

## 터널 굴착에 의한 화강암 대수층의 수리 수문 및 지하수위변동 분석

정상용<sup>1</sup> · 김병우<sup>1</sup> · 강동환<sup>1\*</sup> · 심병완<sup>2</sup> · 정상원<sup>3</sup>

<sup>1</sup>부경대학교 환경지질학과, <sup>2</sup>한국지질자원연구원 지하수지열연구부

<sup>3</sup>충북대학교 사범대학 과학교육과

## Analyses of Hydrology and Groundwater Level Fluctuation in Granite Aquifer with Tunnel Excavation

Sang Yong Chung<sup>1</sup>, Byung Woo Kim<sup>1</sup>, Dong Hwan Kang<sup>1\*</sup>, Byoung Ohan Shim<sup>2</sup>, and Sang Won Cheong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan, Korea

<sup>2</sup>Korean Institute of Geosciences and Mineral Resources

<sup>3</sup>Department of Science Education, Chungbuk National University

수락산 터널지역 내 8개 시추공에서 조사된 기반암의 평균 수리전도도  $2.64 \times 10^{-8}$  m/sec, 평균 RQD 78%, 평균공극율 0.51% 및 지하수위는 77.06~125.97 m의 범위이었다. 지하수위와 표고간의 회귀분석 결과를 이용하여 수락산 터널 지역 내 두 개의 정상부에서 지하수위를 추정하여 구한 터널 구간의 평균적인 수평수리경사는 0.267 이었다. 수락산 터널 구간에서 현장투수시험에 의해 구해진 최소 수리전도도는  $5.56 \times 10^{-9}$  m/sec, 최대 수리전도도는  $6.12 \times 10^{-8}$  m/sec, 평균 수리전도도는  $2.64 \times 10^{-8}$  m/sec 이었다. 최소, 최대 및 평균 수리전도도와 평균적인 수평수리경사를 이용하여 산정된 수락산 터널 구간 내에서의 단위 길이 당 지하수 유출량은 각각  $0.00585 \text{ m}^2/\text{day}$ ,  $0.06434 \text{ m}^2/\text{day}$  및  $0.02775 \text{ m}^2/\text{day}$  이었다. 물수지분석에 의한 연구지역 내 단위함양유역 당 순수지하수함양율은  $224 \text{ mm/yr}$ 로 산정되었다. 터널굴착이 완료된 후 최소, 최대 및 평균 수리전도도를 적용한 지하수위 변동예측 모사에 의하면 수리전도도가 낮을수록 터널 내로의 유출량은 적었지만, 지하수위 강하량은 크게 나타났다. 그리고, 최대 수리전도도를 적용한 모사 시에는 터널로의 유출량이 크지만, 대수층으로의 충전이 빠르게 발생하여 지하수위가 짧은 시간에 회복되었다.

**주요어 :** 화강암, 터널굴착, 수리전도도, 수리경사, 지하수 유출율, 지하수 함양율, 지하수위 변동예측

Average hydraulic conductivity was  $2.64 \times 10^{-8}$  m/sec, average RQD was 78%, average porosity was 0.51%, and range of groundwater level was 77.06~125.97 m by measured in 8 boreholes at the Surak Mt. tunnel area. Groundwater level of two peaks in the Surak Mt. tunnel area were estimated through linear regression analysis for groundwater level versus elevation. And, average horizontal hydraulic gradient in the Surak Mt. tunnel area was calculated 0.267. Minimum, maximum, and average hydraulic conductivities that estimated by field tests were  $5.56 \times 10^{-9}$  m/sec,  $6.12 \times 10^{-8}$  m/sec, and  $2.64 \times 10^{-8}$  m/sec, respectively. Groundwater discharge rates per 1 meter that estimated using minimum, maximum, and average hydraulic conductivities and average horizontal hydraulic gradient were  $0.00585 \text{ m}^2/\text{day}$ ,  $0.06434 \text{ m}^2/\text{day}$ , and  $0.02775 \text{ m}^2/\text{day}$ , respectively. Pure groundwater recharge rate per unit recharge area was calculated  $223.96 \text{ mm/yr}$  through water balance analysis. Prediction simulation of groundwater level fluctuation with minimum, maximum, and average hydraulic conductivities were conducted. Discharge rate into the Surak Mt. tunnel for minimum hydraulic conductivity was small, but groundwater drawdown was highly. Discharge rate into the Surak Mt. tunnel for maximum hydraulic conductivity was higher, but groundwater level was recovered quickly.

**Key words :** Granite, Tunnel excavation, Hydraulic conductivity, Hydraulic gradient, Groundwater discharge rate, Groundwater recharge rate, Groundwater level fluctuation prediction

\*Corresponding author: dhkang@pknu.ac.kr

## 서 론

사회경제적인 활동의 증가로 늘어나는 교통량을 해소하기 위하여 도로의 확장이나 신설이 매년 크게 이루어지고 있으며, 산악지역에 도로를 건설할 경우에는 터널 굴착이 필수적이다. 산악지역에 터널을 굴착하면서 지하수유출이 과도하게 일어날 경우에는, 지하수고갈, 지반침하, 식생의 고사 등 환경문제가 발생하게 된다. 이러한 환경문제를 미연에 방지하기 위해서는 터널굴착 이전에 터널굴착 후의 지하수유출에 의한 주변지역의 지하수위강하 정도를 예측하여 터널굴착 여부와 보강대책 등을 강구하여야 한다.

국내에서 터널 주변지역의 지하수위 변동분석 연구로는 도수로 터널 내로 지하수의 유입량과 단열의 관련성 연구(조병욱 외, 1999), 지하수위 변동과 단열구조의 관련성을 이용한 단열에 의한 터널 내 지하수 유입량과 지하수위 변동의 관계를 실제 굴착터널 내에서의 관찰과 주변지역의 지하수공 모니터링을 통한 연구(이병대 외, 2000, 2001) 등이 수행된 바 있다. 또한, 도수로 터널에 의해 강하된 지하수위의 회복예측 모델링이 이병대 외(2003)에 의해 수행되었다. 이러한 기존의 연구들은 연구지역내 터널굴착 전·후의 실제 현장측정값들을 비교하여 연구한 사례들이며, 터널굴착 이전 시점에서 터널굴착 후의 지하수위 강하 및 회복시기에 관한 연구는 거의 수행된 바가 없다.

본 연구에서는 현장시험과 실내시험에 의해 산출된 수리전도도(hydraulic conductivity), 그리고 현장에서 조사된 지하수위와 물수지 분석(water budget)에 의해 터널내로의 지하수 유출율(discharge rate)과 대수층에서의 지하수 함양율(recharge rate)이 산정되었다. 이러한 수리지질학적 특성을 대표하는 매개변수들을 이용하여 화강암 지역에서 터널이 굴착된 상태로 가정하여 지하수위변동 모델링 실시하고, 연구지역의 지하수위 분포와 수위강하(drawdown) 및 회복(recovery) 시기를 예측분석하였다.

### 연구지역의 수리지질학적 특성

수락산 터널을 포함하는 연구지역은 경도 127°03'01~127°05'55이며, 위도 37°39'36~37°41'46에 해당하는 서울시 노원구에 위치한 수락산 일대이다. 연구지역의 지질은 대부분 경기육괴의 서울화강암이라 부르는 대보화강암으로 이루어져 있다(홍승천 외, 1982). 연구지역 내에 위치한 수락산 터널은 연장 2,950 m, 폭 18.77 m, 높이

10.497 m의 편도 4차선 병렬터널로서 서울외곽순환(일산-퇴계원) 고속도로의 일부분이다(서울고속도로, 2001).

연구지역의 수계와 터널구간 및 지하수 유동모델링 영역이 Fig. 1에 도시되어 있다. 수락산 터널구간에는 4개의 깊은 계곡이 교차하고 있으며, 수계의 주흐름방향은 남서 방향(앞개울골, 뒷개울골)과 남남동 방향(학림골, 용굴암골)이다. 수계의 주흐름방향은 정상원 외(2002)에 의해 연구된 절리군의 주방향과 일치하고 있다.

수락산 터널구간에 시추된 시험시추공(TB-1~8), 터널구간에서 표고가 가장 높은 제 1정상부(T1)와 제 2정상부(T2), 수리경사(hydraulic gradient) 추정 시 이용한 가상 지하수공(TW)의 위치와 표고를 Fig. 2에 도시하였다. 제 1정상부는 뒷개울골과 학림골 사이에, 제 2정상부는 앞개울골과 뒷개울골 사이에 위치해 있으며, 가상의 지하수공은 제 1정상부와 제 2정상부 사이의 최하단부에 설정하였다. 제 1, 2정상부와 가상 지하수공의 표고는 각각 해발 265 m, 182 m 및 82 m 이다(Table 1).

수락산 터널의 입구부와 출구부 사이에 위치한 8개 시험시추공에서 실시된 수압시험 결과, 각 시추공별 기반암의 평균 수리전도도는  $5.56 \times 10^{-9} \sim 6.12 \times 10^{-8}$  m/sec의 범위이며, 이들 자료에서 계산된 터널구간 전체의 평균 수리전도도는  $2.64 \times 10^{-8}$  m/sec 이다. 풍화된 화강암의 수리전도도는  $3.3 \times 10^{-6} \sim 5.2 \times 10^{-5}$  m/sec의 범위에 있는 것으로 보고되었으며(Domenico and Schwartz, 1998), 따라서 수락산 터널구간의 화강암은 풍화가 거의 되지 않은 신선한 화강암인 것으로 판단된다. 현장시험에 의

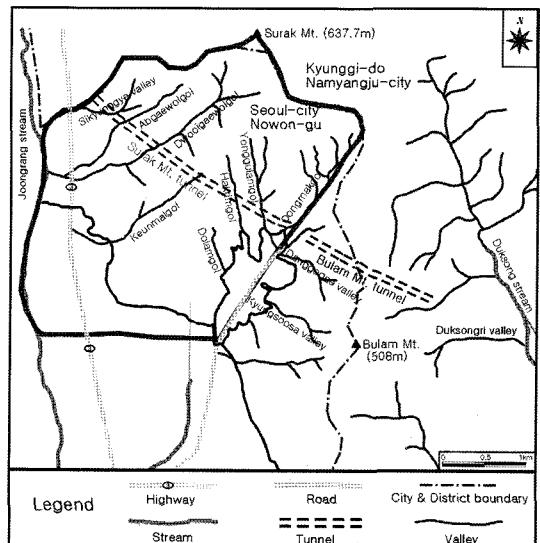


Fig. 1. The hydrosphere at the study area.

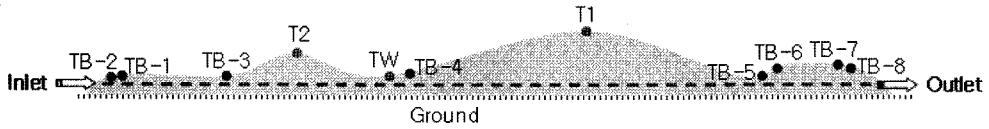


Fig. 2. Cross section of Suraksan tunnel and well locations.

Table 1. Material properties and groundwater level for bedrock at the Suraksan tunnel.

Well No.	Permeability (m/sec)	RQD (%)	Porosity (%)	G.W.L. (m)	Elevation (m)
TB-1	$3.78 \times 10^{-8}$	80	0.35	87.53	88.53
TB-2	$1.62 \times 10^{-8}$	52	0.60	77.06	78.06
TB-3	$5.56 \times 10^{-9}$	80	0.25	87.35	88.55
TB-4	$2.50 \times 10^{-8}$	89	0.30	93.15	97.65
TB-5	$6.12 \times 10^{-8}$	65	0.86	105.04	105.54
TB-6	$3.12 \times 10^{-8}$	89	1.08	120.18	121.48
TB-7	$2.24 \times 10^{-8}$	89	0.35	125.97	128.07
TB-8	$1.18 \times 10^{-8}$	79	0.29	108.05	111.95
Average	$2.64 \times 10^{-8}$	78	0.51	100.54	102.45

해 채취된 코어(core)의 RQD(Rock Quality Designation) 범위는 52~89% 이며, 평균은 78% 이었다. 연구지역의 암질 상태를 RQD만으로 평가한다면 비교적 양호한 것으로 판단되었다(이정인 외, 1997). 채취된 암석코어의 실내시험 결과 공극율의 범위는 0.25~1.08% 이며, 평균은 0.51% 이었다.

수락산 터널구간의 수리지질학적 조사에 의하면, 터널구간에서 대수층의 투수성은 매우 낮으며 풍화가 거의 되지 않은 화강암으로 형성되어 있었다. 수락산 터널 구간 내 8개 시추공의 시험시추 시에 조사된 지하수위의 범위는 해수면 기준으로 78.06~128.07 m 범위이며, 평균지하수위는 100.54 m 정도이다(Table 1).

일반적으로 지형의 표고와 지하수위의 관계는 선형적인 비례관계에 있다(심병완 외, 2000; 정상용 외, 1999). 수락산 터널에 위치한 8개의 시험시추공에서 측정된 지하수위와 표고간의 상관성을 파악하기 위해 실시된 선형회귀분석 결과는 Fig. 3에 작성되어 있으며, 지하수위와 표고의 상관성은 거의 정비례 관계인 것으로 나타났다. 추정된 선형회귀식에 의한 T1, T2 및 TW 지점에서의 지하수위는 260.00 m, 178.60 m 및 80.45 m 이었다.

다르시의 법칙(Darcy's law)에 의한 수락산 터널구간의 지하수 유출량 산정을 위해서는 터널구간의 수리경사가 요구된다. 수락산 터널구간의 수평수리경사는 제 1 정상부와 제 2 정상부 주변의 수리경사를 산정하여 산술 평균(arithmetic mean) 하였다. 수락산 터널구간 내 표고와 지하수위 자료에서 구한 선형회귀식을 이용하여 터

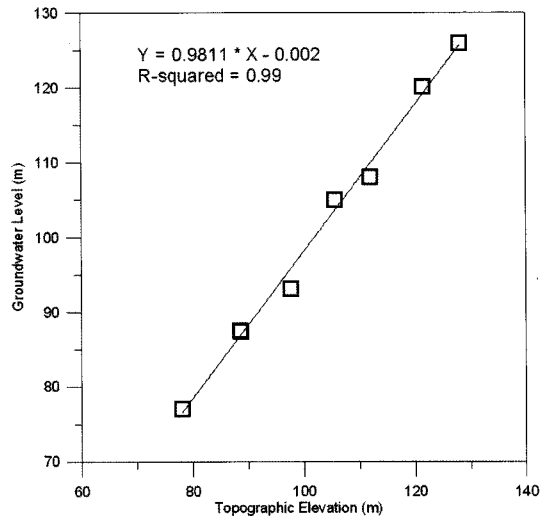


Fig. 3. Linear regression of groundwater level versus topographic elevation.

널구간의 제 1 정상부에서 추정된 지하수위는 260.00 m 이며, 제 2 정상부에서 추정된 지하수위는 178.60 m 이다.

추정된 지하수위를 이용하여 수락산 제 1 정상부에서 터널 입구부쪽에 위치하는 TB-4 시추공 방향으로의 지하수 유동에 대한 수평수리경사는 0.254, 제 1 정상부에서 터널 출구부쪽에 위치하는 TB-5 시추공 방향으로의 지하수 유동에 대한 수평수리경사는 0.221로 산정되었다. 따라서, 제 1 정상부 주변의 평균적인 수리경사는 0.238 정도이었다. 제 2 정상부에서 터널 입구부쪽에 위

치하는 TB-3 시추공 방향으로의 지하수 유동에 대한 수평수리경사는 0.338, 제 2정상부에서 터널 출구부쪽에 위치하는 TW 지하수공 방향으로의 지하수 유동에 대한 수평수리경사는 0.252로 산정되었다. 따라서 제 2정상부 주변의 평균적인 수리경사는 0.295 정도이었다.

지하수위는 제 1정상부 주변이 높지만, 제 2정상부 주변의 수평거리가 제 1정상부에 비해 약 1/3 정도이기 때문에 지하수의 평균적인 수평수리경사는 제 2정상부 주변이 크게 나타났다. 수락산 터널구간 전체의 평균적인 수평수리경사는 제 1정상부와 제 2정상부에서의 평균적인 수평수리경사 0.238과 0.295를 산술평균한 0.267 이었다.

## 터널 유출량과 지하수 함양율

### 터널 유출량

터널굴착 시 터널로의 지하수 유출량은 단층이나 절리 등이 발달하지 않은 암반대수층의 경우에는 수리전도도에 의해 지배되며, 수리전도도가 매우 낮은 경우에는 수리경사에 의해 좌우되는 것으로 보고되었다(박재현 외, 2001). 따라서, 단열이 발달되어 있지 않은 수락산 터널지역에서의 터널유출량 산정 시 고려해야할 주요한 변수는 수리전도도와 수리경사이다.

터널측면의 수평유출면적과 수직유출면적의 합은 총 유출면적 이다. 수리전도도는 8개 시추공에서 조사된 평균 수리전도도  $2.64 \times 10^{-8}$  m/sec를 이용하고, 수락산 터널구간의 평균적인 수평수리경사는 0.267을 적용하였다. 터널 내 지하수 유출량은 측면유출량과 지면유출량의 합으로 구할 수 있다. 먼저, 터널 내 측면유출량은 측면수평유출량과 측면수직유출량에 의해 구해진다. 터널 지면에서의 지하수 유출량 산정 시에는 수평유출만 고려하였다. 출구부(표고 83 m)와 입구부(표고 74 m)의 지하수위는 선형회귀식에 의해 각각 81.43 m와 72.60 m로 추정되었다. 추정된 지하수위를 이용하여 구한 터널 지면에서의 수평수리경사는 0.003 이었다. 터널굴착 후 평균 수리전도도( $K_{avg}$ )에 의해 구한 터널로 유출된 지하수의 총량은 29,883 m<sup>3</sup>/yr이었으며(Table 2), 단위면적으로

환산하면 약 10 m<sup>3</sup>/yr/m의 양에 해당된다. 화강암으로 이루어진 영천댐 도수로터널 굴착 구간에서 유속계를 이용하여 현장에서 측정된 지하수 유출량은 1,556 m<sup>3</sup>/yr/m 이다(조병욱 외, 1999). 이러한 유출량의 차이는 영천댐 도수로터널구간 대수층의 평균 수리전도도가  $4.17 \times 10^{-6}$  m/sec로서(박재현 외, 2001), 본 연구에 비해 약 160배 정도 높았기 때문이다.

터널굴착 후의 지하수위 강하량 변동을 모사하기 위해 최소유출량과 최대유출량이 산정되었다. 최소, 최대 유출량은 현장시추조사에 의해 조사된 최소 수리전도도( $K_{min}$ )와 최대 수리전도도( $K_{max}$ )를 이용하여 계산되었다. 측면과 지면의 유출면적과 수평 및 수직 수리경사는 평균 수리전도도에 의해 지하수 유출량을 산정한 경우와 동일하며, 산정된 최대유출량은 69,274 m<sup>3</sup>/yr, 최소유출량은 6,294 m<sup>3</sup>/yr 로서 약 10배 정도의 차이를 나타내었다(Table 2).

### 순수지하수 함양율

수문학적인 물수지분석(water budget analysis) 방법은 일정 수역 내의 강수량과 직접유출량, 증발산량과 지하수함양량 간에 수문평형(water balance)이 유지된다는 가정 하에 아래의 식 (1)로 표현된다.

$$I = P - DR - ET \pm IU \quad (1)$$

여기서  $I$ 는 지하수 함양량[L<sup>3</sup>],  $P$ 는 총 강수량[L<sup>3</sup>],  $DR$ 는 직접유출량[L<sup>3</sup>],  $ET$ 는 증발산량[L<sup>3</sup>],  $IU$ 는 다른 수역으로부터의 지하수 유출입량[L<sup>3</sup>] 이다. 식 (1)에서 다른 수역으로부터의 지하수의 유출입이 없다고 가정하면, 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$I = P - DR - ET \quad (2)$$

서울기상관측소에서 1992년 1월부터 2001년 12월 사이에 기록된 기상자료(강수량, 기온, 일조시간)를 이용하여 강수량, 직접유출량, 증발산량을 구하여 물수지분석에 의한 지하수 함양량을 산정하였다. 증발산량은 기후인자(월평균 기온, 월평균 일조시간)와의 상관관계를 이용한 Thornthwaite 방법으로 계산하였으며, 총 강수량의

Table 2. Estimation of groundwater discharge rate in Suraksan tunnel area.

Discharge rate	Parameters		
	$K_{min}$	$K_{max}$	$K_{avg}$
Horizontal wall (m <sup>3</sup> /yr)	4,558	50,165	21,640
Vertical wall (m <sup>3</sup> /yr)	1,707	18,789	8,105
Ground surface (m <sup>3</sup> /yr)	29	320	138
Total (m <sup>3</sup> /yr)	6,294	69,274	29,883

22.7%로 나타났다. 직접유출량은 연구구역의 유출량 자료가 없는 관계로 토양의 종류(soil type), 유역의 선행 토양함수조건(antecedent soil moisture condition, A.M.C), 토지의 사용용도(land use)를 고려한 SCS(soil conservation service) 방법을 이용하여 계산하였고, 총 강수량의 47.3%로 산출되었다.

수락산 지역의 강수량, 증발산량 및 직접유출량을 이용한 물수지분석에 의한 지하수 함양율은 10년간 평균 강수량의 30.1%로 산정되었다. 그리고, 기저유출율(base flow rate)은 한국수자원공사(1994)의 자료를 이용하여 14.7%로 적용하여 연구지역 내 순수지하수 함양율은 15.4%로 산정되었다. 본 연구지역에서 10년간의 연평균 강수량(1457.1 mm)에 의한 수락산 터널구간의 순수한 지하수 함양율은 아래의 식 (3)에 의해 산정되었다.

$$\text{순수지하수 함양율} = 0.154 \times 1457.1 \text{ mm/yr} = 224 \text{ mm/yr} \quad (3)$$

### 지하수위 변동예측 모델링

#### 이론적 배경

MODFLOW는 세계적으로 널리 이용되고 있는 지하수 모델링 소프트웨어로서, 지하수 유동이나 오염물질의 이동과 관련된 상황을 재현·분석하여 미래에 예상되는 변화를 예측할 수 있다. MODFLOW는 미국 지질조사소(1998)에 의해 개발되었으며, 현재 여러 가지의 새로운 기능이 계속 개발되고 있다. 불균질·이방성 대수층에서 다공질 매질을 통한 3차원 지하수의 부정류 상태의 유동방정식은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right) - R(x, y, z) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

여기서,  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$ 는 수리전도도의 주축방향에 평행한 X, Y, Z축 방향의 수리전도도 [ $LT^{-1}$ ],  $h$ 는 수두 [ $L$ ],  $t$ 는 시간 [ $T$ ],  $S_s$ 는 비저류계수,  $R(x, y, z)$ 는 공급원(source) 일 때는 (+) 부호이고, 배출원(sink) 일 때는 (-) 부호를 사용한다. 식 (4)에 대한 해는 초기조건과 경계조건으로부터 해석적인 방법으로 산출할 수가 있으나, 매우 단순한 경우를 제외하고는 해석해를 구할 수 없기 때문에 수치해법을 이용하여 근사해를 구한다. MODFLOW는 수치해법 중 유한차분법을 이용하여 연속체를 이산화(discretization)하여, 편미분방정식을 유한차분방정식으로 변형한 후 시공간에 대한 수위자료를 산출한다. 대수층

의 이산화는 반드시 실제 상황을 가장 잘 나타낼 수 있도록 설계해야 하며, 각 대수층의 특성을 가장 잘 대표하는 경계를 설정해야 한다.

#### 경계조건과 입력자료

모델링 입력 자료와 경계조건이 Table 3에 정리되어 있다. 모델링 대상지역의 위치는 경도 127°03'01"~127°05'55", 위도 37°39'36"~37°41'46"에 해당되며, 모델 영역은 현장 및 주변지역 일대의 지형적 특성과 수리지질학적 특성을 고려하여 결정하였다. 전체 대상면적은 4,250 m×4,000 m로 설정하였고, 격자(node)의 수는 X, Y방향으로 56×48로 설정하였다. 지표지질조사와 시추자료를 기초로 하여 전체 모델링 구간을 자유면 대수층으로 설정하여 모사를 실시하였다. 셀(cell)의 크기는 영역별로 변화시켜서 유출이 있는 터널구간에서는 62.5 m×62.5 m로 조밀하게 설정하였으며, 유출구간 이외의 영역은 125 m×125 m의 격자상으로 설정하였다.

수평수리전도도는 등방성( $K_x = K_y$ )으로 가정하였으며, 수리전도도의 최소, 최대 및 평균값은 각각  $5.56 \times 10^{-9}$  m/sec,  $6.12 \times 10^{-8}$  m/sec 및  $2.64 \times 10^{-8}$  m/sec를 적용하였다. 시추코어의 조사 결과 수평방향의 절리 형태가 우세하고, 지표지질 조사시에도 수평방향의 판상절리가 많이 발달되어 있으므로 수직수리전도도( $K_z$ )는 수평수리전도도의 1/10배를 적용시켰다. 자유면 대수층에서의 저류계수는 일반적으로 비산출율(specific yield)과 유사한 값을 가진다(한정상, 1998). Walton(1988)에 의하면, 화강암의 공극율이 0.34-0.57%의 범위를 가질 때 비산출율은 0.2-0.3%의 값을 가진다고 보고되어 있다. 본 연구지역의 대수층은 화강암이며 공극율은 0.51%이다.

지하수 모델링 분석 시 경계조건은 모델링 결과에 결정적인 영향을 준다. 연구지역의 서측에는 중량천이 흐르고 있다. 중량천은 주변 지류들이나 하수의 유입으로 계곡 바닥에 일정한 수두를 유지하고 있으므로, 모델링에서는 중량천을 고정수두경계(constant head boundary)로 설정하고, 하천의 수두는 해수면 기준 18~25 m로 가정하였다. 모델링 영역의 북쪽에는 서울특별시와 경기도의 경계가 산의 분수령(water divide)을 따라서 경계를 이루고 있으며, 수락산(해발 637.70 m)을 포함한다. 본 모델링에서는 산의 능선으로 이루어진 서울특별시와 경기도의 경계선을 무흐름경계(no-flow boundary)로 설정하였다. 그리고, 수락산 터널구간을 한 개의 유출구간으로 설정하였다. 유출율은 최소, 최대 및 평균 수리전도도를 적용하여 0.00585 m<sup>2</sup>/day, 0.06434 m<sup>2</sup>/day 및

**Table 3.** MODFLOW input data and boundary conditions.

Input parameters	Data
Number of node	Column : 56 Row : 48 Layer : 1
Modeling area (m <sup>2</sup> )	4,250 m × 4,000 m
Aquifer type	Unconfined aquifer
Aquifer thickness (m)	20 m
Hydraulic conductivity (m/sec)	Horizontal hydraulic conductivity
	Minimum : $5.56 \times 10^{-9}$
	Average : $2.64 \times 10^{-8}$
	Maximum : $6.12 \times 10^{-8}$
	Vertical hydraulic conductivity
Minimum : $5.56 \times 10^{-10}$	
Average : $2.64 \times 10^{-9}$	
Maximum : $6.12 \times 10^{-9}$	
Storage coefficient	0.00274
Boundary conditions	E-W ridge line of Suraksan : No-flow boundary
	Stream : Constant head boundary
	Tunnel : Drain conductance
	Minimum : 0.00585 m <sup>2</sup> /day
	Average : 0.02775 m <sup>2</sup> /day
	Maximum : 0.06434 m <sup>2</sup> /day
Overall study area : Recharge rate (224 mm/year)	

0.02775 m<sup>2</sup>/day의 값을 적용하였다. 지하수 함양율은 수락산 지역의 강수량, 증발산량, 지표유출량 및 기저유출량 등을 이용하여 물수지 분석에 의해 산정된 224 mm/yr를 모델링 전체 지역에 동일하게 적용하였다.

대수층의 초기수위(initial head)로는 시추조사된 8개 공과 우물조사시 4개 공, 지하수위와 표고간의 회귀분석을 통해 추정된 4개 지점의 값들(터널 입출구와 T1, T2)로서 16개의 지하수위 자료를 이용하였다. 터널 시험 시추공 TB-2, TB-3, TB-4, TB-5 및 TB-8 지하수공의 지하수위와 터널 입구부와 출구부에서 추정된 지하수위를 통해 현재의 지하수위와 모델링 결과에 의한 지하수위를 비교하였다.

### 모델링 결과 분석

본 연구의 모사에서는 터널이 완전히 굴착된 상태로 가정되었으며, 현장에서 조사된 최소, 최대 및 평균 수리전도도를 적용하였다. 각각의 모사에 대한 지하수위의 강하 및 회복 정도를 6개월(180일) 단위로 비교분석하였으며, 정류 상태의 지하수위로 안정화 될 때까지의 기간을 예측하였다.

연구지역의 경계와 MODFLOW를 이용한 격자 구성 및 경계조건과 관측공들이 Fig. 4(a)에 도시되어 있다.

Fig. 4(b)~4(d)에는 최소, 최대 및 평균 수리전도도를 적용하여 모사한 정상상태의 지하수위 등고선도를 도시하였다. 최소 및 평균 수리전도도를 적용한 경우의 지하수위 등고선도는 유사하였으나, 최대 수리전도도를 적용하여 모사된 등고선도에서는 지하수위가 450 m 이상인 지역에서 약간의 차이를 나타내었다.

최소 수리전도도( $5.56 \times 10^{-9}$  m/sec)를 적용하여 모사한 연구지역의 지하수위는 약 3.5년 후에 완전히 회복되었다(Fig. 5). 0.5년 경과 후의 지하수위는 자연지하수위가 150 m 이상인 지역에서 10~100 m 정도의 범위에서 수위강하가 발생하였다. 이는 낮은 수리전도도로 인해 지하수의 충전이 느리게 발생하였기 때문이다. 1년 경과 후에는 자연지하수위가 200 m 이하인 지역에서는 지하수위가 회복되었다. 1.5년 경과 후에는 자연지하수위가 250 m 이하인 지역의 지하수위가 회복되었다. 2년 경과 후에는 자연지하수위가 300 m 이하인 지역의 지하수위가 회복되었다. 2.5년 경과 후에는 수락산 정상부근의 400 m 이상의 고지대를 제외하고는 전체지역의 지하수위가 회복되었다. 3년 후에는 수락산 정상부근의 450 m 이상의 고지대를 제외하고는 지하수위가 회복되었다.

최대 수리전도도( $6.12 \times 10^{-8}$  m/sec)를 적용하여 지하수위 등고선도를 모사한 경우에는 연구지역의 지하수위가

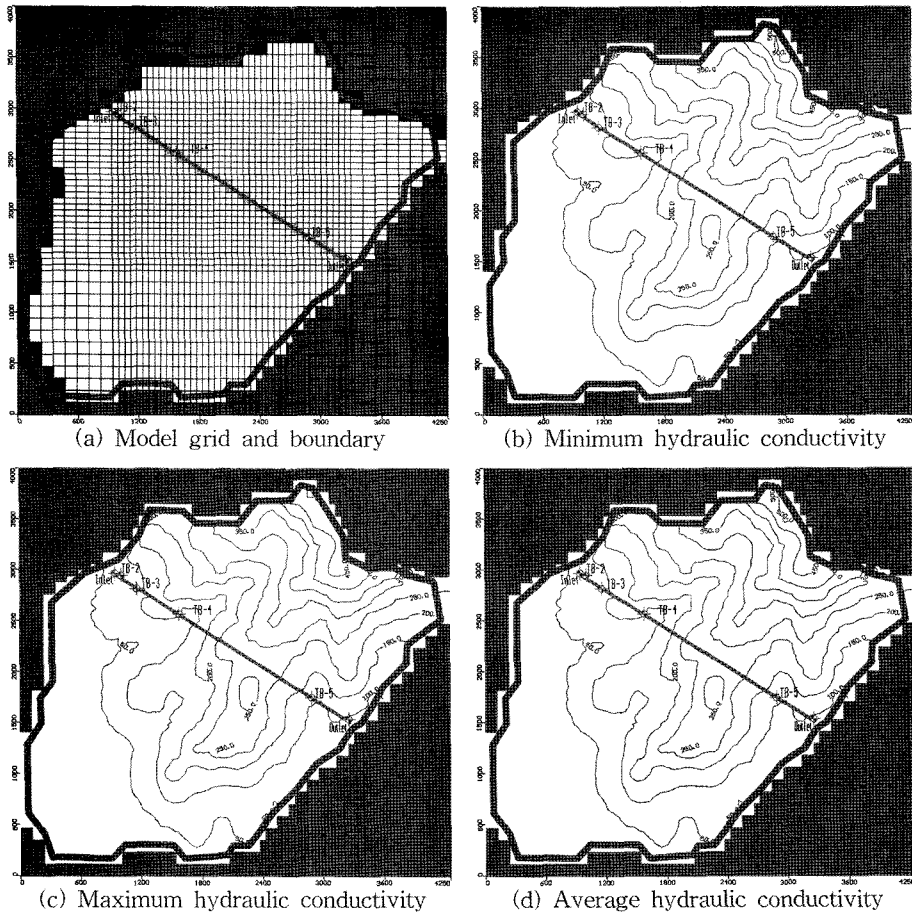


Fig. 4. Model grid and boundary conditions, and contour maps of groundwater level for the steady state.

약 2년 후에 완전히 회복되었다(Fig. 6). 0.5년 경과 후의 지하수위는 자연지하수위가 150 m 이상인 지역에서 10~50 m 정도로서 비교적 소량의 수위강하가 발생하였다. 이는 높은 수리전도도에 의한 빠른 충전이 발생하였기 때문인 것으로 판단된다. 1년 경과 후에는 자연지하수위가 250 m 이하인 지역의 지하수위가 회복되었으며, 고지대에서의 수위강하량은 20 m 이하이었다. 1.5년 경과 후에는 수락산 정상 부근의 400 m 이상인 고지대에서 수위강하량이 약 5 m 정도 발생하였으며, 나머지 지역의 지하수위는 회복되었다.

평균 수리전도도( $2.64 \times 10^{-8}$  m/sec)를 적용하여 지하수위 등고선도를 모사한 경우에는 연구지역의 지하수위가 약 3년 후에 완전히 회복되었다(Fig. 7). 0.5년 경과 후의 지하수위는 자연지하수위가 150 m 이상인 지역에서 10~100 m의 수위강하가 발생하였으며, 이는 최소 수리전도도를 적용한 경우와 유사한 것이다. 1년 경과 후에

는 자연지하수위가 200 m 이하인 지역의 지하수위가 회복되었으며, 1.5년 경과 후에는 큰말골과 학림골 사이를 제외하고는 자연지하수위가 250 m 이하인 지역의 지하수위가 회복되었다. 2년 경과 후에는 자연지하수위가 300 m 이하인 지역의 지하수위가 회복되었으며, 수락산 정상 부근의 지하수위 강하량은 5~10 m 정도이었다. 2.5년 경과 후에는 수락산 정상 부근의 고지대를 제외하고는 전체 지역의 지하수위가 회복되었다.

본 연구지역에서 실시된 최소, 최대 및 평균 수리전도도를 적용한 지하수위 변동예측 모사에 의하면, 초기 지하수위 강하량이 최소 및 평균 수리전도도를 적용한 경우에는 약 10~100 m 정도이었으며, 최대 수리전도도를 적용한 경우에는 약 10~50 m 정도로 나타났다. 그리고, 지하수위가 완전히 회복된 시기는 최대 수리전도도 적용 시 2년, 평균 수리전도도 적용 시 3년, 최소 수리전도도 적용 시 3.5년으로 예측되었다. 이러한 결과는

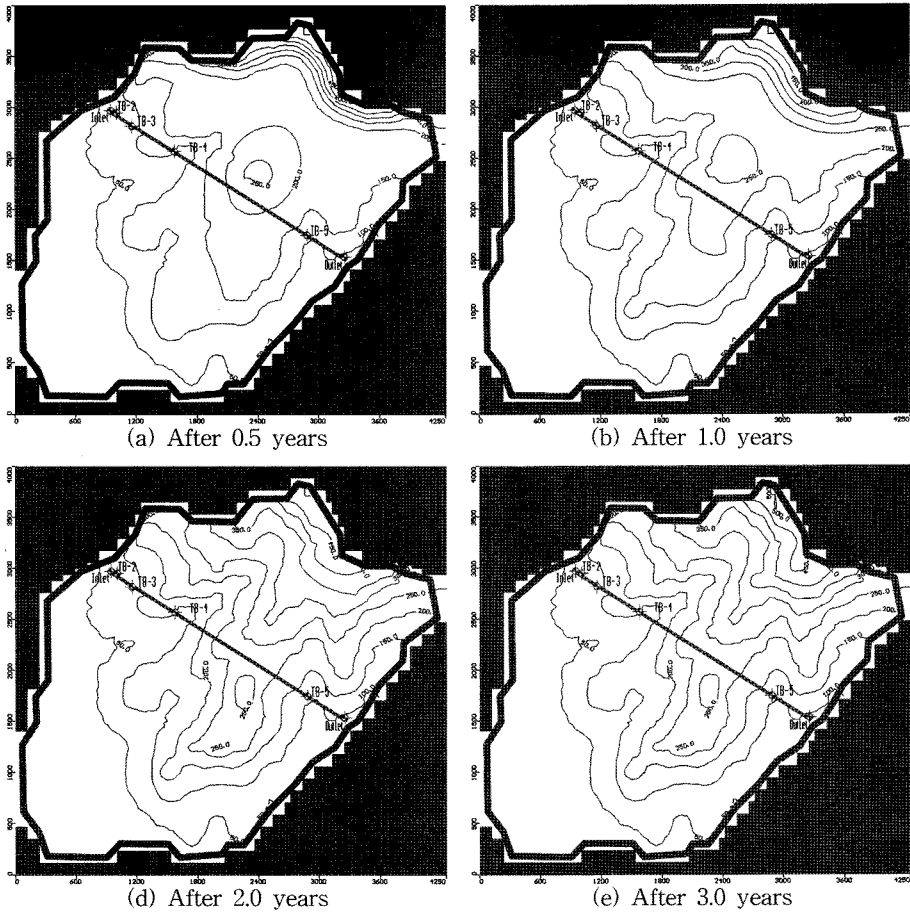


Fig. 5. Groundwater level fluctuation map after tunnel excavation for minimum hydraulic conductivity.

다른 모사 조건들이 동일하다면, 수리전도도가 낮을수록 터널로의 유출율은 적지만 오히려 지하수위의 강하정도가 크게 나타났다. 이는 터널로의 유출을 대체할 수 있는 지하수의 충전이 매우 느리게 발생하였기 때문이다. 이와 반대로, 수리전도도가 높을수록 주변 지하수가 대수층으로 빠르게 유입되므로 강하된 지하수위는 짧은 시간에 회복되었다.

**토의 및 결론**

1. 본 연구지역 내 기반암의 평균투수계수는  $2.64 \times 10^{-8}$  m/sec, 평균 RQD는 78%, 평균 공극율은 0.51% 이었다. 수락산 터널 구간 정상부를 기준으로 하여 산정된 수평수리경사는 제1 정상부에서 0.221, 제2 정상부에서는 0.295 이었으며, 따라서 수락산 터널 구간의 전체 평균 수리경사는 0.267 정도인 것으로 추정되었다.

2. 최소, 최대 및 평균 수리전도도와 수평수리경사를 이용하여 계산된 터널굴착 후 수락산 터널 내에서의 지하수 유출량은 각각  $6,294 \text{ m}^3/\text{yr}$ ,  $69,2744 \text{ m}^3/\text{yr}$  및  $29,883 \text{ m}^3/\text{yr}$  으로 산정되었다. 지하수 함양율은 수락산 지역의 강수량, 증발산량, 지표유출량 및 기저유출량 등을 이용한 물수지 분석에 의해 224 mm/yr로 산정되었다.

3. 본 연구지역에서 최소, 최대 및 평균 수리전도도를 적용하여 실시된 지하수유동 모델링에 의하면 초기 지하수위 강하량이 최소 및 평균 수리전도도를 적용한 모사에서는 약 10~100m, 최대 수리전도도를 적용한 모사에서는 약 10~50m 정도인 것으로 예측되었다. 강하된 지하수위의 회복 시기는 최소 수리전도도 모사 시 3.5년, 최대 수리전도도 모사 시 2년, 평균 수리전도도 모사 시 3년 정도인 것으로 나타났다. 본 연구에서 수행된 지하수위 변동예측 모델링에 의해 수리전도도가 낮을수록 지하수위의 강하정도가 크고, 수리전도도가 높을수록 지하수위



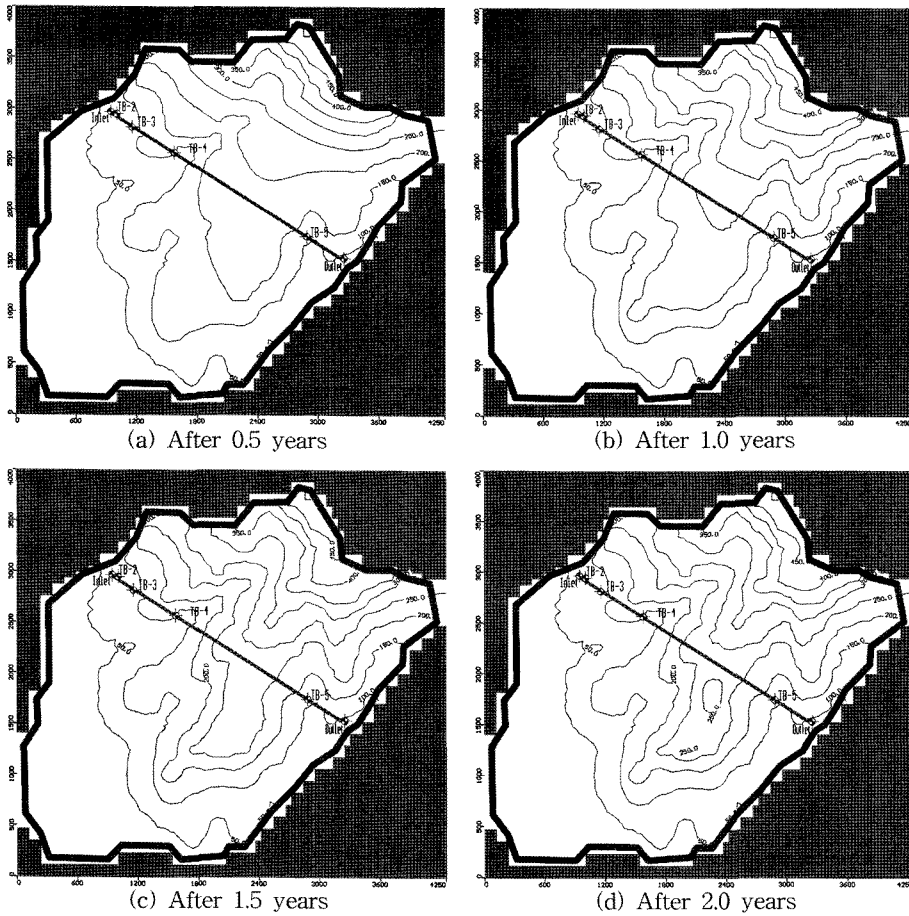


Fig. 6. Groundwater level fluctuation map after tunnel excavation for maximum hydraulic conductivity.

의 회복이 빠르게 나타남을 예측할 수 있었다.

4. 본 연구를 통해 신선한 암반층에서 터널이 건설되는 경우에 지하수위 강하 및 회복 정도는 암반대수층의 수리전도도 크기가 가장 중요한 요인이 됨을 확인할 수 있었다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 3-3-3)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

박재현, 함세영, 성익환, 이병대, 정재열, 2001, 청송군 현서면 일대 도수로 터널내 지하수 유입량과 수리지질 특성의 관련성, 지질공학, 11(2), p.141-152.

심병완, 정상용, 강동환, 김규범, 박희영, 2000, 영산강섬진강 유역의 지하수 데이터베이스 자료에 대한 지구통계학적 분석, 지질공학, 10(2), p.131-142.  
 이정인, 조태진, 이연규, 1997, 암석역학을 이용한 터널설계, 359p.  
 서울고속도로(주), 2001, 서울외곽순환(일산-퇴계원) 고속도로 수락산불암산 터널 관통에 의한 수리변동분석 보고서, 261p.  
 이병대, 성익환, 함세영, 조병욱, 김정숙, 박재현, 2000, 도수로터널 굴착에 따른 주변 지역의 지하수위 변동과 단열구조의 관련성 연구, 지질공학, 10(2), p.143-162.  
 이병대, 추창오, 이봉주, 조병욱, 함세영, 임현철, 2003, 경상북도 영천 지역의 지하수위 회복 예측 수치 모델링, 자원환경지질학회지, 36(6), p.431-440.  
 이병대, 함세영, 이준오, 조병욱, 성익환, 2001, 도수로터널 굴착에 따른 지하수 유출량과 단열의 관련성, 지질공학, 11(3), p.327-337.  
 정상원, 정상용, 2002, 서울시 북동부의 서울화강암에 대한 불연속면의 특성, 지질공학, 12(2), p.167-178.  
 정상용, 유인걸, 윤명재, 권해우, 허선희, 1999, 불균질이방성 대수층의 지하수 유동분석에 지구통계기법의 응

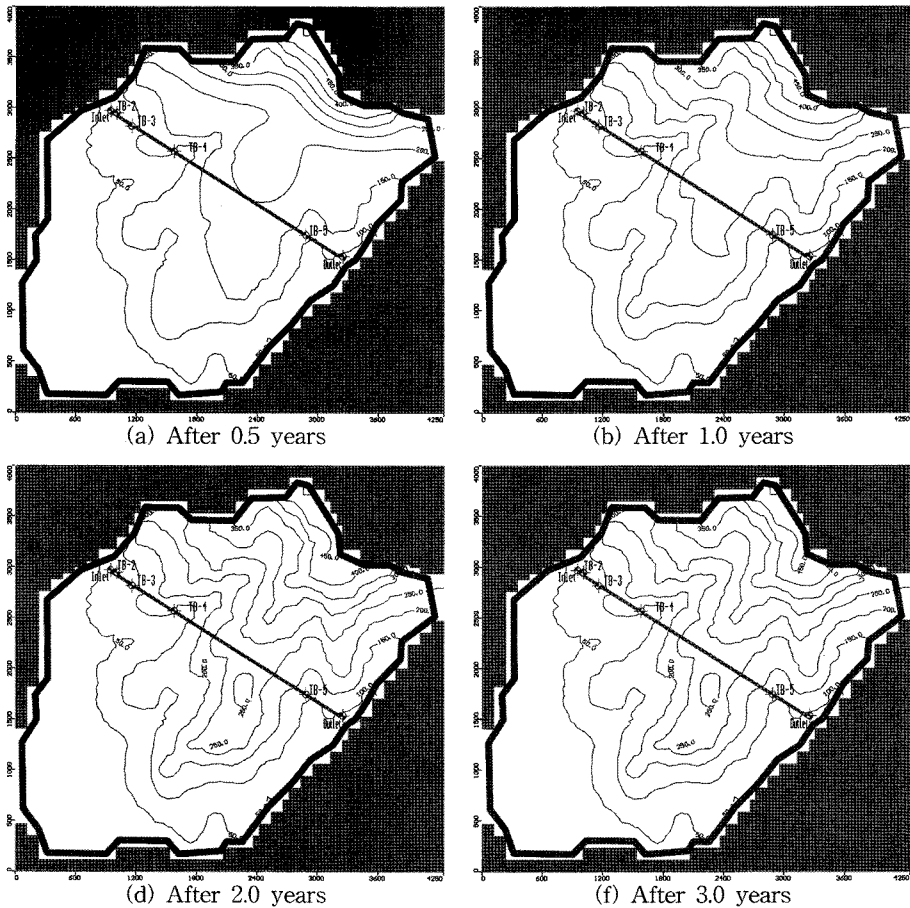


Fig. 7. Groundwater level fluctuation map after tunnel excavation for average hydraulic conductivity.

용, 지질공학, 제9권, 2호, p.147-159.

조병욱, 성익환, 이병대, 추창오, 김통권, 이인호, 최경국, 김정숙, 1999, 터널내 구간별 지하수 유입량 산정방법 : 유속계 이용, 자원환경지질, 32(6), p.661-667.

한국수자원공사, 1994, 지하수 이용관리방안 수립 및 대체용수원 개발지역 선정 조사 보고서, 450p.

한정상, 한찬, 1998, 3차원 지하수모델과 응용, 박영사, 1390p.

홍승천, 이병주, 황상기, 1982, 한국지질도 1:50,000, 한국동력자원연구소, 44p.

Domenico, P. A., and Schwartz, F. W., 1998, Physical and Chemical Hydrogeology, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc, 506p.

Walton, W. C., 1988, Groundwater Pumping Tests, Lewis Publishers Inc., p.9-34.

Waterloo Hydrogeologic, Inc., 1998, Visual MODFLOW, version 2.7.2.

#### 정상용

부경대학교 환경지질학과  
608-737, 부산시 남구 대연3동 599-1  
Tel: 051-620-6235  
Fax: 051-628-6432  
E-mail: chungsy@pknu.ac.kr

#### 김병우

부경대학교 환경지질학과  
608-737, 부산시 남구 대연3동 599-1  
Tel: 051-620-6235  
Fax: 051-628-6432  
E-mail: k\_bw00@hanmail.net

**강동환**

부경대학교 지질환경연구소  
608-737, 부산시 남구 대연3동 599-1  
Tel: 051-620-6235  
Fax: 051-628-6432  
E-mail: dhkang@pknu.ac.kr

**정상원**

충북대학교 사범대학 과학교육과  
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410  
Tel: 043-261-2782  
Fax: 043-271-0526  
E-mail: cheong1@dreamwiz.com

**심병완**

한국지질자원연구원 지하수지열연구부  
305-350, 대전시 유성구 가정동 30  
Tel: 042-868-3175  
Fax: 042-863-9404  
E-mail: boshim@kigam.re.kr