Journal of the Korean Society of Groundwater Environment, Vol. 4, No. 3, pp. 153~160, Sptember,

대수층의 수리상수 결정에 관한 여러 가지 방법의 비교

A Review of Methods for Hydraulic Parameters Determination of Aquifer

김민환(Min - Hwan Kim)*

요 약 : 지하수를 효율적으로 이용하고 보존하기 위해서는 우선 대수층의 투수량계수와 저류계수를 가능한 정확히 평가하여야 한다. 대수층의 수리상수를 결정하기 위한 여러 가지 방법이 본 논문에 소개되었다. 각 방법의 특성을 기술하였으며 각 방법에 의해서 얻어진 결과를 비교하였다. 이를 토대로 자동적으로 대수층의 수리상수를 평가할 수 있는 개선된 방법을 모색하였다.

Abstract : In order to use and conserve groundwater efficiently, in the first place the values of transmissivity and storage coefficient have to be correctly estimated. Various methods to determine hydraulic parameters of aquifer were reviewed and the characteristics of the methods were described in this paper. They were compared to obtaine parameters by various methods. An improved method to estimate the hydraulic parameters of aquifer is suggested by the comparison of the previous methods.

서 론

산업의 발전과 생활 수준의 향상으로 용수의 사용량은 계속해서 증가하고 있다. 부족한 용수를 위해 지하수 사용량이 증가하고 있으며, 하천수의 오염으로 양질의 지하수개발에 관심을 기울이고 있다. 지하수의 이용을 위해서는 지하수량을 정확히 평가해야 한다. 지하수법에서 지하수부존량이라는 용어를 사용하는데 이는 지하수량을 의미하는 것으로 판단된다. 이 법에서 지하수란 지하의 지층이나 암석사이의 빈틈을 채우고 있거나 흐르는 물로 정의 하였다. 그러나 이 양은 단지 상징적인 양에 불과하며 수자원계획이나 지하수개발계획을 수립하는데 어떠한 지표도 될 수 없다. 그러므로 양수된 물의 수량과 수질이 시간에 따라 변하지 않는 평형상태에서 대수층으로부터 얻을 수 있는 연간 지하수 양수량이라는 '지하수 개발 가능량'의 설정이 필요하다. 이 양은 수자원종합계획에서 지하수 적정개발 및 이용의 목표를 설정하는데 중요한 하나의 지표가 될 수 있다(1996, 박창근). 실제 지하수 개발 현장에서 지하수의 적정 개발량을 평가하기 위해 대수층 수리상수를 가능한한 정확하고 현장에서 신속하게 평가할 수 있는 시스템이 필요하다. 또한 지하수의 오염을 포함한 지하수 관련 문제를 해석하기 위해서도 수리상수의 평가가 필수적이다.

대수층의 수리상수로서는 투수량계수(transmissivity)와 저류계수(storage coefficient)이고, 누수대수층(leaky aquifer)인 경우에 누수계수(leakage factor)가 추가된다. 이와 같은 수리상수 결정은 지하수의 운영과 관리에 중요한 변수이다. 이 값을 결정하기 위해 필요한 자료는 시간에 따른 관측정의 수두강하량이다. 이 자료를 이용하여 수리상수값을 결정하려는 노력은 상당히 오래 전부터 수행되어 왔으며 지금까지 여러 가지 방법이 발표되었다(Amitabha, 1985, 1988; Gupta, 1989; Gupta and Sharma, 1985; Pittenger and Reichard, 1996; Rai, 1985; Rashid and Wong, 1992; Sen, 1986; Yeh, 1987). 그러나 점진적으로 방법이 개선되고 구하는 절차를 간단화시키고 있으나 아직도 불충분한 점이 있으며 이를 개선하려는 노력은 계속될 것이다. 본 논문에서는 대수층의 수리상수를 구하는 여러 방법을 소개하고 각 방법에 대한 비교, 고찰을 통해 각 방법의 문제점과 대수층의 수리상수 결정에 관한 개선된 방법을 제시하고자 한다.

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

수학적 문제 구성과 도식적인 해

본 연구에서는 피압대수층에 한정하는데 이 대수층을 비누수대수층과 누수대수층으로 구분하여 문제를 구성한다.

비누수대수층(nonleaky aquifers)

피압대수층에서 대단히 작은 우물로 향하는 방사상 지하수 흐름에 대한 지배방정식을 편미분형태로 나타내면 다음과 같다.

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

여기서 S는 저류계수, T는 투수량계수[L^2/T], s는 수두강하량[L], r는 우물로부터 떨어진 반경[L], t는 양수 경과 시간[T]이다.

식 (1)의 도식적 해인 고전적인 방법이 Theis의 해이다. 이 문제를 위해 몇가지 가정사항(Theis, 1935)이 있다. (1) 대수층은 균질이고 등방성이며 수평방향으로 무한하다. (2) 한 개의 완전관입정(우물, fully penetrating well)에서 일정한 양으로 양수하며 우물의 직경은 대단히 작다. (3) 양수하기 전의 대수층의 수

두는 수평이고 양수 시작 후의 물은 순간적으로 양수되며 수두 경사가 발생한다. 엄격히 말하면 이러한 가정을 만족하는 현장은 없다. 이와 같은 가정하에서 Theis의 해는 다음과 같다.

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

이 때 u는 다음과 같다.

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \tag{3}$$

여기서 u는 무차원 시간계수, Q는 일정한 양수량[L^3/T], W(u)는 비누수대수층에서 우물함수(well function)이다. 이 우물함수를 무한급수 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$W(u) = -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^2}{4 \cdot 4!} + \cdots \tag{4}$$

식 (2)와 (3)은 비선형이므로 해석적으로 구할 수 없다. 그러므로 대수층의 수리상수 T와 S를 도식적으로 구하는 데 이 값은 우물 부근의 대수층에서 평균값이라고 할 수 있다.

누수대수층(leaky aquifer)

대부분의 피압대수층은 연직방향으로 상당한 양이 함양(recharge)된다. 피압대수층의 위에서나 아래에서 반투수층을 통해 상당한 수리경사하에서 대수층 내로 물이 누수된다. 대수층의 두께가 일정한 누수대수층에 대한 지하수 흐름방정식은 다음과 같다.

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

여기서 L은 누수계수(leakage factor)이다. 식 (5)에 대한 해는 Hantush(Sen, 1986)에 의해 다음과 같이 주어져 있다.

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

여기서 $K_0(r/L)$는 2종 0차(second kind and zero order)인 수정 벳셀함수이다. 그리고 q는 다음과 같다.

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

Hantush에 의해 증명된 바와 같이 $q>2r/L$이면 이 식은 근사적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 s_m은 최대수두강하량이다. 이에 대한 해는 다음과 같다.

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

최대수두강하량은 현장의 자료를 이용하여 얻을 수 있다.

이상과 같이 비누수대수층과 누수대수층에 대한 도식해를 구하기 위한 기본식을 살펴 보았다. 이에 대한 해는 이상적인 조건과 가정하에서 유도되었다. 도식해에 의해 대수층의 수리상수를 결정하기 위해 관계곡선(type curve)과 시험자료곡선이 필요하다. 두 곡선으로부터 matching point를 찾아 구하는 방법을 Theis의 도식적인 방법이라 하며 그 동안 실무에서 이용되어 왔다. 이 과정은 Bear(1979)에 의해서 자세히 기술되어 있다. 또 다른 도식적인 방법은 Chow 방법과 Cooper-Jacob방법이 있는데 이들 방법은 모두 비누수대수층에 대한 것이고 후자는 식 (3)에서 $u<0.05$인 경우에 적용이 가능하다(Gupta, 1989). 이와 같은 도식적인 방법은 개인의 주관적인 판단이 개입되므로서 완전한 객관적인 방법이라고 볼 수 없다. Amitabha(1985)에 의하면 Theis방법을 기초로하여 자동화하려는 노력이 일찍이 Saleem(1970), Paschetto and McElwee(1982), Gupta and Joshi(1984)에 의해 실행되었으나 이들 방법들의 주요 과정의 하나가 관계곡선에서의 matching point를 자동적으로 찾는다는 점이다. 도식적으로 가능한 이 과정을 자동화하는데 제약점, 수렴성의 문제(S와 T에 대한 초기값이 필요함), 불편한 여러 과정 등때문에 일반화 시킬 수 있는 방법이 아니다. 특히 대수층의 영향원 내에 주수(recharge)나 장애물이 존재할 때는 사용할 수 없다.

본 연구에서는 도식적인 해를 제외하고 수리상수를 보다 편리하고 자동화가 가능한 방법들을 대상으로 대수층의 수리상수를 결정하기 위한 여러 방법에 대해 간단히 열거하고 비교, 고찰한다.

수리상수 결정을 위한 여러 방법

이 장에서는 수리상수를 구하기 위해 발표된 각 방법을 간단히 소개하고 각 방법의 검증에 사용된 예를 중심으로 그 결과를 비교한다. 그리고 각 방법의 특징과 제약점을 종합하여 제시한다. 또한 누수대수층에서 특성계수를 결정하는데 필요한 최대수두강하량을 결정하는 방법에 대해 기술한다.

Gupta 방법(Gupta and Sharma, 1985)

이 방법은 누수대수층에 대한 수리상수를 결정하기 위해 양수정으로부터 떨어진 방사상 거리에 대수 주기(log-cycle)를 취한 것과 정상상태의 수두강하량(최대수두강하량)과의 관계곡선을 작성하여 추정하는 방법이다. 이를 식으로 나타내기 위해 식 (9)를 $\ln r(=\log_e r)$에 관해 미분하면 가능하다.

$$\frac{\delta s_m}{\delta(\ln r)} = A\frac{\delta K_0(r/L)}{\delta(\ln r)} = A\frac{\delta K_0(r/L)}{\delta(r/L)} \cdot \frac{\delta(r/L)}{\delta(\ln r)} \tag{10}$$

여기서 $A=Q/(2\pi kD)$이다. 그리고 $\frac{\delta K_0(r/L)}{\delta(r/L)} = -K_1(r/L)$, $\frac{\delta(r/L)}{\delta(\ln r)} = r/L$이므로 식 (10)은,

$$\frac{\delta s_m}{\delta(\ln r)} = -A(r/L)K_1(r/L)$$

또는, $$\frac{\delta s_m}{\delta(\log_{10} r)} = -2.303A(r/L)K_1(r/L) \tag{11}$$

이다. 여기서 K_1은 2종 1차 수정 벳셀함수이다. 식 (9)를 식 (11)로 나누면,

$$\frac{s_m}{[\delta s_m/\delta(\log_{10}r)]} = -\frac{1}{2.303\,(r/L)}\cdot\frac{K_0(r/L)}{K_1(r/L)} \tag{12}$$

또는 $\frac{s_m}{\Delta s_m} = G_1(r/L)$ (13)

이다. 여기서 $\Delta s_m = \delta s_m / \delta(\log_{10}r)$은 정상상태의 s_m값이 주어지면 임의의 r에 대한 정상상태에서 수두강하량의 경사를 나타낸다. 그리고 새로운 함수 G1(r/L)은,

$$G1\,(r/L) = \frac{-1}{2.303\,(r/L)}\cdot\frac{K_0\,(r/L)}{K_1\,(r/L)} \tag{14}$$

인데 이는 r/L(= 1.0^{-3}~10.0)에 대해 그림이나 표의 작성이 가능하다. 이 값은 최대수두강하량과 우물 반경에 대한 로그값을 취하여 식 (13)에 의해 평가할 수 있다. r/L 값에 대한 $K_0(r/L)$, $K_1(r/L)$, G1(r/L)를 표로 작성해 놓으면 G1(r/L)값에 해당하는 $K_0(r/L)$, $K_1(r/L)$값을 결정할 수 있다. 그러므로 이들 값과 식 (9)를 이용하면 투수량계수 T(=kD), 누수계수 L을 알 수 있다. 이 방법을 이용하기 위해서는 여러 개의 관측정이 필요하다. 그리고 각 관측정에서 최대수두강하량(정상상태에서의 수두강하량)을 외삽하여 결정하여야하는 경우가 빈번히 발생한다. Gupta(1985)는 이 방법을 시험하기 위해 Kruseman and Ridder (1983)에 의해 주어진 "Dalem"의 양수시험 자료를 이용하였다. 최대수두강하량 값은 Table 1과 같다. 그런데 여기서 사용된 최대수두강하량 값은 외삽에 의해 교정된 값임을 알아야 한다.

Table 1에 제시된 값을 이용하여 Gupta(1985)의 방법에 의해 구한 평균 투수량계수 T는 2,000 m^2/day, 평균 누수계수 L은 1,000 m이다. 그러나 저류계수 S를 결정하는 방법에 대한 내용은 없다. 이 방법에서 중요한 문제는 정확한 G1(r/L)을 평가하는 것이다. G1(r/L)의 평가에서 발생하는 오차는 투수량계수에서 동일한 정도이거나 작게 나타나지만 G1>0.5(혹은 r/L <0.5)인 경우에 누수계수 L에는 크게 영향을 미친다.

Amitabha 방법(1985, 1988)

Theis의 식 (1)~(4)에서 u가 작은 경우(u<0.05)에 Cooper-Jacob(Gupta, 1989)에 의해 우물함수 W(u)를 근사적으로 다음과 같이 나타냈다.

$$W(u) = 0.5772 - \ln(u) \tag{15}$$

이를 이용한 도식적인 방법이 Cooper-Jacob에 의해 소개되었다. Theis 해의 관계곡선과 시험자료곡선에서 u와 r^2/t의 비를 x, W(u)와 s의 비를 y라 하면 식 (15)는 다음과 같다.

$$W(u) = y\ s = -0.5772 - \ln(\frac{r^2x}{t}) \tag{16}$$

관계곡선과 양수시험자료곡선과의 사이에 정확한 match points를 기대할 수 없기 때문에 이를 최소화 시킬 수 있는 방법을 찾기 위한 식을 구성하여 해를 구하는 방법을 제시하였다. 즉, 최소제곱법을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\sum\{-0.5772 - \ln(\frac{r^2x}{t}) - ys\}^2 \tag{17}$$

제곱의 합이 최소가 되기 위한 조건은 식 (17)을 x와 y에 관해 미분하여 0으로 놓으면 된다. 즉 이를 만족하는 x와 y는 다음 식과 같다.

$$y = (C_1\sum_{i=1}^{n}s_i - C_2n)/[n\sum_{i=1}^{n}s_i^2 - (\sum_{i=1}^{n}s_i)^2] \tag{18}$$

$$x = e^{x1} \tag{19}$$

여기서 $x1=(-C_1-y\Sigma s_i)/n$ 또는 $x1=(-C_2-y\Sigma s_i^2)/\Sigma s_i$

$$C_1 = 0.5772n + 2n\ln r - \sum_{i=1}^{n}\ln t_i$$

$$C_2 = 0.5772\sum_{i=1}^{n}s_i + 2(\ln r)\sum_{i=1}^{n}s_i - \sum_{i=1}^{n}(\ln t_i)s_i$$

그리고 n은 관측정의 총 수이다.

양수시험 곡선에서 $r^2/t = 1$, $s = 1$인 점을 고려하면 u와 W(u)의 값은 x와 y에 의해 나타낼 수 있으므로 식 (2)와 (3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = Qy/4\pi \tag{20}$$

$$S = 4Tx \tag{21}$$

이와 같은 방법으로 투수량계수 T와 저류계수 S를 결정한다. 이 방법을 이용하기 위해서 Gupta 방법과 같이 관측정이 여러 개가 필요하다는 점, u<0.05인 경우에 한정된다는 점, 비누수대수층에 한정된다는 점을 갖고 있으므로서 일반화시키기는 어렵다. 이 방법을 검증하기 위해 McElwee(1980)와 Todd(1976)의 자료를 이용하였다.

Amitabha(1988)는 1985년 이후에 누수대수층에 대한 수리상수를 구하기 위한 3가지 방법을 제시하였다. 누수대수층에 대한 해를 구하기 위해 식 (9)에서 r/L≤0.05인 경우에 대한 해석해를 구하는데 제공되어지는 자료에 따라서 3가지 방법을 제안하였다. (1) 방법 1 : 관측정이 한 개만 존재하는 경우, (2) 방법 2 : 관측정이 최소한 2개가 존재하는 경우, (3) 방법 3 : 관측정이 3개 또는 그 이상 존재하는 경우에 대해 저류계수 S와 투수량계수 T, 누수계수 L를 구하는 방법을 제안하였다.

이 연구에서 Amitabha(1988)는 최대수두강하량을 구하는 방법을 제안하였다. 양수 경과 시간에 대해 대수를 취한 것과 수두강하량에 대수를 취한 것 사이에 다항식(polynomial) 관계를

Table 1. Corrected Extrapolated Steady-State Drawdowns of Pumping Test "Dalem"

Piezometer	P_{10}*	P_{10}**	P_{30}*	P_{30}**	P_{60}*	P_{90}*	P_{120}*	P_{400}*
Drawdown in meters	0.310	0.252	0.235	0.213	0.170	0.147	0.132	0.059

* Filter depth, 14 m; ** Filter depth, 36 m

유도하기 위해 최소제곱 fitting을 이용하여 최대수두강하량을 평가하였다. Kruseman and Ridder(1983)에 의해 주어진 "Dalem"의 시험자료에서는 최대수두강하량을 단순히 도해적으로 외삽하여 결정하였는데 이와 관련된 방법에 대해서는 별도의 절에서 논한다. "Dalem"의 시험자료에서 제시한 최대수두강하량 $s_m = 0.147$ m를 모든 논문에서 그대로 적용하였으나 Amitabha(1988)는 $s_m = 0.157$ m로 평가하였으며 도식적인 값으로 $s_m = 0.168$ m로 제시하였다.

SM(Slope-Matching) 방법(Sen, 1986)

앞 장에서 소개된 Theis의 비평형 방정식은 실제 자연상태와는 다른 이상적인 조건과 가정을 기초로하여 유도된 것으로 실험 대상인 대수층 조건들을 완전히 충족시킬 수는 없다. 비균질성, 측정 오차, 대수층 시험기간 등이 대수층 변수에 영향을 준다. Theis방법은 이들 영향을 확인할 수 없다. 그러나 Sen이 제안한 SM방법은 대수층의 수리상수를 결정하는 과정에서 이와 같은 영향을 확인할 수 있으며 시간 단계별로 수리상수를 결정하기 때문에 대수층의 물리적 특성이 반영된다는 장점을 갖고 있다. Sen이 제안한 SM방법과 그 과정을 기술하면 다음과 같다.

이중대수좌표상의 임의 점에서 관계곡선의 경사 α를 다음과 같이 정의하였다.

$$\alpha = u\,\frac{dLnW(u)}{du} \tag{22}$$

우변의 도함수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{dLnW(u)}{du} = \frac{W'(u)}{W(u)} \tag{23}$$

여기서 W'(u)는 u와 관련된 우물함수의 도함수이다. 이 도함수는 식 (4)로부터 쉽게 나타낼 수 있다.

$$W'(u) = 1 - \frac{1}{u} - \frac{u}{2!} + \frac{u^2}{3!} - \frac{u^3}{4!}\cdots \tag{24}$$

식 (23)과 (24)를 식 (22)에 대입하면 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{-(1 - u + \frac{u^2}{2!} - \frac{u^3}{3!} + \frac{u^4}{4!} - \cdots)}{W(u)} \tag{25}$$

간단하게 다시 나타내면,

$$\alpha = \frac{-e^{-u}}{W(u)} \tag{26}$$

식 (26)에서 관계곡선상의 임의 점에 대한 경사값을 결정하는 것이 가능하다. 이에 대한 경사값은 우물함수표와 같이 u에 대한 식 (26)의 값을 작성해 놓은 표에서 찾아 읽으면 된다. 이를 여기에서 경사함수표라고 부른다. 이 값을 사용하여 대수층 시험자료에 의한 관계곡선의 matching없이 다음과 같은 절차에 의해 대수층 변수값을 결정할 수 있다.

1. 두번째 시간-강하량 측정 이후, $\alpha_i = Ln(s_i/s_{i-1})/Ln(t_{i-1}/t_i)$, $(i = 2, 3, ..., m)$와 m(강하량 측정수)을 이용하면 이중대수좌표에서 임의의 연속된 두 점사이의 경사를 구할 수 있다.
2. 식 (26)에 대해 경사함수표로부터 이 경사에 해당하는 u값을 찾는다(필요하면 보간법을 이용한다).
3. 경사와 u값을 알면 식 (26)로부터 우물함수값을 계산한다.

$$W_i(u) = \frac{-e^{-u}}{\alpha_i} \tag{27}$$

4. 식 (2)과 (3)으로부터 국부적인 T와 S값을 각각 계산한다.
5. 다음의 시간-강하량 측정값으로부터 위와 같은 반복 절차에 의해 국부적인 T와 S를 계속 구한다.

이와 같은 절차에 의해 매시간 단계의 투수량계수와 저류계수를 구한 다음 이를 평균하여 결정하는것이 SM방법이다. 그러나 매시간 단계의 투수량계수와 저류계수 값에는 편차를 크게 하는 값도 포함되어 있기 때문에 사전에 불량한 자료를 제거하여 보다 정확한 값을 추정하는 방법을 찾아야 할 것이다. 이 과정은 비누수대수층에 관한 것이다.

누수대수층에 대한 수리상수의 결정은 비누수대수층의 과정과 유사하다. 식 (7)과 (8)에서 W(q)와 q의 도식적인 관계는 Theis 방법의 W(u)와 u의 도식적인 관계와 일치한다. 그러므로 누수대수층에 대한 경사 α_1은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_1 = -\frac{e^{-q}}{W(q)} \tag{28}$$

비누수대수층의 u 대신에 누수대수층에서는 q를 사용하면 된다. 그리므로 수리상수의 결정과정은 비누수대수층과 유사하다. 그러나 현장의 시험자료에 의한 경사의 계산은 $\alpha_{1i} = Ln[(s_m/s_{i-1})/(s_m - s_i)]/Ln(t_i/t_{i-1})$, $(i = 2, 3, ..., m)$에 의해 수행한다. 누수대수층에서 최대수두강하량을 결정하기 위해서 양수시험의 기간이 충분히 길어야 한다.

Sen(1986)에 의하면 SM방법에 의해 계산된 결과는 Theis방법에 의한 결과와 거의 비슷한 결과를 나타내고 있으나 구하기 위한 절차가 역시 번거롭다. 그러나 이 방법은 비누수층인 경우에 양수시간이 충분히 길지 않아도 되지만 누수대수층인 경우에는 양수시간이 충분히 길어야 한다. 그리고 앞에서 언급된 대수층의 물리적 의미가 반영된다는 장점이 있다. 또 다른 장점으로는 한 개의 관측정만 설치되어도 가능하다는 점이다. 만약 구하는 절차를 자동적으로 처리한다면 수리상수를 결정하는 양호한 방법이라고 판단된다. 이 방법을 시험하기 위해 여러 가지의 자료를 이용하였는데 Gupta 방법에 사용된 Table 1의 자료에서 우물반경이 $r = 90$ m인 경우의 자료가 사용되었다. 이 때 최대수두강하량 s_m은 Kruseman and Ridder에 의해 제시된 값 0.147 m가 사용되었다. 이 값을 이용하여 SM방법에 의해 구한 결과, 저류계수 $S = 2.410 \times 10^{-3}$, 투수량계수 $T = 1576\ m^2/day$, 누수계수 $L = 505$ m이다. 저류계수는 비교할 수는 없으나 누수계수는 Gupta 방법과 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

Sen(1986)에 의해 제시된 SM방법은 식(26)에서 u값을 명확히 구할 수 없다. 즉, 주어진 경사값에 대해 u값을 수작업에 의해 보간하여 구한다. 그러나 경사함수표로부터 보간된 u값

은 정확하지 않고 프로그램화시키지 못했다. Pittenger and Reichard(1997)는 반복적인 추측과 보정(guess and correct) 알고리즘을 이용하여 u값을 구하였다. 주어진 경사에 대해 보다 정확한 u값을 결정하는 방법을 이용함으로서 경사함수표로부터 선형 보간에 의해 발생하는 오차를 제거하였다. Pittenger and Reichard에 의해서 제시된 경사값과 Sen에 의해 제시된 경사값의 차이는 u값이 0.1보다 큰 경우에 발생하는데 u가 0.1보다 큰 경우에 우물함수값을 식 (4)에 의해 구할 수 없기 때문이다. 만일 u>0.1인 경우에 Pittenger and Reichard에 의해 계산된 경사가 발산하므로 이를 수정하기 위해 이 범위에서 우물함수값 W(u)는 적분법을 이용하면 가능하다. Pittenger and Reichard에 의해 제시된 방법은 함수표를 이용하지 않고 원래의 함수식을 이용함으로서 반올림 오차를 제거할 수 있다.

또 다른 한가지의 자동화 과정에서의 기술적 문제는 누수대수층에서 누수계수 L값의 평가이다. 누수계수 L은 식 (6)과 (9)에서 벳셀 함수 인수(b=r/L)인데 정확한 값을 얻기가 어렵다. 이 값도 추측과 보정(guess and correct) 알고리즘을 이용한다. $K_0(b)$와 동일한 값에 해당하는 b를 평가함으로서 누수계수 L를 구할 수 있다. Pittenger and Reichard는 r/L>2.0인 경우에 정확성이 감소한다고 지적하였으나 이 조건은 정상적인 수문지질학적인 상태하에서 기대할 수 없다. Pittenger and Reichard도 역시 SM방법에서 정상상태인 최대수두강하량 값에 대해서는 언급없이 Sen이 사용한 최대값을 사용하였다. 그리고 SM방법을 적용하여 대수층의 수리상수를 구하기 위한 자동화 방법을 제시하였지만 개선의 여지는 남아 있다. 주어진 경사에 대해 보다 정확한 u값을 평가하는 방법이 필요하다. 그리고 최대수두강하량의 결정은 단순히 외삽하여 구하였으나 대수층의 물리적인 특성이 반영된 최대수두강하량을 결정하는 방법의 도입과 자동화를 위한 실용적인 방법을 모색해야 한다.

NLFD방법(Yeh, 1987)

NLFD(Nonlinear Least-Squares and Finite-Differences Newton's Method)방법은 Theis의 해에 기초를 두고 있다. 수학적인 관점에서 식 (2)와 (3)은 비선형이기 때문에 해석적으로 해를 구할 수 없다. 그러므로 두 식을 곡선 fitting에 자주 사용되는 비선형 최소제곱 근사법을 이용하여 대수층의 수리상수를 구하는 방법을 제안하였다. 비선형 방법은 예측된 수두강하량과 관측된 수두강하량 사이의 차에 대한 제곱의 합이 최소가 되는 저류계수와 투수량계수를 결정하면 된다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^{n} e_i^2 = \sum_{i=1}^{n} [s_i - \frac{Q}{4\pi T} W(u_i)]^2 \tag{29}$$

여기서 e_i는 예측오차, s_i는 관측된 수두강하량, $QW(u_i)/(4\pi T)$는 예측된 수두강하량, 그리고 시간에 대해 $u_i=r^2S/(4Tt_i)$ 또는 거리에 대해 $u_i=r_i^2S/(4Tt)$이다. 결국, 식 (29)가 최소로 되는 T와 S를 구하면 된다. 이를 식으로 나타내기 위해 T와 S에 관하여 이 식을 미분하면 된다.

$$\frac{\partial}{\partial T} \sum_{i=1}^{n} e_i^2 = \frac{Q}{2\pi T^2} \sum_{i=1}^{n} \{[s_i - \frac{Q}{4\pi T} W(u_i)] [W(u_i) - EXP(-u_i)]\} = 0 \tag{30}$$

$$\frac{\partial}{\partial S} \sum_{i=1}^{n} e_i^2 = \frac{Q}{2\pi ST} \sum_{i=1}^{n} \{[s_i - \frac{Q}{4\pi T} W(u_i)] \cdot EXP(-u_i)\} = 0 \tag{31}$$

식 (30)과 (31)은 미지수 T와 S의 항이 포함된 비선형 방정식이므로 이에 대한 해를 구하기 위해 Yeh(1987)는 뉴톤방법을 이용하여 해를 구하였다. 이 방법을 이용하기 위해서는 초기값이 주어져야 한다. 뉴톤방법에 대한 해를 구하기 위해 사용된 자료는 Amitabha 방법(1985)에서 사용된 Todd(1976)의 자료를 이용하였다. 이 때 수렴성을 시험하기 위해 초기값을 여러 가지로 주어가며 시험을 해 보았는데 수렴하지 못하는 경우가 자주 발생하므로서 초기값의 부여가 중요한 문제로 지적되고 있다.

식 (30)과 (31)을 만족시키는 저류계수 S와 투수량계수 T의 결정은 여러 가지 수학적 기법의 도입에 의해 가능하다. 그러나 이와 같은 방법은 대수층의 물리적 특성을 반영시키기가 어렵다. 이상과 같은 몇가지의 방법에 대한 특징과 제약점을 Table 2에 제시하였다.

최대수두강하량 결정법

누수대수층에서 대수층의 수리상수를 결정하기 위해서 식 (8)에 제시된 최대수두강하량(정상상태의 수두강하량)을 알아야 한다. 여러 논문에서 이 문제에 대한 언급이 없었으며 수리상수를 결정하기 위해 기준이 되는 Kruseman and Ridder에 의해 주어진 자료를 사용하였다. 이 때 최대수두강하량값도 주어졌기 때문에 그 값을 원용하여 사용하였다. 그러나 이 값은 단순히 수두강하량과 양수시간을 그래프 용지에 그려서 외삽한 것이다. 대수층의 물리적 특성에 관계없이 사용되었으나 이후에 Amitabha(1988)에 의해 최대수두강하량을 결정하기 위한 방법이 소개되었다. 최대수두강하량을 평가하기 위해 수두강하량 s에 대수를 취한 값과 양수를 시작한 이후의 시간 t에 대해 대수를 취한 값과의 사이에 다항식 관계를 유도하기 위해 최소제곱곡선 fitting을 이용하였다. 이 방법이 최대수두강하량을 구하기 위한 유일한 수학적인 방법이라고 할 수 있다. 이 관계를 2차(second-degree) 다항식 형태로 가정하여 다음과 같이 나타냈다(Amitabha, 1988).

$$\log s = A_1 \log t + A_2 (\log t)^2 + A_3 \tag{32}$$

이 방정식에서 A_1, A_2, A_3는 다항식의 계수이다. 시간에 대한 수두강하량의 변화율은 시간 t에 관해 식(32)를 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{\log e}{s} \frac{ds}{dt} = A_1 \frac{\log e}{t} + 2A_2 \log t \frac{\log e}{t}$$

또는 $$\frac{ds}{dt} = \frac{s}{t}(A_1 + 2A_2 \log t) \tag{33}$$

정상상태에서의 시간을 t_s라 하면 이 값은 $ds/dt = 0$으로부터 구할 수 있다. 즉,

Table 2. The charcteristics for various methods

	특 성	제 약 점
Gupta방법	* 관측정의 우물이 여러 개 필요하다. * 누수대수층에만 적용할 수 있다.	* 투수량계수의 오차는 G1의 평가오차 보다 같거나 작다. 누수계수의 오차는 G1>0.5일 때 크다. * 주관적일 수 있다. * 저류계수 S의 평가가 불가능하다. * 도식적인 절차가 필요하다. * 선형 보간법을 이용하므로서 오차의 발생 가능성이 크다. * 특성변수 결정을 위한 자동화 방법이 어렵다.
Amitabha방법	* 비누수층에 대한 특성 변수 결정을 위해 관측정이 여러 개 필요하다. * 객관적이다. * 누수대수층에 대해서 관측정의 수에 따라서 3가지 방법을 제안하였다. * 최대수두강하량을 구하는 절차를 제안하였다.	* u<0.05일 때, 적용이 가능하다. * 변수결정을 위한 과정이 완전한 자동화라고 볼 수 없다.
SM방법	* 비누수대수층과 누수대수층에 대한 해를 구할 수 있다. * 대수층의 물리적 특성이 반영된다. * 관측정이 한 개만 있어도 해를 구할 수 있다. * 비누수대수층인 경우에 양수시험기간이 짧아도 가능하다.	* 누수대수층인 경우는 양수시험기간이 충분히 길어야 한다. * 정상상태의 수두강하량의 자료가 필요하다(외삽법에 의해 추정 가능) * 경사함수표를 이용하며 선형보간법을 이용하기 때문에 오차 발생 가능성이 있다. * 보간법에 의해 구해진 경사 α 값이 뉴톤 보간법을 사용한 값과 차가 크다.
NLFD방법	* 비누수대수층에만 적용이 가능하다. * 관측정이 여러 개이거나 한 개의 관측정에서 시간에 따른 수두강하량의 자료가 있는 경우에 적용이 가능하다.	* 관측값과 예측값을 그림으로 비교하도록 권유함. * 초기값에 따라 해가 발산할 수 있다.

$$t_s = 10^{-A_1/2A_2} \tag{34}$$

이다. 이 식을 식 (32)에 대입하면 정상상태의 수두강하량 s_m를 구할 수 있다.

$$\log s_m = A_1 \log(t_s) + A_2 (\log t_s)^2 + A_3 \tag{35}$$

또는 $s_m = 10^{A_1 \log(t_s) + A_2 (\log t_s)^2 + A_3}$

식 (32)를 회귀분석하면 다항식의 계수를 구할 수 있다. 구해진 계수를 식 (35)에 대입하면 최대수두강하량 s_m을 구할 수 있다. 이와 같은 절차에 의해 구해진 최대수두강하량은 $s_m = 0.157$ m(r = 90 m 지점에서)로 계산되었다. Kruseman and Ridder에 의해 외삽된 $s_m = 0.147$ m이다. 관측지점에서 이들 값을 비교해 보면 Table 3과 같다. 이 값의 차이는 수리상수 값의 결과에 큰 차이를 야기할 것으로 판단되며 어느 정도 영향을 미치는 지는 차후의 논문에서 논의할 예정이다.

각 방법의 결과

대수층의 수리상수를 결정하기 위해 여러 가지 방법을 살펴보았다. 각 방법에 대한 결과를 서로 비교하기 위해 비누수대수층에 대한 자료는 Todd(1976), 누수대수층에 대한 자료는 Dalem의 자료(Gupta, 1985)를 이용한 결과들을 Table 4에 제시하였다. 이 Table에서 보는 바와 같이 비누수대수층인 경우에 저류계수와 투수량계수는 거의 비슷한 결과를 나타내고 있다. 누수대수층인 경우에 저류계수는 1.2×10^{-3} - 2.4×10^{-3}이며 투수량계수는 1576 - 2072 m^2/day로 나타났다. 그러나 누수계수는 상당한 차이를 보여주고 있다. 그리고 동일한 관측정의 반경에서 다른 최대수두강하량의 값이 적용되고 있으나 그 결과가 비슷하게 나타나 있는 점은 특이할 만하다. 동일한 방법에 대한 최대수두강하량의 변화는 수리상수에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이에 대한 연구는 후속 연구로 남겨 놓았다.

앞 절에서 살펴본 방법이외에도 Rai(1985)는 비누수대수층에 대해 식 (2)와 (4)를 시간에 대해 미분하여 유한차분형태로 구성하였다. 연속적으로 주어진 양수시험 자료를 이용하여 해를 구하였으나 이 방법도 새로운 형태의 함수표를 작성하여 이용하기 때문에 자동화하는데 어려움이 있다. 그리고 Rashid and Wong(1992)은 누수대수층에 대해 신경망이론을 적용하여 식 (6)을 만족하는 해를 구하였다. 이 방법에 의해 "Dalem" 자료를 사용하여 결정된 변수는 다른 방법에 의해 얻어진 결과와 잘 일치는 하지만 대수층의 물리적 특성을 반영시키지 못한다는 점이다. 또한 이 방법을 현장 기술자가 이용하기 위해서는 신경망이론에 대한 개념을 어느 정도 습득해야 하며 사전에 양수시험자료에 대한 검증이 필요하다.

Table 3. Values of maximum drawdowns for "Dalem (Gupta, 1985)" and "Amitabha (1988)"

Piezometer distance from pumping well (m)	30	60	90	120
Dalem	0.235	0.170	0.147	0.132
Amitabha	0.280	0.188	0.157	0.153

Table 4. Aquifer parameters estimated from data of Todd(nonleaky) and Dalem(leaky)

방 법		반경(m)	비누수대수층		누수대수층				비 고
			저류계수	투수량 계수 (m^3/day)	최대수두강하량 (m)	저류계수	투수량 계수 (m^2/day)	누수계수 (m)	
Gupta		50			0.187*	-	2072	1000	
Amitabha**		60	1.8×10^{-4}	1160					
	I	30-120			#	1.2×10^{-3}	2060	1732	평균값임
	II	30-120			#	1.5×10^{-3}	1876	1161	평균값임
	III	30-120			#	1.6×10^{-3}	1953	1098	
SM	Sen	60/90***	1.98×10^{-4}	1233	0.147	2.4×10^{-3}	1576	505	
	Pittenger	60/90***	1.97×10^{-4}	1187	0.147	2.3×10^{-3}	1609	521	
NLFD			1.93×10^{-4}	1139					

* Table 1의 최대수두강하량의 자료를 대수용지에 최적직선을 그려 반경 r=50 m인 지점의 최대수두강하량을 선택함.
** $r/L\leq0.05$인 경우에 대한 해임.
*** 비누수대수층인 경우 반경 r=60 m, 누수대수층인 경우 반경 r=90 m임.
# 반경에 따라 최대수두강하량이 달라짐(Table 2 참조).
주) r=90 m일 때 Amitabha방법에서 최대수두강하량은 0.157 m이고 SM방법에서는 0.147 m로 다르다.

결론 및 토의

대수층의 수리상수 결정은 지하수를 해석하기 위한 필수적인 요소이다. 이 수리상수를 결정하기 위한 많은 방법이 제시되고 있다 크게 대별해 보면 도해적인 방법과 수학적인 방법으로 구분이 가능하다. 도해적인 방법은 주관적이기 쉽고 변수를 결정하기 위한 절차가 복잡하며 많은 오차가 내포될 소지가 있다. 그리고 여러 가지 수학적인 방법이 있으나 추측과 보정에 의한 방법은 주어지는 초기값에 의해 수렴하는 경우와 발산하는 경우가 발생한다. 이와 같은 단점을 극복할 수 있는 방법이 SM방법이라고 판단된다. 이 방법은 대수층의 물리적 특성을 잘 반영하고 있기 때문에 보다 정확한 대수층의 특성 변화를 알 수 있으며 이 방법에 대해 컴퓨터를 사용하여 자동적으로 수리상수를 결정하려는 많은 기법이 제시되고 있다. SM방법에서 최대수두강하량의 결정방법의 도입이 필요하며 경사를 구하는데 단순히 선형보간법을 사용하였으나 이를 개선하여 오차를 감소시켜 더욱 정확한 수리상수를 결정하는 방법을 찾아야 한다. 이를 위해 직접 경사함수식을 이용하여야 하며 이들 값의 특성을 파악하여 적절한 보간법을 이용하면 보다 정확한 수리상수를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

그리고 최대수두강하량을 결정하는 문제가 정확하게 제시되지 못하고 있는 실정이다. 누수대수층에 대한 수리상수를 결정하기 위해서 최대수두강하량이 필요하다. 대부분의 경우에 외삽법에 의해 추정된 값을 이용하였다. 이 값은 대수층의 물리적 특성이 반영되지 않기 때문에 이를 반영시킬 수 있는 수학적 기법을 토대로 자동화가 이루져야 할 것으로 판단된다. 이 점에 있어서 양수시간과 수두강하량 사이의 다항식(polynomial) 관계를 유도하기 위해 최소제곱곡선 fitting을 이용한 Amitabha (1988) 방법의 도입이 필요하다고 판단된다. 이를 도입하여 기술자가 양수시험 자료를 입력시키면 최대수두강하량 값은 물론 대수층의 수리상수값을 얻을 수 있는 범용 프로그램의 작성이 가능하며 이에 대한 연구를 수행 중에 있다. 연구 중인 SM방법과 여러 상업용 프로그램과는 현재 직접 비교할 수는 없으나 이 방법은 고속 디지털 컴퓨터를 필요로 하지 않으며 많은 기억용량도 요구하지 않기 때문에 보다 효율적인 프로그램이 될 것이다. 또한 수리상수를 결정하는 과정에서 경사함수에 관한 표를 이용하고 이를 보간하여 경사를 구하였으나 경사함수식을 직접 이용하면 경사를 보다 정확하게 구할 수 있으며 최대수두강하량을 단순히 외삽하지 않고 대수층의 물리적 특성이 반영된 새로운 방법을 도입하여 적용하면 자동화가 가능하며 효율적이고 개선된 SM방법이 될것으로 기대된다.

참고문헌

박창근, 1996, 우리나라 지하수 개발가능량 추정:1 개념정립과 기법의 개발, 지하수환경, 3(1), p. 15-20.

Amitabha Mukhopadhyay, 1985, Automated derivation of parameters in a nonleaky confined aquifer with transient flow, Ground Water, 23(6), p. 806-811.

Amitabha Mukhopadhyay, 1988, Automated computation of parameters for leaky confined aquifers, Ground Water, 26(4), p. 500-504.

Bear, J., 1979, Hydraulics of groundwater, McGraw-Hill, p. 467-477.

Gupta, A. and Joshi, S. C., 1984, Algorithm for Theis solution, Ground Water, 22(2), p. 199-206.

Gupta, R. S., 1989, Hydrology and hydraulic Systems, p. 190-198.

Gupta, S. K. and Sharma, P., 1985, Analysis of steady-state flow in semiconfined aquifers: A new approach, Ground Water, 23(2), p. 227-232.

Kruseman, G. P. and De Ridder, N. A., 1983, Analysis and evaluation of pumping test data, International Institute for Land Reclamation and Improvement, The Netherlands, Bulletin 11.

McElwee, C. D., 1980, Theis parameter evaluation from pumping tests by sensitivity analysis, Ground Water, 18(1), p. 56-60.

Paschetto, J. and McElwee, C. D., 1982, Hand calculator program for evaluating Theis parameters from a pumping test,

Ground Water, 20(5), p. 551-555.

Pittenger R. and Reichard, J. S., 1996, Computer determination of aquifer parameters using slope matching, Ground Water, 35(3), p. 546-550.

Rai, S. P., 1985, Numerical determination of aquifer constants, Jr. of Hydraulic Engineering, 111(7), p. 1110-1114.

Rashid Abd. Aziz and Kau-Ful Vincent Wong, 1992, A neural-network approach to the determination of aquifer parameters, Ground Water, 30(2), p. 164-166.

Saleem, Z. A., 1970, A computer method for pumping test analysis, Ground Water, 8(5), p. 21-24.

Sen Zekai, 1986, Determination of aquifer parameters by the slop-matching method, Ground Water, 24(2), p. 217-223.

Theis, C. V., 1935, The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground water storage, Trans. Amer. Geophys. Union, 16, p. 519-524.

Todd D. K., 1976, Groundwater hydrology, Wiley, p.123-134.

Yeh Hund-Der, 1987, Theis' solution by nonlinear least-squares and finite-difference Newton's method, Ground Water, 25(6), p. 710-715.