확인할 수 있다.

그림 4에서 moisture density가 증가함에 따라 formation factor는 지수적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 침출수로 오염되었을 경우 formation factor는 오염되지 않은 경우보다 큰 값을 나타내었으며, 동일한 moisture density에 대하여 침출수 농도가 높아짐에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 이에 대한 회귀분석을 수행한 결과를 표 3에 정리하였다. 회귀분석 결과에 의하면 formation factor는 moisture density의 함수로 표현될 수 있으며, 매우 높은 상관성을 보였다. 회귀분석에 의해 도출된 식은 불포화 사질토 지반에 적용가능하며, 포화대에만 적용가능했던 Archie 식을 확장시킨 형태이다.

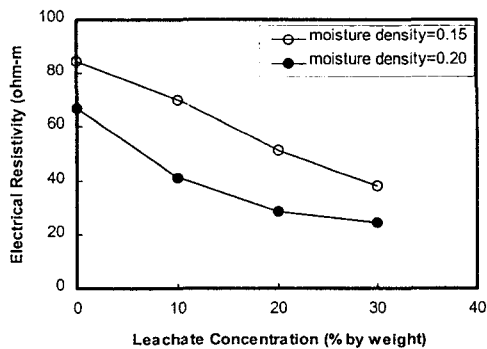


그림 3 침출수의 농도변화에 따른 전기비저항의 변화

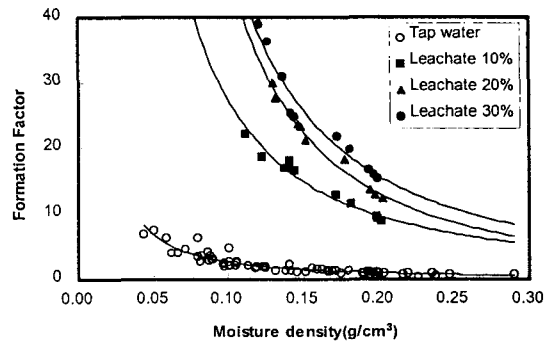


그림 4 moisture density와 formation factor와의 상관관계

표 3 moisture density와 formation factor와의 상관관계식

	Regression equation	R ²
Tap water	FF = 2.02 m _d ^{-2.14}	0.9068
Leachate 10%	FF = 3.62 m _d ^{-1.51}	0.9612
Leachate 20%	FF = 1.40 m _d ^{-1.88}	0.9785
Leachate 30%	FF = 1.50 m _d ^{-1.72}	0.9618

5. 결론

불포화 사질토 지반의 전기비저항은 moisture density가 증가함에 따라 지수함수적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 침출수로 오염된 지반의 경우에도 moisture density의 변화에 따라 전기비저항이 감소하였으며, 침출수 농도가 커짐에 따라 전기비저항은 작은 값을 나타내었다. 지반의 전기비저항은 moisture density에 따라 측정값이 변하므로 전기비저항을 이용한 토양 및 지하수의 오염도 평가에서 moisture density의 평가가 선행되어야 침출수의 오염도에 대한 정확한 평가가 이루어질 수 있다.

Formation factor는 moisture density의 함수로 표현될 수 있으며, 회귀분석을 통하여 포화대에서만 적용가능했던 Archie's 식을 확장하여 불포화 사질토 지반에 적용가능한 formation factor의 식을 도출하였다. 침출수로 오염된 지반의 Formation factor는 오염되지 않은 지반보다 큰 값을 나타내었으며 침출수 농도가 증가함에 따라 동일한 moisture density에서의 formation factor도 증가하였다.

6. 감사의 글

본 연구는 “금수강산21” 프로젝트의 일환으로 수행된 것임을 밝히며, 연구에 도움을 주신 한국과학기술연구원 관계자 분들께 감사드립니다.

7. 참고문헌

- (1) Archie, G. E., "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics", Transactions of American Institute of Mineral Metallurgy Engineering, Vol.146, pp.54-62, 1942
- (2) Jackson, P. D., Smith, D. T. and Stanford, P. N., "Resistivity-porosity-particle shape relationships for marine sands", Geophysics, Vol.43, No.6, pp.1250-1268, 1978
- (3) Kaya, A. and Fang, H. Y., "Identification of contaminated soils by dielectric constant and electrical conductivity", Journal of Environmental Engineering, Vol. 123, No. 2, pp.169-177, 1997
- (4) Okoye, C. N., Cotton, T. R., and O'Meara, D., "Application of Resistivity Cone Penetration Testing for Qualitative Delineation of Creosote Contamination in Saturated Soils", Geoenvironment 2000, pp.151-166, 1995
- (5) Selig, E. T. and Mansukhani, S., "Relationship of soil moisture to the dielectric property", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 101(GT8), pp. 755-770, 1975
- (6) Shang, J. Q., Lo, K. Y. and Incullet, I. I., "Polarization and conduction of clay-water-electrolyte systems", Journal of Geotechnical Engineering, Vol.121, No.3, pp.243-248, 1995