

## 파쇄대 응회암 대수층의 지하수 유동 특성화 기법

김용제<sup>1\*</sup> · 김태희<sup>1</sup> · 김구영<sup>1</sup> · 황세호<sup>2</sup> · 채병곤<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지하수지열연구부, <sup>2</sup>한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

## Analysis of Groundwater Flow Characterization in Fractured Aquifer System

Yongje Kim<sup>1\*</sup> · Taehee Kim<sup>1</sup> · Kue-Young Kim<sup>1</sup> · Se-Ho Hwang<sup>2</sup> · Byung-Gon Chae<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Groundwater and Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

<sup>2</sup>Geological and Environmental Hazards Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

### ABSTRACT

On the basis of a stepwise and careful integration of various field and laboratory methods the analysis of groundwater flow characterization was performed with five boreholes (BH-1, -2, -3, -4, -5) on a pilot site of Natural Forest Park in Guemsan-gun, Chungcheongbook-do, Korea. The regional lineaments of NW-SE are primarily developed on the area, which results in the development of many fractures of NW-SE direction around boreholes made in the test site for the study. A series of surface geological survey, core logging, geophysical logging, tomography, tracer tests, and heat-pulse flowmeter logging were carried out to determine fracture characteristics and fracture connectivity between the boreholes. In the result of fracture connectivity analysis BH-1 the injection well has a poor connectivity with BH-2 and BH-3, whereas a good with BH-4 and BH-5. In order to analyse the hydraulic connectivity between BH-1 and BH-5, in particular, a conspicuous groundwater outflux in the depth of 12 m and influx in the depth of 65 m and 70 m, but partly in/outflux occurred in other depths in BH-5 were observed as pumping from BH-1. On the other hand, when pumping from BH-5 the strong outflux in the depths of 17 m and 70 m was occurred. The spatial connectivity between the boreholes was examined in the depth of 15 m, 67 m, and 71 m in BH-1 as well as in the depth of 15 m, 17 m, 22 m, 72 m, and 83 m in BH-5.

**Key words :** Groundwater flow, Geophysical logging, Tracer test, Flowmeter test, Fracture connectivity

### 요 약 문

국내 수리지질환경에 적합한 다양한 방법론적 접근을 통해 균열암반에서의 지하수 유동 특성을 해석하기 위하여 금산군 남이면 남이자연휴양림 내 연구지역에서 시험시추공 5개(BH-1, -2, -3, -4, -5)를 대상으로 연구를 수행하였다. 연구지역의 균열 발달 특성을 파악하기 위한 기초조사로서 광역 선구조선 분포를 분석한 결과 북서-남동 방향의 연장성이 좋은 구조선들이 우세하게 분포하는데, 이 영향으로 남북방향으로 배열된 시추공들 사이에 파쇄대의 발달과 연결성이 좋다. 현장 지질조사, 시추코아 로깅, 물리검층, 전기비저항 토모그래피, 열추적자시험, 유향·유속검층을 통해 각 시추공에 대한 파쇄대 특성 및 시추공 간의 투수성과 상호 연결성을 해석하였다. 시추공 간의 파쇄대 연결성을 분석한 결과 주입정인 BH-1호공과 BH-2, BH-3은 연결성이 매우 나쁜 반면에 BH-1, BH-4, BH-5호공은 연결성이 매우 좋다. 특히, BH-1호공과 BH-5호공의 수리적 연결성을 파악하기 위하여 BH-1에서 양수하고 BH-5에서 측정할 경우 심도 12 m 지점에서 강한 지하수의 유출이 있으며 이 외의 지점에서는 부분적인 지하수의 유출입이 있다. 주된 지하수 유입은 심도 65 m와 70 m 지점에서 발생하는 것으로 나타났다. 반면에 BH-5에서 양수하고 BH-1에서 측정할 경우에는 심도 17 m 지점에서 시추공으로부터 강하게 지하수의 유출이 발생하고 있음이 확인되었고, 이 외에 70 m 지점에서도 유출이 일어나고 있다. 또한 투수성을 가지는 균열대 중 공간 상호 연결성을 가지는 것으로 확

\*Corresponding author : yjkim@kigam.re.kr

원고접수일 : 2004. 10. 22 게재승인일 : 2005. 3. 11

질의 및 토의 : 2005. 10. 31 까지

인된 것은 BH-1의 경우 15 m, 67 m, 71 m 지점이며, BH-5는 15 m, 17 m, 22 m, 72 m, 83 m 심도의 균열 혹은 균열대에서 BH-1과 상호 연결성이 있다.

**주제어** : 지하수 유동, 물리검층, 추적자 시험, 유향 · 유속검층, 균열 연결성

## 1. 서 론

지하공간 개발의 대상이 되는 암반은 대부분 결정질 암반으로서 미고결 충적층이나 다공질 암반에 비해 지하수의 유동성이 극히 제한된다. 이러한 암반 내에 균열이 존재하는 경우에는 이를 따른 지하수 유동 특성은 다공질 매체에서의 지하수 유동과 전혀 다른 성격을 보인다. 따라서, 지하 암반의 균열발달 상태와 수리지질학적 특성에 대한 정밀조사 및 연구자료는 암반을 개발 · 이용하기 위한 기초적 단계이며, 지하 구조물의 안정성을 유지하는데 필수적인 자료를 산출하게 된다. 또한, 지하에 유입된 오염물질은 자체적으로 느린 속도로 이동하기도 하지만, 이들이 지하수와 접하게 되면 암반 내 균열을 따라 지하수와 함께 이동하게 되므로 그 이동성이 급격히 증가하게 된다. 따라서, 불연속성 암반 내 발달하는 균열을 대상으로 한 구조지질학적, 지구물리학적 및 수리지질학적 특성에 관한 연구는 균열을 따른 지하수 유동과 오염물질 거동을 예측하게 한다.

이러한 물리적 현상에 대한 체계적인 연구는 1990년대 중반 이후 방사성 폐기물 처분장 선정(Jing et al., 1995)과 원유, LPG, LNG 등 지하저장기지 건설물의 증가로 인해 광범위하게 진행되면서 꾸준히 수행되어왔다. 특히 방사성 폐기물 처분장 선정과 원유, LPG, LNG 지하저장기지는 그 운영원리상 지하수와 상호관계는 매우 중요한 의미를 가지고 있다. 국내에서는 방사성 폐기물 처분장 선정을 위한 지하수 유동 특성에 대한 연구가 수행된 바 있으나, 지하수의 물리적 유동 특성에 관한 연구보다는 주로 지하수 내 동위원소의 분포 특성에 대한 연구였다(Lee et al., 2001; Lee et al., 2003). 또한 LPG/LNG 지하저장기지와 관련하여 pilot cavern의 건설에 대한 활발한 연구가 진행되고 있으나 대부분 터널의 물리적 안정성과 균열암반에서의 수리지질학적 현장특성 조사에 대한 연구일 뿐 지하저장 기지의 기밀성 유지의 가장 핵심적인 요인이라 할 수 있는 균열암반에서의 지하수 유동 특성에 관한 체계적인 연구는 거의 수행된 바가 없다.

균열암반에서의 지하수 유동 특성을 체계화하기 위한 연구로서, 최근 선진국가에서는 심도별 수리시험 결과와 더불어 지구물리 자료 등 두 가지 방법을 결합한 해석에 관한 연구는 일부 수행되었으며, 다양한 조사방법(수리시

험, 추적자시험, 전기비저항 토모그래피 등)을 연계 적용하여 이로부터 균열암반에서의 지하수 유동 경로를 추정하는 연구가 진행 중이다(Hyndman et al., 1994; Hyndman and Gorelick, 1996; Day-Lewis et al., 1997; Lane et al., 1998). 이러한 연구 경향은 균열암반 내에서의 지하수 유동 특성을 표현하기 위한 이론적 체계가 없다는 현실에서 어떠한 방법이 보다 효율적인가를 검토하기 위한 방법론적 접근이라고 볼 수 있다.

국내 수리지질환경에 적합한 지하수 유동 특성을 규명하기 위해서는 우선 방법론적 접근법을 통해 균열암반에서의 지하수 유동 특성을 보다 명확히 표현해 줄 수 있는 방법이 무엇인가, 이를 어떻게 정량화 할 것인가, 이를 어떻게 모델과 연계 지을 것인가라는 문제를 해결해야 한다. 이 연구의 목적은 국내 수리지질환경에 적합한 다양한 방법론적 접근을 통해 균열암반에서의 지하수 유동 특성을 해석하기 위한 효율적인 방법 혹은 방법의 조화를 모색하는 것이며, 이는 최적 모델의 선정 및 그 연계성을 규명하기 위한 선행연구의 성격을 가지고 있다.

## 2. 지질과 광역 선구조

연구지역은 충청남도 금산군 남이면 남이자연휴양림 일대이다. 이 지역의 지질은 하부로 부터 시대미상의 변성 퇴적암류, 쥐라기 혹은모 화강암, 백악기의 역질사암층, 응회암 및 협재 퇴적암류, 제충을 관입하는 산성 화산암류, 규장암, 홍색의 장식 화강암 및 석영 반암이 분포하며, 그 상위에 부정합의 제4기 충적층이 분포되어있다(Fig. 1).

시험시추공 설치지역에 분포하는 암질은 백악기의 서대산 응회암으로서, 안산암질 응회암이며 대체로 회녹색 응회암질 바탕에 둥근모양(rounded)의 역들이 포함되어 있고, 때때로 각상의 다른 암편을 포함하기도 한다. 일부 노두에서는 용결응회암이 관찰되는데 이들은 암편들이 용결(welded)되어 둥근 모습을 보이며 부분적으로 결정질 또는 유리질인 것들도 많이 발견된다.

연구지역 주변의 광역 선구조선 분포는 이 지역의 균열 발달 특성과 밀접한 연관을 갖는다. 대체로 북서-남동방향의 연장성이 좋은 대규모 선구조선(12~15 km)이 우세하게 분포하며 조구조적(tectonic) 활동에 의해 형성된 전형적 선구조선의 양상을 보인다(Fig. 1). 따라서, 연구지역

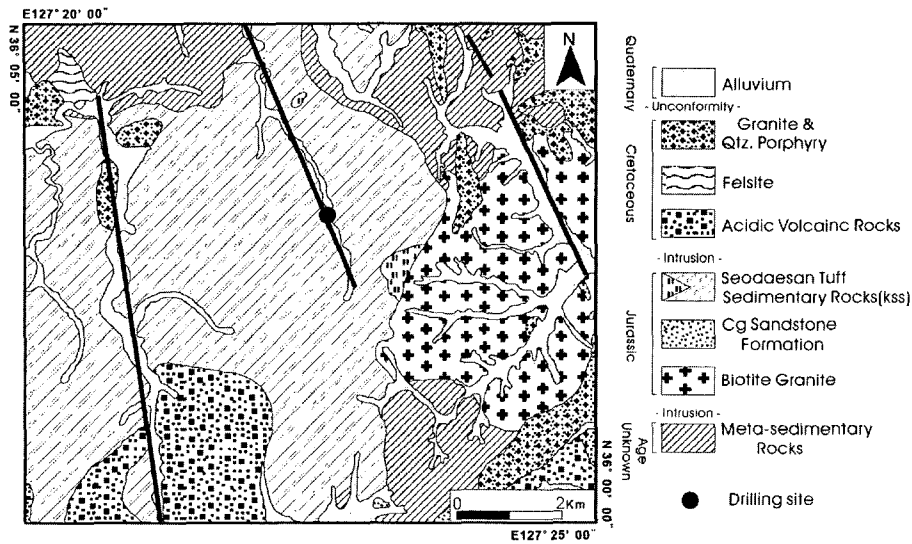


Fig. 1. Simplified geologic map of the study area.

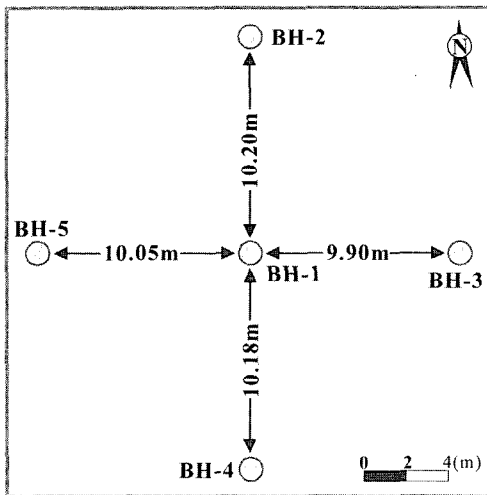


Fig. 2. The borehole array in the pilot test site.

내 대규모 능선과 계곡은 대부분 북서-남동방향으로 분포하고 있다. 또한 이 들은 서로 아평행한(sub-parallel) 연장이 짧은 다수의 선구조선을 발달시키는데 이 중 하나의 선구조선 상에 연구부지가 위치한다.

### 3. 연구방법

#### 3.1. 균열암반 매질의 기본 특성 조사 방법

연구부지는 행정구역상 충청남도 금산군 남이면 남이자 연휴양림 내에 위치하고 있다. 균열암반 대수층에서의 지하수 유동 특성 해석을 위한 다양한 연구 방법들을 수행하기 위해 NX구경으로 145 m 깊이의 시험시추공을 5개 굴착했으며, 시추공의 배열은 Fig. 2에 나타나있다.

#### 3.1.1. 지표하 균열특성

지하암반에 발달하는 균열 특성파악을 위해 채취된 시추코어를 대상으로 정밀 검층(logging)을 실시했다. 코어 검층은 암층 구분, 색깔, 풍화도, 균열정도 및 균열면 상태를 정밀 분석하였다. 풍화도, 강도, 균열정도의 구분은 여러 기준이 제시되어 있으나(Deere et al., 1977; ISRM, 1978), 이러한 기준을 응용하여 이번 조사목적에 맞도록 수정하여 사용하였다. 특히, 균열면에 대한 조사는 ISRM(1978) 기준에 의거하여 균열면 심도, 종류, 경사각, 충전물질 등을 기재하였다.

#### 3.1.2. 물리검층

균열암반 대수층의 지하수 유동 특성을 파악하기 위하여 공경검층, 전기검층, 자연감마선 검층, 온도/전기전도도 검층, 유량·유속 검층을 수행하였다. 최근, 균열암반의 수리특성 평가에 많이 이용되는 유량·유속 검층은 공내수의 유동특성을 직접적으로 측정할 수 있는 특징이 있기 때문에 기존의 물리검층과는 달리 수리지질학적인 정보를 제공할 수 있는 장점을 갖고 있다.

#### 3.1.3. 전기비저항 토모그래피

전기비저항 토모그래피는 지오토모그래피(geotomography)의 개념을 일반적인 전기비저항 탐사에 접목시킨 탐사방법으로 시추공 간의 지질구조에 대한 고해상도의 영상을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 이 연구에서는 지하수 유동경로의 3차원적인 영상화를 목적으로 과쇄대의 분포를 정밀하게 파악하기 위하여 다수의 시추공에 대하여 수

행되었다. 탐사에 이용된 장비로는 미국 AGI사의 다중채널 전기비저항 탐사기인 SuperSting R8/IP 시스템을 이용하였다.

**3.2. 균열압반 매질내 상호 연결성 조사 방법**

균열압반 매질의 기본 특성 조사 결과를 통해 획득한 자료를 토대로, 균열압반에서 지하수의 물리적 유동을 직접 관측하여 각 공내 투수성 균열 및 각 공간 상호 연결 정도를 정성적으로 규명하기 위하여 열추적자를 이용한 추적자 시험과 공내 1-D 유향·유속 시험을 수행하였다.

**3.2.1 추적자 시험**

기본특성 조사결과를 근거로 BH-1호공을 통해 온도가 다른 물 또는 일정한 NaCl 농도의 물을 직접 주입하였으며, BH-1호공 뿐만 아니라 BH-2, -3, -4, -5호공에서 온도의 경우 주입전후 공내 온도에 대한 검층을 통하여 그 상호 연결 구간의 심도에 대한 기본 자료를 얻는데 활용하였고, 이를 바탕으로 EC(electrical conductivity)의 변화를 실시간으로 관측하는 방법을 통해 각 공간 지하수의 물리적 흐름을 직접 모니터링하는 방법을 적용하였다.

**3.2.2 공내 유향·유속 시험**

1980년대에 개발된 1-D 유향·유속검층(Hess, 1982; Hess, 1986) 중에서 매우 낮은 유속을 측정하는 Heat-pulse type의 유향·유속 검층 방법을 이용하여 시추공 간 파쇄대의 수리적 연결성을 파악하였다. 이러한 방법은 일반적으로 투수성 파쇄대의 평가, 시추공 간 수리적으로 연결된 파쇄대의 확인, 투수량계수 추정(Paillet, 1998; 2000; 2001) 등에 활용성이 확장되고 있다. 이 연구는 공내에서 지하수의 물리적 흐름을 직접 관측하는 방법으로 공내 지하수 흐름의 물리적 변화를 직접 관측하였다. 본 연구의 실제 조사에서는 인위적인 수위변화를 가하지 않은 자연상태에서 1차 조사를 수행하였고, 이와 비교를 위하여 양수를 병행하며 시추공 BH-1과 BH-5호공에서 자료를 취득하였다.

**4. 현장 균열망 내 연결성 결과**

**4.1. 파쇄대의 특성**

시험시추공(BH-1, -2, -3, -4, -5)으로부터 획득한 코아를 이용하여 정밀 로깅을 실시한 결과, 연구지역의 암반

은 단층에 의해 심한 파쇄대가 발달되어 있다. 특히, 지표 부근에서의 파쇄 및 풍화 양상은 5개 시추공에서 유사하게 나타난다. 지표 하 약 30 m 이내의 구간에서는 각 시추공에서 인지된 파쇄대가 서로 연결되어 있을 가능성이 매우 높다. 그 하부는 시추공별로 균열발달 상태가 각각 다르게 나타나고, 일부는 시추공 간에 연결 가능성이 높은 것으로 예상되는 구간들도 있다(김태희 등, 2004; 황세호 등, 2004).

시추공별 파쇄대의 연결 상태를 남북방향과 동서방향으로 나누어 조사한 결과, 연구지역에 남북방향의 단층대가 주로 발달한 관계로 남북방향으로 배열된 시추공들 사이에 파쇄대의 발달이 현저할 뿐만 아니라, 파쇄대간 연결성도 좋다. 특히 연구지역에 발달한 단층은 직선상의 교차 단층임으로, 남북방향으로 배열된 시추공들과 교차하는 파쇄대 또는 단층들은 연결성이 매우 좋을 것이 확실시 된다. 반면, 동서방향으로 배열된 시추공들은 파쇄대의 연결성이 남북방향에 비해 나쁘다. 특히, BH-3호공의 경우 단층대에서 벗어난 지점에 위치하므로 시추공과 교차하는 파쇄대가 다른 시추공에 비해 매우 작다. 그러나, BH-5의 경우는 단층대 중심부에 위치하고 있기 때문에 시추공 전체가 파쇄대라고 표현할 수 있을 정도로 암석의

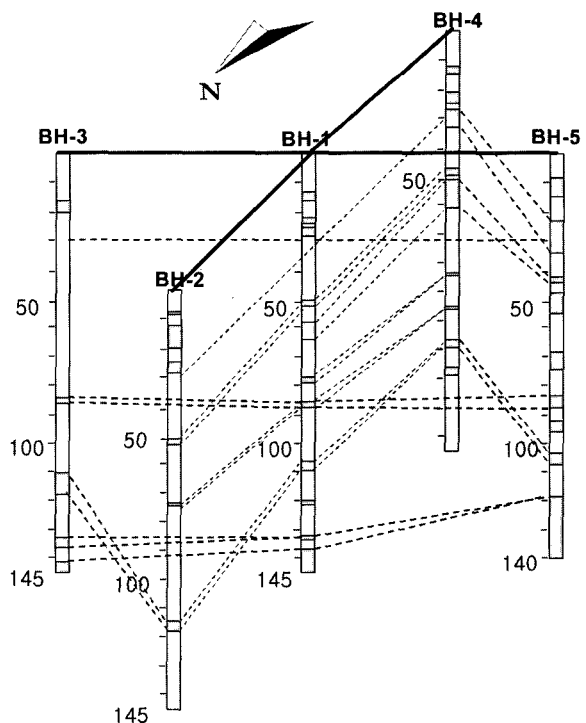


Fig. 3. A diagram showing the fracture connectivity among the boreholes (BH-1, -2, -3, -4, -5) determined based on the core logging analysis.

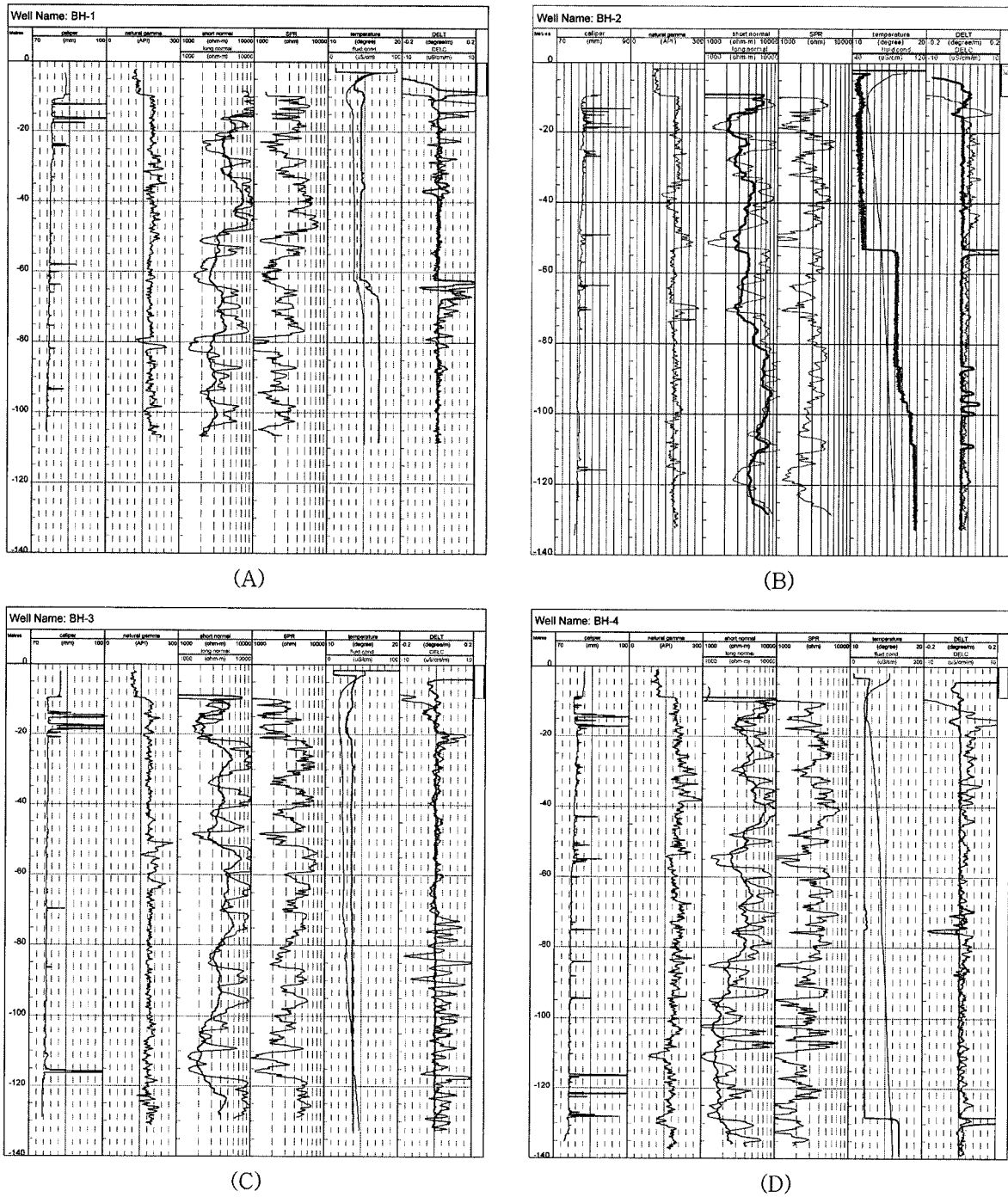
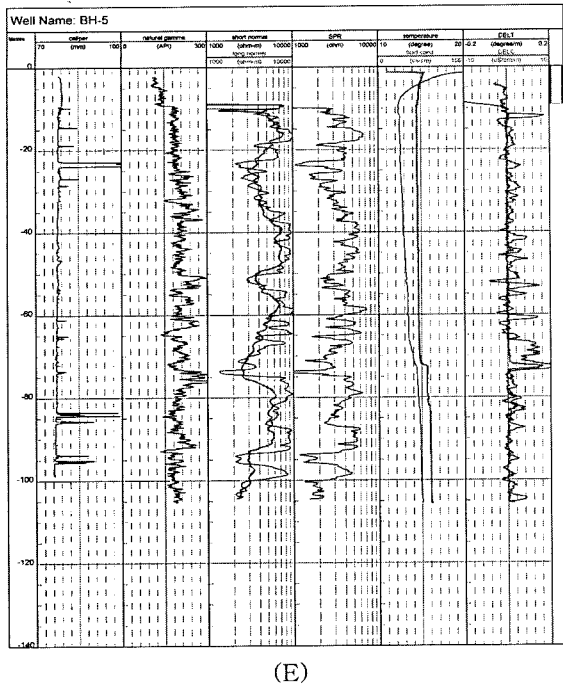


Fig. 4. Results of the geophysical logging of the boreholes. (A) BH-1, (B) BH-2, (C) BH-3, (D) BH-4, (E) BH-5. SPR, DELT, and DELC indicates Single Point Resistance, DELTA Temperature, and DELTA Conductivity, respectively.

파쇄가 매우 심하다. 각 시추공 간 파쇄대의 연결성을 Fig. 3에 나타내었다. 시추공 중 BH-1, BH-4, BH-5는 상호간 파쇄대 연결성이 상당히 좋은 반면, BH-2와 BH-3은 연결성이 좋지 않다. 이와 같은 양상은 단층대와의 거리 또는 상대적 위치에 따라 각 시추공별로 교차하는 균

열과 파쇄대의 분포특성이 매우 큰 차이가 있음을 지시한다.

Fig. 4(A-E)는 5개 시추공에서 수행한 물리검층 결과이다. 공경검층으로 확인되는 파쇄대는 많지만 지하수 유동의 가능성이 높은 파쇄대를 파쇄대 지시자(fracture



(E)

Fig. 4. Results of the geophysical logging of the boreholes. (A) BH-1, (B) BH-2, (C) BH-3, (D) BH-4, (E) BH-5. SPR, DELT, and DELC indicates Single Point Resistance, DELta Temperature, and DELta Conductivity, respectively.

indicator)인 공경검층, 단극저항검층, 온도/전기전도도 변화율검층 자료를 이용하여 분류하였다. Fig. 4에서 caliper는 공경검층으로 단위는 mm, natural gamma는 자연감마선검층으로 단위는 ohm-m, SPR(Single Point Resistance)은 단극저항으로 단위는 ohm, temperature와 fluid cond.은 공내수의 온도와 전기전도도검층으로 단위는 degree와  $\mu\text{S/cm}$ , DELT와 DELC는 심도가 1 m 증가할 때의 온도와 전기전도도의 변화율이다. BH-1호공의 경우, 약 13 m, 35 m, 65 m, BH-2호공의 경우, 약 15 m, 50 m, BH-3호공의 경우, 약 15 m, 70 m, 115 m, BH-4호공의 경우, 약 15 m, 70 m, 128 m, BH-5호공의 경우, 약 14 m, 64 m 구간에서 파쇄대가 발달되어 있다. 특히, 공경검층으로 확인되는 파쇄대 중에서 비교적 규모가 큰 파쇄대나 구간 중에서 단극저항 값이나 온도/전기전도도의 변화가 거의 없는 경우가 매우 많은데 이들은 지하수 유동이 없는 닫힌 파쇄대 또는 시추로 인해 발생한 인위적인 파쇄대로 해석된다.

전기비저항 토모그래피를 이용한 지하수 유동경로를 파악하기 위하여 현장조사를 바탕으로 총 10개의 단면을 역산을 통하여 구성하였으며, 저비저항대를 중심으로 지하수 유동 가능성을 3차원적으로 검토하였다. Fig. 5는 시추

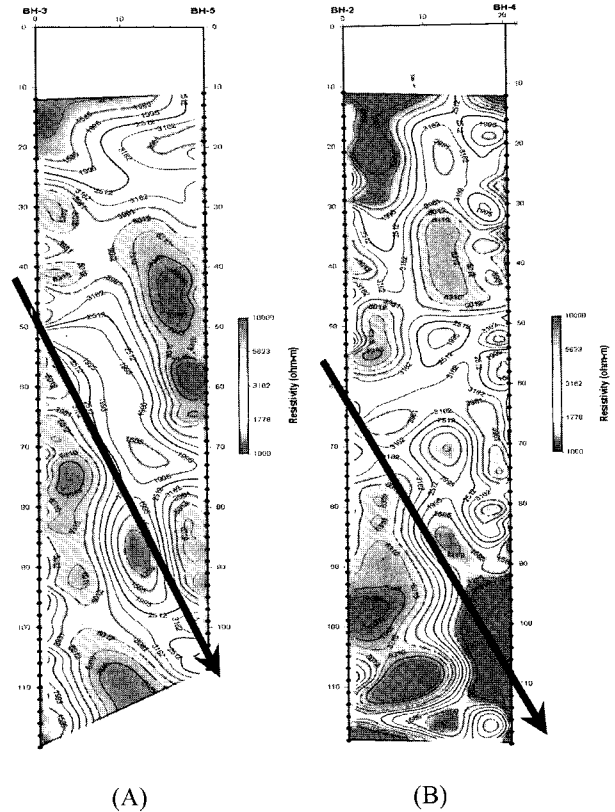


Fig. 5. Results of electrical resistivity tomography. (A) BH-3~BH-5, (B) BH-2~BH-4.

공들에 대한 전기비저항 토모그래피 역산 결과로서, 대략 30 m 상부의 경우에는 전체적으로 낮은 전기비저항 값을 보이는데 이는 시추검층 자료에서 해석되는 천부의 파쇄나 풍화로 인하여 나타나는 현상으로 보인다. 하부의 낮은 전기비저항을 보이는 지역들은 저비저항대 방향으로 파쇄대가 발달하고 있을 가능성이 높은 지역으로서 현장 지질조사를 통해 확인된 단층대에 의한 연약대로 해석된다.

#### 4.2. 균열의 투수성 및 연결성

연구지역 시추공 간의 지하수 유동 특성을 파악하기 위하여 2003년 4월과 8월 2회에 걸쳐 열추적자를 이용한 추적자 시험을 실시하여 온도 및 전기전도도의 변화를 관찰하였다. Fig. 6은 5개의 시추공에 대한 열추적자 시험결과이다. 주입정 BH-1호공의 경우, 천부 약 15 m 부근의 파쇄대는 5개 시추공 간에 수리적으로 연결된 것으로 해석된다. BH-1~BH-2호공의 경우, 천부 약 15 m의 파쇄대를 통해 이동한 추적자가 약 45 m 또는 70 m 부근의 파쇄대를 통하여 밖으로 이동하는 것으로 해석되며, BH-1~BH-3호공의 경우, 천부 약 15 m의 파쇄대를 이동한

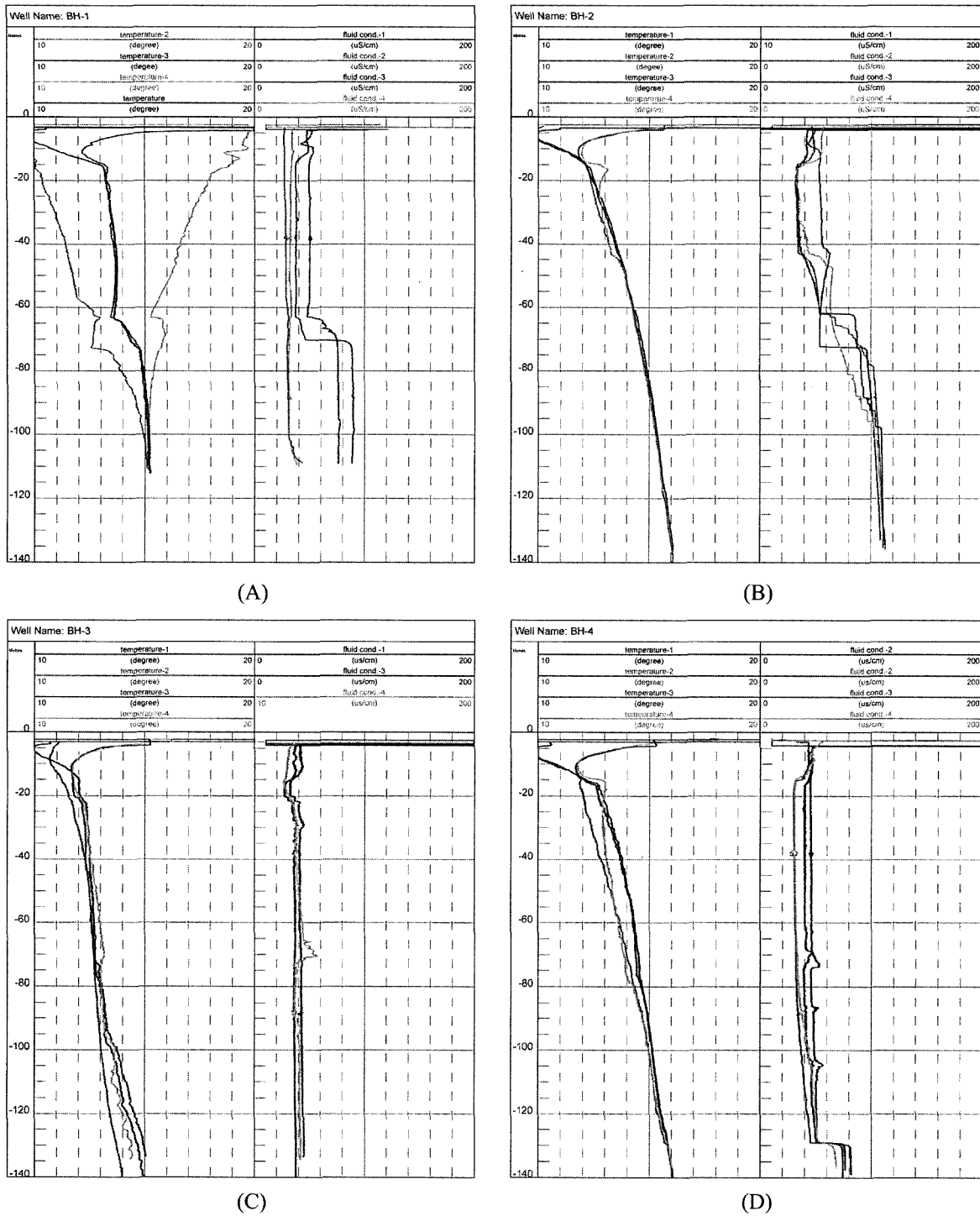
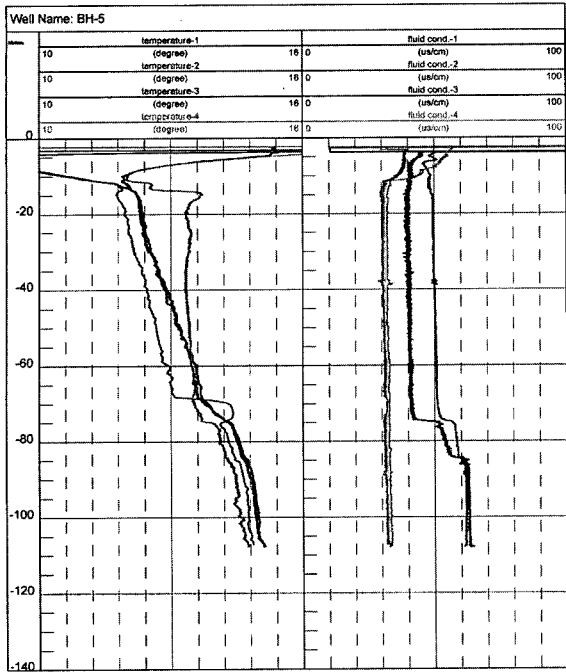


Fig. 6. Results of temperature and EC test from the boreholes (A) BH-1, (B) BH-2, (C) BH-3, (D) BH-4, (E) BH-5.

주입자가 약 70 m의 파쇄대를 통하여 유입된 지하수와 함께 시추공 바닥방향으로 유동하는 것으로 보이며, BH-1~BH-4호공의 경우, 천부 약 15 m의 파쇄대를 통하여 이동한 주입자가 약 75 m와 130 m의 파쇄대를 통하여

시추공 밖으로 유출되며, BH-1~BH-5호공의 경우, 천부 약 15 m와 75 m에 위치하는 파쇄대를 따라서 이동한 추적자가 시추공 바닥으로 이동하여 밖으로 유출되는 것으로 해석된다. 특히, 주입정인 BH-1호공과 BH-2 및



(E)

Fig. 6. Results of temperature and EC test from the boreholes (A) BH-1, (B) BH-2, (C) BH-3, (D) BH-4, (E) BH-5.

BH-3은 수리적인 연결성이 매우 작은 반면에 BH-1, BH-4, BH-5호공은 좋은 개연성이 존재한다.

위 결과를 근거로 NaCl을 이용한 추적자시험을 수행하였다. 추적자시험은 연구지역이 자연적인 수리구배가 아주 적은 특성(수리구배가 가장 심한 BH-1호공과 BH-3호공에서 수리경사도: 약 0.0024-0.0049)을 가지고 있기 때문에 인위적인 수리구배를 이용하였으며, BH-1호공에서 물을 주입하여 방사상흐름을 만든 후 수리구배가 안정된 상태에서 추적자를 주입하였다. Fig. 7에 나타나있듯이 주입공 BH-1호공을 기준으로 볼 때 BH-2의 경우 상부 18 m 심도에서의 연결성은 확인되었으나 중하부 72 m 지점에서의 연결성은 확인되지 않았다. 또한 BH-3의 경우는 반대로 상부의 연결성은 없는 반면 하부 70 m 지점에서 주입정과의 연결성이 확인되었다. BH-4와 BH-5호공의 경우 상부에서는 즉각적인 반응이 나타났으며, 특히 BH-4 74 m 지점에서는 다른 관정들에 비해 상대적으로 추적자의 이동시간이 긴 것으로 나타났으며 두 번의 상승점을 보이는데 이는 다중 채널에 의한 연결성이 있음을 명확히 보여주고 있다.

시추공 BH-1호공과 BH-5호공의 수리적 연결성을 파악하기 위하여 양수를 병행한 유향·유속 검층을 수행하였

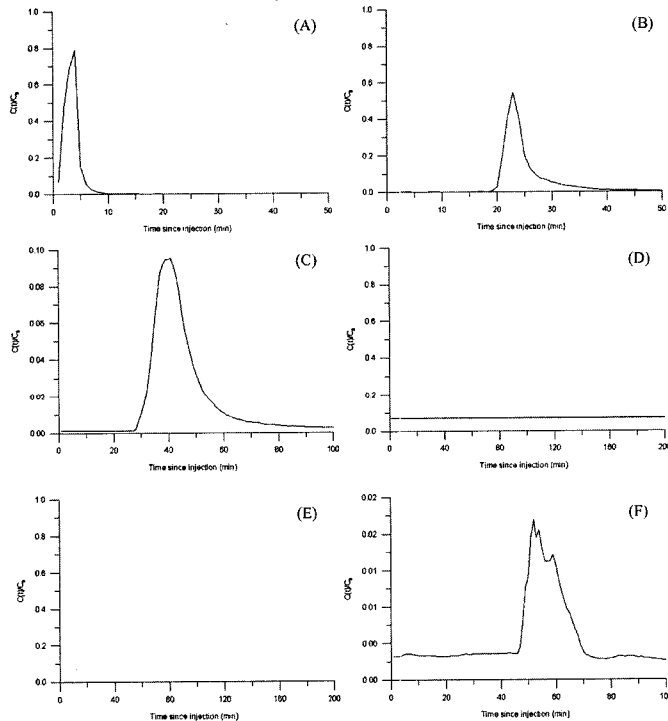


Fig. 7. Results of NaCl test from the boreholes. (A) Injection well BH-1 of 12 m in depth, (B) Injection well BH-1 of 63 m, (C) BH-2 of 18 m, (D) BH-2 of 72 m, (E) BH-3 of 20 m, (F) BH-3 of 70 m, (G) BH-4 of 16 m, (H) BH-4 of 74 m, (I) BH-5 of 13 m.



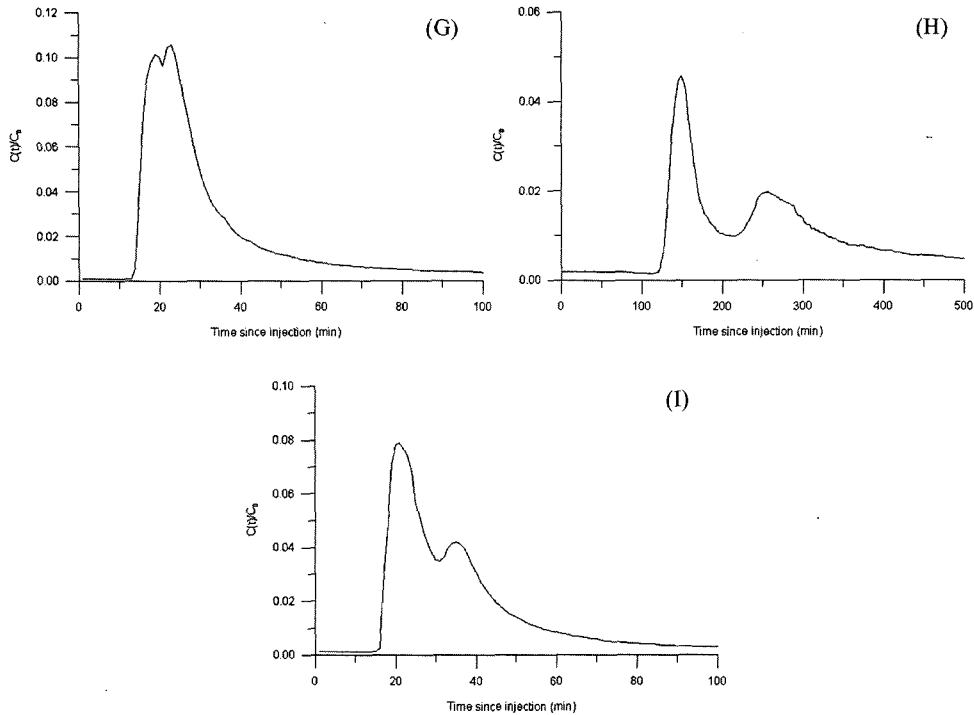


Fig. 7. Results of NaCl test from the boreholes. (A) Injection well BH-1 of 12 m in depth, (B) Injection well BH-1 of 63 m, (C) BH-2 of 18 m, (D) BH-2 of 72 m, (E) BH-3 of 20 m, (F) BH-3 of 70 m, (G) BH-4 of 16 m, (H) BH-4 of 74 m, (I) BH-5 of 13 m.

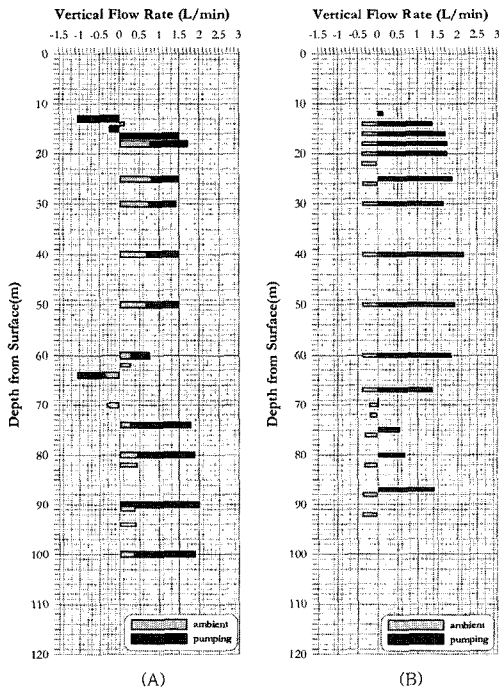


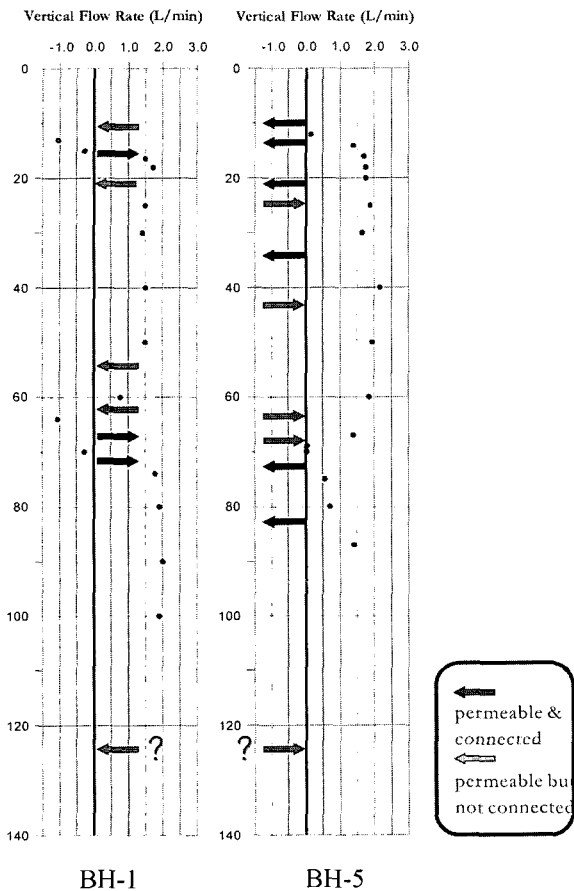
Fig. 8. Results of the 1-D flowmeter test from the borehole BH-1 (A) and BH-5 (B). (A) shows the monitoring results of BH-1 during pumping of BH-5 and (B) shows the monitoring results of BH-5 during pumping of BH-1. The positive (+) and negative (-) numbers indicates the groundwater upflow and downflow, respectively.

으며, 그 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 ambient는 양수를 하지 않은 자연상태의 지하수조건을 의미한다. BH-1호공에서 양수하고 BH-5호공에서 측정할 경우 심도 12 m 지점에서 강한 지하수의 유출이 있으며 이 외의 지점에서는 부분적인 지하수의 유출입이 있음이 확인되었다. 주된 지하수 유입 지점은 심도 65 m와 70 m 지점으로 판단된다. 반면에, BH-5호공에서 양수하고 BH-1호공에서 측정할 경우에는 심도 17 m 지점에서 시추공으로부터 강하게 지하수의 유출이 발생하고 있음을 확인하였고, 이 외에 70 m 지점에서도 유출이 발생하고 있음을 알 수 있다.

### 5. 고 찰

시추공아 로깅, 물리검층, 토모그래피 분석 결과를 토대로 열추적자 및 NaCl 추적자 시험과 유향·유속 검층 결과를 종합 검토하여 각 시추공 간의 투수성 및 상호 연결성을 해석하였다(Fig. 9). 특히, NaCl 추적자 시험과 유향·유속 시험의 결과는 균열암반에서 지하수의 직접적 물리적 이동에 대한 지표로서 지시하는 바가 매우 크다.

주 파쇄대의 추정 심도를 근거로 한 NaCl 추적자 시험 결과를 살펴보면, 기본조사를 통해 추정된 주요 파쇄대 구



**Fig. 9.** Potential groundwater flow fracture connectivity between BH-1 and BH-5 determined from the vertical flowmeter test results. The dark arrow and light arrow indicates the groundwater outflow and inflow at the borehole, respectively. The dots represent the vertical flow rate analyzed in different depth.

간은 각 공별로 직접 연결되어 있다는 점이 명확히 보여지고 있다. 이는 유향·유속 시험 결과를 검토해 보면 보다 명확해 진다. 물론, 유향·유속 시험의 경우 보다 정밀한 조사에 따른 시간적 제약때문에 전체 공에 대해 수행하지 못하고, BH-1과 BH-5호공 두 공만을 대상으로 조사하였다는 한계가 존재하지만, 이 결과를 살펴보면 균열암반 매질에서의 상호 연결성 규명에 대한 유효한 조사 방법임이 명확히 밝혀졌다. 즉, 가장 기본적인 질량보존 (mass balance)의 관점에서 본다면 공내에서 수직적 지하수의 흐름 총량이 변화한다는 것은 공내로 지하수의 유입 혹은 공밖으로 지하수의 유출이 발생한다는 것을 의미하며, 해당 지점에 분포하는 균열 혹은 균열대는 실제 투수성을 가지고 있다는 직접적인 지시자가 되는 것이다. 결국, Fig. 9와 같이 BH-1호공의 경우 투수성 균열 혹은 균열대로 해석되는 심도는 지표로부터 10 m, 15 m, 21 m, 53 m, 62 m, 67 m, 71 m 지점으로 확인되었고, BH-

5호공은 15 m, 17 m, 22 m, 25 m, 33 m, 43 m, 65 m, 68 m, 72 m, 83 m 심도의 지점에서 투수성을 가지는 균열 또는 균열대가 존재한다고 할 수 있다. 하지만, 양수를 병행하며 수행한 유향·유속 시험의 결과는 투수성뿐만 아니라, 각 공간 균열망의 연결성에 대한 중요한 지시자 임을 확인할 수 있다. Fig. 9에 제시된 바를 보면, BH-1호공에서 양수하면서 BH-5호공에서 유향·유속 시험의 결과를 검토하여 보면, 자연적인 유향에 대해 반대 방향의 유향 또한 강한 유속으로 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이를 보다 자세히 검토하면, 25 m, 43 m, 65 m, 68 m 지점에서는 공내로 지하수의 강한 유입이 발생하고 있는 것을 확인할 수 있다. 만일 일반적으로 가정하듯이 양수 시 양수정을 중심으로 방사상의 지하수 흐름이 발생하게 된다면, 실제 BH-1호공에서 양수를 수행한 경우 BH-5호공으로의 지하수 유입은 발생할 수 없다. 즉, 지하수의 흐름은 BH-1호공을 향하여야 하므로 BH-5호공에서는 지하수가 공내에서 유출되거나 혹은 수직적 유량의 변화가 없어야 한다. 하지만, 앞서 언급한 바와 같이 BH-1호공에서 양수한 경우 BH-5호공 내로 지하수의 유입이 강하게 발생하는 구간이 있다는 것은 이 구간의 균열 혹은 균열대가 BH-1호공과 직접적 연결성이 존재하지 않으며, BH-5호공이라는 관정을 매개로 BH-1호공 방향으로 지하수가 흐른다는 것을 의미한다. 이는 BH-5호공에서 양수하면서 BH-1호공에서 수직적 유향·유속을 측정 한 결과에 대해 마찬가지로 해석할 수 있다. 이러한 결과는 균열암반 매질에서 지하수 유동에 대한 해석을 어떻게 할 것인가에 대해, 특히 모델링 해석의 수행방법 채택 상에 중요한 지표를 제공한다. 즉, 일반적으로 적용하여 연속체로서의 매질의 개념이 균열암반 매질에서는 유효하지 않다는 것이다.

## 6. 결 론

균열암반의 지하수 유동 특성을 해석하기 위하여 금산군 남이면 남이자연휴양림 내 연구지역에서 현장 지질 조사, 물리검층, 전기비저항 토모그래피, 추적자시험, 유향·유속 검층을 수행하였다. 시추공과 단층대의 상대적 위치에 따라 시추공 간의 파쇄대의 연결성은 큰 차이를 보인다. 단층대와 비교적 가까운 거리에 위치한 BH-1, BH-4, BH-5호공의 경우는 상호간의 연결성이 좋다. 그러나, 단층대 가장자리 또는 단층대에서 벗어난 지점에 위치하는 BH-3호공의 경우는 파쇄대 발달양상이 다른 시추공과 현격한 차이를 보이고, 시추공 간의 연결성도 매우 약한 것

으로 나타났다. 이 결과를 토대로 시추공에 대한 물리검층과 토모그래피 결과를 이용하여 정확한 균열과 파쇄대의 방향을 산출하고, 추적자 시험과 유향·유속 검층 결과를 종합하여 투수성 균열 및 상호 연결성을 결정하였다. 특히, BH-1호공은 지하수가 유입, 유출되는 구간이 존재하였으며 이와 같이 지하수 유동 특성이 복잡한 경우에 유향·유속검층이 매우 효과적으로 적용될 수 있음이 확인되었다.

이러한 연구 결과는 실제 균열암반 매질에서 지하수의 물리적 유동 특성을 해석함에 있어서 본 연구에서 적용된 지하수시스템에 대한 체계적 통합 해석 기법이 매우 중요함을 지시한다. 물론 본 연구는 정성적 결과를 제시하고 있지만, 추후 균열암반 매질에서의 지하수 유동 해석의 정량화 및 percolation 개념에 기반 한 모델링 기법의 현장 적용성에 대한 실제적 검토를 위해서는 이러한 통합 해석 방법은 매우 유용한 정보를 제공해 줄 수 있다는 점이 본 연구를 통해 확인되었다.

**7. 향후 연구 방향**

서론에서 밝힌 바와 같이 본 연구는 균열암반 매질에서의 지하수 유동 해석을 위한 최적 모델의 선정 및 그 연계성을 규명하기 위한 선행연구의 성격을 가지고 있다. 따라서 균열암반 매질에서의 지하수 유동에 대한 예측 해석을 위해서는 균열암반 매질에서의 지하수공의 역할에 대한 규명, 이에 대한 해석상의 영향 제거 방법 및 현장 연결성(in-situ connectivity)에 대한 정량화 방법, 현장 균열의 기하학적 특성에 대한 upscaling 방법 등에 대한 추가적인 연구가 요구되며, 이를 바탕으로 아직까지 개념 모델 상에서만 논의되고 있는 percolation theory의 실제 자료와의 연계 방법에 관한 연구 등이 심도 있게 진행될 필요가 있다.

**사 사**

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 3-2-2)에 의해 수행되었습니다.

**참 고 문 헌**

김태희, 신재현, 황세호, 김구영, 조병욱, 채병곤, 김용제, 2004, 지하수 유향-유속 자료 및 균열 분포를 이용한 균열암반 특성화 기법, 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회, 155-158.

황세호, 김용제, 염병우, 고진석, 이상규, 2004, 물리검층을 이용한 균열암반의 지하수 유동특성 연구, 한국지구시스템공학회 2004년도 춘계학술발표회논문집, 167-171.

Day-Lewis, F.D., Lane, J.W., Haeni, F.P. Jr., and Gorelick, S.M., 1997, One Approach to Identifying Flow Paths in Fractured Rock: Combining Borehole Radar, Saline Tracer Tests, and Numerical Modeling, in EOS, Transactions, *American Geophysical Union*, Fall Meeting **78**(46), 323.

Deere, D.U., Dunn, J.R., Fickies, R.H., and Proctor, R.J., 1977, Geologic Logging and Sampling of Rock Core for Engineering Purposes(Tentative), American Institute of Professional Geologists, p. 43

Hess, A.E., 1982, A heat-pulse flowmeter for measuring low velocities I 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, *Can. J. Earth Sci.* **23**, 69-78.

Hyndman, D.W., Harris, J.M., and Corelick, S.M., 1994, Coupled seismic and tracer-test inversion for aquifer property characterization, *Water Resources Research*, **30**(7), 1965-1977.

Hyndman, D.W. and Gorelick, S.M., 1996, Estimating lithologic and transport properties in three dimensions using seismic and tracer data: The Kesterson Aquifer, *Water Resour. Res.* **32**(9), 2659-2670.

ISRM, 1978, International Society for Rock Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, *Int. J. of Rock Mech., Mining Sci. & Geomech.* Abstracts, **15**, 319-368.

Jing, L., Tsang, C.F., and Stephansson, O., 1995, DECOVALEX- An international cooperative research project on mathematical models on coupled THM processes for safety analysis of radioactive waste repositories, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, **32**(5), 389-398.

Lane, J.W., Haeni, F.P., Jr., and Day-Lewis, F.D., 1998, Use of Time-Lapse Attenuation-Difference Radar Tomography Methods to Monitor Saline Tracer Transport in Fractured Crystalline Rock, in Proceedings of GPR 98, Lawrence, Kansas, May 27-30.

Lee, K.Y., Yoon, Y.Y., Lee, S.G., Lee, D.H., Kim, Y., and Woo, N.C., 2001, Sorption of radionuclides on the container wall during batch migration studies, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **249**(2), 271-278.

Lee, S.G., Lee, D.H., Kim, Y., Chae, B.G., Kim, W.Y., and Woo, N.C., 2003, Rare earth elements as an indicator of groundwater environment changes in a fractured rock system: Evidence from fractured-filling calcite, *Appl. Geochem.* **18**, 135-143.

Paillet, F.L., 1998, Flow modeling and permeability estimation using borehole flow logs in heterogeneous formations, *Water*

*Resour Res.* **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 the study of heterogeneous aquifer, *Ground Water*, **39**, 667-675.