

2극법 전기비저항 탐사에 의한 지하수탐사

조동행¹⁾ · 지상근¹⁾

A Pole-pole Electrical Survey for Groundwater

Dong-heng Cho and Sang-keun Jee

요 약 : 화강암이 분포하는 경기도 여주군 대신면 상구리 양지말 지역에서, 측선길이 400 m에 걸친 2극법 전기비저항 탐사를 실시하여 약 100 m 심도까지의 지질구분 즉 신선한 암석, 연약지반, 대수층 등을 탐지할 수 있었다. 이어서 실시한 슬럼버저 수직탐사도 이를 뒷받침하는 결과를 보여주었다. 또한 물리탐사 종료 직후 실시한 시추에 의하여 암반 대수층의 존재를 60 m 심도에서 확인하였다. 이 심도는 전기비저항 구조단면도에 나타난 것과 대체로 일치한다. 시추로서 추가 확인된 100 m 심도의 작은 대수층은 상기한 비저항 단면도에는 보이지 않는다. 간단한 수치모델링을 실시하여 다른 전극배열법으로는 상기한 제 2의 대수층을 확인할 수 있는가를 검토하였으나 웨너, 슬럼버저, 쌍극자, 단극-쌍극자 어떤 방법으로도 이 대수층을 탐지할 수 없다는 것을 알았다.

Abstract : The present study may be summarized as follows. By means of a pole-pole electrical survey, major geological features, i.e, fresh rocks, fractured & weak & saturated rocks, fresh water bearing aquifer, were successfully delineated in the surveyed area of a granite region in Korea. The subsequent Schlumberger sounding and drilling confirmed the existence of the aquifer at 60 m depth as expected. But one more minor aquifer which does not show up in the resistivity depth section was met at 100 m depth. A simple forward modelling leads the authors to believe that any other electrode configuration, e.g., Wenner, Schlumberger, dipole-dipole, pole-dipole, would not detect the deeper aquifer. Under these circumstances, further studies remain to be done in connection with the spatial resolution in the vertical direction.

Keywords : 2극법 전기비저항 탐사, 슬럼버저 수직탐사, 지하수, 수직방향 분해능

서 론

전기비저항 탐사법을 이용한 지하수탐사는 연구 역사와 활동이 오래되고 지금도 이 탐사법이 지하수탐사를 위한 주요 수단이 됨에는 변함이 없다. 잘 알려진 바와 같이, 당초에는 웨너, 슬럼버저 전극배열에 의한 수평탐사로 개략적인 탐사를 하고, 이어서 유망지역에 대한 정밀탐사를 수직탐사로 시행하는 것이 상례였으나, 근년에는 다른 전극배열도 사용되고 있다. 특히 국내에서는 쌍극자 전극배열이 선호되고 있는 실정이다. 이 배열은 위에 언급한 수평탐사와 수직탐사를 겸하는 것이고, 분해능이 특히 뛰어나다(김정호, 이명중, 정승환, 1999). 그러나 쌍극자 배열은 측정치의 S/N 비가 다른 배열에 비하여 낮고, 이는 지반의 전도성이 클수록 심하다(김정호, 이명중, 정승환, 1999). 필자도 쓰레기 매립지 조사를 수행하면서, 음의 겉보기 비저항이 자주 측정되는 사실을 목격, 이를 경험한 바가 있다.

본 논문의 탐사지역이 위치한 경기도 여주군 대신면 상구리

양지말의 탐사 현장은 지형, 인근의 인가 등 여러 가지 여건상, 탐사측선을 최대 400 m 이상 연장하기가 힘든 곳이다. 어떤 탐사심도를 확보하기 위하여 2극법 배열이(pole-pole array) 다른 전극배열에 비하여 짧은 전극전개거리로서도 좋다는 보고를(鳥 裕雅 외, 1995) 참고하여, 이번의 지하수탐사에서는 2극법을 시험적으로 적용하여 보기로 하였다. 물론 2극법이 분해능이 낮은 것은 사실이지만, 이상대 탐지능력은 최소한 다른 전극배열에 비해서 비슷하며, 이것이 사실이라면 전극 4개를 움직여야 하는 쌍극자 배열 대신, 전극 2개만을 움직이는 2극법이 개사의 한 방법으로 사용할 수 있지 않을까 생각하게 된 것이 또한 본 지하수탐사에서 2극법을 채택하게 된 연유이다. 2극법은 물리검층에서 노말검층이라는 이름으로 일찍부터, 널리, 전기비저항 물리검층의 표준으로 사용되고 있으며, 고고학적 탐사에도 “the array of choice”라 할 정도로 인기가 높다고 보고되어 있다(Milsom, 1996). 필자는 2극법을 국내 쓰레기 매립지 조사에 적용하여 탐사결과에 만족하고 있다(조동행, 박대원, 이창열, 1999; 조동행, 정하익, 강상윤, 2000).

*2000년 6월 8일 접수

1) 인하대학교 지구환경공학부(School of Earth and Environmental Engineering, Inha University)

탐사지역 · 축선설정 · 탐사장비

본 현장탐사 연구지역은 경기도 여주군 대신면 상구리 양지말이며 인근 골프장의 생활용수로서 지하수개발이 시급한 곳이다. 이곳과 인근 지역은 광주산맥의 지맥인 우둔산이 남북방향으로 둘러 쌓여 있고, 남한강으로 유입되는 신내천과 기타 군소 하계가 분포한다. 산 능선의 방향은 이 지역에 분포하는 편마암류의 편리의 주향과 일치하거나, 화강암류의 절리, 각종 맥암류의 관입방향과 일치하는 경우가 대부분이다. 탐사지역의 암종은 대부분 주라기의 흑운모 화강암류이다.

탐사대상인 대수층은 화강암체의 연약지반내에 부존할 것으로 예상하고, 희망하는 최대 탐사심도는 약 100m로 하였다. 이에 따라 2극법 탐사의 전극간격 단위, 즉 최소 전극간격을 20m로 하고, 최대 전극간격은 200m($n=10$ 에 해당)로 결정하였다.

탐사지역과 탐사축선의 자세한 것은 본 연구를 지원한 (주)이천상공의 요청에 의하여 공개할 수 없음을 유감으로 생각한다. 탐사장비와 역산 소프트웨어는 ABEM 사의 SAS 300 C Terrameter와 RES2DINV ver. 3.4 이다.

탐사 결과 및 해석

앞 절에서 언급한 바와 같은 총 길이 400m 축선에 대하여 2극법 전기비저항 탐사를 실시한 결과를 도시하면 Fig. 1과 같다. 맨 윗쪽의 것은 실측한 겉보기 비저항 가단면도, 맨 밑의 것은 실측자료를 역산(inversion) 하여 얻은 비저항 단면도, 중간의 것은 비저항 단면에 해당하는 이론적 겉보기 비저항 가단면도이다. 실측한 겉보기 비저항 단면도와 이론적 겉보기 비저항 단면도가 자세한 부분에까지 거의 일치하는 것으로 보아, 역산에서 얻은 비저항 단면도는 그 신뢰도가 크다고 하겠다.

Fig. 1을 보면, 축선을 따라 대부분 심도 160m 정도까지 $900 \Omega \cdot m$ 정도의 낮은 비저항 값이 배경이 되고, 국소적으로 2개의 고비저항대와 2개의 저비저항대가 발견된다. 고비저항대는 모두, 심도 50m 정도까지 연장되며, 수평방향으로는 10m~120m 구간과 250m~350m 구간에 한정된다. 비저항 값은 $2000\sim4500 \Omega \cdot m$ 로서 치밀하고, 균열이 비교적 적은 신선한 암석(여기서는 화강암)임을 보여 준다.

저비저항대는 수평거리 210m~330m 수평구간과 심도 10m~90m 구간에 걸쳐 분포하는 것이 두드러지게 눈에 띈다. 비저항은 $150\sim600 \Omega \cdot m$ 에 걸치나 내부로 들어 갈수록 비저항이 낮아져, 청색으로 표시된 중심부분은 평균 $200 \Omega \cdot m$ 이하의 비저항값을 갖는다. 주요 중심부 왼쪽에 조금 떨어져서 폭 5m 정도의 좁은 $200 \Omega \cdot m$ 비저항대가 수직으로 분포하고 10m쯤 더 왼쪽으로 가면 $2000 \Omega \cdot m$ 정도의 국소적인 고비저항대와 수직으로 접하고 있다. 이 밖에 수평거리 350m~390m 구간과 심도 10m~30m 구간에 비저항 $600 \Omega \cdot m$ 되는 저비

저항대가 나타나며 이는 비스듬히 왼쪽으로 좁은 통로를 통하여 먼저 저비저항대와 연결된다. 이 두 개의 저비저항대는 비스듬히 45° 정도로 $2000 \Omega \cdot m$ 의 고비저항대와 접하고 있다.

앞 절에서 언급한 바와 같이 화강암 지반내 균열의 방향이 대체로 남북방향이고 탐사축선을 이와 거의 직각으로 설정한 사실과 비저항 단면도를 볼 때, 탐사구역의 지반은 $2000 \Omega \cdot m$ 이상의 고비저항대를 제외하면, $900 \Omega \cdot m$ 이하의 낮은 비저항의 균열이 많이 분포하는 지반으로 해석할 수 있다. 특히 고비저항대 사이에 협재되어 있는 주 저비저항대는 중심부의 비저항이 평균 $200 \Omega \cdot m$ 이하이고 그 규모가 상당한 것으로 보아 주목할만한 암반 대수층으로 판단된다.

이상의 주 저비저항대의 존재와 충후를 다시 한번 확인키 위하여 수평거리 250m 지점에 중심을 둔 수직탐사를 추가로 실시하였다. 이 지점은 물론 저비저항대 중심의 직상부에 해당한다. Fig. 2에 2극법에서 얻은 주 저비저항대와 비교하기 위하여, 수직탐사에 의한 전기비저항 주상도를 가운데 도시하였다. 이 주상도에 해당하는 수직탐사 이론곡선과 실측곡선은 Fig. 3에 도시하였다. 여기서 역산 결과를 보면, 지표에서 심도 4.5m 구간까지는 비저항 $98\sim134 \Omega \cdot m$ 의 표토층이며 최상부의 두께 1.7m인 표토층은 지반이 기후관계로 냉각되어 비저항이 급격히 증가된 것을 알 수 있다. 탐사를 추운 2000년 1월 7일~8일 양일간에 걸쳐 실시한 것을 상기하면 당연한 일이다. 두께 4.5m의 흙 지층 하부는 17.6m 심도까지 두께 13.1m, 비저항 약 $3500 \Omega \cdot m$ 의 고비저항인 비교적 신선한 화강암반이 존재한다. 이어서 하부로 32.6m 심도까지 두께 15m, 비저항 약 $1200 \Omega \cdot m$ 의 연약지반이 분포하고, 바로 하부는 비저항 $174 \Omega \cdot m$ 의 대수층으로 사료되는 저비저항대가 심도 32.6m~50.9m 구간에 나타나고 그 두께는 18.3m에 달한다. 대수층 하부는 두께 35.2m 되는 연약지반(상부의 연약지반보다는 양호함) 보인다. 그 하부는 신선한 암반으로 생각되는 고비저항대이다. 이상의 결과가 2극법에 의한 비저항 단면도와 세밀하게 일치하지는 않으나, 비저항에 의한 지층 구분과 대수층의 두께 등에선 대략 부합된다. 그러나 수직탐사에 의한 대수층은 전체가 10m 정도 상향으로 변위하여 있다.

이상의 탐사 결과를 토대로 대수층의 직상부라 생각되는 수평거리 250m 지점에서 시추를 실시하였다. 시추는 이수(泥水)의 주입이 없이 압축공기에 의한 회전타격식에 의하였기 때문에 출수와 출수 심도를 비교적 용이하게 현장에서 바로 확인할 수 있었다. 기대한 대로 대수층이 확인되었으며(154톤/일 양수), 출수지점은 대략 심도 60m 지점과 심도 100m 지점이었다. 주요한 출수는 60m 지점으로, 이는 예상한 저비저항대와 대체로 부합하나 100m 지점의 출수는 다소 의외였다. 이 심도에서의 대수층의 존재는 2극법 비저항 단면도에도 수직탐사 주상도에도 나타나지 않았기 때문이다.

혹시 수직탐사 자료에서 이상의 제 2 대수층에 대한 정보를 얻을 수 없을까 고심한 끝에 Fig 3의 자료를 “smoothing”하는

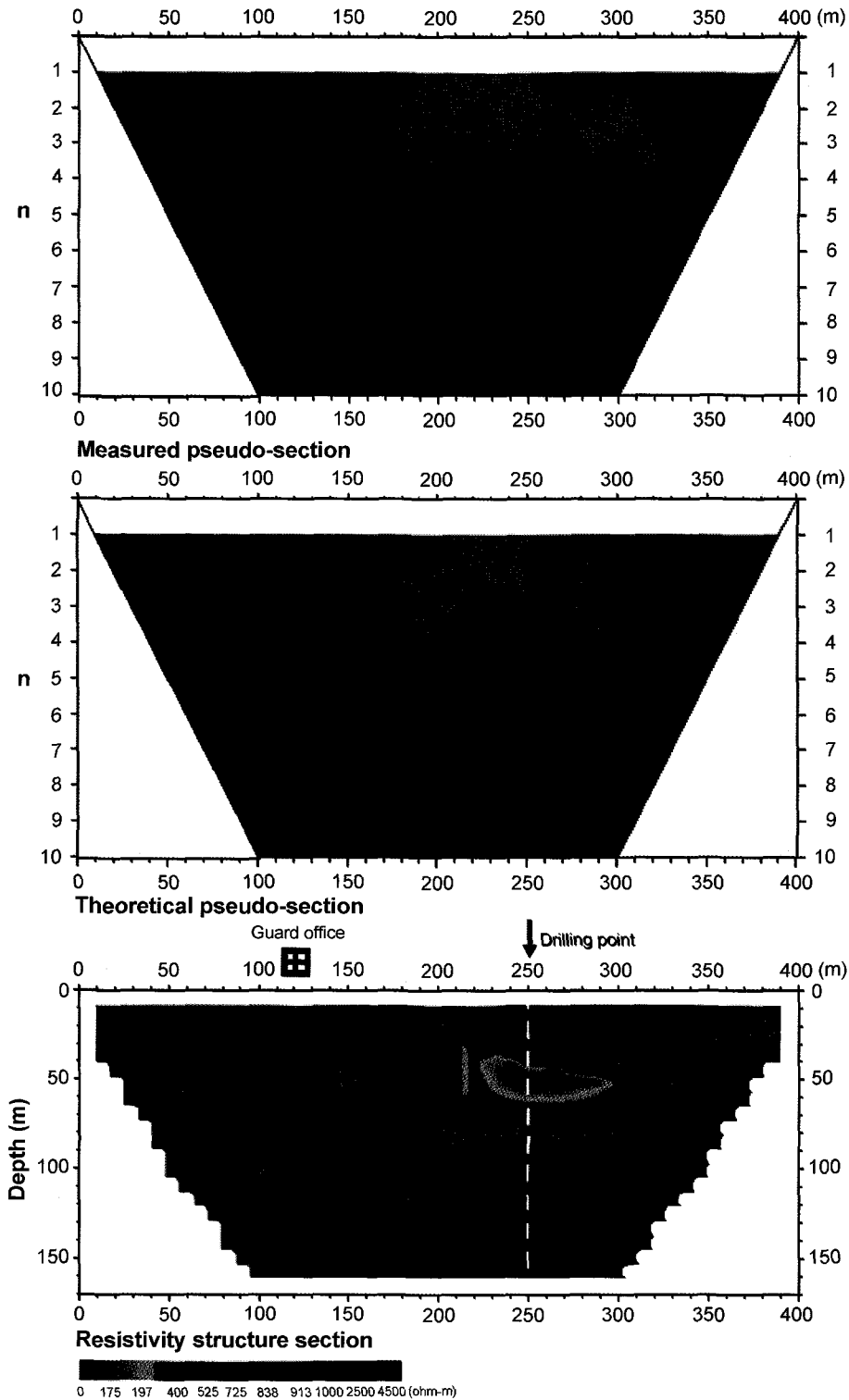


Fig. 1. Pole-pole resistivity pseudo-sections and the resistivity structure section.

기법으로, 전위전극간격(MN/2) 40 m~180 m되는 구간의 돌출 적이고 국소적이라고 생각되는 점들을 솟아내고, 대수 축척으로 대략 비슷한 간격이 되도록 추정점을 남긴 후, 다시 역산을 하여 보았다. 우연히 이렇게 되었는데는 모르나, 하여간 심도

93.0 m~102.1 m 구간에서 두께 약 9 m, 비저항 $188 \Omega \cdot m$ 되는 저비저항대를 찾아내었다. 또 그 위치도 시추시 출수한 100 m 심도와 잘 부합하였다. 이 경우의 비저항 주상도는 Fig. 2의 우측 끝에 나타내었다. 상부 연약지반의 두께, 비저항(497

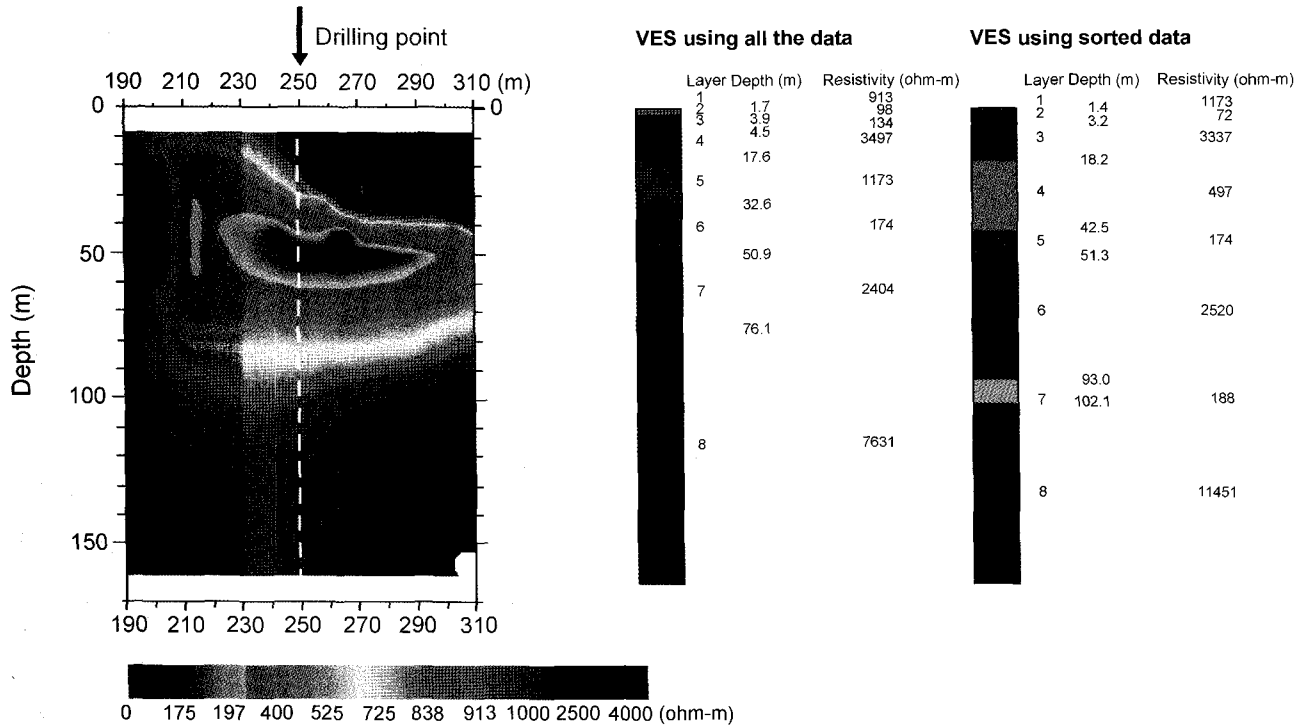


Fig. 2. Comparison of the resistivity structure section with Schlumberger sounding.

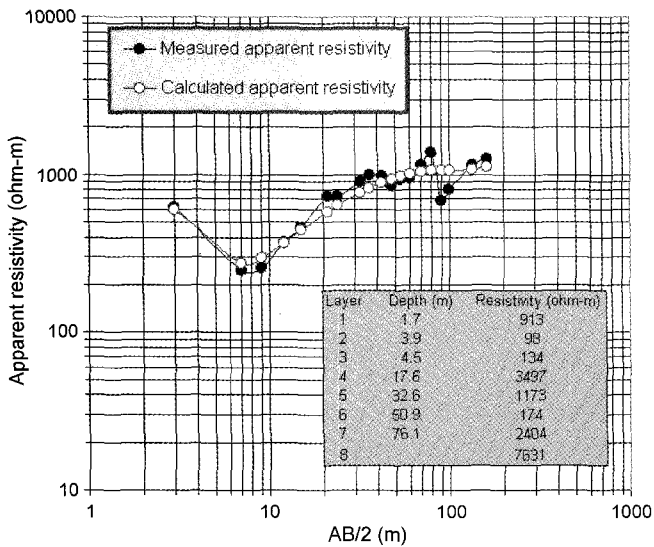


Fig. 3. Schlumberger sounding curve and its interpretation using all the field data.

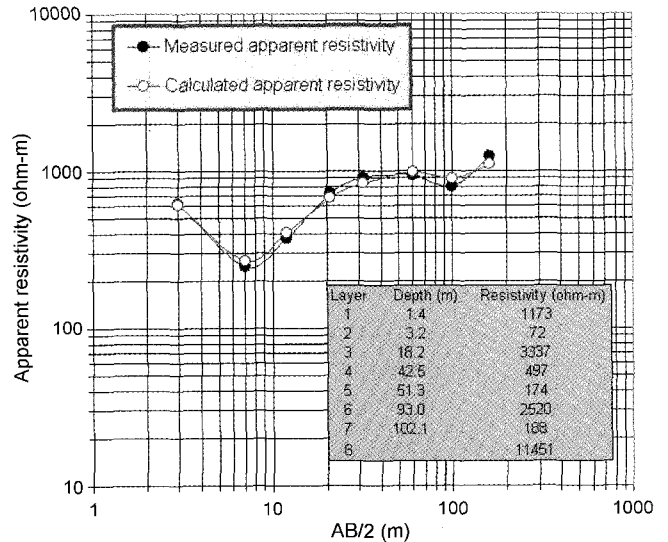


Fig. 4. Schlumberger sounding curve and its interpretation using the sorted data.

$\Omega \cdot m$) 등은 오히려 2극법 단면과 더 잘 부합하나 주 대수층의 두께는 오히려 절반 이하로 축소되었다.

이번의 경우와 같이, 수직방향으로 서로 떨어져 있는 저비저항 이상대가 각기 다른 전극배열에 따라 어떻게 비저항 단면 도상에 나타나는 가를 보기 위하여 본 지하수 탐사 결과를 간략히 한 모델을 설정한 후 forward 모델링을 하여 보았다. 저비저항대는 그 두께가 각각 20 m, 10 m, 이상대의 수평방향 길이는 모두 80 m, 비저항은 상부는 174 $\Omega \cdot m$, 하부는 188

$\Omega \cdot m$ 이고 주변 매질은 2500 $\Omega \cdot m$ 의 비저항을 갖는 모델이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, 아주 불량한 웨너 배열을 제외하고라도, 슬럼버저, 쌍극자, 단극-쌍극자, 2극법 비저항 단면도가 모두, 두 개의 서로 다른 이상체를 구별해 내지 못하고 두 이상대의 중간에서 윗쪽으로 치우친 곳에 중심을 둔 하나의 이상대로서 대수층이 나타난다. 어느 것이 우월하다고 말하기 곤란할 정도로 대동소이하다. 이 한번의 계산으로 일반적인 결론을 내릴 수는 없으나, 현 단계로 두가지 점은 말할 수 있

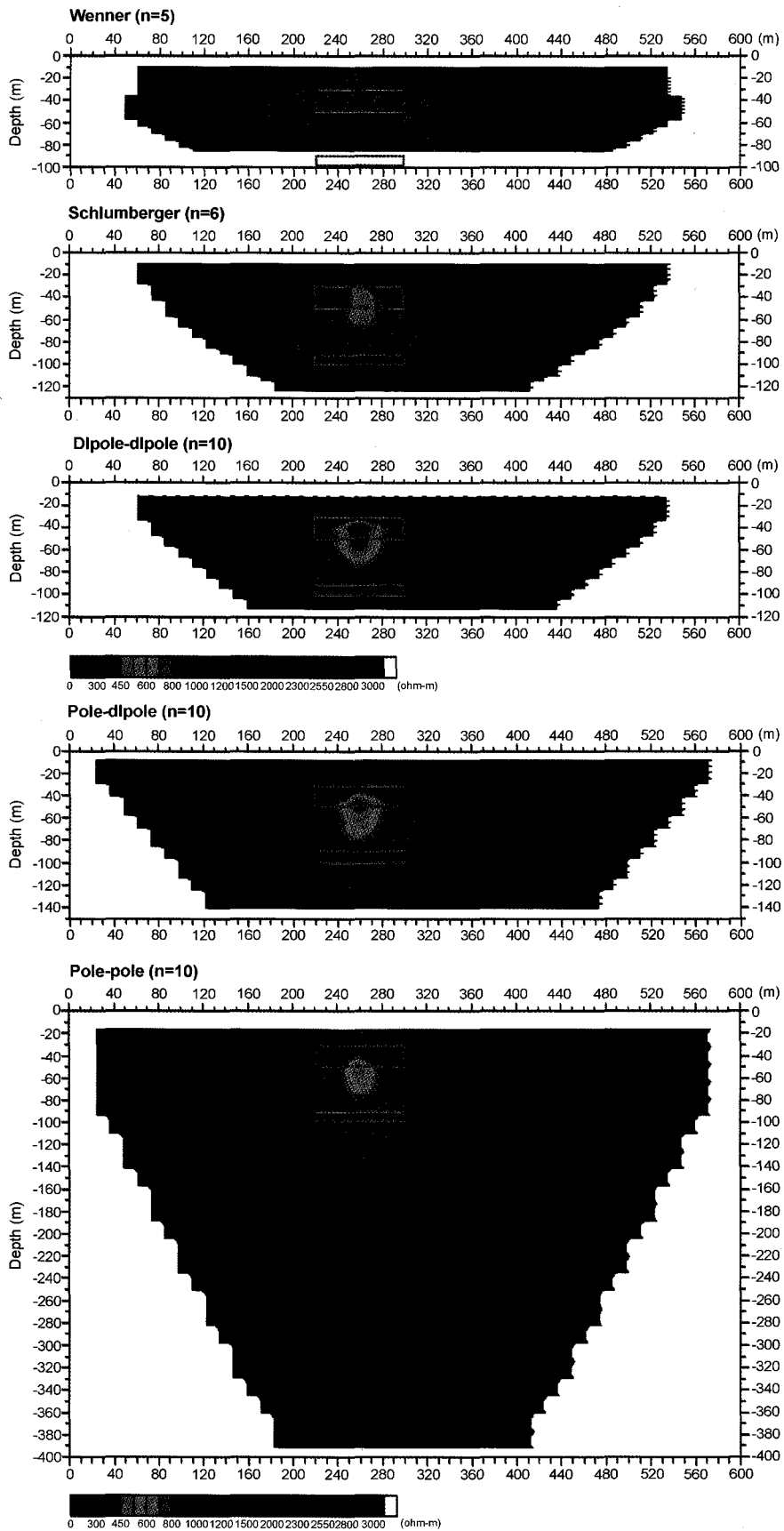


Fig. 5. Theoretical resistivity depth sections associated with two low resistivity targets which are vertically separated each other (Wenner Schlumberger, dipole-dipole, pole-dipole, pole-pole).

을 것이다. 첫째, 본 연구에 들어난 두 개의 저비저항 이상대는 전기비저항 탐사로서는 구별하기 힘든 경우이다. 둘째, 전기비저항 탐사에서 수직방향 분해능은 수평방향 분해능에 비하여 이를 좌우하는 요소가 많은 것 같다. 이 점에 대해서 별도의 연구가 필요할 것이다.

결 론

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

지질학적으로 화강암이 분포하는 본 지역에서 축선길이 400 m인 축선을 따라 2극법 전기비저항 탐사를 수행하여 대략 심도 100 m까지의 전기비저항 구조와 이에 의한 암반구분, 대수층 탐지를 성공적으로 달성하였다. 2극법의 분해능, 특히 수평방향 분해능이 여타의 전극배열보다 낮기 때문에, 비저항 구조의 세밀한 면은 물론 밝힐 수 없었겠지만, 주요한 포인트는 놓치지 않았다고 생각한다. 즉 신선한 암석, 연약지반대, 대수층은 명료하게 구분할 수 있었고, 이 대수층은 시추에 의하여 60 m 심도에서 확인이 되었다. 시추로 확인한 수직방향으로 서로 떨어져 있는 2개의 대수층 중에서 심도 100 m의 것은 2극법으로 탐지할 수 없었다. 슬림버저 수직탐사 자료를 자의로 "smoothing" 하여 하부의 제 2 대수층이 나타나도록 하였으나 그 정당성과 신뢰성은 자신할 수 없다. 즉 이러한 경우, 슬림버저 수직탐사로서 제 2 대수층을 정말로 탐지한 것인지, 나아가서 이러한 능력이 슬림버저 수직탐사법에 일반적으로 갖추어져 있는 것인지 자신할 수 없다는 의미이다. 다음 forward 모델링에 의하여, 여타의 전극배열로서는 상기한 두 개의 대수층을 구분하여 탐지할 수 있는지를 알고자 시도하였으나, 웨너, 슬림버저, 쌍극자, 단극-쌍극자 법 중 어느 방법으로도 탐사가

불가능 함을 확인하였다. 수직방향 분해능은 수평방향 분해능에 비하여 이를 좌우하는 요소가 많은 것 같으며 이에 대해서는 앞으로 별도의 연구가 요망된다.

감사의 말

본 탐사자료 공개에 동의한 (주)이천상공의 박종덕 사장에게 이 자리를 빌어 감사한다. 또한 자료정리와 유익한 토론에 참여해준 인하대학교 지구환경공학부 대학원의 이창열, 강상윤, 정진경 제군, 시설안전관리공단의 직원으로 본 대학원에 재학 중인 오영철 군에게도 고맙게 생각한다.

참고문헌

- 김정호, 이명중, 정승환, 1999, 2차원 전기비저항 탐사를 위한 전극배열법의 비교, 한국자원공학회 제 73 회 학술발표회 논문집, 134-138.
- 소철섭, 나기창, 박맹언, 1989, 이포도폭 지질보고서, 한국동력자원연구소.
- 조동행, 박대원, 이창열, 1999, 쓰레기 매립지반의 공기주입에 따른 전기비저항의 시간적 변화, 1999년도 한국자원공학회·한국자원환경지질학회·한국지구물리탐사학회 춘계 공동 학술발표회 논문집, 94-95.
- 조동행, 정하익, 강상윤, 2000, 2극법 전기비저항 탐사에 의한 침출수 누출조사, 2000년도 한국자원공학회·한국자원환경지질학회·한국지구물리탐사학회 춘계 공동 학술발표회 논문집, 192-193.
- 鳥 裕雅 외, 1995, 比抵抗映像法, 古今書院, 55-56.
- Milsom, John, 1996, Field Geophysics, 2nd edition John Wiley & Sons, 71-87.