

## 시추공 지구물리 방법에 의한 결정질암의 대수 특성 정밀

김영화 · 공남영 · 이성진

강원대 지구물리학과  
yhkim@kangwon.ac.kr

### 요 약 문

Borehole geophysical techniques were adopted for characterizing aquifer properties of crystalline rock formation in Bongmyong borehole test site, Kangwon National University. Specific fractures and/or fracture zones accompanying groundwater flow were delineated well by high resolution flowmeter and dilution measurements, and could be confirmed from conventional well log methods. These geophysical techniques have been proved to be the most effective in aquifer characterization in crystalline rock formation.

**key word** : borehole geophysics, flowmeter, aquifer test, conductivity, well log

### 1. 서론

시추공에서 투수계수 결정 또는 대수층의 수리특성을 밝히는 지구물리학의 방법은 여러 종류가 있다. 그 중에서도 flowmeter 검층(Paillet et al., 1987)과 dilution conductivity 측정(Tsang and Hale, 1989; Kim and Lim, 2001)은 대수층의 수리 특성에 대한 직접적인 정보 제공 수단이란 관점에서 큰 의미를 가진다. Flowmeter 측정은 고분해능 flowmeter인 heat pulse flowmeter와 전자유도 flowmeters(Molz et al., 1994)의 발전에 따라 분당 0.1 리터 이하의 소량의 유체 이동까지 측정할 수 있게 되면서 효과적인 연구 수단이 되고 있다. 특히 자연 상태에서뿐만 아니라 수위 감소가 작고 난류 흐름이 방지되는 낮은 펌핑 속도에서의 flowmeter 측정을 병행함으로써 더욱 효율적으로 지반의 수리 상태를 밝힐 수 있게 되었다(Paillet, 1998). 한편 Dilution conductivity 검층 기법에 의한 투수계수 결정은 Tsang과 Hale(1989)에 의해서 처음 시도되었다. Tsang과 Hale(1989)과 Loew et al.(2000)은 지층수와 크게 농도를 달리하는 시추공 유체를 사용한 시추공 conductivity 측정으로부터 투수계수를 측정할 수 있음을 보였다. 김영화와 임헌태(2001) 그리고 김영화 외(2005)는 전도도 감소의 기울기(GCD) 개념을 사용함으로써 시추공 주변 지반의 투수계수를 효과적으로 결정할 수 있음을 보였다.

최근에 와서 결정질 암석에 대한 시추공 지구물리학적 연구가 세계적인 경향이 되고 있으며 변성암과 화성암에서 많은 연구가 실시되었다. 그러나 어느 나라보다도 결정질암 지질이 풍부한 우리나라에서는 아직도 이 영역에서 체계적인 연구 성과가 이루어지지 못하고 있거나 크게 부족한 편이다. 이러한 관점에서 강원도 춘천시 봉명리의 선캠브리아기 우백질 편마암(Son et al., 1975) 지질 지역에 위치한 강원대학교 학술림 내 시추공 BM-2와 BM-3에서 일련의 시추공 지구물리학적 기법들을 적용하고 결정질암에서의 대수특성에 관하여 연구하였다. 적용 기법은 flowmeter 검층과 dilution conductivity 측정과 함께 televiwer 검층, resistivity, gamma-gamma, gamma, temperature and electric conductivity 검층 등을 포함한다.

## 2. 본론

Flowmeter 측정은 high resolution heat pulse flowmeter를 사용하여 borehole에서 유체 움직임의 방향과 속도를 측정하였다. 시추공과 flowmeter 사이의 완전한 차단을 위한 flowmeter 측정 위치의 선택에서 televiwer log와 caliper log 결과를 활용하였다. 시추공 내의 유체 흐름은 펌핑시와 자연상태의 두 가지의 조건으로 측정되었다. Pumped flow 상태의 측정을 위해서는 RediFlow 펌프를 사용하여 약 1 litre/min의 유량을 양수하여 draw down이 안정될 때까지 펌핑을 함으로써 양수 시 양수되는 물이 모두 대수층으로부터 나오는 조건이 성립될 수 있도록 노력 하였다. BM2 시추공에서의 flowmeter 측정 결과는 자연상태와 양수상태 모두에서 공통적으로 5개의 flowing fracture가 나타났으며 그 심도는 5.5m, 7.5m, 18m, 25.5m, 30m, 33m로 나타났다. 그 중에서도 약 5.5m와 18m, 25.5m에서의 절리가 지하수 현저한 것으로 나타났다. BM3 에서는 4개 약 4m, 10m, 17m, 27.5m에서의 절리가 발견되었으나 약 4 m와 17 m에서의 절리 외에는 그 존재가 미미한 것으로 나타났다.

Dilution conductivity 측정은 시추공 내에 염수를 주입하여 지층수의 유입과 유출에 따른 conductivity 변화의 모니터링을 하는 것이다. 이 현장 측정에 의한 conductivity 감소율(GCD)을 기존의 모형실험에 의한 flow rate 결정 모델 방정식(김영화 외, 2005)에 적용시켜 유량 및 각종 수리상수를 결정하는 방법을 사용하였다. 측정 시스템은 표면에서 시간에 따른 자료 획득 시스템, 시추공에서의 측정 장치와 전극 배전판으로 구성되어 있다. 시추공에서의 측정 장치는 100 가닥의 케이블 표면에 50 cm마다 설치된 64개의 전극으로 이루어져 있다. 시추공에서 측정 장치와 표면에서 시간에 따른 자료 획득 시스템 사이의 연결은 전극 배전판과 64 채널 Terminal block으로 되어 있다. 염수 주입과 전기전도도 관측을 통하여 일련의 electric conductivity 변화 곡선을 얻었다. 시간에 따른 유체의 conductivity 감소가 관찰되었으며, 이로부터 conductivity 변화와 flow rate 사이의 관계를 찾을 수 있었다. 염분 차이는 유입되는 유체의 탐지가 효과적이라도 0.07% NaCl 용액이 주로 사용되어졌다. 전기전도도 곡선은 각 시추공에서 이수의 염수 치환 완료 후 70분 동안 얻어진 600개의 시간에 따른 곡선 중 선택된 11개의 시간에 따른 conductivity 곡선으로 제시되었다. Normalized conductivity 형태로 plot된 conductivity 곡선은 심도 15.5, 30, 그리고 35meter와 더불어 6 meter 위에서와 24.5 meter에서 2개의 중요한 peak를 보인다. 이 peak들은 지하수 유입을 수반하는 fracture의 위치를 나타내는 것으로 보인다. BM-3에서는 대부분의 지하수 흐름이 시추공 상부 구간에 집중되어 나타나는 매우 단순한 conductivity 곡서능르 보여 BM-2에서의 전기전도도곡선과 대조된다.

아울러 각 시추공에서는 절리의 위치와 크기 확인을 염두에 둔 여러 가지 일반적인 지구물리 검층이 실시되었다. BM-2의 4m-38m 구간에서의 optical televiwer와 acoustic televiwer 검층 이미지로부터 대략 35개의 절리 및 절리대가 발견 되었다. Focused resistivity 검층 또한 텔레뷰어 검층에서의 절리 위치에 일치되는 곳에 현저한 비저항 이상대를 보여주었다. 이러한 focussed log에서의 고해상 이상대 분포는 conventional resistivity logs에서의 비저항 곡선과 크게 대비됨이 주목되었다. 대부분의 재래식 검층에서는 예상대로 지하수의 흐름과 연관된 효과적인 지시자가 나타나지 않았으나 gamma log, 온도검층, 전기전도도 검층, 그리고 Stonely wave amplitude log에서는 지하수 흐름과 연관된 이상대의 존재가 인지되었다. 특히 spectral gamma검층과 전기전도도검층의 분석이 지하수의 흐름을 수반하는 절리의 확인에 크게 효과적이었으며 Stonely wave amplitude log에서 구한 감쇄지수 또한 지하수 유동 절리의 존재와 연관성이 큰 것으로 나타났다.

측정 결과의 분석을 위해서 먼저 flowmeter 측정 결과와 dilution conductivity 측정 결과를 비

교하였다. 시추공 BM-2에서 flowmeter 측정으로 탐지된 fracture 지점은 대략 심도 3.5m, 7.5m, 18m, 25.5m, 30m, 그리고 33m인데 비해, dilution 측정의 peak 지점은 6m 위, 15.5m, 24.5m, 30, 그리고 35m이다. Dilution conductivity measurement의 한계 지점 상부의 심도 6 meter 지점의 경우를 제외하면, 두 결과는 2 meter의 오차 범위 안에서 부합한다. 또 다른 하나의 결과는 dilution measurement에서의 peak가 언제나 flowmeter에서 결정된 fracture 지점의 1 내지 2 meter 상부에 위치하는 점이다. 이는 염수의 시추공 유체에 유입된 염도가 낮은 물이 부분적으로 상승할 수 있는 가능성이 있음을 감안할 때 충분히 수궁할 수 있는 결과이며, 따라서 flowmeter 측정과 dilution conductivity 측정의 결과는 매우 잘 부합한다고 할 수 있다. flowmeter와 dilution conductivity 측정 결과, BM-2 시추공으로부터 5개의 fracture 또는 fracture zone이 존재하는 것으로 나타났다. 이는 약 35개의 fracture의 존재를 보여주는 televiwer 절리의 약 1/7dp 해당하는 비율이다. BM-3 시추공의 경우는 더욱 심하여 약 30개의 televiwer fracture 중에서 상부 구간에서

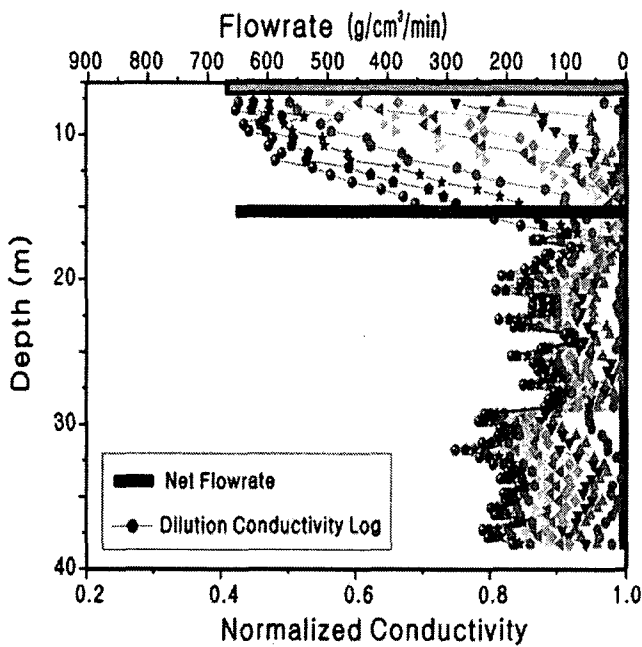


Fig.1. Comparison between flowmeter and dilution measurements.

서의 현저한 fracture zone 2개가 흐름의 원인으로 나타나고 있다(그림 1). 우리는 먼저 flowmeter와 Dilution conductivity 측정에서 나타난 flowing fracture의 위치에 가장 가까이 존재하는 현저한 televiwer fracture를 선택하는 방법으로 flowing fracture의 위치를 결정하였다. 아울러 재래식 검층 곡선으로부터 유체의 흐름이 예상될 수 있는 fracture의 위치를 추적하였으며 이를 위하여 특히 Stonely wave amplitude log, electrical conductivity log, 그리고 gamma log 곡선을 중점적으로 이용하였다. 그 결과 매우 성공적으로서 지하수의 흐름을 수반하는 fracture의 탐지(그림 2)와 각 fracture 투수성 정도가 효과적으로 규명되었다.

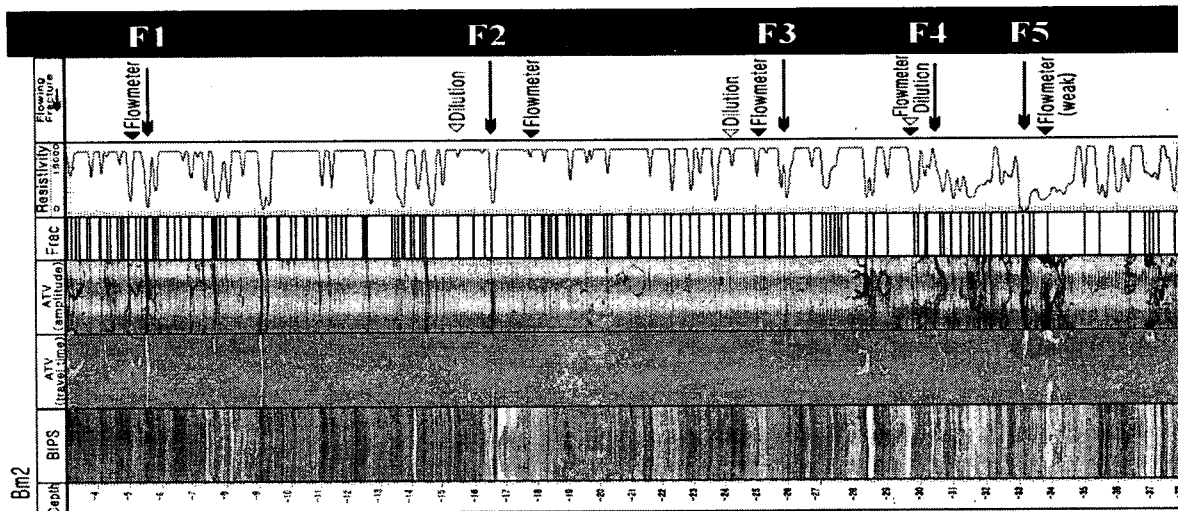


Fig.2. Determination of the location of flowing fractures by dilution, flowmeter, and televiewer logs.

### 3. 결론

강원도 춘천시 봉명리 강원대학교 학술림에 위치한 시험 시추공 BM-2, BM-3에서 flowmeter, dilution conductivity 및 각종 일반적인 물리검층 기법을 적용하여 결정질암의 대수성에 관한 연구를 실시하였다. Flowmeter log에서는 pumping과 non-pumping을 효과적으로 결합함으로써 시추공 내에서의 정밀한 지하수 흐름을 추적할 수 있었다. Dilution conductivity 측정으로 얻은 투수율은 BM-2에서 970 g/min, BM-3에서는 440 g/min의 flow rate 값을 얻었다. Dilution electrical conductivity와 flowmeter로 얻은 투수성 사이에 약간의 심도 오차가 존재하지만, 전반적인 경향은 잘 일치하며, flowmeter와 dilution conductivity 측정이 결정질암에서 매우 효과적인 대수층 시험임을 보였다. 대부분의 재래식 검층들은 지하수의 흐름을 확인하는데 있어 한계를 보였지만 Stonely wave amplitude log, gamma log와 electrical conductivity log는 지하수 흐름을 수반하는 절리의 확인에 있어서 상당히 효과적이었으며 flowmeter와 dilution 측정 결과와도 좋은 상관성을 보였다. 따라서 이들 시추공에서의 물리검층 조사 기법들의 효과적인 활용은 결정질암에서의 지하수 흐름의 근원이 되는 절리의 위치 확인에서부터 각 절리의 대수 능력의 확인에 이르기까지 매우 효과적인 연구 수단이 되는 것으로 확인되었다.

### 4. 참고문헌

- Kim, Y. and Lim, H., 2001, A physical model hole experiment for determining hydraulic constants in borehole using an electrical conductivity log technique. 2001 Annual Conference of the International Association of Mathematical Geology, Cancun, Mexico, A1-11.
- Kim, Y., Zhao, W., and Lim, H.T., 2005, In-situ borehole electrical conductivity

- measurement and flow rate determination, Earth Resources Research and Development, 19 (Special Edition for *12th KoreaChina Joint Geology Symposium*), 52-58.
- Loew, S., Tsang, C-F, Hale, F.V. Hufschmied, P., 2000, The Application of Moment Methods to the Analysis of Fluid Electrical Conductivity Logs in Boreholes. Nagra-Doe Cooperative Project Report, Earth Science Division, Lawrence Berkeley Laboratory, 44p.
- Moltz, F.J., Bowman, G.K., Young, S.C., and Waldrop, W.R., 1994, Borehole flowmeters- Field application and data analysis, *Journal of Hydrology*, 163, 347-371.
- Paillet, F.L., 1998, Flow modeling and permeability estimation using borehole flow logs in heterogeneous fracture formations. *Water Research*, vol. 34, no.5, p.997-1010.
- Paillet, F.L., Hess, A.E., Cheng, C.H., and Hardin, E., 1987, Characterization of fracture permeability with high-resolution vertical flow measurements during borehole pumping. *Ground Water*, v. 25 (no. 1), 28-40.
- Son, C.M., Kim, Y.G., Ki, S. W., Kim, H.S., 1975, Explanatory text of the Geological map of Hongchon sheet(1:50,000), Geological and Mineral Institute of Korea, 21p.
- Tsang, C.F.; Hale, F., 1989, A Direct Integral Method for the Analysis of borehole fluid conductivity logs to determine fracture inflow parameter. National Water Well Association Conference on New Techniques for Quantifying the Physical and Chemical Properties of Heterogeneous Aquifers, Dallas, TX; P.20-23.