

물리검층을 이용한 지하수 유동 특성 연구

황 세 호
이 상 규
박 인 화
이 대 하
채 병 곤

한국지질자원연구원
한국지질자원연구원
한국지질자원연구원
한국지질자원연구원
한국지질자원연구원

서 론

물리검층은 지하수 조사에서 시추공과 교차하는 단열이나 대수층의 특성 파악에서 많은 역할을 수행한다. 물리검층은 시추공에 다양한 센서를 삽입하여 시추공 주변 수 cm~m 범위의 물성 측정을 기본으로 단열의 분포 특성, 지하수의 1차원적인 유동 파악, 단열의 역학적·수리적 특성 파악에 이용할 수 있다. 물리검층의 장점은 시추공 전구간에 대하여 원위치에서 높은 반복성을 유지하면서 연속적으로 자료를 획득할 수 있다는 점이다. 본 연구는 지하수 조사에 필요한 물리검층의 원리와 결정질 암반에서 물리검층을 이용한 단열의 특성 파악 사례, 지반조사시 지하수흐름 (또는 유향·유속)검층의 적용사례, 지하수 기초조사에서 수행한 물리검층과 수압시험 (packer test)과의 비교, 그리고, 연안지역에서 수행한 물리검층 자료를 이용하여 수리지질학적인 단위를 구분한 사례를 소개하고자 한다.

지하수 조사를 위한 물리검층

지하수 조사에서 물리검층은 정호도 작성, 압상 변화, 투수성 지층의 판별, 지하수의 1차원적인 흐름파악, 단열의 분포 특성 파악 등에 활용할 수 있으며 각 물리검층의 원리와 적용은 Key (1990)와 Paillet et al. (1993)에 자세히 기술되어 있다. 물리검층 중에서 자연감마선 검층과 단극저항은 암상의 구분이나 시추공 사이의 지층의 연결성 파악에 효과적이고 단열의 파악에는 공경검층, 단극저항검층 및 공벽영상화검층을 이용하며 단열의 투수성 여부는 공내수의 온도나 전기전도도검층을 이용한다. 그리고, 주로 소구경의 시추공인 경우의 지하수의 유동측정은 지하수흐름 (유향·유속)검층을 이용하며 통상적으로 6인치 이상으로 지하수의 유동이 많은 경우는 대수층과 다른 특성을 갖는 물을 강제 주입하여 대수층의 수리적 특성을 파악하며 (Cohen, 1995), 국내에서 물리검층을 이용한 불연속면 해석은 이상규 등 (2000)에 의해 발표된 바 있다.

물리검층 적용 사례 및 토의

가. 시추공간 수리적 연결 특성 파악을 위한 물리검층

결정질 암반내의 단열특성 파악 목적으로 경기도 남양주군 별내면 광전리에 위치한 5개의 시험 시추공에 대하여 각종 물리검층을 수행하였다 (이대하 등, 1999, 신희순 등 2000). 시험 시추공이 위치한 지역의 지질은 지체 구조적으로 경기육괴에 해당하며 선캄브리아기의 편마암류와 이를 관입한 유라기의 흑운모화강암 및 산성암맥, 그리고 상기 암체를 부정합으

로 피복하는 제 4기 층적층으로 구성된다. 시추공이 위치하는 지역은 상부는 풍화대이고 하부는 주로 편마암으로 구성되어 있다. 시추공과 교차하는 단열의 조사를 위하여 적용한 물리검층은 공경검층, 전기검층, 자연감마선검층, 온도 및 전기전도도검층으로 온도 및 전기전도도검층은 양수시험 전과 양수를 병행하면서 실시하였고 자료 해석 시, 공벽영상화검층인 BHTV (BoreHole TeleViewer) 검층자료를 보조적으로 이용하였다. 시험 시추공은 십자 (+)의 각 끝과 중앙에 위치하며 심도 100 m, 시추공간 거리는 약 10 m이다 (이대하 등, 1999). 5개의 시험 시추공에서 시추공간의 수리적 연결 (hydraulic connection) 특성을 파악하기 위하여 양수 전·후에 온도검층을 실시하였다. 현장 물리검층 기간은 2001년 10월 10일에서 14일이며 양수를 실시하기 전에 5개의 시추공에 대한 온도검층과 BH-1호공에서 이대하 등 (1999)에 의한 양수시험을 토대로 관측공의 안정수위에 근접할 때까지 양수를 실시하면서 온도검층을 실시하였다. 시추공내에서의 온도검층은 정적인 상태에서는 심도에 따라서 일정하게 증가하나 일반적인 경향에서 벗어나는 경우는 열전도도가 다른 암상을 시추공이 관통한 경우, 또는 투수성 단열이 시추공과 교차하는 경우나 시추공내에서 자연적인 수직적인 공내수의 흐름이 있는 경우이다 (Robinson, et al., 1993). Fig. 1은 양수를 실시하기 전에 5개의 시추공에서 실시한 온도검층 결과로 원호 안의 시추공 BH-2 및 BH-3호공의 온도검층 자료를 보면 다른 3개의 온도검층과는 다른 온도 변화율을 보이고 있다. 이는 심도 약 60 m 이내의 지하수 유동 특성이 시추공 BH-2 및 BH-3호공의 나머지 시추공과는 차이가 있음을 의미하는 것이다. 시추공간의 수리적인 연결성 파악 목적으로 양수시험을 병행하면서 물리검층을 수행하였다. 양수시험은 sampler (용량, 제품명 표기)를 이용하여 장기간의 양수는 불가능했지만 이대하 등 (1999)에 의한 안정수위에 근접한 수준에서 온도검층을 수행하였다.

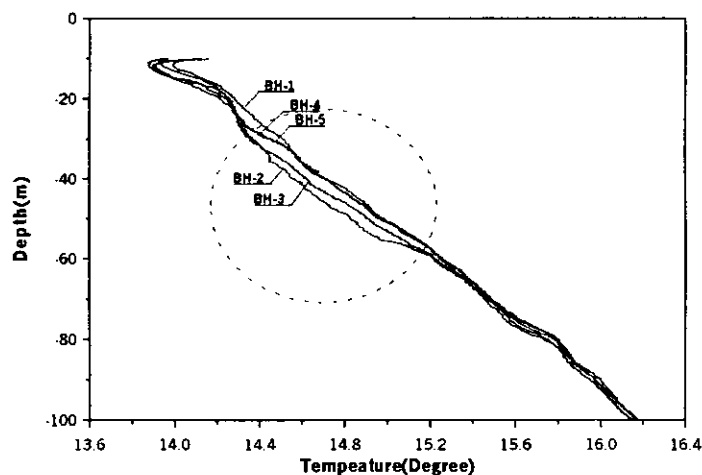


Fig. 1. Natural thermal profiles in borehole BH-1, BH-2, BH-3, BH-4 and BH-5 using temperature logging. Dashed circle indicate the interval that is obvious changes in the thermal gradient in borehole BH-2 and BH-3.

Fig. 2는 시추공 BH-1호공에서 양수를 실시할 때 주변 관측공인 BH-2, BH-3, BH-4 및 BH-5호공에서 온도검층을 실시하여 양수시험 전의 온도검층 결과와의 비교, 그리고 공경검층, 단극저항검층, BHTV검층자료를 이용하여 시추공간의 수리적 연결성을 3차원적인 개념 모델을 이용하여 나타낸 것이다. BH-1호공은 양수가 진행됨에 따라서 주로 시추공 주변 하

부의 지하수가 유입되며 시추공 BH-2, BH-3 및 BH-4호공 (양수시험 시 온도검층의 영향을 많이 받는 순서임)은 주로 상부 지하수가 공내로 유입되어 시추공 중앙부에 위치하는 투수성 단열을 따라서 시추공 BH-1호공으로 유동하는 것으로 보인다. 시추공 BH-5호공은 앞에서 언급한 바와 같이 시추공 BH-1호공과의 수리적 연결성이 작은 것으로 해석된다.

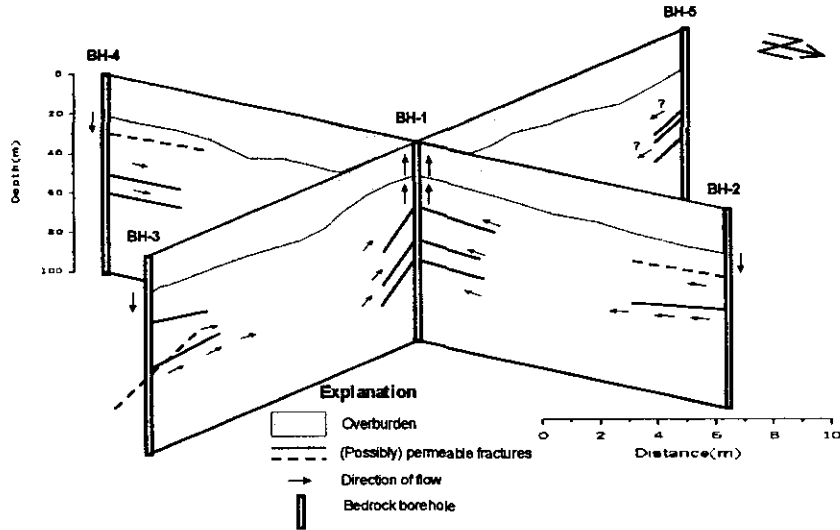


Fig. 2. 3-D conceptual portrayal showing possibly hydraulic connections between the boreholes by geophysical well logs.

나. 지반조사에서 지하수흐름검층의 적용

지반조사시 터널 구간이나 상부의 지하수 유동 문제는 터널의 설계나 시공에 필수적으로 파악해야 시공시 사고의 방지는 물론 공사비용도 절감할 수 있다. 현재 지반조사에서는 수위강하법을 이용한 투수시험이나 수압시험 (packer test), 그리고 지하수흐름 (유향·유속) 검층을 이용하여 시추공과 교차하는 단열의 수리적 특성을 조사하고 있다. 경기도 양수리 지역에서 지반조사 목적으로 굴착한 시추공에서 물리검층 결과, 공경검층, 온도 및 전기전도도 변화율검층에서 인지되는 파쇄대가 지하수의 유입·통로 역할을 하는 것을 알 수 있었다. 현재 지반조사에서 지하수흐름검층 시, 지하수의 유동 방향과 유속의 파악이 가능하지만 유량으로 환산을 해야하는 문제 등 보다 정량적이고 합리적인 조사에 대한 연구가 필요한 실정이다.

다. 지하수 기초조사에서의 물리검층

지하수 조사 목적으로 수행하는 물리검층은 통상적으로 공경검층, 전기검층 (장노말, 단노말, 단극저항, 자연전위) 또는 전자유도검층, 자연감마선, 온도 및 전기전도도검층 등으로 비교적 저렴한 경비와 빠른 시간에 자료 취득이 가능한 장점을 갖는다. 지하수 기초 조사에서 대수층의 특성을 파악하기 위하여 양수정 1개와 1~2개 정도의 관측정을 이용한다. 전남 영암 지역에서 지하수 기초조사 목적으로 수행한 물리검층과 구간별 대수층의 수리적 특성 파악 목적으로 수행한 수압시험 (packer test) 결과를 비교한 결과 온도 및 전기전도도 변화율 검층에서 이상대 구간이 수압시험에 의한 결과와 잘 일치하였다. 이와 같은 결과는 수압시험 등 시추공내에서 각종 수리시험에 앞서 물리검층 자료를 활용하는 것이 필요함을 알 수

있다.

라. 물리검층을 이용한 연안지역 미고결 지층의 수리지질학적 단위 구분

연안지역, 단층대 등 미고결 지층에서 수리지질학적인 단위 구분은 일차적으로 시추코아를 이용하지만 코아 회수율이 낮기 때문에 많은 어려움이 있으며 대부분의 시추공은 공유지 목적으로 PVC 케이싱을 설치한다. 물리검층은 PVC 케이싱 내에서도 시추공 주변 지층에 대한 정보를 얻을 수 있는 장점이 있어 보다 효과적이고 정량적으로 지층의 수리지질학적인 단위 구분을 할 수 있다. 전북 김제시 죽산면 일대에서 해수침투 평가 목적으로 굴착한 관측공에서 전자유도검층, 자연감마선검층, 온도 및 전기전도도검층 결과를 이용하여 투수성과 불투성 지층에 대한 구분이 가능하여 지표물리탐사자료 해석의 보완이나 수리모델링 등에 활용이 가능하였다.

결 론

지하수 조사에서 물리검층의 적용성을 국내에서 수행한 사례를 통하여 검토하였다. 현재 정량적인 수리 상수의 도출에는 많은 연구가 필요하지만 시추공과 교차하는 단열의 수리적 특성 파악에 물리검층이 매우 효과적인 것을 알 수 있다. 물리검층은 다른 지하수 시험에 비하여 측정 규모가 작은 단점이 있지만 결정질 암반이나 미고결 지층의 대수층에 대한 정보를 얻을 수 있으며 특히, 개별적인 단열의 수리적 특성 파악에 많은 장점이 있어 결정질 암반에서의 지하수 유동해석이나 환경오염 분야에 많은 기여를 할 것으로 기대된다.

사 사 : 본 연구는 한국지질자원연구원의 기관고유사업인 “절리 암반의 열 환경 거동 특성 연구”와 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업으로 수행된 것이며 그림작성에 도움을 이미영씨에게 감사드린다.

참 고 문 헌

- Cohen, A.J.B., 1995, Hydrogeologic characterization of fractured rock formation: A guide for groundwater remediators, Berkeley National Laboratory, LBL-38142/UC-800, 144.
- Robinson, R., Silliman, S., and Cady, C., 1993, Identifying fracture interconnection between boreholes using natural temperature profiling: II. Application to a fractured dolomite: *The Log Analyst*, 35, 69-77.
- Key, W. S., Borehole geophysics applied to ground-water investigations, in *Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book2*. 150.
- Paillet, F. L., Kay, R. T., Yeskis, D., and Pedler, W., 1993, Integrating well logs into a multiple scale investigation of a fractured sedimentary aquifer: *The Log Analyst*, 35, 24-40.
- 신희순, 외 54인, 2000, 절리 암반의 열 환경 거동 특성 연구, 한국자원연구소, KR-00(연차)-05, 745.
- 이대하, 김원영, 이승구, 염병우, 기원서, 채병근, 김용제, 김형찬, 문상호, 이철우, 고동찬, 이평구, 조민조, 최범영, 권석기, 허대기, 김현태, 김세준, 김중열, 김유성, 현혜자, 이상규, 황세호, 박인화, 이길용, 윤윤열, 한종규, 1999, 암반내의 열극해석과 지하수 유동 및 흡착연구, 한국자원연구소 연구보고서, KR-99(B)-05, 589.
- 이상규, 황세호, 김중열, 김유성, 박인화, 2000, 공내 물리검층을 이용한 불연속면 해석, 2000

년도 응용지질 Workshop 발표논문집, III-1 ~ III-38.

황세호, 이상규, 1999, 물리검층에 의한 파쇄대 인식과 동적지반정수의 산출: 건설현장에 필요한 물리탐사 기술 심포지움, 한국지구물리탐사학회, 156-175.