

## 사질 자유면 대수층 모형에서의 지하수 모델링 Groundwater Flow Modeling for a Finite Unconfined Sandy Aquifer in a Laboratory Scale

이승섭(Seoung-Sup Lee) · 김정석(Joung-Souk Kim) · 김동주(Dong-Ju Kim)

**요 약 :** 지하 대수층에서의 오염물질 이동현상은 지하수 유동에 좌우되며 이를 지배하는 수리지질 파라미터의 결정과 그에 따른 지하수 모델링은 지하수 복원사업에 중요한 역할을 한다. 본 연구의 목적은 실험실 규모의 자유면 대수층에서 획득된 투수계수와 비산출량을 이용하여 다양한 경계조건하에서 지하수 흐름에 대한 민감도 분석을 수행함으로써, 최적의 수리상수를 결정하고 지하수 유동 특성을 파악하는데 있다. 연구결과 모사된 수위저하는 경계조건과 무관하게 관측된 수위저하보다 적게 나타났으며, 투수계수가 비산출율보다 지하수 흐름에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 물수지 분석결과 양수시험시 관측점에서 측정된 수위저하는 평형수위나 모사 수위저하보다 크게 나타났으며, 이는 대수층과 우물에서의 수위가 상이함을 지시한다. 이러한 수위의 상이성은 시간영역 광전자파 분석기에 의한 지하수면과 모세관대에서의 수분함량을 관측함으로써 규명되었으며 이는 지하수면 하강시 중력배수의 지연성에 기인하는 것으로 나타났다.

**Abstract :** Transport of pollutants in aquifer largely depends on groundwater flow which is governed by aquifer hydraulic parameters. Determination of these parameters and associated groundwater modeling become essential for adequate remediation of contaminated groundwater. The objective of this paper is to analyze groundwater flow and determine the optimum hydraulic parameters by performing groundwater modeling based on sensitivity analysis for unconfined sandy gravel aquifer constructed in a laboratory scale under various boundary conditions. Results revealed that the simulated drawdown was lower than the observed drawdown irrespective of boundary conditions, and specific yield ( $S_y$ ) had less effect on the groundwater flow than permeability ( $K$ ) in the aquifer. Water balance analysis showed that the measured drawdown in neighboring observation wells during pumping was higher than either simulated or recovered water table. This indicated that a difference might exist in the water tables between aquifer and wells. The difference was investigated by time domain reflectometry (TDR) measurements on water contents in the region of water table and capillary fringe, and explained by a delayed response of water table during gravitational drainage as the water table was lowered as a result of pumping.

### 서 론

최근 산업의 발달과 그의 부산물인 각종 오염물질의 미처리와 무단 방류로 하천수는 물론 지하수까지도 오염의 위기에 직면하고 있는 실정이다. 특히 지표수자원은 하천수의 계절적 불연속성과 유해화학물질에 의한 오염으로 양질의 수자원으로서의 구실을 못하고 있다. 따라서 비교적 오염의 위험성이 낮은 지하수자원의 효용성이 점점 증대되고 있다. 지하수자원의 적절한 관리와 오염발생시 원활한 복구를 위해서는 지하 대수층에서의 오염물질 이동현상을 규명하는 것이 필수적이며 이를 지배하는 수리지질 파라미터의 결정과 그에 따른 지하수 모델링은 지하수 복원 사업에 중요한 역할을 한다. 특히 수치기법을 이용한 지하수 모델링은 지하수의 유동이나 용질의 이동과 관련된 과거와 현재의 상황을 재현 분석하게 하며 미래에 예상되는 변화를 평가하는데 널리 이용되고 있다. 따라서 지하수 모델링은 실제 실험에서 획득한 수리지질 인자의 타당성 검증

을 위하여 매우 유용한 방법이다(Tsang, 1991). 본 연구의 목적은 실내 모형 자유면 대수층에서 획득된 투수계수와 비산출량으로 Groundwater Modeling System(GMS) 프로그램에서의 3차원 모듈인 Modflow를 이용하여 다양한 경계조건, 즉 모형의 상하류부에 유입량과 수두의 유무등의 조건들을 부과함으로써 지하수 흐름 특성을 파악하는데 있으며, 또한 수리상수의 민감도 분석을 수행함으로써 최적의 투수계수와 비산출량을 결정하고, 양수시험시 관측공에서 나타나는 수위저하곡선을 모사함으로써 이론과 관측치를 비교하고자 한다.

### 재료 및 방법

#### 실내 대수층모형

물수지 및 지하수 유동을 지배하는 수리지질인자인 투수계수와 비산출량을 비교적 단기간에 분석하기 위하여 실험실 규모의 사질 자유면 대수층 모형을 선택하였다. 모형은 두께 10 mm의 아크릴로 폭 50 cm, 높이 150 cm, 길이 200 cm이며, 불포화대와 포화대의 두 부분으로 구성되어 있다. 조사와 자갈의 혼합토로 구성된 포화대는 바닥에서부터 60 cm까지이며, 세사

고려대학교 이과대학 지구환경과학과(Dept. of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Korea University, Anam Dong 5 ga 1, Sungbuk Gu, Seoul 136-701, Korea)

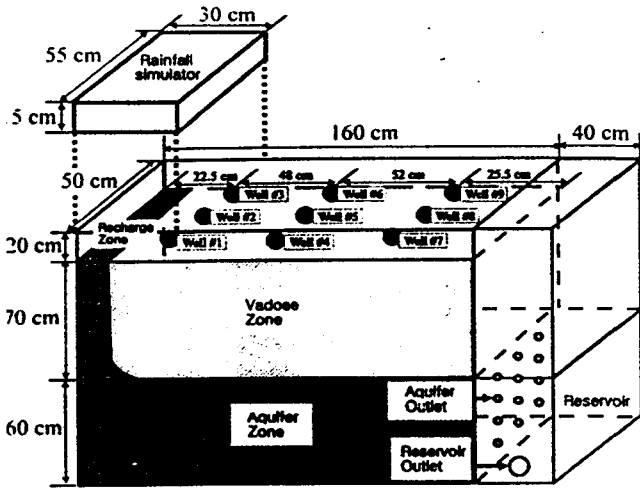


Figure 1. Schematic representation of a 2-D sand tank model to conduct unconfined aquifer tests.

로 구성된 불포화대는 포화대로부터 상부 70 cm까지이다. 모형의 우단에 배수조절조가(폭 50 cm, 높이 150 cm, 길이 40 cm) 위치하며 대수층과 조절조의 벽면은 지름 2.5 cm인 12개의 유출구가 있어 지하수의 원활한 배출을 유도하였다. 좌단에는 포화대수층과 같은 혼합토로 구성된 폭 50 cm, 높이 70 cm, 길이 10 cm의 유입수 구역을 조성하여 강우발생장치(폭 55 cm, 높이 15 cm, 길이 30 cm)로 대수층의 지하수 흐름을 조절하였다. 모형 내부에 폭과 길이 방향으로 각각 3지점에 피에조미터를 설치하여 양수시험시 관측공에서의 수위저하를 측정하였다(Figure 1).

**대수층 시험**

본 연구에 사용된 동일 모형에 대하여 김과 김(1999)은 3가지의 다른 방법(정수위법, Dupuit 가정, Slug 시험)을 사용하여 투수계수와 수직 중력배수에 따른 배출량을 측정하여 비산출율을 결정하였다. 양수정에서 채수에 따른 관측정에서의 수위 변화를 측정하기 위하여 양수시험이 시행되었으며 대수층 상하류부에 3가지 다른 경계조건을 부과하였다. 첫번째 조건 (Case 1)에서는 우단 수조와 대수층과의 경계면에 위치한 유출구를 차단하여 대수층을 둘러싸고 있는 4개의 연직면을 no flux 경계면으로 하였으며 모형 좌단 상부로부터 보충수 유입영역을 통한 유입수가 없는 상태 즉 정지흐름상태에서 양수시험을 시행하였으며, 두번째 조건(Case 2)은 양수 시험시 대수층내의 지하수면의 저하에 따라 40 cm의 수위를 갖는 우단 수조로부터 대수층내로 지하수 유입이 가능하도록 하였으며, 세번째 조건(Case 3)에서는 모형 좌단에 연직으로 설치된 보충수 유입 영역(Recharge Zone)을 따라 일정 유량의 주입과 동시에 우단에 설치된 수조(Water Storage Reservoir)를 통하여 지하수가 배출되도록 하였다. 세가지의 모든 조건에 대하여, 양수시험시 모형 중앙에 위치한 5번 정호에서 양수를 일정량 450 mL/min으로 시행하였으며 초기수위는 바닥으로부터 41.5 cm였다. 양수에 따른 대수층에서의 시간별 수위저하 형태를 관측하기 위하여 양수정을 포함한 인근 8개의 정호에서 우물수위를 측정

하였다.

**수분함량 측정**

양수시험중 관측공에서의 수위저하는 양수정에서의 수위저하와 거의 같은 정도로 일어났다. 이런 특이한 현상을 규명하기 위하여 양수정과 관측정 사이의 대수층에 대한 수위측정이 요구되었으며 최근 지하수문학 영역(Dasberg and Hopmans, 1992; Herkelrath et al., 1991; Topp and Davis, 1985; Topp et al., 1980; Weitz et al., 1997)에서 보편적으로 활용되고 있는 시간영역 광전자파 분석기(Time Domain Reflectometry)를 사용하여 수분함량을 측정하였다. 총 18개의 탐침이 4번과 7번 정호 사이의 대수층 전단 벽면에 3개, 깊이와 수평방향으로 6곳에 설치되었다. 대수층에서의 수위저하 형태를 포착하기 위하여 지하수면을 대수층 상부(바닥면으로부터 60 cm)까지 상승시킨 뒤 초기상태의 함수량(포화 함수량)을 측정하였다. 양수시험은 4번 정호에서 배출량 470 mL/min으로 진행되었으며 실험조건과 동일하게 상부 보충수 유입영역을 통하여 동일량을 보충하여 정상류 흐름상태를 유지한 후 지하수면 상하부의 대수층에 대하여 TDR에 의한 수분함량을 측정하였다. 각 탐침위치에서 획득한 유전상수로부터 함수량으로의 검정은 Topp이 제안한 식을 사용하였다(Topp et al., 1980).

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} K - 5.5 \times 10^{-4} K^2 + 4.3 \times 10^{-6} K^3 \quad (1)$$

여기서  $\theta$ 는 수분함량 그리고  $K$ 는 유전상수이다.

**지하수흐름 모델링**

본 연구에 사용된 모델(GMS)은 최근 미국방성에서 개발한 지하수 흐름 및 오염물질 운송을 모사하는 3차원 프로그램이며, 분석 목적에 따라 다양한 모듈이 존재한다. 그 중 물흐름을 모사하는 3차원 모형인 Modflow(McDonald and Harbaugh, 1988)를 사용하였으며 자유면 대수층에 적용된 지하수의 3차원적 흐름은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

여기서  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$ 는 x, y, z축 방향으로의 투수계수(L/T), h는 수두(L), W는 단위체적당 유량( $T^{-1}$ ),  $S_s$ 는 다공성 매질의 비저유계수( $L^{-1}$ ), t는 시간(T)이다.

김과 김(1999)에 의한 실내 실험에서 획득된 수리지질 파라미터를 이용하여 지하수 모델링을 수행하기 위한 2차원 격자의 설정은 Figure 2에 나타나 있다. Figure 1에서 표시된 조사 및 자갈로 구성된 자유면 대수층(바닥면에서부터 50 cm)의 영역을 2차원 격자망 구조로 나타내었으며, 전체적인 격자의 수는 x축, y축 방향으로 50 cell(200 cm), 25 cell(50 cm), z축은 단일층으로 설정하여 자유면 대수층을 도식하였다. 지하수위 조절조(Water Storage Reservoir)의 격자의 수는 x, y방향으로 10 cell(40 cm), 25 cell(50 cm)로 하였으며, 보충수 유입영역의 격자 수는 x, y방향으로 2 cell(8 cm), 25 cell(50 cm)로 설정하였다. 따라서 모델링에 사용된 총 격자의 수는 1250개이며, 관측정이나 양수정으로 사용된 9개의 피에조미터의 위치는 실제

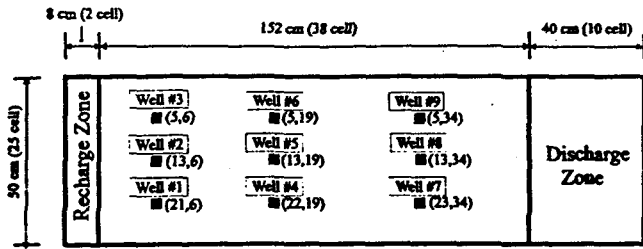


Figure 2. Grid installation of sand tank model (plan view of unconfined aquifer).

의 모형과 같은 위치에 설정하였다.

모델링에 사용된 경계조건은 앞에서 기술한 바와 같이 3개의 다른 경계조건(Case 1, 2, 3)이며 각 경계조건별 투수계수와 비산출율의 민감도 분석에 필요한 수리지질 인자는 Table 1에 나타나 있다. 김과 김(1999)의 논문에서 결정된 대수층 모형의 표준 비산출율( $S_{y2}=0.20$ )과 표준 투수계수( $K_2=5.33$  cm/min)에 따른 지하수 흐름의 민감도를 분석하기 위하여 Dupuit의 제안식에 의해 산정된  $K_2$ , 정수위법에 의해 획득된  $K_1$ , Slug 시험으로 획득된  $K_3$ ,  $K_1$ 와 대수층 깊이별로 측정된 8개의 비산출율 중 표준치인  $S_{y2}$ 와 최대, 최소값인  $S_{y3}$ ,  $S_{y1}$ 을 사용하였다. 수위저하 모사에 사용된 양수정은 대수층 중앙에 위치한 5번 정호이며, 모의발생 시간은 20 min, 양수량과 보충량 및 대수층의 초기수위는 양수시험과 동일조건을 부과하였다. 우단수조의 지하수 유입효과를 반영하기 위한 Conductance는 다음과 같다.

$$C = \frac{KWL}{M} \quad (3)$$

여기서 C는 Conductance( $L^2/T$ ), K는 투수계수( $L/T$ ), W는 수조 폭(L), L은 수조의 길이(L), M은 수조의 높이(L)를 나타낸다. 본 연구에 사용된 L과 M값은 7.5 cm와 10 cm로서 Figure 3에 도시되어 있으며 W는 아크릴의 두께 2 cm를 제외한 38 cm를 사용하였다. 모델링에 사용된 C값은 투수계수에 따라 변화되므로 4개의 다른 수치를 적용하였다(Table 1).

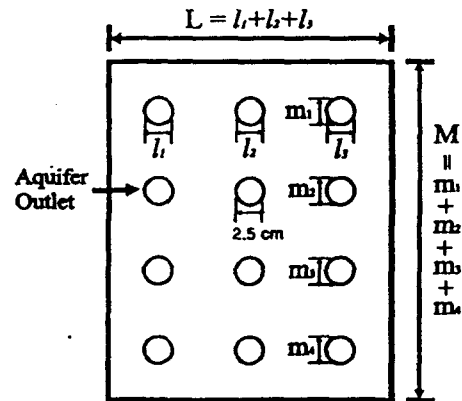


Figure 3. Schematic diagram showing the cross-sectional area between aquifer and reservoir for determination of conductance.

### 결과 및 토의

#### 수위저하곡선

세 가지의 다른 경계조건에서 양수시험을 시행한 결과 9개의 정호에서 관측된 수위저하 자료가 Figure 4에 나타나 있다. 세 가지 경우 모두 수위저하는 양수정에서 가장 크게 나타났으며 양수정으로부터 방사상 거리에 따라 반비례함을 보여준다. 첫번째 경계조건(No Recharge and No Reservoir)의 경우, 시간에 따른 수위저하 곡선이 선형으로 나타나는 것이 특이하다는 것을 알 수 있다. 각 정호별 수위저하 곡선의 차이도 선형으로 증가하였으며 이러한 사실은 양수정에서의 채수에 의한 수위저하가 인근 관측공으로 급속도로 전파되었음을 시사하며 관측공에서의 수위저하가 양수정과 거의 같은 정도로 일어났음을 나타내주고 있다. 이러한 현상은 대수층 매질체의 높은 투수성과 대수층을 둘러싸고 있는 4개의 면적에서 No Flow 경계에 의한 수위저하 급강하 효과에 기인한다고 볼 수 있다. 두 번째 경계조건의 경우 모든 정호에서의 수위저하는 첫 번째의 경우보다 낮게 나타났으며 양수정에서 가장 높게 그리고 4, 6, 2, 3, 1번의 정호로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다.

Table 1. Input parameters used for sensitivity analysis of K and  $S_y$  regarding three difference cases of groundwater flow conditions (Simulation time = 20 min, pumping rate = 450 mL/min, pumping well = 5, initial water level = 42 cm)

Case 1	Various K			Various $S_y$		
	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3	
	$S_y = 0.20$			$K = 5.33$ cm/min		
	$K_1 = 0.77$ cm/min			$S_{y1} = 0.17$		
	$K_2 = 5.33$ cm/min			$S_{y1} = 0.20$		
	$K_3 = 5.85$ cm/min			$S_{y1} = 0.23$		
	$K_4 = 7.49$ cm/min					
	$C_1 = 21.9$ cm <sup>2</sup> /min	$C_1 = 21.9$ cm <sup>2</sup> /min		$C = 151.9$ cm <sup>2</sup> /min	$C = 151.9$ cm <sup>2</sup> /min	
	$C_2 = 151.9$ cm <sup>2</sup> /min	$C_2 = 151.9$ cm <sup>2</sup> /min		Stage = 40 cm	Recharge rate = 240 mL/min	
	$C_3 = 166.7$ cm <sup>2</sup> /min	$C_3 = 166.7$ cm <sup>2</sup> /min		Bottom elevation = 0 cm	Stage = 40 cm	
	$C_4 = 213.5$ cm <sup>2</sup> /min	$C_4 = 213.5$ cm <sup>2</sup> /min			Bottom elevation = 0 cm	
	Stage = 40 cm	Recharge rate = 240 mL/min				
	Bottom elevation = 0 cm	Stage = 40 cm				
		Bottom elevation = 0 cm				

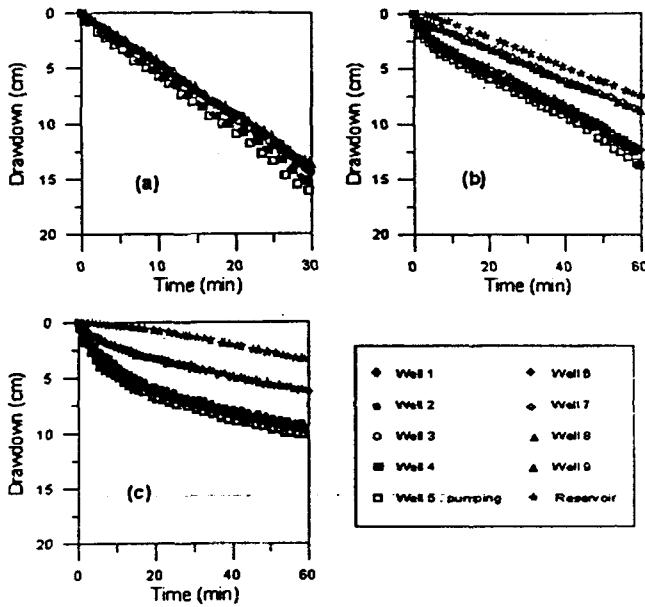


Figure 4. Drawdown of piezometric head in nine wells during pumping for three different boundary conditions: (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3.

수조에 가까이 위치한 7, 8, 9번 정호에서 나타난 비교적 낮은 수위저하는 모형 우단에 위치한 수조로부터 흐름이 발생하는 경계조건을 부과했기 때문인 것으로 판단되며 이러한 영향은 Recharge와 Reservoir 조건이 동시에 부과되는 세 번째 경우의 양수시험에서 더 뚜렷하게 나타났다.

모델링 분석

실내 모형 자유면 대수층에서 획득된 투수계수와 비산출량

을 이용하여 다양한 경계조건에 대하여 양수시험시 발생하는 수위저하 곡선을 모사한 결과와 관측 수위저하 자료가 Figure 5와 Figure 6에 나타나 있다. Figure 5는 일정한 비산출율 ( $S_y=0.20$ )에 대하여 4가지 다른 투수계수를 사용하여 투수계수 변화에 따른 우물수위의 민감도 분석 결과를 보여준다. 모사 수위저하 곡선은 양수정에서 채수시 인근 관측정에서의 우물 수위를 방사상 거리에 대하여 작성하여 수위저하 곡선의 형태로 표시하였다. 경계조건에 따른 3가지 다른 양수경우별 모두 (Case 1, 2, 3) 투수계수가 가장 낮은  $K_1$ 의 경우를 제외하고 유사하게 나타났으며  $K_2, K_3, K_4$ 의 투수계수 차이는 주어진 모형 대수층에서의 수위저하 형태에 미미한 영향을 준다는 것을 알 수 있었다. 동일한 비산출율에 대하여  $K_1$ 의 경우 양수정에서 가장 낮은 수위를 모사한 것은 타 경우보다 투수계수가 약 8배 정도 작아 대수층에서의 지하수 전달이 느리게 나타났기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 양수정으로부터 가장 먼 거리에 있는 관측정에서는 우물수위가 더 높게 나타난 것을 알 수 있었다. 또한 Figure 5에서 보듯이  $K_1(0.77 \text{ cm/min})$ 과  $S_y(0.2)$ 로 민감도 분석을 수행한 경우를 제외한 나머지 경우 모두, 모사 수위와 관측 수위간에 수위저하가 거의 같은 정도로 차이가 있었으며, 이러한 차이는 8개의 관측정과 1개의 양수정에서 수위저하의 평균적 차이가 대략 4cm인 것으로 나타났다. 이러한 결과가 Case 1과 Case 3에서는 거의 비슷하였으며 Case 2의 경우엔 모사수위와 관측수위 차이가 가장 낮은 차이(약 2 cm)를 보였다(Table 2).

일정한 투수계수에 대한 비산출율의 수위저하 곡선에 대한 민감도 분석 결과가 Figure 6에 나타나 있다. 앞의 경우와는 달리 비산출율의 변화 ( $S_{y1}, S_{y2}, S_{y3}$ )에 따른 지하수 흐름의 변화가 거의 미미함을 알 수 있으며 Case 1의 경우 비교적 두드러지게 나타났다. 따라서 우단의 수조나 좌단의 보충수가 존재하여 지하수가 보충되는 조건에서는 약 15%의 비산출율의 변

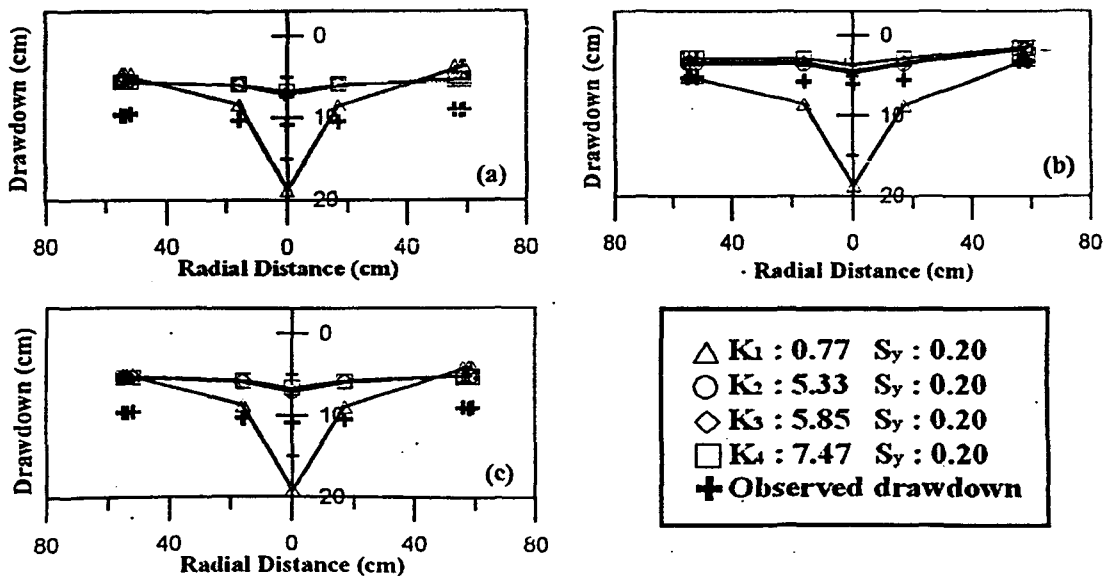


Figure 5. Comparison between observed and simulated drawdown followed by various permeability. ((a) Boundary condition case 1, (b) Boundary condition case 2, (c) Boundary condition case 3))

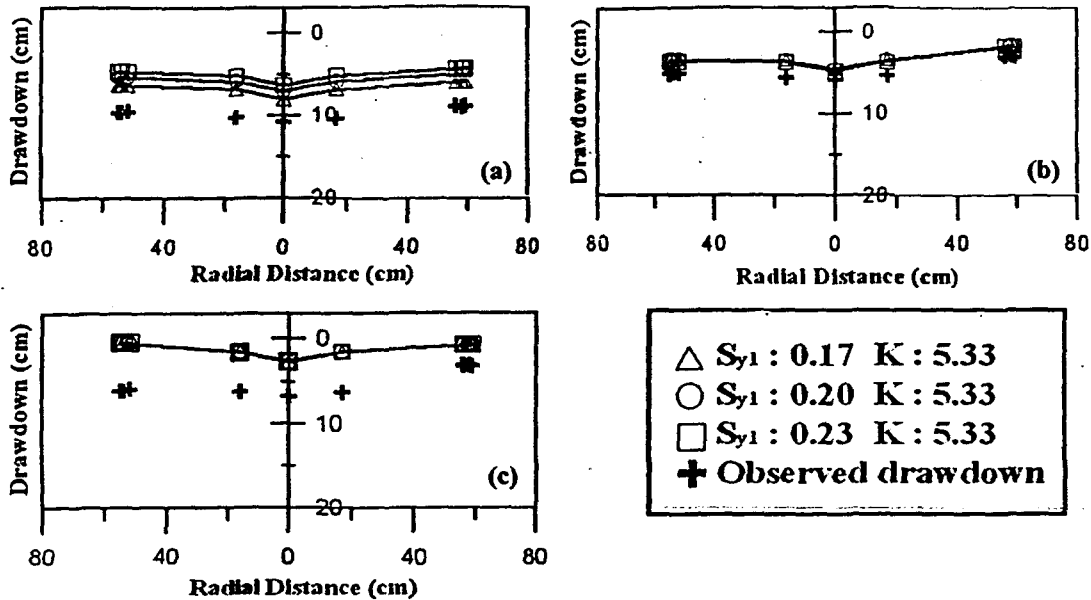


Figure 6. Comparison between observed and simulated drawdown followed by various specific yield. ((a) Boundary condition case 1, (b) Boundary condition case 2, (c) Boundary condition case 3)

Table 2. Average difference between observed and simulated drawdown data for different simulation cases ( $K_1$ : 0.77 cm/min,  $K_2$ : 5.33 cm/min,  $K_3$ : 5.85 cm/min,  $K_4$ : 7.49 cm/min,  $S_{y1}$ : 0.17,  $S_{y2}$ : 0.20,  $S_{y3}$ : 0.23)

	Case 1	Case 2	Case 3		Case 1	Case 2	Case 3
$K_1, S_{y2}$ :	4.8	2.7	4.4	$S_{y1}, K_2$ :	3.1	1.6	4.2
$K_2, S_{y2}$ :	4.1	1.3	4.2	$S_{y2}, K_2$ :	4.1	1.3	4.2
$K_3, S_{y2}$ :	4.1	1.6	4.3	$S_{y3}, K_2$ :	4.8	1.4	4.2
$K_4, S_{y2}$ :	4.1	2.0	4.4				

화는 수위저하에 거의 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다. 또한 Case 1의 경우 비산출율이 가장 낮은  $S_{y1}$ 이 가장 낮은 수위저하를 보여 동일 투수계수에 대하여 비산출율이 적을수록 수위가 급감하함을 알 수 있으며 이는 비산출율이 낮은 대수층은 지하수 함양량이 적어 주어진 채수량에 대하여 그렇지 않은 대수층보다 단위면적당 우물수위가 낮게 되기 때문이다. 이 경우에도 역시 모사 수위와 관측 수위간에 채수정을 포함한 모든 관측점에서 일정 차이를 보였으며 그 차이는 앞의 경우(투수계수 민감도 분석)와 같이 Case 2에서 가장 낮게 나타났다. 이는 5번 정호에서 양수시 우단 수조로부터의 대수층으로의 지하수 공급이 전 대수층에 상당히 빨리 진행됨을 암시하며 Case 3의 경우 우측 관측점에서 모사치와 관측치의 차이가 가장 적게 나타난 사실과 일치한다.

물수지분석

양수정을 중심으로 방사상 거리에 위치한 관측점에서의 수위저하곡선에 대한 관측치와 모사치간의 차이를 규명하기 위하여 채수량과 관측수위 그리고 회복수위간의 물수지 분석을 시행하였다. 관측정과 양수정에서의 양수직후 수위저하와 회복 후 수위저하가 Table 3에 나타나 있으며 Figure 7은 양수직전

Table 3. Comparison of drawdowns in wells between after pumping and equilibrium state (cm)

Well number	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
Drawdown after pumping	15.8	16.0	16.2	16.7	17.4	16.8	14.9	14.9	15.0
Drawdown of equilibrium	9.4	9.5	9.6	9.3	9.5	9.7	9.4	9.3	9.4

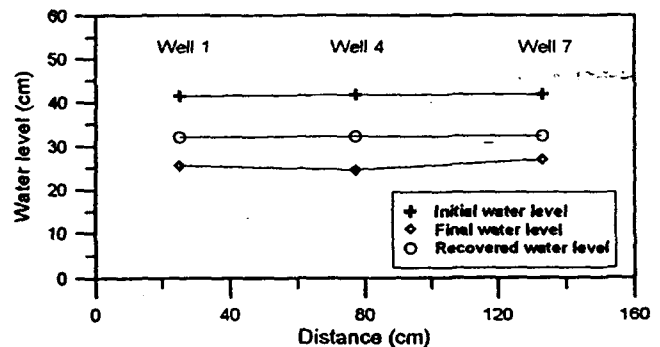


Figure 7. Comparison of three different water levels: i) initial water level, ii) water level after pumping and iii) water level after recovery

의 초기수위와 일정량의 채수 직후의 관측수위 그리고 채수종료 후 회복수위간의 관계를 보여준다. 양수율은 437.6 ml/min, 양수시간은 33분으로 총 채수량은 14.2 L였으나 초기수위와 채수후 관측수위의 차로 계산된 채수량은 21.2 L로 약 50%의 오차를 나타내주고 있다. 그러나 회복수위에 의한 채수량은 약 14.4 L로 실제 채수량과 근접한 결과를 보여 관측수위에 오류가 있음을 지시해주고 있다. 따라서 양수정과 관측점 사이의

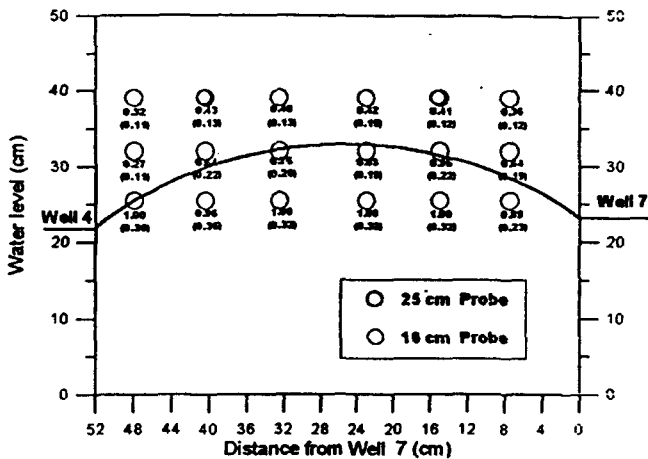


Figure 8. Curvilinear type of water level detected by TDR probes in the aquifer. Values in the bracket represent volumetric water content and the others relative saturation degree.

대수층에 있어서의 지하수 수위를 규명하기 위하여 시간영역 광전자파 분석기로 실측하였으며 그 결과가 Figure 8에 나타나 있다. 4번 정호와 7번 정호 사이에서 일정시간 채수후 18개의 TDR 탐침 위치에서 대수층 수분함량을 관측한 결과 대수층의 지하수위는 포물선형으로 추정되었으며 이는 Figure 8에서의 양수정 4번과 관측정 7번 사이의 직선형 지하수위에 오류가 있음을 암시해주고 있다. 따라서 Figure 5와 6에 도시된 채수정과 관측정사이의 대수층 지하수위는 선형이 아니라 비선형임을 알 수 있다. 이러한 현상은 최근 사질사력토로 구성된 자유면 대수층에 양수시험을 실시한 Nwankwor *et al.* (1992)에 의해서도 발견되었으며 그 이유는 자유면 대수층이 지니고 있는 특수한 상황, 즉 수위저하에 의한 중력배수시 모세관 영역에서의 지하수의 저장능에 의한 지하수위 저하의 지연효과에 기인되었음을 알 수 있었다.

결 론

실내 모형 자유면 대수층에서 획득한 투수계수와 비산출량으로 지하수모델링을 통한 민감도 분석을 한 결과 지하수 흐름에 영향력이 큰 인자는 투수계수인 것으로 나타났으며 비산출율의 영향은 거의 미미하였다. 모사수위와 관측수위와의 비교에서 수위저하는 투수계수 5.33 cm/min, 비산출량 0.2의 경우, 관측 수위저하와 가장 유사함을 보였다. 그러나 관측치와 모사치 사이에는 다소의 차이가 있었으며 이러한 차이는 4개의 연직면이 No Flow 경계면으로 형성된 대수층(Case 1)에서 가장 크게 나타났으며 양수정에서의 채수시 우단 수조로부터 지하수 공급이 가능한 대수층(Case 2)의 경우 가장 낮게 나타

났다. 물수지 분석을 통하여 양수정을 중심으로 형성된 수위저하곡선 즉 우물간 지하수면의 선형화는 실제의 대수층 지하수면과 상이하다는 것을 규명하였으며 선형화된 관측수위는 과소평가 되었음을 알 수 있었다. 또한 시간영역 광전자파 분석기에 의한 양수정과 관측정 사이의 대수층 및 모세관대에서의 수분함량 측정 결과 지하수위가 선형이 아닌 포물선형임을 확인하였다. 이러한 현상은 Nwankwor *et al.*(1992)에 의해서 설명되었으며 수위저하에 의한 중력배수시 모세관 영역에서의 지하수의 저장능에 의한 지하수위 저하의 지연효과에 기인되었음을 알 수 있었다.

사 사

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

참고문헌

김동주, 김정석, 1999, 실내 자유면 사질 대수층의 수리상수 결정, 지하수환경, 투고중.

Dasberg, S. and Hopmans, J. W., 1992, Time domain reflectometry calibration for uniformly and nonuniformly wetted sandy and clayey loam soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 56, p. 1341-1345.

Fetter, C. W., 1994, Applied Hydrogeology, 3rd Ed., PRENTICE HALL, Englewood Cliffs, New Jersey, p. 167.

Herkelrath, W. N., Hamburg, S. P. and Murphy, F., 1991, Automatic, realtime monitoring of soil moisture in a remote field area with time-domain reflectometry, Water Resour. Res., 27, p. 857-864.

McDonald, M. G. and Harbaugh, A. W., 1988, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, U. S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1.

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.

Tsang, C. F., 1991, The modeling process and model validation, Ground Water, 29(6), p. 825-831.

Topp, G.C., Davis, J. L. and Annan, A. P., 1980, Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, Water Resour. Res., 16, p. 574-582.

Topp, G. C. and Davis, J. L., 1985, Measurement of soil water content using time-domain reflectometry, Soil Sci. Soc. Am. J., 49, p. 19-24.

Weitz, A. M., Grauel, W. T., Keller, M. and Veldkemp E., 1997, Calibration of time domain reflectometry technique using undisturbed soil samples from humid tropical soils of volcanic origin, Water Resour. Res., 33(6), p. 1241-1249.