

## 현장 균열망 연결성 통합해석에 대한 신행연구

김태희, 황세호, 채병곤, 고경석, 이철우, 김용제

한국지질자원연구원

(e-mail : katzura@kigam.re.kr)

### <요약문>

현장 균열망의 연결성 및 이에 따른 수리지질학적 특성을 규명하기 위하여, 기존의 통상적인 조사 기법을 한 지역에 집적하여 그 결과에 대한 통합해석을 수행하였다. 본 연구에 적용된 조사 방법은 양수 시험, 물리검층, 다중심도 수리화학 분석, 전기비저항 토모그래피, 시추 코어 검층 등의 기본 특성 조사와, 추적자 시험, 다중 심도 수직 유향유속 시험 등 구간별 특성 조사 등이다. 이러한 조사 결과 본 조사 지역 내 균열의 전반적인 분포 특성을 확인할 수 있었으며, 각 균열의 수리적 특성에 대한 기본적인 특성을 확인할 수 있었다. 특히 추적자 시험과 유향유속 시험 결과를 통해 각 관정간의 균열을 통한 연결성에 대한 중요한 정보를 도출할 수 있었다. 이러한 성과는 추후 percolation, connectivity 등 모델 개념의 현장화를 위한 연구의 선행 연구로서 그 의미를 자리매김 할 수 있을 것이다.

**Key word** : 연결성(connectivity), 물리검층, 추적자 시험, 수직적 수리화학 분포, 수직적 유향유속분포

### 1. 서론

균열암반에서의 지하수 유동해석에 대한 복잡성은 이미 국내외적으로 잘 알려진 사실이다. 원래 지하수의 물리적 유동에 대한 기본 이론은 미국 중부의 대규모 빙하 퇴적층(다공질 매질)을 대상으로 성립된 것이며, 대개의 경우 균열암반에서의 지하수 유동 해석을 위한 기본 틀은 이 다공질 매질에 대한 이론적 틀로부터 도출된 수리전도도(Hydraulic Conductivity), 비저유계수(Specific Storage) 등의 개념을 통해 설명하고자 하는 것이 일반적인 시도이다. 물론 수리전도도나, 비저유계수 등의 개념이 균열암반에서 지하수 유동을 해석하는 데 얼마나 유효한가에 대해서는 아직 증명된 바 없으나, 실용적 관점에서 다공질매질을 설명하기 위해 도출된 수리상수(수리전도도, 비저유계수 등)가 여과 없이 사용되고 있는 실정이다.

물론 기간 균열암반에서의 지하수 거동을 해석하기 위해 많은 개념적 접근법이 제시되어 왔다. 그 중 대표적인 것이 균열망 모형(discrete fracture model)에 근거한 percolation model (Balberg et. al., 1991; Berkowitz and Braester, 1991; Berkowitz and Balberg, 1993; Berkowitz, 1995; Renshaw, 1996; Bour and Davy, 1997; Bour and Davy, 1998; Renshaw, 1999)을 들 수 있을 것이다. 하지만, 이러한 percolation 모델의 가장 큰 문제점은 모델 개념에서의 적용성 검토만이 이루어져 있을 뿐, 실제 현장에서의 적용성에 대해서는 아직 검증되지 못했다는 점이다. 이와는 별도로 최근 균열암반 매질의 특성 - 주로 지하수 유동 경로 -을 규명하기 위한 일련의 움직임이 Stanford Hydrogeology Program 내에서

수행되고 있다 (<http://pangea.stanford.edu/hydro/>). Stanford Hydrogeology Program에서는 균열암반에서의 지하수 유동 경로의 규명을 위하여 기존의 지하수 현장 시험 방법과, 물리탐사, 검층 등의 방법을 통합·적용, 공간 지하수 유동 특성을 밝히고자 하고 있다.

본 연구의 궁극적 목적은 이러한 두가지의 연구 경향을 통합하여 지금까지 모델 개념에서 취급되던 percolation, connectivity의 개념과 균열암반에서의 REV에 대한 개념을 borehole 규모에서 적용할 수 있는 현실적 방법을 제시하고자 하는 것이다. 즉, 현단계에서의 본 연구는 앞으로 진행될 연구에 대한 사전 연구의 성격으로 Borehole 규모에서 모델 개념의 적용 가능성에 대한 선행 검토의 성격을 가지고 있다.

## 2. 연구 방법

본 연구의 조사 지역은 충청남도 금산군 남이면 남이 자연휴양림 내 위치한 한국지질자원연구원 시험 부지이다. 본 조사를 위해 그림 1에 제시된 바와 같이 총 5개의 관정을 설치하고, 본 지역의 기본적인 수리적 특성을 파악하기 위하여 수위관측 및 양수 시험 등 기본적인 현장 조사를 수행하였다. 양수시험을 통해 조사된 본 지역의 수리전도도 값은 10.47~12.21  $m^2/day$ 의 값을 가지며 주목할 만한 이방성은 없는 것으로 확인되었다.

이와 함께 본 지역의 관정 내 수직적 균열분포 특성을 규명하기 위하여 각 관정에서 채취된 시추코어를 통하여 로깅을 수행하였으며, 물리검층, 다중심도 수리화학 분석, 전기비저항 토모그래피 등을 수행하였다. 이러한 관정 내 기본적인 수직적 구조에 대한 조사를 수행한 이후, 투수성 구간에 대해 우선 추정하고, 이를 바탕으로 추적자 시험, 공내 주직 유향 유속 시험 등을 수행하여, 투수성 균열 구간에 대한 관정간 연결성에 대한 현장 조사를 수행하였다. 이러한 조사는 추후 진행될 연구에 대한 선행 조사의 성격을 가지며, 이 결과는 모델 개념에서 논의되고 있는 percolation, connectivity 등의 개념을 현장특성화에 적용시 기본 back data로 활용될 수 있을 것이다.

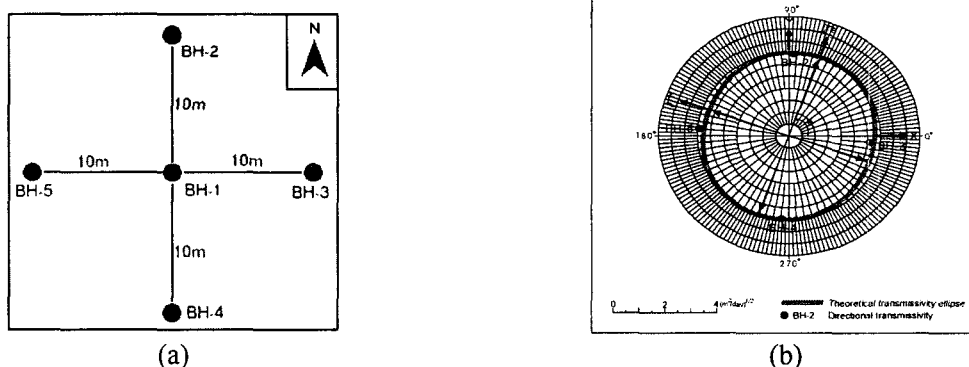


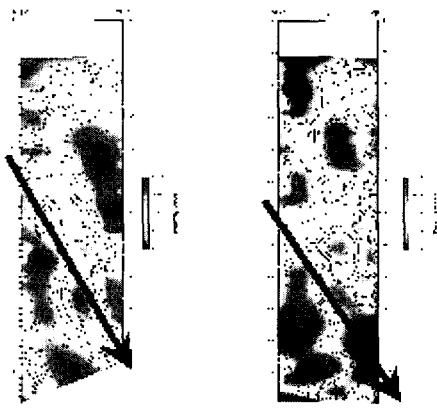
그림 1 (a) 금산지역 시험 시추공 위치도, (b) 양수시험 결과로 도출된 수리이방성

## 3. 현장 조사 결과

### 3.1 관정내 수리 특성의 수직적 분포

조사 방법에서 언급한 바와 같이 관정내 수리 특성의 수직적 분포 특성을 파악하기 위해 우선 기본 물리검층, 심도별 수리지구화학적 조사, 전기비저항토모그래피 등을 수행하였다. 물리검층의 조사 결과

는 전기비저항토모그래피와 수직적 수리화학적 특성 자료와 함께 검토하였다(그림 2, 3). 이상의 조사 결과를 종합하면, 본 조사 지역에서 불연속면 분포 특성은, 1) 지표 하 20m 이내의 지역에서 상대적으로 높은 빈도의 불연속면의 분포를 확인할 수 있으며, 2) 전반적인 불연속면의 분포는 지표 하 30 ~ 80m 지점에서 사이에서 대규모의 불연속면 분포를 확인할 수 있다. 특히 2)에서 확인된 불연속면은 서쪽 방향 경사를 가진 고각의 연약대로 추정된다. 이러한 특성은 수직적 화학조성의 분포에서도 확인할 수 있다(BH-2 60m 지점).



BH-3~BH-5      BH-2~BH-4  
그림 2 전기비저항 토모그래피 역산 결과

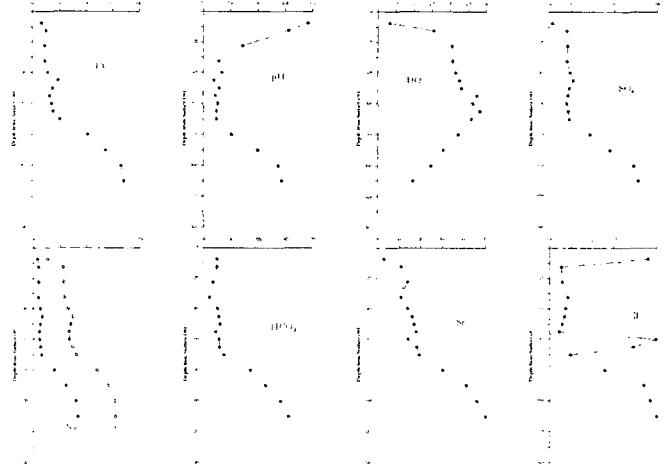


그림 3 BH-2에서 심도별 지하수 성분의 변화 양상.

### 3.2 관정 간 수리적 연결성(hydraulic connection)

관정 내 수리적 특성에 대한 수직적 분포에 대한 조사 결과를 이용하여 관정 간 상호 연결성에 대한 조사 심도를 결정하고, 추적자(NaCl) 시험과 다심도 수직 유향유속 측정을 수행하였다. 추적자 시험의 경우 BH-1에서 추적자를 주입하고, BH-2, -3, -4, -5의 각 2개 심도에서 농도의 변화를 관측하였으며, 다심도 수직 유향유속 측정에서는 자연상태에서의 유향유속과 양수상태(BH-1, BH-5 cross-hole)에서의 유향유속을 관측하여, 관정간의 상호 연결성을 확인하고자 하였다. 각각의 결과는 그림 4, 그림 5에 제시된 바와 같다.

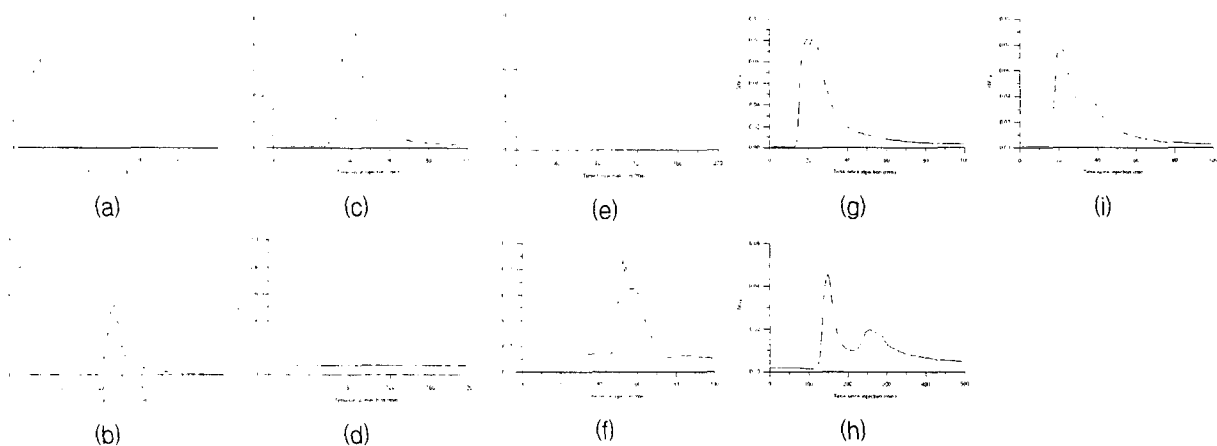


그림 4. NaCl을 이용한 추적자 시험 결과 : (a) 주입공 12m 심도, (b) 주입공 63m, (c) BH-2 18m, (d) BH-2 72m, (e) BH-3 20m, (f) BH-3 70m, (g) BH-4 16m, (h) BH-4 74m, (i) BH-5 13m

특히 유향유속 시험 결과는 주목할 만하다. 자연 상태에서의 공내 지하수의 흐름과 비교하면, 양수 시 BH-1, BH-5 모두 공내 흐름이 매우 커지는 경향을 확인할 수 있다. 이는 BH-1에서 양수하고, BH-5에서 관측한 경우나, 그 반대의 경우 모두 공통적으로 나타나는 현상임을 확인할 수 있다.

#### 4. 토 의

균열암반에서의 지하수 유동에 대한 많은 논의가 국내외적으로 이루어졌으며, 해외에서는 모델개념에서의 균열암반간의 연결성(connectivity)에 대한 개념화에 관한 많은 논의들이 있어 왔다. 하지만, 이러한 논의의 한계는 그것이 개념적 차원에서만 머물 뿐이며, 현장에서의 실제 적용 단계에 이르지 못했다는 것이다. 물론 본 연구 역시 현장 자료에 대한 자료 획득에 그 주안점을 두어 아직은 모델 개념의 connectivity와 현장 자료간의 충분한 연관성을 확정지을 단계에 이르지 못하고 있는 것은 사실이다. 하지만, 다심도 수직적 유향유속 시험 결과를 살펴보면, connectivity, percolation 등 모델 개념의 현장 적용에 대한 가능성을 확인할 수 있다. 그림 5의 결과를 살펴 보면, BH-1의 경우 수직적 유량이 변화하는 구간, 즉 투수성 구간이 모두 BH-5와 연결성을 가지고 있는 것이 아님을 확인할 수 있는데, BH-1의 경우 지표로부터 10m, 15m, 21m, 53m, 62m, 67m, 71m 지점에서 수직적 유량의 변화를 확인할 수 있으나, BH-5와 연결성을 가지고 있는 구간은 15m, 67m, 71m 뿐이다. 즉, 10m, 21m, 62m, 67m 등의 구간은 높은 투수성을 가지나, BH-5와 연결성이 없는 균열이 분포하고 있다는 것이다. 이러한 현상은 percolation theory이 가지는 현실적 배경을 명확히 지시해 주고 있다.

물론 본 연구의 성과는 아직까지 이러한 부분을 충분히 설명할 수 있는 단계에 이르지 못하고 있다. 하지만, 본 연구의 결과는 현장 균열망 연결성(connectivity) 혹은 투과성(percolation) 규명을 위한 선행연구로서는 명확한 성과를 제시하고 있다.

#### 참고문헌

- Balberg I., Berkowitz B. and Drachsler G. E., 1991, Application of a percolation model to flow in fractured hard rocks, *Journal of Geophysical Research*, 96 (B6), 10015-10021
- Berkowitz B. and Braester C., 1991, Dispersion in sub-representative elementary volume fracture networks: Percolation theory and random walk approaches, *Water Resources Research*, 27(12), 3159-3164
- Berkowitz B. and Balberg I., 1993, Percolation theory and its application to groundwater hydrology, *Water Resources Research*, 29(4), 775-794
- Berkowitz B., 1995, Analysis fracture network connectivity using percolation theory, *Mathematical Geology*, 27(4), 467-483
- Bour O. and Davy P., 1997, Connectivity of random fault networks following a power law fault length distribution, *Water Resources Research*, 33(7), 1567-1583
- Bour O. and Davy P., 1998, On the connectivity of three-dimensional fault networks, *Water Resources*

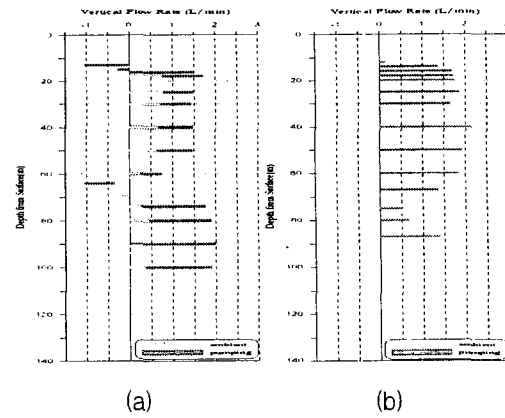


그림 5. 공내 유향-유속 시험 결과 :  
(a) BH-1, (b) BH-5

Research, 34(10), 2611-2622

Renshaw C. E., 1996, Influence of subcritical fracture growth on the connectivity of fracture networks, Water Resources Research, 32(6), 1519-1530

Renshaw C. E., 1999, Connectivity of joint networks with power law length distributions, Water Resources Research, 35(9), 2661-2670