

유향·유속검층을 이용한 시추공간 수리직 연결 특성 파악

황세호·염병우·김용제

한국지질자원연구원 (hwangse@kigam.re.kr)

<요약문>

균열암반내의 수리적 유동 특성을 파악하기 위하여 다양한 물리검층을 수행하였다. 물리검층법은 시추공 주변 지층이나 공내수의 물리적 또는 유동 특성의 연속적인 측정이 가능한 장점을 지니고 있어 최근 지하수 조사나 환경오염 분야에 활용이 점점 증가하는 추세이다. 본 연구는 균열 암반내에서 지하수의 유동 특성 파악에 효과적인 Heat-pulse type의 유향·유속검층을 이용하여 시추공과 교차하는 파쇄대의 수리적인 연결 특성을 파악하였다. 특히, 양수를 병행하면서 취득한 유향·유속검층 자료는 시추공내로 지하수가 유입 또는 유출되는 구간을 정확하게 파악할 수 있었다. 이들 결과는 지하수 수치모델 설정, 각종 공내 수리시험 등에 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

key word: geophysical well logging, fracture, hydraulic connection, heat-pulse flowmeter

1. 서론

균열암반의 수리적 특성을 파악하기 위해서는 위성영상자료 분석, 지표 구조지질조사, 지표물리탐사 등 규모가 큰 지표조사와 균열특성을 직접적으로 평가하기 위하여 굴착한 시추공을 이용하는 조사법으로 구분할 수 있다. 특히, 시추공을 이용하는 조사법은 시추공과 교차하는 다양한 파쇄대의 특성을 정량적으로 평가할 수 있는 장점이 있다. 시추공을 이용하는 조사법 중에서 물리검층은 시추공 주변 지층에 대한 다양한 원위치 물성과 공내수의 특성을 측정하며, 시추공과 교차하는 파쇄대의 기하학적인 정보를 제공하기도 한다. 대부분의 정보 중에서 수리지질학적으로 관심이 되는 공극이나 투수율은 물리검층에서 직접적인 측정이 어렵기 때문에 경험식이나 실내 시험결과를 이용하여 추정한다. 최근, 균열암반의 수리특성 평가에 많이 이용되는 유향·유속검층은 기존의 물리검층과는 달리 수리지질학적인 정보를 제공할 수 있는 장점을 갖고 있다. 상용화된 유향·유속검층 중에서 매우 낮은 유속을 측정하는 Heat-pulse type의 유향·유속검층은 투수성 파쇄대의 평가, 시추공간 수리적으로 연결된 파쇄대 확인, transmissivity 추정 등에 활용되고 있다(Paillet, 1998, 2000, 2001). 본 연구에서는 heat-pulse type의 유향·유속검층법에 대한 자료취득, 자료처리 및 해석을 현장적용사례를 중심으로 기술하기로 한다.

2. 본론

2.1 Heat pulse type의 유향·유속검층

미세한 공내수의 흐름을 측정하는 Heat-pulse type의 유향·유속검층은 1980년 초, 미국 국립지질조사소의 Hess(1982)가 처음으로 장비를 개발한 후, 꾸준한 성능개선으로 균열암반의 수리특성 파악에 많이 이용되고 있다. 유향·유속검층법은 직접적으로 수리특성을 파악할 수 있는 물리검층법으로 측정범위는 0.04~6.1 l/min이다. 이후, 장비의 측정 민감도를 높이기 위해 지상에서 제어 가능한 inflated packer를 장착한 sonde를 개발하였으며(Hess, 1986), 빠른 시간에 측정 가능하도록 제작된 flexible-disk flow diverter로 인한 측정의 불확실성을 줄이거나 영향을 보정하는 방법, 수위의 변화에 따른 측정값의 보정 등에 대한 연구가 수행되었다(Paillet, 2001). 그림 1은 한국 지질자원연구원(KIGAM)에서 운용중인 Heat-pulse type의 유향·유속검층 장비에 대한 calibration chart로 측정된 유속을 유량으로 환산한다. 그림 1에서 실선은 제조사에서 수행한 다양한 시험 자료로 작성된 교정곡선이고 △는 KIGAM에서 운용중인 장비에 대한 calibration 결과이다.

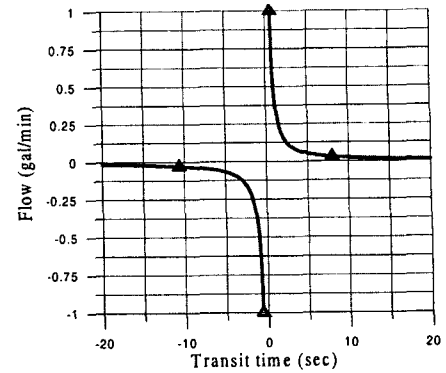


그림 1. Heat-pulse flowmeter의 교정곡선

2.2 자료취득 및 처리

물리검층법으로 균열암반의 수리특성을 파악하기 위하여 충남 금산지역에 위치하는 2개의 시추공에서 각종 물리검층을 수행하였다. 시추공이 위치하는 지역의 지질은 Tuff이고 시추공의 공경은 NX (3 인치), 시추공 심도는 145 m, 시추공간 거리는 10 m이고 케이싱 심도는 10 m 이다. 적용한 물리검층은 지하수 조사에서 많이 이용하는 물리검층법인 공경검층, 자연감마선검층, 공내수 온도/전기전도도검층과 Heat-pulse type의 유향·유속검층을 수행하였다. 공경검층, 자연감마선검층, 공내수 온도/전기전도도검층은 영국 Robertson Geologging사의 물리검층 시스템을 이용하였고 측정간격은 1 cm이며 자연감마선은 20 cm 구간, 공경검층과 온도/전기전도도검층은 10 cm 구간에 대한 이동평균법을 적용하였다. 유향·유속검층은 미국 Mount Sopris사의 물리검층 시스템을 이용하였으며 측정범위는 0.046~3.962 m/min (0.03~3.785 l/min)이다. 시추공 A, B에 대한 물리검층 결과 중에서 자연감마선검층 자료는 심도 10 m 부근에서 steel 케이싱의 영향으로 자연감마선의 강도가 감소하였으며 전구간에서 동일한 자연감마선을 보여 동일한 암상임을 의미한다. 공경검층의 경우, 천부 25 m 이내와 55~75 m 부근 80~100 m 구간에 많은 파쇄대가 존재한다. 그림 2는 시추공 A, B에 대한 공내수의 전기전도도와 온도검층 및 변화율검층 자료이다. 온도 및 전기전도도가 변하는 지점인 심도 64 m 또는 70 m 부근에 지하수의 유동이 있음을 지시한다(그림 2의 (b)에서 온도/전기전도도검층 자료는 심도 1 m 증가에 대한 변화율이며 온도의 경우, 100을 곱한 수치임). 특히, 전기전도도검층 자료에서 심도 약 70 m 까지는 동일한 범위의 전기전도도 분포를 보이고 하부는 큰 차이를 보이는데 이와 같은 전기전도도검층 자료에서 수리적으로 연결된 파쇄대가 존재함을 추정할 수 있다. 시추공간 파쇄대의 수리적인 연결성을 파악하기 위하여 양수전·후에 유향·유속검층을 수행하였다. 유향·유속검층의 측정 심도는 공경검층 자료를 참고로 하여 파쇄대 상·하부 구간을 선정하였고 측정의 민감도를 높이기 위하여 flexible-disk flow diverter를 이용하였다. 사진 1은 유향·유속검층기에 flexible-disk flow diverter를 설치하고 크기를 측정하는 장면으로 flexible-disk flow diverter는 시추공경의 크기보다 2.5 cm 정도 크게 제작하였다.

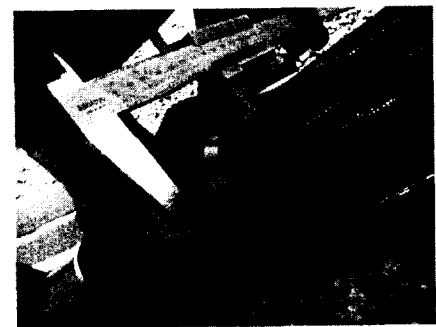


사진 1. 유향·유속검층 장비에 flexible-disk flow diverter를 장착한 장면.

측정의 민감도를 높이기 위하여 flexible-disk flow diverter 직경을 크게 하거나 탄력을 높이면 파쇄대 구간에서 유향·유속검층기의 이동에 어려움 점이 발생하기도 한다. 유향·유속검층의 자료 취득은 동일한 심도에서 평균적으로 3회 이상 측정하여 자료의 반복성(repeatability)을 확인하였다. flexible-disk flow diverter와 시추공벽 사이에 흐르는 지하수의 유동에 대한 보정은 수행하지 않았으며 측정된 자료는 시추공내의 지하수 유동이 flexible-disk flow diverter 안으로 흐른다는 가정 하에 자료를 측정, 해석하였다.

2.3 유향·유속검층 자료의 해석

양수 전에 시추공 A와 B에서 측정한 유향·유속검층 자료 중, 시추공 A의 경우 모든 구간에서 하향의 흐름을 보였으며 심도 70 m 부근은 시추공 밖으로 지하수가 유출되는 것으로 해석되었다. 시추공 B의 경우, 지하수 흐름 방향이 바뀌는 심도 63 m 부근은 지하수가 유입, 70 m 부근은 지하수가 유출되는 구간으로 해석되었다. 시추공 A와 B에서 Rezdi-Flo2를 이용하여 약 20 l/min로 양수를 실시하였고 안정 수위에 근접한 상태를 유지하면서 측정하였다. 시추공 A와 B의 초기 수위는 각각 4.04 m와 3.97 m 이고 양수시작 3시간이 경과한 후의 수위는 각각 4.95 m와 4.87 m로 지하수연구팀에서 측정한 안정 수위와는 수 cm 차이이다. 시추공 B에서 양수를 하고 시추공 A에서 측정한 결과, 지하수의 흐름이 모두 상향이며 심도 약 13 m 부근과 심도 70 m 부근에서는 지하수가 시추공 밖으로 유출되는 것으로 해석되었다. 시추공 A에서 양수를 실시하고 시추공 B에서 측정한 결과, 심도 약 17 m 부근에서 지하수가 유출되고 심도 63 m 부근에 지하수 유입, 그리고 심도 70 m 하부에서 지하수가 유출되는 것으로 해석되었다. 그림 3은 시추공 A에서 양수를 실시할 때, 지하수의 흐름을 개념적으로 표현한 것으로 유향·유속검층이 시추공 사이에 수리적으로 연결된 파쇄대 확인에 효과적임을 보여주고 있다. 그림 3은 시추공간 파쇄대의 수리적인 연결성을 확인한 결과이지만, 앞으로 공경검층 또는 공벽영상화검층에서 확인되는 많은 파쇄대에 대한 각각의 수리적 특성을 평가해야 보다 정량적인 해석이 가능할 것으로 판단된다.

3. 결론

균열암반 내의 지하수 유동 특성을 파악하기 위하여 다양한 물리검층법을 적용하였다. 지하수 조사분야에서 많이 이용하는 기본적인 물리검층(공경검층, 자연감마선검층, 공내수 온도/전기전도도검층 등) 자료에서 시추공간에 수리적으로 연결된 파쇄대가 존재함을 추정할 수 있으나 정확한 위치와 유동 특성에 대한 파악은 어려웠다. 후속적으로 양수 전 또는 양수를 병행하는 유향·유속검층의 적용으로 두 시추공 사이에 수리적으로 연결된 파쇄대를 확인하였다. 특히, 시추공 B호공의 경우, 지하수가 유입, 유출되는 구간이 존재하였으며 이와 같이 지하수 유동 특성이 복잡한 경우에 유향·유속검층이 매우 효과적으로 적용할 수 있음을 알 수 있었다. 앞으로 flexible-disk flow diverter와 시추공벽 사이의 지하수 흐름과 수위변화에 따른 보정 등에 대한 연구가 요구된다.

4. 참고문헌

- Hess, A.E., 1982, A heat-pulse flowmeter for measuring low velocities boreholes, U.S. Geological Survey Open-File Report 82-699, U.S. Geological Survey, Denver.
- Hess, A.E., 1986, Identifying hydraulically conductive fractures with a slow velocity borehole flowmeter, Canadian Journal of Earth Science, 23, 69-78.
- Paillet, F.L., 1998, Flow modeling and permeability estimation using borehole flow logs in heterogeneous formations, Water Resources Research, 34, 997-1010.

Paillet, F.L., 2000, A field technique for estimating aquifer parameters using flow log data, Ground water, 38, 510-521.

Paillet, F.L., 2001, Hydraulic head applications of flow logs in this study of heterogeneous aquifer, Ground Water, 39, 667-675.

사사: 본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구과제(과제번호 3-1-1)와 기관고유사업인 균열암반의 수리지질학적 특성연구 결과중의 일부이다.

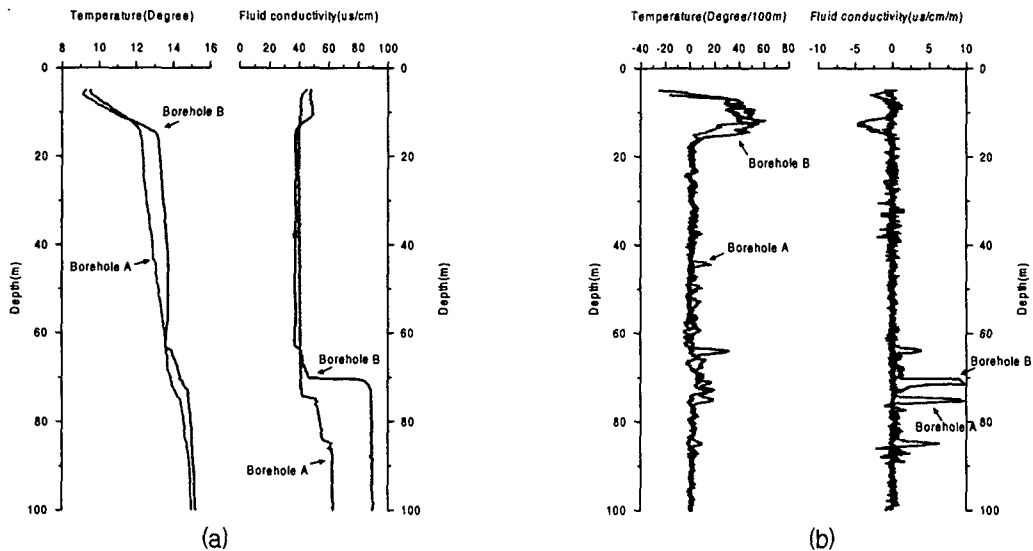


그림 2. (a) 시추공 A와 B에 대한 온도/전기전도도검층 자료, (b) 시추공 A와 B에 대한 온도/전기전도도의 변화율검층 자료.

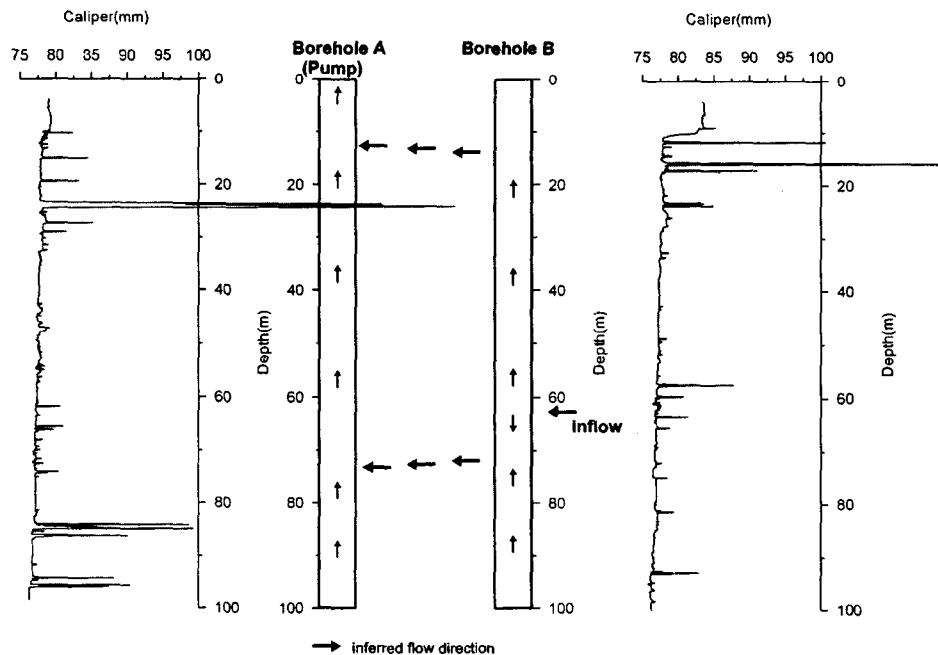


그림 3. 시추공 A에서 양수를 실시할 때, 시추공간 지하수 흐름을 Heat-pulse type의 유향·유속검층으로 확인한 시추공간 파쇄대의 수리적인 연결의 개념도. 공경검층에서 확인되는 큰 규모의 파쇄대 대부분이 시추공간 수리적인 연결성과는 관련성이 작음을 알 수 있다.