

불포화 토양층의 심도별 물리적 특성과 전기비저항 토모그래피 적용 결과 고찰

용환호*, 송성호*, 이규상*, 김진호*, 정형재*

* : 농업기반공사 농어촌연구원 draco92@hanmail.net

1. 서론

지금까지 국내에서는 지구물리탐사를 이용한 단층조사, 암반평가, 연약지반 평가, 파쇄대 및 지하수 탐사 등이 일반적으로 사용되고 있으며, 이 중 쌍극자배열 전기비저항 탐사와 SP 탐사를 이용한 지하수 탐사 및 수리지질구조의 규명에 대한 결과들이 많이 보고되고 있다 (송성호 등, 2002; 송성호와 용환호, 2003). 그러나 이러한 방법들은 지표에 전극을 설치함으로써 일정규모 이상의 광범위한 탐사방법에 해당하여 근본적으로 분해능의 제한이 있기 때문에, 이 연구에서는 불포화대에서의 토양분석을 통한 고해상도 영상 획득을 위하여 소규모 시추공을 이용한 전기비저항 토모그래피법을 적용해보았다.

따라서 본 연구에서는 불포화대 토양의 특성을 분석하고자 강우침투 경로를 모사할 수 있는 염수주입 전후의 토모그래피 결과를 검토해보았으며, 토양의 다양한 분석을 통한 토모그래피 결과의 상관성을 비교해보았다.

2. 자료획득 및 처리

전기비저항 토모그래피의 현장적용 이전단계로 작은 규모의 physical model에 대한 시험 연구를 수행하였다. 시험 연구는 Fig 1과 같이 배열된 전극을 이용하여 약 700여 개의 전극배열이 필요한 변형된 단극-쌍극자배열법을 이용하였으며, Tx공에 전류원 하나가 위치되는 경우 나머지 전류원 하나는 지표상에서 Tx공과 Rx공까지 거리의 2/3 지점에 위치시켰다. 또한 전극배열의 비대칭성을 극복하기 위하여, Rx지점에 전류원을 위치시키는 역변형된 단극-쌍극자배열법 (reverse modified pole-dipole array)과 하나의 공에 전류원과 전위전극을 모두 위치시키는 동일시추공 탐사 (inline survey)를 병행하였다. 전기비저항 토모그래피에서 주로 사용되는 전극배열법으로는 단극 (pole-pole), 단극-쌍극자 (pole-dipole), 쌍극자 (dipole-dipole) 배열법으로, 분해능에 있어서는 쌍극자 배열법이 가장 우수하며, 단극 배열법이 가장 낮지만, 탐사자료의 S/N비는 단극 배열이 가장 우수하며, 쌍극자 배열법이 가장 낮다 (Sasaki, 1992). 그러나 지표탐사와는 달리 전류전극과 전위전극이 지하에 위치

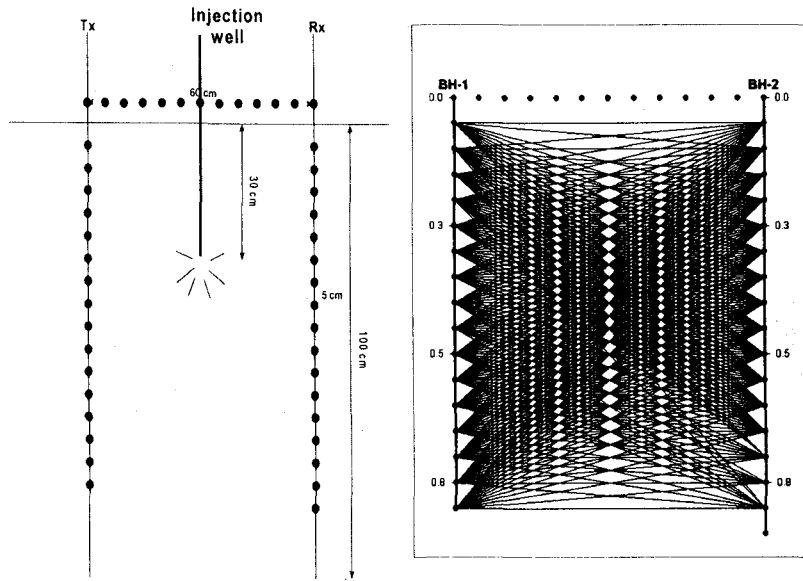


Fig1. Electrodes and raypath in testing area.

함에 따라 쌍극자 배열법으로는 측정이 불가능한 음영대 (shadow zone)가 광범위하게 나타나며, 음의 겉보기비저항이 나타나는 경우가 많다 (조인기 등, 1997). 따라서 본 연구에서는 1997년 김정호 등에 의해 제시된 변형된 단극-쌍극자 배열법 (modified pole-dipole)을 적용하였다.

또한 토양분석과 전기비저항 토모그래피의 상관성을 비교하기 위해 심도에 따라 입도가 다른 토양에 대해서 토모그래피를 적용하였다.

한편, 전기비저항 토모그래피 영상을 획득하기 위해서는 측정자료를 이용한 역산을 거쳐야 하는데, 본 연구에서 토모그래피의 해석을 위해 사용한 방법은 분해능 향상을 위해 라그랑지 승수를 공간분포에 따라 자동으로 결정하는 ACB (Active Constraint Balancing)법을 이용하였다 (김정호 등, 1997; Yi and Kim, 1998).

3. 자료해석

Fig 2는 염수주입 전후의 토모그래피 결과로 지반의 전기적인 특성을 인위적으로 변화시킨 대상 지역의 반응을 시추공을 이용한 영상으로 규명함으로써 염수주입 형태와 주입 범위를 알아낼 수 있었다. 시험 대상지역 토양에 대한 전기비저항은 각 전극 주변에서 약 30 ~ 40 ohm-m 내외의 범위에 해당되며, Fig 2(a)의 경우는 강수 종료 후에 전극을 설치하여 토양수분의 영향이 크게 미친 결과로 판단된다. 그러나 20,000 ppm 농도의 염수를 주입한 직후 측정한 결과는 주입 위치인 -30 cm 깊이에서 Tx 전극방향으로 22 ohm-m 이하의 낮은 비저항 pocket이 Rx 전극방향의 사선방향으로 발달하는 결과가 나타나며 (Fig 2(b)), 이때 양쪽 전극 주변에서는 70 ohm-m 이상의 상대적인 고비저항대가 나타났다. 동일 조건에 대한 24시간 이후 측정된 결과는 염수 pocket이 -60 cm 이하의 심도에서 수평적으로 발달하는 것으로 나타나는데 (Fig 2(c)), 이러한 영상화 결과는 향후 강우의 불포화대의 토

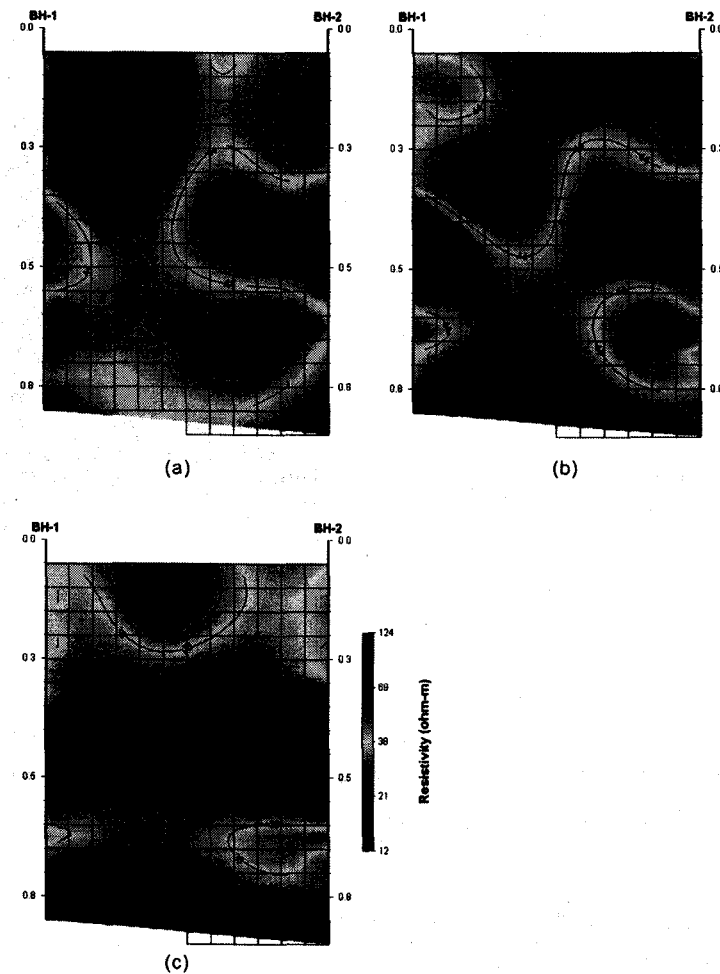


Fig2. Inverted results of resistivity tomography in testing area (a: before injecting, b: 5 minutes later after injecting, c: 12 hours later after injecting)

양 침투양상을 파악하는데 유용할 것으로 판단된다.

Fig 3은 Tx공과 Rx공에서 채취한 토양시료의 토성분석 결과를 나타낸 것으로 Sand, Loamy sand, Sandy loam, Loam, Silty loam으로 크게 다섯 개 군으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 따라서 토모그래피 역산결과에서 각 시료채취 지점에서의 전기비저항을 토성별로 다섯 개 군으로 나누어 비교해보았다. 먼저, Sand의 경우 1000 ohm-m 이상의 높은 비저항을 나타낸 반면에 Loamy sand와 Sandy loam의 경우는 400~700 ohm-m를 나타냈으며, 상대적으로 낮은 sand의 함량을 나타내는 Silty loam과 Loam의 경우에는 100~300 ohm-m의 낮은 전기비저항이 나타났다. 즉, 이러한 결과는 단지, 전기비저항이 수분함량에만 좌우되는 것이 아니라 토양의 입자크기와도 매우 민감하게 작용한다는 것을 시사한다. Fig 4(a)는 전기비저항 토모그래피의 역산결과로써 앞의 다섯 개 군의 토성분석 결과와 연관하여 Fig 4(b)와 같은 추정이 가능하다. 다만, 심도 2 m 이하의 일부 100 ohm-m 보다 낮은 전기비저항은 토양의 수분함량이 주변보다 높은 원인으로 판단된다. 따라서 전기비저항은 토성과 수분함량이 모두 고려되는 것으로 확인되었다. Fig 5와 Fig 6은 각각의 심도에

대해서 토모그래피 역산결과와 각종 토양분석 자료와의 연관성을 나타내는 그래프이다. 이미 토양 간극수의 전기비저항과 소형루프 전자탐사의 1차원 역산결과에 의한 전기비저항의 관계는 매우 연관성이 큰 것으로 보고된바 있다 (용환호 등, 2003). 따라서 본 연구에서는 WL공과 WR공에 대해서 토양 간극수 이외의 치환성 양이온과 가용성 이온함량, 현장수분함량, 점토함량을 전기비저항 토모그래피 역산결과와 비교해 보았다. 그 결과 WL공과 WR공에서 수분함량, 점토함량의 경향과 토모그래피의 역산결과 모두 심도에 따른 상관성을 확인할 수 있었으며, 치환성 이온 중에는 Ca^{++} 와 Mg^{++} 이온의 상관성이 크게 나타났다. 이러한 상관성을 바탕으로 본 연구에서는 향후 점토함량 및 수분함량, 이온함량을 동시에 고려하여 토모그래피를 통한 시추공 주변의 토양특성을 보다 정확하게 파악할 수 있는 방법의 개발이 요구된다.

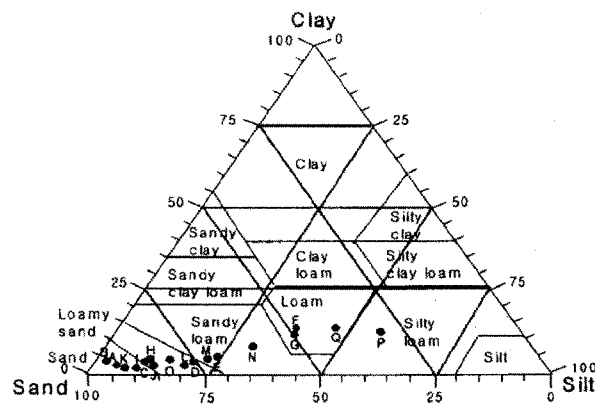


Fig3. Particle-size distribution of each soil sample (A:WL-0.5m, B:WL-1.0m, C:WL-1.5m, D:WL-2.0m, E:WL-2.5m, F:WL-3.0m, G:WL-3.5m, H:WL-4.0m, I:WR-0.5m, J:WR-0.8m, K:WR-1.0m, L:WR-1.5m, M:WR-2.0m, N:WR-2.5m, O:WR-3.0m, P:WR-3.5m, Q:WR-4.0m).

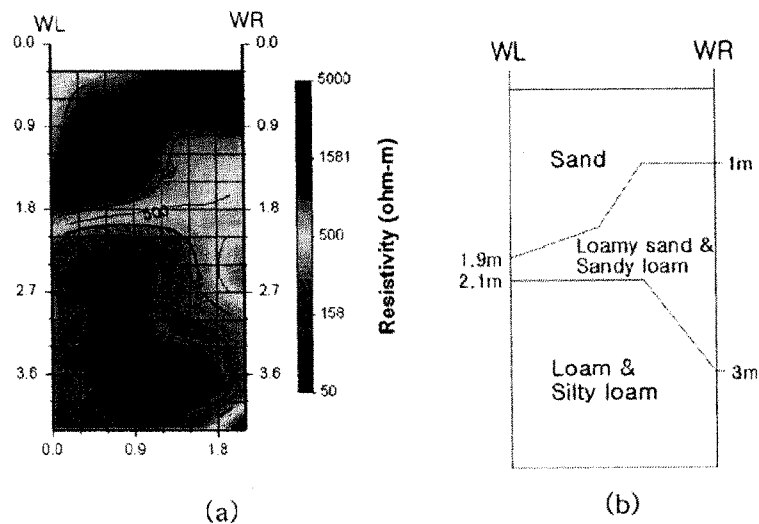


Fig4. Inverted resistivity section of tomography(a) and estimated soil section(b).

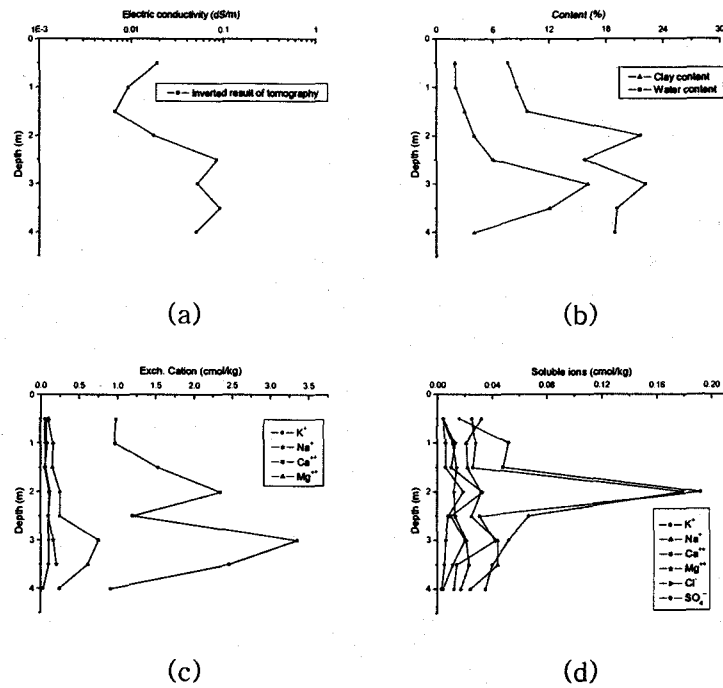


Fig5. Comparison results of electric conductivity by tomography and contents by soil analysis in each depth points in WL borehole (inverted resistivity by tomography(a), water and clay contents(b), Exch. Cation contents(c), and soluble ions contents(d)).

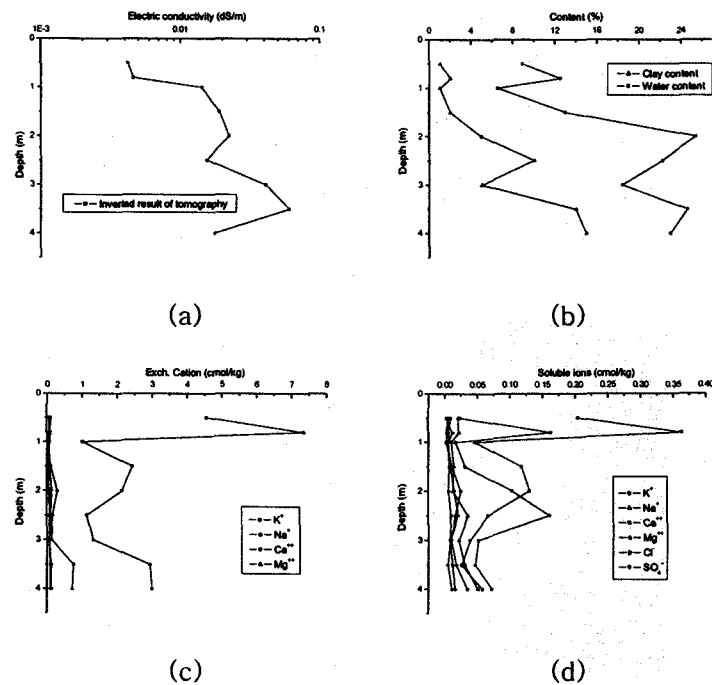


Fig6. Comparison results of electric conductivity by tomography and contents by soil analysis at each depth points in WR borehole (inverted resistivity by tomography(a), water and clay contents(b), Exch. Cation contents(c), and soluble ions contents(d)).

4. 결 론

소규모 시추공에서의 전기비저항 토모그래피를 이용하여 강우시 불포화대의 특성과 심도별 토양특성을 분석하고자 했다. 염수주입 실험에 의해 지표면에서 침투되는 염수의 형태와 범위를 파악할 수 있었으며, 이는 빗물과 지하수면의 연결통로를 간접적으로 제시할 수 있는 불포화대의 특성을 파악하는데 유용할 것으로 판단된다. 또한 토양의 입도 및 수분함량과 이온함량을 분석함으로써 토모그래피를 통해 보다 효율적인 시추공 주변의 토양특성 분석이 가능할 것으로 기대된다

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원(과제번호3-3-1)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Sasaki, Y. (1992) Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation: Geophys. Prosp., 40, 453-463.
- Yi, Myeong-jong, and Kim, Jung-ho, 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.
- 김정호, 이명종, 조성준, 정승환, 송윤호 (1997) 전기비저항 토모그래피의 분해능 향상에 관한 연구: 한국자원연구소, 3-54.
- 송성호, 용환호, 김진호, 송승엽, 정형재 (2002) 전기 빗 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 논 토양분석: 물리탐사, 6, 207-214.
- 조인기, 정승환, 김정호, 송윤호 (1997) 전기비저항 토모그래피에서의 전극배열 비교: 한국자원공학회, 34, 18-26.