

개선된 SM(Slope-Matching) 방법에 의한 대수층의 특성변수 결정

김민환·오종민·전일권*

호남대학교 토목환경공학과, * 담양대학 토목공학과

Determination of Aquifer Parameters by the Improved Slope-Matching Method

Minhwan Kim · Joungmin Oh · Irkweon Ceon*

Department of Civil Engineering, Honam University

** Department of Civil Engineering, Damyang College*

ABSTRACT

With the development of industry and standard of living, the quantity of groundwater consumption has been increasing. For the analysis of groundwater, to determine the hydraulic parameters of aquifer is very important. Various numerical methods have been developed to solve aquifer tests and eliminate the subjectivity of traditional graphical type curve methods. The slope-matching method, which matches the slope of the Theis type curve to the slope of the field data, can be used to numerically solve pump tests for both leaky and nonleaky aquifers. A FORTRAN program on based slope-matching method was developed to obtain the transmissivity, storage coefficient, and leaky factor from pumping test data automatically. Results derived from published data show that the improved slope-matching method gives parameters close to the ones derived by the slope-matching method.

Key words : aquifer, transmissivity, storage coefficient, leaky factor

요약문

산업과 생활수준의 발달로 지하수 사용량은 증가되어 가고 있다. 지하수 해석을 위해서 대수층의 특성변수의

결정은 매우 중요하다. 대수층의 해석과 고전적인 도식적 방법의 주관성을 제거하기 위해 여러 가지 수치방법이 개발되어 왔다. Theis의 관계곡선과 현장 자료를 토대로 유도된 SM방법이 누수대수층과 비누수대수층에 대한 해석을 위해 사용되어 왔다. 본 논문에서는 SM방법을 토대로 전달계수, 저류계수, 누수계수를 결정하기 위한 자동화된 포트란 프로그램을 개발하여 제시하였다. 기존의 양수시험 자료를 토대로 개선된 SM방법의 결과는 기존의 SM방법의 결과와 거의 일치하고 있다.

주제어 : 대수층, 전달계수, 저류계수, 누수계수

1. 서론

지하수의 관리와 운영을 위해서 신속하고 가능한 한 정확하게 대수층의 특성변수를 평가하는 기법이 필수적이다. 양수시험에 의해 얻은 시험 자료를 이용하여 특성변수를 결정하기 위한 해석적인 방법은 다양하다¹⁻⁷. 평가해야 할 특성변수로는 투수계수와 저류계수이며 누수대수층인 경우에는 누수계수가 추가된다. 양수시험 자료에 의해서 특성변수를 평가하는 방법은 여러 가지가 있으나 Sen³에 의해 제안된 Slope-Matching 방법은 다음과 같은 장점이 있다. (1) 대수층의 물리적 성질이 반영되어 있다. (2) 누수대수층이나 비누수대수층의 해를 구할 수 있다. (3) 비누수대수층일 때 양수기간이 짧아도 된다. (4) 하나의 관측정으로도 가능하다. 이러한 장점을 갖고 있기 때문에 다른 여러 가지 방법 보다 양호한 기법이다. 그러나 이 방법은 다음과 같은 단점을 갖고 있다. (1) 2중 로그 용지에 그려진 관계곡선(type curve)에서 임의의 점에 대한 경사값을 읽어야 한다는 것이다. 즉, 수동적이며 오차가 발생할 수 있다. (2) Sen이 제안한 방법은 정상상태에서 최대 수두강하량의 값이 필요하다. 누수대수층에서 벡셀함수를 이용하여 누수계수를 결정할 때 사용된다. 벡셀함수표를 이용하기 때문에 역시 수동적이며 번거롭고 오차가 발생할 수 있다. (3) (2)번 단계에서 최대 수두강하량값이 없는 경우에 이 값을 근사적으로 구하기 위해 양수시험 결과를 그래프 용지에 그려, 외삽하여 결정하기 때문에 번거롭고 주관적일 수 있다.

본 논문에서는 비누수대수층과 누수대수층에 대한 통합된 특성변수의 결정에 관한 것으로 누수대수층에

대한 결과만의 일부가 기존에 발표된 논문⁸에 이용되었음을 밝혀둔다. 본 논문에서는 그 과정을 구체적으로 기술하고 보완하였으며 Sen³의 결과와도 구체적으로 매시간 단계별로 특성변수의 값을 비교하여 제시하였다. 이를 위해 Sen이 제안한 SM 방법의 장점을 살리고 단점을 보완하여 비누수대수층과 누수대수층에 대한 특성변수를 양수시험 자료에 의해 자동으로, 신속하며 보다 정확하게 결정하는 방법을 제시하였다.

2. 문제의 구성과 도식해

비누수대수층에 대한 특성변수를 결정하기 위한 선구적인 방법은 지하수 흐름과 열전도간의 유사성을 이용한 Theis² 비평형 방정식이 있다. 그리고 누수대수층에 대한 특성변수를 결정하기 위한 방법은 Hantush와 Jacob⁹에 의해 제시되었다. Theis², 그리고 Hantush와 Jacob⁹에 의해 제시된 방법은 주관적일 수 있으며 많은 시간이 소요되기 때문에 여러 학자들^{4, 5, 6, 8, 10, 11, 12}에 의해서 간략 해법이 제안되었다. Pittenger 등¹³은 SM방법을 토대로 Theis의 우물함수와 벡셀함수 값에 대해 추측-보정(Guess-and-correct)의 반복법을 사용하여 필요한 값을 구하였으며 최대수두강하량 값은 Sen³의 논문에 제시된 값을 사용함으로써 완전한 자동화 방법이라고 할 수 없다.

본 연구에서는 피압대수층에 한정하며 대수층을 비누수대수층과 누수대수층으로 구분하여 문제를 구성한다. 그러나 비피압대수층에서도 수위의 변동 성분이 대수층의 포화두께에 비례 작다면 수정없이 적용하여도 양호한 결과를 얻을 수 있다¹³.

2.1 비누수대수층(nonleaky aquifer)

완전관입정에서 양수량이 일정한 경우의 비누수대수층의 개념도를 Fig. 1(a)에 도시하였다. Dupuit-Forchheimer 가정하에 피압대수층에서 대단히 작은 우물로 향하는 방사형 지하수 흐름 방정식을 원통좌표로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 S = 저류계수; T = 전달계수; h = 수두; r = 우물로부터 거리; t = 시간이다. 이 식에 대한 고전적인 도식해가 Theis에 의해 제시되었다. 이 해는 Theis의 가정하에서 다음과 같다.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (2)$$

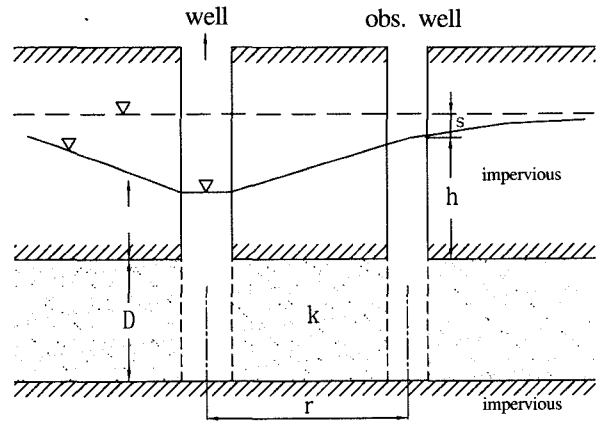
여기서,

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (3)$$

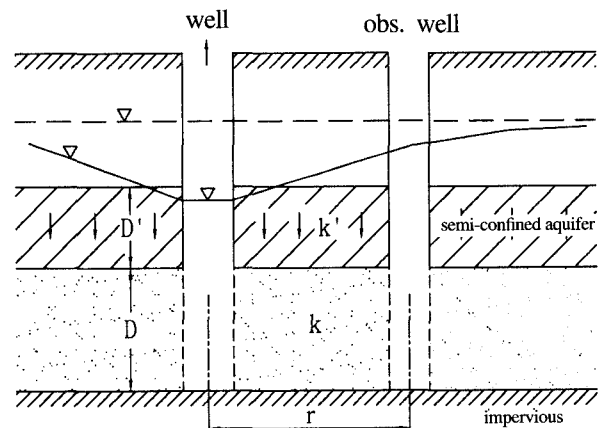
여기서, Q = 양수량; W(u) = 우물함수로서 지수적분 형태로 표시할 수 있으며 Taylor의 무한 급수 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} \dots \quad (4)$$

Theis의 비평형방정식은 이상적인 조건과 가정을 기초로 유도되었으며 실제 대수층의 조건들을 완전하게 반영되지 않았다. 식(1)과 (2)는 비선형이므로 해석적으로 구할 수 없으며 도식적인 방법을 이용한다. 이 방법을 이용하여 대수층의 특성변수를 구하기 위해서는 관계곡선(type curve)과 양수시험 곡선이 필요하다. 두 곡선으로부터 matching point를 찾아서 특성변수를 구하는 방법을 Theis의 도식적인 방법이라고 한다.



(a) Nonleaky aquifer



(b) Leaky aquifer

Fig. 1. Sketch of confined aquifer.

2.2 누수대수층(Leaky aquifer)

대부분의 피압대수층은 연직방향으로 유출량이 존재한다. 피압대수층의 위와 아래에 반투수 대수층(semipervious layers)으로 이루어진 경우에 상당한 수리경사하에서 대수층 내로 물이 누수된다. 이와 같은 누수대수층에 대한 개념도를 Fig. 1(b)에 도시하였다. 대수층의 두께가 일정한 누수대수층에 대한 지하수 흐름방정식을 원통좌표로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} - \left(\frac{h}{L^2}\right) = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

이 식에 대한 해석해는 Hantush³⁾에 의해서 수두강

하량(s)을 다음과 같이 제시하였다.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} [2K_0\left(\frac{r}{L}\right) - W(q)] \quad (6)$$

여기서 $K_0(r/L) = 2$ 종 0차 수정 벡셀 함수이고 L 은 누수계수이다. 그리고 q 는 다음과 같다.

$$q = \frac{Tt}{SL^2} = \frac{r^2}{4L^2} \frac{1}{u} \quad (7)$$

만일 $q > 2r/L$ 인 경우에 Hantush는 수두강하량을 다음과 같이 제시하였다.

$$s_m - s = \frac{Q}{4\pi T} W(q) \quad (8)$$

여기서 $s_m =$ 정상상태에서의 최대수두강하량이고 이에 대한 해석하는 다음과 같다.

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} K_0\left(\frac{r}{L}\right) \quad (9)$$

최대수두강하량은 양수시험 자료를 이용하여 외삽법에 의해 구할 수 있으며 양수시험 기간이 충분히 길어야 된다.

이상과 같이 비누수대수층과 누수대수층에 대한 도식해를 구하기 위한 기본식을 고찰하였다. 이들 해는 이상적인 조건과 가정하에서 유도되었다. 다른 도식적인 방법은 Chow 방법과 Cooper-Jacob 방법이 있는데 이들 방법은 비누수대수층에 대한 것이다³. 도식적인 방법은 개인의 주관적인 판단이 개입되어 오차가 야기된다. Amitabha⁶, Salleem¹⁴, Gupta와 Joshi⁴에 의하면 Theis방법을 기초로 하여 자동화를 시도하였으나 관계곡선에서 matching point를 자동적으로 찾아서 특성변수를 결정하거나 수학적 방법을 이용하여 자동화하는데 제약점, 수렴의 문제 등으로 일반화시킬 수 없었다.

3. SM방법과 그 방법의 개선

대수층의 특성변수 값을 결정하는 방법은 다양하다.

크게 대별하면 도해적인 방법과 수학적 방법으로 구분할 수 있다. 도해적인 방법은 주관적이기 쉽고 절차가 번거롭고 오차가 내포될 수 있다. 그리고 제안된 수학적 방법은 주어지는 초기값에 의해 수렴하거나 발산하는 경우가 발생한다¹⁵. 이와 같은 단점을 극복할 수 있는 방법이 SM방법이다. 본 장에서는 SM방법과 그 단점을 소개하고 개선된 SM방법에 대해 논의한다.

3.1 SM방법

Theis 비평형 방정식은 실제 자연상태와는 다른 이상적인 조건과 가정을 기초로 하여 유도된 것으로 대수층 조건들을 완전히 반영시킨 것이 아니다. 비균질성, 측정오차, 대수층의 시험기간 등과 다른 요소에 따라 특성 변수는 달라진다. Theis 방법에서 이들의 영향을 확인할 수 없다. 그러나 Sen이 제안한 SM 방법은 대수층의 특성변수를 매시간 결정하기 때문에 대수층의 물리적 특성이 반영된다는 장점을 갖고 있다. SM 방법을 비누수대수층과 누수대수층으로 구분하여 기술하면 다음과 같다³.

비누수대수층인 경우에 이중대수지상에 도식한 Theis 관계곡선상의 임의의 점에서 경사 α 는 다음과 같다.

$$\alpha = u \frac{d \ln W(u)}{du} \quad (10)$$

우물함수 $W(u)$ 의 도함수를 이용하여 식(10)을 다시 정리하여 나타내면 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{-(1-u + \frac{u^2}{2!} - \frac{u^3}{3!} + \frac{u^4}{4!} - \frac{u^5}{5!} + \dots)}{W(u)} \quad (11)$$

식(11)을 간단한 형태로 나타내면,

$$\alpha = -\frac{e^u}{W(u)} \quad (12)$$

그리고 양수시험 자료에서 연속적인 두 점간의 경사는 다음과 같다.

$$\alpha_i = \frac{\ln(s_{i+1}/s_i)}{\ln(t_{i+1}/t_i)} \quad (i=1,2,3,4,\dots,n-1) \quad (13)$$

양수시험 자료에서 임의의 두 점간의 경사 α_i 는 식 (13)을 사용하여 구한 후, 식(12)의 경사 α 와 일치할 때의 u 값을 읽는다. Sen은 식(13)에서 구한 α 에 해당하는 u 값을 읽을 수 있는 경사함수표를 제시하였다. SM 방법에서 대수층의 특성변수를 결정하는 과정은 Theis 관계곡선과 양수시험곡선과의 일치점을 찾지 않고 다음과 같은 단계를 거쳐서 결정한다.

(1) 두 번째 시간-강하량 측정 이후의 값에 대하여 식(13)을 사용하여 임의의 연속된 두 점간의 경사 $\alpha_i = \ln(s_i/s_{i-1})/\ln(t_i/t_{i-1})$ 를 계산한다.

(2) Theis의 경사함수표로부터 경사 α_i 에 해당하는 u 값(필요하면 보간한다)을 읽는다.

(3) 경사 α 와 u 값을 알면 식(12)를 변형한 다음식 으로부터 우물함수 값을 계산한다.

$$W_i(u) = \frac{e^{-u}}{\alpha_i} \quad (14)$$

(4) 식(2)와 (3)으로부터 T와 S값을 각각 계산한다.

(5) 다음의 시간-강하량에 대해 과정 1부터 반복한다.

이와 같은 과정에 의해 매시간 단계의 투수량계수와 저류계수를 구한 다음, 이를 평균하여 구한다. 그러나 매시간 단계의 투수량계수와 저류량계수 값의 변화에 관심을 갖어야 한다. 다시말하면 대수층의 물리적 성질을 무시한 불량한 값이 내포되어 있는지 검토해야 한다.

누수대수층에 대한 특성변수의 결정은 비누수대수층의 과정과 유사하다. 관계곡선의 경사 α_1 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_1 = - \frac{e^{-q}}{W(u)} \quad (15)$$

여기서 우물함수 $W(q)$ 는 비누수대수층의 $W(u)$ 의 u 대신에 q 값을 사용하면 된다. 그리고 양수시험 자료

에서 연속적인 두 점간의 경사 α_{ii} 는 다음과 같다.

$$\alpha_{ii} = \frac{\ln[(s_m - s_i)/(s_m - s_{i+1})]}{\ln(t_{i+1}/t_i)} \quad (i=1, 2, 3, \dots, n-1) \quad (16)$$

누수대수층에 대한 특성변수 결정하는 과정은 다음과 같다.

(1) 양수시험 자료로부터 최대수두강하량 s_m 을 외삽법으로 구한다.

(2) 두 번째 시간-강하량 측정의 값에 대해서 식 (16)을 이용하여 임의의 연속된 두 점간의 경사 α_{ii} 를 계산한다.

(3) Theis의 경사함수표로부터 α_{ii} 에 해당하는 q 값을 찾는다.

(4) 경사 α_{ii} 와 q 값을 알면 다음 식을 이용하여 우물함수 $W(q)$ 를 계산한다.

$$W_i(q) = - \frac{e^{-q}}{\alpha_{ii}} \quad (17)$$

(5) 식(8)을 이용하여 T값을 계산한다.

(6) 식(9)를 변형한 다음 식을 이용하여 벡셀함수 인자인 r/L 값을 Bessel 함수표로부터 찾은 후에 누수 계수 L 를 계산한다.

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

(7) 식(7)을 변형한 다음 식을 이용하여 저류계수 S 를 구한다.

$$S = \frac{Tt}{L^2} \frac{l}{q} \quad (19)$$

(8) 다음의 시간-강하량에 대해 과정 2부터 반복한다.

이와 같은 과정에 의해서 투수량계수 T , 저류계수 S , 누수계수 L 을 구한다. 경사 α_{ii} 는 최대수두강하량과 수두강하량의 차이 때문에 항상 양수이다.

3.2 SM방법의 단점과 개선된 SM방법

SM 방법에서 첫 번째 단점은 양수시험 자료에서 연속적인 두 점간의 경사 α 에 대한 u 값을 찾기 위해 선형보간 방법을 이용하였다. 매단계에서 수작업으로 보간하는 방법을 본 논문에서는 Lagrange의 n 차 보간공식을 이용하였다. $(n+1)$ 개의 자료 $(u_0, f(u_0)), (u_1, f(u_1)), \dots, (u_n, f(u_n))$ 이 주어졌을 때 이 점들을 통과하는 다항식은 n 차 Lagrange 성질을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_n(u) = -\sum_{i=0}^n \left[\prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{u - u_j}{u_i - u_j} \right] f(u_i) \quad (20)$$

이 식을 Lagrange의 n 차 보간식이라 하며 이 식을 이용하여 경사에 대한 u 값을 자동으로 결정한다.

두 번째 문제는 벡셀함수 인자($b=r/L$)를 구한 후 누수계수 L 를 결정하는데 식(9)로부터 벡셀함수 인자를 정확하게 직접 평가할 수 없다. 이를 해결하기 위해 Newton-Raphson 방법을 이용하는데 최대수두강하량값과 식(9)를 이용한다. 이 방법은 벡셀함수 $K_0(b)$ 가 미분 가능한 식일 때 매우 빠르게 근을 찾을 수 있다. 여기서 $K_0(b)$ 는 다음과 같다.

$$K_0(b) = [\ln(2) - \gamma] I_0(b) - I_0(b) \ln(b) + \frac{1}{4} b^2 + \dots \quad (21)$$

Newton-Raphson 방법에 의해 구한 인자는 다음과 같다.

$$b_{n+1} = b_n - \frac{K_0(b_n)}{K_0'(b_n)} \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad (22)$$

이와 같은 방법에 의해 벡셀함수 인자를 자동으로 구한 후에 누수계수 L 를 결정한다.

세 번째는 누수대수층에서 특성변수를 결정하기 위해 최대수두강하량 값이 필요하다. 이 값을 구하기 위해 정상상태가 이루어질 때까지 양수시험을 하거나 그 이전의 자료를 이용하여 그래프 용지에 양수시험 자료를 그려서 외삽하여 결정하였다. 본 논문에서는 양수시험 자료를 이용하여 자동으로 최대수두강하량 값을

결정하기 위해 Amitabha[®]가 제시한 수학적 방법을 적용시켰다. 이 방법은 최대수두강하량 값을 결정하기 위한 유일한 수학적 방법이라고 할 수 있다. Amitabha는 시간에 대한 수두강하량관계를 다음과 같이 제시하였다.

$$\log s = A_1 \log t + A_2 (\log t)^2 + A_3 \quad (23)$$

여기서 A_1, A_2, A_3 는 다항식 계수이다. 시간에 대한 수두강하량의 변화율은 식(23)을 미분하여 정리하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{ds}{dt} = \frac{s}{t} (A_1 + 2A_2 \log t) \quad (24)$$

정상상태에 도달한 시간(t_s)은 $ds/dt=0$ 이므로 식

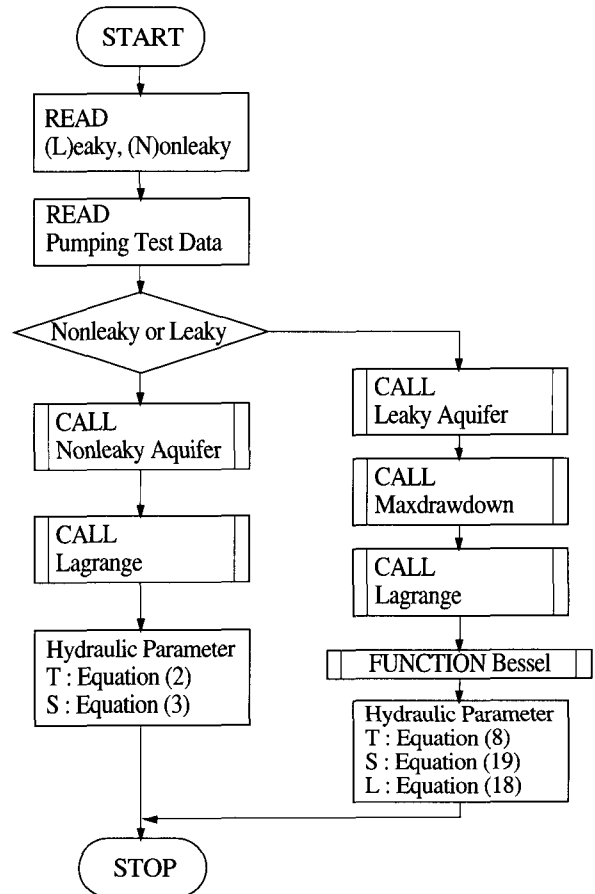


Fig. 2. Flow chart of improved SM method

(24)로 부터 구할 수 있다.

$$t_s = 10^{-4.124} \quad (25)$$

식 (25)를 식 (23)에 대입하면 정상상태의 최대수두강하량 s_m 을 구할 수 있다.

$$\log s_m = A_1 \log(t_s) + A_2(\log t_s)^2 + A_3 \quad (26)$$

식 (24)를 회귀분석하면 다항식의 계수를 구할 수 있으며 이 계수를 식 (26)에 대입하면 최대수두강하량 s_m 을 구할 수 있다.

이상과 같이 SM방법을 자동화하기 위한 기술적인

문제를 고찰하고 그 해결 방안을 제시하였다. 개선된 SM방법에 의해 특성변수를 결정하는 흐름도는 Fig. 2와 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 비누수대수층인가 누수대수층인가를 구분하여 양수시험자료를 입력하면 특성변수를 결정할 수 있다.

3.3 예제

본 절에서는 개선된 SM방법에 대해 검증한다. 개선된 SM방법은 비누수대수층과 누수대수층으로 구분하고 관측정이 한 개이상에 대해서도 가능하도록 하였다. 개선된 SM방법에 대한 검증을 위해 Todd¹⁵와 Dalem⁶의 자료를 이용하였다(Table 1, 2)

Todd의 자료는 비누수대수층에 대한 것이고 Dalem의 자료는 누수대수층에 대한 것이다. 이 자료들은 새로운 방법이 제시될 때마나 사용된 자료이다. 이 자료를 본 논문에서 제시된 개선된 SM방법에 적용해 본 결과를 Table 1과 2에 제시하였다. 이 논문에서 제시한 결과를 검증하기 위해 Sen의 SM방법과 비교하였다. 비누수대수층인 경우에 Table 1에 제시된 것처럼 개선된 SM방법과 기존의 SM방법의 결과는 거의 비슷하게 나타났다.

누수대수층인 경우에 대해서도 비교해 본 결과, 기존의 SM방법과 비슷한 결과를 나타내고 있다 그러나 누수계수 L 은 본 논문에서 구한 값이 Sen의 결과 보다도 다소 크게 나타났다. 이는 최대수두강하량 s_m 에 의해 영향을 받기 때문이다. Sen은 Kruseman와 Ridder¹⁶가 외삽하여 구한 $s_m = 0.147m$ 를 사용하였

고 본 논문에서는 Amitabha가 제시한 방법에 의해 구한 결과 $s_m = 0.157m$ 의 값을 이용하였다. Table 2를 보면 $i = 11, 12$ 에서 특성변수 값을 평가하지 않았다. 이는 누수대수층인 경우에 벡셀함수 인자 $b=r/L > 2$ 일 때 대수층에서 지질수문학적인 상황에서 기대되지 않은 값이므로 특성변수를 결정할 때 이러한 값은 제외되도록 하였다¹¹.

4. 결 론

양수시험자료만 입력하면 대수층의 특성변수를 자동적으로 결정되도록 개선된 SM방법을 제시하였다. 본 논문은 Sen의 SM방법을 기본으로 하고 있다. 개선된 SM방법과 Sen의 SM방법의 결과는 거의 일치함을 알 수 있었으며 두 방법에 대해 특성변수를 비교해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 대수층의 물리적 특성이 반영된 SM방법을 개선함으로써 완전한 자동화가 가능하도록 제시하였다.
- (2) Theis 관계곡선과 양수시험곡선을 이용하여 u 를 구할 때 도식적인 방법 대신에 본 논문에서는 Lagrange 보간법을 이용하여 보다 정확한 u 값을 계산하였으며 프로그래밍하였다.
- (3) Sen의 방법에서 제 2종 0차 벡셀함수 $K_0(b=r/L)$ 에서 b 값을 구할 때 벡셀함수표에 의해 보간하여 구하였으나 본 논문에서는 자동화하기 위해 Newton-Raphson 방법을 이용하여 보다 정확하게 평가하였다.
- (4) 최대수두강하량 값을 결정할 때 Sen은 도식적으로 외삽에 의해 결정하였으나 본 논문에서는 Amitabha가 제시한 방법을 사용하여 자동화하였다.

참 고 문 헌

1. Hantush, M.S., 1964, Hydraulics of Well, Advances in Hydrosiences, Academic Press, pp.281-432
2. Theis, C. V., 1935, The Relationship between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and

Table 1. Calculation results for nonleaky aquifer

Time (day)	Drawdown (m)	Slope	u	W(u)	Transmissivity (m ² /day)		Storativity	
					(1)	(2)*	(1)	(2)
.6960E-03	.201	-.7331E+00	.2415E+00	.1071E+01	1100.	1262.	.2053E-03	.158E-03
.1020E-02	.266	-.4101E+00	.5992E-01	.2297E+01	1781.	1636.	.1209E-03	.1363E-03
.1390E-02	.302	-.5146E+00	.1094E+00	.1742E+01	1190.	1174.	.2011E-03	.2174E-03
.1740E-02	.339	-.4627E+00	.8342E-01	.1988E+01	1210.	1192.	.1951E-03	.1840E-03
.2090E-02	.369	-.4118E+00	.6063E-01	.2285E+01	1278.	1291.	.1799E-03	.4529E-03
.2780E-02	.415	-.4097E+00	.5977E-01	.2299E+01	1143.	1133.	.2109E-03	.2133E-03
.3480E-02	.455	-.3530E+00	.3815E-01	.2727E+01	1236.	1247.	.1823E-03	.1876E-03
.4170E-02	.485	-.3325E+00	.3141E-01	.2915E+01	1240.	1276.	.1804E-03	.1890E-03
.5570E-02	.534	-.2692E+00	.1464E-01	.3661E+01	1414.	1414.	.1281E-03	.1222E-03
.6960E-02	.567	-.3241E+00	.2883E-01	.2998E+01	1091.	1109.	.2431E-03	.2481E-03
.8330E-02	.601	-.3566E+00	.3939E-01	.2696E+01	925.	923.	.3373E-03	.3428E-03
.9720E-02	.635	-.2251E+00	.6863E-02	.4411E+01	1433.	1432.	.1062E-03	.1083E-03
.1250E-01	.672	-.2382E+00	.8825E-02	.4162E+01	1277.	1268.	.1566E-03	.1585E-03
.1670E-01	.720	-.2410E+00	.9290E-02	.4111E+01	1178.	1172.	.2030E-03	.1997E-03
.2090E-01	.760	-.2233E+00	.6614E-02	.4448E+01	1207.	1221.	.1854E-03	.1724E-03
.2780E-01	.810	-.2146E+00	.5487E-02	.4634E+01	1180.	1171.	.2000E-03	.2096E-03
.3480E-01	.850	-.1918E+00	.3111E-02	.5199E+01	1262.	1274.	.1517E-03	.1474E-03
.4170E-01	.880	-.1797E+00	.2184E-02	.5551E+01	1301.	1291.	.1317E-03	.1314E-03
.5570E-01	.927	-.1803E+00	.2225E-02	.5533E+01	1231.	1233.	.1695E-03	.1674E-03
.6960E-01	.965	-.1983E+00	.3704E-02	.5025E+01	1074.	1092.	.3077E-03	.2949E-03
.8330E-01	1.000	-.1937E+00	.3277E-02	.5147E+01	1062.	1170.	.3220E-03	.2166E-03
.1020E+00	1.040	-.1399E+00	.4421E-03	.7147E+01	1418.	1104.	.7103E-04	.1175E-03
.1250E+00	1.070	-.1781E+00	.2071E-02	.5604E+01	1080.	1073.	.3108E-03	.3129E-03
.1460E+00	1.100							
AVERAGE VALUE		1231.	1224.	.1957E-03	.1991E-03			

*(1) : Improved SM method (2) : Sen's SM method

- Duration on a Well using Ground Water Storage, Transactions, American Geophysical Union, Vol.16, pp.519.
- Sen Z., 1986, Determination of Aquifer Parameters by the Slope-Matching Method, Ground Water, Vol.24, No.2, pp.217-223.
 - Gupta, A. and S.C. Joshi, 1984, Algorithm for Theis Solution, Ground Water, Vol.22, No.2, pp.199-206.
 - Gupta S. K. and P. Sharma, 1985, Analysis of Steady-State Flow in Semiconfined Aquifer : New Approach, Ground Water, Vol.23, No.2, pp.227-232.
 - Amitabha M., 1985, Automated Derivation of Parameters in a Nonleaky Confined Aquifer with Transient Flow, Ground Water, Vol.23, No.6, pp.806-811.
 - Amitabha M., 1988, Automated Computation of Parameters for leaky Confined Aquifers, Ground Water, Vol.26, No.4, pp.500-504.
 - 김민환, 1998, 누수대수층에 대한 수리상수 추정과 해석, 대한지하수환경학회, 제 5권 제 3호,

Table 2. Calculation results for leaky aquifer

Time (day)	Drawdown (m)	Slope	q	W(q)	Transmissivity (m ² /day)		K ₀ (R/L)	R/L	L (m)		Storativity	
					(1)	(2)*			(1)	(2)	(1)	(2)
.243E-01	.069	.411	.603E-01	.229E+01	1568.	1514.	2.039	.149	605.2	492.	.173E-02	.171E-02
.306E-01	.077	.381	.482E-01	.250E+01	1882.	1824.	2.447	.098	918.5	715.	.141E-02	.145E-02
.375E-01	.083	.513	.108E+00	.175E+01	1422.	1337.	1.850	.181	497.9	392.	.198E-02	.204E-02
.468E-01	.091	.399	.552E-01	.237E+01	2162.	2055.	2.811	.068	1326.8	968.	.104E-02	.112E-02
.674E-01	.100	.598	.156E+00	.143E+01	1507.	1345.	1.960	.161	558.3	395.	.209E-02	.232E-02
.896E-01	.109	.772	.268E+00	.990E+00	1236.	952.	1.608	.233	386.2	236.	.277E-02	.312E-02
.125E+00	.120	.947	.394E+00	.712E+00	1149.	734.	1.494	.263	342.2	173.	.311E-02	.454E-02
.167E+00	.129	1.283	.662E+00	.402E+00	854.	274.	1.111	.402	224.2	77.	.429E-02	.359E-02
.208E+00	.136	1.438	.791E+00	.315E+00	887.	112.	1.154	.382	235.5	49.	.421E-02	.267E-02
.250E+00	.141	.402	.567E-01	.235E+01	-	4765.	-	-	-	-	-	-
.292E+00	.142	.507	.106E+00	.177E+01	-	2420.	-	-	-	1551.	-	.267E-02
.333E+00	.143											
AVERAGEVALUE		1407.	1576.	566.1	505.	.252E-02	.240E-02					

*(1) : Improved SMmethod (2) : Sen's SM method

pp.123-128.

9. Hantush, M.S., and C.E. Jacob, 1955, Nonsteady Radial Flow in an Infinite Leaky Aquifer, Transactions, American Geophysical Union, Vol.36, pp.95-100.

10. Rashid a. and K. V. Wong, 1992, A Neural-Network Approach to the Determination of Aquifer Parameters, Ground Water, Vol.30, No.2, pp.164-166.

11. Pittenger R. and J. S. Reichard, 1997, Computer Determination of Aquifer Parameters Using Slope Matching, Computer Notes, Vol.35, No.3, Ground Water, pp.546-550.

12. Yeh H., 1987, Theis Solution by Nonlinear Least-squares and Finite-difference Newton's Method, Ground Water, Vol.25, No.6, pp.710-715.

13. Todd D.K., 1976, Groundwater Hydrology, Willey, pp.123-134.

14. Saleem, Z. A., 1970, A Computer method for Pumping Test Analysis, Ground Water, Vol.8, No.5, pp.21-24.

15. 김민환, 1997, 대수층의 수리상수 결정에 관한 여러 가지 방법의 비교, 대한지하수환경학회, 제 4권 제 3호, pp.153-160.

16. Kruseman, G.P. and N.A. De Ridder, 1983, Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, International Institute for Land Reclamation and Improvement, The Netherlands, Bulletin 11.

〈원고접수일 : 2001. 6. 25〉