

실내 자유면 사질 대수층의 수리상수 결정

Determination of Hydraulic Parameters in Unconfined Sandy Aquifer in a Laboratory Scale

김정석(Joung-Souk Kim) · 김동주(Dong-Ju Kim)

요약 : 지하 저장 유류 탱크로부터의 기름 유출이나 쓰레기 매립장으로부터의 침출수는 양질의 지하수 자원에 대한 오염원으로 널리 인지되고 있다. 지하 대수층에 유입된 오염물질의 이동성은 지하수 흐름에 의존하며 이에 관련된 수리상수의 결정은 중요한 과제가 된다. 본 연구의 목적은 사질토로 구성된 실내 자유면 대수층 모형을 구축하여 대수층의 수리상수를 기존의 방법들을 이용하여 결정, 비교함으로써 최적의 수리상수를 결정하는데 있다. 자유면 대수층의 저장율을 나타내는 비산출량(S_y)은 중력배수법을 적용하여 단위 수위 강하에 대한 단위 면적당 배출수의 용적을 대수층 깊이별로 측정하였다. 또한 수리전도도는 실내 모형이 가지는 제한성 즉 불 투수 경계에 의한 간섭효과를 배제하기 위하여 3가지의 다른 방법 (정수위법, Dupuit Approximation, Slug Test)을 이용하여 결정하였다. 실험결과 자유면 사질 대수층의 비산출율은 평균 0.20로서 이는 타 연구결과와 잘 일치하였으며 대수층 깊이에 따라 0.17 - 0.23 사이의 비교적 적은 편차를 보여 대수층의 균질성을 확인할 수 있었다. 반면에 정수위 측정법에 의한 수리전도도는 0.77 cm/min, Dupuit Approximation은 5.33 cm/min, Slug Test 중 Bouwer & Rice 방법은 5.85 cm/min 그리고 Hvorslev 제안식은 7.49 cm/min의 측정치를 나타내었다. 이로써 가장 낮은 관측치를 보인 정수위법을 제외한 다른 방법들은 비교적 근사한 수치를 나타내어 자유면 대수층의 수리전도도 측정 시 정상류 흐름하에 Dupuit Approximation에 의한 방법이나 Slug Test에 의한 방법들이 비교적 좋은 결과를 나타냄을 알 수 있었다.

Abstract : Oil leaked from underground storage tanks and leachate from sanitary landfills have been known as contaminant sources of the high-quality groundwater resources. The mobility of contaminants in the aquifer largely depends on the groundwater flow and the determination of associated hydraulic parameters is essential for a proper remediation of contaminated groundwater. This study aimed at determining an optimum set of hydraulic parameters for an unconfined sandy aquifer of a laboratory scale through comparison of various methods. Results showed that the specific yield obtained from gravity drainage experiment was an average of 0.20 with minor variations in aquifer depths, and the permeabilities obtained from Dupuit approximation and slug test gave similar values of 5.33 cm/min and 5.85 cm/min but the constant head method gave 0.77 cm/min, which is much lower than the other methods. This experimental evidence reveals that the permeability of the unconfined sandy aquifer could be accurately determined by Dupuit assumption or slug test rather than by constant head method conducted for a disturbed separate soil column.

서 론

최근 들어 폐기물 매립지의 부적절한 관리로 차수막을 통하여 다량의 침출수가 토양내로 유입되거나 지하 저장탱크의 노후로 인한 누유가 발생함에 따라 오염물질의 대수층으로의 유입이 발생하여 지하수 자원의 질적 저하를 초래하고 있다. 대수층내의 오염물질의 이동은 대류, 확산, 흡착 등의 물리화학적 현상에 의하여 지배되며 그 중 확산은 지하수 공극유속(대류계수)에 의존하므로 지하수의 유동을 지배하는 수리상수인 수리전도도와 비산출량을 결정하는 것은 매우 중요한 선결 과제가 된다. 대수층에서의 수리상수를 결정하는 방법이 여러 연구자들에 의하여 제안이 되었으나 대부분이 피압대수층(Cooper and Jacob, 1946; Hantush, 1956; Hantush, 1960a; Hantush, 1960b; Neuman and Witherspoon, 1969; Theis, 1935; Walton,

1960)에 제한되었다. 한편 자유면 대수층에 관한 방법들(Neuman, 1975; Streltsova, 1972, 1973; Walton, 1979)도 제안이 되었으나 이는 지하수 흐름이 정호로부터 무한대의 방사상 거리로 확장될 수 있는 현장상태의 지하수 흐름에 적용되는 것들이다. 본 연구에서는 수리상수의 결정에 있어서 경제성과 용이성 및 정확도를 기하기 위하여 실내 자유면 대수층 모형을 구축하고 정상류 조건하에서 Dupuit이 제안한 방법을 통해 수리전도도를 결정하였으며 Slug test 중 Hvorslev방법(Hvorslev, 1951)과 Bouwer & Rice 방법(Bouwer and Rice, 1976)에 의한 측정 그리고 PVC Ring으로 동일 시료를 채취하여 정수위법에 의한 수리전도도들을 각각 결정하여 비교, 분석하였다. 또한 자유면 대수층에서의 여러 가지 수리현상 규명을 위한 기초자료를 구하기 위하여 중력배수법에 의한 대수층 깊이별 비산출율도 측정하였다.

* 고려대학교 이과대학 지구환경과학과(Dept. of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Korea University, Seoul 136-701, Korea)

실험방법

자유면 대수층 모형

본 연구에 사용된 실험실 규모의 대수층 모형은 길이 2.0 m, 폭 0.5 m, 높이 1.5 m 의 아크릴(두께 1.0 cm)로, 모형 우측에는 길이 0.4 m, 폭 0.5 m 높이 1.5 m의 수조를 설치하였다. 대수층과 수조를 분리하는 연직 아크릴 벽면에는 직경 2.5 cm의 유출구를 12개 만들어 대수층에서 수조로의 지하수 흐름이 용이하도록 하였다 (Figure 1). 모형 바닥면으로부터 높이 0.6 m 까지 사질토와 사력토의 혼합물로 채우고, 0.6 m부터 1.3 m 까지 미세 사질토를 채워 지하 대수층과 불포화 토양층을 모형화 하였으며, 각각의 토성은 Figure 2에 도시되어 있다. 모형 토조의 좌단으로부터 길이 0.1 m까지는 바닥부터 상부까지 혼합물로 채워 강우에 의한 보충수 (Recharge)의 유입을 용이하게 하여 지하수 흐름을 발생시킬 수 있도록 하였다. 대수층 시험 시 우물 수위를 관측하기 위하여 모형 내에 길이 140 cm, 직경 3 cm인 9개 간이 관측정(PVC Piezometers; well No.1-9)을 설치하였으며 보충수 경계면으로부터 대수층으로 일정 유량 유입이 가능하도록 강우발생 모형 (Rainfall Simulator)을 모형 상부 좌단에 설치하였다. 강우발생 모형은 플라스틱 상자에 직경 1 mm의 유출구를 9지점에 설치하여 자연 강우를 모의

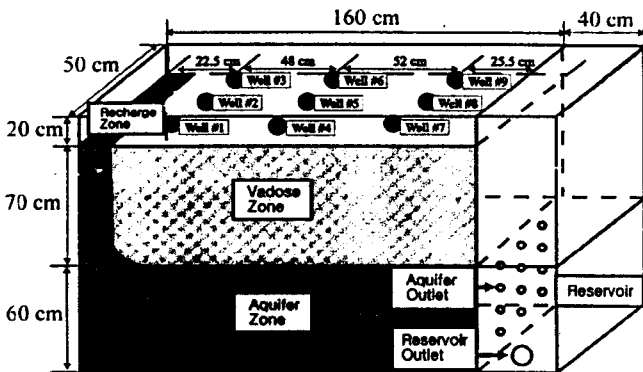


Figure 1. Schematic experimental setup of 2-D unconfined sandy aquifer.

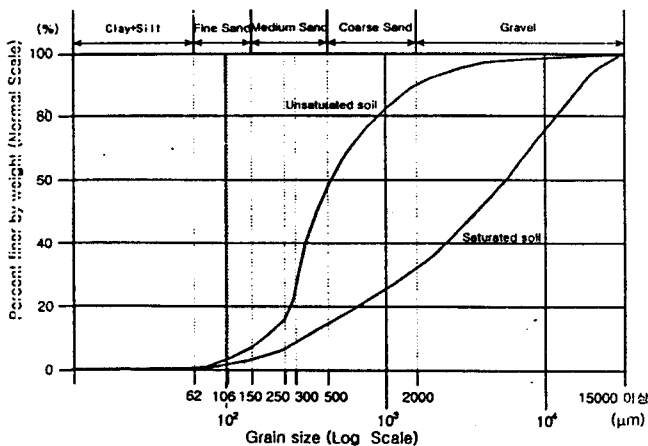


Figure 2. Grain-size distribution curves of aquifer and vadose zone materials.

발생시켰으며, 강우강도는 강우발생 모형내 수위로 조절하였다.

비산출율(S_y)

대수층 모형의 비산출율을 결정하기 위하여 대수층의 높이를 초기 44.76 cm로 설정한 후 수조 하단의 밸브에 연결된 호스의 높이를 단위 수두 Δh 만큼 급강하하여 일정시간이 경과한 후 더 이상 중력 배수가 발생되지 않을 때까지 배출된 지하수의 체적을 측정하였다. 이 경우 전체 배출수의 체적은 대수층과 수조부분에서의 배출수의 합으로 구성되므로 대수층만을 통한 중력배수의 체적은 전체에서 수조부분의 배출수를 감한 부분이 된다. 따라서 비산출율 (S_y)은 다음 식과 같이 표시된다.

$$S_y = \frac{-V_w}{A\Delta h} \quad (1)$$

여기서 V_w , A , Δh 는 각각 중력배수의 체적, 대수층 수평면적, 단위 수두 (수위 강하량)이다. 본 모형에서의 비산출율은 초기수위 44.76 cm에서 최종수위 30.6 cm까지 8단계의 다른 대수층 깊이에서 측정되었다.

수리전도도

본 연구에 사용된 자유면 대수층 모형은 현장조건과는 달리 3개 이상의 연직 경계면에서 불 투수 경계조건이 설정되어 있으므로 양수시험시 양수정으로부터 형성되어 대수층 전역으로 파급되는 수위강하 곡선에 연직면으로부터 간섭효과가 발생된다. 현장상태에서의 자유면 대수층에 대한 양수시험 자료로부터 대수층 수리상수를 구할 수 있는 방법이 몇몇 연구자들에 의하여 제안되었으나 본 연구에 사용된 모형 대수층에 적용하는 것은 불가능하다고 판단되었다. 따라서 정상류 상태에서 Dupuit이 제안한 수리전도도 산정방법에 의거, 9개의 관측정으로부터 수위를 측정하여 관측정간의 수리전도도를 측정하였다. 대수층 모형의 좌단 상부의 보충수 경계면(Recharge Boundary)에 강우발생 모형을 통해 $Q = 237 \text{ mL/min}$ 로 유량을 발생시킨 후 이를 일정시간 동안 유지시켰다. 우측 수조를 통하여 유출되는 배출수량이 강우에 의한 유입량과 같게 되었을 때 정상류 상태를 확인할 수 있었다. 정상류 상태를 이루었을 때, 각각의 관측정으로부터 수두를 측정하여 다음 식(2)로부터 수리전도도를 결정하였다.

$$q = \frac{1}{2}K\left(\frac{h_1^2 - h_2^2}{L}\right) \quad (2)$$

여기서 q 와 K 는 단위 폭당 유량과 수리전도도이며, h_1 , h_2 는 상하류 관측정에서의 수두, L 은 각 관측정간의 거리이다. 본 모형에서는 모형의 길이와 폭 방향으로 각각 3개씩 총 9개의 관측정이 설치되어 있으므로 1차원 지하수 흐름 방향으로 총 9개의 지점에서 수리전도도를 결정할 수 있었다. 정상류 흐름 조건에서 관측된 각 우물에서의 수두값은 Table 1에 나타나 있으며 단위 폭당 유량(q)은 $4.94 \text{ cm}^2/\text{min}$ 로 일정하였다.

대수층 모형에 대하여 Slug Test도 수행되었으며 직경 2.5 cm, 길이 45.5 cm의 원통형 Slug를 중앙에 위치한 직경 3.0 cm의

관측공(Well 5)에 순간주입 하였다. Slug 주입 직전의 초기 수위는 64.5 cm, 그리고 약 223 mL의 Slug 주입 직후 우물에서의 수위 상승은 31.6 cm 이었으며 상승수위의 시간에 따른 수위저하의 비를 측정하였다. 오차 가능성을 줄이기 위하여 실험을 10회 이상 반복하고 동일하게 나타나는 데이터를 결과치로 사용하였다. 측정된 시간별 수위 저하 자료를 이용하여 Hvorslev (1951)와 Bouwer and Rice (1976)가 각각 제안한 식 (3)과 식 (4)에 의해서 수리전도도를 산정하였다.

$$K = \frac{r^2 \ln\left(\frac{L_c}{R}\right)}{2L_c T_0} \quad (3)$$

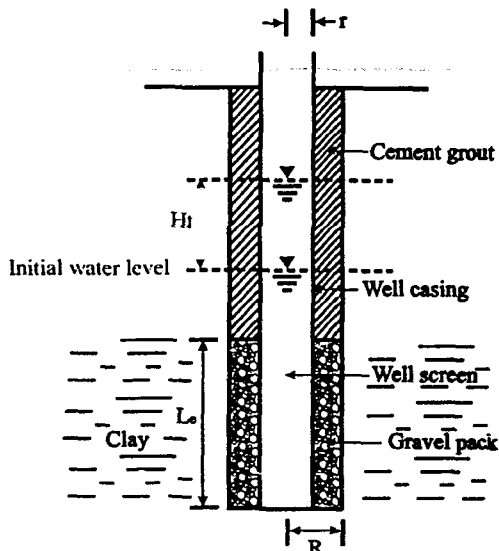


Figure 3. Piezometer geometry for Hvorslev method.

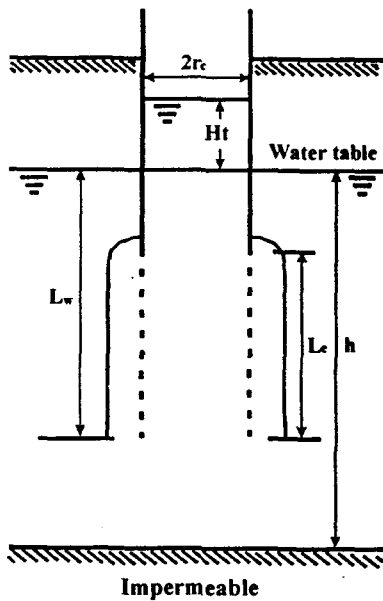


Figure 4. Geometry and symbols for a slug test with Bouwer and Rice method.

$$K = \frac{r_c^2 \ln(R_c/R)}{2L_c} \frac{1}{t} \ln\left(\frac{H_0}{H_t}\right) \quad (4)$$

여기서 r , r_c 는 각각 우물, 우물 케이싱 반경이고, R_c , R 은 각각 유효 우물 반경, 우물 스크린까지의 반경이며 (Figure 3,4), L_c , T_0 는 각각 우물 스크린의 길이, 우물 수위가 초기 급상승 수위의 37%까지 하강하는데 걸리는 시간이다 (Figure 5). 식

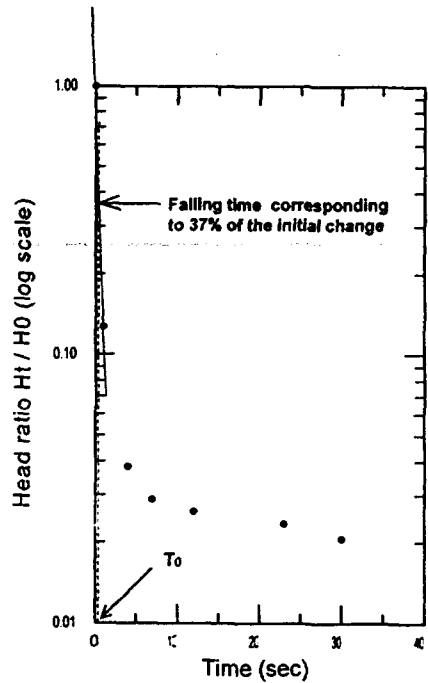


Figure 5. Plot of H_t/H_0 versus time for Hvorslev method.

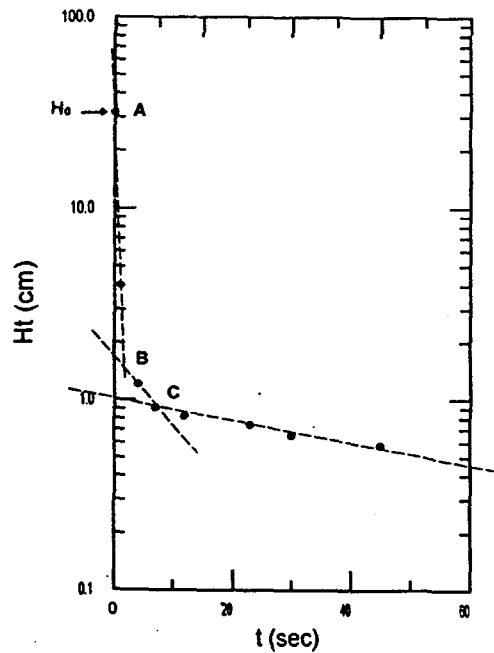


Figure 6. Head in well 5 as a function of time for Bouwer and Rice method.

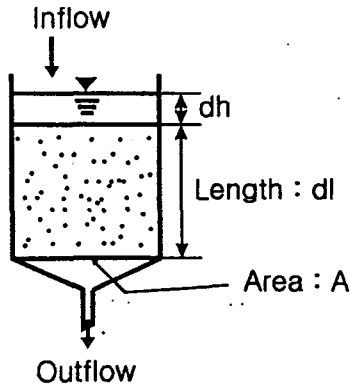


Figure 7. Geometry and symbols for constant head method.

(4)에서 H_0 , H_1 는 각각 초기 상승 수위, 시간 t 에 따른 우물 수위를 각각 나타낸다 (Figure 6). 식(4)에서 $\ln(R_c/R)$ 은 L_w (상승 수위와 우물 스크린 바닥간의 거리)와 h (상승 수위와 대수층의 바닥면 간의 거리)의 상대적인 비율에 따라 결정되며 본 실험의 경우 $L_w=h$ 이므로 다음식에 의해서 결정되었다.

$$\ln\left(\frac{R_c}{R}\right) = \left[\frac{1.1}{\ln(L_w/R)} + \frac{C}{L_w/R} \right]^{-1} \quad (5)$$

한편 정수위법에 의한 대수층 시료의 수리전도도를 결정하기 위하여 직경 20 cm, 높이 20 cm의 PVC원통에 모형 대수층과 동일한 토성의 사질 및 사력토의 혼합물을 채워서 대수층과 거의 같은 정도로 균질하게 성형하였다. 시료 상부에 일정 수두(3 cm)를 유지하여 정상류 상태를 확인 한 후 시간별 단위 면적당 배출수의 양을 측정하여 Darcy 법칙으로부터 주어지는 식 (6)에 의하여 수리전도도를 산정하였다(Figure 7).

$$q = -K \left(1 + \frac{dh}{dl} \right) \quad (6)$$

여기서 q , K 는 각각 단위 면적당 유량, 수리전도도이고, dh , dl 는 각각 상부수두, 시료의 길이이다.

결과 및 토의

비산출율

본 연구에서 사용한 실내 자유면 대수층의 비산출율은 Table 2에 나타난 바와 같이 대수층 깊이별로 최대 0.23, 최소 0.17로서 부분적으로 약간의 차이가 있었으나 평균 0.20, 표준편차 0.02로 시험 전구간에 걸쳐 거의 일정한 것으로 나타나 모형 대수층의 균질성을 파악할 수 있었다. 이러한 결과는 사질

대수층에 대한 중력배수법을 적용하여 비산출율을 측정한 Nwankwor *et al.*(1992)에 의한 연구 결과와도 잘 일치하였으며 본 모형 대수층에 대한 적절한 수치인 것으로 간주된다.

수리전도도

수리전도도를 Dupuit (1863)식으로부터 획득하기 위해서는 i) 대수층에 대하여 수면 경사도가 대수층의 수리 균배와 동일해야 한다는 것과 ii) 지하수 흐름이 수평적이고, 수직적으로는 균등한 에너지를 가져야 한다는 Dupuit 식의 가정을 만족시켜야 한다. 본 실험은 조사력토(Figure 2)를 60 cm 두께에 대하여 균질하게 성형하여 자유면 대수층을 구축 하였고 간이 강우모형을 사용하여 폭 방향으로 균일하게 유량을 발생시켜서 정상류 흐름 조건을 유지함으로써 1차원 지하수 흐름에서 수리 균배가 대수층 지하수면의 경사에 의해 발생하였으므로 i)의 가정을 만족시킨다고 볼 수 있다. 또한 대수층이 수위 관측 거리 108 cm의 영역에서 평균 2.42 cm 내이의 수두차를 유지하여(Table 1) 약 0.02의 수리 균배를 보임으로써 42.2 cm의 대수층 평균 두께에서 수평 방향으로의 흐름이 지배적인 것으로 판단되므로 ii)의 가정을 만족시킨다. 따라서 본 대수층 모형이 Dupuit식의 전제를 만족하기 때문에 Dupuit의 방법으로 획득한 수리전도도를 표준 수리전도도로 결정하였다. Dupuit에

Table 2. Specific yields for different depths of aquifer

Initial h (cm)	Final h (cm)	Δh (cm)	V_w (ml)	S
44.76	43.17	1.59	2569	0.21
43.17	41.75	1.42	2221	0.21
41.75	39.75	2.00	2858	0.19
39.75	37.70	2.05	3597	0.23
37.70	36.05	1.65	2254	0.18
36.05	34.44	1.61	2699	0.22
34.44	32.60	1.84	2536	0.18
32.60	30.55	2.05	2697	0.17
Average				0.20

$A = 7584 \text{ cm}^2$

Table 3. Permeability obtained from two pairs of piezometric heads using Dupuit Approximation. (unit : cm/min)

$K_{avg}(h_3-h_6)$ 5.91	$K_{avg}(h_6-h_9)$ 4.83	$K_{avg}(h_3-h_9)$ 5.34
$K_{avg}(h_2-h_5)$ 6.71	$K_{avg}(h_5-h_8)$ 4.22	$K_{avg}(h_2-h_8)$ 5.32
$K_{avg}(h_1-h_4)$ 5.30	$K_{avg}(h_4-h_7)$ 5.36	$K_{avg}(h_1-h_7)$ 5.33

Table 1. Piezometric heads in the unconfined aquifer wells

No. of Exp.	Head (cm)									
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	Reservoir
1st	43.4	43.2	43.4	42.2	42.5	42.3	41.0	40.7	40.8	39.3
2nd	43.3	43.2	43.3	42.0	42.2	42.2	40.7	40.6	40.7	39.4
3rd	43.9	43.9	43.9	42.7	42.9	42.8	41.4	41.3	41.4	39.4
4th	43.0	43.0	42.9	42.1	42.1	42.0	40.9	40.6	40.7	39.4
5th	43.3	43.2	43.1	42.2	42.3	42.2	41.0	40.9	41.0	39.4

Table 4. Permeability obtained from two different methods of slug test.

A. Hvorslev method								
T ₀ (min)	H ₀ (cm)	r ² (cm ²)	L _c (cm)	L _c /R	ln(L _c /R)	K (cm/min)	K _{avg} (cm/min)	
0.0083	31.6	2.25	60	30	3.4	7.66	7.49	
0.0087	31.6	2.25	60	30	3.45	7.33		
B. Bouwer and Rice method								
Time (min)	H ₀ (cm)	H _t (cm)	C	ln(L _w /R)	ln(R _w /R)	ln(H ₀ /H _t)	K (cm/min)	K _{avg} (cm/min)
0.017	31.6	4.0	2	3.47	2.61	2.07	6.06	5.85
0.017	31.6	4.6	2	3.47	2.61	1.93	5.65	

의한 수리전도도는 Table 3에 나타난 바와 같이 관측점 구간 별로 약간의 차이가 있었으나 포화 수리전도도의 특성상 이는 거의 미미한 것으로 판단되며 전반적으로 상류 구간이 하류 구간보다 약간 높게 나타난 것을 알 수 있다. 그러나 상하류 전 구간의 수리전도도 (K(h₃-h₉))는 각 구간별 (K(h₃-h₆), K(h₆-h₉)) 수치의 평균치에 근접하였으며 모형의 폭방향 (지하수 흐름에 수직방향)으로 전 구간 수리전도도 (K(h₃-h₉), K(h₂-h₈), K(h₁-h₇))는 각각 5.34 cm/min, 5.32 cm/min, 5.33 cm/min로 나타나 전체 대수층의 평균치인 5.33 cm/min에 거의 근접하였다.

Slug test 자료를 Hvorslev 방법에 의하여 분석한 결과 수리전도도는 7.49 cm/min를 보여 표준 수리전도도와 비교하여 약 40% 정도 높게 나타났다. 한편, Bouwer & Rice 방법에 의한 분석결과 수리전도도는 5.85 cm/min로 Dupuit에 의한 표준 수리전도도와 약 10%의 차이를 보여 유사하게 나타났다. 이는 Bouwer & Rice 방법이 본 연구에서 사용된 대수층의 수리전도도를 비교적 정확하게 추정하고 있음을 보여준다(Table 4). Hvorslev 방법에 의한 결과가 약간 높게 나타나는 이유는 Slug의 순간주입 직후의 상승수위에 대한 수위강하 비가 약 37%를 보이는 시간인 T₀가 수리전도도를 결정하는 데에 있어서 매우 중요한 요소가 되는 바, 본 실험의 대수층은 조사력토로 구성되어 있어서 그 수리전도도가 다른 대수층 토양에 비하여 크기 때문에 상대적으로 T₀를 결정하는 데에 큰 오차의 가능성을 가졌다고 보여지며 따라서 Hvorslev 방법은 낮은 수리전도도를 가진 대수층에 적합하다는 것을 확인할 수 있었다(Figure 5). Bouwer & Rice 방법에 의해 분석한 수위강하는 시간의 경과에 따라 AB, BC, C이후의 세구간으로 도시되었다(Figure 6). 일반적으로 두개 이상의 직선구간이 나타날 경우 두번째 부분을 선택하여 수리전도도를 결정하는데 이는 순간주입 직후의 상승한 수위가 관측공 주위의 gravel pack을 통하여 급격히 강하되기 때문이다(Bouwer, 1989). 그러나 본 실험의 경우 스크린 되어 있는 우물이 대수층과 직접 접촉하고 있어서 순간 주입 직후 관측공 내 상승한 수위의 시간에 따른 저하는 바로 대수층의 영향을 받게 된다. 따라서 첫번째 직선영역인 AB구간을 선택하여 수리전도도를 결정하였다. Bouwer & Rice 방법이 Dupuit에 의한 방법의 결과보다 9.7% 크게 수리전도도를 추정한 것은 Slug Test를 주입실험으로 수행하고, 초기 상승 수위가 대수층의 두께와 비교하여 상대적으로 커서 수위 회복이 빠르게 나타났기 때문인 것으로 판단된다(이진용

등, 1999).

정수위 방법을 통한 실험 결과 수리전도도는 0.77 cm/min로 본 연구에 사용된 다른 방법들 보다 가장 낮게 나타났다. 이는 대수층 시료를 PVC Ring에 모형화하는 과정에서 다짐의 정도나 그 공극구조가 실제 대수층의 토성과 차이를 가지게 되었기 때문인 것으로 사료된다.

결 론

조사력토로 구성된 실험실 규모의 자유면 대수층 모형에서 정상류 상태하의 9개 관측수위로부터 Dupuit의 관계식에 의한 수리전도도를 산정하였으며, 정수위법과 Slug Test 중 Hvorslev에 의한 방법 (Hvorslev, 1951)과 Bouwer & Rice에 의한 방법 (Bouwer and Rice, 1976)으로부터 각각 수리전도도를 결정하여 비교하였다. Dupuit에 의한 수리전도도는 5.33 cm/min으로서 본 모형에서의 자유면 대수층 흐름이 Dupuit이 제안한 2가지 가정을 만족시킴으로 표준 수리전도도로 결정하였고, 동일한 토성으로 성형한 대수층 시료에 대하여 정수위 방법으로 수리전도도를 측정한 결과 0.77 cm/min, Hvorslev 방법에 의한 slug test에서는 7.49 cm/min, Bouwer & Rice 방법에 의한 결과는 5.85 cm/min의 수리전도도를 각각 보여줌으로써 본 연구에 수행한 순간주입 방법 중 자유면 대수층의 수리전도도 결정에서 Bouwer & Rice 방법이 가장 적합함을 알게 되었다. 또한 대수층의 비산출율은 약 0.20으로 포화 함수량인 40%의 약 절반 가량을 차지하고 있어 지하수 함양율이 비교적 높은 대수층에 속한다는 것을 알 수 있었으며 수리상수에 관한 이러한 결과치는 향후 자유면 대수층에서의 지하수 모델링이나 오염물질 이동 현상의 연구에 기초자료가 되리라 생각된다.

사 사

본 연구는 한국 학술진흥재단의 신진교수 연구 지원 과제 (KRF-99-H0170500)에 의하여 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

이진용, 이강근, 정형재, 배광옥, 1999, 순간수위변화 및 양수시험을

- 통한 수리상수 추정의 문제점 분석, 지하수환경, 6(1), p. 14-22.
- Bouwer, H. and Rice, R. C., 1976, A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely and partially penetrating wells, *Water Resource Research*, 12(3), p.423-428.
- Bouwer, H., 1989, The Bouwer and Rice Slug Test. *Ground Water*, 27(3), p.304-309.
- Cooper, H. H. Jr. and Jacob, C. E., 1946, A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history, *Transactions, American Geophysical Union*, 27, p.526-534.
- Dupuit, J., 1863, *Etudes theoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux decouverts eta travers les terrains permeables*, 2d ed. Paris: Dunod.
- Hantush, M. S., 1956, Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers, *Transactions, American Geophysical Union*, 37, p.702-714.
- Hantush, M. S., 1960a, Analysis of data from pumping tests in anisotropic aquifers, *Journal of Geophysical Research*, 71, p.421-426.
- Hantush, M. S., 1960b, Modification of the theory of leaky aquifers, *Journal of Geophysical Research*, 65, p.3713-3725.
- Hvorslev, M. J., 1951, Time lag and soil permeability in ground water observations, U. S. Army Corps of Engineers Waterway Experimental Station, Bulletin 36.
- Neuman, S. P., 1975, Analysis of Pumping Test Data From Anisotropic Unconfined Aquifers Considering Delayed Gravity Response, *Water Resource Research*, 11, p.329-342.
- Neuman, S. P. and Witherspoon, P. A., 1969, Applicability of current theories of flow in leaky aquifers, *Water Resources Research*, 5, p.817-829.
- Nwankwor, G. I., Gillham, R. W., van der Kamp, G. and Akindunni, F. F., 1992, Unsaturated and saturated flow in response to pumping of an unconfined aquifer: Field evidence of delayed drainage, *Groundwater*, 30, p.690-700.
- Streltsova, T. D., 1972, Unsteady radial flow in an unconfined aquifer, *Water Resource Research*, 8, p.1059-1066.
- Streltsova, T. D., 1973, Unsteady radial flow in an unconfined aquifer, *Water Resource Research*, 9, p.236-242.
- Theis, C. V., 1935, The lowering of the piezometer surface and the rate and discharge of a well using ground-water storage, *Transactions, American Geophysical Union*, 16, p.519-524.
- Walton, W. C., 1960, Leaky artesian aquifer conditions in Illinois, *Illinois State Water survey Report of Investigation 39*
- Walton, W. C., 1979, Progress in analytical groundwater modeling, *Journal of Hydrology*, 43, p. 149-159.