

균열암반 매질 내 단공 및 공간 간섭 시험에 대한 현상적 비교

김태희* · 김구영 · 오준호 · 황세호

한국지질자원연구원

The Phenomenological Comparison between Results from Single-hole and Cross-hole Hydraulic Test

Kim Taehee* · Kim Kue-Young · Oh Jun-Ho · Hwang Se-Ho

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

ABSTRACT

Generally, fractured medium can be described with some key parameters, such as hydraulic conductivities or random field of hydraulic conductivities (continuum model), spatial and statistical distribution of permeable fractures (discrete fracture network model). Investigating the practical applicability of the well-known conceptual models for the description of groundwater flow in fractured media, various types of hydraulic tests were applied to studies on the highly fractured media in Geumsan, Korea. Results from single-hole packer test show that the horizontal hydraulic conductivities in the permeable media are between $7.67 \times 10^{-10} \sim 3.16 \times 10^{-6}$ m/sec, with 7.70×10^{-7} m/sec arithmetic mean and 2.16×10^{-7} m/sec geometric mean. Total number of test interval is 110 at 8 holes. The number of completely impermeable interval is 9, and the low permeable interval - below 1.0×10^{-8} m/sec is 14. In other words, most of test intervals are permeable. The vertical distribution of hydraulic conductivities shows apparently the good correlation with the results of flowmeter test. But the results from the cross-hole test show some different features. The results from the cross-hole test are highly related to the connectivity and/or the binary properties of fractured media; permeable and impermeable. From the viewpoint of the connection, the application of the general stochastic approach with a single continuum model may not be appropriate even in the moderately or highly permeable fractured medium. Then, further studies on the investigation method and the analysis procedures should be required for the reasonable and practical design of the conceptual model, with which the binary properties, including permeable/impermeable features, can be described.

Key words : Fracture media, Conceptual model, Multi-level hydraulic test, Single-hole test, Cross-hole test, Binary properties

요 약 문

일반적으로 균열암반 매질은 수리전도도 혹은 그 난수장이나(연속체 모형), 투수성 균열의 공간적 통계적 분포(불연속균열망 모형)를 이용하여 표현할 수 있다. 본 연구에서는 잘 알려진 균열암반매질의 개념 모형의 실질적 적용성을 검토하기 위하여 충청남도 금산군 남이면 남이자연휴양림 내 한국지질자원연구원 시험부지 내에서 다양한 현장 수리시험을 적용하고, 그 결과를 비교검토하였다. 본 지역에서 투수성 구간의 수리전도도 값은 $7.67 \times 10^{-10} \sim 3.16 \times 10^{-6}$ m/sec이며, 산술평균은 7.70×10^{-7} m/sec, 기하평균은 2.16×10^{-7} m/sec이다. 단공 패커 시험의 경우 총 8개의 공에서 총 110개 구간에 대한 시험을 수행하였다. 이 시험 구간 중 불투수성 구간은 총 9개, 1.0×10^{-8} m/sec 이하의 수리전도도를 가지는 저투수성 구간은 총 14개로 전반적으로는 투수성이 양호한 것으로 확인되었다. 단공 패커시험을 통해 나타난 수리전도도의 수직적 분포는 단공 유황·유속 시험 결과와 비교적 잘 부합하는 양상으로 나타나고 있다. 하지만, 공간 수리시험의 결과는 전반적으로 투수성이 양호하다는 단공 시험 결과와는 다소 다른 양상을 보인다. 공간 시험의 결과는 투수성보다는 연결성을 포함한 균열암반 매질의 투수성/불투수성의 이진법적 특성에 의해 더 큰 영향

*Corresponding author : katzura@kigam..re.kr

원고접수일 : 2007. 5. 2 게재승인일 : 2007. 7. 28

질의 및 토의 : 2007. 12. 31 까지

을 받는 것으로 나타났다. 따라서 균열암반 매질에서의 지하수 유동에 대한 개념 모형의 현실적이고 합리적인 설정을 위해서는 투수성/불투수성의 이진법적 특성에 대해 어떻게 규명할 것인가에 대한 조사방법과 해석방법에 대한 지속적인 연구가 요구된다.

주제어 : 균열암반매질, 개념모형, 다중심도수리시험, 단공시험, 공간시험, 이진법적 특성

1. 서 언

일반적으로 방사성 폐기물 처분의 가장 큰 목적은 방사성 핵폐기물을 인간의 생활권으로부터 격리하여, 생물권(biosphere)으로의 회귀를 최대한 지연시키는 것을 그 목적으로 한다. 따라서 인간의 건강과 환경에 대한 위협으로부터 방사성 폐기물에 대한 안전한 관리의 중요성은 오래전부터 인지되어 왔으며, 관련 분야로부터 중요한 경험들이 축적되어 왔다(IAEA, 1994). 방사성 폐기물은 원자력 발전과 산업적 활용, 연구, 의학 분야 등에서 이용되는 방사성 물질로부터 만들어지게 된다(IAEA, 1994). 이러한 방사성 폐기물 처분 방법과 관련하여 지금까지 다양한 방법이 제기되어 왔는데, 현재까지 가장 현실성 있게 검토되고 있는 방법은 지질학적 처분 방법이다. 이와 관련하여 많은 나라에서 지질학적 처분장 부지 선정을 위한 사전 연구가 수행되어 왔으며(Cacas et al., 1990a,b; Bear et al. 1993; National Research Council, 1996), 가장 대표적인 예로 스웨덴의 Stripa Mine, 미국의 Yucca Mountain 지역 그리고 일본의 호노루베 URL 등을 들 수 있다. 특히 스웨덴의 Stripa Mine의 경우 최초의 대규모 시험연구부지로서 균열암반 매질 내에서 지하수 유동 및 용질 거동 특성과 관련하여 매우 다양한 현장 실험이 수행되었고, 이를 바탕으로 오늘날 알려진 균열암반 매질 내 지하수 유동 및 용질 거동에 관한 많은 이론적 제안들이 이루어 졌다(Bear et al. 1993). 특히 Stripa Mine에서의 실험에서 지하 공동 내 균열에 따른 seepage rate 측정에 관한 실험 결과는 모든 균열이 투수성을 가지는 것이 아니며, 일부의 균열(3%)을 통해 전체 seepage 양의 50%가 유출됨이 확인되었다(Bear et al. 1993). 이 뿐만 아니라, 본 지역에서의 추적자 회수 실험을 통해 암체 확산에 관한 문제가 본격적으로 제기되기도 하였다(Bear et al. 1993). 이러한 실험 결과는 균열암반 매질에서의 지하수 및 용질의 거동을 해석하기 위해서는 매우 다양하며 많은 자료가 요구됨을 의미하는 것이었다. 이와 함께, 이러한 현상에 대한 다양한 이론적 접근법(Bear et al. 1993; National Research Council, 1996)이 연구되기도 하였는데, Fractal Dimension의 정의, Fractional Flow의 개념, 앞서 언급한 암체확산(Bear et al. 1993; National

Research Council, 1996) 등에 관한 연구가 이에 해당한다. 하지만, 현재까지 균열암반 매질에서의 지하수 유동을 명확히 설명할 수 있는 이론적 틀은 제시되지 못하고 있는 것이 현실이다(Neuman, 2005; de Marsily et al., 2005).

균열암반 매질에서의 지하수 및 용질의 거동 특성에 대한 명확한 이론적 틀이 제시되지 못하는 이유는 현상의 복잡함에 기인하는 바가 크다. 앞서 언급한 바와 같이 실제 지하수의 유동이 모든 균열을 통해 발생하는 것이 아니라, 선택적으로 발생한다는 점은 percolation theory(Renshaw, 1996; Berkowitz et al., 2000; Bour et al., 2002)의 현상적 근거를 제시해 주고 있으나, 아직까지 percolation theory는 현장 규모에서의 지하수 유동 특성을 설명할 수 있는 전반적인 프레임워크를 제시하지 못하고 있기도 하다. 이에 반해 Ando et al.(2003), Neumann(2005)은 등다공질연속체 모형(Equivalent Porous Medium Model)의 개념에 근거하여 불균질성에 매우 심한 다공성 매질로서 균열암반의 특성을 모사하고자 하였으며, Cacas et al.(1990a; 1990b)는 불연속 균열망 모형(Discrete Fracture Network Model)을 이용하여 프랑스의 Fanay-Augres 지역의 지하수 유동 특성을 설명하고자 하였다. 이러한 시도들은 많은 경우 수리학(hydraulics)에 지나치게 경도되어 유동 방정식을 풀었을 뿐, 암석의 구조, 상, 특성 등 지질학적 특성에 대해 현실적으로 설명해 내지 못했다(de Marsily et al., 2005).

이러한 이유는 균열암반 매질에 대한 지하수 유동 특성을 어떤 매개변수를 이용하여 특성화할 것인가에 대한 현실적인 기준, 즉 개념 모형(Conceptual Model)과 관련된 문제일 가능성이 크다. 즉, 비록 추계론적 모형을 이용한다 하더라도, 등다공성 매질 모형을 이용하는 경우 균열암반 매질에서의 지하수 유동 특성은 수리전도도(Hydraulic Conductivity) 혹은 그 난수장(Random Field)으로 규정되어야 하며, 불연속 균열망 모형을 이용하는 경우 투수성 균열의 투수성과 그 공간적 분포, 연결성 등을 통해 규정되어야 한다는 현상의 개념화 과정과의 관련성에 관한 문제를 살펴보아야 한다는 것이다. 실제로 불연속적인 지하수 유동 특성을 보이는 균열암반 매질에서 아무리 불균질성을 고려한다하더라도, 연속체 모형으로 모사하는 것이 현실적인가의 문제나, 불연속 균열망의 공간

적 분포와 연결성을 고려할 수 있다 하더라도, 불연속 균열망 모형을 모사하기 위한 자연상 균열의 공간적/기하학적 분포를 현실적으로 조사할 수 있는가의 문제는 균열암반 매질에서의 지하수 유동 특성을 모사하기 위하여 핵심적으로 검토하고 가야할 문제들이기도 하다.

본 연구의 목적은 지금까지 제안된 다양한 균열암반 매질에서의 현장 조사기법들을 적용하여 그 결과를 현상이라는 측면에서 비교·검토하고 이를 통해 균열암반 매질 내에서 지하수 유동의 특성이 무엇인가를 관측된 현상을 중심으로 검토하는 것이다. 물론 이러한 시도는 이미 많은 연구를 통해 진행된 바 있다(Bear et al. 1993; National Research Council, 1996; Paillet, 1998). 하지만, 기존의 연구는 어떠한 형태로든 개념 모형을 전제로 하고 있어 개념 모형에 맞는 물리적 계수를 추정하는데, 중점을 두고 있으며, 국내에서는 사실상 이에 관한 연구는 거의 이루어진 바 없다고 할 수 있다. 이와는 달리 본 연구는 현재까지 제안된 다양한 심도별 시험 방법을 현장에 적용하고, 그 결과를 서술하는데 중점을 두어 균열암반 매질에서 나타나는 지하수 유동에 관한 물리적 현상의 특징을 검토하는 데 그 목적이 있으며, 향후 균열암반 매질에 대한 개념화의 현상적 근거를 확보하는데 그 목적이 있다.

2. 시험 부지의 지질학적/수리지질학적 기본 특성

연구지역은 행정구역상 충청남도 금산군 남이면 남이자 연휴양림 내 위치한 지역으로 주변 지역의 주요 지질은 시대미상의 변성퇴적암류, 쥐라기 흑운모 화강암, 그 상위를 백악기의 역질사암층, 응회암 및 이에 협재하는 퇴적암류, 그리고 하위의 제충을 관입하는 산성 화산암류, 규장암, 홍색의 장식 화강암 및 석영 반암이 분포하며, 그 상위에 부정합의 관계로 제4기의 충적층이 놓인다(Fig. 1; 한국지질자원연구원, 2004). 시추공 설치지역에 분포하는 암질은 백악기의 소위 서대산 응회암이다. 이들은 일반적으로 석질 응회암(Lithic tuff)로 보고되어 있으나, 노두와 시추코어에서 관찰한 바에 의하면 안산암질 응회암에 더 가까운 것으로 판단된다. 응회암은 대체로 회녹색 응회암질 바탕에 비교적 둥근 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 것도 많다(한국지질자원연구원, 2004).

이러한 지질학적인 특성 검토와 함께 수리지질학적인

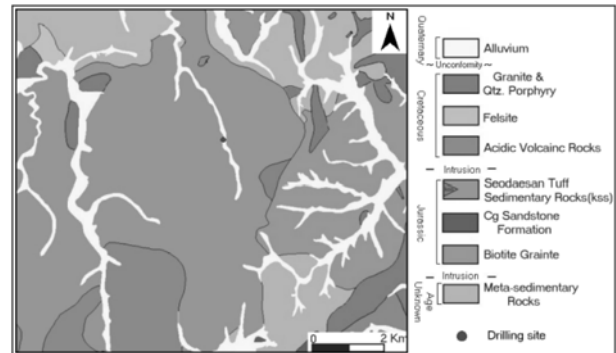


Fig. 1. Regional geologic map around the study site (KIGAM, 2004).

Table 1. Test wells in the study site (KIGAM, 2004)

Well No.	Depth* (m)	Purpose of Installation
BH-1	140	Evaluation of basic properties in Test Site (vertical profile)
BH-2	140	
BH-3	140	
BH-4	140	
BH-5	140	
BH-6	90	Monitoring hydrogeological properties at upper and middle fracture zone
BH-9	40	Interaction between groundwater/surface water in fractured system
BH-10	45	Investigation of upper groundwater system

* "Depth" means drilling depth from the ground surface.

기본 특성을 검토하기 위하여, 연구 지역 내 1차적으로 우선 5개의 시험정을 NX 구경으로 설치하였다(Table 1, Fig. 2(a); BH-1 ~ BH-5). 1차 조사에서는 균열암반 매질의 심도별 특성을 고려하지 않고, 우선 단일한 특성을 가지는 매질로 가정하고 가장 일반적인 조사 방법인 양수시험을 실시하였다. 이를 통해 시험 부지 내에서의 개괄적인 투수량계수(Table 2) 및 방향에 따른 이방성(Fig 2(b))을 산정하였다. 전체 심도를 대상으로 산정된 투수량계수는 $9.78 \times 10^0 \sim 1.21 \times 10^1 \text{ m}^2/\text{day}$ 정도의 값을 보이며(Table 2), 이로부터 추정된 연구부지 내 이방성율은 약 1.17로 거의 등방성에 가까운 값을 보여 준다(한국지질자원연구원, 2003). 이와 함께, 시험 구역 내 지하수위의 변화는 강수에 대해 즉각적인 반응을 보여 준다(Fig. 3).

본 시험 지역 내 배치된 관정들의 케이싱 최상부(TOC)의 고도 차이는 BH-3과 BH-4가 36.2 cm로 최대의 차이를 보이고 있으며, 대부분의 관정들 간의 BH-3, BH-10 시험정을 제외한 대부분 시험정의 TOC 고도 차이는 15 cm 이내이다.

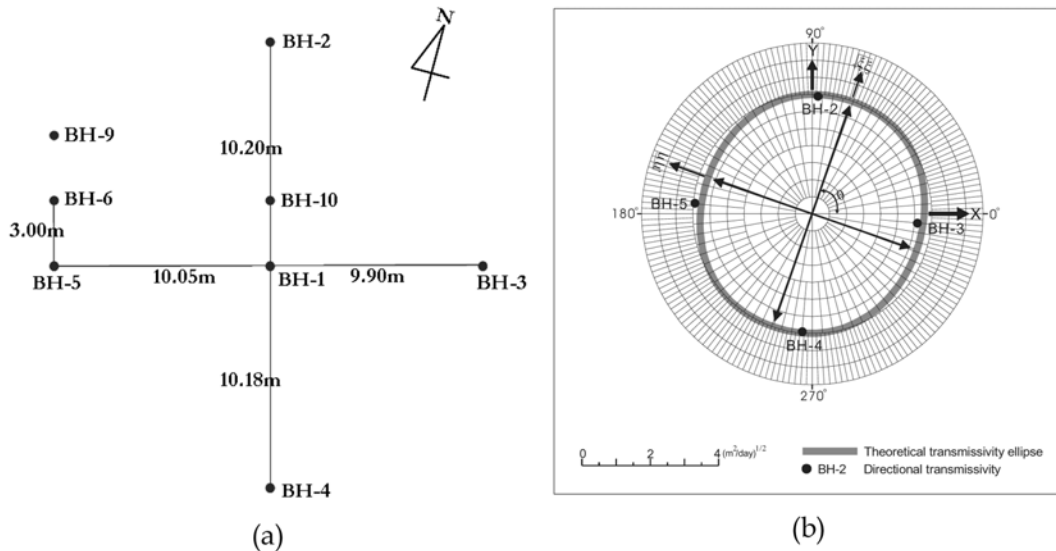


Fig. 2. Locations of test wells in the study site (a) and theoretical transmissivity ellipse in the study site (b) (KIGAM 2003).

Table 2. Bulk transmissivities at each of monitoring wells from pumping test result (KIGAM, 2003)

Pumping well	Observation well	T_d (m ² /day)
BH-1	BH-2	1.203E + 1
	BH-3	9.782E + 0
	BH-4	1.209E + 1
	BH-5	1.150E + 1

3. 연구 방법

본 연구는 균열암반 매질의 심도별 특성 파악과 공간 연결성에 대한 심도별 특성 파악에 중점을 두었다. 우선 균열암반 매질 내 투수성 균열대의 분포수리전도도 등에 대해 우선적으로 조사하고, 이를 바탕으로 관정 간 상호 연결성에 대한 조사를 수행하였다. 이를 위해 적용된 방법은 각각 다음과 같다.

3.1. 단공 내 수직적 물성 변화

단공 내 수직적 물성 변화를 위해 현장에서 적용한 방법은 현재 국내에서도 어느 정도 체계화 된 방법들로, 1) 지구물리검층, 2) 공내 자연적 수직 유향·유속 측정, 3) 심도별 이중 패커 시험 등이 적용되었다. 단일 공내 수직적 물성의 분포 특성 파악을 위해서는 공벽에 아무런 인위적 조치도 가하지 않은 나공 상태를 유지하여야 하므로, 단공 내 수직적 물성 변화에 대한 실험을 수행하기 이전에 지구물리검층 등을 통해 사전에 공내의 상황을 충분히 파악할 필요가 있다. 그리고, 이를 바탕으로 공내 자연적

수직 유향·유속 시험의 관측 심도를 결정하고, 구간별 이중 패커 시험의 기능 여부를 판단하는 것이 필요하다. 예를 들어 공내 관정 주변으로 물리적 파손이 발생한 구간에서 유향·유속 시험을 수행할 경우 공벽 조건에 따라서 시험 결과의 신뢰도에 심각한 영향을 줄 수도 있으며, 수직 균열이 강하게 발달한 관정의 경우 이중 패커를 이용하더라도, 해당 구간을 적절히 고립시키지 못할 수 있고, 수평 파쇄가 심한 경우 패커 자체에 손상을 줄 수도 있다.

본 연구에서는 지구물리검층, 특히 공내 공경 검층의 결과를 검토하여 유향·유속 시험의 심도를 결정하였다. 하지만, 패커 시험의 경우 수직 균열에 의해 시험이 곤란한 구간은 관측되지 않아, 시험 대상공의 전 구간에서 이중 패커 시험을 수행하였다.

3.2. 공간 상호 연결성

단공 내 수직적 물성 변화에 대한 조사의 가장 궁극적인 목적은 통상적인 균열의 발달 정도를 파악하는 것이라기 보다는, 공 주변의 투수성 균열의 분포에 대한 파악과 그 정량화에 목적이 있다. 하지만 균열암반 매질의 일반적인 특성 상 공 주변의 투수성이 그 수평적 혹은 수직적 연장성과 반드시 일치하는 것은 아니다. 따라서 비록 단일 공 주변에서 투수성이 확인된 구간이라 하더라도 투수성 균열의 연장성, 다시 말하여 연결성에 대해서는 별도의 조사가 필요할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 단일 공 내에서의 투수성 균열 구간에 대해 확인한 후 각 투수성 구간 간의 수평적 연결성 검토를 위한 공간의 상호

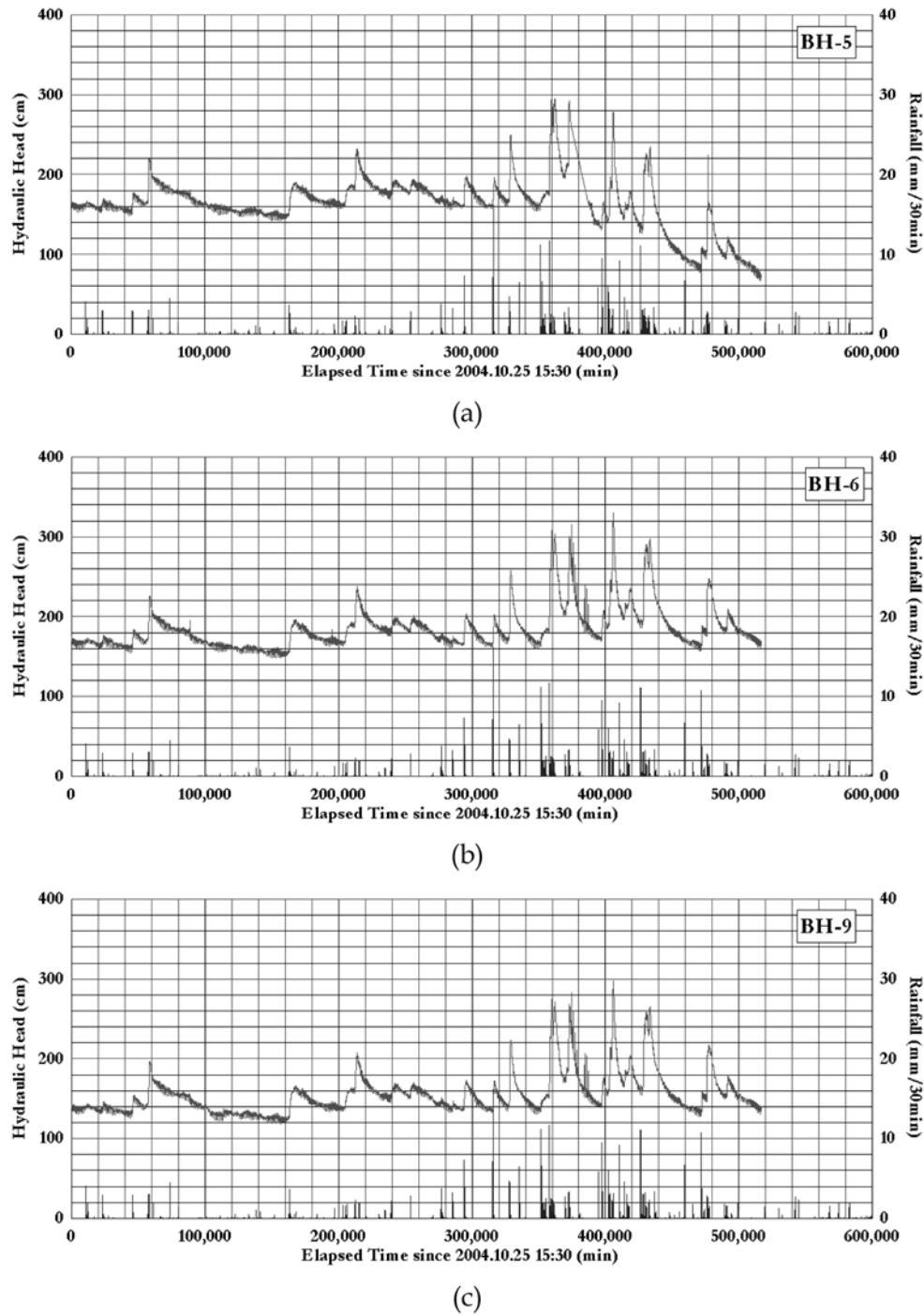


Fig. 3. Variation in water-level at each monitoring wells. (solid lines represents the water-level and bar charts represent the accumulated rainfall during every 30 minutes).

간섭에 대한 현장 시험을 수행하였는데, 1) 공간 수직 유향·유속 시험, 2) 다중 심도 열추적자 시험 등이 해당한다.

공간 수직 유향·유속 시험의 경우 외국의 경우 이미 그 실험 방법과 해석 방법 등에 대해 소개된 바 있으나 (Paillet, 1998; William and Paillet, 2002), 아직까지 국

내에서는 현장 수리시험으로서 활용되고 있는 단계는 아니다. 하지만, 국외에서 단공 유향·유속 시험의 경우 이미 구간별 패커 시험을 대체할 수 있는 시험으로 인정받고 있는 추세이며 (Neumann, 2005), 공간 유향·유속 시험 역시 균열암반 매질에서의 연결성(connectivity)을 파악

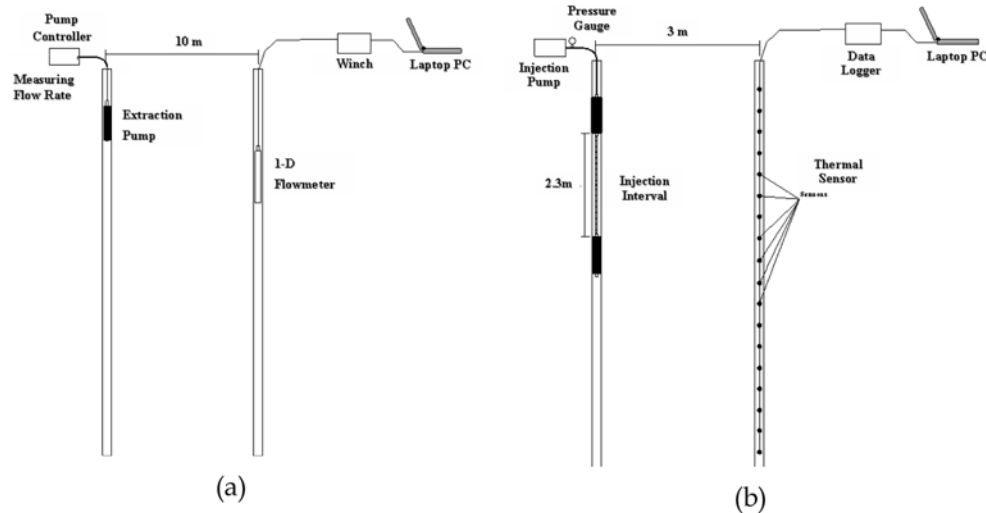


Fig. 4. Conceptual diagram for the cross-hole flowmeter test (a) and diagram for the multi-level thermal tracer test (b).

할 수 있는 유력한 방법으로 받아들여지고 있다. William and Paillet(2002)의 경우 공간 유향·유속 시험 시 관측 정에서의 시간에 따른 유속 및 유향 변화를 정량화 하여 구간별 수리전도도를 추정할 수 있는 이론적 틀을 제시하고 있다. 하지만, 본 연구에서는 수위가 안정된 이후 관측된 공내 유향 및 유속의 자료를 이용하였다. 공간 유향·유속 시험의 개념도는 Fig. 4(a)에 제시된 바와 같다. 명확히 논의한다면, 공간 유향·유속 시험의 결과는 공간 연결성에 대한 직접적인 증거를 제시해 주는 방법은 아니나, 매우 유력한 자료를 제공해 준다는 점에서는 이론의 여지가 없다고 보아야 한다. 이에 반해 다중심도(열추적자 시험은 공간 연결성에 대한 직접적인 증거를 제시해 줄 수 있는 현장 시험 방법이다. Fig. 4(b)에 제시된 다중심도(열추적자 시험은 개념적으로는 어떠한 추적자를 이용한다 하더라도 유사한 결론을 도출할 수 있으나, 일반적으로 Cl/Br 혹은 형광물질 등을 이용할 경우 구간별 시료의 채취와 분석에 따른 시간적/재정적 문제와 함께 시료 채취에 따른 공내 교란 등의 문제가 발생하게 되므로 실제 현장에서의 적용 상에 제약이 따를 수 있다(시료 채취 시 유량 조절, 시료 채취 심도의 연속성 등). 따라서, 이러한 경우 각 모니터링 구간을 개별적으로 고립시키고, 고립된 여러 구간에서의 시료 채취 및 분석 등을 통해 결과를 얻어야만 신뢰도 높은 자료를 얻을 수 있다. 하지만, Fig. 4(b)에 제시된 바와 같이 array type의 센서를 이용하여 공내 변화를 심도별로 동시에 모니터링 하는 경우 구간별 공내 고립의 문제 혹은 시료 채취에 따른 교란 등의 문제를 해결할 수 있다는 장점이 있다. 현재까지 정밀한 해상도를 가진 array 타입의 센서는 온도 센서를

제외하면 널리 상용화되지 않았다는 점을 고려한다면, 열추적자는 이러한 타입의 현장 시험에 매우 적합한 추적자라고 할 수 있다. 본 연구에서 적용된 array 타입의 온도 센서는 2 m 간격으로 배열되어 있으며, 센서의 총 길이는 100 m이다. 단, 열추적자를 현장에 적용하고자 하는 경우 지하 매질 및 지하수가 가지는 열에 대한 수용능력(heat capacity)을 고려하여야 하는데, 주입정과 관측정의 수평 거리가 10 m 이상이면 거의 추적자로서 활용도가 없다고 보아야 한다. 본 연구에서 다중심도 열추적자 시험에 활용된 주입정과 관측정의 거리는 3 m이다.

4. 현장 시험 결과

4.1. 단공 내 수직적 물성 변화

4.1.1. 지구물리검층

지구물리검층 시 적용한 방법은 자연감마(전 대상공), 전기비저항(전 대상공), 유체의 온도 및 전기전도도(EC; 전 대상공), 공경(BH-1~5), Televiwer 검층(BH-1~5) 등이다. 이 중 자연감마와 전기비저항은 지하수 유동 시스템과 어느 정도의 상관성은 있으나, 직접적인 자료는 아니므로 본 연구의 검토 대상에서 제외하였다. 적용한 방법 중에서 공내 지하수 자체의 직접적인 물성을 반영한 것은 온도와 EC이며, 공경 검층의 경우 공내 시험 구간 설정에 직접 관련되는 계수이므로 이 3개의 검층 항목을 집중적으로 검토하였다.

본 연구 지역에 시추된 시험정의 계획된 시추 구경은 75 mm이나, 공경 검층 결과 나타난 시험 정의 구경은 상부에서는 75 mm 보다 조금 큰 76~78 mm 내외의 값

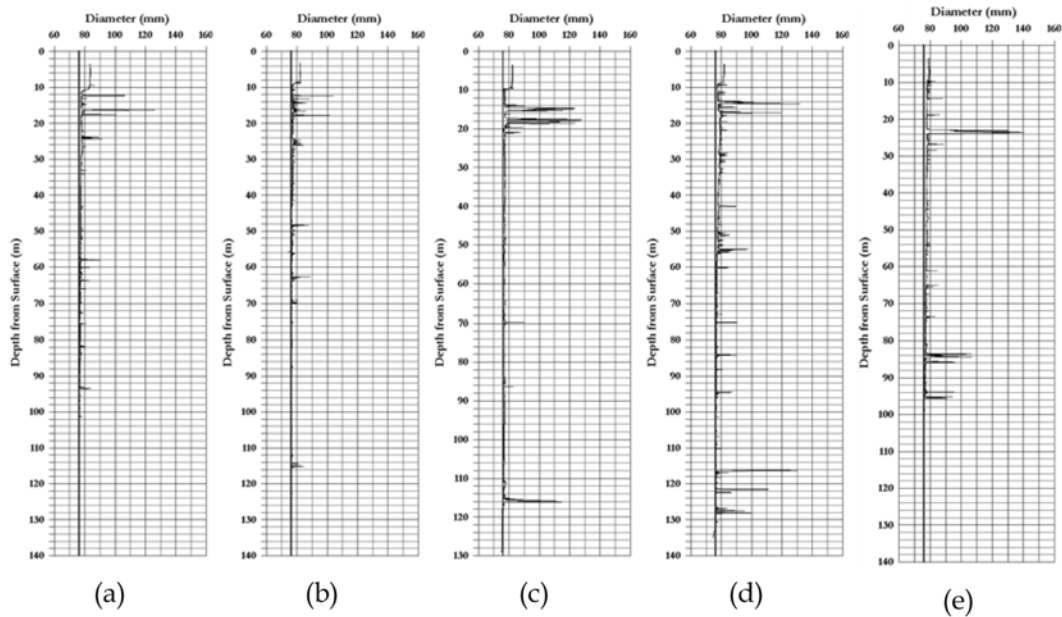


Fig. 5. Results of caliper logging at BH-1 (a), -2 (b), -3 (c), -4 (d) and -5 (e).

을 보이며, 최상부는 85 mm 내외의 구경을 보여주고 있다(Fig. 5). 하지만, 심도가 깊어질수록 원 계획 구경인 75 mm에 근접하는 양상을 보여주며 100 m 이상의 심도에서는 경우에 따라 75 mm 이하의 구경을 보여주기도 한다. 하지만, 파쇄 구간에서는 이와는 다른 양상을 보여주는 데, BH-5를 제외하면 10~20 m 사이의 심도에서 구경이 최대 120~130 mm에 이르는 구간들이 상당 구간 관측되었다. BH-5의 경우 다른 시험정들과는 달리 지표로부터 약 12~14 m 구간에서 가장 큰 구경을 보여주는데, 최대 구경은 약 140 mm이다. 이와 함께 BH-4의 경우 공 전반에 걸쳐 많은 파쇄구간이 분포하고 있음이 확인되어 심도별 시험 구간을 설정하기 난해한 것으로 확인, 주요 시험공에서 제외하였다. 공경 검층 결과 관측된 시험정 별 주요 파쇄구간은 BH-1의 경우 앞서 언급한 10~20 m 구간은 제외하고 약 24 m, 58 m, 94 m 지점에서 파쇄구간이 관측되었고, BH-5의 경우 22~24 m 구간 이외 27 m, 61 m, 65 m, 83~86 m, 94~96 m 구간에서 파쇄구간이 관측되었다. 이러한 공경 검층 결과는 이후 언급할 공내 유향·유속 시험의 대상 심도를 결정하는 데 참고자료로 활용되었다.

하지만, 온도와 EC에 대한 검층 결과는 공경 검층 결과에 나타난 파쇄구간과는 다소 다른 결과를 보여주고 있다(Fig. 6). 물론 BH-1~4 시험정의 경우 10~20 m 구간에서 온도 혹은 EC의 점진적인 변화를 보여 주고 있으나, 이는 상부 풍화대 구간에 해당하기에 균열암반 매

질의 전형적인 특성을 보여준다고 말하기는 어렵다. 온도 검층의 경우 최상부에서 관측되는 온도 하강 구간을 제외 하면 전반적으로 심도에 따라 높아지는 양상을 보여 주고 있으며, 심도에 따라 약간씩 지온 상승률이 변화되는 양상을 보여 준다. 특히 지온 상승률의 변화가 관측되는 구간 중 상당 구간은 EC의 변화를 동반하고 있다는 점은 주목할 만하다(Fig. 6). BH-1의 경우 약 63 m와 70 m 구간의 온도 상승률이 변하는 심도에서 EC의 급격한 변화가 관찰되어 해당 구간에서 상부와는 다른 지하수가 유입될 가능성을 시사해 주고 있다. 이러한 현상은 BH-2, BH-5, BH-6와 BH-10 시험정에서도 관찰되는 데, BH-2의 경우 약 42 m, 62 m 구간에서 이러한 동반 변화가 관찰되며, BH-5는 74~76 m 구간 및 85 m 구간에서 이러한 변화를 보여준다. BH-6 시험정 심도 약 45 m 구간 및 BH-10의 약 24 m 구간 역시 유사한 변화양상을 보여준다.

4.1.2. 공내 자연적 수직 유향·유속 측정

공내 자연적 유향·유속 측정 결과를 살펴보면 우선, BH-2와 BH-4에서는 공내 흐름이 거의 관측되지 않는다는 점을 확인할 수 있다. 그리고, 2003년 10월 1차조사에서 관측된 자료에서 모든 관정에서 하향의 흐름이 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다(Fig. 7; 이때 (+) 유량의 경우 상향의 흐름을, (-) 유량의 경우 하향의 흐름을 의미한다). 자연적인 흐름에서는 모든 투수성 균열(대) 분포

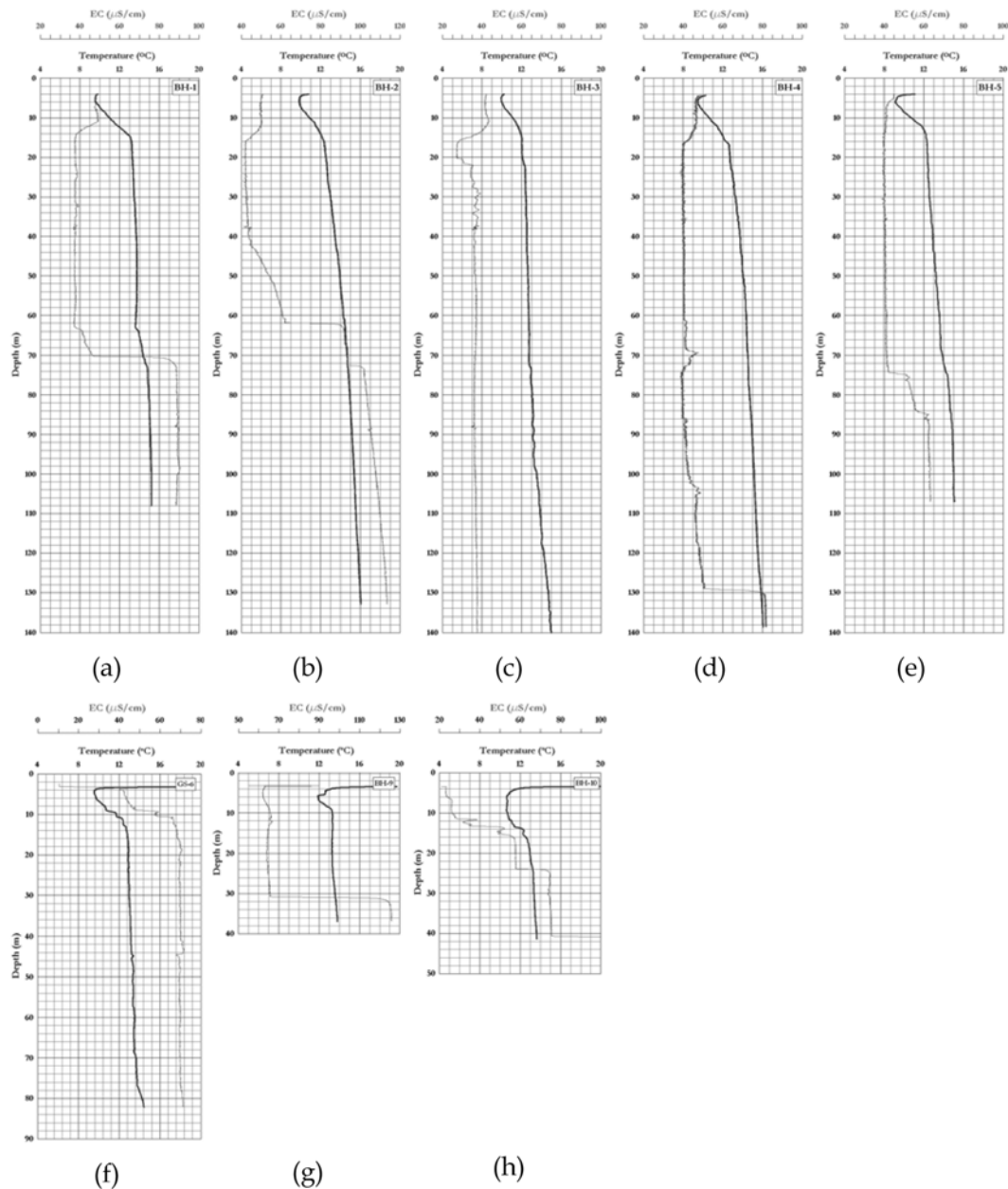


Fig. 6. Results of EC (thin line)-temperature (thick line) logging at BH-1 (a), -2 (b), -3 (c), -4 (d), -5 (e), -6 (f), -9 (g) and -10 (h) (2003. 03 at BH-1 ~ 5, 2005. 04 at BH-6, 9, 10).

구간에서 유량이 변화하는 것은 아니므로, 투수성 구간에 대한 모든 정보를 얻을 수 없으나, 적어도 자연적인 공내 흐름의 변화가 관측되는 구간은 그 투수성에 매우 좋은 구간일 가능성이 높다. 전반적으로 모든 공의 상부에서부터 하향의 흐름이 존재한다. 그리고 특징적인 유향의 변화 구간은 BH-1의 경우 14~18 m, 70~73 m 구간에서 공으로부터 지하 매질로의 유입이 관측되고 있으며, 20~24 m, 50~60 m, 100 m 하부 심도의 구간에서 공내로의 유출이 발생되고 있음을 확인할 수 있다(Fig

7(a)). BH-5에서는 93 m 하부, 68~70 m 구간에서 공내로의 유출이, 62~65 m, 13 m 상부 구간에서 공으로부터의 유입이 발생되고 있으며(Fig. 7(e)) BH-3의 경우 20 m 하부구간에서 유입된 물이 주목할 만한 변화없이 하부구간에 이르러 130 m 심도부근 및 최하부 구간을 통해 유출되고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 7(c)).

4.1.3. 심도별 이중 패커 시험

본 시험 지역에서 수행한 양수시험 결과 추정된 수리전

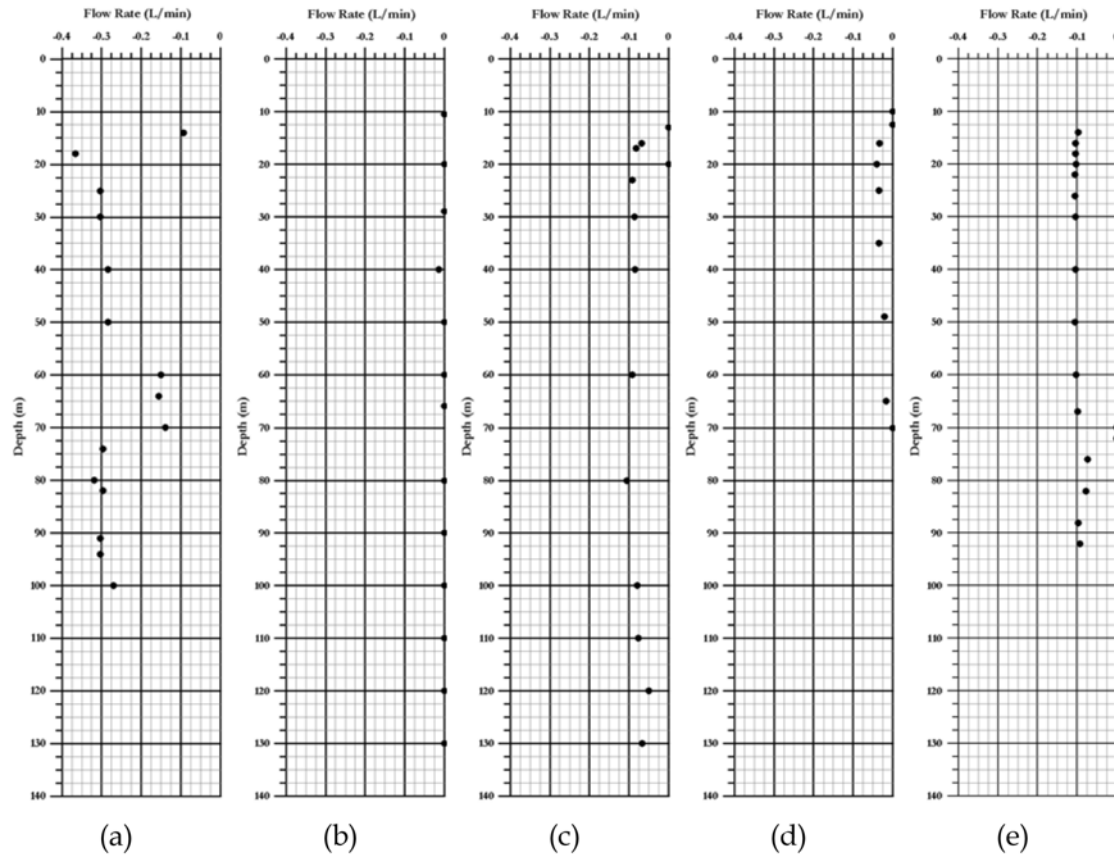


Fig. 7. Ambient flow rate at BH-1 (a), -2 (b), -3 (c), -4 (d) and -5 (e) (2003. 10 1st measure).

도도는 4.85×10^{-5} m/min $\sim 6.00 \times 10^{-5}$ m/min 정도의 값을 보여주는 데, 심도별 이중 패커 시험 결과 역시 비슷한 양상을 보여 주고 있다. 심도별 패커 시험 결과에 대한 각 공별 산술평균은 각각 4.39×10^{-5} (BH-2), 5.77×10^{-5} (BH-5), 8.66×10^{-5} (BH-6), 3.76×10^{-5} (BH-9), 4.54×10^{-5} m/min(BH-10)로 나타났다.

시험 결과로 나타난 수리전도도의 분포를 심도별로 살펴보면, BH-10을 제외하면 상부 20 m 이내 구간의 수리전도도가 상대적으로 높게 나타나고 있고, 각 공별 평균 수리전도도에 비해 약간 높게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다(Fig. 8). 하지만, BH-10의 경우 상부 구간의 수리전도도는 상대적으로 낮게 나타나거나 불투수층으로 확인되었으며 지표로부터 약 19~22 m 심도의 구간에서 수리전도도가 가장 높은 것으로 나타났다(Fig. 8(b)). 하지만 다른 시험공의 경우를 살펴보면 본 시험 사이트 내의 전형적인 최상부 불투수층은 지표로부터 약 20~30 m 심도 사이 구간에서 나타나고 있어 상부풍화대에 의한 고 투수성 구간과 그 하부의 투수성 구간이 연결되지 않은 다른 시스템으로 존재할 가능성을 시사하고 있다. 전체적

으로는 심도에 따라 약간의 차이가 존재하나, 전 시험구간이 산술평균에 의한 수리전도도와 같거나 약간 작은 오더(order)의 값을 보여주고 있어, 투수성 구간은 시험 지역 전 심도를 통해 고르게 분포하고 있음을 알 수 있다(Fig. 8). 다만, 각 공별로 일부의 심도에서 10^{-7} m/min 이하의 저투수성 혹은 불투수성 구간이 분포하고 있다(BH-2: 45~48 m, BH-5: 54~57 m, BH-6: 66~69, BH-9: 30 m 이하 등).

4.2. 공간 상호 연결성

4.2.1. 공간 수직 유향 · 유속 시험

공간 수직 유향 · 유속 시험을 위해 시험 대상이 될 2 개의 공을 선정하였는데, 앞서 자연적인 공내 유향 · 유속의 관측에서 상대적으로 큰 유량을 보인 BH-1과 -5번 공을 시험공으로 선정하고 현장 시험을 수행하였다. 현장 시험은 우선 자연적인 공내 유향 · 유속을 다시 한번 관측하고, 양수 조건에서 변화를 관측하는 순서로 이루어졌다. 자연적인 상황에서의 공내 유향 · 유속의 측정 결과는 앞서 Fig. 7에 나타난 결과와 그 유량에서 다르게 나타났으

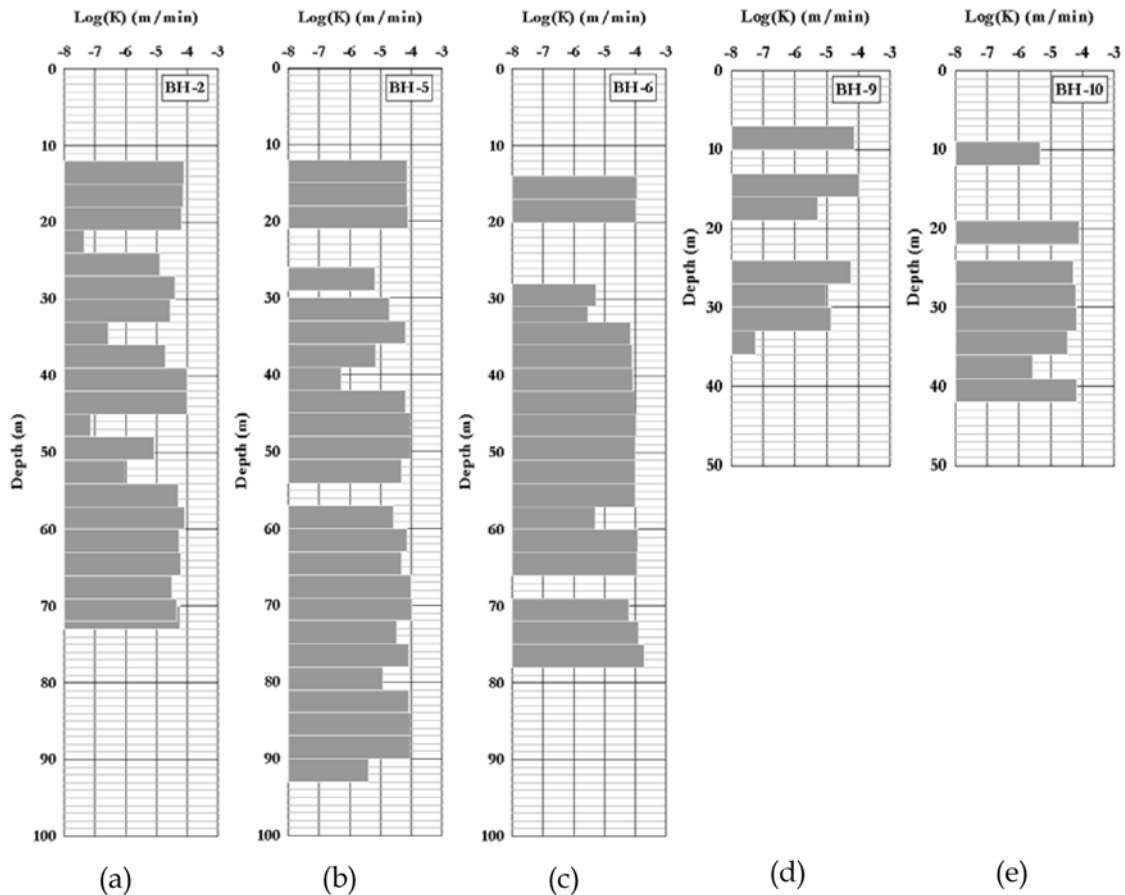


Fig. 8. Results of double packer tests at BH-2 (a), -5 (b), -6 (c), -9 (d) and -10 (e).

나 이는 관측시기의 차이에 따른 자연적인 시스템에 의한 변화로 볼 수 있다. 하지만, 유량이 변하는 심도는 BH-1과 BH-5 양자 모두에서 일치함을 확인할 수 있다(Fig. 7, 9).

이러한 자연적인 공내 유향·유속의 분포를 기준 자료로 삼고, 공간 상호 간섭에 대한 변화를 관측하였다. 우선 BH-5번 공에서 양수를 하여 안정수위에 이른 후 BH-1에서 관측된 공내 유향·유속의 변화는 자연적인 상황에서의 유향·유속과 방향은 동일하나 그 유량이 증가하는 양상을 보여 준다(Fig. 9(a)). 단, 최상부구간(16 m 상부)에서는 자연적으로는 상향의 흐름에서 양수 시 하향의 흐름이 더욱 큰 유량으로 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 이에 반해 BH-1에서 양수하고 BH-5에서 유량의 변화를 관측한 경우는 다른 양상을 보여주고 있다. 자연적인 공내 흐름은 하향인데 반해 BH-1에서 양수 후 공내 흐름은 전적으로 상향의 흐름만이 발생한다는 것이다. 물론 상향의 흐름만 발생한다고 해서 공내로의 지하수 유출입이 없는 것은 아니며, 심도 80~87 m 지점에서 공으로부터의 유출, 67~75 m 구간에서 공으로의 유입이 발생하고 있

으며, 상부로 가면서 약간씩의 유량 변화가 관측되기도 한다. 하지만, 최종적으로 상향으로 이동하는 공내 지하수는 지표로부터 약 13 m 혹은 그 상부로 모두 유출되고 있다(Fig. 9(b)).

4.2.2. 다중 심도 열추적자 시험

앞서 연구방법에서 언급한 바와 같이 열추적자의 경우 관측거리가 10 m 내외에 이르는 경우 암석과 물의 열용량이 매우 크기 때문에 관측공에서의 관측이 이루어지지 않을 가능성이 크다. 따라서 본 시험은 상대적으로 거리가 가까운 BH-5호공과 BH-6호공(공간 간격 3 m)을 대상으로 수행되었다. 이 때 BH-5호공은 주입정으로, BH-6호공은 관측정으로 이용하였다. BH-5호공에서의 주입심도는 심도별 이중팩커 시험 결과를 근거로 투수성이 상대적으로 높은 9개의 구간을 선택하였다(Table 3). 이와 함께 BH-6호공에서는 2 m 간격으로 온도센서(최대해상도 0.0625°C)를 설치하여 1분 간격으로 온도의 변화를 관측하였다. 다만, 최하부 2개 구간의 시험 시, 원래 사용한

배열형의 온도센서의 연결 상의 문제로 0.5 m 간격을 가진 총 50 m 길이의 온도센서를 이용하여 하부 50 m 구간만을 모니터링 하였다. 이 때 주입되는 물의 온도는 시

험 구역 내 지하수의 온도(13 ~ 14°C)에 비해 약 10°C 높은 물을 주입하여 온도 차에 의해 유도되는 지하수의 흐름과 수리전도도 변화(밀도 및 점성)를 최소화하도록 하였다.

시험결과 BH-6호공에서 외양적으로도 명확하게 온도의 변화가 관측된 구간은 BH-5호공의 12.5 ~ 15.3 m 구간 (Fig. 10(a), (b)), 18.5 ~ 21.3 m (Fig. 10(c), (d)), 45.5 ~ 48.3 m 구간 (Fig. 10(g), (h))이며, 33.5 ~ 36.3 m 구간과 60.5 ~ 63.3 m 구간, 66.5 ~ 69.3 m 구간, 70.5 ~ 73.3 m 구간에서 주입시 관측공에서 주목할 만한 변화가 관측되지 않았다. 다만, BH-5호공의 50.5 ~ 53.3 m 구간과 75.5 ~ 78.3 m 구간에서 주입 시 BH-6호공의 심도 60 m 구간, 72 m 구간에서 각각 미세한 반응이 관측되었다 (Fig. 10(i), (q)). 이 때 2개의 시험 구간 중 상대적으로 온도 변화의 폭이 큰 50.5 ~ 53.3 m 구간의 경우 회복 단계에서 아무런 특징적인 변화가 관측되지 않는다는 점 (Fig. 10(j))을 고려한다면, 실제 연결성이 존재할 가능성이 낮을 것으로 생각되면, 오히려 상대적으로 온도의 변화가 적은 75.5 ~ 78.3 m 구간의 경우 회복단계에서의 전형적인 온도의 이동 및 회복 양상이 관찰되어 (Fig. 10(r)) 연결성이 존재하는 것으로 보인다. 하지만, 본 시험에 활용된 온도 센서의 최대 해상도를 고려한다면, 관측오차일 가능성이 높다.

연결성이 외양적으로 확인된 구간을 세부적으로 살펴보면, 최상부((1)번 주입구간)의 12.5 ~ 15.3 m 구간에서 주입 시 BH-6호공에서의 온도 변화는 최상부구간에서 최대 7.6°C 내외의 변화를 보여주고 있고, BH-6호공 내에서 하향으로 서서히 전파되는 양상으로 보여주고 있다 (Fig

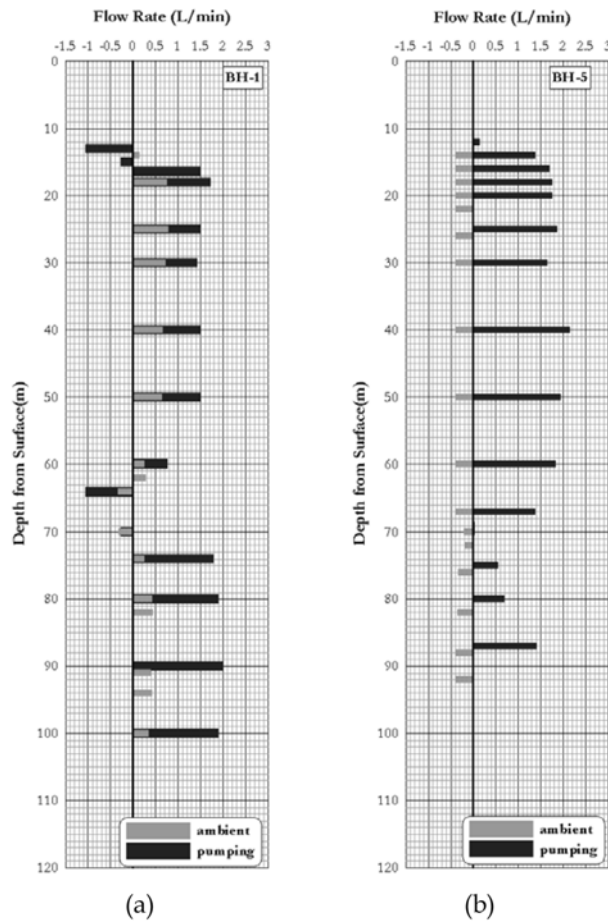


Fig. 9. Results of cross-hole flowmeter test : (a) BH-1, (b) BH-5.

Table 3. Injection Intervals for the thermal tracer test at BH-5 and results of thermal tracer tests and the comparison with hydraulic conductivities at each of injection depths

No	Injection Interval (m)		Hydraulic Conductivity (m/min)		Response
	Upper depth	Lower depth	BH-5	BH-6	
1	12.5	15.3	7.403×10^{-5}	1.104×10^{-4}	O
2	18.5	21.3	7.902×10^{-5}	1.071×10^{-4}	O
3	33.5	36.3	6.545×10^{-5}	6.765×10^{-5}	X
4	45.5	48.3	9.121×10^{-5}	1.041×10^{-4}	O
5	50.5	53.3	9.110×10^{-5}	9.640×10^{-5}	△
6	60.5	63.3	7.416×10^{-5}	1.179×10^{-4}	X
7	66.5	69.3	9.890×10^{-5}	1.121×10^{-4}	X
8	70.5	73.3	1.073×10^{-4}	6.208×10^{-5}	X
9	75.5	78.3	8.357×10^{-5}	1.895×10^{-4}	△

O : measured the response,

X : not measured response,

△ : something recorded but not confirmed

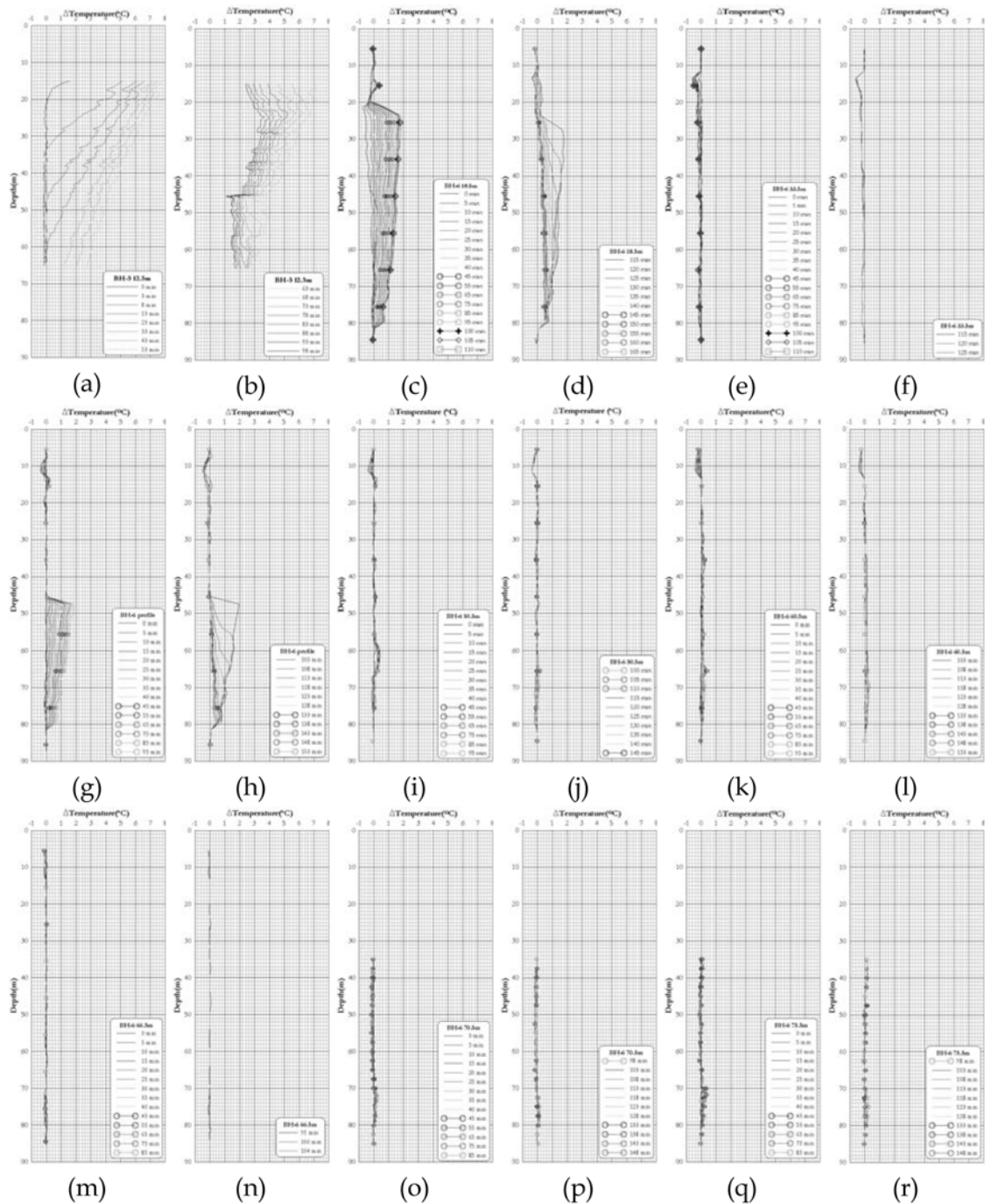


Fig. 10. Results of multi-level thermal tracer test : (a) injection interval at BH-5 12.5 ~ 15.3 (injection phase), (b) 12.5 ~ 15.3 (recovery phase), (c) 18.5 ~ 21.3 (injection phase), (d) 18.5 ~ 21.3 (recovery phase), (e) 33.5 ~ 36.3 (injection phase), (f) 33.5 ~ 36.3 (recovery phase), (g) 45.5 ~ 48.3 (injection phase), (h) 45.5 ~ 48.3 (recovery phase), (i) 50.5 ~ 53.3 (injection phase), (j) 50.5 ~ 53.3 (recovery phase), (k) 60.5 ~ 63.3 (injection phase), (l) 60.5 ~ 63.3 (recovery phase), (m) 66.5 ~ 69.3 (injection phase), (n) 66.5 ~ 69.3 (recovery phase), (o) 70.5 ~ 73.3 (injection phase), (p) 70.5 ~ 73.3 (recovery phase), (q) 75.5 ~ 78.3 (injection phase), (r) 75.5 ~ 78.3 (recovery phase).

10(a)). 해당 시험 구간의 경우 회복 단계에서의 변화 역시 주목할 만한데, 주입 시 유입된 열추적자의 이동 속도에 비해 상부로부터 원래의 온도로 회복되는 속도는 느리

게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 하지만, 약 45 m 심도 하부로 상대적으로 매우 빠른 온도 회복세가 관찰되고 있는데(Fig. 10(b)), 이는 해당구간에서 공 내로 지하

수가 유입되어 하향으로 이동하고 있음을 지시해 준다. 이에 반해 (2)번 주입 구간(18.5~21.3 m)의 경우 (1)번 주입구간과 온도 상승과 회복에서 다른 양상을 보여주고 있다. 이 경우 BH-6번 공의 온도 변화는 약 20 m 심도의 지점에서 발생하는 데, 주입단계에서 온도의 변화는 유입 심도인 20 m 지점에서부터 하부로만 확산될 뿐, 그 상부 지점에서 변화는 관찰되지 않는다(Fig. 10(c)). 이러한 변화 양상은 회복단계에서도 비교적 명확하게 나타나는 데, 이 경우 온도의 회복은 상부로부터 매우 빠르게 하부로 확산되어 주입을 중단한 뒤 30분 이내 BH-6 전 공내에서 시험 이전의 온도로 회복되고 있음이 확인되었다(Fig. 10(d)). 이러한 변화 양상은 (4)번 주입구간에서도 유사하게 나타난다(Fig. 10(g), (h)).

5. 토 의

흔히들 균열암반 매질을 표현하기 위해 몇가지 대표적인 개념 모형을 채용하게 되는데, 등다공성 매질모형(Equivalent Porous Medium Model: EPM), 불연속 균열망 모형(Discrete Fracture Network Model), 이중공극 모형 등이 이러한 개념모형에 해당한다. 그리고 실제로 현장에서 수행한 시험의 결과를 해석하고자 하는 경우, 해석자는 반드시 개념모형 중 하나를 선택하여야 한다. 하지만, 정작 문제가 되는 것은 균열암반 매질에서 어떠한 개념 모형이 적합한가에 대해 아직까지는 어떠한 명확한 답도 학술적으로 제출된 바가 없다는 점이다. 이러한 한계는 여러 현장 시험을 적용한 본 연구에서 관찰된 현상들을 통해서도 확인할 수 있다. 앞서 심도별 이중 패커 시험의 결과에서 확인할 수 있듯이 본 연구지역은 심도에 관계없이 비교적 고른 투수성을 보여주고 있다(Fig. 8). 물론 외양적으로 관찰되는 일부 불투수성 혹은 저투수성 구간이 분포하고 있으나, 이러한 구간은 전 구간에 대해 최대 20% 미만의 구간에서만 분포할 뿐, 상당 부분의 심도에서 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ m/min 혹은 그 이상의 투수성을 보여주고 있다.

먼저 단공내에서 심도별 물성 변화에 대한 조사 결과를 비교해 보면, 물리적으로 분포하는 파쇄대의 분포가 균열암반 매질의 투수성과 직접적으로 관련이 있다는 증거는 찾아보기 어렵다. BH-1호공의 경우 지표로부터 20 m 심도 상부의 풍화대 구간을 제외하면, 공내 물리적 파쇄가 관찰된 심도는 약 24 m, 58 m, 60 m, 64 m, 94 m 등이나(Fig. 5(a)), 공내에서 지하수 유동의 주목할 만한 변화를 보이는 구간은 64 m 부근의 EC변화(Fig. 6(a))

외에는 없다. 오히려 외양적으로 물리적 파쇄가 관찰되지 않는 70 m 심도에서 가장 급격한 EC의 변화(Fig. 6(a))와 공내 자연적인 유량의 변화(Fig. 7(a))가 나타나고 있다. 이러한 특성은 BH-5호공에서도 관찰되는 데, 외양적으로 관찰된 파쇄 구간인 84 m, 86 m, 94 m, 96 m 구간 중 공내 지하수 유동상의 변화가 관찰되는 구간은 84 m 부근에서의 EC 변화(Fig. 6(e))이다. 실제로 EC의 가장 급격한 변화를 보이는 약 74 m 구간과 공내 수직적 유향·유속의 변화를 보이는 70 m, 72 m 구간(Fig. 7(e))에서의 외양적인 파쇄는 관찰되지 않는다. 이와 함께, 이러한 공내에서의 변화는 심도별 수평적 수리전도도의 분포로는 구분할 수 없다. 국내에서 일부 연구자들의 경우 Televiewer나 BIPS 등을 이용하여 획득된 자료를 통해 공내에서 관찰되는 균열의 두께(aperture)를 규정하고 이를 이용하여 균열의 투수성을 추정하려는 시도가 이루어지고 있는데(함세영 외, 2001; 박경우와 배대석, 2005) 본 연구에서 관찰된 여러 정황은 이러한 시도를 현장에 적용하고자 할 때, 매우 조심스럽게 접근해야 한다는 점을 시사해 주고 있다.

이러한 점은 공간 상호 간섭시험 결과와 함께 비교할 때, 더욱 복잡해지게 된다. 특히 공간 상호 간섭시험의 결과가 공벽 주변의 투수성과 그 투수성의 확장성, 즉 연결성과의 관계라는 측면을 검토해 보면 더욱 그러하다. 시험 현장에서 1차적인 조사가 수행된 후 BH-1호공에서의 공내 사고로 이후 심도별 투수성 자료를 획득하지 못한 점은 아쉬운 점이나, 공간 상호 간섭시험들과 단공 내 심도별 물성 시험에 모두 활용된 BH-5호공의 결과를 비교해 보면 투수성과 연결성의 불명확한 관계가 명백하게 드러나게 된다. 즉, 연결성이 확보되는 공간 심도에서의 투수성은 보장될 수 있으나, 투수성이 높은 지역이라고 하여 수평적 연결성이 존재하는 것은 아니라는 점이다. 우선 BH-5호공에서 공간 수직 유향·유속 시험의 결과를 살펴보면 BH-1호공에서 양수가 이루어질 경우, BH-5호공에서 지하수의 유출이 발생하는 심도는 지표로부터 13 m 심도 상부, 80~87 m 사이의 구간이며, 30~40 m 사이의 구간에서 상대적으로 작은 유량의 변화가 존재하지만 유출이 발생하고 있는 것으로 보인다. 이와 함께, 60~67 m 사이의 구간과 67~75 m 사이의 구간에서는 오히려 공내로 지하수의 유입이 발생하고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 9(b)). 물론 유출이나 유입이 발생하는 모든 구간에서의 투수성은 공내에서 상대적으로 높게 기록되고 있다(Fig. 8(b)). 하지만, 이러한 현상이 관찰되는 구간은 투수성이 높은 전 구간은 아니다. 이러한 시험 결과는 혼

히 적용되는 layer의 개념을 통한 균열암반매질 내에서의 지하수 유동 해석에 대한 시도가 현실에서의 지하수 유동 현상을 전혀 반영하지 못할 수 있음을 시사하는 것이다. de Marsily et al.,(2005) 역시 동일한 문제에 대해 지적한 바 있다.

투수성과 연결성의 문제가 직접적으로 상관성이 없음을 확인하기 위해서는 심도별 이중패커시험을 통해 얻어진 투수성에 대한 정보와 다중심도 열추적자 시험 결과를 비교하면 더욱 명확해진다. 앞서 언급한 바와 같이 BH-5 호공에서 열추적자를 주입하기 위한 구간을 선택한 기준은 주변지역에 비해 상대적으로 투수성이 높은 구간이며, 총 27개의 이중패커시험 구간 중 9개의 구간에서 열추적자의 주입하고, 주입정으로부터 3 m 거리에 있는 BH-6 호공 내 전구간의 온도변화를 동시에 모니터링한 결과를 살펴보면(Fig. 10), 명확히 연결성이 확인된 구간은 3개 구간, 명확하지 않으나 가능성이 있는 구간이 2개 구간으로 총 5개의 구간에서만 연결성이 확인되거나 그 가능성이 관찰되었다. 특히 최상부 주입구간인 12.5 ~ 15.3 m 구간(1번 구간)의 시험결과와 적하부 구간인 18.5 ~ 21.3 m 주입 구간(2번 구간)의 결과는 수직적으로 투수성 구간이 연속해서 확인된다 하더라도, 그것이 하나의 연결된 지하수의 유로로 해석하는 것은 문제가 있을 수 있다는 점을 보여준다. BH-5호공 상부의 경우 이중패커시험 결과 12 ~ 21 m 구간에서의 수리전도도가 거의 유사하며($7.40 \times 10^{-5} \sim 7.90 \times 10^{-5}$ m/min) 연속적이라는 점은 직관적으로 하나의 연결된 유로를 형성하고 있다고 해석되는 것이 일반적이다. 하지만 두개의 시험 구간에서 수행된 열추적자 시험의 결과는 전혀 다른 반응양상을 보여주고 있다. 우선 1번구간에서 열추적자의 주입을 수행한 경우 관측정인 BH-6호공에서의 온도 변화는 최상부로부터 발생하여 공 하부로 비교적 빠른 속도로 이동하는(Fig. 10(a)) 반면 2번 구간에서 주입을 수행한 경우 BH-6호공의 반응은 지표로부터 20 m 심도에서 온도의 변화가 시작되어 그 변화가 하부로 상대적으로 느리게 확산되고 있다(Fig. 10(c)). 이 때 주목할 점은 20 m 심도에서 BH-6호공으로 유입된 열추적자는 해당 심도의 상부구간으로 전혀 확산되지 못한다는 점이다. 이러한 차이점은 회복단계에서도 관찰된다. 1번 주입구간에서 53분간 열추적자를 주입한 후 중단한 경우 회복 역시 상부로부터 시작되어 하부로 확산되는 데, 주입 시의 반응과는 달리 회복의 전파속도는 매우 느리다. 하지만, 2번 구간에서의 회복 양상은 앞서 시험 결과에서 언급한 바와 같이 30분 이내 시험 이전의 수준으로 복귀되는 매우 빠른 속도를 보이고 있다.

이러한 시험 결과는 1번구간과 2번구간이 전혀 다른 유로를 형성하고 있음을 지시해 주는 것이며, BH-6호공의 경우 최상부에서 유입된 지하수가 하부로 빠르게 이동하여 2번 구간 주입 단계에서조차 BH-6호공 20 m 심도에서 유입된 열이 확산(dispersion) 되는 것을 저지할 정도의 빠른 속도로 하부로 이동하고 있음을 지시하는 것이다. 그리고 회복단계의 빠른 회복 속도 역시 동일한 가속에 의한 것일 가능성을 지시하고 있다. 상부로 유입된 지하수의 빠른 하부로의 이동은 4번 주입구간의 시험 결과에서도 마찬가지로 관찰된다(Fig. 10(g), (h)). 즉, 수직적으로 연속된 유사한 수평적 수리전도도를 가진 투수성 구간이라 할지라도 수직적으로 상호 연결된 유로를 가진 시스템이 아닌 독립적인 유로를 형성할 수 있다는 것이다.

이상의 시험 결과들이 지시해 주는 균열암반매질에서의 지하수 유동 특성은 명백히 이진법적 변화 특성을 보여준다. 즉, 투수성/불투수성에 대한 명확한 구분이 존재한다는 것이다. 물론 투수성 구간의 경우 그 수리전도도는 명백히 불균질성을 보여주고 있으나, 이것이 등다공성매질 모형에 기반한 난수장(Random Field)의 형태와는 명백히 다른 점은 투수성/불투수성과 이에 따른 지역적 투수성-연결성 등에서 나타나는 이진법적 변화의 특성이 외양적으로 관찰된다는 점이다. 실상 균열암반매질에서 Representative Elementary Volume(REV)를 정의하려는 시도들(Bear et al., 1993; Wellman and Poeter, 2005)에서 지속적인 성과의 도출이 지연되거나, 혹은 균열암반 매질의 이방성(anisotropy), Fractal 특성, Fractional flow 등의 현상은 이러한 균열암반매질의 이진법적 변화에 기인하는 것이라고 보아야 한다. 이진법적 특성을 표현하는 모형은 석유 공학에서 중요한 급진전을 이루기도 하였다(de de Marsily et al.,(2005) 이러한 현상적인 특성들을 기존에 제안된 여러 개념 모형을 통해서 적절히 설명할 수 있는 방법을 제안하기는 매우 어렵다. 특히 어떠한 개념 모형을 채용하더라도 해당 개념 모형 내 핵심 계수(key parameter)의 공간적 불균질성을 반영할 수 있는 명확한 현실적인 방법이 현재까지는 존재하지 않는다는 점은 개념 모형 채용 상의 모호함을 더욱 가중시키고 있다.

궁극적으로 모든 현장 조사와 수치적 모델링을 통한 해석은 보다 광역적인 시스템의 변화를 해석하거나 예측하는 데 그 목적이 있다. 하지만, 균열암반 매질의 경우 어떤 개념모형을 채용하든 그 핵심계수의 현실 반영성 여부의 문제, 불균질성에 따른 계수의 광역적 up-scaling 등의 문제 등에 현재까지는 현실적인 대안이 존재하지 않는다는 점은 시스템 변화에 대한 해석이나, 예측에 많은 어려

움을 받게 하는 궁극적인 원인이 될 수 있다. 그리고 이러한 문제들은 궁극적으로 지하수 유동에 있어서 균열암반 매질의 이진법적 특성에 기인하는 바가 크다고 보여진다. 따라서 향후 조사 현장 규모에서 균열암반 매질의 이진법적 특성에 대해 정량적으로 기술할 수 있는 현장 조사기법과 이 결과를 광역적으로 확장해석할 수 있는 up-scaling 기법 등에 대한 연구가 지속적으로 요구된다고 할 수 있다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업인 “청정 대용량 지하수자원 확보 기술개발” 사업의 연구비 지원으로 진행되었습니다.

참 고 문 헌

박정우, 배대석, 2005, 텔레뷰어에서 관찰되는 단열특성과 수리 전도도의 상관관계 분석, *지질학회지*, **41**(2), 269-285.

한국지질자원연구원, 2003, 균열암반의 수리지질학적 특성 연구, KR-2003-(최종)-09-2003-R.

한국지질자원연구원, 2004, 지하수시스템 통합해석기술개발 (I), KR-2004-(연차)-07-2004-R.

함세영, 김문수, 이병대, 류상민, 옥수석, 2001, 부산지역 화강암의 단열변도와 수리적 특성의 상관성, *지질공학*, **11**(3), 279-294.

Ando, K., Kostner, A., and Neuman, S.P., 2003, Stochastic continuum modeling of flow and transport in a crystalline rock mass: Fanay-Augres, France, revisited, *Hydrogeology Journal* **11**(5), 521-535.

Bear, J., Tsang, C.F., and de Marsily, G., 1993, Flow and contaminant transport in fractured rock., San Diego: *Academic Press, Inc.*

Berkowitz, B., Bour, O., Davy, P., and Odling, N., 2000, Scaling of fracture connectivity in geological formations., *Geophysical Research Letter*, **27**(14), 2061-2064

Bour, O., P. Davy, C. Darcel, and N. Odling, 2002, A statistical scaling model for fracture network geometry, with validation on a multiscale mapping of a joint network (Hornelen Basin, Norway), *Journal of Geophysical Research*, **107**(B6), 2113, doi: 10.1029/2001JB000176.

Cacas, M.C., Ledoux, E., de Marsily, G., Barbreau, A., Calmels, P., Gaillard, B., and Margritta, R., 1990a, Modelling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation. 1. The flow model., *Water Resources Research*, **26**(3), 479-489.

Cacas, M.C., Ledoux, E., de Marsily, G., Barbreau, A., Calmels, P., Gaillard, B., Margritta, R., 1990b, Modelling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation. 2. The transport model., *Water Resources Research*, **26**(3), 491-500.

de Marsily, G.h., Delay, F., Goncalves, J., Renard, P.h., Teles, V., and Violette, S., 2005, Dealing with spatial heterogeneity, *Hydrogeology Journal*, **13**, 161-183.

IAEA, 1994, Siting Geological Disposal Facilities.

National Research Council, 1996, Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications. Washington, DC: National Academy Press.

Neumann, S.P., 2005, Trend, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks, *Hydrogeology Journal*, **13**, 124-147.

Paillet, F.L., 1998, Flow modeling permeability estimation using borehole flow logs in heterogeneous fractured formations, *Water Resources Research*, **34**(5), 997-1010.

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

Wellman, T.P., and Poeter, E.P., 2005, Estimating spatially variable representative elementary scales in fractured architecture using hydraulic head observations, *Water Resources Research*, **41**, W03001, doi:10.1029/2004WR003287.

William, J.H. and Paillet, F.L., 2002, Using flowmeter pulse tests to define hydraulic connections in the subsurface: a fractured shale example, *Journal of Hydrology*, **265**, 100-117.