

## 입도분석과 현장수리시험에 의한 수리전도도의 특성 비교

함세영, 정재열, 이정환, 김형수\*, 한정상\*\*

부산대학교 지질학과

\*한국수자원공사 수자원연구원

\*\*연세대학교 지구시스템학과

hsy@pusan.ac.kr

### 요 약 문

Hydraulic conductivity of unconsolidated media can be determined by aquifer tests, laboratory tests and empirical equations based on grain size analysis. Commonly, the different methods give different hydraulic conductivities. Grain size measurements were done to determine hydraulic conductivity, using 184 soil samples collected from eight boreholes in a riverbank filtration area, Daesan-Myeon, Changwon City, Korea. Pumping tests were conducted at the riverbank filtration area. The average hydraulic conductivity by the empirical relations from grain size measurements comes out around  $10^{-2}$  m/s, 22 to 55 times higher than by the pumping test analyses. The hydraulic conductivity obtained from the empirical equations is interpreted to have a relationship with steady-state condition while that obtained from the pumping tests is interpreted to have a relationship with unsteady-state condition. Thus, hydraulic conductivity obtained from various methods should be critically analyzed for reasonable management of groundwater development.

**key word** : hydraulic conductivity; grain size analysis; pumping test; riverbank filtration.

### 1. 서론

지하수를 개발할 때는 적정양수량 산정, 지하수 모델링 등을 위하여 수리상수를 결정하여야 한다. 수리전도도는 대수층시험, 실내시험 그리고 입도분석에 의한 경험적인 방법 등에 의하여 구할 수 있다. 대수층시험은 dfI반적으로 실내시험보다 더 나은 방법으로 알려져 있다. 입도분석에 의한 방법은 입도와 수리전도도의 상관성에 기초를 두고 있다(Hazen, 1892; Slichter, 1899; Kozeny, 1927; Shepherd, 1989). 입도분석에 의한 방법은 대수층의 기하학적 형태, 수리적인 경계 등과는 연관성이 없다(Uma et al., 1989). 그러나, 실제로는 대수층의 기하학적 형태와 수리적인 경계는 수리상수값에 큰 영향을 미친다.

강변여과수 취수방식은 미국과 유럽의 여러 선진국에서는 약 150년 이전부터 이용되어 왔으나, 우리나라에서는 1990년대부터 강변여과수 취수를 위한 조사가 5대강 유역을 중심으로 시작되었다. 우리나라에서는 대부분의 수돗물 원수를 하천수에서 공급하고 있으나, 인구증가와 산업의 발전으로 인하여 수돗물 원수의 수질이 점점 악화될 위험에 처하고 있다. 더구나, 강의 하류지역에서는 상류로부터 유입되는 오염물질로 인하여 수돗물 원수의 수질이 더욱더 저하되고 있으므로, 하류지역에서는 수돗물 정수 비용이 상류지역보다 더 높다. 낙동강 하류지역에 위치하고 있는 창원시에서는 대산면 갈전리와 북면 신촌리 지역에 수질 향상과 정수비용 절약 방안으로 강변여과수 취수방식에 의하여 수돗물을 생산하고 있다.

강변여과수의 적정취수량을 결정하기 위해서는 강변퇴적층의 정확한 수리전도도값 산정이 요구된다. 본 연구에서는 창원시 대산면 강변여과수 취수지역의 시추공 입도분석과 현장수리시험에 의해서 산정한 수리전도도를 서로 비교하고, 값 차이의 원인을 분석하고자 한다.

## 2. 입도분석자료를 이용한 경험식에 의한 수리전도도 결정

창원시 대산면 강변여과수 취수지역에 위치한 8개 시추공(DS1 ~ DS8)에서 채취한 184개 퇴적층 시료의 입도분석을 실시하였다. 조립질 입자의 입도분석은 체분석으로 수행하고, 실트 이하의 세립질 입자의 입도분석은 ASTM(1995)기준에 의거하여 비중계(hydrometer)를 사용하였다. 조립질과 세립질을 구분하는 기준은 체 번호 200 (0.075mm)이다. 세립질의 입도분석에는 피펫법(Head, 1984)을 사용할 수도 있으나 피펫법은 시료를 채취할 때와 피펫의 내용물을 비울 때에 세심한 주의를 요한다(Bardet and Young, 1997).

입도분석자료를 경험식에 적용하여 수리전도도를 구할 수 있다(Kosenow, 2002). 본 연구에서는 Hazen(1892) 식, Slichter(1899) 식, Kozeny(1927) 식, Beyer(1964) 식, Sauerbrei(Kosenow, 2002) 식 그리고 Sheperd(1989) 식을 이용하였다. 이들이 제안한 수리전도도는  $K=Cd_e^b$ 와 같다. Hazen, Slichter, Kozeny, Beyer, 그리고 Sauerbrei 식에서  $C = (g/v)(\beta)(v(n))$ 이고, Shepherd 식에서는  $C = 1.59 \times 10^{-2} (ms^{-1})$ 이다.  $g$ 는 중력가속도( $9.8 m \cdot s^{-2}$ ),  $v$ 는 물의 동점성계수(kinematic viscosity)로서  $20^\circ C$ 에서  $10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$ 이다.  $\beta$ 는 다공질 매질의 특성에 따른 무차원 계수(조직, 입자의 모양, 암석의 조성, 이방성 등),  $v(n)$ 은 공극율 함수,  $n$ 은 공극율(무차원),  $d_e$ 는 다공질 매질의 유효입경( $L$ )으로서, 유효입경보다 작은 세립질 부분이  $e\%$ 이다.

입도분포자료로 경험식에서 구해진 모래/자갈층의 평균 수리전도도는  $3.2 \times 10^{-2} ms^{-1}$ 이고 나머지 모래층들의 평균 수리전도도는  $1.8 \times 10^{-5} \sim 6.0 \times 10^{-4} ms^{-1}$ 로서 모래/자갈층이 53배 내지 1777배나 더 크다(Table 3). 퇴적층의 전체 두께에 수리전도도를 곱하여 투수량계수를 계산하면, 모래/자갈층의 평균 투수량계수가  $0.155 m^2 s^{-1}$ 로서 가장 높고, 세립질 모래층은 평균  $2.37 \times 10^{-3} \sim 3.45 \times 10^{-3} m^2 s^{-1}$ 로서 그 다음이고, 중립질 모래층이  $1.68 \times 10^{-3} m^2 s^{-1}$ 로서 가장 낮다.

### 3. 양수시험분석과 입도분석에 의한 수리상수의 비교 검토

양수정(PW1 ~PW4)에서 얻어진 양수시험분석 결과는 투수량계수는  $5.55 \times 10^{-3} \sim 9.03 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 에 분포한다(Table 4). 한편 저류계수는  $4.51 \times 10^{-4} \sim 6.13 \times 10^{-4}$ 를 보여준다. 수리전도도는 투수량계수를 주대수층인 모래/자갈층의 평균 두께 12.2m로 나누어서 계산하면  $4.55 \times 10^{-4} \sim 7.40 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ 이며, 평균값은  $5.77 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ 이다. 따라서 양수시험에서 구해진 모래/자갈층의 수리전도도는 입도분석에서 구해진 모래자갈층의 수리전도도의 1.8%에 불과하다. 또한 양수시험에서 구해진 모래/자갈층의 투수량계수는 입도분석에서 구해진 모래자갈층의 투수량계수의 4.5%밖에 되지 않는다. Vuković 과 Soro (1992, p. 293)는 양수시험분석에서 구해진 투수량계수가 입도분석에서 구해진 투수량계수보다 수배 더 크다고 보고하였다. Uma 등(1989)은 입도분석에서 구해진 투수량계수와 수리전도도가 양수시험분석에서 구해진 것과 상당한 차이를 보인다고 보고하였다. 고유투수율은 외부에서 가해지는 하중에 때문에 발생하는 지반침하와 고착, 기질의 용해, 점토의 팽창 등에 의한 매질의 구조 및 조직의 변화에 따라 변하게 된다(Bear and Verruijt, 1990, p. 31). 양수시험에 의한 퇴적층 입자의 이동은 고유투수율을 변화시키고 이에 따라 수리전도도가 변화될 수 있다고 판단된다.

Table 3. Estimated transmissivity and hydraulic conductivity by grain size analysis.

	Upper fine sand		Medium sand		Lower fine sand		Sand/gravel	
	K ( $\text{ms}^{-1}$ )	T ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )	K ( $\text{ms}^{-1}$ )	T ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )	K ( $\text{ms}^{-1}$ )	T ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )	K ( $\text{ms}^{-1}$ )	T ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )
DS1	3.30E-05	4.62E-04	4.90E-04	2.9E-03	1.50E-04	1.40E-03	-	-
DS2	1.80E-04	1.98E-03	3.40E-04	2.0E-03	2.80E-04	3.40E-03	5.60E-04	8.80E-03
DS3	2.80E-04	8.12E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.10E-04	4.20E-03
DS4	3.00E-04	4.50E-03	8.40E-04	8.4E-04	4.00E-04	4.40E-03	9.00E-02	1.20E+00
DS5	1.20E-04	2.16E-03	5.60E-04	2.8E-04	2.90E-04	2.80E-03	-	-
DS6	1.90E-04	4.56E-03	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.00E+00	-	-
DS7	1.90E-04	3.42E-03	6.80E-04	2.4E-03	4.00E-04	3.20E-03	-	-
DS8	1.60E-04	2.40E-03	7.10E-04	5.0E-03	3.00E-04	3.90E-03	-	-
Arit h. mean	1.82E-04	3.45E-03	4.53E-04	1.68E-03	2.28E-04	2.37E-03	1.14E-02	1.55E-01

Table 4. Hydraulic parameters by the pumping test analyses.

Well no.	Transmissivity ( $m^2s^{-1}$ )	Hydraulic conductivity ( $ms^{-1}$ )	Storativity
PW1	5.62E-3	4.61E-4	4.51E-4
PW1	7.92E-3	6.50E-4	5.45E-4
PW3	5.55E-3	4.55E-4	5.24E-4
PW4	9.03E-3	7.40E-4	6.13E-4
Arith. mean	7.03E-3	5.77E-4	5.33E-4

#### 4. 결론

창원시 대산면 갈전리 강변여과수 취수지역에서 수행된 양수시험과 입도분석에서 구해진 수리상수(수리전도도, 투수량계수)를 서로 비교한 결과 입도분석에서 구해진 수리전도도와 투수량계수가 양수시험에서 구해진 것보다 훨씬 큼을 알 수 있다. 이는 입도분석에서 구해진 수리상수는 정상류상태를 대표하지만 양수시험에서 구해진 수리상수는 부정류상태에서 퇴적층 입자의 이동이 발생하는 조건을 대표하기 때문으로 해석된다. 따라서 실제 현장에서의 투수량계수나 수리전도도를 구하기 위해서는 양수시험이 더 적합한 방법이며 입도분석에서 구해진 수리전도도와 투수량계수는 양수시험자료를 참고로 하여 보정을 요하는 것으로 판단된다.

#### 5. 참고문헌

- ASTM, ASTM test method for particle size analysis of soils (D422-63), Annual Book of ASTM Standards, Soil and Rock (I), v. 04.08, American Society of Testing and Materials, West Conshohoken, PA, p. 981 (1995).
- Bardet, J.-P., Young, J., Grain size analysis by buoyancy method, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 20 (4), 481-485 (1997).
- Bear, J. and Verruijt, A., 1990. Modeling groundwater flow and pollution, D. Reidel Publishing Company, 414 pp. (1990).
- Beyer, W., On the determination of hydraulic conductivity of gravels and sands from grain-size distributions. Wasserwirtschaft-Wassertechnik 14, 165-169 (1964).
- Hazen, A., Some physical properties of sands and gravels, Ann. Rept. Massachusetts State Board of Health, 539-556 (1892).
- Head, K.H., Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 1: Soil Classification and Compaction Tests, Pentech Press, London, UK (1984).
- Kasenow, M., Determination of Hydraulic Conductivity from Grain Size Analysis, Water Resources Publications, LLC, 47-84 (2002).

Kozeny, J., Uber kapillare leitung des wassers im boden, Sitzungsber. Acad. Wiss. Wien, 136, 271-306 (1927).

Schlichter, C.S., Theoretical investigation of the motion of groundwaters, U.S. Geol. Surv., 19<sup>th</sup> Ann. Rept. Pt. 2, 295-384 (1899)

Shepherd, R.G., Correlations of permeability and grain size, Ground Water 27 (5), 633-638 (1989).

Uma, K.O., Bgboka, B.C.E., and Onuoha, K.M., New statistical grain-size method for evaluating the hydraulic conductivity of sandy aquifers, J. Hydrol., 108, 343-366 (1989).

Vuković, M. and Soro, A., Hydraulics and water wells-Theory and application, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA, 354 pp. (1992).

## 6. 사사

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 3-4-1)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드린다.