

누수대수층에 대한 수리상수 추정과 해석 Parameters Estimation and Analysis for Leaky Aquifer System

김민환(Min - Hwan Kim)*

요 약 : 본 연구에서 고려한 누수대수층 구조는 상부의 자유면대수층과 하부의 피압대수층으로 구성되어 있으며 이들 사이에 누수층(leaky layer)이 있다. 상부 지하수 수위의 하강에 따른 피해 방지와 효율적인 지하수 관리를 위해서 상부와 하부의 지하수 수두 변화가 동시에 파악되어야 한다. 누수대수층 구조의 피압대수층(하부)에서 양수를 할 때 자유면대수층(상부)은 하부와 상부 대수층을 구분하는 누수층의 영향을 받게 된다. 누수층을 해석하기 위해서 이 층에 대한 수리상수의 결정이 필요하다. 본 논문에서 수리상수를 결정하기 위한 개선된 SM(slope-matching)방법을 제시하였다. 그리고 누수대수층 구조에서 상부와 하부의 지하수 수두를 예측하기 위해 유한차분법을 이용하여 수치모형을 구성하였다. 수치모형의 검증에 위해 1차원 누수대수층 구조에 대한 해석해를 이용하여 정상류 상태에서 수두를 비교하였다. 그 결과는 잘 일치하고 있으며 2차원 누수대수층의 하부층인 피압대수층에서 양수를 할 때 상부 대수층과 하부 대수층에서 지하수 수두의 거동을 고찰하였다.

Abstract : Leaky aquifer (two-aquifer) system in this study consist of an upper unconfined and a lower confined aquifer with a leaky layer between them. It is assumed that water is withdrawn from the confined aquifer of the aquifer system, the upper unconfined aquifer will be affected by the leaky aquifer separating the upper and lower aquifers. In order to analyze the leaky aquifer, the determination of hydraulic parameters is needed. In this paper, hydraulic parameters are suggested by improved SM (slope-matching) method. To know variation of groundwater head in leaky aquifer systems, an numerical scheme is made using the finite difference method. To verify the numerical scheme, its solution is compared to analytical one. The solution of them agrees well in one-dimensional system at steady-state condition. And heads of groundwater are computed upper and lower aquifer in two-dimensional system.

서 론

자연수위가 지표면 부근에 위치해 있다면 자유면대수층으로부터의 양수는 인근의 물수지에 원하지 않는 큰 영향을 미칠 수 있다. 과도한 양수를 하는 경우에 지하수 수면이 강하되므로써 인근의 물공급은 심각하게 저해될 것이다. 동시에 그 지역의 생태계뿐만 아니라 경제에도 악영향을 미칠 것이다. 피압대수층으로부터의 양수는 통상적으로 악영향을 감소시킬 수 있지만 그 정도는 자유면대수층과 피압대수층 사이의 누수층의 수리상수에 달려있다. 물을 오직 피압대수층으로부터 양수한다고 할 지라도 낮아지는 상부지하수 수위의 악영향을 완전히 제거시킬 수는 없다. 효과적인 물관리를 위해 자유면대수층에서 지하수 수면을 일정한 수위이하로 하강되지 않도록 하기 위하여 현장 우물의 운영을 최적화해야 한다. 이 수위의 선택은 생물학적, 생태학적 요인 외에 또 다른 여러 요인을 고려해야 하며 수문학자, 생태학자, 그리고 토질공학자와의 상호협회가 필요하다. 대

부분 지하수의 문제를 다루기 위해 대수층을 피압대수층과 자유면대수층으로 분류하여 지하수를 해석해 왔다. 그리고 양질의 지하수를 얻기 위해 피압대수층으로부터 양수하려고 노력해 왔다. 그러나 자연상태에서 완전한 피압대수층으로 이루어진 대수층은 거의 없는 실정이며 이 층위에 누수층을 고려하여 해석해야 적절한 경우가 많다. 이와 같은 누수대수층에 대한 해석을 통해서 누수층이 상부와 하부 지하수의 수두의 변화에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 이를 위해 누수층의 수리상수를 파악하는 일이 중요하다. 누수대수층의 수리상수로는 저류계수, 투수량계수, 누수계수이다. 이상과 같은 과정을 통해서 얻어진 수리상수는 누수대수층으로 이루어진 지하수의 최적 운영과 관리를 위해 필수적이다.

이 논문에서는 양수시험 자료에 의해 대수층의 수리상수를 결정하기 위한 개선된 기법에 대해 논의하고 검증한다. 또한 상부 대수층과 하부 대수층, 그리고 누수층 사이의 상호 관계를 고찰하기 위해 수립된 지배방정식을 이용하여 수치모형을 구성하고 이 모형의 검증을 위해 간단한 예를 들어 해석해와 비교한 후에 2차원으로 확장하여 상부 대수층과 하부 대수층의 수두를 고찰한다.

*호남대학교 토목공학과(Department of Civil Engineering, Honam University, Kwangju 506-714, Korea)

누수대수층의 지배방정식과 해

신뢰할만한 지하수 관리를 위해 물리적 현상과 수문학적, 지질학적 조건뿐만 아니라 지하수 유역에서 이들 상호작용에 대한 모의실험이 필요하다. 누수대수층에 대한 구조는 Figure 1에 나타냈으며 이에 대한 지배방정식과 해석해와 수치해를 기술한다.

지배방정식

Figure 1에서와 같이 누수층을 통과하는 누수항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_L = k_L \frac{\bar{h} - h}{b} = \sigma_s(\bar{h} - h) \quad (1)$$

여기서 q_L =단위면적당 누수율 [$L^3/T/L^2$]

$\sigma_s = k_L/b$ =누수계수 [T^{-1}]

k_L =누수층의 투수계수(hydraulic conductivity) [L/T]

b =누수층의 두께 [L]

\bar{h} =상부 대수층의 수두 [L]

h =하부 대수층의 수두 [L]

상부 대수층은 자유면대수층이므로 2차원의 비선형 지배방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_u(\bar{h} - H) \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_u(\bar{h} - H) \frac{\partial \bar{h}}{\partial y} \right] + \sigma_s(\bar{h} - h) + \sum q_u = S_u \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \quad (2)$$

여기서 $H(=B+b)$ 는 누수층의 상부 높이(Figure 1 참고)이다. 하부 대수층은 피압대수층이므로 이에 대한 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[T_l \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[T_l \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \sigma_s(\bar{h} - h) + \sum q_L = S_l \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

여기서 k_u =상부 대수층의 투수계수 [L/T]

S_u =상부 대수층의 저류계수(storage coefficient or storativity) [dimensionless]

S_l =하부 대수층의 저류계수 [dimensionless]

$\sum q_u$ =단위 면적당 상부 대수층의 유입과 유출(sink and

source, 침투 혹은 역침투) [L/T]

$\sum q_L$ =단위 면적당 하부 대수층의 유입과 유출(sink and source, 침투 혹은 역침투) [L/T]

$T_l = k_l B$ =하부 대수층의 투수량계수 [L^2/T]

B =하부 대수층의 두께

식 (2)에서 $k_u(\bar{h} - H)$ 항은 변화가 가능한 전달계수로서 다음과 같이 바꾼다.

$$T_u = k_u(\bar{h} - H) \quad (4)$$

식 (2)에서 저류계수도 다음과 같이 변화가 가능하다.

$$S_u = (\bar{h} - H) S_u^s + S_u \quad (5)$$

여기서 S_u^s 는 상부 대수층의 비저류율(specific storage)이다. 상부 대수층의 저류계수(storativity)는 특정한 시간 간격에 대해 일정한 값으로 근사화할 수 있다. 자유면대수층에서 물은 토양의 공극을 통해서 대부분 배수되기 때문에 상부 대수층의 저류계수 S_u 는 토양의 공극율로 근사화할 수 있다. 그러므로 식 (5)에서 $(\bar{h} - H) S_u^s$ 항을 무시할 수 있다. 저류계수는 비산출률(specific yield)과 거의 비슷한데 공극율 보다 약간 적다.

해석해

누수대수층 구조에 대해 정상류 상태에서 1차원 흐름의 해석해를 구한다. 초기에 상부 대수층과 하부 대수층의 수두는 일치한다고 가정하였다. 하부 대수층에서 양수함으로써 누수층 때문에 상부 대수층과 하부 대수층의 수두에 차가 발생한다. 누수층에서 흐름은 오직 이 층의 연직 방향에 대해서만 고려하고 피압대수층인 하부에서 흐름은 방사상의 수평 흐름만 고려한다. 상부 대수층과 하부 대수층 사이의 누수항은 식 (1)에 나타냈으며 누수대수층에 대한 1차원 지배방정식을 원주좌표(cylindrical coordinate)로 나타내면 다음과 같다.

$$k_l \frac{d^2 h}{dr^2} + k_l B \frac{1}{r} \frac{dh}{dr} + k_L \frac{\bar{h} - h}{b} = 0 \quad (6)$$

수두강하량 s 는 $s = \bar{h} - h$ 이므로 식 (6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Gupta, 1989).

$$- \frac{d^2 s}{dr^2} - \frac{1}{r} \frac{ds}{dr} + \frac{k_L}{k_l B b} s = 0 \quad (7)$$

또는,

$$\frac{d^2 s}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{ds}{dr} - \frac{s}{F^2} = 0 \quad (8)$$

여기서 F 는 누수계수(leakage factor)이며 다음과 같이 정의된다.

$$F = \sqrt{k_l B / (k_L / b)} \quad (9)$$

식 (8)의 일반해는 다음과 같다.

$$s = C_1 K_0 \left(\frac{r}{F} \right) + C_2 I_0 \left(\frac{r}{F} \right) [L] \quad (10)$$

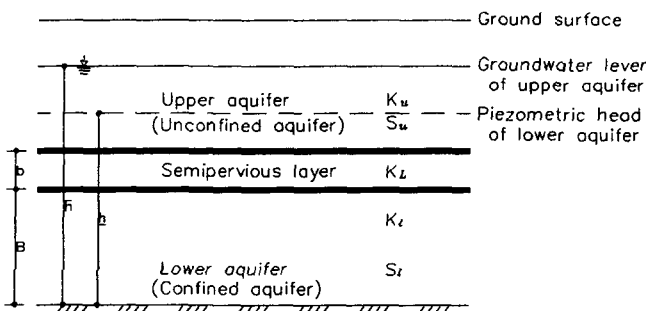


Figure 1. Schematic diagram of leaky aquifer system.

여기서, $I_0(r/F)$ =제 1종 0차 수정 벡셀함수

$K_0(r/F)$ =제 2종 0차 수정 벡셀함수

C_1, C_2 =적분상수(경계조건에 의해 결정)

무한한 대수층에 대한 경계조건은 $r=\infty$ 이면 $s=0$, $r=r_w$ 이면 $r(ds/dr)=-Q/2\pi T_l$ 이다. 이를 적용하여 수두강하량을 구하면 다음과 같다(Gupta, 1989).

$$s = \frac{Q}{2\pi T_l} K_0\left(\frac{r}{F}\right) \quad (11)$$

여기서 $K_0(r/F)$ 의 값은 r/F 값에 따라 수정 벡셀함수표를 이용하면 된다.

수치해

지하수의 거동을 해석하기 위해 수치실험을 수행하였다. 수치실험을 위해서 유한차분법을 사용하였다. 즉, 연속적인 해의 영역이 사각형 망으로 이루어졌다. 대수층에서 수두의 균일화와 두 대수층 사이의 물교환은 누수대수층 원리에 의해 모의실험하였다.

상부와 하부 대수층의 지배방정식에 대한 수치모형을 구성하기 위해 유한차분법을 이용하였다. 유한차분법에서 격자의 간격은 각각 $\Delta x=\Delta y=a$ 로 하였다. 유한차분법은 시간 간격에 대해 안정된 음해법(김민환, 1995)을 적용하고 가중치 $\alpha=1/2$ 을 사용하여 Crank-Nicolson식을 이용하였다. 이를 식 (2)와 (3)에 적용하여 수치모형을 구성하면 다음과 같다.

상부 대수층:

$$\begin{aligned} \bar{h}_{ij}^{n+1} = & \frac{1}{[(a^2 S_u/4T_u \Delta t) + \alpha]} \left[\alpha \bar{h}_{ij}^{n+1} + \frac{a^2 S_u}{4T_u \Delta t} \bar{h}_{ij}^n + (1-\alpha)(\bar{h}_{ij}^n - \bar{h}_{ij}^n) \right. \\ & \left. + \frac{\alpha_s a^2}{4T_u} (\bar{h}_{ij}^n - \bar{h}_{ij}^n) + \frac{a^2}{4T_u} \sum q_u \right] \quad (12) \end{aligned}$$

하부 대수층:

$$\begin{aligned} \underline{h}_{ij}^{n+1} = & \frac{1}{[(a^2 S_l/4T_l \Delta t) + \alpha]} \left[\alpha \underline{h}_{ij}^{n+1} + \frac{a^2 S_l}{4T_l \Delta t} \underline{h}_{ij}^n + (1-\alpha)(\underline{h}_{ij}^n - \underline{h}_{ij}^n) \right. \\ & \left. + \frac{\alpha_s a^2}{4T_l} (\bar{h}_{ij}^n - \underline{h}_{ij}^n) + \frac{a^2}{4T_l} \sum q_l \right] \quad (13) \end{aligned}$$

여기서 T_u 는 상부 대수층의 투수량계수 [L^2/T], n 은 시간을 나타내는 지수이고, \bar{h}_{ij}^{n+1} 은 절점(i, j)에 대한 주변의 4절점을 평균 수두로 표시한 것이다. 즉,

$$\bar{h}_{ij}^{n+1} = \frac{\bar{h}_{i-1,j}^{n+1} + \bar{h}_{i+1,j}^{n+1} + \bar{h}_{i,j-1}^{n+1} + \bar{h}_{i,j+1}^{n+1}}{4}$$

식 (12)과 (13)을 이용해서 상부와 하부 대수층의 수두를 결정한다.

누수대수층의 수리상수 결정

누수대수층의 수리상수를 결정하기 위해 여러 가지 방법이

제시되었으나 김민환(1997)에 의하면 제변수 값을 결정하는데 자동화가 가능하고 대수층의 물리적 특성이 반영된 SM 방법을 추천한 바 있으며 이후에 이 방법을 토대로 자동화한 결과를 제시하였다. 이 방법에 대해 간단히 기술하면 다음과 같다.

피압대수층의 위에서나 아래에서 누수층을 통해 상당한 수리경사하에서 대수층 내로 물이 누수된다. 대수층의 두께가 일정한 누수대수층에 대한 부정류상태의 지하수 흐름방정식을 원통좌표로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} - \left(\frac{s}{F^2}\right) = \frac{S_l}{T_l} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (14)$$

여기서 s 는 수두강하량이다. 식 (14)에 대한 해는 Hantush (Sen, 1986)에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$s = \frac{Q}{4\pi T_l} \left[2K_0\left(\frac{r}{F}\right) - W(q) \right] \quad (15)$$

여기서 $K_0(r/F)$ 는 2종 0차(second kind and zero order)인 수정 벡셀함수이다. 그리고 q 는 다음과 같다.

$$q = \frac{T_l t}{S_l F^2} = \frac{r^2}{4F^2} \frac{1}{u} \quad (16)$$

여기서 u 는 비평형 방정식에 대한 Theis 해에서 우물함수 인자이다. 이 식은 Hantush에 의해 증명된 바와 같이 $q > 2r/F$ 이면 근사적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s_m - s = \frac{Q}{4\pi T_l} W(q) \quad (17)$$

여기서 s_m 은 최대수두강하량이다. 이에 대한 해는 다음과 같다.

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T_l} K_0\left(\frac{r}{F}\right) \quad (18)$$

최대수두강하량은 현장의 자료를 이용하여 외삽법(Sen, 1986)을 이용하거나 Mukhopadhyay(1988) 방법을 이용하여 얻을 수 있다.

식 (17)의 $W(q)$ 와 q 의 관계는 Theis 방법의 $W(u)$ 와 u 의 도식적인 관계와 일치한다. 관계곡선의 경사 α_1 는 다음과 같다.

$$\alpha_1 = -\frac{e^{-q}}{W(q)} \quad (19)$$

이 식을 이용하여 새로운 우물함수 인자 q 를 구할 수 있다. 즉, 양수시험 자료에서 연속적인 두 점사이의 경사는 다음과 같다.

$$\alpha_{1i} = \frac{\text{Ln}[(s_m - s_i)/(s_m - s_{i+1})]}{\text{Ln}(t_{i+1}/t_i)} \quad (20)$$

이 경사에 해당하는 q 값을 식 (19)에 의해 구한 후, 식 (17)에 의해 투수량계수 T_l 을 구한다. 그리고 식 (18)에 의해 벡셀함수표에 의해 인자를 구하면 누수계수 F 를 구할 수 있다. 이 둘 값과 식 (16)을 이용해 저류계수 S_l 을 구할 수 있다. 이 과정이 그

Table 1. Pumping test data for leaky aquifer (Sen, 1986)

Time (day)	.243E-01	.306E-01	.375E-01	.468E-01	.674E-01	.896E-01
Drawdown(m)	.069	.077	.083	.091	.100	.109
Time (day)	.125E+00	.167E+00	.208E+00	.250E+00	.292E+00	.333E+00
Drawdown(m)	.120	.129	.136	.141	.142	.143

Table 2. Evaluated hydraulic parameters by improved slope-matching method

Time (day)	Drawdown (m)	Drawdown diff.	Slope	q	W (q)	Transmissivity (m ² /day)	K ₀ (r/F)	r/F	F (m)	Storativity
.243E-01	.069	.089	.411	.603E-01	.229E+01	1568.	2.039	.149	605.2	.173E-02
.306E-01	.077	.081	.381	.482E-01	.250E+01	1882.	2.447	.098	918.5	.141E-02
.375E-01	.083	.075	.513	.108E+00	.175E+01	1422.	1.850	.181	497.9	.198E-02
.468E-01	.091	.067	.399	.552E-01	.237E+01	2162.	2.811	.068	1326.8	.104E-02
.674E-01	.100	.058	.598	.156E+00	.143E+01	1507.	1.960	.161	558.3	.209E-02
.896E-01	.109	.049	.772	.268E+00	.990E+00	1236.	1.608	.233	386.2	.277E-02
.125E+00	.120	.038	.947	.394E+00	.712E+00	1149.	1.494	.263	342.2	.311E-02
.167E+00	.129	.029	1.283	.662E+00	.402E+00	854.	1.111	.402	224.2	.429E-02
.208E+00	.136	.022	1.438	.791E+00	.315E+00	887.	1.154	.382	235.5	.421E-02
.250E+00	.141	.017	.402	.567E-00	.235E+01	-	-	-	-	-
.292E+00	.142	.016	.507	.106E+00	.177E+01	-	-	-	-	-
.333E+00	.143									
average						1407.			566.1	.252E-02

다음 시간 단계에 대해 수행을 하면 매시간 단계에 대한 수리상수를 결정할 수 있다. 식 (19)에서 q 값의 산정을 위해 Sen (1986)은 수정우물함수(W(q))표를 이용하여 선형보간법에 의해 구했으나 본 논문에서는 Lagrange의 n차 보간공식을 이용하였다. 그리고 식 (18)에서 벡셀함수의 인자를 구하기 위해 벡셀함수표를 이용하는 대신에 Newton-Raphson 방법을 이용하여 수리상수를 결정하는데 자동화하였다. 또한 최대수두강하량을 결정하는데 기존의 외삽법을 이용하지 않고 Mukhopadhyay (1988) 방법을 이용함으로써 누수대수층에서 수리상수를 결정하는데 완전한 자동화를 구축하였다.

수치실험

누수대수층에 대한 해석을 위해 수치모형의 구성과 수리상수를 결정하는 개선된 SM 방법을 앞장에서 제시하였다. 개선된 SM 방법을 이용하여 수리상수를 결정하기 위해 Dalem(Gupta, 1985)의 양수시험 자료를 이용하였다. 그리고 누수대수층에 대한 수치모형의 검증에 위해 단순화된 누수대수층의 문제를 구성하고 이에 대해 해석해와 수치해의 결과를 비교하였다. 또한 이를 2차원 문제로 확장하여 수행하였다.

개선된 SM 방법의 적용

개선된 SM 방법의 효율성을 검증하기 위해 Dalem의 양수시험자료(Table 1)를 이용하여 수행하였다. 우물에서 관측지점까지의 거리는 90 m이고 양수량은 761 m³/day이다. 최대수두강하량은 Sen(1986)의 논문에서 외삽법을 이용하여 0.147 m로 추정하였다. 그러나 본 논문에서는 이를 자동화하기 위해 Mukhopadhyay(1988) 방법을 사용하여 0.157 m로 결정하였다. 이

값을 이용하여 수리상수를 매시간 단계에 대해서 평가한 결과를 Table 2에 제시하였다. 벡셀함수 인자(r/F)가 2보다 큰 경우는 대수층에서 지질 수문학적인 상황에서 기대되지 않는 값이므로 수리상수를 평가하는데 있어서 이와 같은 자료를 제외하였다. Dalem의 양수시험 자료를 이용하여 수리상수를 구하는 방법은 여러 가지가 이전에 제시되었다. 이들을 비교하기 위해 Table 3에 제시하였다. 이 결과, 투수량계수와 저류계수의 값이 다른 방법과 거의 비슷하게 평가되었다. 즉, 개선된 SM 방법은 양수시험 자료만을 입력하면 최대수두강하량과 수리상수를 자동적으로 구하는데 사용될 수 있는 효율적인 방법이라고 판단된다.

누수대수층의 수두 거동 해석

앞장에서 구성된 수치모형을 검증하기 위해 제시된 예제가 없기 때문에 하부 대수층에서 양수할 때 상부 대수층의 영향을 고려하여 예제를 구성하였다. 실제 현장에서 가능한 예제라고 간주하기는 무리일 수도 있지만 본 연구에서는 하부 대수층에

Table 3. Hydraulic parameters estimated by various methods

방 법	반경 (m)	s _m (m)	저류계수	투수량계수 (m ² /day)	누수계수 (m)
Gupta(1989)	50	0.187	-	2072	1000
Amitabha(1989)		0.157	1.7×10 ⁻³	1665	600
SM(Sen, 1986)		0.147	2.4×10 ⁻³	1576	505
Pittenger(1997)	90	0.147	2.3×10 ⁻³	1609	521
NNA(Rashid, 1986)		-	1.8×10 ⁻³	1698	698
개선된 SM		0.157	2.5×10 ⁻³	1407	566

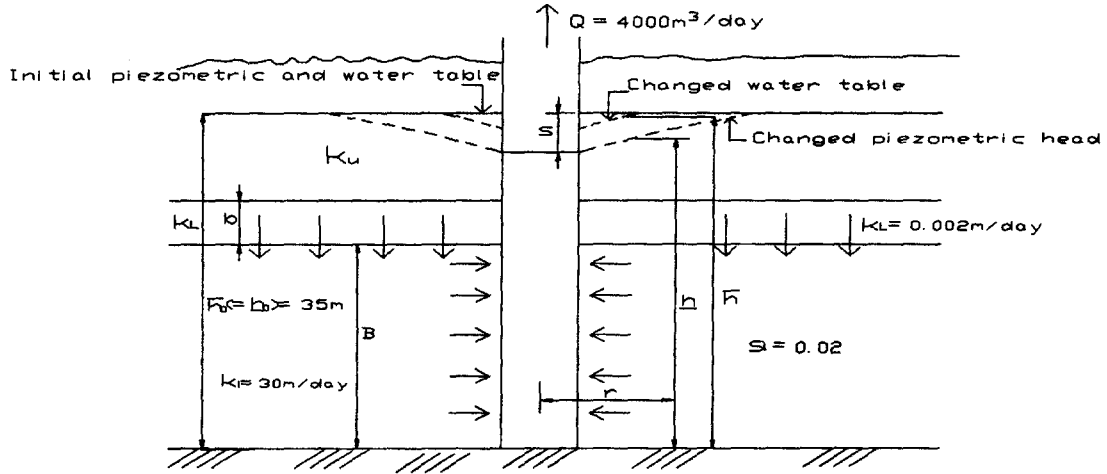


Figure 2. Example of leaky aquifer system.

서 양수하는 경우에 상부 대수층의 수두가 영향을 받는 수리상수를 고려하였다. Figure 2와 같이 누수대수층의 상부 대수층에서 투수계수 $k_u=50$ m/day, 저류계수 $S_u=0.2$, 하부 대수층에서 투수계수 $k_l=30$ m/day, 저류계수 $S_l=0.02$, 누수층에서 투수계수 $k_L=0.002$ m/day 이다. 그리고 하부피압대수층의 두께는 $B=20$ m, 누수층의 두께는 $b=2$ m이다. 상부 대수층인 자유면대수층의 수위와 하부 대수층인 피압대수층의 수두는 초기에 동일하며 초기 수두는 35 m이다. 각 대수층의 두께에 대해서는 Figure 2에 나타나 있다. 이 대수층은 우물을 중심으로 무한히 넓은 것으로 가정하였다. 하부 대수층에서 유량 $Q=4000$ m³/day로 양수할 때 정상상태에서 피압대수층의 수두를 해석해와 수치해를 비교해 보면 Figure 3과 같다. 수치해의 경우에 정상상태는 전단계와 현단계의 수두차가 0.01 m보다 작을 때를 수렴기준으로 하였다. 즉 정상상태로 간주된 시간은 23.12 day이다. 해석하는 식 (11)에 의해 계산되었다. 그림에서 보는 바와 같이 수두는 약간의 차이를 보이고 있으나 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 정상상태에서 수렴한 것을 보다 작게 하면 거의 일치한다. 이 때 수치해를 이용해서 상부 대수층의 지하수 수위를 동시에 계산할 수 있다. 그러나 해석해에 의한 상부 대수층 수위

의 계산은 불가능하다. 수두가 우물에 대해 대칭이므로 우물을 중심으로 1/2만 나타냈다. 2차원의 경우를 Figure 4에 제시하였다.

Figure 4(a)는 상부 대수층인 자유면대수층의 수두를 나타내고 있는데 우물부근에서 수위가 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이것으로부터 피압대수층의 수위가 누수층의 영향을 받고 있음을 알 수 있으며 누수층의 누수계수에 따라 그 양은 증감할

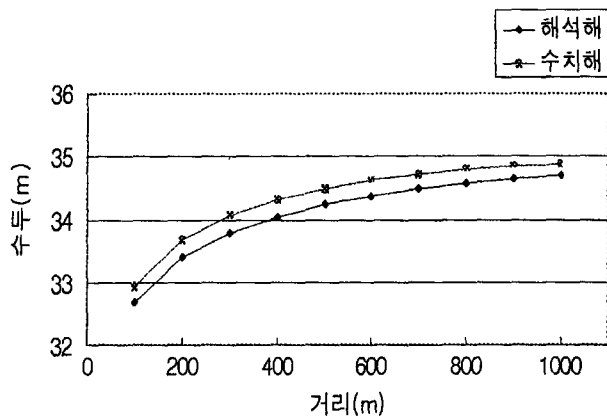
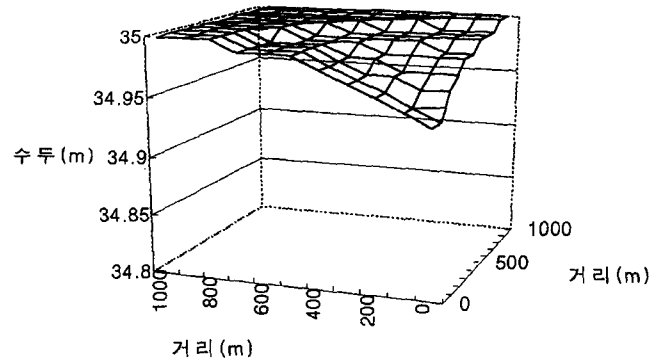
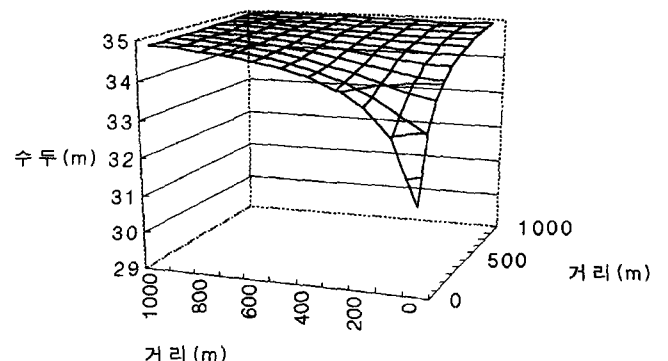


Figure 3. Comparison between analytical and numerical solutions (1-dimensional steady-state condition).



(a) Upper aquifer



(b) Lower aquifer

Figure 4. Groundwater head in leaky aquifer system (2-dimensional steady-state condition).

것이다. 이와 같이 누수층을 중심으로 상부와 하부 대수층이 구분되는 누수대수층 구조에서는 누수층으로 인한 영향을 반드시 고려해야함을 알 수 있다.

결 론

대수층은 실제로 피압대수층이나 자유면대수층으로만 이루어진 경우는 흔하지 않고 이들이 복합적으로 이루어진 누수대수층 구조로 해석해야 적절한 경우가 있다. 누수대수층을 해석하기 위해 우선 대수층의 수리상수의 평가가 선행되어야 한다. 이를 위해 대수층의 물리적 특성이 반영된 SM방법을 개선하였다. 이 방법은 자동화가 가능하며 다른 여러 방법과 비교해 본 결과, 거의 비슷한 값을 알 수 있었다.

그리고 누수대수층에 대한 지배방정식의 해를 구하기 위해 유한차분법을 이용하여 수치 모형을 구성하였다. 이 모형의 검증을 위해 1차원에 대한 해석해와 수치해를 비교한 결과, 거의 비슷한 값을 얻었으며 하부의 대수층인 피압대수층에서 양수하는 경우에 상부 대수층의 수위가 누수층의 영향으로 다소 하강함을 알 수 있었다. 이를 토대로 누수대수층 구조를 2차원으로 확장하여 상부와 하부 대수층 수두의 거동을 살펴보았다. 대수층이 누수대수층 구조를 이루고 있을 때, 누수층에 의해서 상부 대수층의 수위가 영향을 받으며 따라서 상부 대수층의 지하수 수위의 변동이 일어난다. 지하수의 효율적인 관리와 상부 대수층의 지하수 수위 강하로 인한 피해를 방지하기 위해 누수대수

층 구조에서 상부와 하부 대수층 수두의 거동이 동시에 고려되어야 한다.

참고문헌

- 김민환, 1997, 대수층의 수리상수 결정에 관한 여러 가지 방법의 비교, 대한지하수환경학회지, 4(3), p. 153-160.
- 김민환, 이 재형, 1995, 지하수 모형, 도서출판 새론, p. 68-91.
- Mukhopadhyay, A., 1988, Automated computation of parameters for leaky confined aquifers, *Groundwater*, 26(4), p. 500-504.
- Bear, J., 1979, *Hydraulics of groundwater*, McGraw Hill, p. 107-109.
- Gupta, R. S., 1989, *Hydrology and hydraulic systems*, Prentice Hall, p. 174-177.
- Pittenger, Robert and Reichard, J.S., 1996, Computer Determination of aquifer parameters using slope matching, *Groundwater*, 35(3), p. 546-550.
- Rashid, A. A. and Wong, K.-F. V., 1992, A Neural-network approach to the determination of aquifer parameters, *Groundwater*, 30(2), p. 164-166.
- Raudkivi, A. J., 1976, *Analysis of groundwater flow*, Edward Arnold, p. 141-152.
- Sen, Z., 1986, Determination of aquifer parameters by the slope-matching method, *Groundwater*, 24(2), p. 217-223.