

포천지역 지하수기초조사 산학연 공동탐사 사례연구(III): 전기탐사기술

유영준¹⁾, 김종남¹⁾, 유인걸¹⁾

¹⁾대한광업진흥공사 국내탐사팀, yjyou@kores.or.kr

Industry-University-Research Collaborative Geoscientific Study in Pocheon Area for Groundwater Survey, Part III : Resistivity Technology

Youngjune You¹⁾, Jong Nam Kim¹⁾, In Kol Yoo¹⁾

¹⁾Domestic Mineral Exploration Team, Korea Resources Corporation

요약 : 지하수 조사를 목적으로 시공된 시추공인근 지역에서 지표 비저항탐사, 비저항토 모그래피 탐사를 실시하였다. 이들의 탐사결과로부터 기존 분석 자료인 기반암심도, 암반 대수층, 파쇄대 등에 대하여 비교하였다. 지표 탐사로부터 층적 대수층 경계 해석을 위한 현장자료 취득에서 전극배열, 전극간격에 따른 지하구조 해석방법을 제시하였고 한계점을 검토하였다. 그리고 비저항 토모그래피 탐사결과로부터 두 시추공사이의 암반 대수층의 지하수 유동 통로와 관련된 지하구조 해석을 시도하였다. 그 결과 상기 탐사방법들이 기반암 심도, 층적대수층의 경계 및 암반대수층의 지하수 유동통로 등의 해석에 유용함을 제시하였다.

주요어 : 지하수조사, 전기비저항탐사, 대수층

Abstract : The groundwater survey was carried out by electrical resistivity and resistivity tomography using several kinds of electrode array to delineate the depth of the saturated zone and basement complex, the aquifer system of fractured rock, and the 2-D resistivity structure was obtained by inversion technique. And the hole-to-surface and crosshole tomography were applied for two boreholes and the inverted resistivity tomogram are obtained. The comparison of those data with core logging data was performed and those results were relatively well correlated. And it was possible to find out the configuration of basement and the fracture zone and the aquifer system from the 2-D resistivity structure and resistivity tomogram.

Keywords : groundwater survey, electrical resistivity, aquifer

1. 서론

지하수조사를 위한 물리탐사는 지하수 부존가능성이 높은 지질구조를 탐사하는 것이 주된 목적이다. 즉 대수층의 심도와 두께, 단층의 위치, 주향, 기반암까지의 심도, 암반내 균열 등이다. 전기탐사중 전기비저항탐사는 지하수조사에 가장 널리 이용되는 탐사법으로 지하의 대수층의 판정과 기반암의 깊이, 지층경계, 단층이나 파쇄대 등을 비저항의 변화로부터 지하수 부존 가능한 지하구조를 해석한다.

일반적으로 지질과 비저항치와의 관계는 같은 종류의 암석 또는 지층에 따라 비저항치가 다르다. 비저항치는 암석의 종류, 균열의 빈도나 충전물, 공극율, 포화도, 풍화나 변질에 따른 점토 함유량 등에 의해 변화한다. 그러나 함수비가 100%에 근접할 때 함수비에 따른 비저항의 변화는 작기 때문에 포화된 지하수의 경계를 정확하게 추측하는 것은 매우 어렵다. 대수층은 비저항치가 100~1,000 ohm-m 범위를 보이며 1,000 ohm-m 이상의 높은 비저항치를 보이는 암석은 불투수층에 속한 화성암 또는 변성암이거나, 투수층에 속한 암석에서는 건조상태일 것이다.

조사 대상지역은 포천시 창수면 오가리지역으로 지하수조사를 목적으로 시공된 공경 ϕ 200mm의 착정공 PCE002(P)과 ϕ 76mm의 조사공 PCE002(O), 이들 시추공 사이의 상부 지표이다. 본 탐사에서는 PCE002(P)를 BH-1(지표측점 38m), PCE002(O)를 BH-2(지표측점 54m)호공으로 명명하여 설명하였다.

본 조사지역에 대한 총적 대수층의 두께, 암반층내에 지하수의 분포 및 유동경로와 관련된 수리지질구조, 즉 절리나 파쇄대 등의 특성 등을 파악하기 위하여 지표 및 시추공에서 여러 가지 배열법의 물리탐사를 실시하였다. 본 논문에서는 지표 및 시추공에서 전기비저항탐사를 적용하였고(Table 1), 탐사결과로부터 불포화대, 총적대수층, 암반층에 대한 지하구조를 해석하고 지하구조 해석의 한계와 문제점 등을 검토하였다.

탐사측선의 배열은 지표에서 측정거리 38m에 위치한 시추공 BH-1호공, 측정거리 54m에 위치한 BH-2호공을 기준으로 하여 양단으로 연장하였고 이들 시추공 사이, 지표의 측정점을 이용하여 토모그래피 탐사법으로 자료를 취득하였다. 탐사장비는 8채널 전기비저항탐사기(SuperSting R8/IP, by Advanced Geosciences Inc.)를 이용하였다.

Table 1. Descriptions of survey methods and data acquisition

Methods	Array	Data acquisition
Surface	Dipole-dipole Schlumberger	L=600m(a=30m, 21 elec.), L=250m(a=5m, 10m, 51 elec.) L=100m(a=2m, 4m, 51 elec.)
Borehole (Tomography)	Pole-dipole	Electrode spacing : 2m(BH-1 : 30~88m, BH-2 : 30~68m) Electrode array : Crosshole, Hole to Surface, In-line

2. 지표 전기비저항 탐사

지표에 설치된 측선길이/전극수는 100m/51전극, 600m/21전극에 대하여 쌍극자 배열법으로, 250m/51전극에 대하여 쌍극자 배열법과 슬럼버져 배열법으로 측정을 실시하였다(Fig. 1, Table 1). 측선길이 100m의 경우에는 전극간격 a=2m, 4m, 전극 전개수 n=12, 측선길이 250m의 경우에는 전극간격 a=5m, 10m(슬럼버져 배열법은 전극간격 5m만 측정), 전극 전개수 n=12까지 탐사자료를 취득하였다.

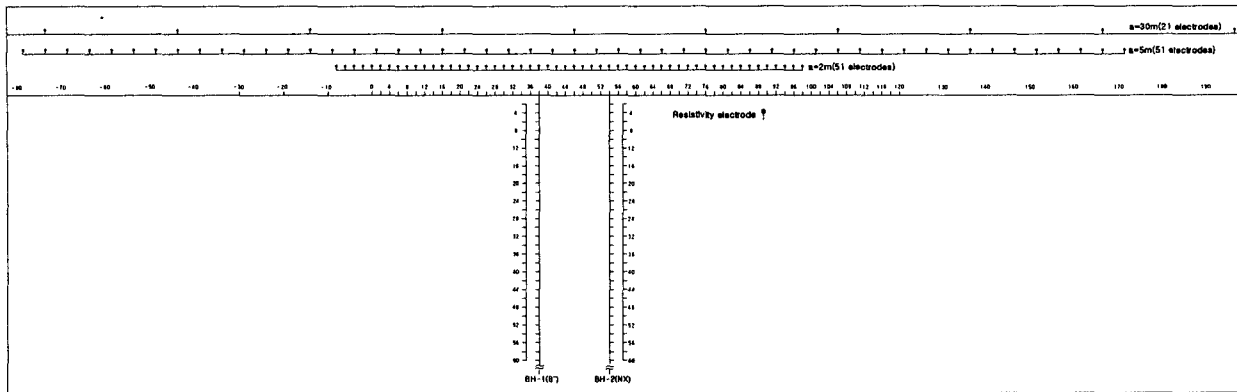


Fig. 1. Field survey layout for surface resistivity and tomography survey

2.1 전극간격 a=2m, 4m

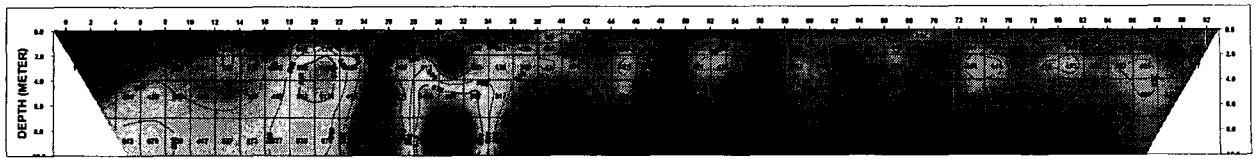
측선길이 100m에서 51개의 전극을 접지시키고 전극간격을 2m(1배), 4m(2배)로 하여 자료를 취득하고 이에 대한 탐사결과는 Fig. 2a,b에 나타내었다.

전극간격 a=2m에 대한 비저항분포는 측정점 18~22m, 28~34m 사이의 고비저항대를 제외하고는 전반적으로 500 ohm-m 이하의 저비저항대가 주로 분포한다. 여기서 저비저항대 분포 구간중 청색계통으로 채색된 200~300 ohm-m 이하의 저비저항대는 심도 4~5m 하부에 분포하며 이는 총적대수층으로 해석된다. 지표에서 심도 4~5m까지 분포하는 녹색계통의 비저항치 300~500 ohm-m 범위의 구간은 지표부근에 지하수를 포함하지 않은 불포화 토양층으로 해석된다. 측정점 18~22m의 심도 2m 하부, 28~34m의 심도 4m 하부에 비저항치 500~2,000 ohm-m의 고비저항대가 분포하며 전극간격 a=4m인 경우 28~34m 사이에 고비저항대 분포는 사라진다. 측정점 28~34m의 위치는 농로가 통과하는데 이에 의해 천부에 고비저항 분포를 나타내는 것으로 해석된다. 측정점 18~22m 사이의 고비저항대는 a=4m에서 심도 20m까지 700 ohm-m 내외로 주변의 200~300 ohm-m의 비저항치 대비 약 2배 이상 증가하며 이는 총적층내에 지하수 함양 가능성이 낮음을 시사한다.

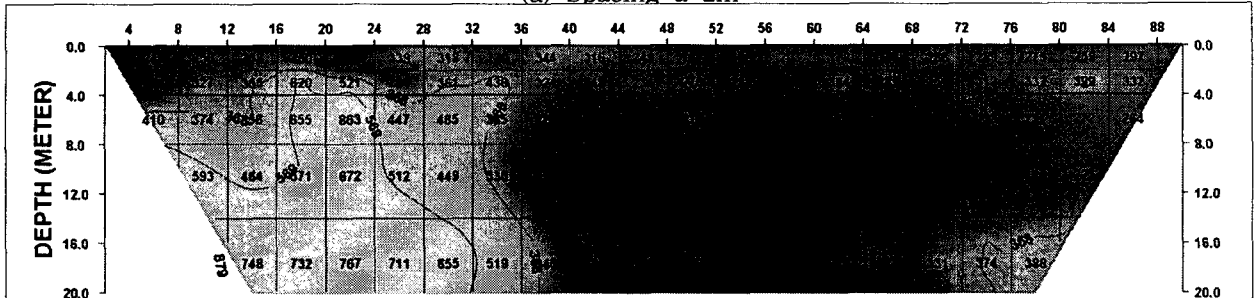
한편 전극간격 a=4m에 대한 비저항분포도에서 측정점 36m를 기준으로 좌측으로 비교적 높은 비저항대를 보여주고 우측으로 저비저항대를 보여주고 있는 가운데 특히 측정점 40~72m 사이의 심도 약 4~5m 하부에 비저항치 200~300 ohm-m 이하의 낮은 비저항대가 넓게 분포하고 있으며 전극간격 a=2m에서의 결과 해석과 마찬가지로 총적대수층으로 판단된다. 기반암반층에 대한 정보는 시추결과 25m 하부이다. 전극간격 2m, 4m인 경우 가탐심도가 각각 10m, 20m 내외이므로 기반암층까지의 해석은 곤란하다. 탐사결과를 보면 국부적으로 비저항치 500~2,000 ohm-m 정도의 고비저항대가 분포하나 이는 전술한 바와 같이 기반암에 대한 정보로 해석되지 않는다. 따라서 기반암층에 대한 정보는 다음에 설명한 바와 같이 가탐심도가 25m 이상되는 전극간격 a=5m, 10m의 결과에 의해 해석이 가능할 것이다.

2.2 전극간격 a=5m, 10m

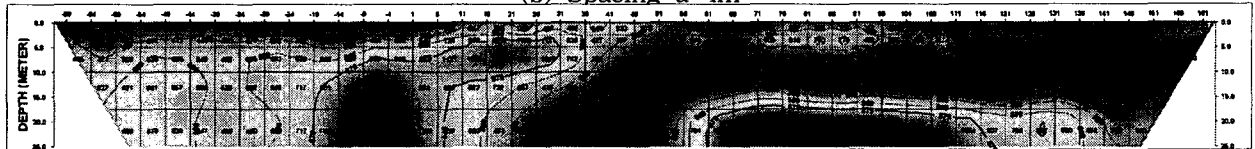
쌍극자배열법과 슬림버저 배열법에 의한 탐사를 실시한 측선길이 250m에 대한 탐사결과는 Fig. 2c,d,e와 같다. 가탐심도는 쌍극자 배열법의 경우 25m와 50m, 슬림버저 배열법의 경우 40m까지로 예상하여 역산을 수행하였다.



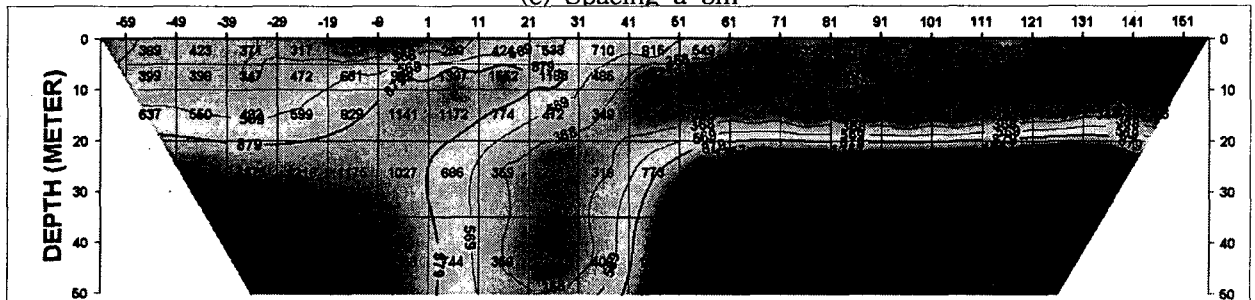
(a) Spacing $a=2m$



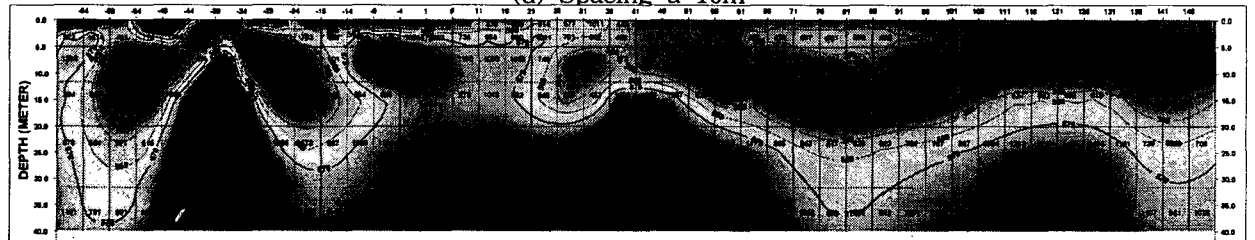
(b) Spacing $a=4m$



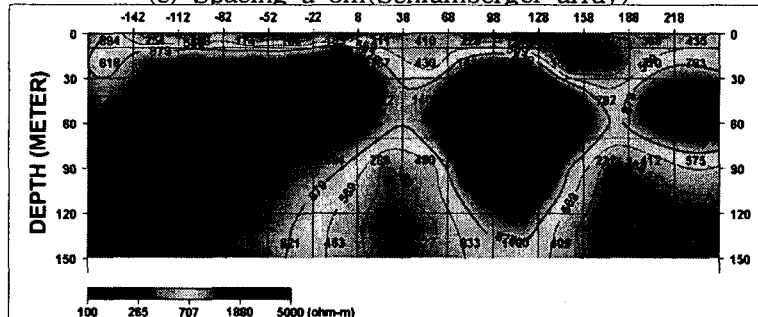
(c) Spacing $a=5m$



(d) Spacing $a=10m$



(e) Spacing $a=5m$ (Schlumberger array)



(f) Spacing $a=30m$

Fig. 2. Results of electrical resistivity survey

쌍극자 배열법에서 전극간격 $a=5m$ 에 대한 비저항분포도에서 측점 31~54m 하부에 심

도 50m 이상까지 비저항치 300 ohm-m 이하의 저비저항대를 보여주고 있으며 이는 암반대수층 부존가능성을 보여주고 있다. 한편 $a=5m$ 인 경우 측정 56~150m에서 심도 약 20m하부에 비저항치 500~1,000 ohm-m 이상의 매우 높은 비저항대가 분포하고 있다. 시추공 BH-1이 위치하고 있는 측정 38의 좌측으로는 측정 16~-19m에서도 높은 비저항치를 보이는 것이 특징적이다. 이와 같은 고비저항대 상부의 저비저항대는 충전대수층으로 판단된다. 그러나 충전층내의 지표 토양층의 불포화대 경계구분은 $a=2,4m$ 의 해석 결과 보다 뚜렷하지 못하다. 이는 불포화층의 심도가 약 4~5m 정도이므로 전극간격이 5m일 때 수직적인 분해능이 저하되기 때문으로 생각된다.

전극간격 $a=10m$ 에 대한 비저항분포도에서는 측정 11~41m에서 저비저항대를 보여주고 있는 가운데 좌측과 우측의 하부에 고비저항대가 분포하고 있다. 특히 우측의 고비저항대는 매우 높은 비저항치로 심도 20m부근에서 충전층과 기반암의 경계가 뚜렷하게 나타나며 전반적으로 상당히 신선한 화강암 암반으로 해석된다.

슬림버저 배열법에 의한 전극간격 $a=5m$ 에 대한 비저항분포도를 보면 쌍극자배열법에 의한 비저항분포도와 상당히 다른 양상을 보여주고 있다. 이는 슬림버저 배열이 수평 층서구조에 대한 수직분해능이 높은 반면 쌍극자배열은 수직분해능이 낮고 수평적 전기비저항 변화에 민감하기 때문인 것으로 보인다. 전반적인 비저항분포도는 측정 26m의 우측으로 심도 20m내외에 충전층과 기반암층의 경계가 존재할 것으로 보이며 측정 26m의 좌측으로는 비저항분포도상에서 충전층과 기반암층의 경계가 일정한 심도에 나타나지 않고 상당히 복잡한 양상으로 나타나 있다. 이는 측정 31~1m에 있는 제방 길과 측정 -36m의 지표면에 존재하는 매우 낮은 비저항대의 영향으로 다소 왜곡되어 나타났기 때문인 것으로 생각된다.

2.3 전극간격 $a=30m$

Fig. 2f에 도시한 바와 같이 지표로부터 심도 20~30m 범위의 천부 비저항 분포에 대한 상세한 해석은 전술한 전극간격 $a=2,4,5,10m$ 의 결과와 비교할 때 상당히 떨어짐을 알 수 있다. 그러나 암반층 경계면으로 해석된 심도 25m 하부에서 150m 사이에서 절리나 균열의 발달에 의해 지하수를 함양한 암반 파쇄대 구간과 신선한 암반층의 경계는 용이하게 해석된다. 여기서 심도 60m 하부에 비저항치 200~300 ohm-m 범위의 암반대수층 구간은 측정 6~68m, 158~248m이다. 측정 6~68m의 저비저항대 구간은 전극간격 5m, 10m의 결과에서 보듯이 충전대수층까지 연결된 것으로 해석되므로 암반대수층과 충전대수층의 부존가능성이 높은 것으로 해석된다.

따라서 지표 비저항탐사결과로부터 지표 토양층 불포화대, 충전대수층, 암반대수층, 신선한 암반층 등을 구분하였다. 비저항치 분포는 지표 부근의 불포화층은 300~500 ohm-m, 충전/암반대수층은 200~300 ohm-m 이하, 암반층은 500~2,000 ohm-m 이상으로 해석된다. 암반 대수층과 신선한 암반층과 비저항치 대비 약 1/10 이하의 저비저항 이상대를 보인다. 전극간격, 측선길이당 전극수, 전극배열법에 대한 상호비교 및 탐사 효율성을 고려할 때 지표 토양층 불포화대의 탐사 대상의 심도가 10m 이내인 경우 전극간격 $a=2m$ 가 적합하고, 충전대수층의 심도가 20~25m 정도일 때는 $a=4m, 5m$ 가 효과적이다. 기반암 경계면의 심도가 20m 이상일 때는 $a=5m, 10m$ 인 경우 상세한 해석이 가능하나 $a=30m$ 일 때는 기반암의 경계면 해석은 곤란하며 암반내에 지하수 함양 가능한 암반 파쇄대 해석에는 $a=5m, 10m$ 의 경우 보다는 효과적이었다. 또한 접지전극 수는 측선길이 100m 이상일 때 탐사 효율을 높이기 위해 50개 이상이 적합하다. 그리고 탐사장비의 개선으로 command file에 의한 자동측정이 가능하므로 전극배열을 다양하게

적용하여 여러 종류의 배열을 병행하는 것이 바람직하다.

3. 전기비저항 토모그래피 탐사

본 탐사는 Fig.1에 도시한 지표와 시추공에서 기반암의 절리와 균열 등의 발달상태와 이와 관련하여 두 시추공 사이의 지하수 유동통로가 되는 파쇄대를 파악하고자 한다. 현장 탐사자료는 1개 시추공내에 전극을 배열하여 취득하는 동일 시추공탐사(in-line survey), 두개의 시추공에 각각 송/수신 전극을 배열한 시추공간 탐사(crosshole survey) 및 지표와 시추공에 각각 송/수신전극을 배열한 지표-시추공탐사(surface to hole survey) 등을 실시하였다. 전극배열법은 쌍극자법, 단극-쌍극자법, 수정 단일-쌍극자(modified pole dipole) 배열법 등을 적용하였으며 각각의 송/수신 위치별로 S/N비가 높은 전극배열을 선택하여 적용했다. 또한 송/수신 전극위치를 서로 바꾸어 가면서 자료를 취득하는 reciprocal array를 수행하였다.

지표에서 심도 25m까지 시추공 BH-1은 철제, BH-2는 PVC로 케이싱이 설치되어 있어 시추공을 이용한 현장자료 취득이 불가능하였다. 철제 케이싱에 의한 영향을 배제하기 위해 시추공 BH-1은 심도구간 30~88m, 시추공 BH-2는 심도구간 30~68m에 대하여 전극간격 2m로 측정을 실시하였다. 동일 시추공자료 획득을 위해서 수정 단일-쌍극자배열법을 사용하였으며 전극전개수 $n=2\sim 11$ 로 하고, 나머지 하나의 전류전극(C_2)은 두 시추공사이 지표에 두어 탐사를 실시하였다. 지표에는 측선길이 100m에 전극간격 2m, 51개 전극을 배열하였다. 이때 탐사자료 해석에서 지표-시추공 탐사자료는 두 시추공 사이에 설치된 전극만을 이용한 현장자료를 적용하였다. 그리고 시추공간 탐사 및 지표-시추공탐사는 reciprocal array로 현장자료를 취득하였다. 여기서 측정된 자료는 편집과정을 거쳐 S/N비가 낮거나 음의 겉보기 비저항치에 대한 자료는 제거하고 비저항토모그래피 역산(Tomo DC S/W)을 수행하였다.

탐사자료에 대한 역산결과는 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. 이 비저항 토모그래피단면에서 보면 시추공 BH-1에서 지표~심도 25m구간과 시추공 BH-2에서 지표~심도 20m구간에서 비저항치 300 ohm-m이하의 낮은 비저항치를 보여주고 있는데 이는 시추결과 기반암 심도가 25m이므로 충전층으로 해석된다. 이 충전층에서의 비저항 분포는 지표탐사에서 얻은 결과와 잘 일치하고 있다.

그러나 Fig. 2의 지표 비저항 탐사로부터 얻은 결과보다 본 토모그래피 탐사로부터 얻은 결과가 지표 토양층 불포화대, 충전대수층, 기반암층 경계의 구분이 더 불분명하게 해석된다. 이는 시추공 심도 25m까지 케이싱이 설치되어 있어 심도 0~30m 구간에 전극설치가 불가능하여 탐사자료의 취득이 불가능하기 때문에 현장자료 부족에 따른 지하구조 해상도의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

비저항 토모그램을 보면 심도 25m 하부에 대하여 전반적으로 1,000 ohm-m 이상의 적색계통 고비저항대 분포가 우세하다. 심도 33m, 51m 위치에 비저항치 1,000 ohm-m 이하의 국부적인 저비저항대가 분포하며 암추조사 결과 염기성 암맥의 심도와 일치하는 것으로 보아 암맥에 발달된 균열이나 절리에 의한 암반 파쇄대로 해석되며 암반 대수층과의 관련여부는 불분명하다. 시추공 BH-1의 심도 70~76m와 BH-2의 62~66m 사이에 비저항치 2,000 ohm-m 이하의 저비저항대가 미약하게 연결되고 있다. 이는 BH-2의 심도 70m 위치에서 암추조사 결과 육안관찰에 의한 지하수 유동흔적과 RQD 10%, 투수시험 결과 심도 70.5m의 투수계수 2.78×10^{-6} cm/s 등과 비교할 때 암반 파쇄대와 관련된 암반 대수층으로 해석된다.

따라서 탐사결과로부터 두 시추공사이의 지하수 유동경로가 될 만한 파쇄대는 비저항 토모그래피단면상에서 미약하나마 시추공 BH-1의 심도 70~76m와 시추공 BH-2의 심도 62~66m를 잇는 구간으로 보인다.

4. 탐사결과 및 고찰

지표 전기비저항 탐사에서 쌍극자 배열법으로 전극간격 $a=2.5m$ (51전극)일 때 지표로부터 심도 4m 이내의 불포화대와 충적 대수층의 경계를 상세하게 해석할 수 있다. 그리고 심도 20~25m 이상의 암반경계는 쌍극자와 슬림버저 배열인 경우 전극간격 $a=10m$ 일 때 가능하였다. 지층구성별로 비저항치 분포는 불포화대에서 300~500 ohm-m, 충적 대수층에서 60~300 ohm-m, 암반층에서 500~1,000 ohm-m 이상의 범위를 보인다.

전기비저항 토모그래피 탐사에서는 지표~심도 20m구간에서 상당히 낮은 비저항치를 보여주고 있는데 이는 기반암 심도가 20~25m로 해석된다. 심도 20~25m하부에서는 전반적으로 화강암 분포지역을 반영하는 고비저항치를 보여주고 있는 가운데 소규모로 심도 30~35m, 심도 49~54m 및 심도 70~76m구간에서 저비저항대가 분포하고 있다.

이는 심도 30~35m와 심도 49~54m는 시추공에서 염기성 암맥의 위치와 동일하며, 심도 70~76m구간은 시추결과 확인된 대수층구간(69~72m)과 일치하고 있다. 또한 두 시추공사이의 지하수 유동경로가 될 만한 파쇄대로는 비저항 토모그래피단면상에서 미약하나마 시추공 BH-1의 심도 70~76m와 시추공 BH-2의 심도 64~66m를 연결하는 구간으로 보인다.

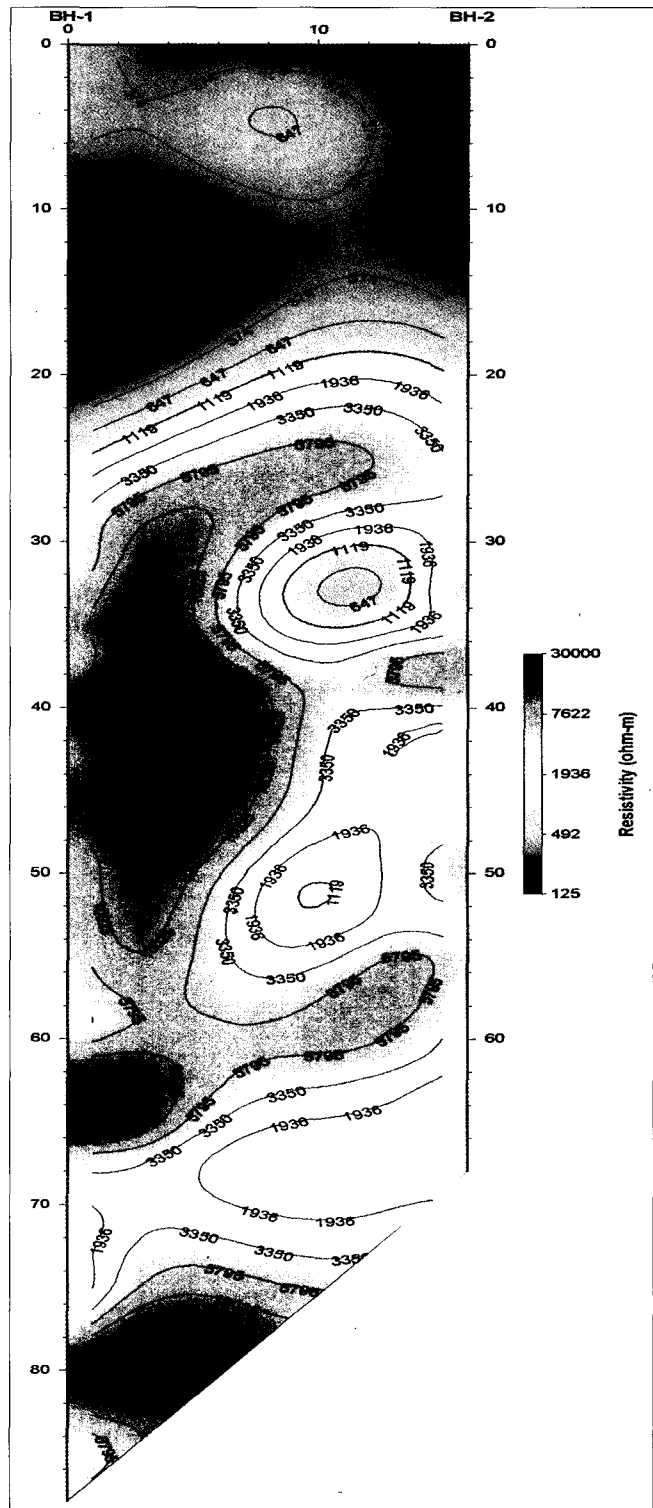


Fig. 3. Resistivity tomogram

5. 결론

지표에서 전기비저항탐사와 시추공간 비저항 토모그래피 탐사로부터 기존 분석결과인 불포화대, 자유면대수층, 기반암경계, 암반 대수층(파쇄대) 등에 대한 지층 구분이 가능하였다. 지표 탐사로부터 충적 대수층 경계 해석을 위한 현장자료 취득에서 전극배열, 전극

간격에 따른 지하구조 해석 방법을 제시하였고 한계점을 검토하였다. 즉 천부의 충적 대수층을 파악하기 위해서는 전극간격을 좁게($a=2m, 4m$), 좀 더 깊은 기반암 심도를 파악하기 위해서는 전극간격을 좀 더 넓게($a=10m$), 그리고 심부 암반대수층의 파악을 위해서는 전극간격을 그 이상으로 넓게 하여 탐사를 수행하는 것이 효과적인 것으로 나타났다. 그리고 비저항 토모그래피 탐사결과로부터 두 시추공사이의 암반 대수층 지하수 유동 통로의 해석을 시도하였으며 미약하나마 지하수 유동 통로로 생각되는 지하구조를 파악할 수 있었다. 지하수조사에 있어서 조사지역의 충적 대수층 두께를 파악하고자 할 때 지표 전기비저항탐사를 이용하여 효과적으로 해석할 수 있다.

참고문헌

대한광업진흥공사, 2004, 포천지역 지하수 기초조사보고서, P538.

유영준, 유인걸, 김정호, 2004, 삼보광산 금 광화대에 대한 전기탐사 반응, 물리탐사, 제7권 제4호, pp.217-224

현대건설주식회사, 1999, 전기비저항 토모그래피 영상법 및 토목/환경분야 적용성 연구, P.97