

시추공 유속 검층을 이용한 암반 대수층의 수리전도도 분포 산정

Estimation of the hydraulic conductivity profile in fractured rocks using the borehole flowmeter test

구 민 호(Min-Ho Koo)

공주대학교 지질환경과학과

차 장 환(Jang Hwan Cha)

농업기반공사 농어촌연구원

요약 / ABSTRACT

공주대학교 내의 3개 시추공을 대상으로 열원 공급 방식의 유속 측정기를 이용하여 자연 유속 및 양수 유발 유속을 측정하였으며, 자료 분석을 통하여 수리전도도의 수직적인 분포를 추정하였다. 자연 상태에서 시추공을 통하여 유입 또는 유출되는 지하수의 양은 1~2 m³/day로 균열 암반의 경우 시추공에 발달된 투수성 단열들을 통하여 많은 양의 지하수가 유동되고 있음을 관측하였다. 유속 측정으로부터 계산된 구간별 수리전도도는 동일 시추공에서 실시한 수압시험으로부터 구한 값과 유사한 경향을 보였다. 시추공 영상촬영 자료 분석 결과 투수성 단열이 발달된 구간은 유속 변화가 큰 구간과 일치하였다. 수질 검층 결과 일부 구간에서 상이한 수질 특성을 갖는 지하수의 유입에 의해 불연속적인 수질 변화가 나타났으나, 유속 측정 결과와 비교할 때 투수성 단열의 위치를 파악할 수 있는 능력은 현저하게 떨어지는 것으로 분석되었다.

주요어 : 유속 측정기, 자연 유속, 양수 유발 유속, 수리전도도, 암반 대수층

The vertical distribution of hydraulic conductivity of 3 boreholes located at Kongju National University was estimated by the ambient flow and the pump-induced flow measurements using a heat-pulse flowmeter. The ambient flow measurements showed that a great amount of groundwater (1~2 m³/day) flowed in the boreholes through the conductive fractures. The analyzed conductivity profiles are similar to those of the packer test performed for the same boreholes. The conductive fractures in which the differential net flow changed greatly could be identified by the BIPS logging. The water-quality logging data showed that quality of groundwater changed abruptly

at some depths of the boreholes. This change in water quality can be attributed to the presence of conductive fractures that have resulted in the mixing of groundwater of different quality flowing in different fracture channels. However, compared to the flowmeter test, the water-quality logging showed low capability in identifying locations of conductive fractures.

key words : borehole flowmeter, ambient flow, pump-induced flow, hydraulic conductivity, bedrock aquifer

서론

수리전도도는 대수층의 물리적인 특성을 나타내는 대표적인 수리상수로서 지하수 적정개발량의 평가, 유해 폐기물 처분장 선정, 터널 및 유류저장 시설 건설, 지하수 오염물의 거동 평가 및 복원 등과 같은 지하수와 관련된 수리지질학적인 문제들을 해결하는데 우선적으로 추정해야 하는 매우 중요한 인자이다. 암반 대수층의 경우 파쇄 매질이 나타나는 불균질성 및 이방성에 의하여 수리 시스템을 파악하는 것이 매우 어려우며, 특히 수리전도도의 경우 수직적인 불균질성이 매우 크게 나타나는 것으로 알려져 있다. 대수층의 불균질성을 간과하는 경우 오염된 지하수에 대한 정화 시스템의 적절한 설계가 어려우며, 결과적으로 시스템 가동 시 정화의 효율성이 많이 저하되는 것으로 보고 되고 있다(Mercer et al., 1990).

시추공의 구간별 수리전도도를 추정하는 방법으로는 수압시험(packer test), 추적자시험(tracer test) 및 순간충격시험(multi-level slug test) 등이 있으며, 최근에는 유속 측정기를 사용한 시추공 검층법이 개발되어 암반 대수층에 발달된 투수성 단열들의 수직적인 분포를 효과적으로 파악하는 기법으로 많이 이용되고 있다. Paillet et al.(1990)은 암반대수층에서 양수시험 동안 시추공 내에서 유속을 측정하여 투수계수의 수직분포를 파악하였다. Ruud and Kabala(1997) 및 Xiang(1995)은 다층구조를 갖는 대수층에서 유속 측정법에 의한 투수계수의 추정 결과를 수치적으로 분석하였다. Paillet(1998)은 유속 측정 자료를 분석하여 공 주변에서의 지하수 유동을 모사하는 수치모델을 개발하였으며, Kabala(1994)는 대수층의 투수계수와 비저유계수의 수직분포를 동시에 추정할 수 있는

이중 유속 측정법(double flowmeter test)을 개발하였다. Miyakawa et al.(2000)은 시추공용 TV 카메라가 장착된 유속 측정기를 개발하여 파쇄 매질에서의 투수성 단열을 조사하는 목적으로 이용하였다. Young et al.(1998)은 유속 측정법의 이론, 현장 측정 방법, 자료 해석, 및 적용 사례 등을 종합하여 보고하였다. 유속 측정법은 수리전도도의 수직적인 분포를 시추공에서 측정할 수 있는 점에서 수압시험과 유사하지만 수압시험에 비하여 장비 운영이 간단하며, 짧은 시간에 측정이 가능한 장점을 갖는다(Paillet and Allen, 1995).

본 연구에서는 유속 검층법을 공주대학교 내에 설치된 4개 시추공 중 3개 시추공에 적용하여 자연 유속 및 양수 유발 유속의 수직적인 변화를 측정하였다. 유속 변화량의 수직적인 분포로부터 각 구간에 발달된 투수성 단열의 위치를 파악하였으며, 유속 측정 자료의 분석을 통하여 구간별 수리전도도를 추정하였다. 또한 동일한 시추공에 대하여 수압시험, 시추공 영상촬영(BIPS), 및 수질 검층을 수행하여 유속 측정 결과와 비교 분석하였으며, 유속 측정으로부터 계산된 구간별 수리전도도와 시추공 영상촬영 자료에서 획득한 구간별 단열 빈도의 상관관계를 알아보았다.

연구지역의 지질

연구지역 주변의 지질은 고기로부터 선캠브리아기에 속하는 변성암류와 시대미상의 편마상화강암류, 중생대의 화강암류, 염기성암맥, 산성암맥, 안산암질암 및 경상계퇴적암류로 구성된다(Figure 1). 선캠브리아기의 변성암류는 크게 호상편마암과 운모편암으로 구별되며, 시대미상의 편마상화

시추공 유속 검층을 이용한 암반 대수층의 수리전도도 분포 산정

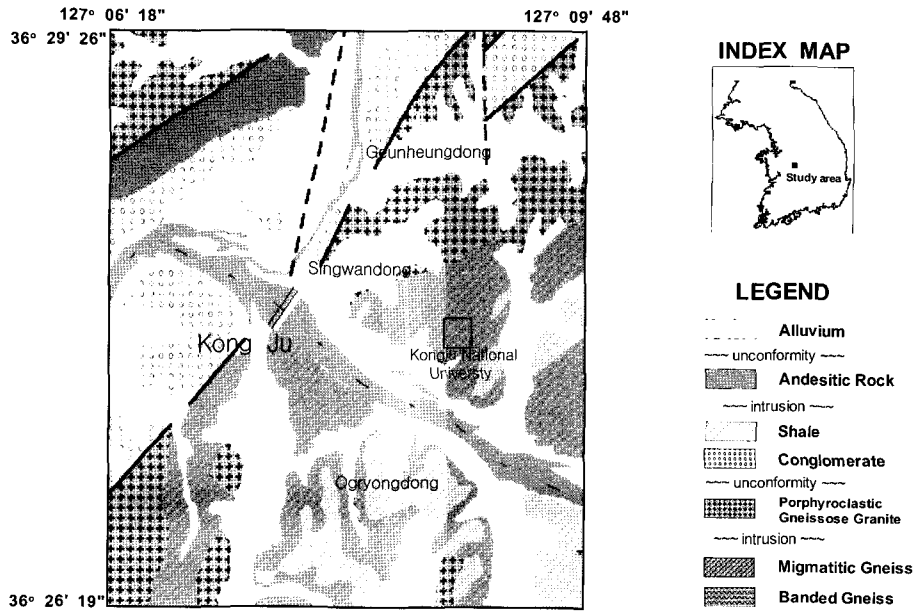


Fig. 1. Geologic map of the study area.

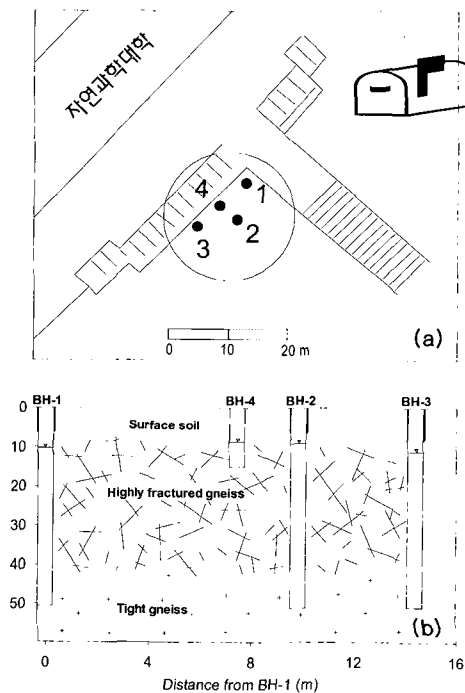


Fig. 2. Map showing the test boreholes: (a) location of the boreholes, and (b) the schematic cross section.

강암류로는 반상쇄설편마상화강암과 편리상화강암이 있다. 백악기 퇴적암류는 북부 중앙 의당면 청룡리 부근에서 청양군 청남면 아산리에 이르기 까지 대상 분포를 보이며, 퇴적암류와 하위의 반상쇄설편마상화강암과는 대체로 단층접촉으로 경계 지워지나 북부에서는 안산암질암의 관입의 영향을 받았다. 퇴적암류는 세일, 실트스톤, 세일질사암, 알코즈사암, 역질사암, 역암 등이 상호 호층을 이루고 있다.

Figure 2는 공주대학교에 설치된 4개 시추공의 위치도와 시추 주상도를 이용하여 도시한 시추공의 단면도를 나타낸다. 시추공은 모두 NX공으로 회전 수세식에 의하여 1999년 12월에 개발되었다. BH-1, BH-2, 및 BH-3은 균열암반 지하수의 관측공으로 사용하기 위하여 충적층 및 풍화대에 해당하는 상부 구간에 케이싱을 설치하고 그라우팅을 수행하였다. BH-4는 상부 충적층 지하수의 관측공으로 설치하였다. Figure 2b에 도시한 바와 같이 모래질 실트로 구성된 미고결층 및 하부 풍화대의 두께는 10m 내외이다. 하부의 편마암에서는 40m 깊이까지 균열이 잘 발달되어 있으며, 40m 하부에서는 균열의 빈도가 급격하게 감소하

는 경향을 보이며 소규모의 암맥이 존재한다.

유속검층

유속 측정기

지하수 시추공용 유속 측정기는 임펠러(impeller), 열원(heat-pulse), 및 전자기(EM) 방식의 3종류가 개발되어 이용되고 있다. 임펠러 방식의 유속 측정기는 가장 오래된 것으로 석유 개발과 관련된 조사 목적으로 개발되었으며, 1980년대 이후 지하수를 대상으로 하는 연구에 적용되었다. 대부분의 임펠러 측정기는 유속이 느린 경우 측정이 불가능하기 때문에 자연 상태에서 지하수 유속을 측정할 수 없는 제한점을 가지는 것으로 알려졌다. 열원 방식의 측정기는 이러한 단점을 보완한 것으로 저속에 매우 민감하여 시추공 내에서의 지하수 흐름을 0.1 ml/min 까지 정밀하게 측정할 수 있다. 전자기 방식의 측정기는 가장 최근에 개발된 것으로 저속에서 고속까지 측정 범위가 넓은 장점을 가지기 때문에 지하수 시추공에 적용하기에 가장 적합한 것으로 알려졌다.

본 연구에 이용된 유속 측정기는 미국 KVA사의 Groundwater Flowmeter Geoflo Model-90으로 열원이 지하수의 이동보다 빠르게 매질을 통

하여 전달되는 원리를 이용하여 개발되었다. 즉 본 장비는 인위적으로 공 내 지하수에 열원을 공급하고 상하에 설치된 열감지 센서를 이용하여 측정된 온도변화로부터 지하수의 유동방향과 유속을 계산한다.

본 연구에 이용된 유속 측정기의 정밀도를 검증하기 위하여 내경 100mm PVC관을 사용하여 실험용 모형을 제작하였다. 연동식(peristaltic) 펌프를 이용하여 물의 주입량을 5~2500 ml/min으로 변화시키면서 유속 측정값을 기록하였다. Figure 3은 실험 결과를 도시한 것으로 본 유속 측정기는 상하 방향의 흐름에서 실제 유량을 비교적 정밀하게 측정하는 것으로 나타났다.

자연 유속(ambient flow) 측정

공주대학교에 설치된 4개 시추공 중 BH-1, BH-2 및 BH-3을 대상으로 자연 유속의 수직적인 변화를 측정하였다. 측정 사이의 간격은 3m이며 심도 11~47m의 시험 구간에 대하여 상부에서부터 하향식으로 측정하였다. Figure 4는 현장 시험 시 장비 설치 방법을 나타낸 모식도이다. 유속 검층에 필요한 현장 장비는 크게 측정기(probe), 펌프, 및 지상장비(above-ground electronics)로 구성된다. 공 내에 삽입된 측정기는 열원을 공급하는 전극과 상하부에 위치하는 두 개의 온도 센

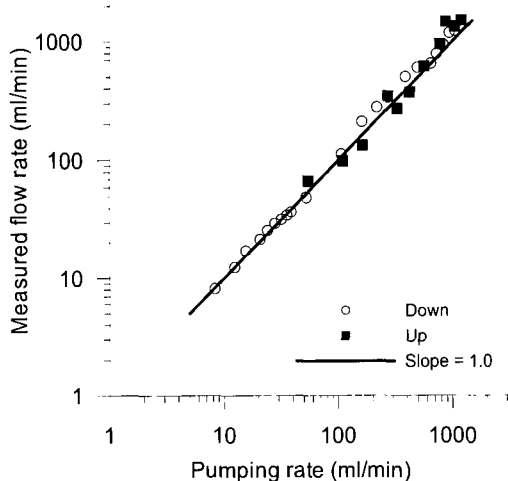


Fig. 3. Results of the laboratory experiments performed for flowmeter accuracy.

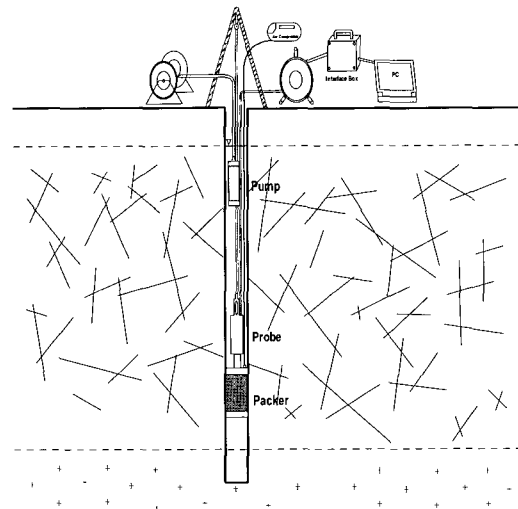


Fig. 4. A schematic diagram of the flowmeter test.

시추공 유속 검층을 이용한 암반 대수층의 수리전도도 분포 산정

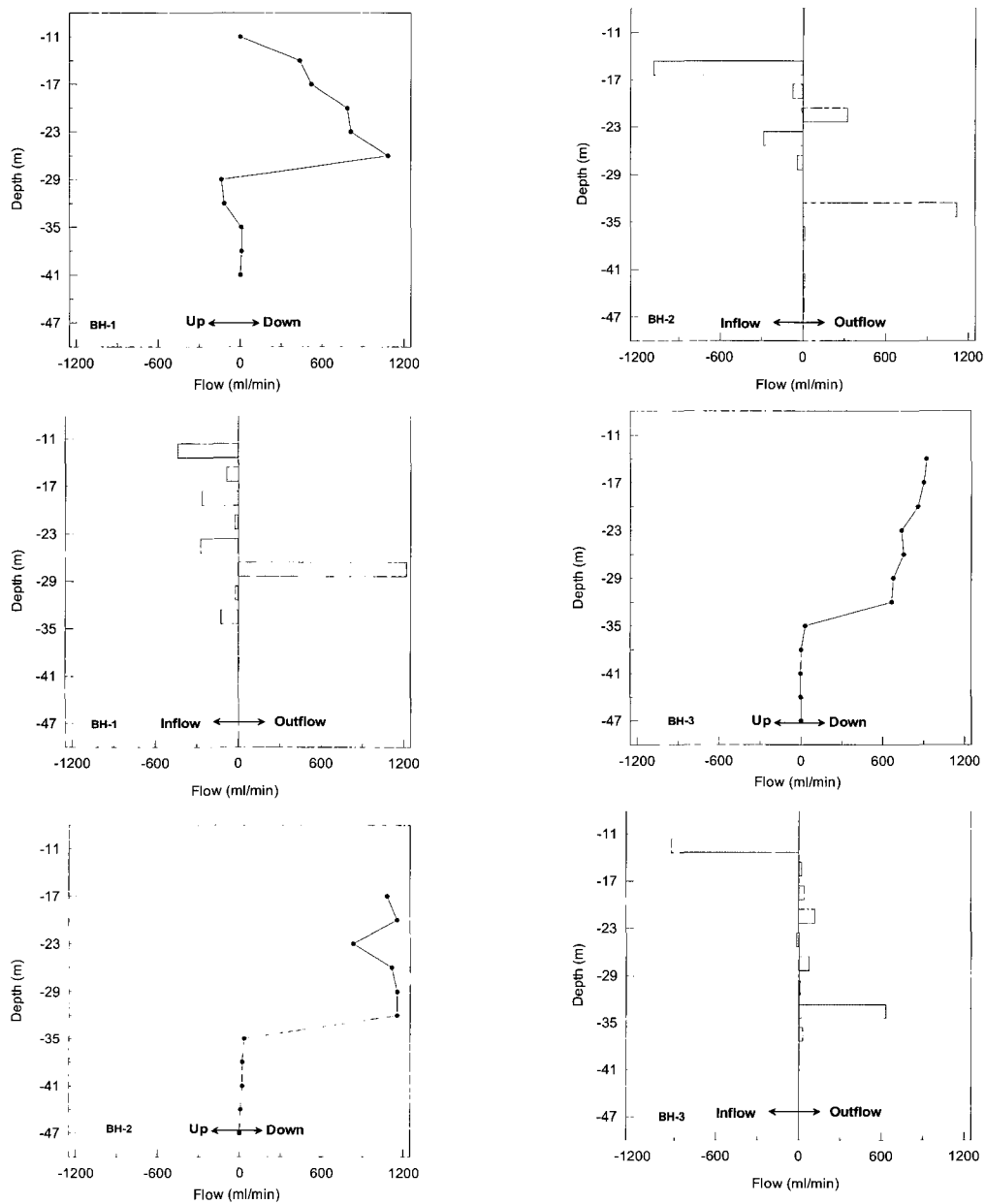


Fig. 5. Vertical distribution of the measured ambient flow and the calculated differential ambient flow.

서로 구성되며, 케이블을 통하여 지상의 측정기 제어 장치(interface box)와 연결된다. 유속 측정기 하단에 부착된 패키지는 4mm관을 통하여 지상의 공기압축기와 연결되며, 유속 측정기와 공벽

사이로의 물의 흐름을 차단하는 역할을 한다. 펌프는 자연 유속 측정 시에는 불필요하며 뒤에서 언급될 양수 유발 유속 측정 시에 사용하였다.

Figure 5는 자연 상태에서 측정된 공 내 유속과

이로부터 계산된 유속 변화량의 수직적인 분포를 나타낸 것이다. 두 측정 사이의 유속 변화량은 두 점 사이에 위치하는 단열을 통해 유입 또는 유출되는 지하수의 양을 의미한다. 즉 시추공 내의 수직적인 지하수 유속 변화는 균열 암반의 경우 단열을 통하여 유입 또는 유출되는 지하수에 의하여 불연속적인 분포를 보인다. 따라서 자연 유속 측정 자료를 분석하면 투수성 단열이 위치하는 심도를 파악할 수 있으며 단열을 통해 흐르는 지하수의 양과 수두 분포를 추정할 수 있다.

자연 유속 측정 결과 BH-1은 29m 상부구간에서 하향의 지하수 흐름을 보이며, BH-2 및 BH-3은 35m 상부구간에서 하향의 지하수 흐름을 보인다. BH-1의 경우 11~26m 상부구간 및 29~35m 하부구간을 통하여 지하수가 유입되며, 대부분 26~29m 구간을 통하여 유출되었다. BH-2의 경우 14~20m 구간 및 23~29m 구간을 통하여 지하수가 유입되며, 20~23m 구간 및 32~35m 구간을 통하여 지하수가 유출됨을 볼 수 있다. BH-3의 경우 11~14m 구간을 통하여 대부분의 지하수가 유입되어 14~38m 구간을 통하여 유출되었다. BH-1, BH-2 및 BH-3에서 유입 또는 유출되는 지하수의 양은 각각 $1.76 \text{ m}^3/\text{day}$, $2.13 \text{ m}^3/\text{day}$, 및 $1.35 \text{ m}^3/\text{day}$ 으로 자연 상태에서도 많은 양의 지하수가 시추공을 통하여 유동하고 있음을 알 수 있다.

Figure 5와 같이 본 연구에서는 시추공 내 자연 유속의 수직적인 변화를 측정함으로써 암반 대수층에 발달된 투수성 단열들의 분포와 단열들을 통한 지하수의 유출입량을 추정할 수 있었다. 또한 인접한 3개 시추공에서 수행된 자연 유속 측정 결과를 단열의 발달 방향을 고려하여 분석할 경우 연구 지역 암반의 투수성 단열망(fracture network)에 대한 3차원적인 구조를 파악할 수도 있을 것으로 판단된다.

양수 유발 유속(pump-induced flow) 측정

Figure 4와 같이 시추공 내에 펌프를 설치하고 일정한 양수량을 유지하면서 지하수위 변화가 거의 없을 때까지 기다린 후(pseudo-steady state), 자연 유속과 동일한 시험 구간에 대하여 상향식

으로 양수 유발 유속을 측정하였다. BH-1, BH-2 및 BH-3의 양수량은 각각 $1180 \text{ ml}/\text{min}$, $1420 \text{ ml}/\text{min}$, 및 $1560 \text{ ml}/\text{min}$ 이며, 측정 결과는 Figure 6과 같다. Figure 6에서 순 유속(net flow)은 양수 유발 유속에서 자연 유속 성분을 제거한 것으로 양수에 의해서만 발생한 유속 성분을 나타낸다. 순 유속에서 나타나는 정(+)과 부(-)는 각각 하향의 지하수 흐름과 상향의 지하수 흐름을 의미하며 순 유속 값은 양수량에 따라 다르게 나타날 수 있다. 순 유속의 변화는 수리전도도의 수직적인 분포를 계산하는데 이용하였다.

수리전도도 산정

정류 상태(steady-state)에 있는 지하수의 방사 흐름(radial flow)에 관한 Thiem의 방정식에 의하면 자연 유속 및 양수 유발 유속 시 수리전도도는 각각 다음 식과 같다.

$$K_i = \frac{\Delta q_i}{2\pi\Delta z_i(h_R - h_1)} \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (1)$$

$$K_i = \frac{\Delta Q_i}{2\pi\Delta z_i(h_R - h_2)} \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (2)$$

식에서 Δq_i 는 자연 유속의 변화량, ΔQ_i 는 양수 유발 유속의 변화량, Δz_i 는 측정구간의 길이, h_R 는 영향반경(R)에서의 수두, h_1 및 h_2 는 우물반경(r)에서의 수두를 나타낸다. 구간별 수리전도도는 양수 유발 유속에서 자연 유속 성분을 제거한 순 유속에 의해 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$K_i = \frac{\Delta Q_i - \Delta q_i}{2\pi\Delta z_i(h_1 - h_2)} \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (3)$$

평형 상태의 시험 기간동안 시추공 주변에서의 수두구배가 각 단열에서 모두 일정하다고 가정하면 다음 식과 같이 수직적인 수리전도도의 분포(K_i)를 계산할 수 있다(Young et al., 1998).

$$K_i = \frac{(\Delta Q_i - \Delta q_i)/\Delta z_i}{Q/b} \quad (4)$$

시추공 유속 검층을 이용한 압반 대수층의 수리전도도 분포 산정

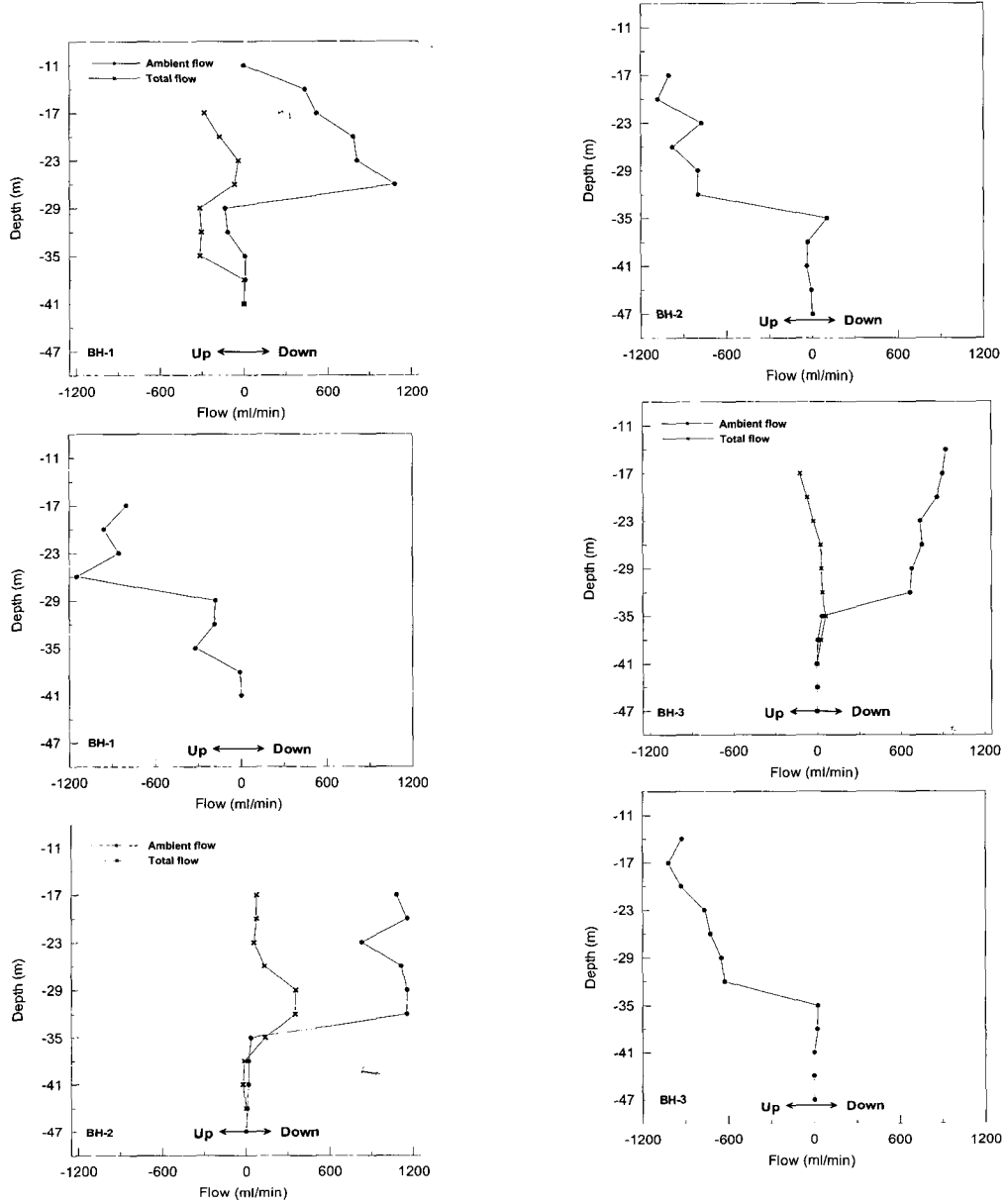


Fig. 6. Vertical distribution of the measured pump-induced flow (total flow) and the calculated net flow.

식에서 \bar{K} 는 시추공의 평균 수리전도도, Q 는 양수율, b 는 대수층의 두께를 나타낸다.

측정된 자연 유속 및 양수 유발 유속 자료를 위식에 대입하여 BH-1, BH-2 및 BH-3의 수리전도도의 수직적인 분포를 계산하였다. 식 (4)에서

\bar{K} 는 BH-1, BH-2 및 BH-3에 대하여 수행한 양수시험 자료를 이용하여 구하였으며, 각각 $1.1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$, $2.0 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$, 및 $2.3 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 의 값을 갖는다. Table 1은 현장 측정 자료와 이를 이용하여 계산된 수리전도

Table 1. Results of the flowmeter tests and the estimated hydraulic conductivity.

Depth (m)	Ambient flow (ml/min)	Δ Ambient flow (ml/min)	Total flow (ml/min)	Net flow (ml/min) ^r	Δ Net flow (ml/min)	Ki (cm/sec)
BH-1						
-11	0.00	-435.82				
-14	435.82	-85.17				
-17	520.99	-263.21	-282.63	-803.62	154.46	1.96E-05
-20	784.20	-26.18	-173.88	-958.08	-106.35	1.35E-05
-23	810.38	-272.23	-41.35	-851.73	297.76	3.79E-05
-26	1082.61	1220.36	-66.88	-1149.49	-970.61	1.23E-04
-29	-137.75	-20.86	-316.63	-178.88	9.08	1.15E-06
-32	-116.89	-124.12	-304.85	-187.96	132.38	1.68E-05
-35	7.23	0.02	-313.11	-320.34	-313.13	3.98E-05
-38	7.21	7.21	0.00	-7.21	-7.21	9.17E-07
-41	0.00	-	0.00	0.00	-	-
BH-2						
-14	0.00	-1082.25				
-17	1082.25	-73.81	77.40	-1004.85	76.80	1.54E-05
-20	1156.06	325.24	74.41	-1081.65	-308.06	6.18E-05
-23	830.82	-283.27	57.23	-773.59	205.37	4.12E-05
-26	1114.09	-40.26	135.13	-978.96	-179.81	3.60E-05
-29	1154.35	0.43	355.20	-799.15	1.01	2.02E-07
-32	1153.92	1119.75	353.76	-800.16	-902.26	1.81E-04
-35	34.17	14.31	136.27	102.10	133.25	2.67E-05
-38	19.86	0.39	-11.29	-31.15	8.37	1.68E-06
-41	19.47	12.81	-20.05	-39.52	-32.86	6.59E-06
-44	6.66	6.66	0.00	-6.66	-6.66	1.34E-06
-47	0.00	-	0.00	0.00	-	-
BH-3						
-11	0.00	-923.76				
-14	923.76	22.66	0.00	-923.76	97.44	1.80E-05
-17	901.10	42.40	-120.10	-1021.20	-90.48	1.67E-05
-20	858.70	119.56	-72.02	-930.72	-165.44	3.06E-05
-23	739.14	-15.24	-26.14	-765.28	-38.93	7.21E-06
-26	754.38	75.88	28.03	-726.35	-77.98	1.44E-05
-29	678.50	11.34	30.13	-648.37	-20.86	3.86E-06
-32	667.16	634.46	39.65	-627.51	-654.03	1.21E-04
-35	32.70	28.57	59.22	26.52	2.80	5.18E-07
-38	4.13	4.13	27.85	23.72	23.72	4.39E-06
-41	0.00	-	0.00	0.00	-	-

도를 나타낸 것으로 BH-1의 경우 17~29m 및 32~38m 구간에서 $1.35 \times 10^{-5} \sim 1.23 \times 10^{-4}$ 의 cm/sec 값을 보이며, 26~29m 구간에서 가장 큰 값을 갖는다. BH-2의 경우 17~29m 및 29~38m 구간에서 $1.54 \times 10^{-5} \sim 1.81 \times 10^{-4}$ cm/sec 의 값을 보이며, 32~35m 구간에서 가장 큰 값을 보인다. BH-3의 경우 17~35m 구간에서 $3.86 \times 10^{-6} \sim 1.21 \times 10^{-4}$ cm/sec 의 값을 보이며, 32~35m 구간에서 1.21×10^{-4} cm/sec 의 큰 값을 보인다.

유속 검층법을 이용하여 산정된 수리전도도의 수직적인 분포는 다른 현장 수리시험법과 마찬가지로 수리 시스템을 단순화시키는 가정을 통하여 구해질 수 있으므로 해석 결과의 불확실성을 배제할 수 없다.

수압시험과의 비교

BH-1, BH-2 및 BH-3을 대상으로 유속 검층과 동일한 시험구간에서 3m 간격으로 이중 패커를 이용하여 수압시험은 실시하였다. 수압시험 시 주입압력을 2, 4, 6, 8, 10, 8, 6, 4 kg/cm^2 의 9 단계로 증감하였으며, 각 주입 단계별 시간은 5분간으로 주입된 수량을 측정하였다. 주입되는 물은 지상의 수조로부터 피스톤 펌프에 의해 시험구간에 주입되고 압력과 유량은 주입관에 설치된 압력계와 유량계를 이용하여 측정하였다. 압력은 0.5 kg/cm^2 의 눈금단위 압력계를 사용하였으며, 유량은 0.1 l 단위 측정이 가능한 유량계를 이용하였다. 시험 당시 지하수 심도는 각각 11.6m, 11.9m 및 11.9m로 측정되었다.

본 연구에서는 수리전도도 계산을 위하여 등방성 매질에서의 정상류 해석방법을 적용하였으며, Hvorslev(1951)에 의하여 제시된 다음 식을 이용하였다.

$$K = \frac{Q}{2\pi LH} \ln \left[\frac{L}{2r} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{2r} \right)^2} \right] \quad (5)$$

식에서 Q는 주입량, L은 시험구간의 길이, r은 시

추공의 반경, H는 주입수의 압력에 의한 수두 증가량, K는 수리전도도를 나타낸다.

수압시험으로부터 측정된 주입량과 주입 압력을 위 식에 대입하여 각 공의 수직적인 수리전도도의 분포를 계산하였다. 측정된 수리전도도는 $10^{-7} \sim 10^{-5}$ cm/sec 의 범위를 나타내며, 시추공에 따라 수리전도도의 수직적인 분포나 값의 크기에서 큰 차이를 보여 연구 지역의 균열 암반 대수층이 가지는 비균질성을 잘 반영한다. 투수성 단열과 관련된 10^{-5} cm/sec 이상의 높은 수리전도도를 가지는 구간은 심도 38m 상부에서 모두 나타나며, 이러한 수리전도도의 분포는 시추주상도에 나타난 파쇄대의 수직적인 분포와 거의 일치한다. 수압시험을 통하여 추정할 수 있는 주요 투수성 단열의 분포를 보면, BH-1의 경우 23~35m에 밀집되어 나타나며, BH-2의 경우 14~17m, 26~29m, 35~38m의 3구간에 분포하며, BH-3의 경우 14~16m 와 32~35m에 나타난다. 이와 같이 수리지질학적으로 주요한 불연속면을 포함하는 구간에서는 패커시험 간격을 다르게 하더라도 수리전도도의 상대적인 이상대를 나타낸다고 알려졌다(박동극, 1994).

수압시험을 통하여 산정된 수리전도도를 이용하여 각 시추공의 투수량계수를 구하면 BH-1은 7.0×10^{-6} m^2/sec , BH-2는 7.4×10^{-6} m^2/sec , BH-3은 1.2×10^{-5} m^2/sec 와 같다. 따라서 연구지역 암반의 투수성은 BH-1에서 BH-3 방향, 즉 남서 방향으로 진행할수록 커지는 경향을 보인다. BH-1에서 BH-3 까지의 거리가 14m 임을 고려할 때 본 연구 지역 균열 암반대수층의 수리특성은 작은 규모에서도 비균질성이 크게 나타남을 알 수 있다.

Figure 7은 유속 측정으로부터 계산된 구간별 수리전도도와 수압시험으로부터 구한 값을 비교한 것으로 선형적인 비례 관계를 잘 보여준다. 유속 측정법은 수리전도도의 수직적인 분포를 파악하는데 있어서 수압시험과 거의 동일한 수준의 해석 자료를 제공하면서 동시에 시험장비의 휴대성과 운용성의 측면에서 큰 장점을 갖는다. 동일한 조건에서 두 시험을 수행할 때 수압시험이 유

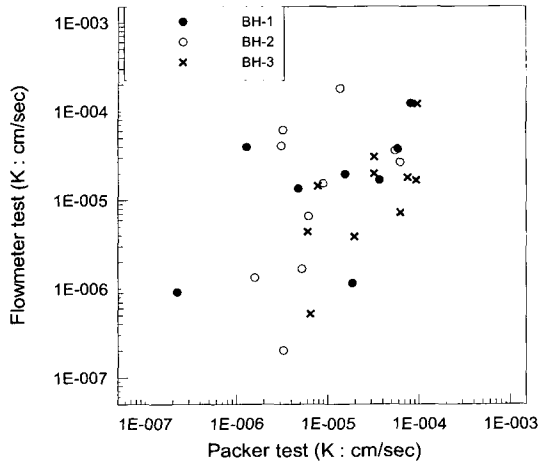


Fig. 7. Comparison of the estimated hydraulic conductivities by the flowmeter test and the packer test.

속 검층보다 약 2배 정도의 시간이 소요되는 것으로 나타났다.

시추공 영상 자료와의 비교

연구 지역 시추공에 발달된 단열의 수직적인 분포 특성을 파악하기 위하여 BIPS 공 내 검층을 수행하였다. BIPS 검층은 시추공 영상촬영 시 현장에서 직접 육안으로 공벽의 화상을 관찰할 수 있는 장점을 가지며, 공벽의 전개화상이 디지털로 저장되므로 공 내의 불연속면에 대한 정보를 파악할 수 있다. 또한 BIPS는 균열대의 충전물 유무 및 균열면의 풍화상태, 균열의 거칠음 정도(roughness) 및 두께를 정밀하게 분석할 수 있으며, 암종의 변화, 암맥의 관입상태, 그리고 암석이 가지는 일차구조와 구성광물의 입자의 크기까지 파악할 수 있다(구민호 외, 1999). 검층에 의해 기록된 불연속면은 두께 및 충전 유무만을 기준으로 하여 투수성 단열과 비투수성 단열로 구분하였다. 단열 두께의 경우 임의적이지만 1mm를 구분값으로 취하였으며, 충전 유무는 화상에서 육안 관찰에 의하여 결정하였다. Table 2는 BH-1, BH-2 및 BH-3에서 실시한 시추공 영상촬영 자료의 해석 결과이며, Figure 8은 자료 해석 결과

Table 2. Orientation of fractures in the boreholes analyzed from the BIPS image logs

Fracture classification	Number	Major orientation	Minor orientation
BH-1	All	N47E/50NE	N55W/25NE
	Open	N69W/41NE	N48W/59NE
	Closed	N40E/53NW	N52W/25NE
BH-2	All	N36W/25NE	N62E/41NW
	Open	N32W/28NE	N39E/20NW
	Closed	N36W/24NE	N63E/40NW
BH-3	All	S6E/30SW	N64W/27NE
	Open	N22E/18NW	N59W/37NE
	Closed	S6E/29SW	N44E/54NW

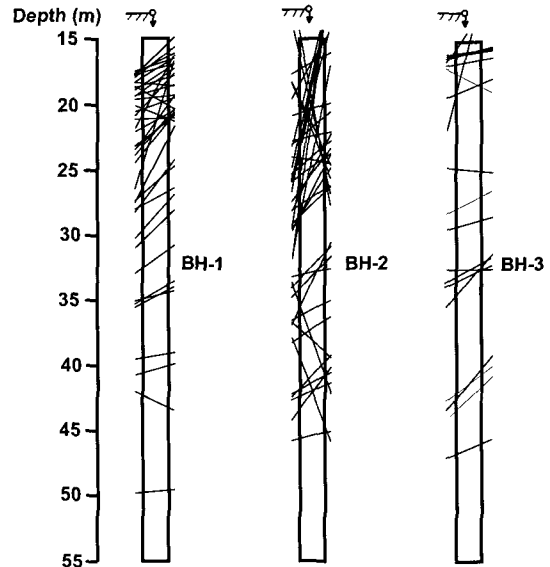


Fig. 8. Vertical distribution of conductive fractures observed in BIPS images.

나타난 투수성 단열들의 수직적인 분포를 도시한 것이다. 연구지역에서 투수성 단열의 발달은 BH-1, BH-2 및 BH-3의 경우 각각 N69°W, N32°W 및 N22°E 방향이 우세하며, 경사는 대부분 8°~41°의 각을 보인다.

시추공 유속 검층을 이용한 암반 대수층의 수리전도도 분포 산정

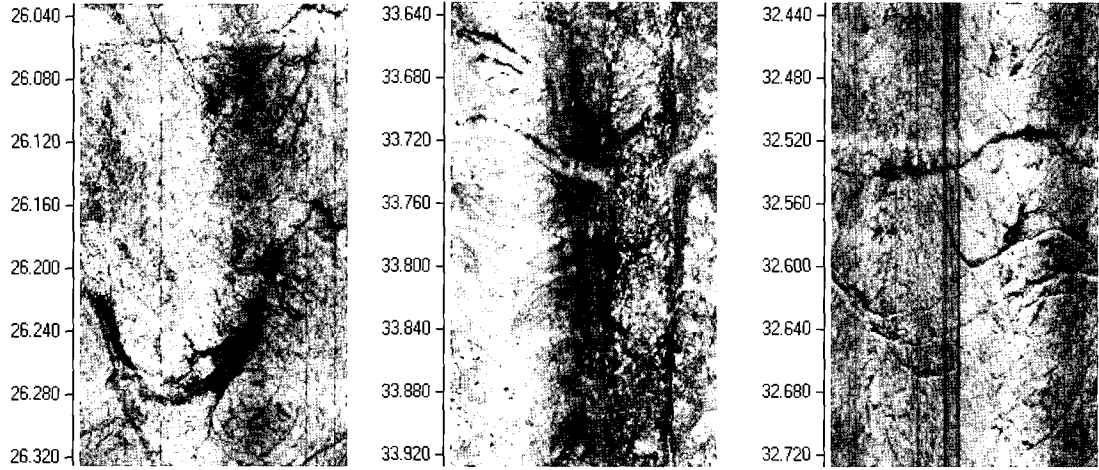


Fig. 9. A section of BIPS logs with highly conductive fractures.

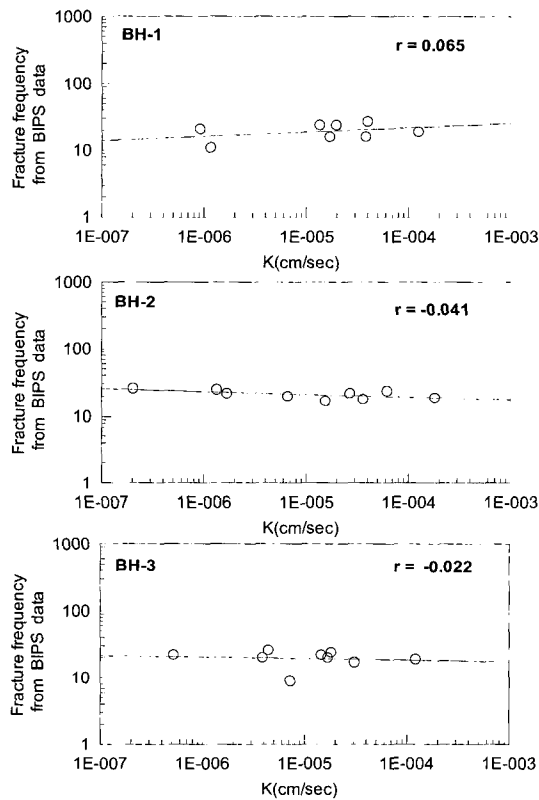


Fig. 10. Correlation between the hydraulic conductivity and the fracture frequency obtained from the BIPS logging.

BH-1의 경우 17~18m, 26~28m 및 34~35m 구간에서, BH-2는 18~19m, 26~29m, 33~35m 및 37~38m 구간에서, BH-3은 15~17m 및 32~34m 구간에서 투수성 단열들의 발달을 볼 수 있다. 이러한 단열의 발달 구간은 Figure 5의 자연 유속 측정을 통하여 확인된 지하수의 유출입 발생 구간과 거의 일치한다. 특히 자연 유속의 변화가 크게 발생하는 구간에서는 Figure 9와 같이 투수성이 매우 큰 것으로 추정되는 소수의 단열들이 BIPS 영상에 관찰된다.

시추공 영상촬영 자료에서 획득한 모든 단열의 빈도와 유속 측정에 의해 구한 수리전도도 간의 상관관계를 분석하였다(Figure 10). 분석 결과 상관계수는 0.022~0.065로 상관성이 매우 낮은 것으로 나타나, 본 연구 지역의 경우 단열의 두께가 크고 연장성이 양호한 소수의 단열들에 의하여 지하수 유동이 지배되고 있는 것으로 해석된다.

시추공 수질 검층과의 비교

유속 측정법은 대수층의 수리전도도를 추정하는 기법이라는 측면에서는 수리시험법의 일종에 속하지만, 시추공 내부에서 검층기를 이용하여 암반의 특성을 파악하는 면에서는 우물 검층법(well

구민호, 차장환

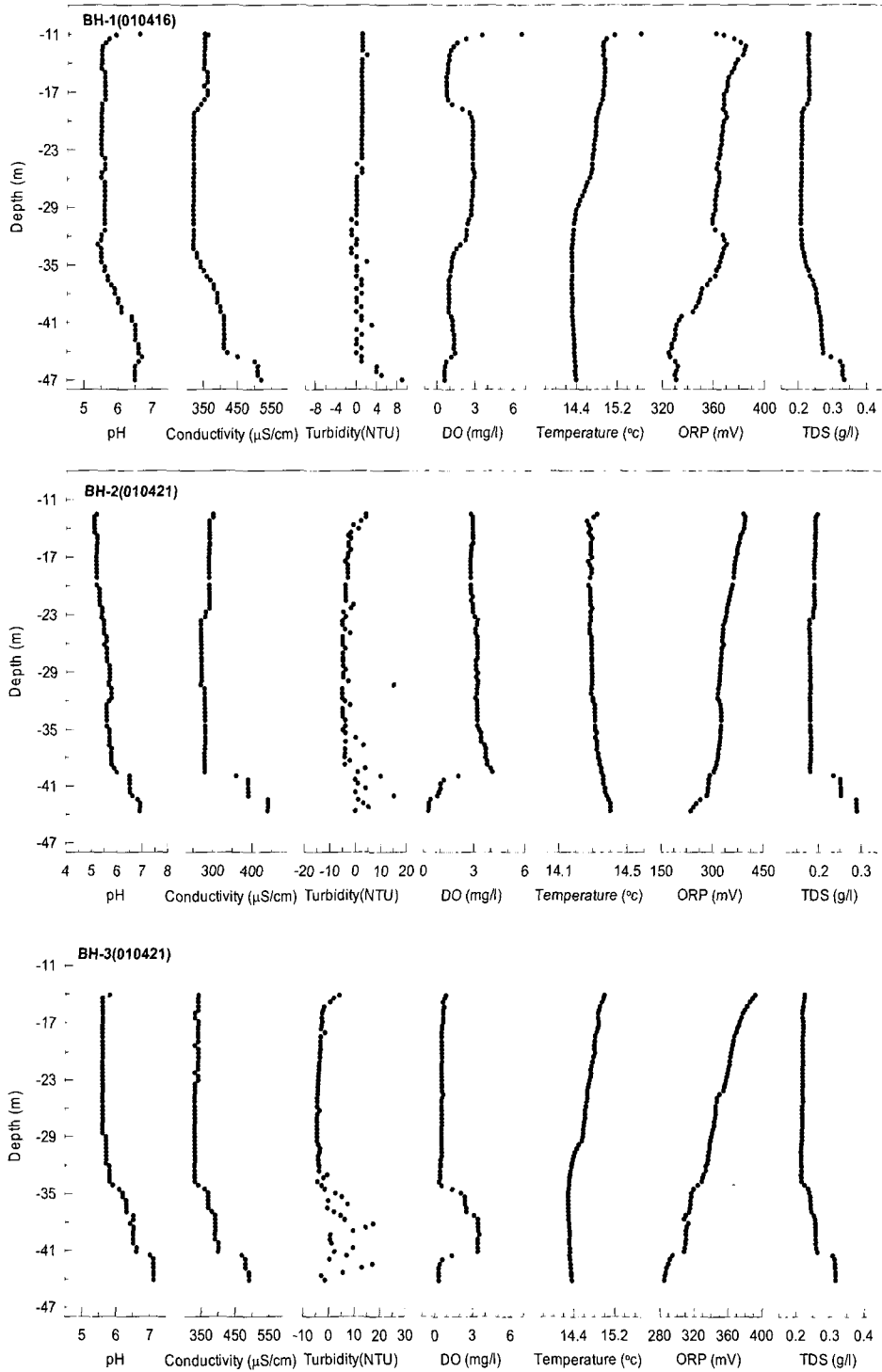


Fig. 11. Results of the water-quality logging in 3 boreholes.

logging)이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 시추공 지하수가 가지는 물리화학적 변화를 측정하는 데 일반적으로 많이 이용되는 검층법과 유속 측정법을 비교하기 위하여 동일 시험정에 대해 수질의 수직적인 변화를 측정하였다. 수질 검층에 사용된 장비는 HORIBA사의 Water Quality Monitoring System U-20 이며, 지하수면 하부 구간에서 0.5m 간격으로 지하수의 pH, 전기전도도(EC), 탁도, 용존산소(DO), 온도, 산화환원전위(ORP), 및 총고용물질(TDS)의 수직적인 변화를 측정하였다. Figure 11은 3개 시추공의 수질 검층 결과를 나타낸다.

BH-1의 경우 심도 11m, 19m, 33m 및 44m 부근을 경계로 지하수의 수질 변화가 나타난다. 11m 구간에서 온도는 15.1 °C이며, pH = 5.9, EC = 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$, DO = 3.5 mg/l 의 수질특성을 보인다. 11m 심도에서의 수질변화는 지하수면 상부로부터 공으로 유입되는 지하수의 수질 특성을 반영한 것으로 해석된다. 19m 구간에서는 pH = 5.5, EC = 320 $\mu\text{S}/\text{cm}$, DO = 2.5 mg/l 의 수질특성과 14.8 °C의 온도를 나타낸다. 32m 구간에서의 온도는 14.3 °C이며, pH = 5.6, EC = 340 $\mu\text{S}/\text{cm}$, DO = 1.1 mg/l 의 수질특성을 보인다. BH-2의 경우 심도 39m 및 43m 부근을 경계로 지하수의 수질 변화가 나타난다. 39m 상부 구간의 지하수는 pH = 5.1~6.0, EC = 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$, DO = 2.8~3.2 mg/l , 온도 = 14.3 °C의 수질 특성을 보이며, 43m 하부 구간의 지하수는 pH = 6.9, EC = 440 $\mu\text{S}/\text{cm}$, DO = 0.3 mg/l , 온도 = 14.4 °C의 수질 특성을 나타낸다.

BH-3의 경우 심도 34m 및 42m 부근을 경계로 지하수의 수질 변화가 나타난다. 34m 상부 구간의 지하수는 pH = 5.6, EC = 330 $\mu\text{S}/\text{cm}$, DO = 0.5 mg/l , 온도 = 14.3~14.9 °C의 수질 특성을 보이며, 42m 하부 구간의 지하수는 pH = 7.0, EC = 470 $\mu\text{S}/\text{cm}$, DO = 0.2 mg/l , 온도 = 14.3 °C의 수질 특성을 나타낸다.

BH-1의 측정 결과를 보면 33m 부근을 경계로 하부에서 pH, EC, 및 ORP의 수직적인 변화가 크게 발생함을 볼 수 있는데, 이는 유속 측정 자료

의 해석 결과 단열의 발달이 미약한 공 하부 구간과 일치한다. 즉 이 구간의 지하수는 단열들을 통한 지하수의 유동계에서 제외된 공 내에 정지된 물로 해석된다. 33m 하부에서 보이는 EC 값의 증가 추세와 탁도의 불규칙적인 변화는 이러한 추정을 뒷받침한다. BH-2의 40m 하부와 BH-3의 34m 하부에서도 동일한 경향이 나타나며, 역시 유속 측정 결과와도 일치한다. 따라서 시추공 내 지하수의 수직적인 흐름이 존재하는 구간과 흐름이 매우 느리거나 정지된 하부 구간과의 경계에서는 지하수의 수질 특성을 나타내는 pH, EC, 탁도, 및 ORP의 측정값이 불연속적인 변화를 잘 보였다. 반면 그림에 나타난 바와 같이 지하수의 수질 변화와 거의 관련이 없는 수온 측정값에서는 이러한 경향이 잘 나타나지 않았다.

시추공 내 지하수의 수직적인 흐름이 활발한 상부 구간을 보면 EC, DO, 온도, 및 ORP 측정값에서 불연속적인 변화가 미약하게 나타나지만 심도가 일치하지 않거나 점이적인 변화를 보인다. 따라서 수질 검층 자료를 이용하여 투수성 단열의 위치를 파악하는 것은 유속 측정법에 비하여 해상도와 신뢰도가 매우 떨어질 뿐만 아니라, 정량적인 해석이 불가능하기 때문에 측정 자료의 활용 측면에서도 매우 제한적일 수밖에 없다.

결론 및 토의

본 연구에서는 열원 공급 방식의 유속 측정기를 사용하여 측정한 구간별 자연 유속 및 양수 유발 유속 자료를 이용하여 투수성 단열의 위치를 파악하였으며, 시추공 내의 구간별 수리전도도를 추정하였다. 또한 동일한 시추공에 대하여 수압시험, 시추공 영상촬영(BIPS), 및 수질 검층을 수행하여 유속 측정 결과와 비교 분석하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 자연 유속 측정 자료의 분석 결과 상당한 양의 지하수(1~2 m^3/day)가 자연 상태에서 연구 지역 시추공에 발달된 단열을 통하여 유동하였다.
2. 자연 유속 및 양수 유발 유속 자료를 이용하여 산정된 수리전도도의 수직적인 분포는 수압시험을 통하여 구한 결과와 유사한 경향을 보였다.

3. 시추공 영상촬영 자료를 이용하여 투수성 단열의 수직적인 분포를 파악하였으며, 유속 측정 시 지하수의 유출·입에 의하여 큰 유속 변화를 발생시키는 1~2 개의 투수성 단열을 영상 자료에서 확인할 수 있었다.

4. 시추공 영상촬영 자료에서 획득한 단열 빈도와 유속 측정으로부터 구한 수리전도도 간의 상관성은 매우 낮은 것으로 분석되어, 수리전도도가 소수의 투수성 단열에 의해 지배적인 영향을 받는 것으로 나타났다.

5. 수질 검층 결과 일부 구간에서 상이한 수질 특성을 갖는 지하수의 유입에 의해 불연속적인 수질 변화가 관측되었으나, 유속 검층 결과와의 상관성이 미약한 것으로 분석되어 유속 검층에 비하여 투수성 단열의 위치를 파악할 수 있는 능력은 현저하게 떨어지는 것으로 해석된다.

6. 결론적으로 유속 측정법은 시추공 내 지하수의 유동 시스템을 파악하는데 매우 효과적인 방법이며, 수리전도도의 수직적인 변화도 추정이 가능하며, 시험장비의 휴대성과 운용성의 측면에서도 장점을 가지므로 현장 수리시험법으로 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 자연 상태에서 공 내로 유입 또는 유출되는 지하수의 양과 심도를 정확하게 측정할 수 있으므로 파쇄매질의 경우 각 단열들을 통하여 공 내로 유입되면서 혼합되는 지하수의 수질 변화를 해석하는데 매우 유용한 정보를 제공할 수 있다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 2000년도 목적기초연구사업(2000-2-13100-001-2)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

구민호, 이동우, 원경식, 1999, 시추공 텔레뷰어 및 BIPS의 영상자료 해석을 통한 파쇄매질의 투수율테서 계산 프로그램 개발 및 현장 적용, 지질공학회지, 9권, 3호, 187-206.
박동극, 1994, 결정질암체에서 수리전도도에 대한

규모종속에 관한 분석, 지질공학회지, 4권, 1호, 13-28.

Hvorslev, M.J., 1951, Time lag and soil permeability in ground water observations, Bull. 36, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.

Kabala, Z.J., 1994, Measuring distributions of hydraulic conductivity and specific storativity by the double flowmeter test, Water Resour. Res., v. 30, n. 3, 685-690.

Mercer, J.W., Skipp, D.C., and Griffin, D., 1990, Basics of pump-and-treat remediation technology, EPA/600/8-90/003, U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma.

Miyakawa, K.K. Tanaka, Hirata, Y., and Kanauchi, M., 2000, Detection of hydraulic pathways in fractured rock masses and estimation of conductivity by a newly developed TV equipped flowmeter, Engineering Geology., v. 56, 19-27.

Paillet, F.L., 1998, Flow modeling and permeability estimation using borehole flow logs in heterogeneous fractured formations, Water Resour. Res., v. 34 n. 5, 997-1010.

Paillet, F.L., Hess, A.E., and Morin, R.H., 1990, Estimation of the relative permeability distribution in fractured granitic rocks by means of vertical flow measurements in the Siblingen borehole, Switzerland, Colorado, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 90-4034 p.

Paillet, F.L., and Allen, B.S., 1995, Comparison of flowmeter estimates of fracture zone permeability with the results of conventional straddle-packer injection tests, Proceedings of the 6th International Symposium on Borehole Geophysics for Minerals, Geotechnical and Groundwater Application,

시추공 유속 검층을 이용한 암반 대수층의 수리전도도 분포 산정

Santa Fe, New Mexico.

- Ruud, N.C., and Kabala, Z.J., 1997, Numerical evaluation of the flowmeter test in a layered aquifer with a skin zone, J. Hydrol., v. 203, 101-108.
- Xiang, J., 1995, The evaluation of the flowmeter test in three-layer aquifers and the influence of disturbed zones, J. Hydrol., v. 166, 127-145.
- Young, S.C., Julian, H.E., Pearson, H.S., Molz, F.J., and Boman, G.K., 1998, Application of the electromagnetic borehole flowmeter, EPA/600/R-98/058, U.S. Environmental Protection Agency.

투 고 일	2002년 6월 21일
심 사 일	2002년 6월 22일
심사완료일	2002년 7월 31일

구민호
공주대학교 자연과학대학 지질환경과학과
314-701 충남 공주시 신관동 182
TEL: 041-850-8515
E-mail: koo@kongju.ac.kr

차장환
농업기반공사 농어촌연구원
425-170 경기도 안산시 사동 1031-7
TEL: 031-400-1851
E-mail: hydro-cha@hanmail.net