

수리전도도의 불확실성을 고려한 확률론적 지하수 유동해석에 관한 연구

류동우^{1)*}, 손봉기²⁾, 송원경³⁾, 주광수⁴⁾

A Study of Probabilistic Groundwater Flow Modeling Considering the Uncertainty of Hydraulic Conductivity

Dong-Woo Ryu, Bong-Ki Son, Won-Kyong Song and Kwang-Soo Joo

Abstract MODFLOW, 3-D finite difference code, is widely used to model groundwater flow and has been used to assess the effect of excavations on the groundwater system due to construction of subways and mountain tunnels. The results of numerical analysis depend on boundary conditions, initial conditions, conceptual models and hydrogeological properties. Therefore, its accuracy can only be enhanced using more realistic and field oriented input parameters. In this study, SA(simulated annealing) was used to integrate hydraulic conductivities from a few of injection tests with geophysical reference images. The realizations of hydraulic conductivity random field are obtained and then groundwater flows in each geostatistically equivalent media are analyzed with a numerical simulation. This approach can give probabilistic results of groundwater flow modeling considering the uncertainty of hydrogeological medium. In other words, this approach makes it possible to quantify the propagation of uncertainty of hydraulic conductivities into groundwater flow.

KeyWords simulated annealing, hydraulic conductivity, uncertainty, groundwater flow modeling

초 록 도심지 지하절 및 산악 터널의 굴착과 관련한 지하수 유동 해석 및 환경 영향 평가를 위해 3차원 유한 차분 모형인 MODFLOW가 널리 이용되고 있는 추세이다. 수치해석 결과는 일반적으로 경계조건, 초기조건, 개념 모형 설정 및 수리 물성치 등에 의해 차이가 난다. 따라서 대상 해석 영역의 실제 상황을 반영한 지하수 모델링은 매우 중요하다. 일반적으로 지하수 유동 해석과 관련한 많은 경우, 경계 조건 설정보다는 수리 물성치의 결정에 어려움이 많으며, 이는 제한된 조사나 실험 결과로부터 전체 대상 영역의 매질을 결정하기 때문이다. 본 연구에서는 모의 담금질(SA : Simulated Annealing) 기법을 활용하여 지반 조사 자료, 특히 물리탐사 결과 이미지와 제한된 개소의 수리 전도도 자료를 병합하여 수리 매질들을 실현시켰다. 지구통계학적 등가 매질들을 대상으로 하여 수리 전도도의 불확실성을 고려한 지하수 유동 해석을 수행하였다. 지하수 환경 영향 평가 및 터널 내 유입 지하수 문제에 있어 수리 전도도의 불확실성을 고려함으로써 확률론적 접근이 가능하였다.

핵심어 모의 담금질, 수리전도도, 불확실성, 지하수 유동 해석

1. 서 론

도심지 및 산악 터널의 시공과 관련하여 지하수 문제는 시공 과정에서의 안정성 뿐만 아니라 지하수 수계의 변동으로 인한 수리 환경 측면에서 그 중요성이 점점

되고 있다. 따라서 터널 굴착으로 인한 터널 내 유입 지하수량 및 인근 지역의 지하수 환경 영향 평가를 위해 다양한 지하수 수치해석이 수행되고 있으며, 특히 유한차분 모형인 MODFLOW가 널리 이용되고 있는 실정이다. 암반 내 지하수 유동은 일반적으로 암반 파쇄대를 통해 지하수 유동이 이루어지는 점을 고려할 때, 연속적 모형인 MODFLOW를 이용하는데 있어 개념적인 무리가 있을 수 있지만, 목적에 따라 연속체 모형을 사용하는 것이 용인될 수 있다(김강주, 1999).

일반적으로 수치해석, 특히 지하수 유동 해석의 경우 경계조건, 초기조건, 개념모형 그리고 매질 물성의 결정은 해석 결과의 신뢰성에 영향을 미친다. 개념모

¹⁾ 한국지질자원연구원 연수연구원

²⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

³⁾ 한국지질자원연구원 책임연구원

⁴⁾ 현대건설

* 교신저자 : ryurock@empal.com

접수일: 2005년 4월 11일

심사 완료일: 2005년 4월 22일

델 설정의 경우, 그 복잡성 정도에 따라 취득되는 정보의 신뢰성 및 해석 시간의 소요 정도 등에 있어 큰 차이를 보인다(김강주, 1999). 이와 같이 개념 모델 설정 단계에 있어 개념모델에 따른 해석결과와의 비교 검토 및 효율적인 개념모델의 구성과 관련한 연구가 수행되었다(최미정 등, 2004). 국내 대수층의 성격 규명에 있어 논란이 남아 있으나, 이는 전적으로 지질 로깅 및 지하수 위 자료에 근거한 논리적 판단이 요구되는 부분이다.

수리전도도의 분포 추정과 관련한 연구들은 지구통계학적 추정기법인 크리깅 추정자들을 이용한 내삽 및 외삽에 기초하여 이루어졌다(조웅현, 1994; Aboufrassi and Marino, 1984; Datta-Gupta et al., 1995). 또한, 다양한 크리깅 기법을 활용하여 지하수위 분포를 추정하는 연구도 있었다(정상용, 1993). 하지만, 크리깅 추정자는 MSE(mean square error)의 측면에서 최적의 추정치를 제공한다는 의미이며, 공분산 혹은 변동도와 같은 공간 변화성 모델의 재생성은 짧은 이격거리에서 오차를 보인다. 또한, 추정 대상 변량이 편미분 방정식의 변수로 들어갈 경우 곡선화 영향(smoothing effect)으로 인해 오차가 커지게 되는 단점이 있다. 특히, 크리깅 추정자에서 제공되는 추정 분산은 변량의 불확실성에 대한 정량적 정보를 제공하는데 한계가 있다.

절리 암반에서의 지하수 해석 방법은 크게 세 가지 모델로 구분할 수 있다. EPM(equivalent porous medium) model, DF(discrete fracture) model, DP(dual porosity) model(Bear 등, 1993; Long et al., 1982; Ki-Bok et al., 2002). 지하수 유동 경로로서 암반 불연속면을 고려하는 방법들은 일반적으로 그 수가 적은 대규모의 단층 등을 대상으로 하는 경우에 효과적이지만, 대상 영역이 넓고, 암반 내 존재하는 불연속면들에 대한 정보가 충분하지 않은 경우 해석의 효율성과 정확성이 기대에 미치지 못 하는 경우가 많다. 본 연구에서는 현장 상황을 고려하여 연속체 모델을 선택하여 지하수 유동해석을 수행하였다.

우리나라 대부분의 지층은 수리지질학적으로 불균질·이방성 대수층으로 구성되며, 이에 따라 제한된 매질의 정보로부터 발생할 수 있는 해석 결과의 불확실성을 평가하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 매질이 가지는 수리적 특성의 불확실성을 평가하기 위해 추계학적 최적화기법인 모의 담금질(simulated annealing)기법을 적용하여 수리전도도의 분포에 대한 실현(realization)들을 얻었다. 이를 대상으로 하여 연속체 모델인 MODFLOW를 활용한 수리해석을 수행하였고, 터널 굴착으로 인한 터널 내 지하수 유입량 및 인근 지역의 지하수위 강하에 대한 확률론적 결과를 얻을 수 있었다.

2. 모의 담금질 기법의 이론과 알고리즘

2.1 최적화 기법

모의 담금질 기법은 GA(genetic algorithm), ANN(artificial neural networks), 반복 탐색법(iterated search : random search와 gradient methods의 결합된 방법) 등과 같이 최적화 문제(optimization problem)의 해를 찾기 위해 고안된 물리적 어닐링 과정의 상사에 기초한 방법이다(Kirkpatrick, 1980). 모의 담금질 기법은 금속의 담금질(annealing)과 같은 물리적 과정의 상사로서 Table 1과 같이 비교할 수 있다. 물리적 시스템에서 목적함수는 금속의 격자에너지(lattice energy)이며, 각 매개변수들은 구성 원자들의 상대 위치가 된다. 이 목적함수는 원자들이 일정한 결정구조 내에 배열될 때 전체적으로 최소치에 도달한다. 금속이 충분히 서서히 냉각될 때 이와 같은 상태에 도달할 수 있다. 국부적으로 최적화된 원자들의 결합들이 담금질 과정에서 붕괴될 수 있는데, 이는 시스템의 열 에너지가 에너지 장벽(energy barrier)을 넘을 수 있기 때문이다. 이와 대조적으로 급냉할 경우, 담금질시효(quenching ageing)로 인한 비결정화 혹은 부분 결정구조를 형성하게 된다. 이는 전체 최소치로부터 어떤 거리에 위치하는 국부 최소치에서 주로 발생하게 된다.

매개변수 p_1, p_2, \dots, p_i 에 대해 최소화시키고자 하는 목적함수 O 를 고려하자. 모의 담금질(simulated annealing)에서는 목적함수 O 의 매개변수들을 무작위로 변동시킨다. 각 시간 단계, $t \rightarrow t+1$,에서 하나의 매개변수를 한번 변화시킬 수 있으며, 이는 목적함수 $O_t \rightarrow O_{t+1}$ 의 변화를 일으킨다. $O_{t+1} \leq O_t$ 이면 이 변화를 채택하게 된다. 반면 $O_{t+1} > O_t$ 이면 이 변화에 대한 채택 및 기각 결정은 확률 P_a 에 따라 무작위로 이루어진다. 이에 대한 확률은 다음과 같다.

$$P_a = e^{-\frac{O_t - O_{t+1}}{c}} \quad (1)$$

Table 1. Analogy between physical annealing and simulated annealing

Physical annealing	Simulated annealing
Thermodynamic simulation	Optimization w/ constraints
States of system	Solutions
Energy of a state	Cost of a solution
Change of state	Neighbor solution
Temperature	Control parameter
Quenching	Local minimum
Min. Energy	Min. Cost

상기 식은 Metropolis criterion으로서, 모의 담금질 기법의 중심이 된다. 채택될 확률 P_a 는 매개변수 c 에 의해 결정된다. 담금질과 상사하여 고려할 때, c 는 시스템의 온도에 해당한다. c 를 증가시키수록 특정 변화를 채택할 가능성을 높일 수 있다.

c 가 주어졌을 때, 식 (1)에 의해 매개변수를 무작위로 수정함으로써 Markov 체인을 구성한다. 새로운 Markov 체인은 시스템을 냉각함, 즉 c 를 낮춤으로써 시작될 수 있다. 특정 온도로 냉각된 후, 시스템은 Metropolis criterion에 의해 조절되는 많은 전이과정들을 통해 열 평형상태에 도달하게 된다. 이는 특정 에너지 상태에 도달할 확률은 Boltzmann 분포를 따른다(Aarts and Korst, 1989). 모의 담금질의 각 Markov chain이 평형상태에 도달하는 데 걸리는 시간(전이횟수)은 온도에 반비례한다. 모의 담금질의 목적은 연속적으로 보다 낮은 온도에서 Markov chains이 평형상태에 있도록 하는 과정을 통해 시스템을 얻는 것이며, 이 과정은 더 이상 변화가 채택되지 않도록 시스템이 충분히 냉각될 때까지 계속된다. 실제 적용 시, 좋은 해의 조건은 다음과 같다.

1. c 는 시스템이 모의 담금질 초기에 국소 최소치로부터 벗어날 수 있도록 충분히 높은 값을 가져야 하며, 너무 빨리 낮아지지 않도록 해야 한다.
2. 각 Markov chain은 평형상태에 가까워질 수 있도록 충분히 길어야 한다.

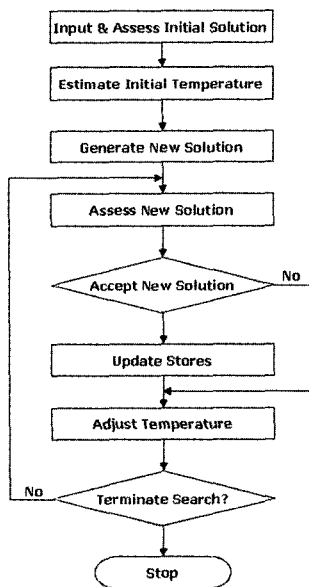
3. 시스템이 최적치에 도달하도록 충분히 Markov 체인들을 형성시킨다.

2.2 알고리즘

온도 c 는 너무 빨리 낮출 경우 국부 최소치에 빠지게 되어 수렴하지 않을 수 있으며, 너무 천천히 낮출 경우 수렴에 걸리는 시간이 너무 길어질 수 있다. 따라서 온도 c 을 어떻게 낮추는지의 문제는 매우 중요하며, 이를 냉각 스케줄(annealing schedule)이라 한다. 수렴성을 보장하는 냉각 스케줄에 대한 수학적 이론들이 있으나, 이 경우 실제 적용 시 수렴에 소요되는 시간이 매우 길어진다 (Aarts and Korst, 1989). 따라서 경험적 방법이 현실적 대안이 될 수 있다. 초기 온도 c_0 를 높게 설정하고, 충분한 변동이 채택되어진 횟수가 기설정된 K_{accept} 을 넘어서거나, 혹은 시도된 변동횟수가 기설정된 임계횟수 K_{max} 에 도달할 때마다 감쇠 인자 λ 을 곱해서 온도를 낮춘다. 이와 같은 과정은 목적함수가 충분히 작은 값을 가질 때 멈춘다.

일반적으로 최적화 알고리즘은 탐색과 활용기법으로 구성되며, 전자는 미지의 영역을 탐색하는 것을 말하며, 후자는 보다 나은 값을 찾기 위해 이미 탐색했던 지점들에서의 기지 값들을 활용하는 것을 의미한다. 기본적인 모의 담금질 기법의 알고리즘은 Fig. 1과 같다.

수리전도도 확률집합체의 실현에 활용된 모의 담금질 기법의 과정은 다음과 같이 요약할 수 있다.



Begin

INITIALIZE(i_{start}, c_0, L_k)

$k = 0;$

$i = i_{start}$

Repeat

For $i = 1$ to L_k do

Begin

GENERATE(j from s_i);

If $f(j) \leq f(i)$ then $i = j$

else

if $\exp((f(i) - f(j))/c_k) > \text{random}[0, 1)$ then $i = j$

End;

$k = k + 1;$

CALCULATE(L_k)

CALCULATE(c_k)

Until (stop_criterion)

End;

Fig. 1. The structure of basic simulated annealing algorithm

① 모집단 분포로부터 각 격자점의 난수를 부여함으로써 초기 3차원 수치 모델을 생성한다. 제 2 변량(탄성과 속도)을 이용한 cosimulation의 경우, 보정 산점도(calibration scatterplot)로부터 얻은 적절한 조건부 분포로부터 난수를 부여한다.

② 목적함수를 기설정된 공간 모델과 그 실현의 결과치의 이격도로서 정의한다.

③ 무작위로 선택된 위치에 새로운 값을 할당함으로써 결과 영상을 다시 변동시킨다.

④ 변동(열 진동)은 항상 목적함수가 감소할 때 받아드린다. 목적함수 값이 증가하면 특정 확률로서 받아드린다(Boltzmann 확률분포에 의한 확률부여 - Metropolis 알고리즘).

⑤ 변동 과정은 의도하지 않은 자리교환(swaps)을 허용할 확률이 줄어들 동안 목적함수가 작은 값을 가질 때까지 계속 반복 수행된다.

2.3 목적함수

수리전도도 확률집합체(random field)의 실현들을 얻기 위해 적용한 모의 담금질 기법에서 활용한 목적함수들은 Table 2와 같다.

최종 목적함수 O 는 C 개 구성 요소들의 가중치 합으로 구성되며, 각 요소들은 상기 제시한 각 목적함수들이 될 수 있다.

$$O = \sum_{c=1}^C \omega_c O_c \tag{2}$$

여기서, ω_c 와 O_c 는 각각 가중치와 구성 목적함수이며, O 는 구성 목적함수의 개수이다.

각 가중치는 전체 목적함수에 대한 각 구성 목적함수의 기여도를 균일하게 할 수 있다. 변동을 받아드릴 것

인지 기각할 것인지를 판단하는 모든 기준은 목적함수의 변화량에 기초한다:

$$\Delta O = O_{t+1} - O_t \tag{3}$$

각 구성 목적함수로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta O = \sum_{c=1}^C \omega_c [O_{c,t+1} - O_{c,t}] = \sum_{c=1}^C \omega_c \Delta O_c \tag{4}$$

가중치 $\omega_c, c=1, \dots, C$ 는 목적함수 ΔO 의 변화량에 각 구성 목적함수가 동일하게 기여하도록 결정된다. 즉, 각 가중치 ω_c 는 구성 목적함수 평균변화량의 절대치에 반비례한다.

$$\omega_c = \frac{1}{|\Delta O_d|}, c=1, \dots, C \tag{5}$$

실제의 경우, 각 구성 목적함수의 변화량의 평균치, $|\Delta O_d|$ 는 분석적으로 계산할 수 없지만, 독립적인 변동으로 인한 평균변화량을 산정함으로써, 수치적으로 근사시킬 수 있다.

$$|\Delta O_d| = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |O_c^{(m)} - O_d|, c=1, \dots, C \tag{6}$$

3. 수리전도도 확률집합체

해석 대상지역에서 수행된 수압시험은 공간 이격 거리가 상당히 크고, 제한된 개소에서의 시험 자료만으로 해석 대상 영역의 수리전도도 분포를 파악하는데 한계가 있다. 따라서 수리전도도를 하나의 확률과정(stochastic process)으로 간주하고, 기설정된 통계 모델 및 기지의 수리전도도 값들을 제약조건으로 하여 최적화를

Table 2. Summary of various objective functions for simulated annealing(Deutsch and Journel, 1998)

Statistics	Objective functions
Histogram	$\sum_z [F^*(z) - F(z)]^2$, where F^* is a conditional cumulative distribution function of simulated realization.
Variogram	$\sum_h \frac{[\gamma^*(h) - \gamma(h)]^2}{\gamma(h)^2}$, where γ^* is a variogram of simulated realization.
Indicator variogram	$\sum_{j=1}^{n_j} \sum_k \frac{[\gamma_j^*(h_i) - \gamma_j(h_i)]^2}{\gamma_j(h_i)^2}$, where γ_j^* is an indicator variogram of simulated realization in class j .
Correlation coefficient	$[\rho^* - \rho]^2$, where ρ^* is a correlation coefficient between primary and secondary variable of simulated realization.
Conditional distribution	$\sum_{i=0}^{n_i} \sum_{j=0}^{n_j} [f_i^*(j) - f_i(j)]^2$, where f_i^* is a conditional distribution of the primary variable given that the collocated secondary variable is in class i .

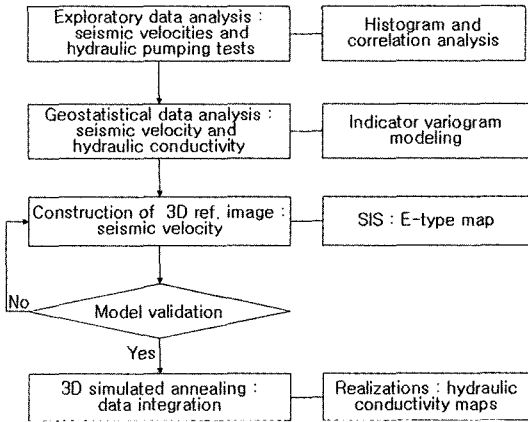


Fig. 2. Flow chart for the construction of hydraulic conductivity realizations

수행하였다. 전체적인 수리전도도 확률집합체를 생성시키기 위한 작업 흐름도는 Fig. 2와 같다. 2차 변량으로서 물리탐사 자료를 참조영상(reference image)으로 활용하였는데, 이는 물리탐사로부터 취득된 탄성과 속도 영상은 전체를 이루는 자료(exhaustive data)로 간주할 수 있기 때문이다. 최적화된 수리전도도 분포를 실현시키기 위해 모의 담금질 기법을 활용하여 1차 변량인 수리전도도를 2차 변량인 물리탐사 자료와 함께 cosimulation을 수행하였다.

본 과업구간에 취득된 수리전도도 및 물리탐사 결과 등 지구통계학적 모델링에 사용된 자료의 통계 분석 결과는 Fig. 3-5와 같으며, 이를 토대로 모의 담금질 기법에 사용할 목적함수들을 설정하였다. 탄성과 탐사 결과로부터 나온 P-파 속도와 수리전도도의 상관성은 -0.437로 나타났으며, 이들의 보정 산점도(calibration scatterplot)

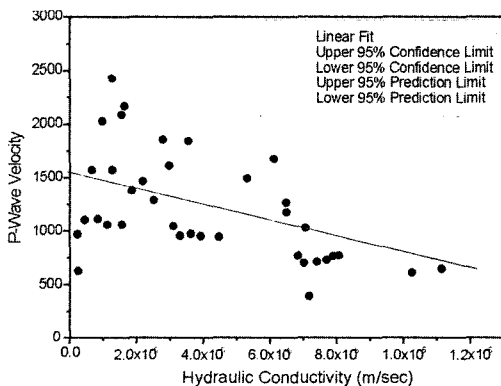


Fig. 3. Correlation between hydraulic conductivity and seismic wave velocity

는 조건부 분포로 활용하였다. 수압시험으로부터 나온 수리전도도의 지시 변동도 모델링 결과, 각 cutoff별로 영향범위 80-100 m 인 지수함수 모델로 정의하였다 (Fig. 4). 전체적인 수리전도도의 분포는 양봉분포를 보였으며, 이는 풍화토층인 최상부 지층과 하부 풍화암 및 연암층의 수리전도도 차이가 비교적 크게 나타났기 때문인 것으로 파악되었다(Fig. 5).

지하수 수리 해석을 위해 설정된 층들 중 터널을 포함하는 층을 포함한 상부 세 개 층에 대해 수리전도도 분포를 모사하였다. Fig. 6은 수리전도도 확률집합체의 30번 실현들 중 한 예이다. 각 층별 수리전도도 실현들의 분포 특성 및 통계량은 Fig. 7 및 Table 3과 같다. 전체적인 분포는 실제 측정된 수리전도도의 양봉분포

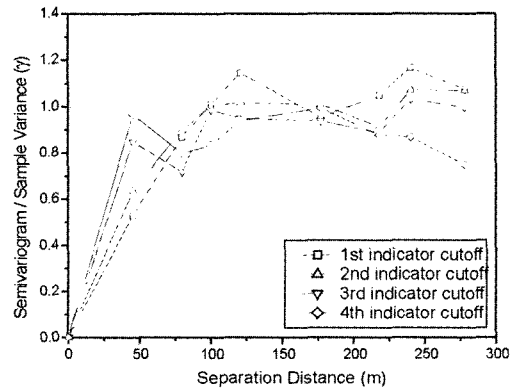


Fig. 4. Experimental variogram of hydraulic conductivity

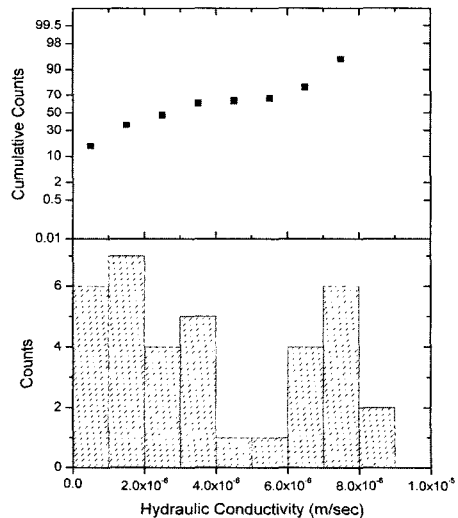


Fig. 5. Statistical distribution of field hydraulic conductivity

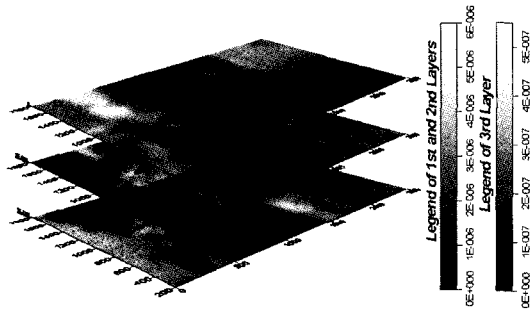


Fig. 6. One of 30 realizations of hydraulic conductivity random field

특성과 유사하며, 이는 모의 담금질 기법의 목적함수에 내재되어 있는 제약조건들 중 기설정된 분포 특성이 반영되었기 때문이다. 실제 해석 격자망 내의 첫 번째와 두 번째 층은 풍화토 및 풍화암이 혼재되어 있는 지층에 해당하며, 세 번째 층은 풍화암 및 연암이 혼재되어 있는 지층에 해당된다. 수리전도도 값의 통계량은 첫 번째 및 두 번째 층의 경우 평균 2.1×10^{-6} m/sec 및 표준편차 1.5×10^{-6} m/sec이며, 세 번째 층의 경우 평균 2.2×10^{-6} m/sec 및 표준편차 1.4×10^{-7} m/sec이다.

4. 지하수 모델 해석

해석 영역은 지하철 정거장 및 암반 터널 노선을 중심으로 가로×세로방향으로 2500 m × 2000 m의 크기로 설정하였다. 해석영역을 20 m × 20 m의 정방형 셀로 분할하였으며, 관정을 설치할 조경원 부근과 터널 노선 격자망을 세분화하였다. 터널 노선 주변의 한 셀의 크기는 20 m × 5 m로 설정하였으며 조경원 부근은 10 m × 10 m로 설정하였다. Fig. 8은 해석 영역 3차원 지형을 보여주고 있다. 풍화토 및 풍화암이 혼재되어 있는 지층을 제 1층과 2층으로 설정하였으며, 터널이 통과하는 구간으로 풍화암 및 연암이 혼재되어 있는 지

Table 3. Statistics of hydraulic conductivities in each layer

Layers	Hydraulic conductivity(m/sec)	
	Mean	Standard deviation
1st layer	2.12E-6	1.48E-6
2nd layer	2.10E-6	1.49E-6
3rd layer	2.28E-7	1.39E-7

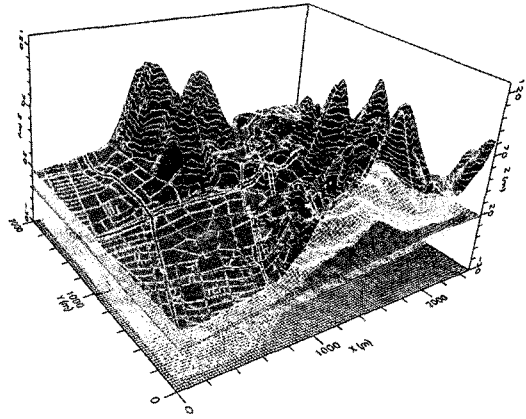


Fig. 8. 3D topography of a simulated domain

층을 제 3층과 4층으로 나누었고, 마지막으로 경암을 5층으로 설정하였다.

본 연구에서 사용한 MODFLOW는 식 (7)과 같이 포화된 다공질 매체에서의 비압축성 유체의 유동식을 이론에 기초하여 유한차분법(finite difference method)을 사용하고 있다(Waterloo hydrogeologic, 2003).

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = 0 \tag{7}$$

여기서 K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} 는 x, y, z 좌표축에 따른 수리

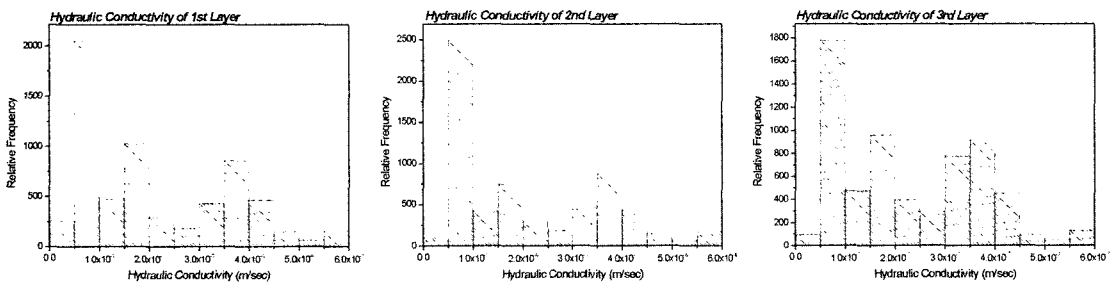


Fig. 7. Histograms of realizations in each layer

전도도이고, W 는 시스템 내로 유입 또는 유출되는 단위 체적당 플럭스(flux) 그리고, S_s 는 비저류계수를 나타낸다. 본 연구에서 비저류계수는 $10^{-5} m^{-1}$, 유효 공극률은 0.2로 가정하였다.

4.1 경계조건

본 해석에서는 지반조사 자료 및 관정의 지하수위 자료들에 기초하여 경계조건들을 변경시키면서 정상상태 지하수위를 보정하였다. 해석 영역에 사용된 수리전도도는 실현된 수리전도도 확률집합체 중 하나의 결과를 이용하였다. Fig. 9는 해석에 사용된 주요 경계조건을 나타낸다.

일반적으로 고정 수두 경계(constant head boundary)는 대상영역 내의 수위변화를 일으키는 경계조건들의 영향권 밖이라고 판단되는 대상영역의 지형경계 등에 많이 사용되는 조건으로서, 지하수위가 안정적인 구간

에 적용할 수 있다. 해석 영역의 좌측과 좌측 상부는 지형의 고도변화가 작고 평지가 지속되므로 고정 수두(constant head)로 간주할 수 있으며, 모델의 중앙의 상부지역은 산악으로부터의 급격한 지형변화로 인해 지하수 유동이 안정적으로 확보된다고 판단되어 고정 수두 경계로 가정하였다.

해석 대상지역의 경우 높은 산악지역의 고도가 120 m 까지 이르는 복잡한 지형을 이루고 있다. 산악지역의 경우 지하수가 산악경계지역을 넘어서 유동할 수 없으므로 광역적 흐름의 분수령을 따라 비유동 경계(no flow boundary)를 가정하였다. 또한, 산악지역을 해석영역에 포함시킬 경우, 급격한 지형변화로 인해 안정적인 지하수 유동 해석이 불가능하므로 고도 40 m 이상의 급격한 지형변화를 갖는 산악지역을 모두 비유동 경계조건으로 처리하였다.

정상류해석으로부터 해석 영역에 산정한 지하수계의 경계 조건 및 수리물성치의 타당성을 검토하기 위해 해석결과로부터 나온 관정의 지하수 수위와 실제 해석 대상지역 관정의 지하수 수위에 대한 통계적 분석을 수행하였다(Fig. 10). 관측된 지하수위 값과 해석된 지하수위 값에 대한 신뢰도를 평가하기 위하여 RMS 오차(root mean square error)를 사용하였으며 해석 지역의 RMS 오차는 3.0%로 그 결과 수리해석에 사용된 수리물성치가 타당하였음을 확인할 수 있었다. Fig. 11는 해석 지역의 지하철 정거장 및 터널 굴착 전 자연 상태에서의 지하수위 등고선도로, 터널 굴착 전 정상상태의 지하수위 값과 지하수 흐름은 지형고도에 지배되고 있음을 알 수 있으며, 터널 노선을 따라 모델 우측에서 좌측으로 지하수 흐름이 유도되고 있다.

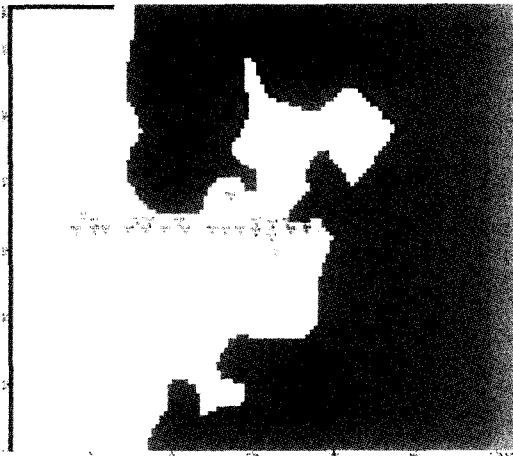


Fig. 9. Boundary conditions for groundwater modeling

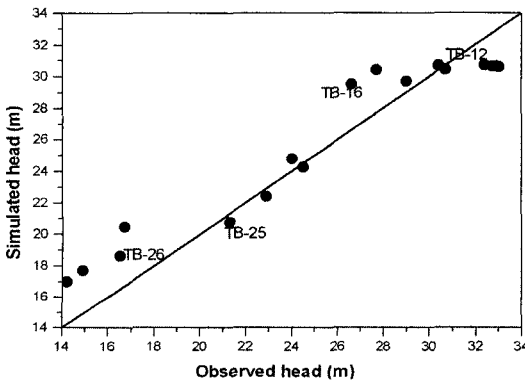


Fig. 10. Observed and simulated groundwater levels

4.2 굴착에 따른 터널 내 통계적 유입량 예측

터널 굴착에 의한 부정류(transient) 해석을 수행하기 위하여 정상상태 해석의 수위 분포 결과를 초기 수위로 가정하였으며, 추계학적 최적화기법인 모의 담금질 기

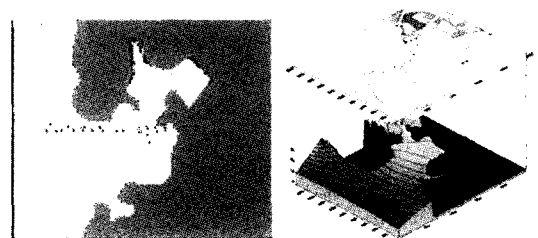


Fig. 11. Head distribution from steady state groundwater modeling

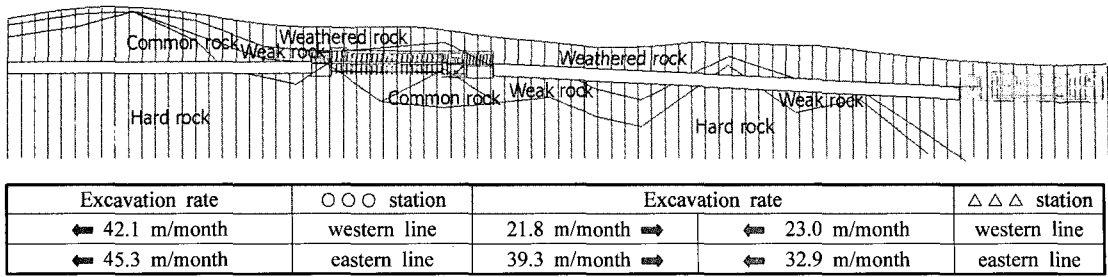


Fig. 12. Stations and tunnels excavation schedule

법으로 실현된 수리전도도 결과에 대하여 각각 30번의 부정류 해석을 수행하였다. 지하철 노선을 따라서 배출 경계(drain boundary)를 가정하였고, 해석으로부터 각 공사 진행에 따른 해석 영역의 수위변화 양상 및 조경 원 내에 관정을 설치하여 지하수 수위강하(drawdown)를 확률론적으로 예측하였다.

굴착된 터널의 형상은 유한차분법을 사용하는 MODFLOW의 제약으로 정방형의 형상을 가정하였다. 정거장 및 터널 굴착과정은 Fig. 12와 같다. 부정류 해석 단계는 공사 진행에 기초하여 모델 내의 굴착의 경우 총 굴착기간이 개착식 구간(정거장) 2년과 NATM(New Austrian Tunneling Method) 터널 공사 기간 15개월일 때(상선 9개월, 하선 15개월), 상선의 경우 개착부(정거장) 중심으로 1/3굴착(3개월, 하선 1/5굴착), 상선의 2/3굴착(6개월, 하선 2/5굴착), 상선 터널 관통(9개월, 하선 3/5 굴착), 하선 4/5굴착(12개월), 하선 터널 관통의 5단계로 나누어 모사하였다.

지반에 정거장 및 터널이 굴착되면 정상상태의 수두차가 거의 없는 유동 상태에서 굴착으로 인해 굴착 구간 경계부와의 급격한 수두차가 발생하며, 이로 인하여 지하수가 빠른 속도로 터널 내부로 유입된다.

굴착 구간의 경계를 모사하는 배출 경계의 컨덕턴스

(conductance)는 굴착 주변 지역의 대수층에서 터널 내로 지하수가 유입되는 용이성을 나타내는 값이다. 굴착 구간 내로의 지하수 유입은 컨덕턴스와 굴착 내부와 외부의 수압 차이에 비례하여 발생한다.

본 연구에서는 배출 경계의 컨덕턴스는 각 굴착단계 구간별로 터널 굴착 중 1 m²/day로, 터널 완성 후 유지기간 동안 터널의 하부는 터널 라이닝 효과를 고려하여 80% 감소시킨 0.2 m²/day로, 터널의 상부는 그라우팅과 터널 라이닝 효과를 고려하여 90% 감소시킨 0.1 m²/day로 가정하였다(이병대 등, 2003).

모의 담금질 기법으로 발생시킨 30번의 수리전도도 분포에 대하여 부정류 해석을 수행한 결과는 다음과 같다. 터널내로 유입되는 지하수량은 개착식 정거장 완료 시점인 730일(2년) 후 ○○○ 정거장으로 평균 0.914 m³/min/km 최대 0.949 m³/min/km, △△△ 정거장으로 평균 0.626 m³/min/km 최대 0.686 m³/min/km이다. 상선 터널 관통 완료 시점인 1000일 후 상선 터널의 지하수 유입량은 평균 0.314 m³/min/km 최대 0.345 m³/min/km이고, 하선 터널의 지하수 유입량은 ○○○ 정거장 시점 방향으로 평균 0.286 m³/min/km 최대 0.327 m³/min/km로 추정되었다. 터널이 완공된 1185일 후 상선 터널 내의 지하수 유입량은 평균 0.102 m³/min/km 최

Table 4. Groundwater discharge into tunnels at each construction stage

	Elapsed time(days)	Status of construction		Discharge(m ³ /min/km)		
				mean	95 percentile	maximum
Stations	730	completion of excavation	○○○	0.914	0.938	0.949
			△△△	0.626	0.677	0.686
Tunnels	1000	under tunneling	eastern	0.314	0.343	0.345
			western1	0.286	0.317	0.327
			western2	0.251	0.289	0.294
	1185	completion of grouting	eastern	0.102	0.112	0.113
			western	0.317	0.345	0.346
	2640	after completion of tunneling	eastern	0.103	0.105	0.106
western			0.092	0.097	0.098	

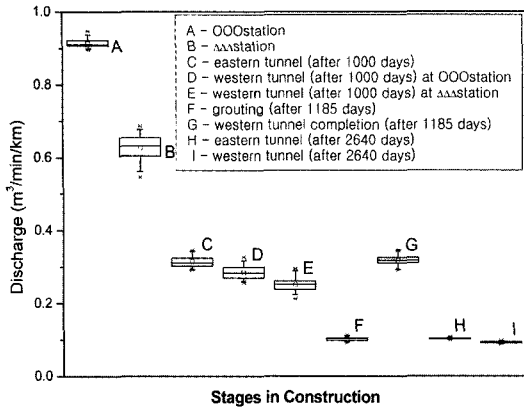


Fig. 13. Box plot of groundwater discharge into tunnels at each construction stage

대 0.113 m³/min/km, 하선 터널 내의 지하수 유입량은 평균 0.317 m³/min/km 최대 0.346 m³/min/km로 추정되었다. Table 4는 30번의 부정류 해석 결과로부터 구한 각 시공 단계별 터널 내 평균 유입량과 95번째 분위 수 값을 나타낸다. Fig. 13은 시공 단계에 따른 터널 내 유입량을 box plot으로 나타내었고, 박스의 하부와 상부는 각각 제 1 사분위수(first quartile)와 제 3 사분위수(third quartile)를 나타내고 있다.

4.3 굴착에 따른 통계적 지하수위 변화 예측

각 시공 단계별 굴착에 따른 노선 주변의 지하수위 변화와 지하수 유동을 모사하였으며, 터널 노선에서 모델 상부로 120 m 떨어진 조정원 내에 관정을 설치하고 지하수 수위강하를 통계적으로 분석하였다. 굴착되는 터널 노선으로부터 관정까지의 거리와 관정 주변의 질리 연결도 등 부정류 상태에서 예측된 지하수위 강하는 관정의 위치에 따라 달라 질 수 있다. 따라서, 보수적 결과를 얻어내기 위해 상대적으로 지하수위 강하가 클 것으로 예상되는 조정원 내 가장 높은 지점에 관정을

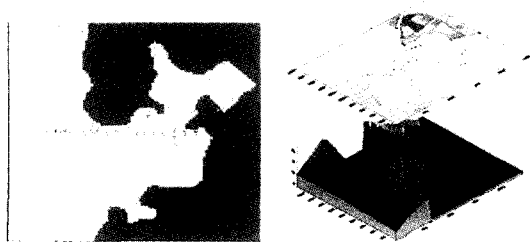


Fig. 14. Head distribution from transient flow simulation upon completion of station excavation(after 730 days)

설치하였다.

Fig. 14는 정거장 굴착이 완료된 730일 후 지하수위 변화 양상을 보여주고 있다. Fig. 14의 경우 ○○○정거장과 △△△정거장의 개착터널 굴착에 따라 정거장 주변의 수위가 큰 폭으로 떨어지고 있다. 조정원의 경우 정상류 해석의 초기 수위보다 평균 4.15 m 수위강하가 발생하는 것으로 계산되었다.

Fig. 15는 상선이 관통되는 1000일 후, Fig. 16은 하선이 관통되는 1185일 후의 지하수위 분포를 보여주고 있다. Fig.15와 Fig. 16의 경우 터널 굴착이 진행되면서 수위 변화 양상이 터널 쪽으로 확대되고 있음을 볼 수

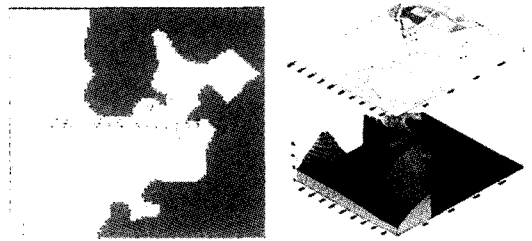


Fig. 15. Head distribution from transient flow simulation upon completion of the eastern tunnel excavation (after 1000 days)

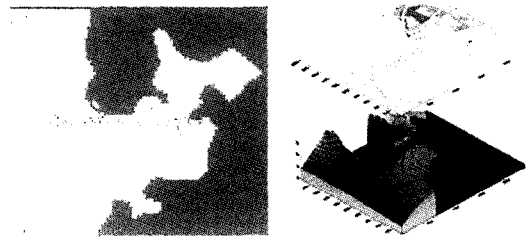


Fig. 16. Head distribution from transient flow simulation upon completion of the western tunnel excavation (after 1185 days)

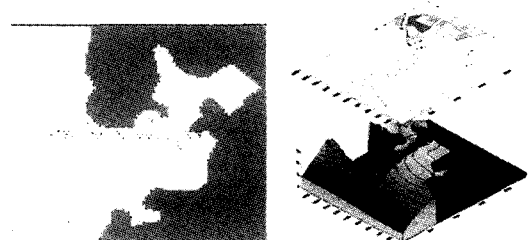


Fig. 17. Head distribution from transient flow simulation 4 years after the completion of excavation(after 2640 days)

있다. 국부적으로 터널 주변에서 터널 내부방향으로 지하수 유동이 발생하고 있으나, 전체적인 지하수 흐름은 정상상태와 유사함을 알 수 있다. 굴착이 종료되어 터널이 관통된 시점에서 전 구간에 걸쳐 터널 상부를 중심으로 수위 강하가 일어나고 있음을 알 수 있다. 하지만 전체적으로 수위변화는 터널 굴착 주변에 국한되고 있으며 전체적인 지하수 유동은 크게 변화하지 않고 있다.

Fig. 17은 터널 완공 후 4년의 지하수위 분포를 보여주고 있으며 터널 굴착 이전의 정상상태 수위를 거의 회복하였으나 터널 굴착으로 인하여 국부적으로 수위가 변화되었다. 터널 완공 이후에도 지하수 흐름양상은 크게 변화하지 않고 터널노선을 향해 수리경사가 형성됨을 알 수 있다. 이는 MODFLOW를 이용하여 절리암반에서 굴착된 터널 주변의 지하수 유동에 관한 이전의 연구(허창환, 2003)와 유사한 결과를 보여주고 있다.

Table 5는 조정원에 설치한 관정에 대한 시공 단계별 평균 수위 변화와 95번째 백분위수 값을 나타내고 있으며, Fig. 18은 시공 단계별 수위변화에 대한 box plot을 보여주고 있다. 수위 강하는 터널 굴착 후 1000일인 상선이 관통하는 단계에서 가장 높은 수위 강하인 평균 5.67 m(최대 6.8 m)를 보이고 있으며, 터널 완공 후인 1185일에는 평균 4.97 m(최대 6 m) 그리고 완공 후 4년이 지난 2640일 후에는 1.48 m(최대 2.8 m)로 비교적 안정화된 값을 보여주고 있다. 상선이 관통하는 1000일의 경우 상선이 하나의 채널을 형성하게 되므로 지하수 유동이 보다 쉽게 생기기 때문에 조정원에 설치된 관측공의 최대 수위 강하를 보이고 있다. 이후 상선의 그라우팅 효과에 의해 수위 강하가 떨어지다 다시 하선이 관통되는 1185일에 1000일의 경우와 유사하게 하선의 터널이 하나의 채널을 형성하여 수위 강하가 다소 상승하는 경향을 보이고 있다. 터널 완공 후 4년이 지난 2640일에서는 지하 수위가 회복되면서 안정화 되

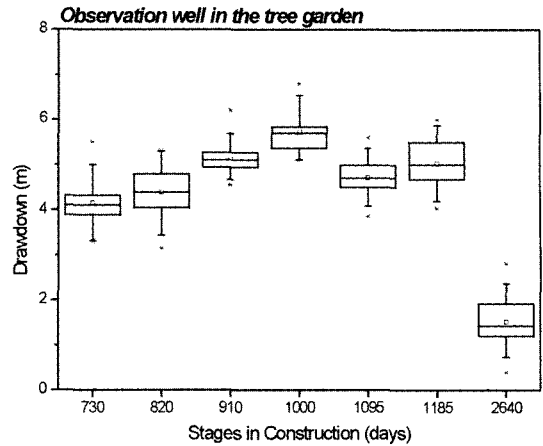


Fig. 18. Box plot of drawdown in the observation well at each construction stage

어 지하수위 강하는 크게 줄어드는 것을 알 수 있다. 터널 시공이 완공된 4년 후 조정원의 수위는 평균 28.5 m로 터널 시공 이전보다 평균적으로 1.5 m 수위가 강하하였고, 최대 2.8 m 수위 강하가 발생하였으나 시공 이후 점점 수위가 회복되었음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 제한된 수리 매질의 정보 부족으로 발생하는 불확실성을 고려하기 위해 추계학적 최적화기법인 모의 담금질 기법을 적용하여 수리전도도 확률집합체의 실현들을 얻었다. 터널 노선 주변에 실현된 수리 전도도의 분포를 MODFLOW 해석 입력 자료로 활용하여 확률론적 수리해석 결과를 얻었다. 정상상태 해석의 수위 분포 결과를 부정류 해석의 초기 수위로 설정하였으며, 모의 담금질 기법을 활용하여 얻은 30번의 수리전도도 확률집합체의 실현들을 대상으로 각각 부정류 해석을 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 제한된 수리 실험들로부터 얻은 수리 전도도 자료만을 활용함으로써 발생하는 해석 결과의 현실성 결여를 줄이기 위해 모의 담금질 기법을 활용하여 탄성과 탐사 결과를 제한된 횡수의 수리전도도 자료와 병합시켜 수리전도도의 공간 분포를 추정하였다. 지하수 유동해석에 있어서 수리 전도도의 불확실성을 반영시키고자 수리 전도도 확률집합체에 대한 실현들을 이용하여 터널 굴착으로 인한 지하수 유동 변화의 불확실성을 평가하였다.
- 2) 정상류 해석에서 관측된 지하수위 값과 해석된 지하

Table 5. Drawdown in the observation well at each construction stage

Elapsed time after excavation(days)	Drawdown(m)		
	mean	95 percentile	maximum
730	4.15	5.00	5.50
820	4.39	5.00	5.31
910	5.14	5.68	6.20
1000	5.72	6.54	6.80
1095	4.71	5.37	5.60
1195	5.03	5.87	6.00
2640	1.52	2.36	2.80

수위 값에 대한 신뢰도를 평가하기 위한 RMS 오차는 3.0%로 해석 구간에 대한 개념 모델과 입력 수리 물성치가 타당하였음을 확인할 수 있었다. 지하수위 값과 지하수 흐름은 지형고도에 지배되고 있음을 알 수 있으며, 터널 노선을 따라 모델 우측에서 좌측으로 지하수 흐름이 유도되고 있다.

- 3) 부정류 해석에서 터널내로 유입되는 지하수량은 개착식 정거장 완료 시점인 730일 (2년) 후 ○○○ 정거장으로 평균 0.914 m³/min/km 최대 0.949 m³/min/km, 이고, 터널 시공 중 최대 유입되는 시기는 하선 터널이 관통하는 1185일 후 이고, 지하수 유입량은 평균 0.317 m³/min/km 최대 0.346 m³/min/km로 해석되었다.
- 4) 조정원에 설치한 관정에 대한 시공 단계별 수위변화는 터널 굴착 후 1000일인 상선이 관통하는 단계에서 가장 높은 수위 강하인 평균 5.67 m(최대 6.8 m)를 보이며, 터널 완공 후인 1185일에는 평균 4.97 m(최대 6 m)로 계산되었다. 조정원과 가까운 상선이 관통하는 1000일의 경우 상선이 하나의 채널을 형성하게 되므로 지하수 유동이 보다 용이하게 되고, 이로 인해 조정원에 설치된 관측공의 최대 수위 강하를 보이고 있는 것으로 판단된다.
- 5) 해석 layer별로 대표값을 입력 변수로 사용하는 결정론적 해석 방법에서는 지하수 유입량 또는 지하수위 강하의 단일 값만을 얻을 수 있는 반면, 본 연구에서는 추계학적 최적화 기법인 모의 담금질 기법을 활용한 확률론적 해석을 수행함으로써 각 해석의 평균 값 뿐 아니라 최대값과 각 분위수 값을 구할 수 있기 때문에 지하수 유동 분석에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있었다. 특히, 환경문제와 같이 보수적 접근이 필요한 적용 분야에서 매우 유용한 접근법일 수 있다.

참고문헌

1. 김강주, 1999, 지하수환경영향예측을 위한 지하수모델의 적용현황 및 문제점: 환경영향평가서와 먹는 샘물환경영향조사서를 중심으로, 지하수환경, 제6권 2호, 66-75.
2. 이병대, 추창호, 이봉주, 조병욱, 함세영, 임현철, 2003, 경상북도 영천지역의 지하수위 회복 예측 수치 모델링, 대한환경지질학회지, 제36권 6호, 431-440.
3. 정상용, 이강근, 1995, 난지도 매립지 일대의 지하수위 분포 추정을 위한 복합크리깅의 응용, 지하수환경, 제2권 2호, 58-63.
4. 조용현, 박영기, 김환홍, 1994, Kriging 기법과 수치모형에 의한 이안지구 대수층의 투수량 계수, 지하수환경, 제1권 2호, 113-120.
5. 최미정, 이진용, 구민호, 이강근, 2004, 터널모델링시 개념 모델에 따른 지하수 유동 예측결과 비교연구, 지질공학, 제14권 2호, 223-233.
6. 허창환, 2003, Modflow를 이용한 터널의 지하수 유동해석, 한국수자원학회지, 제36권 1호, 129-142.
7. Aarts, E. and Korst, J., 1989, Simulated Annealing and Boltzmann Machines - a Stochastic Approach to Combinatorial Optimization and Neural Computing, Wiley, New York, 272 p.
8. Aboufirassi, M. and Marino, M.A., 1983, Kriging of water levels in the Souss Aquifer, Mathematical Geology, 15.4, 537-551.
9. Bear, J., Tsang, C.F. and de Marsily, G., 1993, Flow and contaminant transport in fractured rock, Academic Press, Inc., San Diego, 560 p.
10. Datta-Gupta, A., Lake, L.W., and Pope, G.A., 1995, Characterizing heterogeneous permeable media with spatial statistics and tracer data using sequential simulated annealing, Mathematical Geology, 27.6, 763-788.
11. Deutsch, C.V. and Journel, A.G., 1998, GSLIB Geostatistical Software and User's Guide, Oxford Univ. Press, New York. 369 p.
12. Kirkpatrick, S., Gellat, C.D. and Vecchi, M.P., 1983, Optimization by simulated annealing, Science 220, 671-680.
13. Long J.C.S., Remer J.S, Wilson C.R. and Witherspoon P.A., 1982, Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, Water Resources Research, 18. 3, 645-658.
14. Waterloo Hydrogeologic. 2003, Visual Modflow Pro user's Manual, Waterloo hydrogeologic Inc., Ontario, 434 p.
15. Ki-Bok Min, Ianru Jing and Ove Stephansson, 2002, Determination of the equivalent permeability tensor of fractured rock masses based on stochastic REV approach, Proceeding of 2002 ISRM regional symposium on rock engineering problems and approaches in underground construction, 289-296.



류 동 우

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원
지구환경시스템 공학부 공학박사
Tel: 042-868-3265
E-mail: ryurock@empal.com
현재 한국지질자원연구원 연수연구원



손 봉 기

1998년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
Tel: 02-880-8713
E-mail: bongki@rockeng.snu.ac.kr
현재 서울대학교 대학원 지구환경시스
템공학부 박사과정



송 원 경

1982년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1986년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1996년 프랑스 에콜테민 지질공학과
공학박사
Tel: 042-868-3247
E-mail: songwk@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 책임연구원



주 광 수

1990년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1992년 한양대학교 공과대학 대학원
자원공학과 공학석사(암반공학 전공)
1997년 한양대학교 공과대학 대학원
자원공학과 공학박사(암반공학 전공)
Tel: 02-599-1045
E-mail: ksjooh@hdec.co.kr
현재 현대건설 기술개발원(설계) 차장