

연구논문

불포화대 토양 특성 분석을 위한 전기비저항 토모그래피의 적용성

용환호¹⁾ · 송성호¹⁾

Application of Electrical Resistivity Tomography to Analyze Soil Properties in Unsaturated Zone

Hwan-Ho Yong¹⁾ and Sung-Ho Song¹⁾

요약 : 불포화대 토양특성 분석을 목적으로 토양단면의 고해상도 영상을 얻을 수 있는 전기비저항 토모그래피를 적용하였다. 전극설치 지점에서 심도별로 채취한 토양시료를 대상으로 토양 공극수의 전기전도도, 수분함량, 이온함량을 측정 한 결과, 토양특성과 전기비저항 토모그래피 결과의 상관성이 토성별로 선형적인 관계가 나타남에 따라 전기비저항 토모그래피 결과를 보다 효과적으로 해석할 수 있었다. 따라서 불포화 토양층을 대상으로 한 전기비저항 토모그래피를 이용하여 시추공 사이의 토양특성을 파악할 수 있으며, 토양의 산도, 유기물 함량 등의 간접적 평가가 가능할 것으로 판단된다.

주요어 : 불포화대, 전기비저항 토모그래피, 공극수의 전기전도도, 토성

Abstract : To analyze soil properties of unsaturated zone, we applied electrical resistivity tomography(ERT) of high resolution image. From linear relationship with each soil texture between results of ERT and soil properties such as electrical conductivity of pore water, water contents and ionic contents, we could be analyzed the result of ERT more effectively. Consequently, ERT can be useful for estimating soil properties between the two holes and evaluating indirectly pH and organic contents of soil.

Keywords : unsaturated zone, electrical resistivity tomography (ERT), electrical conductivity of pore water, soil texture

서론

지구물리탐사 결과에 의한 전기비저항은 지반의 물성과 직접적으로 관련된 것으로 지반의 수분함량, 공극률, 공극수의 전기전도도, 미세토립자의 함유량 등에 의해 결정되므로 탐사 결과로부터 정확한 정보를 추출하기 위해서는 전기비저항과 지반 물성의 관계를 정확하게 밝히는 것이 매우 중요하다(박삼규, 2004). 불포화대 토양을 대상으로 할 경우에는 이러한 물성과 관련된 강수, 결빙, 다짐 등에 의해 전기비저항은 보다 민감하게 변화한다. 특히, 다짐현상은 인위적으로도 일어날 수 있으며, 이처럼 불포화대 토양의 물리적 특성은 매우 복잡하지만 상관성이 큰 전기비저항으로부터 부분적인 평가가 가능하다.

지금까지 국내에서는 지구물리탐사를 이용한 단층조사, 암반평가, 연약지반 평가, 파쇄대 및 지하수 조사 등이 일반적으로 사용되고 있으며, 그 중에서 지하수 조사와 수리지질구조 규명을 위한 방법으로 쌍극자배열 전기비저항 탐사, MT 탐사 및 SP 탐사 결과들이 많이 보고되고 있다(정승환 등, 1992; 송성호 등, 2002; 송성호와 용환호, 2003). 그러나 이러한 방법들

은 지하수면 하부의 지반 및 지질구조를 대상으로 한 방법들로 근본적으로 불포화대 토양을 대상으로 할 경우에는 제한이 따른다. 최근에는 소형루프 전자탐사를 적용하여 논 토양의 염류집적과 심도별 토양을 분석함으로써 포화대와 불포화대의 토양분포를 밝히려는 연구가 진행되고 있다(용환호 등, 2003). 그러나 이 방법 또한 전기적인 잡음에 매우 취약하기 때문에 도심지 또는 전력선이 위치한 곳이나 협소한 장소에서는 자료의 취득이 용이하지 않으며, 시추공을 이용하여 수행하는 전기비저항 토모그래피에 비해 근본적으로 지표탐사에서 얻을 수 있는 자료의 수가 한정되기 때문에 해상도가 떨어질 수밖에 없다.

따라서 본 연구에서는 불포화대 토양분포별 전기비저항의 상관관계를 분석하기 위하여 고해상도의 영상획득이 가능하며, 소규모의 시추공을 이용하여 협소한 장소에서도 자료취득이 가능한 전기비저항 토모그래피를 적용하여 2차원 역산에 의한 전기비저항 결과와 토양분석 결과를 비교해보았다. 또한 심도별 토양시료를 대상으로 수분함량, 산도(pH), 유기물, 이온함량 및 공극수의 전기전도도와 입도분석을 통한 토성별 전기비저항의 상관성을 파악해보았다.

*2004년 7월 23일 접수

1) 농어촌연구원 지하수연구실(KARICO)

토양시료 분석

토양의 수분함량(water content)은 토양시료 중 물의 함량을 나타내는 것으로 토양의 종류에 따라 토양의 수분보유능력이 달라진다. 측정법은 전체 토양에 대한 토양수의 부피비인 용적 수분함량을 사용하였으며, 본 연구에서는 토양에서 고체상태로 되어있는 유기물과 무기물, 기체상태로 되어있는 토양가스, 액체상태로 되어있는 토양수 중 토양수만의 함량을 나타내었다.

토양의 수소이온농도 지수인 산도(pH)의 경우 유기물과 무기물의 형태와 성질, 수분함량, 염과 전해질의 함량, 이산화탄소의 함량 등에 영향을 받는다. 주로 산성에 가까운 토양일수록 용탈(eluviation)이 심하게 진행된 토양이나 수산화물 점토 광물이 주가 되는 토양이며, 미생물의 활동이 거의 없으며, 금속이온의 용해도가 높아지는 경우가 대부분이다.

유기물은 다양한 분해단계의 미생물, 동식물의 잔해 세포, 잔해로부터 합성된 부식물, 그리고 숯이나 흑연, 석탄과 같은 고도의 탄소화합물 등을 포함한다. 유기물 함량은 단지 토양입자와 함께 2 mm 체를 통과한 유기물의 양으로 표시하였다.

이온분석은 증류수로 포화시킨 토양의 공극수만을 빼내어 가용성이온을 대상으로 양이온과 음이온을 분리하여 이온함량을 측정하였다. 이온은 온도와 함께 전기전도도와 직접적인 상관성이 있으며, 토양의 종류에 따라 이온의 흡착성질이 달라지는 경향이 있다.

측정된 전기전도도는 공극수를 대상으로 하여 수용액의 성질을 나타내는 값으로 염이 물속에 많이 용존될수록 전기전도도는 증가하는 경향을 나타내며, 본 연구에서 측정된 방법은 토양시료를 증류수로 포화시키고 풀 상태의 점도가 되도록 반죽한 후, 염이 용존되도록 약 12시간 정도 방치한 후 반죽 침출액의 전기전도도를 측정하였다. 본 연구에서는 토양과 물의 비율을 1:5로 결정하였는데, 이는 압력을 가하거나 또는 진공상태에서 토양으로부터 쉽게 제거될 수 있는 분석을 위해 충분한 양의 침출액을 얻을 수 있는 비율이기 때문이다. 다만, 이 부분이 토양시료 공극수의 전기전도도와 탐사결과와의 전기비저항을 직접 비교하는데 있어서 큰 오차요인이 되기도 한다.

마지막으로 토성별로 토양시료의 입도를 분석해보았다. 비중법에 의하여 입자의 크기에 따라 사토(Sand), 미사토(Silt), 점토(Clay)의 함량을 측정된 결과, 조사지점의 토양시료가 대부분 사토로 구성되어 있음을 확인할 수 있었다. 사토를 보다 세분화하기 위해 다시 체분석을 통하여 매우 굵은 사토(Very Coarse Sand; VCS), 굵은 사토(Coarse Sand; CS), 중간 사토(Medium Sand; MS), 얇은 사토(Fine Sand; FS), 매우 얇은 사토(Very Fine Sand; VFS)로 구분하여 조사지점의 토양특성을 파악해보고자 했다.

전기비저항 토모그래피의 자료획득 및 처리

불포화대는 시추공내에 공내수가 존재하지 않기 때문에 시료채취 이후 핸드오거(hand auger)를 이용하여 굴착된 소규모 시추공에 미리 제작한 전극과 함께 전선을 설치한 후, 설치된 전극의 접지를 위하여 시료채취시 얻어진 토양을 되매움하여 전극과 시추공벽 간의 공간을 최소화하였다. 또한 조밀한 전극과 효과적인 전극배열로 분해능을 향상시키고자 전극간격은 0.3 m, 전극배열 방법은 시추공간(crosshole) 탐사의 경우, 단극-쌍극자배열에서 음의 전류전극을 두 시추공을 연결하는 지표 상에서 송신공으로부터 수신공까지 거리의 2/3 지점에 위치시킨 후, 시추공내의 전위전극을 이용하여 전위를 측정하는 변형된 단극-쌍극자배열법(modified pole-dipole array)을 적용하였다(김정호 등, 1997; Yi and Kim, 2003). 또한 전극배열의 비대칭성을 극복하기 위하여 수신공에 전류원을 위치시키는 역변형된 단극-쌍극자배열법(reverse modified pole-dipole array)과 하나의 공에 전류원과 전위전극을 모두 위치시키는 동일시추공 탐사(inline survey)를 병행하였다. Fig. 1은 전기비저항 토모그래피를 위한 전극설치 모식도를 보여주고 있다. 두 시추공간 거리는 2.1 m이고, 시추공의 심도는 4 m로 하였으며, 지하수위는 지표로부터 2.4 m에 나타나는 것으로 확인되었다.

한편, 전기비저항 토모그래피 영상을 획득하기 위해서는 측정자료에 대하여 자료편집 및 역산을 수행하여야 하는데, 본 연구에서는 상용 소프트웨어인 TomoDC를 이용하였다. 이 해석 소프트웨어에 내장된 역산 알고리즘은 유한요소법에 기반을 둔 평활화제한 최소자승역산법을 채용하고 있으며, 역산의 분해능 향상을 위하여 라그랑지 승수를 공간분포에 따라 자동

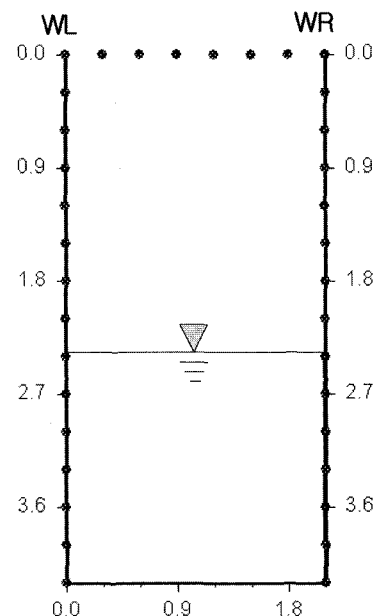


Fig. 1. Electrodes and two holes for electrical resistivity tomography.

으로 결정하는 ACB(Active Constraint Balancing)법을 채용하고 있다(김정호 등, 1997; Yi and Kim, 2003).

자료해석

Fig. 2는 토모그래피에 의한 전기전도도와 토양시료 공극수의 전기전도도를 비교한 결과로 지하수면은 지표로부터 2.4 m 깊이에 나타나는데, 토모그래피의 결과에서 나타난 전기전도도 상승구간과 일치된다. 또한 심도 2.4 m 이하의 포화대 구간에서는 전기전도도의 변화양상이 비슷한 경향을 보이는데 비하여 불포화대에서는 두 결과의 상관성이 나타나고 있지 않다. 즉, 포화대에서의 시료는 수분을 다량 포함하고 있으며, 토양시료 분석시에도 포화시켜서 측정함에 따라 큰 오차가 나타나지 않으나, 불포화대에서는 인위적인 포화가 자료의 신뢰도를 매우 낮출 가능성이 있다.

따라서 본 연구에서는 조사 지점의 토양이 심도별로 다양하게 나타남에 따라 토성분류를 실시하여 토성별 경향성을 확인해보았다. Fig. 3은 WL공과 WR공에서 채취한 토양의 입도를 분석한 결과로 모래, 실트, 점토 함량에 따라 USDA 분류법에 의해 분류해 본 결과, 대부분 점토함량이 낮은 사토(Sand; S), 양질사토(Loamy sand; LS), 사질양토(Sandy loam; SL), 양토(Loam; L), 미사질양토(Siltyloam; SIL) 영역에 속하며, 양토와 미사질양토에 속하는 토양시료들은 모두 포화대 구간의 시료인 것으로 나타났다(U.S. Dept. of Agriculture, 1975). 이때의 시료채취 위치 및 심도는 Table 1과 같다.

연구지역의 심도별 토양특성은 Fig. 3에 표시한 바와 같이 크게 3그룹으로 분류하였는데, 불포화대에만 존재하는 사토를 I그룹, 포화대와 불포화대에서 모두 나타나는 양질사토와 사질양토를 II그룹, 포화대에서 나타나는 양토와 미사질양토를 III 그룹으로 나누었다. 그 결과, I그룹의 경우 전기비저항은 500

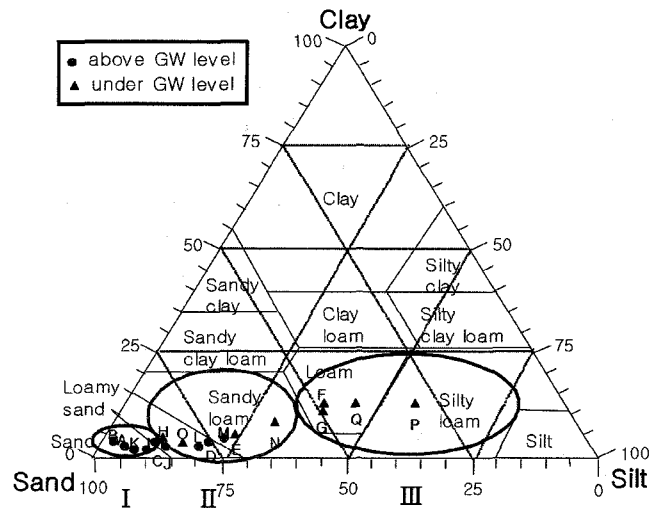


Fig. 3. Particle size distribution of each soil in each depth according to USDA texture classification (clay: <0.002 mm, silt: 0.002~0.05 mm, sand: 0.05~2.0 mm).

Table 1. Depth of soil sampling.

A	WL-0.5 m	I	WL-0.5 m
B	WL-1.0 m	J	WL-0.8 m
C	WL-1.5 m	K	WL-1.0 m
D	WL-2.0 m	L	WL-1.5 m
E	WL-2.5 m	M	WL-2.0 m
F	WL-3.0 m	N	WL-2.5 m
G	WL-3.5 m	O	WL-3.0 m
H	WL-4.0 m	P	WL-3.5 m
		Q	WL-4.0 m

ohm-m 이상으로 나타났고, II그룹의 경우 200~700 ohm-m, III 그룹의 경우 100~300 ohm-m의 범위를 나타내는데, 각 그룹간 비저항대가 중첩되어 나타난 것은 같은 토성이라도 수분함량

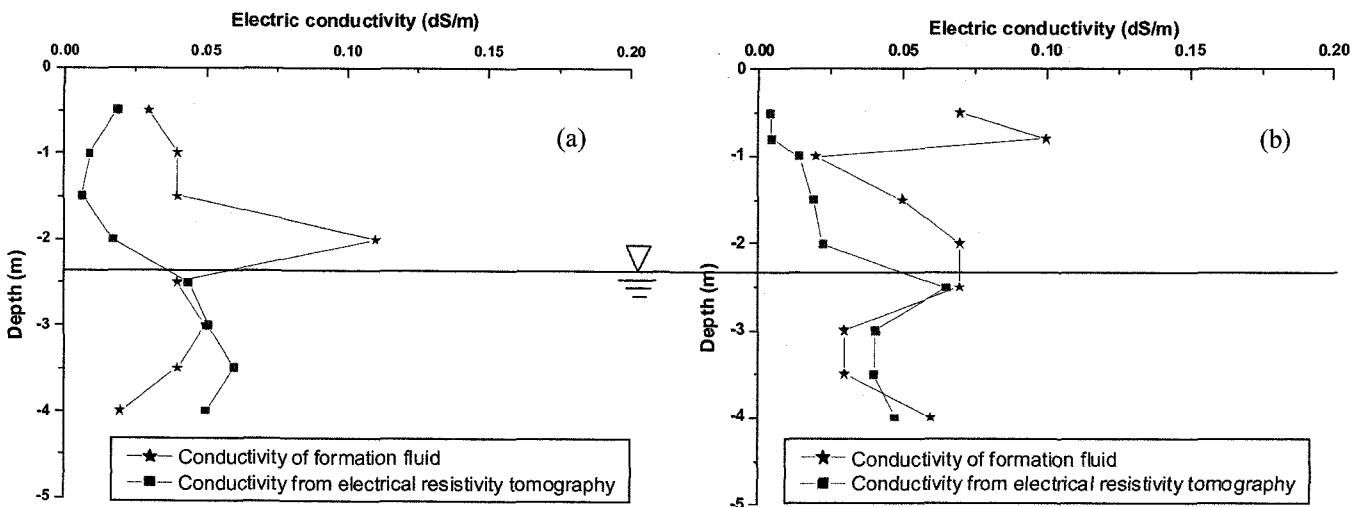


Fig. 2. Conductivity distribution of tomography method and soil analysis at each depth ((a) WL hole, (b) WR hole).

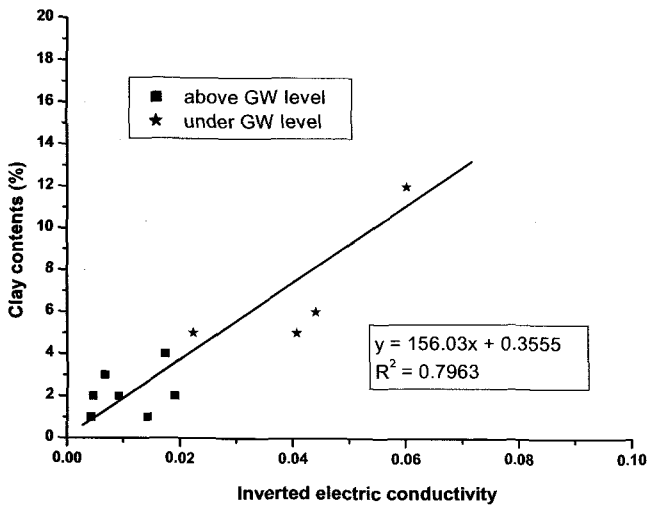


Fig. 4. Correlation of conductivity from resistivity tomography method and clay contents.

이나 이온함량 등이 서로 상이한 조건이었기 때문에 파악된다. 따라서, 이러한 분류결과를 토모그래피에 의한 전기비저항과 단순 비교하는 것보다는 토양수분함량, 이온함량 등을 추가하여 해석하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 전기비저항에 영향을 미치는 주 요소가 매질의 공극을 차지하는 수분에 함유되어 있는 이온성분이라고 볼 수 있지만, 토성에 따라 수분을 흡착하는 정도가 각각 상이하므로, 이에 따라 이온함량도 서로 달라지기 때문에 토양의 입자크기는 전기비저항과의 상관성을 분석할 경우 서로 다른 경향을 보일 것으로 판단하였다. 연구지역의 경우 대부분 사토로 구성되어 있긴 하지만, 심도에 따라 모래입자의 크기도 서로 다르며, 전기비저항과 밀접한 관련이 있는 점토함량도 현저히 차이가 있는 것으로 확인되었다. 따라서 Fig. 4에서의 같이 조사지점의 점토함량과 전기비저항과의 관계를 확인한 결과 대체로 점토함량이 증가할수록 전기

전도도가 높아짐을 확인할 수 있었다.

Fig. 5에서는 심도별로 대부분의 구간에서 점토가 많은 지점의 경우 수분함량도 상대적으로 많은 것으로 나타났다. 결과적으로 점토함량과 수분함량은 전기전도도의 경향과 매우 유사함을 확인할 수 있었다.

II그룹의 경우, Fig. 6에서와 같이 포화대와 불포화대 시료가 혼재되어 있지만, 지하수면 아래부분과 위부분의 경우 토모그래피 결과의 전기비저항 범위가 큰 차이가 나타남에 따라 두 구간을 서로 분리하여 분석할 필요성을 인식할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 토성 분석과정에서 토성 이외에 지하수면과의 상관관계를 동시에 고려하고자 했다.

Fig. 7(a)는 조사지역의 전기비저항 토모그래피 영상으로 심부로 갈수록 점점 낮은 전기비저항이 분포함을 확인할 수 있었다. WL공과 WR공의 토양샘플 분석결과를 종합하여 두 시추공 사이의 토양단면을 작성해보면, Fig. 7(b)와 같이 나타나는데, 이는 그룹간 중첩되어 나타나는 전기비저항 구간이 각각

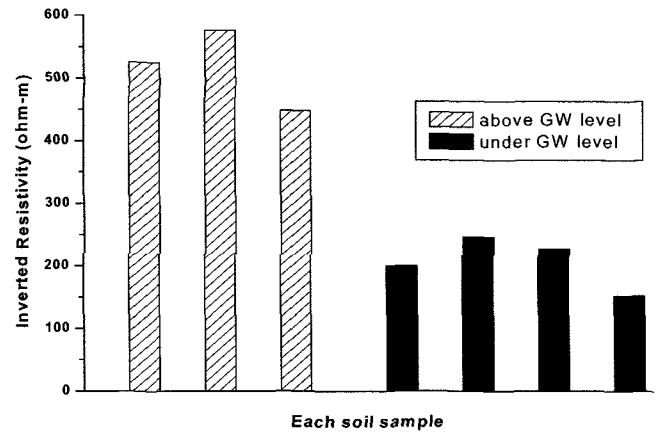


Fig. 6. Inverted resistivity distribution of II group. The groundwater level control the resistivity distribution.

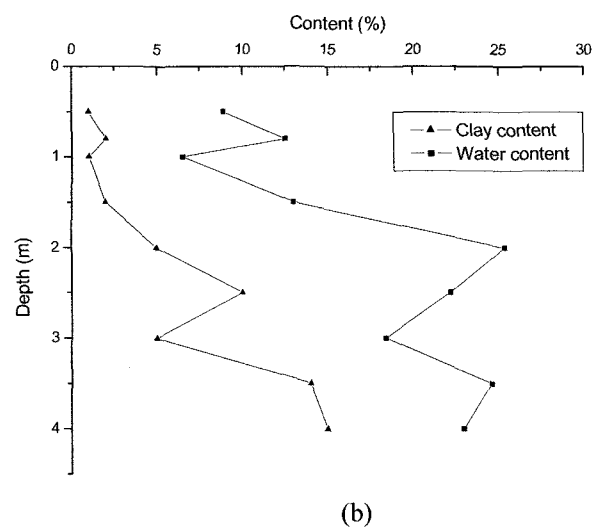
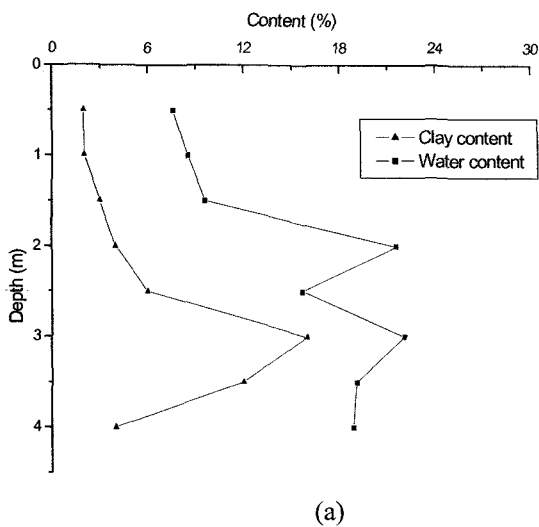


Fig. 5. Clay and water contents with depth. WL borehole (a), WR borehole (b).

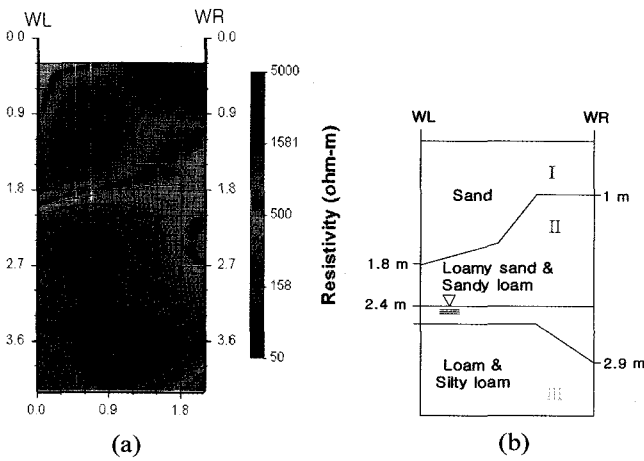


Fig. 7. Resistivity section obtained from the inversion of tomography data (a) and soil section expected by the classification of soil texture (b) in same area.

의 그룹에 대한 경계가 되며, 이때 지하수면을 고려하더라도 토성에 따라 전기비저항의 범위가 크게 벗어나지 않음을 확인할 수 있다.

이러한 상관성을 바탕으로 현장수분함량, 산도, 유기물, 이온함량과 전기비저항 토모그래피에 의한 전기비저항과의 상관성을 분석하였다. Fig. 8은 전기비저항 토모그래피에 의한 전기비저항과 토양내의 수분함량의 상관관계를 분석한 결과로 수분함량의 경우 점토함량이 거의 존재하지 않는 I그룹의 경우 전혀 상관성을 보이지 않고 있는데, 이는 불포화대 구간의 경우 전기비저항 토모그래피에 의한 전기비저항이 매우 높은 범위에 속하고, 모래의 특성상 수분을 보유하고 있는 능력이 매우 낮기 때문에 소규모의 범위 내에서 상관성 분석이 어렵기 때문으로 판단된다. 그러나, II그룹의 경우 수분함량이 일부 높은 구간이 나타나는데, 이는 불포화대 경우라고 하더라도 지표에서 침투되는 수분과 지하수면으로부터의 모세관현상에

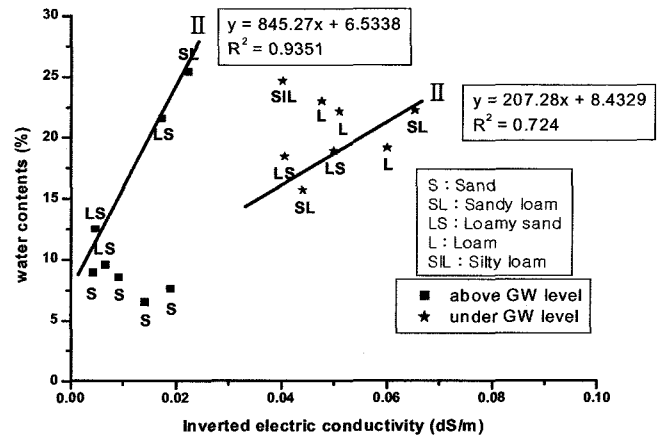


Fig. 8. Correlation of conductivities obtained from tomography method and water contents by soil analysis.

의한 원인으로 상대적으로 수분보유 능력이 높기 때문인 것으로 판단된다. 전기비저항 토모그래피의 결과에서도 전기비저항과 수분함량의 관계에서 R^2 이 0.9351이라는 높은 상관성으로부터 이와같은 결과를 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다. 또한 포화대 구간이라고 하더라도 II그룹의 경우 전기비저항 토모그래피에 의한 전기비저항과 상관성이 잘 나타나는데, 이는 지하수면 아래이긴 하지만 조사지점의 현장수분함량이 전기비저항에 보다 큰 영향을 주었을 것으로 생각된다. 그러나, III그룹의 경우는 수분함량에 의한 전기비저항의 상관성이 잘 나타나지 않는 것으로 확인되었다.

Fig. 9는 전기비저항 토모그래피에 의한 전기비저항과 산도 및 유기물 함량과의 상관관계를 분석한 결과로 II그룹에 불포화대와 포화대 구간 모두 토모그래피에 의한 전기비저항과 상관성을 보임에 따라 전기비저항 토모그래피를 이용한 토양특성 평가시 산도와 유기물 함량을 이용한 간접적 평가가 가능함을 확인할 수 있었다. 사토로 구성된 I그룹과 양토와 미사질 양토로 구성된 III그룹의 경우에는 상관성이 크지 않은 것으

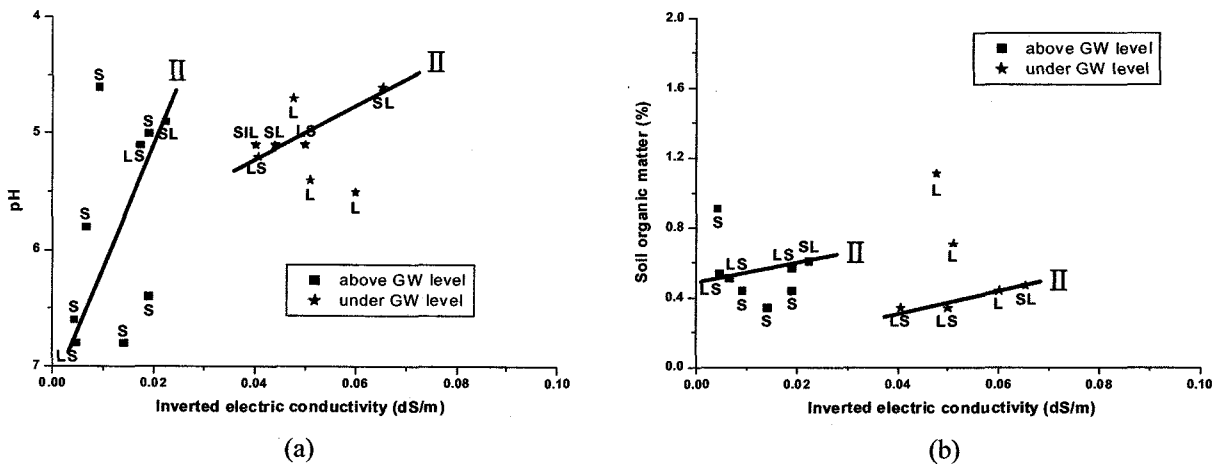


Fig. 9. Correlation of conductivities obtained from tomography method and pH (a), organic contents (b) by soil analysis.

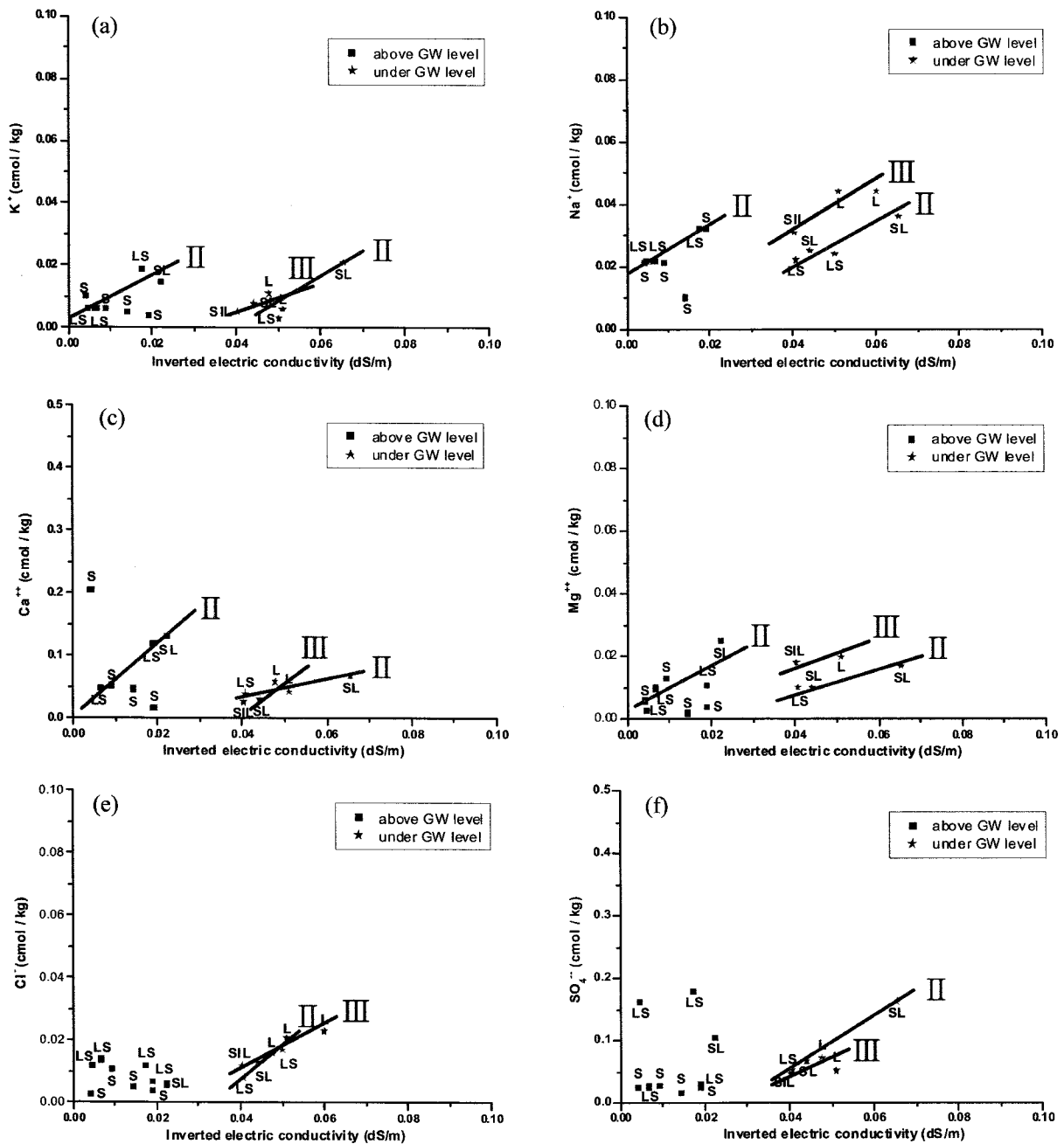


Fig. 10. Correlation of conductivities obtained from tomography method and ion (K⁺ (a), Na⁺ (b), Ca⁺⁺ (c), Mg⁺⁺ (d), Cl⁻ (e), SO₄⁻ (f)) contents by soil analysis.

로 나타남에 따라 I그룹의 경우는 산도와 유기물 함량에 영향을 줄 수 있는 요소들이 남아있더라도 수분이 거의 없는 환경 하에서는 전기비저항과 직접적인 관련이 없는 것으로 판단되며, 가장 심부에 속하는 III그룹의 경우도 지하수면 아래에서 전기비저항 토모그래피 상에서 낮은 전기비저항 구간이 집중되어 있기 때문에 상관성이 잘 나타나지 않았다. II그룹의 경우는 지하수면이 항상 일정하지 않으므로 설사 조사시점이 포화 구간이더라도 경우에 따라서는 불포화대 구간이 될 수 있으므로 다양한 변수가 생길 가능성도 배제할 수 없다. 다만, 이 구

간은 지하수면이 수시로 변하기 때문에 지하수면이 변화하기까지의 시간을 최소화하여 토모그래피 측정이 이루어졌으므로 이러한 변수들이 배제된 것으로 간주하였다.

Fig. 10은 토모그래피 결과와 이온함량과의 관계를 나타낸 것으로, 포화대 구간에서는 II그룹, III그룹 모두 토모그래피 결과와 매우 상관성이 높게 나타났다.

이온은 주성분 이온을 대상으로 양이온과 음이온을 분리하여 K⁺, Na⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Cl⁻, SO₄⁻의 함량을 측정하였는데, 불포화대의 경우, II그룹에서 양이온은 전기비저항 토모그래피에

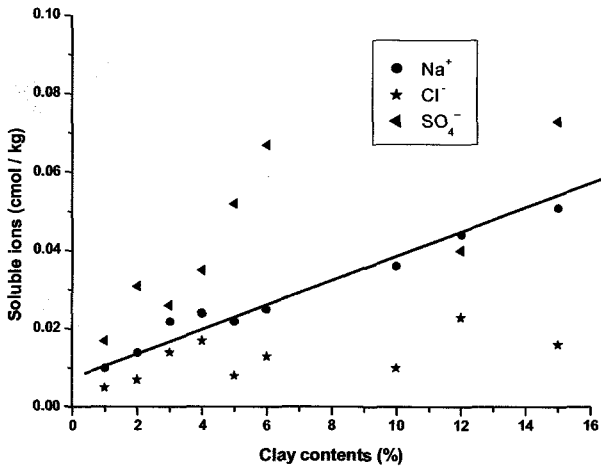


Fig. 11. Correlation of clay contents and cation (Na^+), anion (Cl^- , SO_4^{2-}) contents by soil analysis.

의한 전기비저항과 상관성을 보이고 있지만, 음이온은 그다지 큰 상관성이 나타나지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 점토의 특성상 양이온 흡착성질과 무관하지 않을 것으로 생각된다. 따라서 Na^+ 이온과 Cl^- , SO_4^{2-} 이온을 대상으로 점토함량과의 상관성을 비교하였다. 그 결과, Fig. 11과 같이 Na^+ 이온이 가장 점토함량과 밀접한 연관이 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 이온함량과의 관계는 기본적으로 시료 분석시 포화침출법을 기초로 하기 때문에 실제 포화대 구간의 특성 또한 잘 반영하고 있는 것으로 파악되며, 불포화대 구간에서도 지표에서의 수분침투가 지하수면까지 도달하는 과정에서 이온흡착이 계속 진행되는 것으로 판단할 수 있다.

이와 같이, 토성분류에 따른 전기비저항의 분포는 특정 요소에 의해 좌우되는 것이 아니라, 수분함량과 이온함량과의 유기적 관계가 형성될 수 있음을 의미하며, 이러한 상관관계 분석을 통하여 보다 구체적인 해석이 가능할 것으로 생각된다.

토의 및 결론

사질양토와 양질사토(II그룹)의 경우 포화대와 불포화대에서 모두 수분함량, 이온함량, 산도, 유기물함량 등이 전기비저항 토모그래피 결과와 상관성을 나타내었으며, 불포화대 사토(I그룹)의 경우 수분 및 점토함량이 극소량 분포함에 따라 상대적으로 전기비저항 토모그래피 결과와의 상관성이 낮은 것으로 확인되었다. 반면, 포화대 구간의 양토와 미사질양토(III그룹)의 경우 이온함량은 전기비저항 토모그래피 결과와 상관성을 나타내지만, 수분함량, 산도, 유기물 함량과의 상관성은 떨어지는 것으로 나타났으며, II그룹에서 양이온과 음이온 함량 분석결과, 포화대 구간에서는 두 이온 모두 전기비저항 토모그래피 결과와 상관성을 나타내지만, 불포화대 구간에서는 양이온만이 상관성을 나타내는 것으로 보아 점토의 양이온 흡착성질

과 관련성이 높은 것으로 판단된다. 전체적으로 불포화대를 대상으로 한 토양 공극수의 전기전도도와 전기비저항 토모그래피에 의한 전기전도도는 시료분석시 시료를 포화시켜 측정하는 포화침출법을 근본으로 하기 때문에 단순히 측정값만을 가지고 비교하여서는 곤란하다. 즉, 불포화대의 특성을 고려한 상관성 분석이 필요하며, 이에 따라 토성별로 분리하여 수분함량과 이온함량을 동시에 고려할 경우, 보다 구체적인 결과를 얻을 수 있었다. 지하수면의 높이가 유동적이기 때문에 지하수면 근처의 비교적 깊은 불포화대의 경우는 매우 복잡한 변수들이 존재하지만, 오히려 지표부근 I그룹의 모래성분 보다는 점토를 함유한 사질양토와 양질사토(II그룹)의 경우가 전기비저항 토모그래피 역산 결과와 더 상관성이 큰 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 전기비저항 토모그래피에 의한 전기비저항 분포를 통해 시추공 사이의 토양특성 추정이 가능할 것으로 판단된다. 본 조사지점이 사토로 주로 구성된 지역임을 감안할 때 보다 복잡한 지질구조와 다양한 지역에서의 조사결과가 추가된다면, 다양한 해석이 가능할 것이며, 소규모 시추공을 이용한 전기비저항 토모그래피를 통하여 토양의 간접적 평가가 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원(과제번호 3-3-1)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김정호, 이명중, 조성준, 정승환, 송윤호, 1997, 전기비저항 토모그래피의 분해능 향상에 관한 연구, 한국자원연구소, 3-54.
- 박삼규, 2004, 지반의 전기비저항을 좌우하는 물성요인, 물리탐사, 7, 130-135.
- 송성호, 용환호, 김진호, 송승엽, 정형재, 2002, 전기 및 CSMT 탐사를 이용한 초정지역의 수리지질 구조 해석, 물리탐사, 5, 118-125.
- 송성호, 용환호, 2003, 대수층 이방성 분석을 위한 자연전위 모니터링의 적용, 자원환경지질, 36, 49-58.
- 용환호, 송성호, 김진호, 조인기, 2003, 소형루프 전자탐사에 의한 토양분석, 물리탐사, 6, 207-214.
- 정승환, 김정호, 조인기, 전정수, 1992, 종합적 물리탐사에 의한 파쇄대 및 심부 지하수 탐사, 지질공학, 2, 113-130.
- USDA, 1975, Soil Taxonomy: Agricultural Handbook No. 436, USDA, Washington D.C., 754.
- Yi, M. J., and Kim, J. H., 1998, Enhancing the resolving power of the Least-squares inversion with Active Constraint Balancing, 68th Ann. Internal. Mtg. Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 485-488.