

## 터널모델링시 개념모델에 따른 지하수 유동 예측결과 비교연구

최미정<sup>1)</sup>·이진용<sup>\*1)</sup>·구민호<sup>2)</sup>·이강근<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(주)지오그린21, <sup>2)</sup>공주대학교 지질환경과학과, <sup>3)</sup>서울대학교 지구환경과학부

### A Comparative Study on Groundwater Flow Depending on Conceptual Models in Tunnel Modeling

Mi-Jung Choi<sup>1)</sup> · Jin-Yong Lee<sup>\*1)</sup> · Min-Ho Koo<sup>2)</sup> · Kang-Kun Lee<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>GeoGreen21 Co., Ltd., <sup>2)</sup>Department of Geoenvironment, Kongju National University,

<sup>3)</sup>SEES, Seoul National University

도로 및 철도 신설에 따른 터널 굴착으로 지하수가 유출될 경우 지하수 자원 고갈, 농업용수 및 생활용수 부족 및 지표수 유량의 변화 등이 예상된다. 이러한 터널 굴착에 따른 지하수계의 변화를 예측하기 위해 3차원 유한 차분 모형인 MODFLOW가 가장 널리 이용되고 있는 추세이다. 지하수 유동 모델링 실무에서 개념모델의 설정은 가장 중요한 요소 중 하나이다. 개념모델을 너무 단순화하였을 경우 모델링 결과로부터 필요한 정보를 얻어 낼 수 없는 상황이 발생할 수 있고, 혹은 너무 복잡하게 개념모델을 설정하였을 경우 필요한 현장 자료가 부족할 수 있으며, 수집이 되었더라도 모델을 구동하는데 과도하게 많은 시간과 자원이 소요될 수 있다. 본 연구에서는 터널 굴착에 관한 지하수 모델링을 수행할 경우 개념 모델 설정에 따른 모델링 결과를 비교하여 현실에 보다 적합하고 효율적인 개념모델 구성에 대해 고찰하였다.

**주요어** : 터널, 모델링, 지하수 유동, 개념모델, MODFLOW

When the groundwater outflow occurs due to tunnel excavation during the road and railroad construction, depletion of groundwater resources, deficiency in the living and agricultural waters, and changes in the surface water flux are expected. The MODFLOW is a most commonly used and three dimensional finite difference model to predict changes in the groundwater system due to the tunnel construction. A conceptual model is one of the most important elements for the proper modeling results. Essential information will not be extracted from an oversimplified conceptual model while excess time and resources with much field data are required for the very complicated one. This study presented a comparison of the modeling results depending on some conceptual models and discussed construction of the efficient conceptual model for reasonable and realistic results in the tunnel modeling.

**Key words** : Tunnel, Modeling, Groundwater flow, Conceptual model, MODFLOW

\* Corresponding author : hydrolee@empal.com

## 서론

도로 및 철도 신설에 따른 터널 굴착으로 지하수가 유출될 경우 지하수 자원 고갈, 농업용수 및 생활용수 부족 및 지표수 유량 변화 등이 예상된다. 이러한 터널 굴착에 따른 지하수계의 변화를 예측하기 위해 3차원 유한 차분 모형인 MODFLOW가 가장 널리 이용되고 있는 추세이다. 우리나라는 주로 암반내 파쇄대를 통해 지하수가 흐르고 있어 연속적 모형인 MODFLOW를 일반적으로 적용하기에는 무리가 있지만, 연구목적과 현실적인 문제에 따라서 파쇄대수층에 대하여 MODFLOW와 같은 연속적 모형을 적용하는 것도 용인될 수 있다(김강주, 1999). 그러므로 암반대수층에 대해 MODFLOW를 이용하여 모델링을 할 경우에는 모델링의 목적, 정확도, 현장 정보 및 상황 등이 종합적으로 고려되어야 한다.

지하수 유동 모델링 과정에서 경계조건의 선택과 개념화 단계인 개념모델 설정은 모델링 수행 시 결과의 신뢰성과 가치를 결정하는 가장 중요한 요소 중 하나이다(Fig. 1). 개념모델을 너무 단순화하였을 경우 모델링 결과로부터 필요한 정보를 얻어낼 수 없는 상황이 발생할 수 있고, 너무 복잡한 개념모델을 설정하였을 경우 필요한 현장 자료가 부족할 수 있으며, 자료가 수집이 되었더라도 모델을 구동하는데 과다하게 많은 시간과 자원이 소요될 수 있다(김강주, 1999).

본 연구는 터널 굴착에 관한 지하수 모델링을 수행할 경우 개념 모델 설정에 따른 모델링 결과를 비교하여 현실에 보다 적합하고 효율적인 개념모델 구성에 대해 고찰하였다.

## 본론

### 터널 모델링을 위한 기본자료 입력 및 구성

본 연구에서는 터널 굴착에 따른 지하수 유동 변화를 모의하기 위해 캐나다의 Waterloo Hydrogeologic, Inc (WHI)에서 판매하는 3차원 유한 차분 모형인 Visual MODFLOW Ver.3.0.0을 이용하였다(McDonald and Harbaugh, 1988).

연구지역은 관심대상 터널이 위치할 지점을 중심으로 충청북도 제천시와 강원도 영원군의 경계부근이다(Fig. 2a). 모델링을 위한 모의 영역 설정은 터널을 중

심으로 8,000 m × 8,000 m가 되도록 설정하였다. 격자망 구성은 기본적으로 가로와 세로 모두 50 m로 설정하였고, 유역내 터널 주변은 가로 및 세로 25 m로 더욱 세분하여 입력하였다. 모델의 유역 경계 및 경계조건은 연구지역의 동쪽과 남서쪽의 산능선을 지하수 분

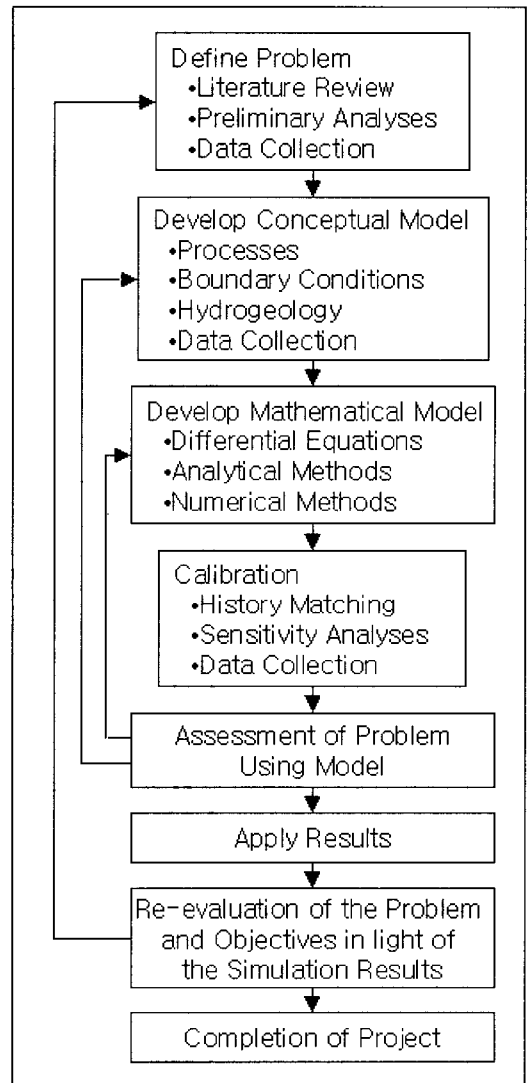


Fig. 1. Flow chart of the groundwater flow modeling process (Reilly, 2001)

수령(groundwater divide)으로 고려하여 불투수 경계로, 유역내 큰 하천 및 지류는 하천경계로 설정하였다. 하천경계조건에서 하천의 고도는 지형의 고도를 이용하였고, 하천의 수심은 0.5~1 m로 입력하였다(Fig.

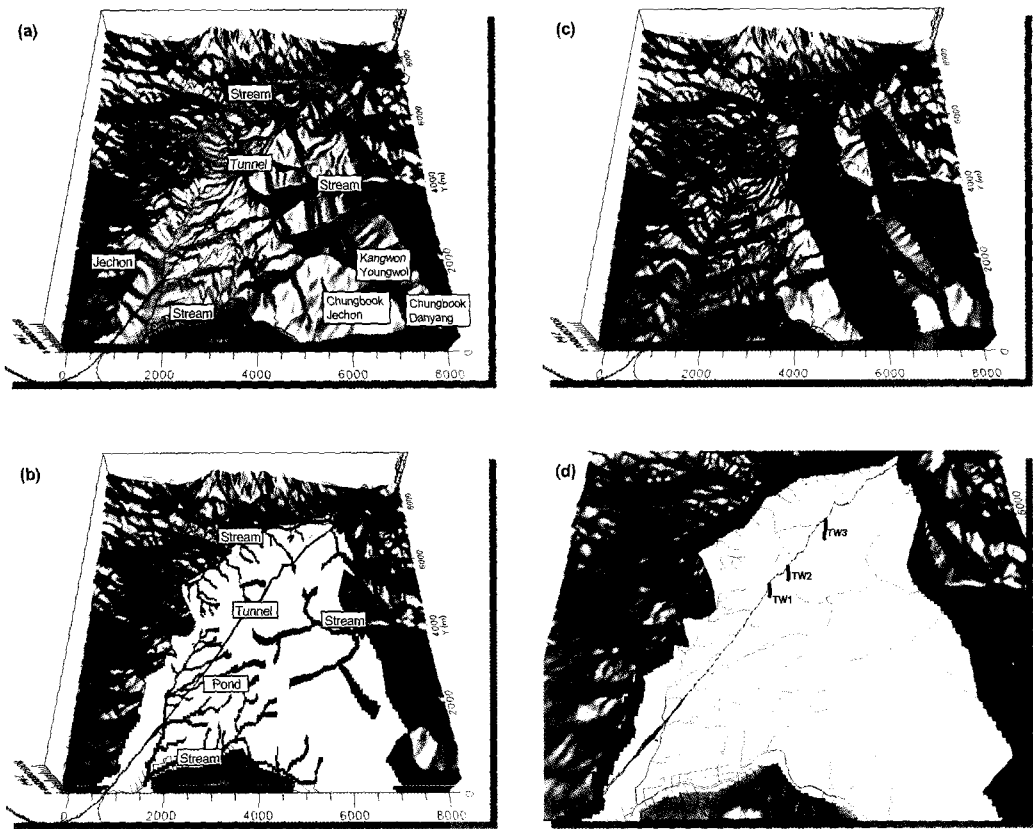


Fig. 2. Input of basic data for groundwater modeling: (a) model domain, (b) modeling boundary, (c) zonation for hydraulic parameter input and (d) groundwater monitoring wells.

2b).

연구지역의 지질 분포는 흑운모 화강암과 조선계 대석회암통인 삼태산층, 영흥층, 홍월리층 및 갑산층으로 구성되어 있다(정창희 외, 1979; 김기환 외, 1967; 원종관 외, 1974)(Fig. 2c). 복잡한 지질특성을 합리적으로 반영하기 위해 모의 영역내 수리지질학적 층서는 흑운모 화강암층, 석회암 및 백운모암층, 세일, 사암, 역암 및 석회암이 협재된 층으로 구분하였으며, 각각의 수리상수값은 현장시험 결과 및 문헌자료를 참조하여 모형보정을 통해 입력하였다(Table 1).

건설될 터널은 배수경계조건을 이용하여 입력하였다. 배수경계의 고도는 터널의 바닥고인 터널 시점부의 고도 252 m에서 터널 종점부의 고도 232 m가 되도록 입력하고, 배수경계의 전도도(conductance)는 터널 굴착 기간동안은  $10 \text{ m}^2/\text{day}$ 로, 터널 굴착 완료 이후에

는  $0.01 \text{ m}^2/\text{day}$ 로 입력하였다. 터널 굴착 진행에 따라 배수 경계 조건의 기간을 고려하여 입력하였다(Fig. 3).

### 개념모델 설정

터널 굴착에 따른 지하수 유동계에 대한 영향을 알아보기 위해 2가지 다른 개념모델을 설정하였다. Type 1은 터널 모형 구성시 대수층을 3개의 층으로 구분하여 1층의 고도는 터널 바닥고를, 나머지 층을 둘로 나누어 2층과 3층으로 입력한 후 터널을 최상부층에 입력한 경우이다. 그리고 Type 2는 대수층을 4개의 층으로 구분하고 2층의 바닥고도를 터널 바닥고로, 2층의 두께는 터널 높이인 10 m가 되도록 입력한 후 2층에

Table 1. Hydraulic properties for groundwater flow modeling

Zone	Geologic unit	Hydraulic conductivity (cm/sec)		Specific storage (1/m)	Porosity (-)
		Kx=Ky	Kz		
Zone I	Biotite granite	$2.5 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-5}$	0.10
Zone II	Carbonate rocks	$5.0 \times 10^{-5}$	$5.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-5}$	0.20
Zone III	Shale, sandstone, conglomerate	$2.0 \times 10^{-6}$	$2.0 \times 10^{-7}$	$1.5 \times 10^{-5}$	0.15

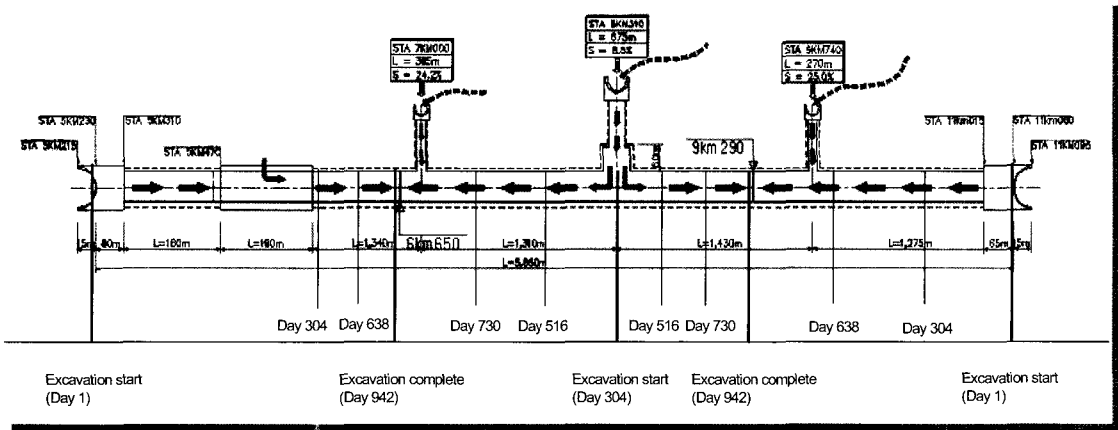


Fig. 3. Tunnel excavation schedule.

터널을 입력한 경우이다(Fig. 4). 대수층 설정은 최상부층을 자유면 대수층으로 입력하고, 자유면 대수층 이하의 대수층은 피압/자유면 변환 대수층으로 입력하여 각각 지하수 유동 모델링을 수행하였다.

지하수 유동 모델링의 정류모의 시 지하수는 초기 수두에 상관없이 일정한 결과가 도출되어야 한다. 본 연구에서는 MODFLOW 모형 구성시 초기 수두값에 따른 모델링의 수렴여부 및 계산결과인 지하수위 분포를 또한 비교하였다.

개념모델에 따른 지하수 유동 예측결과

대부분의 터널은 균열이 발달한 암반대수층을 관통하고 있으며, 이러한 암반대수층은 자유면 대수층의 특성을 보이는 경우도 있으나 수직적인 단열분포의 차이로 인해 피압대수층의 특성을 보이는 경우가 많다(Lee and Farmer, 1993). 따라서 지질 로깅 및 지하수위 자료를 분석하여 대수층의 종류를 먼저 결정해

야 한다.

두 개념모델 설정에 따른 지하수 유동 모의를 수행한 결과 터널굴착에 따라 굴착된 터널을 중심으로 주변 지하수가 배수되면서 수위강하가 일어났다. 터널

을 최상부층의 자유면 대수층에 설정한 Type 1의 경우 지하수위는 터널 굴착기간 동안 터널 고도까지 하강하는 것으로 나타났으나, 터널 공사 종료 후에는 지하수위가 빠르게 회복되는 것으로 나타났다(Fig. 5).

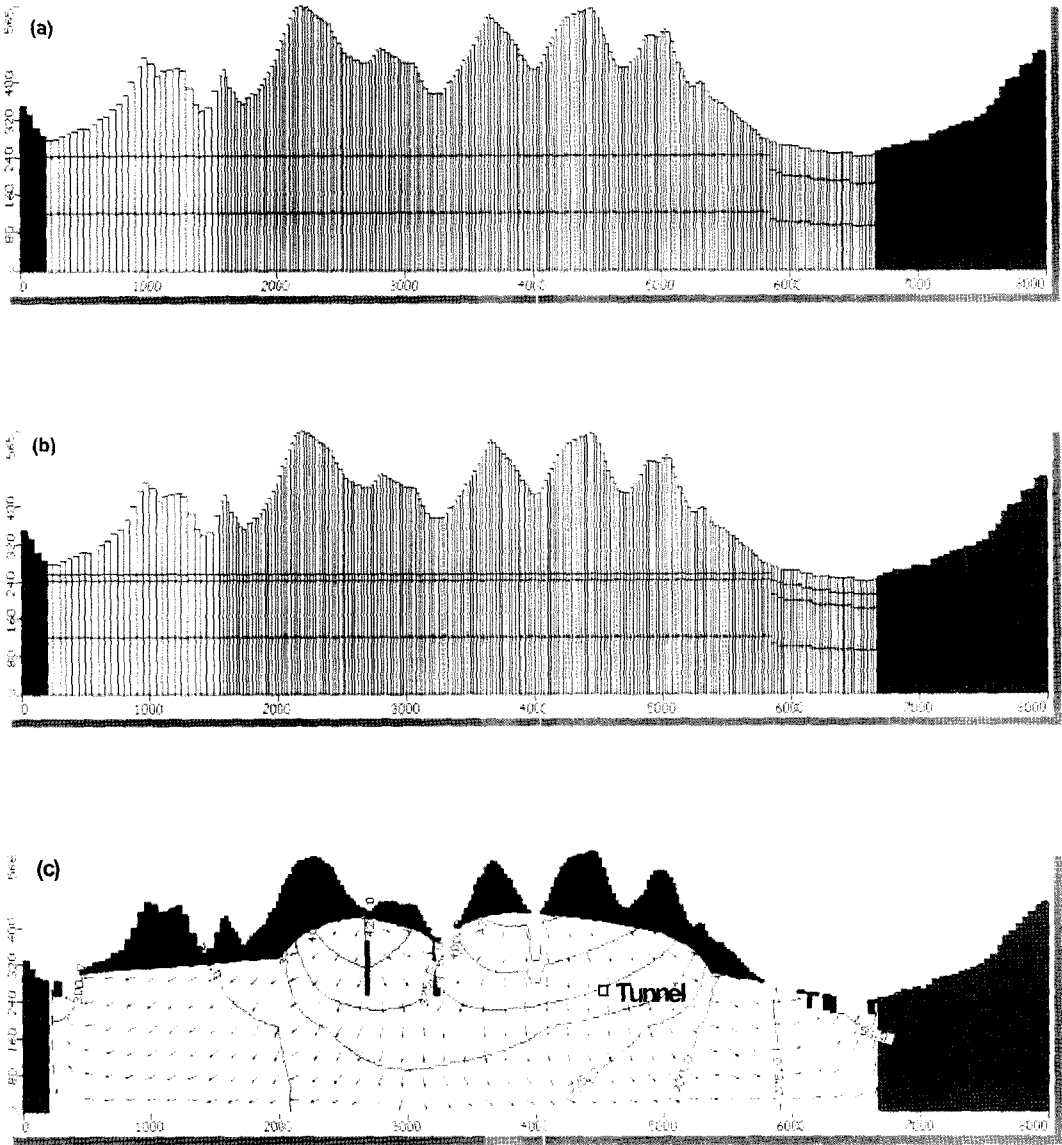


Fig. 4. Concept models for the tunnel flow modeling: (a) type 1, (b) type 2 and (c) initial water level prior to tunnel excavation.

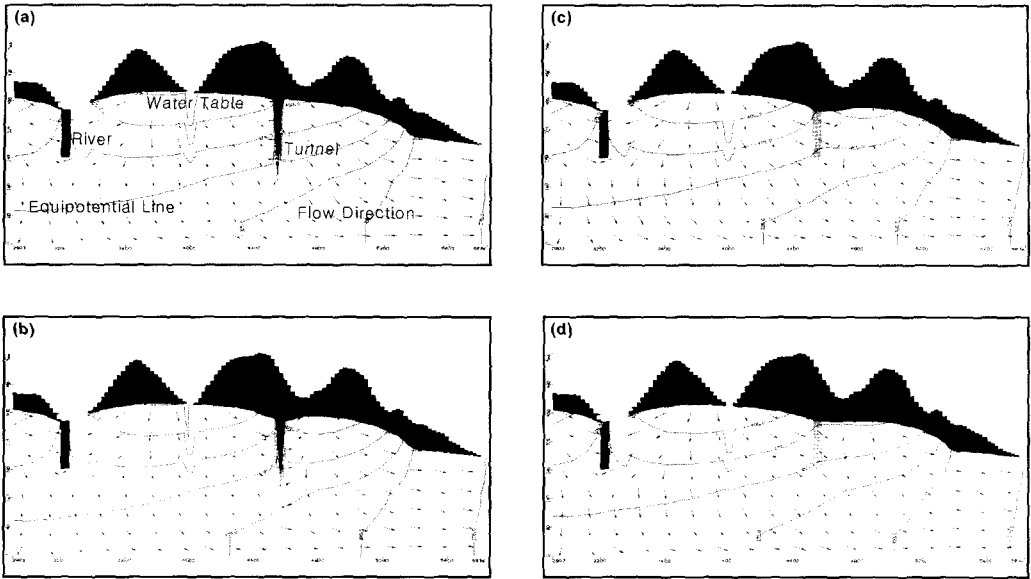


Fig. 5. Water level changes for the type 1: (a) day 364, (b) day 730, (c) day 940 (excavation complete), and (d) 1 year after excavation completion.

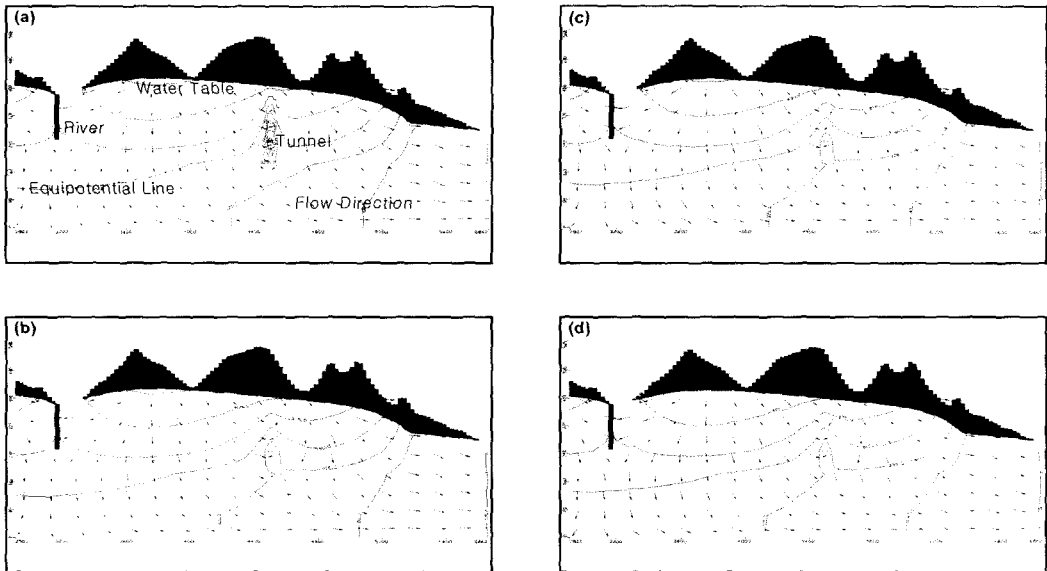


Fig. 6. Head changes for the type 2: (a) day 364, (b) day 730, (c) day 940 (excavation complete), and (d) 1 year after excavation completion.

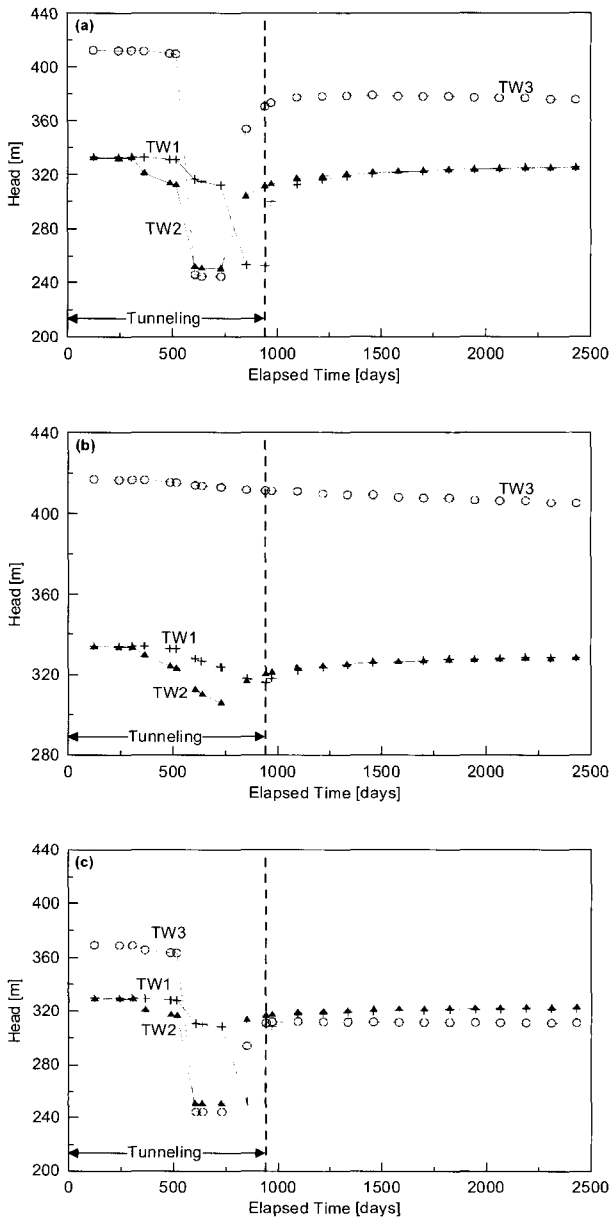


Fig. 7. Changes in heads during and after the excavation: (a) water level in layer 1 (type 1), (b) water level in layer 1 (type 2), and (c) heads in layer 2 (type 2).

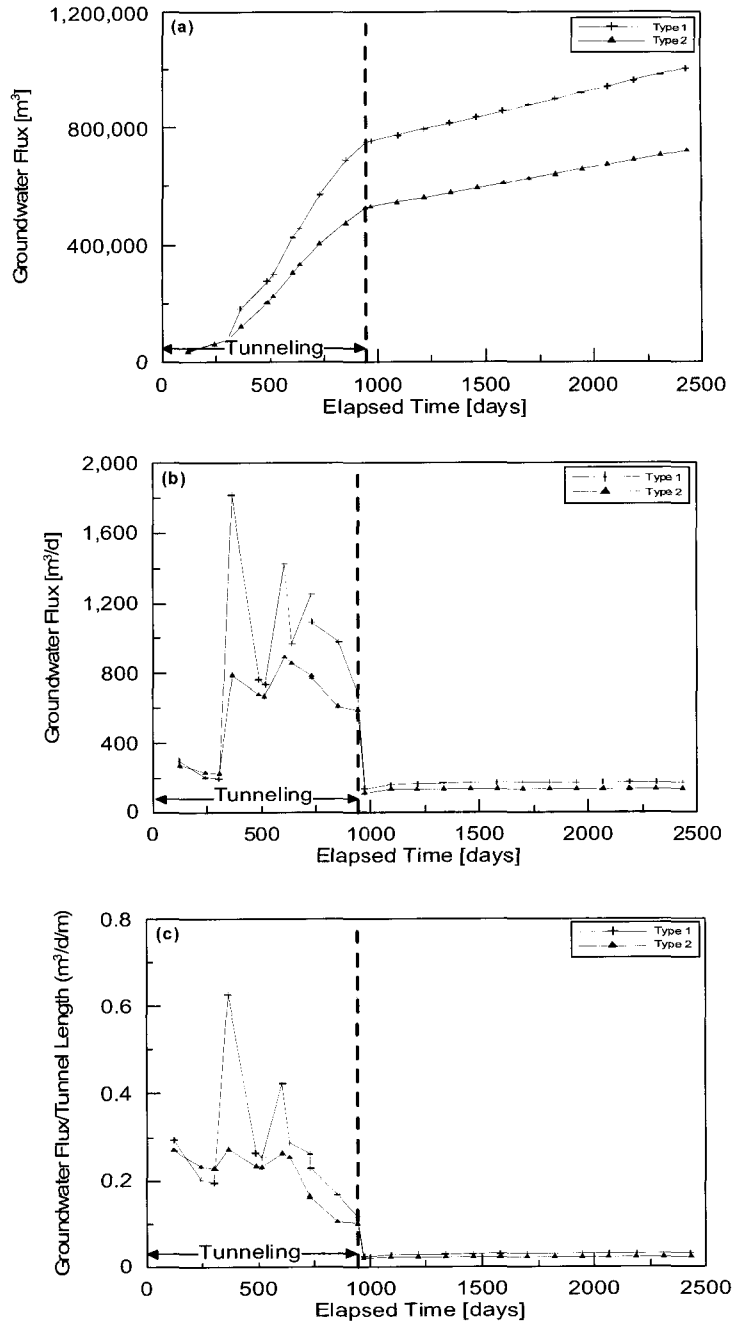


Fig. 8. Comparison of groundwater flux into the tunnel: (a) cumulative flux, (b) daily flux, and (c) groundwater flux per unit tunnel length.



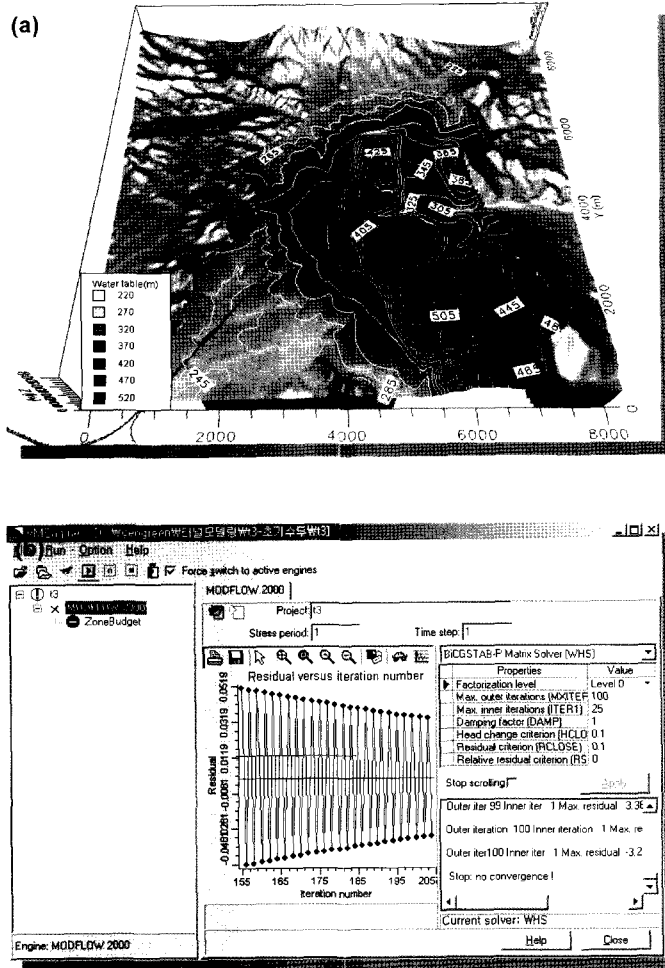


Fig. 9. Effects of initial head distribution: (a) simulated steady-state head in model layer 1, and (b) oscillation (not converge) in the simulation.

Table 2. Elevation of tunnel bottom around the groundwater monitoring well

Monitoring well	TW1	TW2	TW3
Tunnel bottom elevation (m)	249.8	247.6	242.77

반면 터널을 피압/자유면 변환 대수층인 2층에 설정한 Type 2의 경우는 터널 주변으로 수리수두(head potential)가 떨어져 터널을 중심으로 콘(cone) 형태로 나타났으며, 최상부층의 지하수위는 크게 하강하지 않았다(Fig. 6). 터널 굴착이 예상되는 지점 3곳에 관측정을 설정하여 수위를 계산한 결과 Type 1의 경우 각 관측정 지점에서 터널 굴착이 이루어지면 지하수위는 그 지점의 터널 바닥고도까지 하강하는 것으로 계산되었다(Table 2, Fig. 2d, Fig. 7). 반면 Type 2의 경우 각 관측정 지점에서 터널 굴착이 이루어지면 최상부층의 지하수위는 크게 하강하지 않고 터널 굴착이 종료된 후 다시 회복되는 양상을 보였으며, 터널이 입력된 2층에서의 수리 수두(head potential)는 터널 굴착시 터널 바닥고도까지 하강하는 것으로 나타났다.

터널 전도도를  $10 \text{ m}^2/\text{day}$ 로 가정하였을 경우 터널 굴착 종료시점까지 터널로 유출되는 지하수량은 Type 1의 경우  $755,659 \text{ m}^3$ 로 그리고 Type 2의 경우  $530,309 \text{ m}^3$ 로 계산되었고, 단위 터널 길이당 터널 내 유입률은 Type 1의 경우 최대  $0.63 \text{ m}^3/\text{day}/\text{m}$ 로, Type 2의 경우 최대  $0.26 \text{ m}^3/\text{day}/\text{m}$ 로 분석되어 개념모델 설정에 따라 터널내로 유출되는 지하수량도 3배 정도의 큰 차이를 보였다(Fig. 8). 일반적으로 터널 내로 유입되는 유출수는 터널 굴착이 진행되면서 증가하는 경향으로 분석된다(Molinero et al., 2002). 그러나 금번 모의 결과 단위터널 길이당 터널내 유입되는 지하수량이 갑자기 감소하여 작게 나타난 구간은 터널 굴착 갑산층 구간으로 수리전도도값이 다른 구간에 비해 1 order 정도 작기 때문이다.

### 초기수두값에 따른 모의결과 비교

모형 구성시 초기수두값에 따라 모델의 정류모의 결과를 비교하였다. 일반적으로 지하수 수두도 지형구배를 따라 존재하는 경우가 많으므로 지형구배를 따라 모형의 초기수두를 입력한 경우 수치해의 수렴도 잘 이루어졌으며 모의 결과 보다 현실적인 수두분포를 나타냈다(Fig. 9a). 그러나 MODFLOW를 이용한 터널 모델링시 초기수두값을 초기 평균 고도값으로 정해진(default) 수두값을 전체에 동일하게 설정하여 모의한 결과 모의 수렴 기간을 아주 길게 하여도 모형 수렴이 잘 이루어지지 않았다(Fig. 9b). 따라서 터널 모델링에서 초기수두값은 수치해의 수렴 여부 및 계산된 지하수위 값에도 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

## 결론

개념모델 설정시 터널 입력층의 대수층 종류에 따라 지하수위 변화 및 터널 내로의 지하수 유출량 예측에 큰 차이를 보였다. 우리나라의 경우 터널은 대부분 균열 암반대수층을 통과하고, 이러한 암반대수층은 자유면 대수층의 특성을 보이는 경우도 있으나 대부분 피압대수층의 특성을 보인다. 따라서 지질 로깅 및 지하수위 자료를 분석하여 대수층의 종류를 먼저 결정된 후 지하수 모델링을 위한 개념모델을 설정해야 할 것이다. MODFLOW를 이용한 터널 모델링시 초기수두값에 따라 수치해의 수렴여부에 큰 영향을 미치고, 계산된 지하수위 값에도 큰 차이를 보였다. 일반적으로 지하수 수두는 지형구배를 따라 존재하는 경우가 많으므로 지형구배를 따라 모형의 초기수두를 입력하는 경우 수치해의 수렴이 잘 이루어졌으며, 모의 결과 보다 현실적인 수두분포를 나타냈다.

현재 다수의 터널 굴착 및 이에 따른 터널 지하수 유동 모델링이 연구적 차원에서 혹은 실무적 차원에서 이루어지고 있으나 아직까지 국내에서 모델링 결과를 검증할 만한 공사중 혹은 사후 모니터링 자료를 찾기 힘들며, 이에 앞서 모델링을 위한 기본적인 수리지질학적 자료의 수집도 미미한 상황이다. 그 결과 자칫 지하수 전문모델링이 예측하고 설계하는 도구로 사용되는 것이 아니라 그래픽 도구로 전락하는 상황을 만들곤 한다. 특별히 모델러가 설정한 개념모델이 현장을 제대로 구현했는지 혹은 할 수 있는지 확인하기 위해서는 터널 상부 및 인근 관측정에서 지속적인 지하수위 모니터링이 절실히 요구된다.

## 사사

본 논문에 대한 좋은 수정의견을 주신 두 분의 심사위원님께 감사의 말씀을 드립니다.

## 참고문헌

김강주, 1999, 지하수환경영향예측을 위한 지하수 모델의 적용현황 및 문제점: 환경영향평가서와 먹는샘물환경영향조사서를 중심으로, 지하수환경, 제6권 2

호, 66-75.

김기환, 박봉순, 이흥규, 1967, 한국지질도, 제천도  
폭 1:50,000, 국립지질조사소.

원종관, 유환수, 이윤중, 김정진, 1974, 한국지질도,  
신림도폭 1:50,000, 국립지질광물연구소.

정창희, 이돈영, 류양수, 강기우, 1979, 한국지질도,  
평창영월 도폭, 1:50,000, 자원개발연구소.

Molinero, J., Samper, J., and Juanes, R., 2002,  
Numerical modeling of the transient hydro-  
geological response produced by tunnel construction  
in fractured bedrocks, *Engineering Geology*, 64,  
369-386.

Lee, C.-H., and Farmer, I., 1993, *Fluid Flow in  
Discontinuous Rocks*, Chapman & Hall, London,  
169p.

McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W., 1988. A  
Modular Three-Dimensional Finite-Difference  
Groundwater flow model: *Techniques of  
Water-Resources Investigations of the United States  
Geological Survey*, Book 6.

Reilly, T.E., 2001, *System and Boundary  
Conceptualization in Ground-water Flow  
Simulation*, *Techniques of Water-Resources  
Investigations of the United States Geological  
Survey*, Book3 Applications of Hydraulics Chapter  
B8. 25p.

투 고 일 2004년 5월 10일

심 사 일 2004년 5월 11일

심사완료일 2004년 6월 11일

이진용

(주)지오그린21

151-818 서울시 관악구 봉천7동 산4-8 서울대학교  
연구공원 본관 520호

Tel: 02-875-9491

Fax: 02-875-9498

E-mail: hydrolee@empal.com

최미정

(주)지오그린21

151-818 서울시 관악구 봉천7동 산4-8 서울대학교  
연구공원 본관 519호

Tel: 02-875-9492

Fax: 02-875-9498

E-mail: geogw99@hotmail.com

구민호

공주대학교 지질환경과학과

314-701 충남 공주시 신관동 182번지

Tel: 041-850-8515

Fax: 041-850-8510

E-mail: koo@kongju.ac.kr

이강근

서울대학교 지구환경과학부

151-747 서울시 관악구 신림동 산56-1

Tel: 02-880-8161

Fax: 02-874-7277

E-mail: kklee@snu.ac.kr