

시추공 유속측정기(Borehole Flowmeter)를 이용한 암반의 구간별 수리전도도 산정

구민호 · 차장환 · 이주형 · 박창희 · 정복선
공주대학교 지질환경과학과
koo@knu.kongju.ac.kr

요 약 문

시추공의 구간별 수리전도도를 추정하는 방법으로는 수압시험(packer test)이 많이 이용되는데 최근에는 유속측정기(flowmeter)를 이용한 시추공 검층법이 개발되어 활발한 연구가 진행 중이다. 본 연구에서는 열원(heat-pulse) 공급 방식의 유속측정기를 이용하여 공주대학교 내에 설치된 시추공에서 자연 유속(ambient flow) 및 양수 유발 유속(pump-induced flow)을 측정하였으며, 자료를 분석하여 수리전도도의 수직적인 분포를 산정하였다. 분석 결과는 수압시험에 의해 산정된 수리전도도의 분포와 잘 일치하였으며, BIPS에 의해 촬영된 시추공 영상 자료와 비교함으로써 지하수 유동과 관련된 투수성 단열(conductive fracture)들의 수직적인 위치를 정확하게 파악할 수 있었다. 분석 결과는 암반 대수층 내에 발달된 단열망(fracture network)에 대한 3차원적인 정보를 제공할 수 있으며, 이는 효과적인 지하수 모니터링, 모델링, 및 정화 설계(remedial design)에 필요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

key words : 유속측정기(borehole flowmeter), 자연 유속(ambient flow), 양수 유발 유속(pump-induced flow), 수리전도도(hydraulic conductivity), 암반 대수층(bedrock aquifer)

1. 서론

수리전도도는 대수층의 물리적인 특성을 나타내는 대표적인 수리상수로서 지하수 적정개발량의 평가, 유해 폐기물 처분장 선정, 터널 및 유류저장 건설, 지하수 오염물의 거동 평가 및 복원 등과 같은 지하수와 관련된 수리지질학적인 문제들을 해결하는데 우선적으로 추정해야 할 매우 중요한 인자이다. 암반 대수층의 경우 파쇄 매질이 나타내는 불균질성 및 이방성에 의하여 수리시스템을 파악하는 것이 매우 어려우며, 특히 수리전도도의 수직적인 변화는 이러한 불균질성이 매우 크게 나타나는 것으로 알려졌다.

시추공의 구간별 수리전도도를 추정하는 방법으로는 수압시험(packer test)이 많이 이용되는데, 최근에는 유속측정기(flowmeter)를 이용한 시추공 검층법이 개발되어 암반 대수층에 발달된 투수성 단열들의 분포를 효과적으로 파악하는 기법으로 최근 많이 이용되며 활발한 연구가 진행 중이다. Paillet et. al. (1990)은 암반대수층에서 양수시험 동안 시추공 내에서 유속을 측정하여 투수계수의 수직분포를 파악하였다. Ruud and Kabala(1997)와 Xiang(1995)은 다층구조를 갖는 대수층에서 유속측정법에 의한 투수계수의 추정 결과를 수치적으로 분석하였다. Paillet(1998)은 유속 측정자료를 분석하여 공 주변에서의 지하수 유동

을 모사하는 수치모델을 개발하였으며, Kabala(1994)는 대수층의 투수계수와 비저유계수의 수직분포를 동시에 추정할 수 있는 이중 유속측정법(double flowmeter test)의 원리를 소개하였다.

본 연구에서는 이러한 유속측정 시험법을 공주대학교 내에 설치된 시추공에 적용하여 수리전도도의 수직적인 분포를 추정하였으며, 수압시험 및 시추공 영상 자료와 비교함으로써 투수성 단열들의 정확한 위치를 파악하였다.

2. 본론

2.1 유속측정기(Borehole flowmeter)

지하수 시추공용 유속측정기는 임펠러(impeller), 열원(heat-pulse), 및 전자기(EM) 방식의 3종류가 개발되어 이용되고 있다. 임펠러 방식의 유속측정기는 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 0.1 ml/min까지 정밀하게 측정한다. 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 유속측정기는 미국 KVA사의 Groundwater Flowmeter Geoflo Model-90으로 열원을 이용하는 heat-pulse flowmeter이다. 본 장비는 열원이 지하수의 이동보다 빠르게 매질을 통하여 전달되는 원리를 이용하여 개발되었다. 즉 인위적으로 공내 지하수에 열원을 공급하고 상하에 설치된 열감지 센서를 이용하여 측정된 온도변화로부터 지하수의 유동방향과 유속을 계산한다.

2.2 기기보정(Calibration)

Figure 1과 같이 내경 100 mm PVC관에 유속측정기를 설치하여 기기보정을 실시하였다. 연동식(peristaltic) 펌프를 이용하여 유량을 10 - 1000 ml/min로 변화시키면서 측정값을 기록하였으며 결과는 Figure 2와 같다. 그림에 나타난 바와 같이 유속측정기는 상하 방향에서 모두 실제 유량을 정확하게 측정하고 있어 기기 보정식이 불필요한 것으로 나타났다.

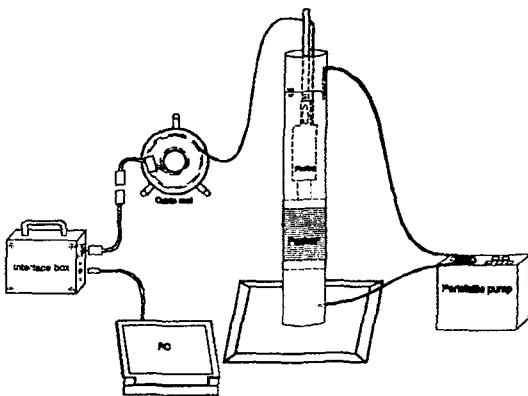


Figure 1. 기기보정 실험 모식도.

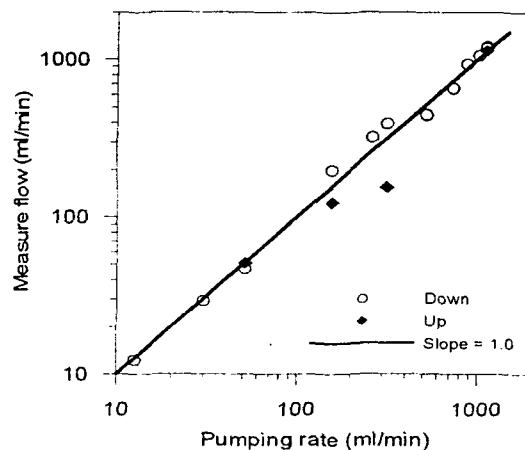


Figure 2. 기기보정 실험 결과.

2.3 자연 유속(ambient flow) 측정

Figure 3은 공주대학교에 설치된 4개 시추공의 위치를 나타내며, BH-1을 대상으로 유속 측정을 실시하였다. BH-1은 시추 심도 50.7 m, 케이싱 심도 7.0 m, 공경은 76 mm이며, 시험 당시 지하수 심도는 10.8 m를 나타냈다. 심도 11 - 47 m의 시험 구간에서 3 m 간격으로 자연 유속을 측정하였다. Figure 4는 현장시험 모식도를 나타낸다.

Figure 5는 자연 상태에서 측정된 공내 유속 및 유속 변화량의 분포를 나타낸다. 두 측정점 사이의 유속 변화량은 두 점 사이에 위치하는 단열을 통해 유입 또는 유출되는 지하수의 양을 의미한다. 그림에 나타난 바와 같이 BH-1의 경우 11-26 m 상부구간 및 29-35 m 하부구간을 통하여 지하수가 유입되며, 대부분 26-29 m 구간을 통하여 유출되었다. 유입 또는 유출되는 지하수의 양은 1220 ml/min (1.76 m³/day)으로 자연 상태에서도 많은 양의 지하수가 시추공을 통하여 유동하고 있음을 알 수 있다. 그림과 같이 자연 유속 측정을 통하여 투수성 단열(conductive fracture)의 분포를 정확하게 파악할 수 있었다.

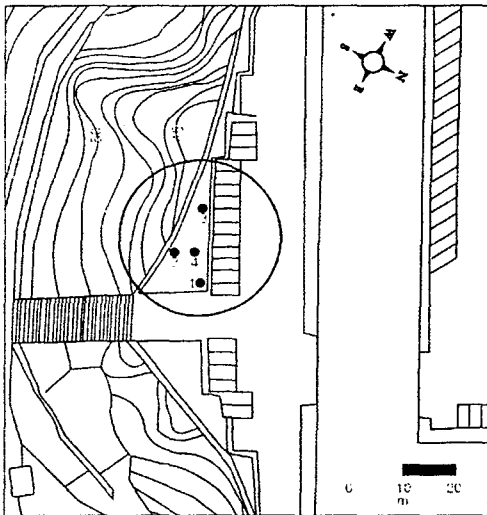


Figure 3. 공주대학교 시추공 배치도.

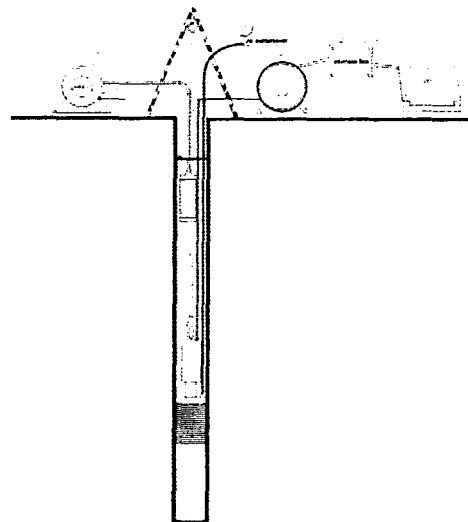


Figure 4. 현장시험 모식도.

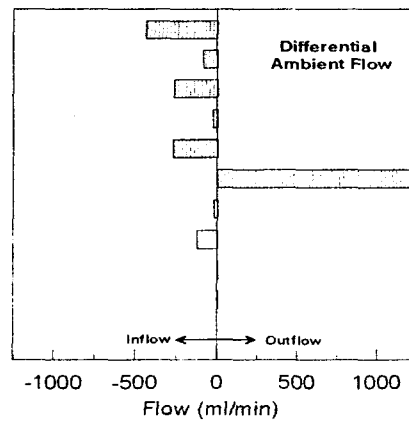
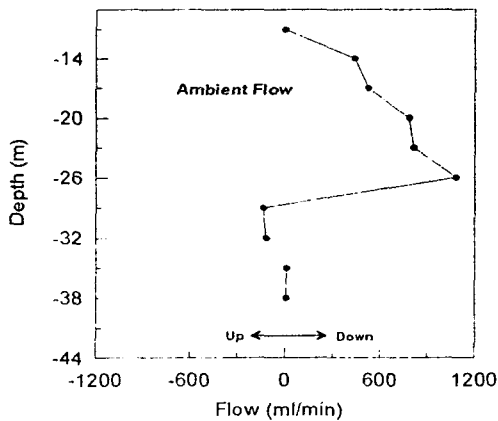


Figure 5. 측정된 자연 유속 및 유속 변화량의 수직 분포.

2.4 양수 유발 유속(pump-induced flow) 측정

Figure 4와 같이 시추공 내에 펌프를 설치하고 일정한 양수량을 유지하면서 ($Q = 1180 \text{ ml/min}$) 지하수위 변화가 거의 없을 때까지 기다린 후(pseudo-steady state), 심도별 양수 유발 유속을 측정하였다. 측정결과는 Figure 6과 같으며 자연 유속의 결과와 유사한 양상을 보였다. Figure 7은 양수 유발 유속에서 자연 유속 성분은 제거한 것으로 양수에 의해 발생한 순 유속(net flow)을 나타낸다. 순 유속의 변화는 구간별 수리전도도 계산에 필요한 자료로 이용하였다.

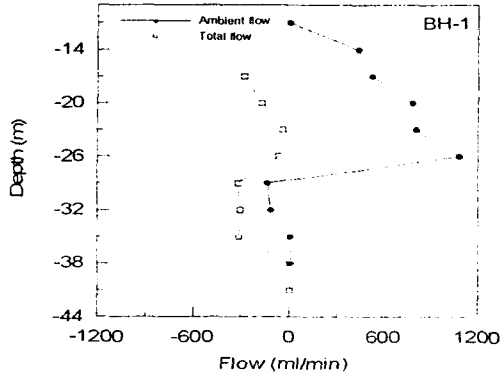


Figure 6. 양수 유발 유속 측정결과.

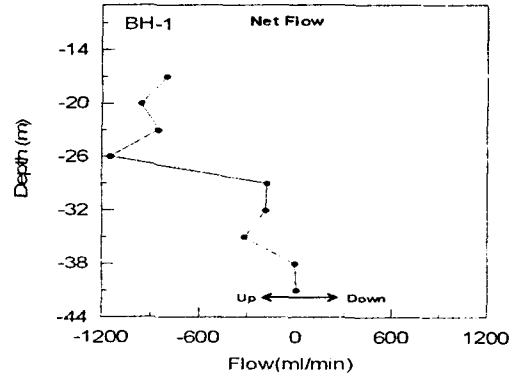


Figure 7. 순 유속(net flow) 계산결과.

2.5 구간별 수리전도도 계산

준평형상태의 시험 기간동안 시추공 주변에서의 수두구배가 각 단열에서 모두 일정하다고 가정하면 다음 식을 이용하여 수리전도도의 수직적 분포 (K_i)를 계산할 수 있다 (Young et al., 1998).

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

식에서 \overline{K} 는 시추공의 평균 수리전도도, ΔQ_i 는 양수 유발 유속의 변화량, Δq_i 는 자연 유속의 변화량, Δz_i 는 측정구간의 두께, Q 는 양수율, b 는 대수층의 두께를 나타낸다.

측정된 자연 유속 및 양수 유발 유속 자료를 위 식에 대입하여 BH-1공의 수리전도도의 수직적인 분포를 계산하였으며 Table 1과 같다. 계산 과정에서 \overline{K} 는 BH-1에 대하여 수행한 양수시험 자료를 이용하여 구하였으며 $1.1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 의 값을 갖는다. Table 1에 나타난 바와 같이 유속 측정으로부터 계산된 구간별 수리전도도는 동일 시추공에서 실시한 수압시험으로부터 구한 값과 유사한 경향을 보인다.

3. 결론

유속측정기를 이용하여 측정한 구간별 자연 유속 및 양수 유발 유속 자료를 이용하여 시추공 내의 구간별 수리전도도를 추정하였다. 유속측정 시험법은 수압시험과는 달리 시추공

Table 1. 유속 측정시험 자료와 산출된 구간별 수리전도도

Depth (m)	Ambient flow (ml/min)	Δ Ambient flow (ml/min)	Total flow (ml/min)	Net flow (ml/min)	Δ Net flow (ml/min)	Calculated K_i (cm/sec)	Packer test K_i (cm/sec)
-11	0.00	-435.82					
-14	435.82	-85.17					
-17	520.99	-263.21	-282.63	-803.62	154.46	1.96E-05	1.60E-06
-20	784.20	-26.18	-173.88	-958.08	-106.35	1.35E-05	1.55E-05
-23	810.38	-272.23	-41.35	-851.73	297.76	3.79E-05	4.73E-06
-26	1082.61	1220.36	-66.88	-1149.49	-970.61	1.23E-04	5.88E-05
-29	-137.75	-20.86	-316.63	-178.88	9.08	1.15E-06	8.09E-05
-32	-116.89	-124.12	-304.85	-187.96	132.38	1.68E-05	1.86E-05
-35	7.23	0.02	-313.11	-320.34	-313.13	3.98E-05	3.68E-05
-38	7.21	7.21	0.00	-7.21	-7.21	9.17E-07	1.30E-06
-41	0.00	-	0.00	0.00	-	-	2.24E-07

에 무리를 주지 않고 시추공 내의 자연적인 지하수의 흐름을 이용하는 장점을 갖는다. 또한 시험장비의 휴대성과 운용성이 수압시험에 비하여 간편하므로 앞으로 구간별 수리전도도의 추정에 많이 이용되리라 기대된다.

4. 참고문헌

- Kabala, Z.J., 1994, Measuring distributions of hydraulic conductivity and specific storativity by the double flowmeter test, *Water Resour. Res.*, 30(3), 685-690.
- Paillet, F.L., 1998, Flow modeling and permeability estimation using borehole flow logs in heterogeneous fractured formations, *Water Resour. Res.*, 34(5), 997-1010.
- Paillet, F.L., A.E. Hess, and R.H. Morin, 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, 26p.
- Ruud, N.C., and Z.J. Kabara, 1997, Numerical evaluation of the flowmeter test in a layered aquifer with a skin zone, *J. Hydrol.*, 203, 101-108.
- Young, S.C., H.E. Julian, H.S. Pearson, F.J. Molz, and G.K. Boman, 1998, Application of the electromagnetic borehole flowmeter, EPA/600/R-98/058, U.S. Environmental Protection Agency.
- Xiang, J., 1995, The evaluation of the flowmeter test in three-layer aquifers and the influence of disturbed zones, *J. Hydrol.*, 166, 127-145.

사사

본 연구는 한국과학재단 2000년도 목적기초연구사업(2000-2-13100-001-2)의 연구비 지원에 의하여 수행되고 있으며, 이에 감사드린다.