

암반대수층에서의 공내 유량측정기의 고정식 및 이동식 측정방법에 관한 비교 연구

장기영¹ · 박학윤¹ · 김태희² · 여인욱^{1*}

¹전남대학교 지구환경과학부, ²한국지질자원연구원

Comparative Study on Stationary and Trolling Methods of Flowmeter in Fractured Rock Aquifer

Ki Young Jang¹ · Hak Yun Park¹ · Tae Hee Kim² · In Wook Yeo^{1*}

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Chonnam National University

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

ABSTRACT

Stationary and trolling methods in measuring flow using flowmeter were adopted to investigate the hydraulic connectivity of fractures and to evaluate the applicability of the measurement methods. Stationary method was useful for identifying the inflow and outflow patterns in the measured section, which enabled us to analyze the hydraulic connectivity of fractures between the wells. Trolling method failed to find the inflow and outflow patterns in the well, but was very effective for locating the conductive fractures. Measuring flow in the borehole by both stationary and trolling methods was found to be very efficient for identifying conductive fractures and their hydraulic connectivity in fractured rock aquifer.

Key words : flowmeter, stationary method, trolling method, conductive fracture, hydraulic connectivity

요 약 문

공내 유량측정기의 고정식 및 이동식 측정방법을 이용하여 암반대수층에서의 절리의 수리적 연결성 및 두 측정방법의 적용성을 검토하였다. 고정식 측정방법의 경우 측정구간에서의 지하수의 유출 및 유입을 파악할 수 있어, 관정사이의 수리적 연결성을 해석하는데 매우 유용하였다. 이동식 측정방법의 경우 유량측정기의 이동속도로 인해 지하수의 유출 및 유입 경향을 파악할 수 없었으나, 지하수 유출 및 유입이 일어나는 절리의 정확한 위치를 찾는 데 매우 유용하였다. 두 측정방법을 동시에 사용하는 것이 지하수 유동절리의 위치 및 수리적 연결성을 파악하는데 더 효율적인 것으로 나타났다.

주제어 : 공내 유량측정기, 고정식측정방법, 이동식측정방법, 지하수 유동 절리, 수리적 연결성

1. 서 론

방사성 폐기물 처분장 및 터널과 지하저장 시설과 같은 대규모 지하 구조물의 부지 선정 및 안정성 평가에 있어 균열 암반 매질을 통한 지하수의 유동 특성은 매우 중요하다. 암반대수층의 경우 수리적 연결성을 가지는 절리에

의해 지하수의 흐름 및 오염물질의 이동이 지배된다. 예를 들어, 최근 가장 큰 오염원 중의 하나인 DNAPL은 지하에 누출되었을 때 절리의 모세관압, 지하수와 DNAPL의 점성력에 의해 모든 절리가 아닌 특정 절리를 따라 이동하게 된다(Ji et al., 2003). 따라서 암반대수층에서 지하수의 흐름, 오염물질의 이동 및 정화에 있어서

*Corresponding author : iwyeo@chonnam.ac.kr

원고접수일 : 2007. 5. 8 게재승인일 : 2007. 5. 17

질의 및 토의 : 2007. 8. 31 까지

수리적 연결성을 가지는 절리를 파악하는 것이 매우 중요하다. 균열 암반 매질에서의 지하수 유동 특성을 파악하기 위해 추적자 시험, 패커시험 등이 널리 활용되고 있다 (de Marsily, 2005; Newman, 2005).

1980년대 후반 이후 공내 유량측정기(flowmeter)가 개발되면서 절리 및 파쇄대의 수리적 연결성에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다(김용제 외, 2005; 김태희 외, 2004a, 2004b; 한국지질자원연구원, 2006; Boman et al., 1997; Paillet, 1993, 1998, 2000; Paillet et al., 1996; Williams and Paillet, 2002; Ruud and Kabala, 1996). 국외의 기존 연구를 살펴보면 심도에 따른 구간별 유량을 측정하여 수리전도도나 저류계수등과 같은 수리학적 변수의 해석에 활용하였으며(Paillet, 1998, 2000; Paillet et al., 1996; Ruud and Kabala, 1996; Williams and Paillet, 2002), 이와 함께 암반대수층에서 절리의 수리적 연결성을 확인하고자 하는 연구가 이루어 졌다(Paillet, 1993; Boman et al., 1997). Paillet et al. (2002)은 암반대수층에서 유량측정기와 전기비저항을 이용하여 수리적 연결성을 갖는 절리를 찾아내는 연구를 수행하였다. 국내에서도 유량측정기를 사용하여 균열 암반 매질에서의 지하수 유동 특성을 파악하고, 절리의 수리적 연결성을 파악하고자 하는 연구가 이루어 졌다(김태희 외, 2004a, 2004b; 한국지질자원연구원, 2006). 또한 파쇄대 응회암층에서 유량측정기, 물리 검증, 패커시험, 추적자 시험 등을 함께 실시하여 절리의 연결성을 파악하고자 하였다(김용제 외, 2005).

본 연구에서는 수리적 연결성을 갖는 절리들을 파악하기 위해 고정식(stationary) 측정뿐만이 아니라 이동식(trolling) 측정방법을 이용하여 지하수 유동에 영향을 미

치는 투수성 절리들을 파악하고자 하였다. 기존의 연구에서는 이동식 측정방법보다는 고정식 방법만을 이용하여 해석하고 있다. 따라서 본 연구에서는 고정식 측정방법의 결과와 비교하여, 이동식 측정방법의 적용성 및 효율성을 검토하였다. 단공유수시험(single-hole flow test)과 교차유수시험(cross-hole flow test)을 수행하였으며, 유량측정에는 고정식 및 이동식 측정방법을 사용하였다. 두 측정방법을 이용하여 수리적 연결성뿐만이 아니라 절리의 정확한 위치도 파악하고자 하였다.

2. 지질 및 관측공 현황

본 연구에서는 전남대학교에 위치한 직경 15 cm의 관정 3개중 2개를 활용하였다. 연구지역의 지형 경사는 매우 완만하며, 주변에 하천이 위치하고 있으나 복개 도로 공사로 인하여 하천으로의 지하수 유출이 차단된 지역이다. 각 관정은 지질 도폭 상 화강암질 편마암을 기반암으로 하고 있으며(한국자원연구소, 1997), 시추자료에 의하면 기반암까지의 심도는 지표로부터 약 14.5 m~18.5 m이다. 두 관정사이의 거리는 12.33 m이며, 관정의 직경 및 심도 등 자세한 사항은 Table 1에 정리하였다. 케이싱은 풍화층 하부에서 기반암 상부 약 0.5 m까지 설치하였으며 케이싱 하부는 나공으로 존재하고 있다. 연구 지역의 수리지질학적 특성을 알아보기 위해 순간 충격시험을 실시하였다. 순간 충격시험은 일정 부피의 고체 슬러그를 주입하고, 수위가 안정된 뒤에 다시 슬러그를 제거하면서 실시하였다. 순간충격시험 자료의 해석은 Bouwer and Rice(1976)의 해석 방법을 이용하였다. 순간충격시험의 해

Table 1. Details of wells in test site

Well	Total depth (m)	Diameter (m)	Casing length (m)
BH-1	102	0.15	16.5
BH-3	80	0.15	15

Table 2. Hydraulic conductivities measured by slug test (unit in m/sec)

Well	Test	Results	Geometric Mean	Standard Deviation
BH-1	slug in	8.07×10^{-7}	5.47×10^{-7}	2.55×10^{-7}
		4.40×10^{-7}		
	slug out	8.09×10^{-7}		
		3.11×10^{-7}		
BH-3	slug in	9.03×10^{-7}	8.53×10^{-7}	4.11×10^{-7}
		8.66×10^{-7}		
	slug out	8.42×10^{-7}		
		8.06×10^{-7}		

석 결과로 나타난 수리전도도는 $3.11 \times 10^{-7} \sim 9.03 \times 10^{-7}$ m/sec의 범위를 가지며 공별 수리전도도는 주목할 만한 차이를 보이지 않았다(Table 2).

관정에서의 절리 또는 파쇄대의 위치를 파악하기 위하여 공내촬영기(borehole televiewer)를 이용하여 공내 촬영을 실시하였다. 공내촬영기의 해상도가 높지 못해 대략적인 절리 및 파쇄대의 위치만을 파악할 수 있었다(Table 3). 대부분의 절리 및 파쇄대는 케이싱 하부 10 m 구간 이내에 분포하고 있어, 상부 기반암에 대부분의 파쇄대가 존재하고 있음을 나타낸다.

3. 현장시험 및 연구방법

공내 유량측정기를 이용하여 관정의 심도에 따른 유량 및 유향을 측정하였다. 공내 유량측정기는 미국 Century-Geophysics 사의 9721 모델을 사용 하였으며, 전자기(electromagnetic) 형식으로서 수직방향의 유향을 측정할 수 있는 공내 유량측정기이다. 공내 유량측정기에는 유체가 센서를 중심으로 이동 할 수 있도록 하는 스커트(skirt)가 장착되어 있으며 스커트의 지름은 공내 직경과 같은 0.15 m이다(Fig. 1a).

유량 측정 방식에는 고정식(stationary)과 이동식(trolling) 방법이 있다. 고정식 방법은 관정의 상부나 하부에서부터 일정 간격을 두고 지하수의 유량을 측정 하여 심도에 따른 유량의 변화를 측정하는 방법이며, 특정 구

간과 상하 구간에서 측정된 유량을 조사하여 특정 구간에 대한 지하수의 유출 및 유입을 확인 할 수 있다. 반면, 이동식 방법은 관정의 상부나 하부에서부터 일정한 속도로 공내 유량측정기를 이동하면서 관정 내 지하수의 유량을 연속적으로 측정하는 방식이다. 이동식 방법으로 관정 내의 유량을 측정 할 때에는 유량측정기의 이동 속도 때문에 실제 유량보다 작거나 크게 측정될 수 있어 이동속도의 영향에 대한 보정이 필요하다. 그러나 본 연구에서는 정확한 유량 파악보다는 유동절리 및 절리들의 수리적 연결성을 파악하는데 목적이 있기 때문에 이에 대한 보정은 고려하지 않았다. 본 연구에 적용된 고정식 방법의 측정 간격은 관정의 총 심도 및 파쇄대의 위치를 고려하여 5 m 간격으로 측정 하였다. 이동식 방법에서는 유량측정기의 이동속도는 0.5 m/min과 1.0 m/min으로 하였으며, 이동 중 측정 간격은 0.005 m로 하였다.

본 연구에서는 BH-1과 BH-3 두 관정을 대상으로 연구가 수행 되었다. 유량 측정 시험은 양수를 실시하며 동일 관정에서 유량 변화를 측정함으로써 단일 관정 내 지하수 유동 절리를 확인 할 수 있는 단공유수시험, 두 개의 관정 중 한 관정에서 양수를 실시하고 다른 관정에서 유량 변화를 측정하여 두 관정 간 수리적 연결성을 확인 할 수 있는 교차유수시험을 실시하였다. 또한 자연 수리경사에 의한 지하수의 흐름을 파악하기 위하여 자연유수시험을 실시하였다. 본 연구에서는 $68 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 양수를 실시하며 교차유수시험 및 단공유수시험을 실시하였으며, 모든 유수시험(flow test)에서는 고정식 및 이동식 측정방법을 이용하여 관정 내의 유량을 측정하였다(Fig. 2). 교차유수시험에서는 순수한 양수에 의한 효과를 구하기 위해 교차유수시험 결과에서 자연적인 흐름조건에서 측정된 유량을 차감하여 순 유량(net flow)을 산출하여 두 관정사이의 수리적 연결성을 해석하였다. 단공유수시험과 교차유

Table 3. Location of fracture and fractured zone identified by borehole televiewer

Well	Depth of fracture and fractured zone (m)
BH-1	16.5~17.5, 30~31, 41~43, 48~48.5
BH-3	15~17

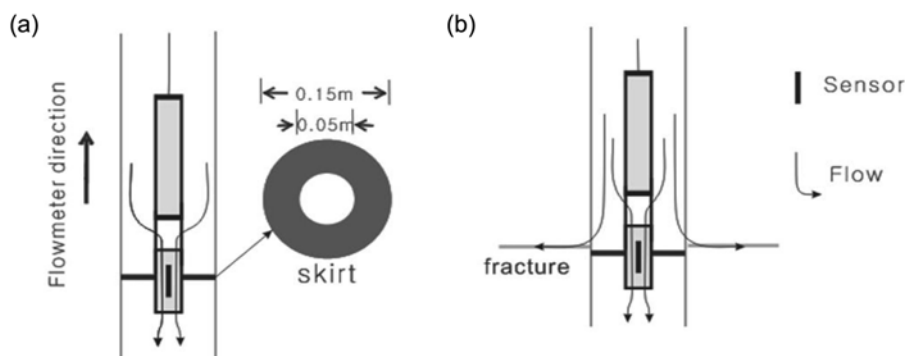


Fig. 1. Schematic drawings of (a) flowmeter and skirt and (b) water flow through the flowmeter and fracture during the trolling measurement.

수시험을 실시할 때 양수는 안정수위를 감안하여 케이싱 상부로부터 BH-1은 15 m, BH-3는 14 m 지점에서 실시하였다.

4. 시험 결과

4.1. 고정식 방법

BH-1에서의 고정식 측정방법에 의한 결과는 Fig. 3과

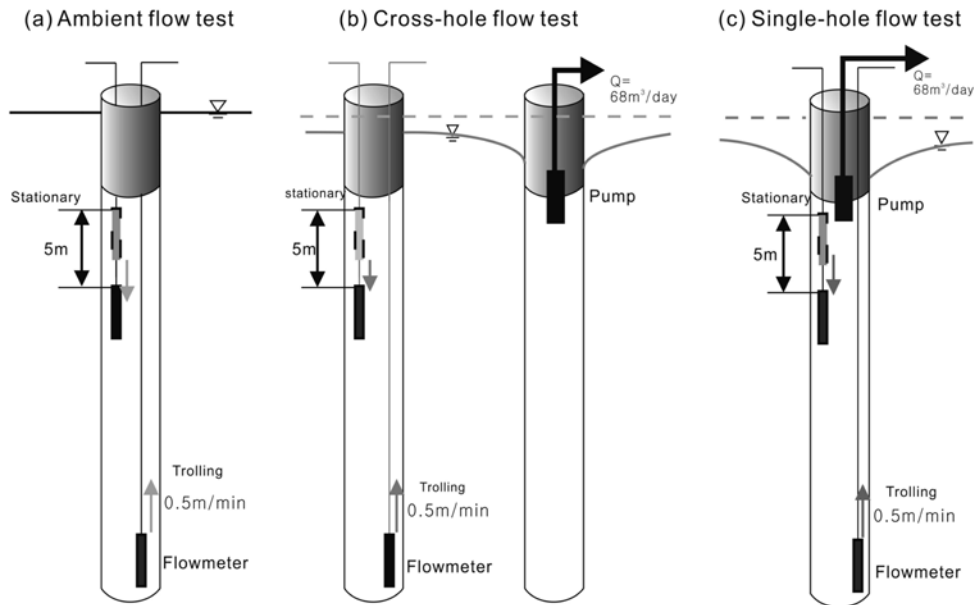


Fig. 2. Schematic drawings of measurement methods of flowmeter during (a) ambient flow test, (b) cross-hole flow test, and (c) single-hole flow test.

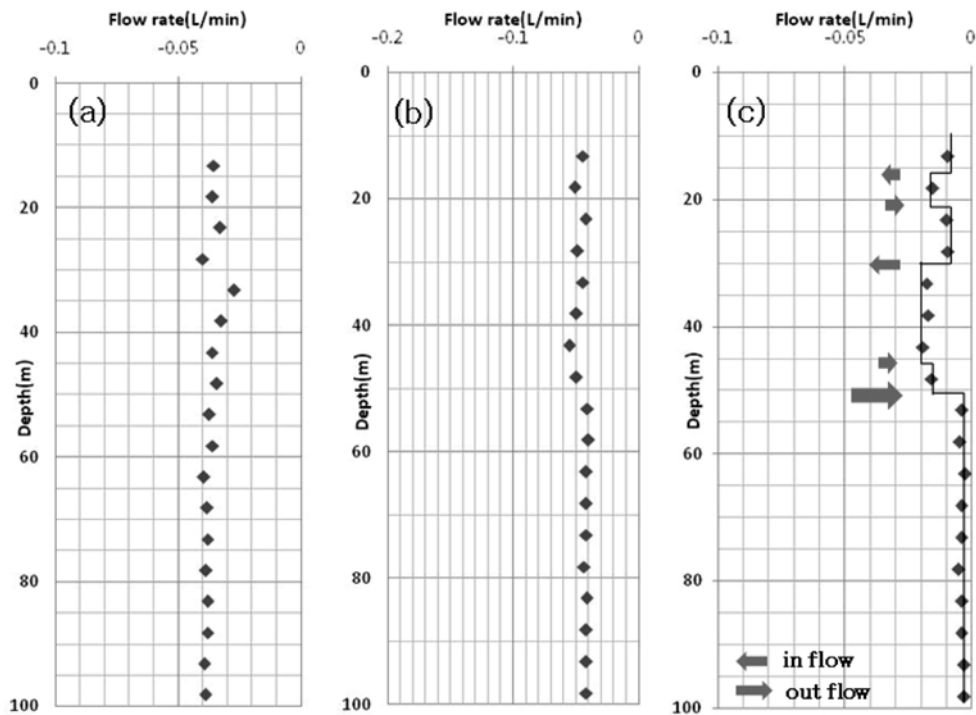


Fig. 3. Flow variations with the increase of the depth in BH-1. Flow was measured by stationary method for (a) ambient flow condition and (b) cross-hole flow test (i.e., pumped at BH-3). Net flow is shown in (c).

같다. 그림에서 “-”는 하향흐름, “+”는 상향흐름을 의미한다. 자연적인 흐름에 대한 측정된 유량은 0.04~0.03 L/min 을 보이며, 23 m~38 m 구간에서 약간의 유량변화를 보이고 있다(Fig. 3a). BH-3에서 양수하며, BH-1에서 유량을 측정하는 교차유수시험의 결과는 0.04~0.06 L/min 로 유량이 다소 증가하였다(Fig. 3b). 두 관정사이의 수리적 연결성을 해석하기 위하여 교차유수시험 결과에서 자연유수시험 결과를 차감하여 순 유량(net flow)을 산출하였다(Fig. 3c). 그 결과 케이싱 하부인 13.5 m~18.5 m, 28.5 m~33.5 m, 그리고 48.5 m~53.5 m 구간에서 관정 내로의 지하수의 유입이, 18.5 m~23.5 m, 43.5 m~48.5 m 구간에서 BH-3관정으로의 유출이 일어나고 있음을 확인할 수 있다 (Fig. 3c). 유입이 일어나는 구간에서의 절리는 BH-1에만 연결되어 있고, BH-3과는 수리적 연결성이 없는 절리이며, 반면 유출이 일어나는 절리는 BH-1 뿐만 아니라 BH-3에도 수리적 연결성을 갖는 절리이다.

BH-3에 대한 고정식 측정방법에 대한 결과는 Fig. 4와 같다. 유량은 0.06~0.05 L/min을 보였다(Fig. 4a). BH-1과의 연결성을 확인해 보기 위해 실시한 교차유수시험의 결과는 앞서 언급한 BH-1의 경우보다 더 큰 변화 양상을 나타냈다(Fig. 4b). 양수에 의한 순유량(net flow)의 결과는 공내 촬영을 통해 확인 되었던 15 m~17 m 심도에서

뿐만 아니라 18.5 m~23.5 m, 38.5 m~43.5 m 구간에서 유량의 변화가 관찰되었다. 13.5 m~18.5 m, 38.5 m~43.5 m 구간에서는 관정으로의 지하수 유입이 일어났고, 18.5 m~23.5 m, 43.5 m~48.5 m 구간에서는 관정으로부터 지하수가 유출되어 이 구간에 BH-1 관정으로 지하수가 유출되는 절리가 존재함을 보여준다(Fig. 4c).

각 관정에서의 지하수 유동절리(conductive fracture)를 찾기 위해 단공유수시험을 실시하였다(Fig. 5). BH-1의 경우 케이싱 바로 하부 심도인 17 m~18.5 m 심도에서 가장 많은 지하수가 유입되고 있으며, 28.5 m~33.5 m, 43.5 m~48.5 m, 48.5 m~53.5 m 구간에서 각각 지하수의 유입이 있음을 확인할 수 있다(Fig. 5a). BH-3에서도 케이싱 바로 하부 심도인 13.5 m~18.5 m 심도에서 가장 많은 지하수가 유입되고 있으며, 18.5 m~23.5 m, 23.5 m~28.5 m, 43.5 m~48.5 m 심도에서 각각 지하수가 유입되고 있다(Fig. 5b). 양수 위치가 케이싱 구간 내에 위치하는 점을 감안 하였을 때, 두 관정에 있어 양수 시 대부분의 지하수가 케이싱 바로 하부에 발달하는 파쇄대를 통해 지하수가 유입되고 있음을 확인할 수 있다.

4.2. 이동식 방법

자연유수시험, 교차유수시험, 단공유수시험을 실시할 때,

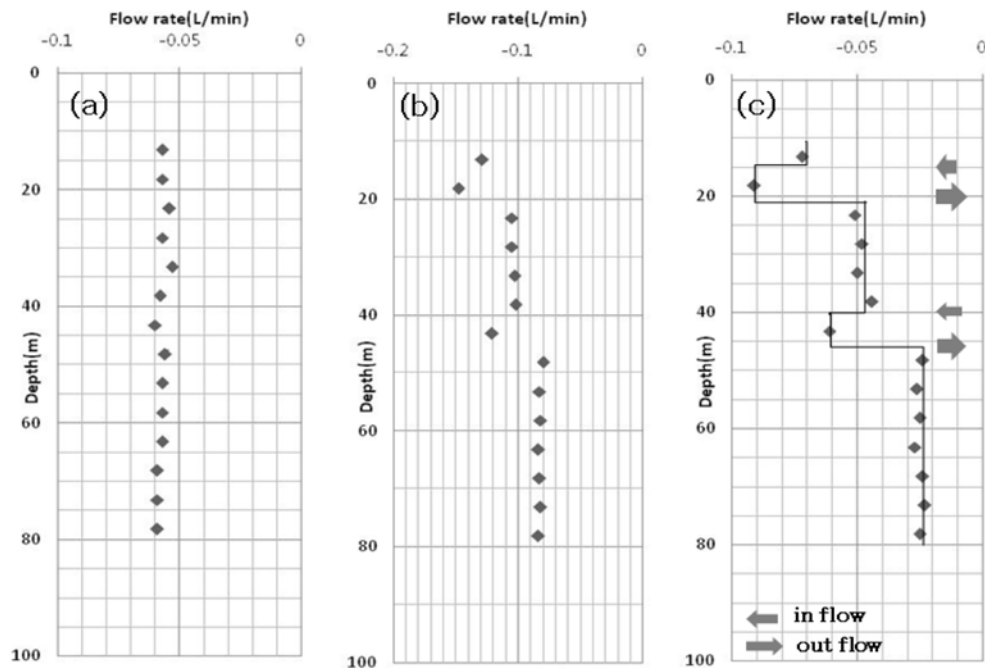


Fig. 4. Flow variations at different depths in BH-3. Flow was measured by stationary method for (a) ambient flow condition and (b) cross-hole flow test (pumped at BH-1). Net flow is shown in (c).

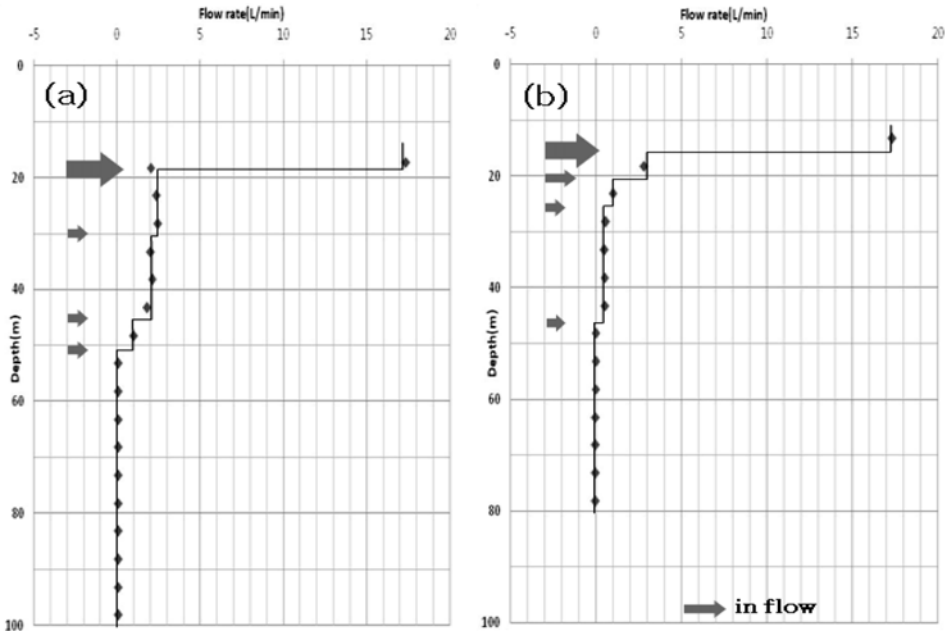


Fig. 5. Flow variations at different depths in (a) BH-1 and (b) BH-3 measured by stationary method during single-hole flow test.

관정 내 깊이에 따른 연속적인 유량을 측정하기 위하여 이동식 측정방법을 활용하였다. 공내 유량측정기는 하부에서 상부로 올리며 측정하였으며, 이동속도는 0.5 m/min으로 설정하였다. 단, BH-1의 단공양수시험 시에는 1.0 m/min으로 하였다. 그러나 유량측정기의 이동속도는 상부로 가면서 점진적으로 증가하였다. 이는 공내 유량측정기가 관정 상부로 이동하면서 유량측정기에 연결된 연결선의 길이가 짧아짐에 따라 윈치(winch)에 작용하는 장력이 감소되어, 장비의 서버시스템이 점진적으로 속도를 증가시키기 때문이다. 이동속도의 편차는 약 +0.1 m/min이다. BH-1에서 각 시험 시 이동식 측정방법에 의해 측정된 유량은 Fig. 6에, 그리고 BH-3에서의 측정된 값은 Fig. 7에 나타내었다. 두 결과에 있어 “-”값을 보이는 것은 유량측정기가 상부로 움직이면서 관정 내의 지하수는 상대적으로 아래로 이동하기 때문이다. 또한 상부로 오면서 전체적으로 하향으로의 유동이 더 커지는 것은 유량측정기의 이동속도가 점진적으로 증가하였기 때문이다.

BH-1에서 측정된 자료를 살펴보면 자연유수시험결과와 교차유수시험결과와의 그래프 양상이 매우 유사하며, 그 변화폭 또한 일치함을 확인 할 수 있다(Fig. 6a, 6b). 17 m~20 m, 25 m, 43 m, 45 m, 49 m지점에서 약 1.0 L/min의 유량 변화를 확인 할 수 있다. 즉, 하향의 흐름이 이 지점에서 작아진다는 것이다. 이는 질리가 없는 경우 유량측정기가 상부로 이동하면서 관정 내의 지하

수가 유량측정기의 센서를 통해 모두 하부로 이동하는데, 특정지점에 투수성을 가지는 질리가 있는 경우 관정내의 지하수가 센서뿐만이 아니라 질리를 통해 빠져 나가기 때문이다(Fig. 1b). 또한 질리나 파쇄대가 있는 곳에서 공경의 변화가 일어나는데, 스키투와 공경의 변화로 인한 틈 사이를 통해 관정 내의 지하수가 아래로 이동하기 때문이다. 이러한 이동식 측정방법은 지하수 유동질리를 정확히 찾는데 매우 유용한 방법이 될 수 있다. 그러나 교차유수 시험과 자연유수시험에서는 지하수의 흐름이 작은 경우 유량측정기의 이동속도에 의해 영향을 받기 때문에, 심도별 유량에 거의 차이가 나타나지 않는다. 따라서 이동식 측정방법은 질리간의 상호 수리적 연결성 연구에는 적절치 않을 수 있다. 단공유수시험의 경우 49 m 지점을 경계로 유량 값이 증가하였다(Fig. 6c). 이는 49 m 지점 하부에는 지하수 유동질리가 없어 거의 지하수의 흐름이 없으며, 49 m 지점에 질리가 있어 지하수가 유입되고 있기 때문이다. 이는 고정식 측정방법의 결과와도 일치한다. 또한 유량의 큰 변화가 관측되는 지점 역시 자연유수시험과 교차유수시험의 지점과 일치하며, 이러한 관측 결과는 해당 심도에 지하수 유동 질리가 분포하고 있음을 지시한다. 단공유수시험에서도 케이싱 바로 하부에서 많은 지하수가 유입되고 있음을 보여준다.

BH-3의 경우 역시 유량의 큰 변화가 감지되는 위치를 이용하여 질리의 위치를 구하였다. 케이싱 바로 하부인

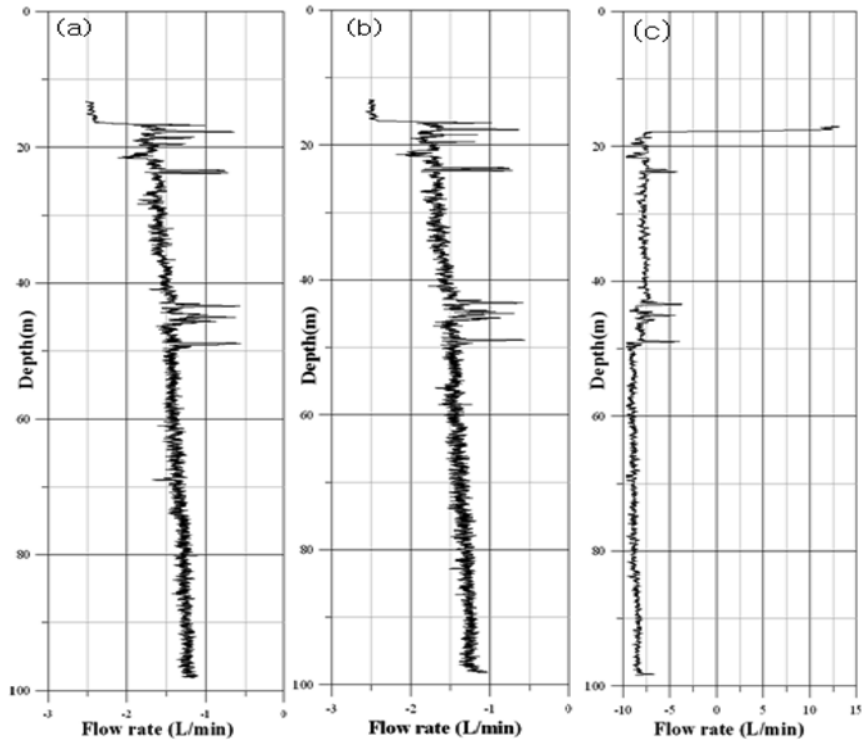


Fig. 6. Flow variations measured by trolling method at different depths in BH-1 for (a) ambient flow, (b) cross-hole flow test, and (c) single-hole flow test.

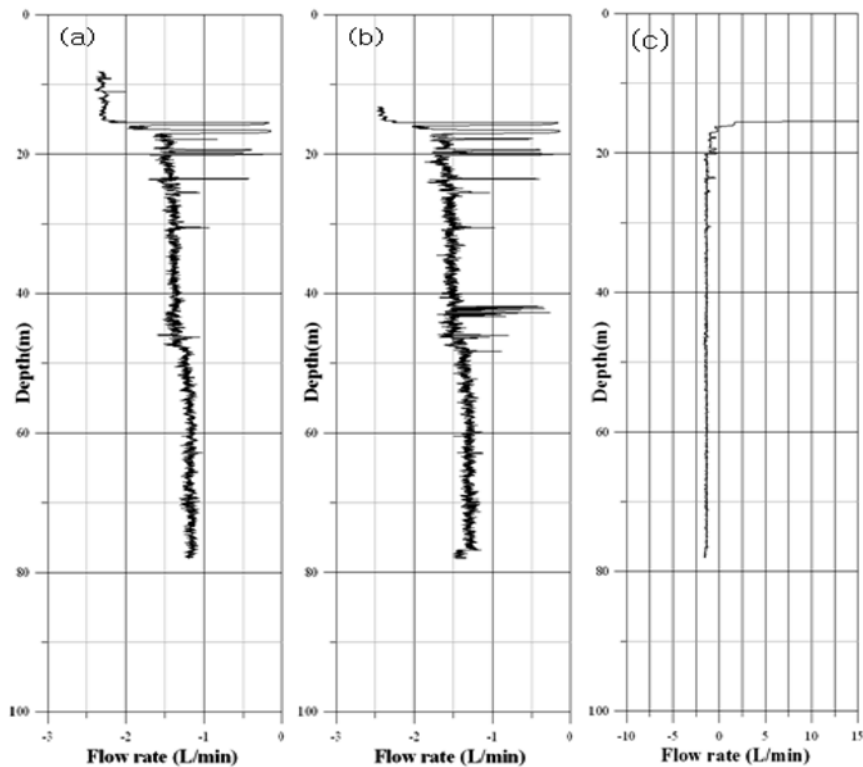


Fig. 7. Flow variations measured by trolling method at different depths in BH-3 for (a) ambient flow, (b) cross-hole flow test, and (c) single-hole flow test.

15 m 심도에서 18 m까지는 파쇄대가 존재하며 지하수 유동절리는 20 m, 23 m, 25 m, 30 m, 46 m에 위치한다 (Fig. 7). Fig. 7(b)의 그래프 중 40 m~50 m 구간의 큰 변화는 유량측정기의 이동속도가 순간 급격히 줄어들면서 하향의 흐름이 줄어들었기 때문에 나타난 것이다. 그러나 46 m 지점의 경우 Fig. 7(a)에서 보듯이 유량의 변화가 나타나 절리가 위치하는 것으로 판단하였다. 그러나 변화 폭이 크지 않아 다른 절리에 비해 수리전도도는 크지 않을 것으로 판단된다. 단공유수시험의 결과도 케이싱 바로 하부에서 많은 지하수가 유입되고 있음을 보여준다.

5. 수리적 연결성 절리 해석 및 고찰

이동식 측정방법에 의해 확인된 절리의 위치와 고정식 측정방법에 의해 지하수 유출입이 일어나는 구간은 경향적으로 일치하는 것으로 나타났다(Figs. 3, 4, 6, and 7). 따라서 이동식 측정방법에 의해 파악된 절리의 심도를 이용하여, 고정식 측정방법의 각 측정구간에서 지하수 유출 또는 유입이 일어나는 절리의 정확한 위치를 결정하였다. 고정식과 이동식 측정방법의 결과를 종합하여 확인된 절리의 위치를 Fig. 8에 정리하였다. 네 지점에서는 이동식 측정 방법에 의해 예측된 절리가 고정식 측정방법에는 전혀 나타나지 않았다(Fig. 8). 이는 이 절리가 지하수의 유동이 크지 않은 절리, 즉 수리적 연결성이 매우 낮은 절리이거나 또는 절리와 관련없이 단순히 시추 시 발생한 공경의 변화로 관정내의 지하수가 유량측정기의 센서가

아닌 스커트와 공벽 틈 사이를 통해 이동하였기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 차이가 발생한 원인에 대해서는 다른 종류의 물리검층 방법을 이용한 보다 자세한 연구가 필요하다.

두 관정의 케이싱 바로 아래 지점에 위치한 파쇄대가 주된 지하수 유동절리이며, 20 m 지점에 위치한 절리는 두 관정을 연결하고 있는 것으로 나타났다. 그리고 BH-1의 45 m, 49 m의 절리가 수리적으로 BH-3과 연결되며, BH-3의 46 m 지점 절리가 BH-1과 수리적으로 연결되어 있는 것으로 판단된다. 반면 BH-1의 28.5 m~33.5 m 구간의 절리와 BH-3의 40 m 지점의 절리는 두 관정사이의 수리적 연결성은 없는 절리로 나타났다.

두 관정에서 실시한 고정식 및 이동식 측정방법에 있어서 고정식 방법의 경우 단공유수시험 및 교차유수시험 모두에서 구간별 지하수 유입 및 유출을 확인할 수 있어, 각 관정 및 상호간의 수리적 연결성을 파악하는데 큰 장점이 있다. 그러나 측정구간(간격)이 큰 경우 지하수 유동 절리의 정확한 위치를 찾기가 곤란하다는 단점이 있다. 이를 위해서는 구간을 작게 선택하여야 하는데 이는 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 그러나 이동식 측정방법은 유량측정기가 연속적으로 이동하며 지하수 유동절리의 위치를 정확하게 찾아낼 수 있다는 장점이 있다. 따라서 고정식 측정에 앞서 이동식 측정을 수행하여 절리의 위치를 파악한 후, 효율적인 측정구간을 설계하여 고정식 측정을 수행하는 것이 훨씬 더 효율적일 수 있을 것이다.

Trolling	Stationary method		Trolling	Stationary method	
	Cross-hole flow test	Single-hole flow test		Cross-hole flow test	Single-hole flow test
17~19	17~19	17~19	15~18	15~18	15~18
20	20	20	20	20	20
			23		
25			25	X	25
			30		
X	28.5~33.5	28.5~33.5			
			40		
43					
45	45	45			
49	49	49	46	46	46

Fig. 8. Location of identified conductive fractures by stationary and trolling methods: (a)BH-1, and (b)BH-3.

6. 결 론

두 관정에 대해 공내 유량 측정기의 고정식 및 이동식 측정방법을 이용하여 수리적 연결성 및 두 방법에 대한 적용성을 연구하였다. 고정식 방법의 경우 관정 내 구간 별 지하수 유출 및 유입의 양상을 더욱 정확하게 판단할 수 있으며, 이는 특히 지하수의 수리적 연결성이 미약하여 지하수의 흐름이 매우 작은 곳에서 이동식 방식에 비하여 더욱 유리할 것으로 판단된다. 반면 이동식 방법을 이용하여 관정사이의 상호 수리적 연결성을 조사한 경우 공내 유량측정기의 이동속도를 작게 조절하여도 유량측정기의 이동속도로 인한 지하수 흐름의 변화로 인해 지하수 유출 및 유입의 경향을 파악할 수 없었다. 그러나 이동식 측정방법은 인위적인 지하수 흐름 형성 없이 자연지하수 조건에서도 지하수 유동 절리의 위치를 정확히 추정할 수 있는 것으로 나타났다. 이동식 측정방법은 아직 국내의 연구에는 사용되지 않았으나, 이 측정방법이 지하수 유동절리 위치를 정확히 찾아낼 수 있어 지하수 유동절리 위치 파악에 매우 유용한 실험방법이 될 수 있음을 확인 하였다. 그러나 이동식 및 고정식 측정방법 중 하나가 방법론상의 우위로 보여주는 것은 아니며, 지하수 유동절리의 위치 및 절리의 수리적 연결성을 파악하는 데는 두 가지 방법을 병행하는 것이 보다 더 유용할 수 있음을 보여주었다.

사 사

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(R02-2004-000-10176-0).

참 고 문 헌

김용제, 김태희, 김구영, 황세호, 채병곤, 2005, 파쇄대 응회암 대수층의 지하수 유동 특성화 기법, *지하수토양환경* **10**(4), 33-44.
 김태희, 신제현, 황세호, 김구영, 조병욱, 채병곤, 김용제, 2004a, 지하수 유량-유속 자료 및 균열 분포를 이용한 균열암반 특성화 기법, *한국지하수토양환경학회 추계학술발표회*, p. 155-158.
 김태희, 황세호, 채병곤, 고정석, 이철우, 김용제, 2004b, 현장균열망 연결성 통합해 석에 대한 선행연구, *한국지하수토양환경학회 춘계 학술발표회*, p. 509-513.

한국자원연구소, 1997, 광주 지질도폭 설명서(1:250,000), KR-97(S)-1, 과학기술부.

한국지질자원연구원, 2006, 지하수시스템 통합해석기술개발 (I), KR-2004-(연차)-07-2004-R, p. 46-47.

Boman, G.K., Molz, F.J., and Boone, K.D., 1997, Borehole flowmeter application in fluvial sediments: Methodology, Result, and Assessment, *Ground Water*, **35**(3), 443-450.

Bouwer, H. and Rice, R.C., 1976, A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating well, *Water Resources Research*, **12**, 423-28.

de Marsily, Gh., Delay, F., Gonalvs, J., Renard, Ph., Teles, V., and Violette, S., 2005, Dealing with spatial heterogeneity, *Hydrogeology Journal*, **13**(1), 161-183.

Ji, S. H., Yeo, I. W., Lee, K. K., and Glass, R. J., 2003, Influence of ambient groundwater flow on DNAPL migration in a fracture network: Experiments and simulations, *Geophysical Research Letters*, **30**(10), 1504, doi:10.1029/2003 GL 017064.

Newman, SP., 2005, Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks, *Hydrogeology Journal*, **13**(1)124-147.

Palillet, F.L., 1993, Using borehole geophysics and cross-borehole flow testing to define hydraulic connections between fracture zones in bedrock aquifers, *Journal of Applied Geophysics*, **30**, 261-279.

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

Paillet, F.L., 2000, A field technique for estimating aquifer parameters using flow log data, *Ground Water*, **38**(4), 510-52.

Paillet, F.L. and Crowder, R.E., 1996, A generalized approach for the interpretation of geophysical well logs in ground-water studies - Theory and Application, *Ground Water*, **34**(5), 883-898.

Paillet, F.L., Williams, J.H., Oki, D.S., and Knutson, K.D., 2002, Comparison of formation and fluid-column logs in a heterogeneous basalt aquifer, *Ground Water*, **40**(6), 577-585.

Ruud, N.C. and Kabala, Z.J., 1996, Numerical evaluation of flowmeter test interpretation methodologies, *Water Resources Research*, **32**(4), 845-852.

Williams, 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.