

## 비선형 회귀모형을 이용한 지하저장공동 주변 현장수리지질시험 매개변수의 자동 추정

정일문<sup>1\*</sup> · 조원철<sup>2</sup> · 김남원<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 수문연구실, <sup>2</sup>연세대학교 토목환경공학과

### Automatic Parameter Estimation of Hydrogeologic Field Test around Underground Storage Caverns by using Nonlinear Regression Model

Il Moon Chung<sup>1\*</sup>, Won Cheol Cho<sup>2</sup>, and Nam Won Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hydrology Research Division, Korea Institute of Construction Technology

<sup>2</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University.

지하저장공동의 설계 및 효율적 유지관리를 위해서는 설계전단계에서 사전조사로서 공동주위의 대수층 매개변수를 규명하고 운영전·후의 지하수의 흐름을 해석하는 과정이 반드시 수행되어야 한다. 수리지질설계에 필요한 제반자료를 얻기 위해서는 다양한 수리지질시험을 수행해야하며, 이 중 시추공 주변의 수리지질특성은 필수적인 기초자료가 되므로 보다 정확한 매개변수의 산정이 요구된다. 그러나 기존에 널리 사용된 도해적 일치법을 이용할 경우, 육안 오차나 절차상의 오독 등으로 타당성이 적은 수리지질 상수값을 산정할 위험이 있으며, 산정과정에서 불필요한 작업을 수행해야 하는 단점이 있다. 최근 매개변수의 직접전환을 위한 여러 방법론이 제시되어 왔는데, 그 중에서 비선형 회귀모형을 이용하면 매개변수가 반복계산을 통해 자동추정되는 편리함이 있고 추정된 매개변수의 통계학적 타당성까지 평가할 수 있어 매우 유용한 것으로 평가되고 있다. 본 연구에서는 공동주위의 실제 수리지질 자료에 대해 기존의 도해적 방법을 거치지 않고, 비선형 회귀모형을 이용한 매개변수의 자동추정을 수행하였다. 매개변수 자동추정 과정에서 발생할 수 있는 많은 반복 계산 횟수를 줄이고 수렴불가능의 문제를 해결하는 방안으로 감쇠계수를 도입하는 방안을 함께 제시하였다.

**주요어** : 지하 저장 공동, 매개변수 자동 추정, 비선형 회귀분석, 수렴, 감쇠계수

For the design and effective management of underground storage caverns, preliminary investigation on the hydrogeologic parameters around caverns and analysis on the groundwater flow must be carried out. The data collection is very important task for the hydrogeologic design so various hydraulic tests have been performed. When analyzing the injection/fall off test data, existing graphical method to estimate the parameters in Theis' equation is widely used. However this method has some sources of error when estimating parameters by means of human faults. Therefore the method of estimating parameters by means of statistical methods such as regression type is evaluated as a useful tool. In this study, nonlinear regression analysis for the Theis' equation is suggested and applied to the estimation of parameters for the real field interference data around underground storage caverns. Damping parameter which reduce the iteration numbers and enhance the convergence is also introduced.

**Key words** : underground storage cavern, automatic parameter estimation, nonlinear regression model, convergence, damping parameter

### 서 론

지하저장공동의 설계 및 효율적 유지관리를 위해서는

설계전단계에서 사전조사로서 공동주위의 대수층 매개변수를 규명하고 운영전 후의 지하수의 흐름을 해석하는 과정이 반드시 수행되어야 한다(정형식과 이익효, 1983;

\*Corresponding author: imchung@kict.re.kr

김치환과 이석천, 1992; 김천수, 1991; 서정규, 1993). 수리지질설계에 필요한 제반자료를 얻기 위해서는 다양한 수리시험을 수행해야하며, 이 중 시추공 주변의 수리지질특성은 필수적인 기초자료가 되므로 보다 정확한 매개변수의 산정이 요구된다. 이를 위해서는 수위강하시험(falling head test), 단기주입시험, 장기 양수 및 주입시험, 간섭시험 등을 수행한다. 이중 광역적인 암반의 수리지질특성을 얻기 위해서는 장기 양수/주입시험과 간섭시험을 수행해야 하며, 시험자료를 이용하여 수리지질학적 매개변수를 산정하게 된다.

이러한 수리시험자료의 해석을 위해 Theis(1935)는 피압대수층에서 시간에 따른 수두강하의 관계를 열전도흐름과 일정강도의 선소멸(line sink)과의 유사성을 이용하여 지수적분함수로 표현되는 해석해를 구하였으며, 수두강하의 현장관측치로부터 대수층 상수인 투수량 계수  $T$ 와 저류계수  $S$ 를 결정하는 일치법(match point method)을 제안하였다. 이 기법은 Theis가 제안한 형상곡선과 양수 시험자료의 중첩에 의해 일치점을 찾을 수 있고 이 일치점으로부터  $T$ 와  $S$ 를 결정하는 방법이다.

Cooper와 Jacob(1946)은 Theis식을 간략화시킨 직선법을 제안하였으며, 일치법과 직선법은 양수시험자료로부터 매개변수를 추정함에 있어 도해적 방법을 이용하는 절차를 수행하게 된다. 이와같이 관측자료로부터 매개변수를 추정하는 방법을 역산(inverse) 또는 매개변수의 확정(identification)분제로 정의하며, 지하수 해석에서 매우 중요한 사항으로 고려되어 왔으며 직접법과 간접법으로 대별된다. 직접법은 관측자료로부터 매개변수를 직접전환하는 방법이며, 간접법은 매개변수값을 계속적으로 변화시키면서 수두관측치가 계산치와 허용오차범위내에 들도록 하는 방법이다.

이러한 매개변수 확정 문제를 Theis식에 적용한 대표적인 연구는 다음과 같다. Yeh와 Tauxe(1971)는 준선형화 기법을 이용하여 양수자료로부터 대수층 매개변수인 투수량계수와 저류계수를 구하였으며, 해석적인 결과와의 비교를 통해 그 적합성을 확인하였다.

권오현 등(1994)은 비선형 회귀분석의 하나인 최급강하법에 의해 현장자료에 대한 균질, 등방성 대수층의 매개변수를 결정한 바 있으며, 오차발생원인을 공급원의 존재로 보았다.

매개변수를 추정하기 위한 최적화기법으로 회귀과정을 사용할 경우, 이를 통해 구한 매개변수는 단일해가 아닌 분포형태로 나타나게 된다. 따라서 추정된 매개변수를 이용하여 구한 계산값과 관측값과의 적합여부를 확인해

야 하며, 회귀모형의 가정사항에 대한 통계학적 검토가 필요하다(Cooley와 Vecchia, 1987; 정일문 등, 1994). 매개변수확정에 있어 표준회귀과정을 사용함으로써 얻어지는 장점은 가정의 타당성과 모형의 적합성을 검토하기 위한 규칙적인(formal)통계학적 기법의 적용이 가능한 점과 모형과 그 매개변수의 신뢰구간과 잔차에 대한 통계학적 검토가 가능하다는 것이다(Yeh, 1986).

수치모형의 검정을 위한 매개변수의 자동보정기법에서도 비선형회귀분석의 기법이 도입되어 Cooley(1977)의 연구를 필두로 최근까지 진행되고 있으며, Hill(1992)은 3차원 지하수 흐름모형인 MODFLOW에 역산기법을 결합한 모형을 제시하였으며, Cooley와 Hill(1992)은 Newton 방식의 비선형 최소제곱법의 세 가지 방법을 비교고찰하였다.

본 연구에서는 현장에서 얻어진 수리시험자료로부터 매개변수를 직접추정하기 위한 방법론으로 비선형 회귀분석을 채택하였다. 이 방법은 전통적인 도해적 과정을 거치지 않고 관측값과 계산값의 차이를 허용오차범위로 줄여나가며, 매개변수를 변화시키는 자동추정기법으로 그 결과 구해진 매개변수는 단일값이 아닌 평균과 분산의 형태로 매개변수의 범위(range)가 결정된다는 장점이 있다. 비선형 회귀분석과정은 Draper와 Smith(1981)가 제시한 선형화 기법을 Hartley(1961)가 보완한 modified Gauss-Newton방법을 이용하였는데 이 방법은 비선형의 식을 Taylor급수에 의해 선형화시키며, 반복계산을 통해 매개변수 갱신을 수행하며, 매개변수의 갱신단계에서 감쇠변수(damping parameter)를 도입하여 수렴을 유도한다.

본 연구에서 개발된 검증된 회귀모형(정일문 등, 1995)은 비누수 피압대수층에 대한 Theis의 비평형방정식에 대한 해석해를 기초로 구성되었으며, 따라서 다음과 같은 Theis식의 기본가정을 전제로 한다(Dawson과 Istok, 1991).

- ① 대수층은 무한히 계속되어 있으며, 균질이고 등방성이다.
- ② 양수정은 대수층 전체를 관통, 균등하게 공급받고 있다.
- ③ 투수량계수는 시간과 거리에 따라 변화하지 않는다.
- ④ 우물의 구경은 매우 작다.
- ⑤ 물은 수두감소에 따라 순간적으로 방출된다.

### 비선형 회귀모형

모형이 매개변수간에 비선형이고 종속변수에 대해 선형일 때 모형은 식(1)과 같은 표준 비선형 회귀형태를 가진다.

$$Y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k; \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p) + \varepsilon \quad (1)$$

회귀모형에서 반복되는 실험에서  $\xi$ 는 독립변수,  $Y$ 는 종속변수가 된다.  $n$ 개의 관측점과  $p$ 개의 매개변수가 있을 때 식(2)와 같은 행렬의 형태로 나타낸다.

$$Y = f(\xi, \beta) + \varepsilon \quad (2)$$

식(2)는 참매개변수벡터  $\beta$ 에 대한 추정치 벡터  $b$ 와 참오차 벡터  $\varepsilon$ 의 추정치벡터 $\hat{\varepsilon}$ 의 항으로 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = f(\xi, b) + \varepsilon \quad (3)$$

선형인 경우 회귀하는 식(4)에서 가중잔차의 제곱합인  $S(b)$ 를 최소화함으로 구한다.

$$S(b) = \varepsilon^T w \varepsilon = [Y - f(\xi, b)]^T w [Y - f(\xi, b)] \quad (4)$$

식(3)이 비선형인 경우 식(5)와 같이 초기변수들에 대한 선형근사화가 이루어지며, 절단된 Taylor급수에 의해 초기변수  $b_0$ 에 대해 확장된다.

$$f(\xi, b) \cong f(\xi, b_0) + X_0(b - b_0) \quad (5)$$

$$X_0 = \{X_{ij}^0\} = \left\{ \frac{\partial f_i}{\partial b_j} \right\}_{(n \times p)} \quad (6)$$

여기서,  $w$ 는 가중행렬,  $f_i$ 는  $i$ 점에서의 계산값이고,  $X_0$ 는 민감도 계수행렬이다.

식(5)를 이용하여 식(3)은 식(7)과 같은 증분선형모형(incremental linear model)으로 전환된다.

$$Y - f(\xi, b_0) \cong X_0(b - b_0) + \varepsilon \quad (7)$$

$\beta$ 에 대한 최선의 추정치는 식(8)을 최소화함으로 얻을 수 있다.

$$S(b) = \varepsilon^T w \varepsilon \cong [Y - f(\xi, b_0) - X_0(b - b_0)]^T w [Y - f(\xi, b_0) - X_0(b - b_0)] \quad (8)$$

$S(b)$ 를 최소화 하기 위해 매개변수에 대한 도함수를 0으로 놓으면 식(9)와 같은 정규방정식이 얻어진다.

$$X_0^T w X_0 d_1 = X_0^T w [Y - f(\xi, b_0)] \quad (9)$$

여기서,

$$d_1 = b_1 - b_0 \quad (10)$$

첨자 1은 첫번째 근사해를 나타낸다. 반올림 오차를 줄이기 위해 식(10)을 축척화(scaling)시킨다. 이 절차를

식(11)에서 (16)까지 나타내었다.

$$C_0^T X_0^T w X_0 C_0 C_0^{-1} d_1 \quad (11)$$

$$= C_0^T X_0^T w [Y - f(\xi, b_0)]$$

$$S_0^T w S_0 \delta_1 = S_0^T w [Y - f(\xi, b_0)] \quad (12)$$

$$S_0 = X_0 C_0 \quad (13)$$

$$\delta_1 = C_0^{-1} d_1 \quad (14)$$

$$C_0 = \text{diag}\{(A_{11}^0)^{-1/2}, (A_{22}^0)^{-1/2}, \dots, (A_{pp}^0)^{-1/2}\} \quad (15)$$

$$\Delta_0 = X_0^T w X_0 \quad (16)$$

여기서,  $A_{11}^0$ 는  $\Delta_0$ 의 대각성분이다.

개선된 추정치를 얻기 위해  $b_1$ 이  $b_0$ 에 대입되며 이 과정은 반복된다. 일반적인 반복계산과정을 식 (17)-(20)에 나타내었다.

$$S_r^T w S_r \delta_{r+1} = S_r^T w (Y - f(\xi, b_r)) \quad (17)$$

$$S_r = X_r C_r \quad (18)$$

$$\delta_{r+1} = C_r^{-1} (b_{r+1} - b_r) = C_r^{-1} d_{r+1} \quad (19)$$

$$C_r = \text{diag}\{(A_{11}^r)^{-1/2}, (A_{22}^r)^{-1/2}, \dots, (A_{pp}^r)^{-1/2}\} \quad (20)$$

여기서,  $A_{ii}^r$ 은  $A_{ii}^0$ 와 상사적이다.  $\delta_{r+1} \rightarrow 0$ 일 때 식(7)에서  $[Y - f(\xi, \hat{b})] = \hat{\varepsilon}$ 이 된다. 동시에  $\hat{b}$ 는 식(2), (4)의  $S(\hat{b})$ 를 최소화시킨다. 즉,  $S(\hat{b}) = [Y - f(\xi, \hat{b})]^T w [Y - f(\xi, \hat{b})]$ 가 되며 이처럼  $S(b)$ 를 최소화하는 회귀과정을 Gauss-Newton 방법이라 한다(정일문 등, 1995).

식(19)에서 수렴을 유도하기 위해 감쇠(減衰)변수(damping parameter)  $\rho$ 가 도입된다.

$$b_{r+1} = \rho d_{r+1} + b_r \quad (21)$$

여기서,  $d_{r+1} = C_r \delta_{r+1}$ 이며,  $\rho$ 는 변위벡터  $d_{r+1}$ 의 크기를 변화시키며,  $0 < \rho < 1$  이면 계산된 매개변수치의 변화는  $\rho = 1$ 일 때 보다 작아져서 내삽과정이 된다.

### 수리간섭시험에 대한 매개변수 추정

반경이  $r$ , 수두가  $h$ 이고, 일정주입/배출량  $Q$ 로 주입/양수하는 무한경계의 균질, 등방대수층계의 방사상 흐름을 지배하는 방정식은 다음 식(22)와 같고 초기 및 경계조건은 식(23)-(24)와 같다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial h}{\partial r} \right) = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (22)$$

$$h(r, t=0) = 0 \text{ for } r \geq 0 \quad (23a)$$

$$h(r = \infty, t) = 0 \text{ for } t \geq 0 \quad (23b)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{Q}{2\pi T}, \quad T > 0 \quad (24)$$

비누수 피압대수층의 매개변수인 T와 S는 양수시험 중 관측정에서의 시간별 수위강하 자료를 이용하여 다음의 Theis식으로 부터 우물함수와와의 관계에 의한 일치법에 의해 도해적으로 구할 수 있다.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_{r_0^2 S / 4Tt}^{\infty} \frac{e^{-z}}{z} dz \quad (25)$$

여기서, t = 시간  
 s = 수위강하  
 r<sub>0</sub> = 관측정까지의 수평거리

식(25)의 적분항은 식(26)의 우물함수를 도입하여 유한개의 급수형태로 표현할 수 있다.

$$W(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-z}}{z} dz = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots \quad (26)$$

여기서, u = r<sub>0</sub><sup>2</sup>S/4Tt이다.

우물의 반경이 작고 시간 t가 클 때 u값이 매우 작아지므로, 식(26)의 급수항에서 두번째 항까지만 고려하여 근사화시킨 식(27)에 의해 매개변수를 구하는 방법이 직선법이다.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left( -0.5772 - \ln \frac{r_0^2 S}{4Tt} \right) \quad (27)$$

Theis방정식은 매개변수 T, S에 대해 비선형이다. 진술한 회귀과정을 이용하여 매개변수 T, S를 구하는 회귀모형을 구성하면 다음과 같다.

$$r(t, r_0; T, S) = \frac{Q}{4\pi T} W(t, r_0; T, S) \quad (28)$$

식 (28)에 대한 식(6)의 민감도 계수행렬을 다음의 적분식을 이용하여 구한다.

$$\frac{d}{d\alpha} \int_{u(\alpha)}^{\infty} f(x) dx = -f[u(\alpha)] \frac{du(\alpha)}{d\alpha} \quad (29)$$

관측점수 i에 대한 투수량계수 T의 민감도 Z<sub>Tr</sub>와 저류계수 S의 민감도 Z<sub>is</sub>는 다음과 같다.

$$Z_{Tr} = -f_i + \frac{Q}{4\pi T} e^{-u_i}, \quad Z_{Tr} = X_{Tr} T \quad (30)$$

$$Z_{is} = -\frac{Q}{4\pi T} e^{-u_i}, \quad Z_{is} = X_{is} S \quad (31)$$

식(30)과 (31)은 다음과 같이 축척화된 선형모형의 결과로도 볼 수 있다.

$$\begin{aligned} f_i &= f_i^0 + X_{Tr}^0 \Delta T_1 + X_{is}^0 \Delta S_1 \\ &= f_i^0 + X_{Tr}^0 T_0 \left( \frac{\Delta T_1}{T_0} \right) + X_{is}^0 S_0 \left( \frac{\Delta S_1}{S_0} \right) \\ &= f_i^0 + Z_{Tr}^0 \left( \frac{\Delta T_1}{T_0} \right) + Z_{is}^0 \left( \frac{\Delta S_1}{S_0} \right) \end{aligned} \quad (32)$$

윗 첨자 0은 현 단계의, 1은 다음 단계의 반복변수이다. 직선법에 이용되는 근사식을 이용할 경우 식(30)과 (31)은 식(33)과 (34)로 변환된다.

$$Z_{Tr} = -f_i + \frac{Q}{4\pi T}, \quad Z_{Tr} = X_{Tr} T \quad (33)$$

$$Z_{is} = -\frac{Q}{4\pi T}, \quad Z_{is} = X_{is} S \quad (34)$$

ΔT<sub>r+1</sub>, ΔS<sub>r+1</sub>는 식(21)에서의 d<sub>r+1</sub>가 된다. 수렴을 유도하는 감쇠변수 ρ를 도입하여 새로운 회귀변수를 계산한다. 대개 ρ는 1보다 작은 값으로 정한다. 계산과정을 Fig. 1의 순서대로 나타내었으며 계산과정은 다음과 같이 9단계로 나눌 수 있다.

(1) 초기치 입력 :

T<sub>0</sub> = 투수량계수의 초기치(m<sup>2</sup>/sec)

S<sub>0</sub> = 저류계수의 초기치,

ρ = 감쇠변수

ε = 오차한계

r<sub>mx</sub> = 최대반복횟수

t = 관측시간(초)

s = 관측수두강하(m)

(2) 식 (28)을 이용한 초기치에 의한 수두강하계산

(3) 민감도계수행렬 Z<sub>r</sub>(Z<sub>Tr</sub>와 Z<sub>is</sub>) 계산

(4)~(7) 새로운 매개변수 계산

(8) 반복횟수가 최대 반복 횟수보다 작는지 확인

(9) 출력

### 현장수리시험자료에 대한 회귀모형의 적용

본 절에서는 실제 저장공동인 "B"공동주위의 수리시험자료(삼림산업, 1993)에 대해 본 연구에서 확립한 회귀모형을 이용하여 수리지질학적 매개변수를 추정하였다.

지하 유류비축기지 건설시 수밀성 확보를 위한 시험 및 해석은 피압대수층 이론에 크게 의존하고 있으며, 피압대수층을 세분화하면 일반적인 피압대수층, 다층구조내의 피압대수층, 파쇄대를 따라 흐르는 피압대수층으로

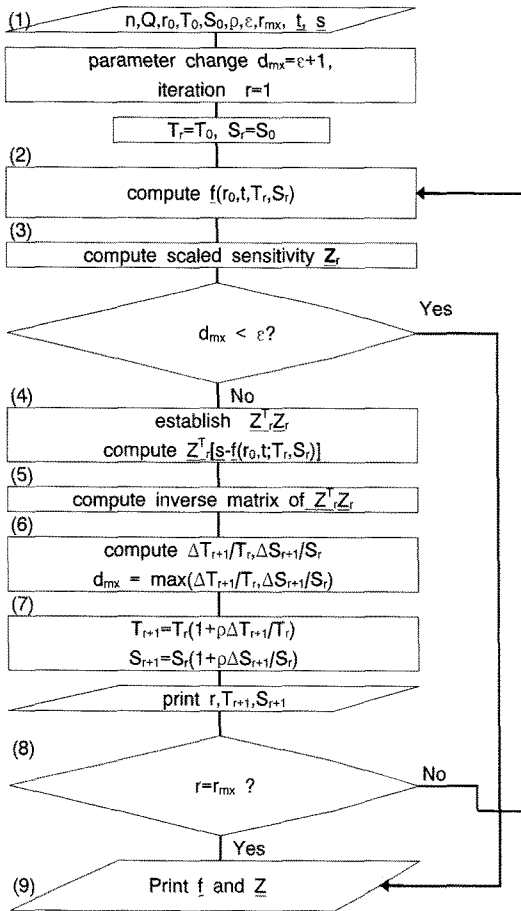


Fig. 1. Flow chart for parameter estimation.

구분하며 각 대수층마다 잘 정의된 이론식이 발달되어 있으며, 피압대수층 내의 모든 흐름은 이론적 해석이 가능하다.

현장에서의 수리시험은 크게 장기 배출/회복시험과 장기 주입/회복시험, 장기 배출에 의한 간섭시험, 장기 주입에 대한 간섭시험으로 나뉘며, 본 연구에서는 간섭 시험에서 장기 배출에 대한 주변공의 시간별 수두강하량 자료를 이용하여 현장변수를 산정하였다. 간섭시험의 질차는 시험대상공(active hole)에서 배출 혹은 주입을 계속하며, 주변의 관측공(observation hole)으로부터 수두 변화를 감지하여 해석하는 방법이다. 이러한 간섭시험의 해석을 통해서 투수량계수  $T(m^2/sec)$ 와 저류계수  $S$ 를 구할 수 있다. 본 연구에서 확립된 회귀모형을 적용하고자 하는 B공동은 건설의 간섭시험 결과는 총 11개 관측정에서 관측되었으며 이에 대한 주입공과 관측공과의 거리 및 양수량 그리고 감쇠변수를 다음 Table 1에 나타냈다.

간섭시험은 총 11개의 관측정에서 관측되었으며, 이에 대한 매개변수의 추정결과 및 수렴과정은 다음 Fig. 2~ Fig. 23과 같다.

Fig. 2~Fig. 23의 결과를 살펴보면 11개의 관측공에 대해 관측치에 대한 계산치가 좋은 적합을 보였으며, 이에 대한 반복계산의 횟수도 최대 30번이내에서 수렴되는 좋은 수렴성도 아울러 나타내고 있다.

한편, 매개변수 추정시에는 반복계산시 초기치의 설정여부에 따라 수렴가능성 여부가 가장 중요한 문제가 될 수 있으므로 초기치의 설정이 수렴성 여부를 좌우하는지를 살펴보았다.

초기치는 11개 관측정 모두 동일하게  $T = 1.0E - 08$ ,  $S = 1.0E - 07$ 을 주었으나, 이로 인한 수렴성의 문제는 나타나지 않았으며, 수렴과정에서 매개변수 변화폭 역시 적절한 것으로 나타났다.

특히, 본 연구에서는 수렴을 유도하는 감쇠변수를 도

Table 1. Input data for interference test.

Observation hole (No.)	Abstraction rate (//day)	Distance from active hole (m)	Damping parameter
1	3142.5	21.0	1.0
2	3142.5	31.5	1.0
3	170.3	42.0	1.0
4	479.0	10.5	0.4
5	583.6	21.0	1.0
6	583.6	21.0	0.8
7	579.1	21.0	0.8
8	579.1	42.0	0.8
9	191.0	21.0	0.8
10	732.8	21.0	0.5
11	732.8	21.0	0.5

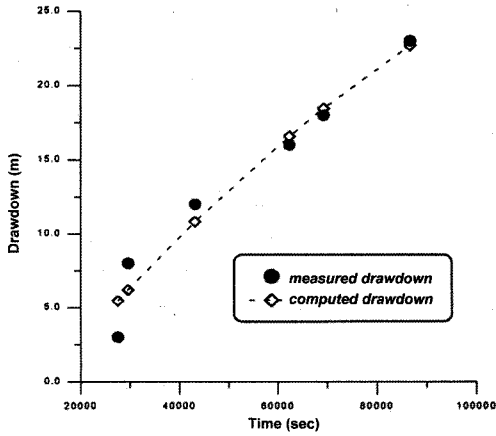


Fig. 2. Comparison between observed and computed groundwater head (No. 1 hole).

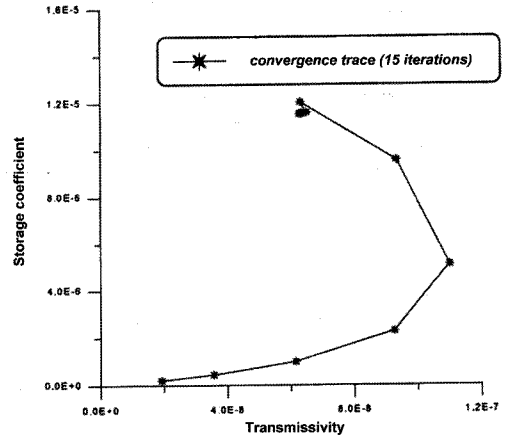


Fig. 5. Convergence process of parameters (No. 2 hole).

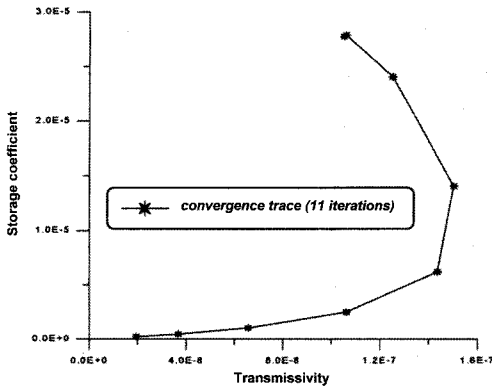


Fig. 3. Convergence process of parameters (No. 1 hole).

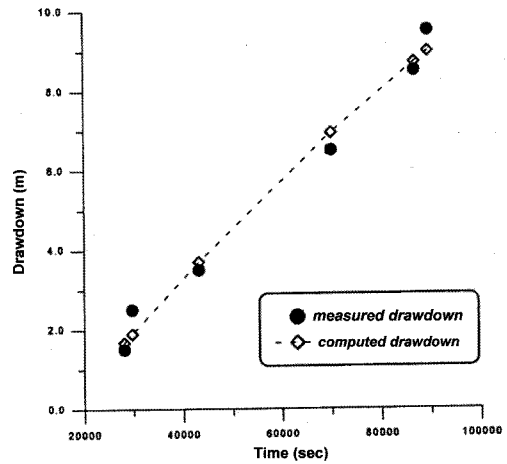


Fig. 6. Comparison between observed and computed groundwater head (No. 3 hole).

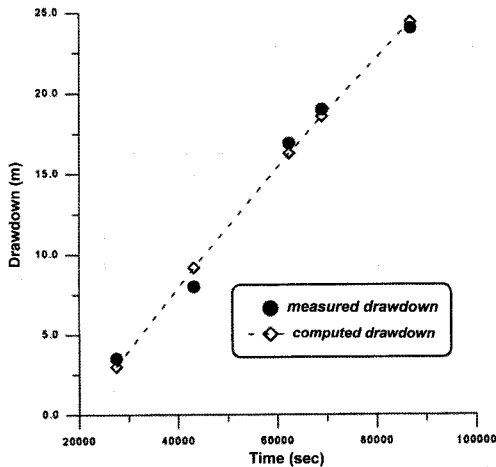


Fig. 4. Comparison between observed and computed groundwater head (No. 2 hole).

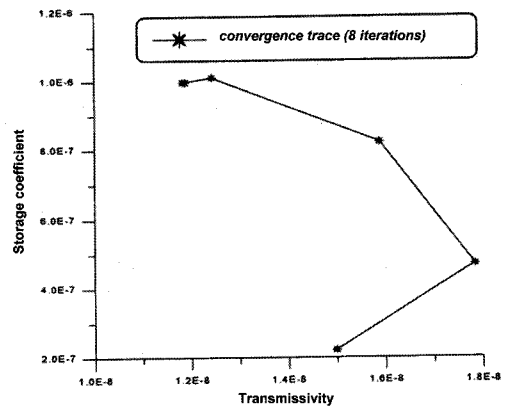


Fig. 7. Convergence process of parameters (No. 3 hole).

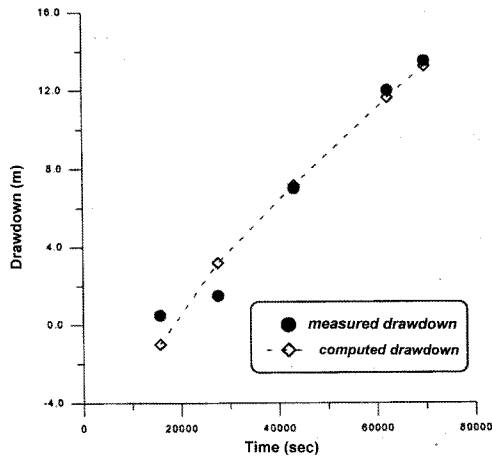


Fig. 8. Comparison between observed and computed groundwater head (No. 4 hole).

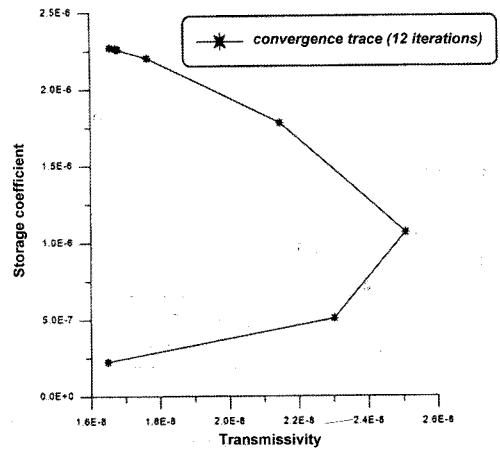


Fig. 11. Convergence process of parameters (No. 5 hole).

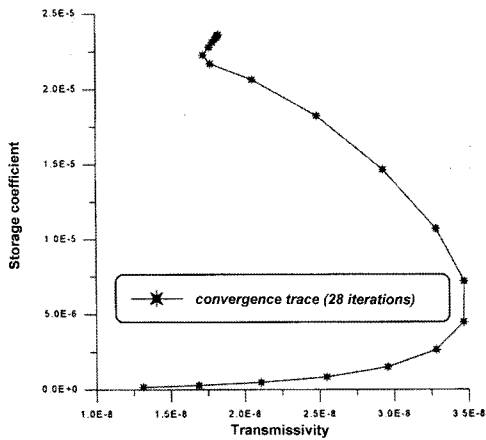


Fig. 9. Convergence process of parameters (No. 4 hole).

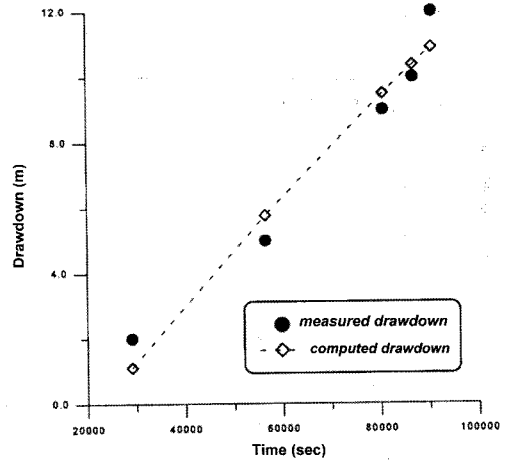


Fig. 12. Comparison between observed and computed groundwater head (No. 6 hole).

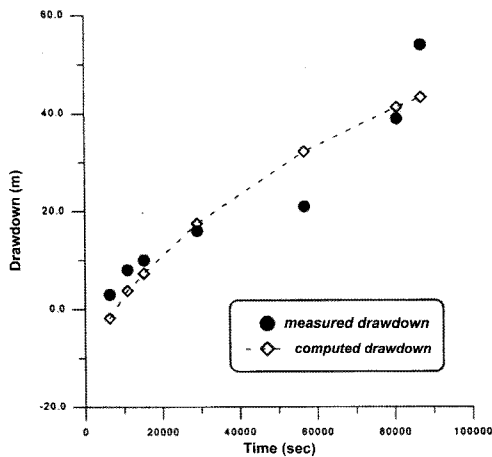


Fig. 10. Comparison between observed and computed groundwater head (No. 5 hole).

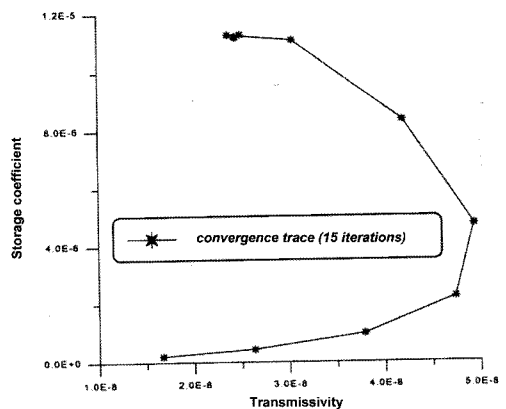


Fig. 13. Convergence process of parameters (No. 6 hole).

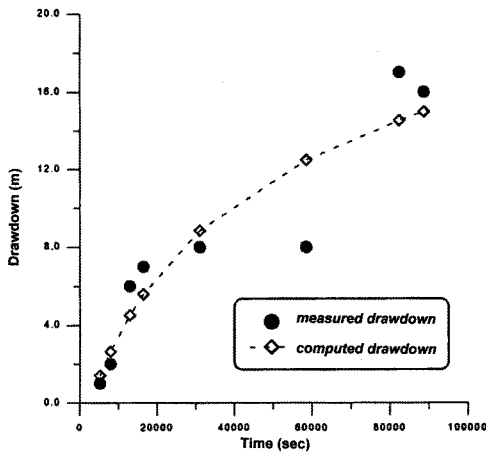


Fig. 14. Comparison between observed and computed groundwater head (No. 7 hole).

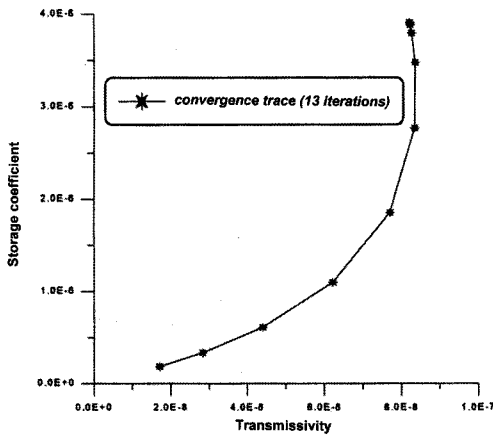


Fig. 15. Convergence process of parameters (No. 7 hole).

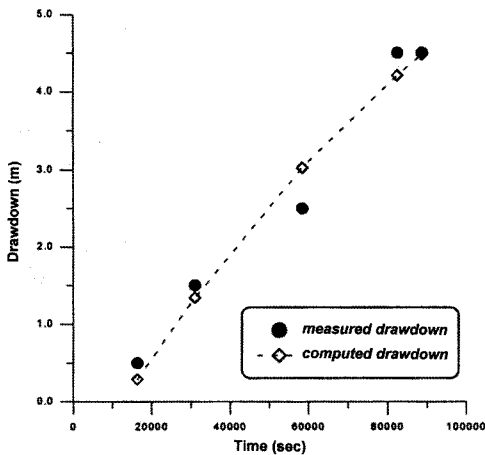


Fig. 16. Comparison between observed and computed groundwater head (No. 8 hole).

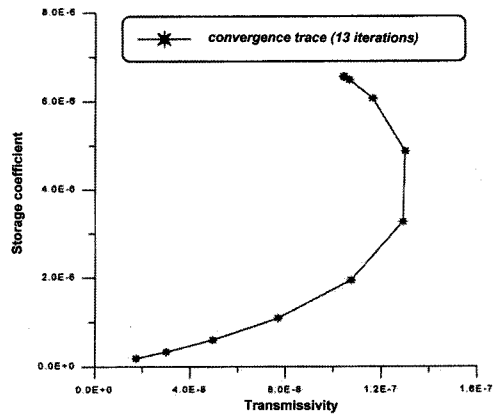


Fig. 17. Convergence process of parameters (No. 8 hole).

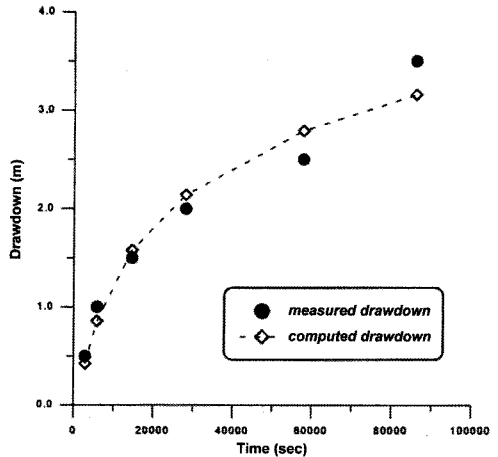


Fig. 18. Comparison between observed and computed groundwater head (No. 9 hole).

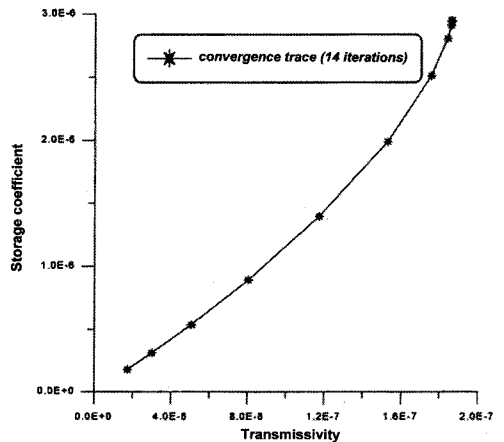


Fig. 19. Convergence process of parameters (No. 9 hole).



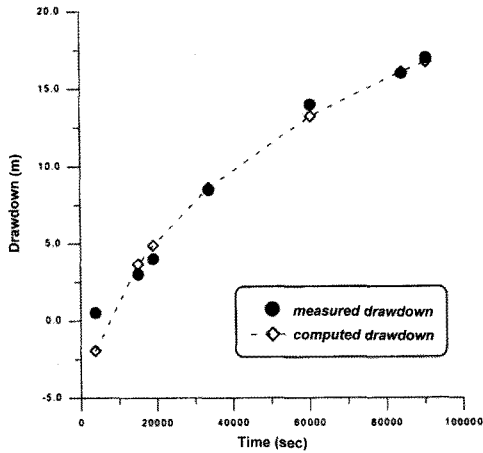


Fig. 20. Comparison between observed and computed groundwater head (No. 10 hole).

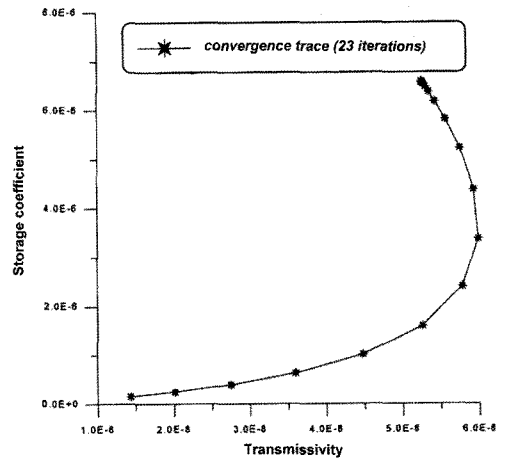


Fig. 23. Convergence process of parameters (No. 11 hole).

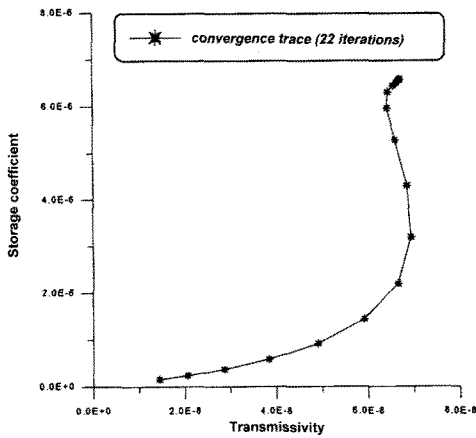


Fig. 21. Convergence process of parameters (No. 10 hole).

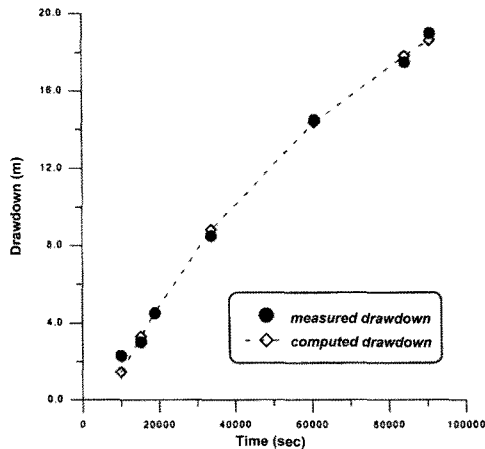


Fig. 22. Comparison between observed and computed groundwater head (No. 11 hole).

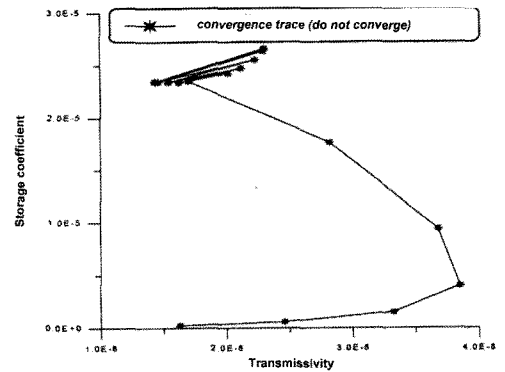


Fig. 24. Convergence failure due to improper selection of damping parameter at No. 4 hole ( $\rho = 0.8$ ).

입하여 매개변수 변화폭을 반복계산수에 따라 유연하게 변화시켜가며 수렴을 촉진시켰으며, 이 경우 반복계산수가 현저히 감소하는 결과를 보였다. 예를들면 제6관 측정에서  $\rho = 1.0$ 으로 계산하면 23회의 반복계산이 이루어지나  $\rho = 0.8$ 인 경우는 Fig 13에서와 같이 15번의 반복계산으로 수렴이 이루어짐을 볼 수 있다. 또한 수렴불가능이 나타나는 경우에 대해서도 감쇠변수로 수렴을 가능케 할 수 있었는데, 제4관측공의 경우 감쇠변수  $\rho$ 를 0.8로 한 경우 40번까지의 반복계산에서도 수렴하지 않는 결과를 보였으나(Fig. 24),  $\rho = 0.47$ 가 되면 Fig. 9에서와 같이 28번째의 반복계산에서 수렴하였다.

위와 같은 매개변수 추정결과로 얻어진 11개 관측공에 대한 수리상수의 평균값과 기존의 도해적 방법(삼림산업, 1993)으로 구한 값을 비교하여 Table 2에 나타내

**Table 2.** Comparison between regression model results and graphical analysis results.

No. of observation holes	Transmissivity ( $m^2/sec$ )		Storage coefficient	
	Regression model results	Graphical analysis	Regression model results	Graphical analysis
#1	1.052E-07	1.9E-07	2.776E-05	2.2E-05
#2	6.345E-08	1.2E-07	1.157E-05	9.6E-06
#3	1.188E-08	1.2E-08	9.967E-07	8.4E-07
#4	1.828E-08	3.4E-08	2.364E-05	3.1E-05
#5	1.675E-08	1.9E-08	2.264E-06	1.7E-06
#6	2.452E-08	3.2E-08	1.120E-05	3.9E-06
#7	8.223E-08	8.2E-08	3.906E-06	3.8E-06
#8	1.041E-07	1.6E-07	6.560E-06	1.8E-06
#9	1.861E-07	1.1E-07	2.947E-06	6.9E-06
#10	6.708E-08	8.1E-08	6.579E-06	5.1E-06
#11	5.250E-08	8.1E-08	6.589E-06	4.5E-06

**Table 3.** Joint confidence intervals for estimated parameters.

No. of observation holes	Transmissivity ( $m^2/sec$ )	Storage coefficient
#1	1.052E-07 $\pm$ 9.298E-08	2.776E-05 $\pm$ 4.806E-06
#2	6.345E-08 $\pm$ 4.035E-08	1.157E-05 $\pm$ 1.950E-06
#3	1.188E-08 $\pm$ 7.363E-09	9.967E-07 $\pm$ 1.280E-07
#4	1.828E-08 $\pm$ 2.489E-08	2.364E-05 $\pm$ 8.775E-06
#5	1.675E-08 $\pm$ 2.460E-08	2.264E-06 $\pm$ 1.597E-06
#6	2.452E-08 $\pm$ 4.033E-08	1.120E-05 $\pm$ 4.300E-06
#7	8.223E-08 $\pm$ 6.958E-08	3.906E-06 $\pm$ 3.380E-06
#8	1.041E-07 $\pm$ 1.310E-07	6.560E-06 $\pm$ 1.719E-06
#9	1.861E-07 $\pm$ 1.052E-07	2.947E-06 $\pm$ 2.735E-06
#10	6.708E-08 $\pm$ 3.671E-08	6.579E-06 $\pm$ 2.374E-06
#11	5.250E-08 $\pm$ 1.048E-08	6.589E-06 $\pm$ 6.809E-07

었다. 관측정 #2, #9번 등에서 다소 차이를 보이고 있으나 이는 자료중 특이하게 범위를 벗어나는 몇 개의 이상치(outlier)가 매개변수에 미치는 영향으로 평가된다.

본 연구에서 개발한 회귀모형은 결과로서의 매개변수의 평균과 분산값을 산정할 수 있으며, 이에 따라 공동 신뢰영역을 구할 수 있으며 그 결과는 다음 Table 3과 같다. 결과적으로 투수량계수는  $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 의 범위이고, 저류계수는  $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 의 범위를 나타내어 기지주변이 저투수 암반의 특성을 잘 나타내고 있다.

## 결 론

지하저장공동의 설계 및 효율적 유지관리를 위해서는 설계전단계에서 공동주위의 대수층 매개변수를 규명하는 과정이 반드시 수행돼야 한다. 이 중 수벽공 주변의 수리지질특성은 향후 공동의 가스 기밀성 유지를 위한 수

치해석시 필수적인 기초자료가 되므로 보다 정확한 매개변수의 산정이 요구된다. 그러나 기존에 널리 사용된 도해적 일치법을 이용할 경우, 육안 오차나 절차상의 오독 등으로 인한 오차가 발생할 수 있으므로 본 연구에서는 비선형 회귀분석을 이용한 자동추정 기법을 적용하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 확립한 매개변수추정 모형인 Theis의 회귀모형은 도해적 과정을 거치지 않으므로 편리하고도 통계학적인 분석이 가능한 장점이 있다고 판단된다.

(2) 회귀모형은 역문제중 간접법에 속하므로 초기치나 수리상수의 변화폭에 민감하며 수렴불가능이 되는 경우도 발생하나 본 연구에서는 초기치에서부터 최적매개변수를 따라가는 수렴과정이 매우 신속함을 확인하였으며, 감쇠변수의 사용으로 수렴성의 증진 및 신속한 수렴을 도모할 수 있었다.

(3) 추정된 수리지질 매개변수는 단일 값이 아닌 공동

신뢰영역을 함께 제시함으로써 매개변수의 가능한 변동 범위를 제시할 수 있는 장점이 있다.

## 사 사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 3단계 연구사업(과제번호 2-2-3)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

- 권오현, 조효섭, 이성수 1994, 경사법에 의한 균질·동방성 대수층의 최적매개변수 결정, 제36회 수공학 연구발표회 논문집, 한국수문학회, 437-442.
- 김철수 1991, 결정질암반에서 지하수유동 연구경향, 지질공학회지, 1(1), 137-145.
- 김치환, 이석천 1992, 국내 원유비축 지하공동의 조사 및 설계사례, 터널과 지하공간, Vol. 2, 190-198.
- 삼립산업(주) 1993, B기지 수밀성 확보를 위한 수벽공 기능 검토 보고서.
- 서정규 1993, 지하저유공동의 지하수 관리, 미간행 발표물, 한국석유개발공사
- 정일문, 조원철, 이원환, 허준행 1994, 지하수 흐름의 회귀모형에 대한 통계학적 분석, 1994년도 학술발표회 개요집, 대한토목학회, 197-200.
- 정일문, 허준행, 조원철 1995, 비누수 피압대수층의 매개변수 결정을 위한 회귀모형의 적용, 대한토목학회 논문집, 15(6), 1639-1646.
- 정형식, 이익호 1983, 지하원유비축공동에서 Water Curtain의 효율성에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 3(3), 87-94.
- Cooley, R. L. 1977, A method of estimating parameters and assessing reliability for models of steady-state groundwater flow, 1-theory and numerical properties, Water Resources Research, 13(2) 318-324.
- Cooley, R. L. and Hill, M. C. 1992, A comparison of three Newton-like nonlinear least squares methods for estimating parameters of groundwater flow models, Computational Methods in Water Resources IX, Vol. I, 379-386.
- Cooley, R. L. and Vecchia, A. V. 1987, Calculation of nonlinear confidence and prediction intervals for groundwater flow models, Water Resources Bulletin, American Water Resources Association, 23(4) 581-599.
- Cooper, H. H., Jr. and Jacob, C. E. 1946, A generalized graphical method for evaluating formation constants and summerizing well field history, Trans. Amer. Geophys. Union 27, 526-534.
- Dawson, K. J. and Istok, J. D. 1991, Aquifer Testing, Lewis Publishers.
- Draper, N. and Smith, H. 1981, Applied Regression Analysis, John Wiley, 709.
- Hartley, H. O. 1961, The modified Gauss-Newton method for fitting of nonlinear regression functions by least squares, Technometrics, Vol. 3, 269-280.
- Hill, M. C. 1992, A computer program for estimating parameters of a transient three dimensional groundwater flow model using nonlinear regression, U.S.G.S. Open File Report 91(484), 358.
- Theis, C. V. 1935, The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, Trans. Amer. Geophys. Union 16, 519-524.
- Yeh, W. W-G. 1986, Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology The inverse problem, Water Resources Research, 22(2) 95-108.
- Yeh, W. W-G. and Tauxe, G. W. 1971, Quasilinearization and the identification of aquifer parameters, Water Resources Research, 7(2) 375-381.

---

2008년 11월 3일 원고접수, 2008년 11월 29일 게재승인

### 정일문

한국건설기술연구원 수문연구실  
411-712 경기도 고양시 일산서구 대화동 2311  
Tel: 031-910-0334  
Fax: 031-910-0251  
E-mail: imchung@kict.re.kr

### 조원철

연세대학교 토목환경공학과  
120-749 서울시 서대문구 성산로 262  
Tel: 02-2123-2802  
Fax: 02-364-5300  
E-mail: woncheol@yonsei.ac.kr

### 김남원

한국건설기술연구원 수문연구실  
411-712 경기도 고양시 일산서구 대화동 2311  
Tel: 031-910-0256  
Fax: 031-910-0251  
E-mail: nwkim@kict.re.kr