

터널 굴착에 따른 지하수 유동계의 변화에 대한 수리상수들의 민감도 분석

정복선¹⁾, 구민호*²⁾, 김용제³⁾, 이진용⁴⁾

¹⁾(주)희송지오텍, ²⁾공주대학교 지질환경과학과, ³⁾한국지질자원연구원 지하수지열연구부, ⁴⁾(주)지오그린21

Sensitivity Analysis of a Transient Groundwater Flow Modeling for Tunnel Excavation

Bok-Seon Jeong¹⁾, Min-Ho Koo*²⁾, Yongje Kim³⁾, Jin-Yong Lee⁴⁾

¹⁾HeeSong Geotek Co., Ltd., ²⁾Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University,
³⁾Groundwater and Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,
⁴⁾GeoGreen21 Co., Ltd.

Visual Modflow를 이용하여 터널 굴착 시 터널 내 지하수 유입량과 영향반경에 영향을 미치는 수리 인자들에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 터널의 심도 및 수리전도도의 민감도가 가장 크게 나타났으며, 굴착 후 경과 시간에 따라 민감도의 순위가 달라지는 것으로 분석되었다. 비산출률의 경우 굴착 후 시간이 경과함에 따라 민감도가 지속적으로 증가하는 것으로 나타나 배수형 터널 설계 시 수리전도도와 함께 중요하게 고려되어야 할 변수인 것으로 밝혀졌다. 터널 굴착 및 방수 처리 과정을 모사할 수 있는 부정류 모델링 기법을 제시하였으며, 실제 터널 설계 지역에 적용하여 굴착 과정에서 발생하는 터널 내 지하수 유입량과 주변 지역 지하수계의 변화를 예측하였다. 예측 모델의 결과는 모델 보정을 통하여 설정한 수리전도도에 매우 민감하므로, 사후 모니터링을 통한 모델 검증이 요구된다.

주요어: Visual Modflow, 민감도 분석, 수리전도도, 3차원 부정류모사

By using a simple conceptual model, a sensitivity analysis is performed to examine the effects of changing model parameters on the model outputs, the groundwater discharge and the radius of influence, induced by tunnel construction. The results indicate that the model outputs are most sensitive to the tunnel depth and the hydraulic conductivity, and their sensitivities vary with time. It is also revealed that the sensitivity of the specific yield increases constantly with time, and therefore it is as important as the hydraulic conductivity for constructing a wet-system tunnel. A transient model is suggested to simulate the stepwise tunnel excavation and the watertight lining. The model is used for a tunnel construction site to predict groundwater inflow into the tunnel and the transient response of the surrounding aquifer system. The predicted results are highly sensitive to the hydraulic conductivities assigned by model calibration. Thus, a postaudit should be made to reduce the uncertainty of the predictive model.

Key words : Visual Modflow, Sensitivity analysis, hydraulic conductivity, 3-D transient simulation

* Corresponding author : koo@kongju.ac.kr

서 론

최근 국토의 효율적인 활용을 위하여 고속철도, 지하철 등의 교통시설을 위한 터널과 도수로터널, 에너지 저장 시설, 방사성 폐기물 저장소 등의 건설이 활발하게 진행되고 있다. 구조물 건설을 위한 지하공간의 굴착은 주변 지역 지하수계에 스트레스로 작용하여 지하수위 및 지하수 흐름 방향의 변화를 초래하며, 때로는 지하수 자원의 고갈과 같은 지하수 장애를 발생시키기도 한다. 또한 터널 내로 유입되는 지하수는 터널 굴착 작업을 어렵고 위험하게 하며, 많은 비용이 소요되게 할 뿐 아니라 작업장을 교란시켜 공사에 지장을 초래하기도 한다. 따라서 터널 굴착 시 주변 지역에서 발생하는 지하수 유동체계의 변화는 터널 설계 시 고려되어야 할 중요한 문제로 인식되고 있으며, 최근 이에 관한 연구가 증가 추세에 있다.

이병대(2001)는 도수로터널 굴착 현장에서 관측된 수리지질학적 자료를 분석하여 지하수위 변동과 단열 구조와의 관련성 및 터널내 유출량과 수리지질 특성과의 관련성을 규명하였다.

정현영 외(2001)는 지하 석유 비축기지 주변 지하수계 모델링 연구를 통하여 기지 인근에서 지하수를 개발할 때의 영향 및 수벽공 설치의 효과 등을 파악하고, 실제 설치 후의 영향을 측정하여 모델링 결과와 비교하였다. 비축기지 주변 지하수 유동 체계는 Modflow를 이용하여 분석하였으며, 모델링을 수행하고 도출한 해석결과를 실제자료와 비교·검토함으로써 실제 현상과 모델링 결과가 일치함을 확인하였다.

고태영과 문현구(2001)는 3차원 절리 발생 프로그램을 개발하여 절리망 해석에 의해 터널 내로 유입되는 지하수의 양을 예측하였으며, 이인모 외(1993)는 터널 주변의 3차원 지하수 흐름 상태를 수치해석을 통하여 예측하고 침투수압에 의한 터널 막장에서의 응력 및 변위의 변화를 검토하였다. 남기천 외(1994)는 터널 공사 중 누수 및 수압의 변화와 방수시공 후 지하수위의 상승과 작용수압 변화양상을 유한요소법으로 해석하고 이로부터 결정된 작용수압에 따른 방수터널의 2차 라이닝 설계 예를 제시하였다. 이인모 외(1994)는 터널막장 및 라이닝에 대해 배수조건에 따른 지하수 흐름을 고려한 적절한 해석 및 설계방법을 제시하였다. 장근무(1998)는 유한요소 프로그램인 Napsac와 Nammu를 이용하여 균열연결망 모델에서의 터널 굴착 수치실험을 수행하였으며, 균열연결망 모델을 통

해 구해진 투수계수 텐서를 입력 값으로 하는 등가다공성 모델에서의 터널 굴착 지하수 유동 해석결과와 상호 비교·분석하였다. 이희근 외(1995)는 수문학, 암석수리학, 및 수리지구화학적 접근 방법을 통해 획득한 자료를 종합하여 터널 굴착과 관련된 지표수 및 지하수의 유동 변화를 해석하였다.

허준석 외(1997)는 터널내부로의 지하수 유입량을 산정하기 위해 유한요소법을 이용한 2차원 침윤해석을 수행하였으며, 흐름조건과 지반조건을 다양하게 변화시키면서 흐름해석을 실시하였다. 이 연구 결과에 의하면 지하수의 흐름과 수두 분포는 암반의 투수성과 터널 상부의 두께, 매질의 비균질성과 불투수층의 경사도 등 여러 인자에 의존하며, 이러한 인자들은 터널 내로의 유입량에도 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 최미정 외(2004)는 개념 모델 설정에 따른 지하수 모델링 결과를 비교하여 현실에 적합하며, 효율적인 개념 모델의 구성에 대하여 고찰하였다.

본 연구에서는 지하수 유동 모사에 널리 이용되는 Visual Modflow를 이용하여 터널 굴착 시 터널 내 지하수 유입량과 영향반경에 영향을 미치는 수리 인자들에 대한 민감도 분석을 수행하였으며, 터널 굴착 전 굴착 과정 및 굴착 후에 발생하는 지하수 유동 체계의 변화를 모사할 수 있는 3차원 부정류 모델을 제시하였다. 또한 제시된 모델을 이용하여 실제 터널 굴착 현장에 대한 3차원 부정류 모사를 수행하여 터널 굴착 전 지하수 유동양상과 터널 굴착 및 방수공사에 따른 지하수 유동 체계의 변화를 분석하였다.

민감도 분석

지하수 모델링 상용 프로그램인 Visual Modflow를 이용하여 터널 굴착 시 터널 내부로의 지하수 유입량 및 영향반경에 영향을 미치는 수리 인자들에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석에 이용된 수리 인자로는 터널 상부로부터 지하수면까지의 높이, 즉 굴착 초기 압력수두(H), 수리전도도(K), 비저유계수(S_v) 및 비산출률(S_y)이다.

개념모델 설정

Fig. 1은 민감도 분석을 위하여 설정한 가상의 개념 모델이다. 그림과 같이 $1\text{ km} \times 1\text{ km} \times 0.1\text{ km}$ 규모의 모델 영역에 대하여 $100 \times 100 \times 10$ 의 3차원 격자

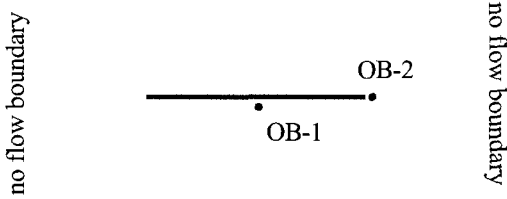
망을 설정하였다. 모델을 단순화하기 위하여 하부 및 측면은 불투수 경계로 설정하였으며, 지하수 함양은 발생하지 않으며, 초기 수두는 100 m로 모델 영역 전체가 포화 상태인 것으로 가정하였다. 터널은 그림과 같이 모델 영역의 중앙에 위치하며, 터널의 폭과 높이는 10 m, 길이는 500 m이다. 격자망의 열과 층의 크기는 터널의 크기와 일치하도록 설정하였으며, 터널의 입구와 출구의 수평적 위치는 각각 26행 50열, 75행 50

열이다. 본 모델에서는 민감도 분석의 효율성을 고려하여 터널 전체 구간을 일시에 굴착하는 것으로 가정하였다.

터널 굴착 구간은 굴착 후 압력 수두 성분이 순간적으로 제거되면서 수두 강하가 발생하며 이후 터널 고도에 해당하는 수두 값을 가지게 된다. 따라서 터널이 위치하는 격자를 터널 고도에 해당하는 일정수두 격자로 변환시킴으로써 굴착을 모사할 수 있다. 실제 터널 굴착 속도를 고려한 모사 방법과 결과는 다음 절에서 자세히 탐색하였다.

no flow boundary

(a)



no flow boundary

(b)



지하수 유입량 및 영향반경 분석

Table 1과 같이 굴착 초기 압력수두, 수리전도도, 비저유계수 및 비산출률과 같은 모델 입력 변수들을 변화시키면서 총 14번의 부정류 모사를 수행하여 이들 변수들에 대한 모델의 민감도 분석을 실시하였다.

Fig. 2는 Table 1의 입력 변수들의 변화에 따른 터널 내부로의 지하수 유입량의 시간적 변화를 나타낸 것이다. 앞에서 언급한 바와 같이 본 모델은 터널 전체 구간을 일시에 굴착하는 것으로 가정하였으므로 터널 내부로의 지하수 유입량은 시간이 지남에 따라 지수 함수적인 감소 경향을 보였다. 굴착 초기 압력수두와 수리전도도는 터널 유입량을 결정하는 가장 중요한 모델 변수인 것으로 나타났다. 비산출률은 굴착 후 시간이 경과하면서 점차 민감도가 증가하였으며, 비저유계수는 지하수 유입량에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 모사되었다.

Fig. 3은 각 모델 변수의 민감도를 정량적으로 해석하기 위하여 모델 변수의 가장 작은 값을 기준으로 상대적인 값의 변화를 계산하여 도시한 것이다. Fig. 3a

Fig. 1. The conceptual model and the finite difference grid used for the sensitivity analysis: (a) plane view, (b) cross-sectional view.

Table 1. Input parameters used in the sensitivity analysis

H (m)	K (m/day)	S_s (m^{-1})	S_y
10, 30, 50, 70	0.01	10^{-5}	0.01
30	0.005, 0.01, 0.05, 0.1	10^{-5}	0.01
30	0.01	10^{-7} , 10^{-6} , 10^{-5}	0.01
30	0.01	10^{-5}	0.001, 0.01, 0.1

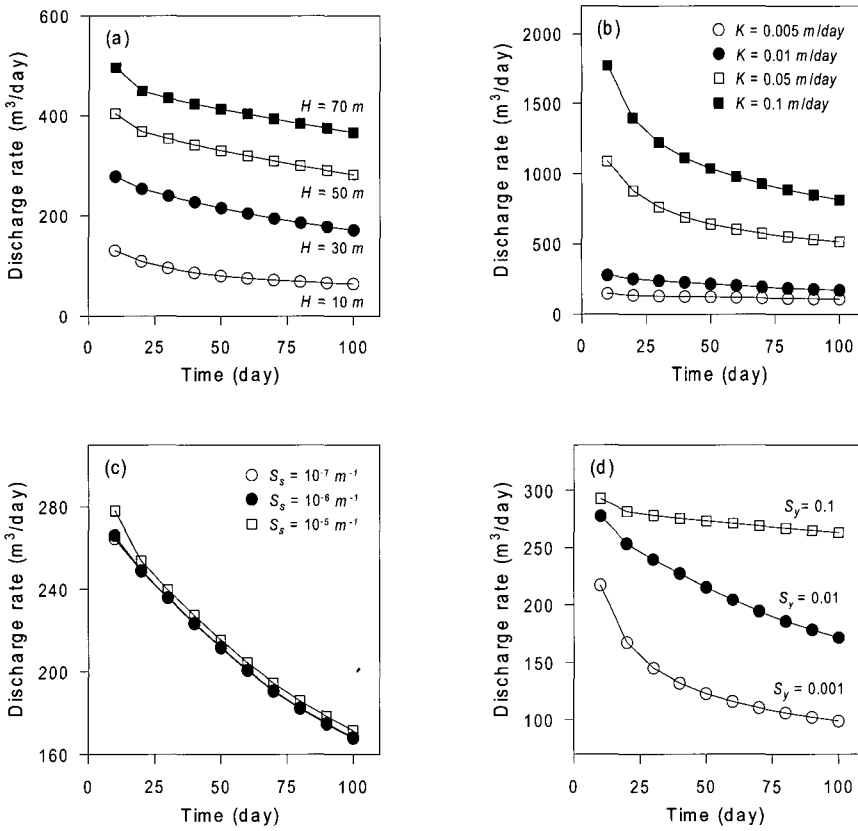


Fig. 2. Variations of the simulated groundwater inflows into the tunnel with changes of input parameters: (a) the tunnel depth, (b) the hydraulic conductivity, (c) the specific storage, and (d) the specific yield.

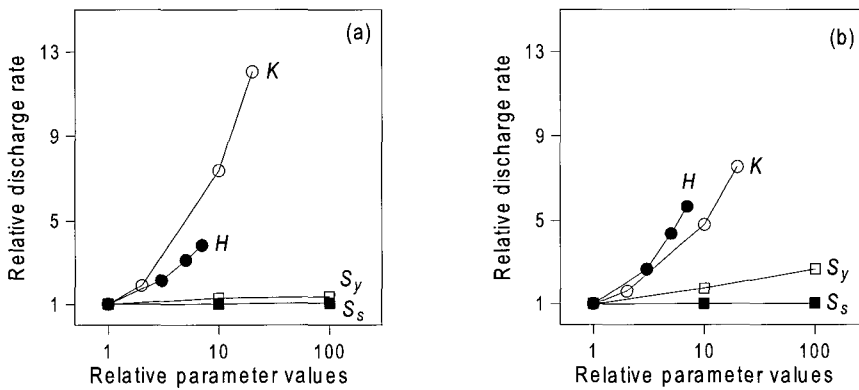


Fig. 3. The normalized effect of varying input parameters on the groundwater inflows: (a) 10 days and (b) 100 days after tunnel excavation.

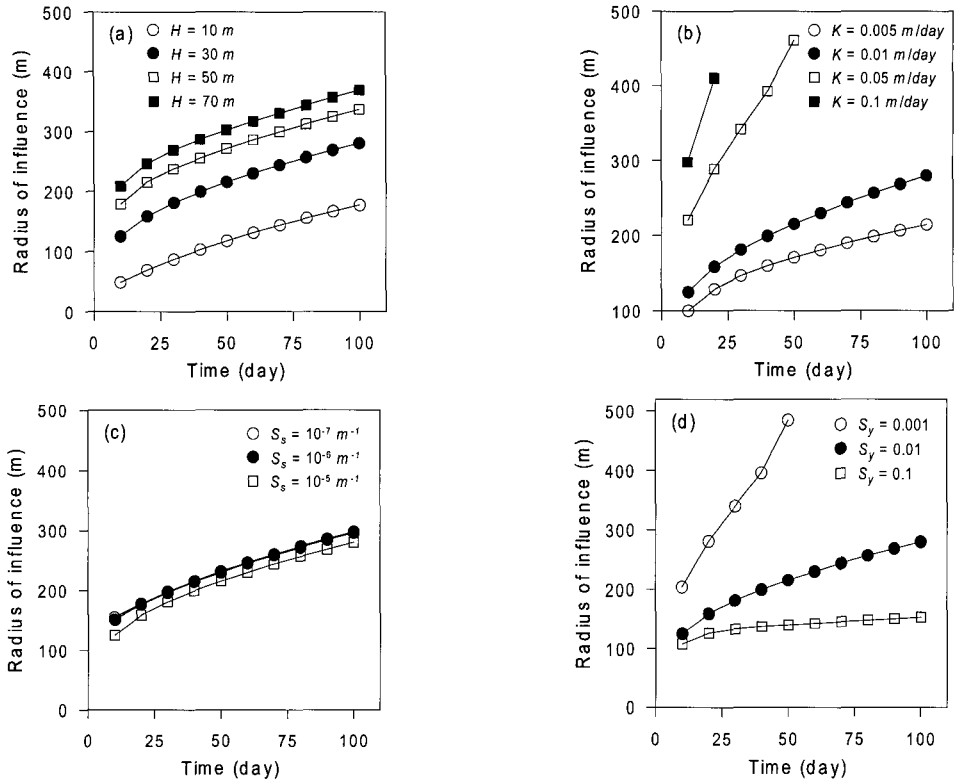


Fig. 4. Variations of the radius of influence induced by tunnel excavation with changes of input parameters: (a) the tunnel depth, (b) the hydraulic conductivity, (c) the specific storage, and (d) the specific yield.

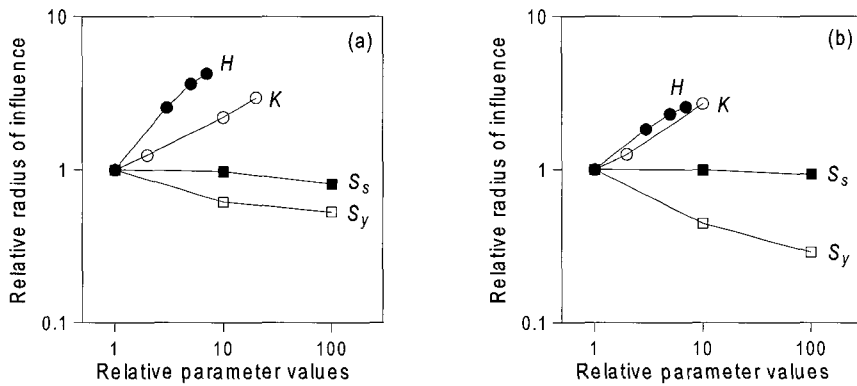


Fig. 5. The normalized effect of varying input parameters on the radius of influence induced by tunnel excavation: (a) 10 days and (b) 50 days after tunnel excavation.

는 굴착 10일 후, Fig. 3b는 굴착 100일 후의 결과를 보여준다. 굴착 초기(Fig. 3a)에는 지하수 유입량이 수리전도도에 가장 민감한 것으로 나타났으며, 다음은 초기 압력수두, 비산출률, 비저유계수 순이다. 하지만 굴착 후 시간이 경과하면서 수리전도도의 민감도는 감소한 반면, 초기 압력수두의 민감도는 점차 증가하여 100일 경과 후의 지하수 유입량(Fig. 3b)은 초기 압력수두에 대한 민감도가 가장 큰 것으로 나타났다. 자유면 대수층의 저유성을 나타내는 비산출률의 경우 굴착 후 시간이 경과하면서 민감도의 완만한 증가 추세를 보였다.

Fig. 4는 각 입력 변수들의 변화에 따른 터널 굴착 영향반경의 시간적 변화를 나타낸 것이다. 영향반경은 분석의 편의성을 고려하여 터널 중앙부를 관통하는 남북 방향의 단면에서 수위강하가 1 m 발생한 지점의 터널로부터의 이격 거리로 가정하였다. 그림과 같이 터널 굴착에 따른 지하수 영향반경은 굴착 초기 압력수두 및 수리전도도와는 정(+)의 관계를, 비산출률 및 비저유계수와는 부(-)의 관계를 보였다. Fig. 4b 및 Fig. 4d와 같이 일부 모사($K = 0.05 m/day$, $K = 0.1 m/day$, $S_y = 0.1$)의 경우 영향반경이 모사 기간 중에 모델 경계를 넘어서는 것으로 나타나 이후의 시간에 대해서는 영향반경을 산정할 수 없었다.

Fig. 5는 Fig. 3과 같이 각 모델 변수의 가장 작은 값을 기준으로 영향반경의 상대적인 값의 변화를 계산하여 도시한 것이다. Fig. 5a는 굴착 10일 후, Fig. 5b는 굴착 50일 후의 결과를 보여준다. 영향반경은 터널 내 지하수 유입량과 달리 굴착 초기에는 초기 압력수두에 가장 민감한 것으로 나타났으며, 다음은 수리전도도, 비산출률, 비저유계수 순이다. 하지만 굴착 후 시간이 경과하면서 초기 압력수두의 민감도는 뚜렷하게 감소한 반면, 수리전도도의 민감도는 미약하게 증가하여 50일 경과 후에는 두 변수의 민감도가 비슷한 것으로 나타났으며, 이후 더 시간이 경과할 경우 역전되는 양상을 보일 것으로 예상된다. 한편 비산출률의 민감도는 굴착 초기에 상대적으로 작은 값을 보였으나, 시간이 경과하면서 점차 증가하여 50일 후에는 초기 압력수두 및 수리전도도와 같은 수준의 값을 보였다. 비저유계수는 터널 내 지하수 유입량과 같이 영향반경에도 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

터널 굴착 과정 및 방수공사에 대한 부정류 모사

앞의 민감도 분석을 위해 설정한 모델에서는 터널 전체 구간을 일시에 굴착하는 것으로 가정하고 굴착 후의 터널 내 지하수 유입량과 영향반경의 시간적 변화를 모사하였다. 하지만 모델에서 설정한 가정은 민감도 분석의 편의성을 위한 것으로 수 m/day 정도로 굴착이 진행되는 실제 상황을 재현하는 모델로는 적합하지 않다. Fig. 6은 터널 굴착 과정 및 굴착 후 방수공사를 부정류 모사하는 과정을 도식화한 것으로 요약하면 다음과 같다.

1) 터널 굴착 전 모델 영역의 지하수 유동 체계에 적합한 정류 모사를 수행한다.

2) 터널 굴착 시점에 위치한 격자를 터널 고도에 해당하는 일정수두 격자로 변환시키고, 부정류 모사 수행 시 터널 내부로의 지하수 유입량을 계산할 수 있도록 터널 굴착 구간을 제 2구역(zone)으로 지정한다 (Visual Modflow의 고유 기능).

3) 굴착 방향으로의 격자의 크기와 터널 굴착 속도를 고려하여 굴착 시간을 구한 후 정류 모사 결과를 부정류 모사의 초기 조건으로 설정하여 부정류 모사를 수행한다.

4) 터널에 해당하는 격자에 대하여 굴착 방향으로 위 2, 3단계를 순차적으로 반복하여 터널 전구간의 굴착을 완료한다. 단, 부정류 모사의 초기 조건은 전단계의 부정류 모사 종료 시점의 결과를 이용해야 한다.

5) 터널 굴착이 완료되면 방수공사 모사를 위하여 굴착 시 일정 수두로 설정되었던 터널 구간의 격자들을 불활성 격자(inactive cell)로 변환한다. 방수공사는 터널 전구간에 대하여 단시간에 시행될 수 있으므로 터널 굴착 모사와 달리 터널의 모든 격자들을 동시에 불활성 격자로 변환할 수 있다.

6) 터널 굴착 종료 시의 부정류 모사 결과를 초기 조건으로 설정하여 부정류 모사를 수행한다. 이때 방수공사 후 지하수계가 굴착 전의 원래의 상태로 회복되는 과정을 모사할 수 있도록 모사 시간을 크게 설정해야 한다.

위와 같이 터널 굴착 및 방수공사 과정을 모사하기 위해서는 여러 번의 부정류 모사를 반복 수행해야 하므로 전 과정을 완료하는데 많은 시간이 요구된다. 따라서 격자망 설정 시 터널 굴착 방향으로의 격자의 크기를 적절하게 설정해야 할 필요가 있으며, 불가피하게 터널 구간의 격자의 개수가 많게 설정될 경우에는 2, 3단계를 여러 개의 격자에 대하여 동시에 수행하여도 무방하다.

터널의 방수형식은 배수형과 방수형으로 대별되는

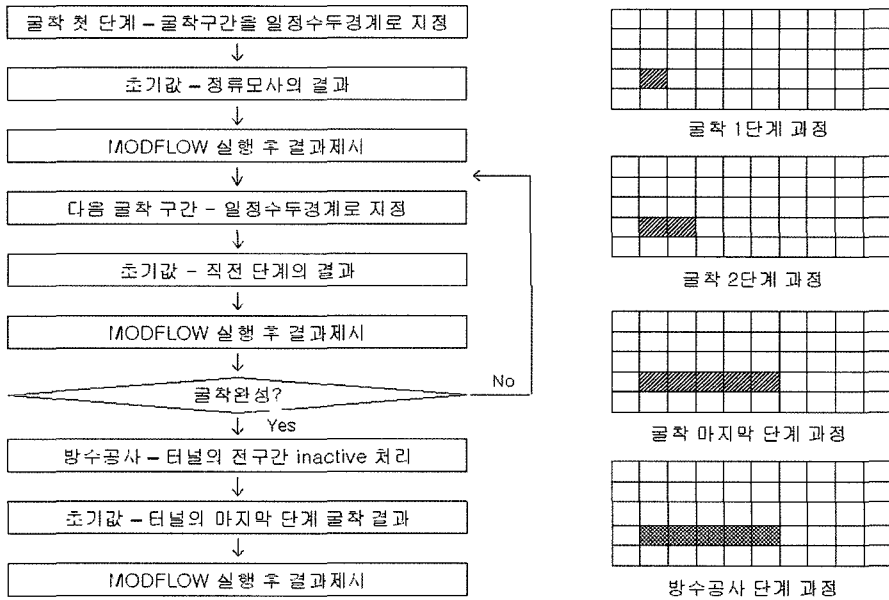


Fig. 6. The suggested procedure for a transient simulation of stepwise tunnel excavation and the watertight lining.

데, 이상의 모사 과정은 터널 전체를 방수 시공하여 터널 내로 유입되는 지하수를 완전히 차단하는 방수형 터널에 해당된다. 따라서 방수막 배면과 바닥으로부터 유입되는 지하수를 배수공을 통하여 처리하는 배수형 터널의 경우 위의 방법을 적용할 수 없다. 최미정 외(2004)는 터널 굴착 구간에 대하여 배수경계조건을 적용하였는데, 이는 배수형 터널의 굴착을 모사하는 방법이라고 할 수 있다. 하지만 이 경우 배수경계의 수리전도성(conductance)의 값에 따라 터널 내부로의 지하수 유입량이 달라지므로 입력 값의 선정에 유의해야 한다.

터널 굴착 과정의 부정류 모사

앞에서 설정한 개념 모델을 이용하여 터널 굴착 과정을 모사하였다. 위에서 언급한 바와 같이 부정류 모사 첫 단계의 초기조건은 정류모사 결과를 이용해야 하지만, 개념 모델에서 모델영역 전체의 초기수두로 가정한 100 m 값을 초기조건으로 이용하였다. 수리전도도, 비저유계수, 및 비산출률은 국내 암반의 일반적

인 특성을 고려하여 각각 $K = 0.01m/day$, $S_s = 10^{-5}m^{-1}$, $S_y = 0.01$ 의 값을 사용하였으며, 터널 굴착 초기 압력수두 $H = 30m$ 이다.

Fig. 1의 개념 모델에서 터널의 길이는 500 m, 굴착 방향으로의 격자의 크기는 10 m로 설정하였으므로 터널 구간에 해당하는 격자의 수는 50개이다. 본 모델에서 굴착 속도는 5 m/day로 가정하였으며, 터널 구간의 격자의 수가 많이 1회의 부정류 모사에서 2개의 격자를 동시에 굴착하는 것으로 모사하였다. 따라서 터널 굴착을 완료하는데 총 25회의 부정류 모사가 순차적으로 반복 수행되었다.

Fig. 7a는 터널 굴착 4일 후 터널 고도에서의 등수위선 평면도를 나타내며, Fig. 7b는 터널을 관통하는 동서 방향의 단면에서의 등수위선도를 나타낸다. 그림과 같이 굴착을 시행한 구간의 등수위선은 터널을 중심으로 동심원상으로 분포한다. 터널에서 약 55 m 정도의 범위까지 굴착에 의해 수위강하가 발생하였으며, 지하수면은 터널 상부에서 약 1 m 정도 하강되었다. Fig. 7c와 Fig. 7d는 터널 굴착 완료 시점인 100일 후의

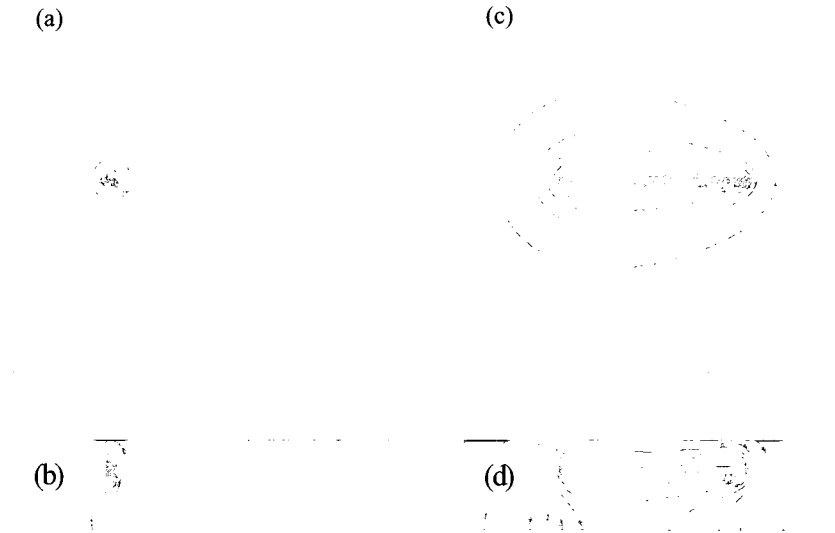


Fig. 7. Distribution of the hydraulic head: (a) and (b) 10 days, (c) and (d) 100 days after tunnel excavation (contour interval: 3m).

결과이다. 터널 굴착에 의해 수위강하가 발생한 영향 범위는 굴착 구간의 남북방향으로 약 230 m이며, 터널 상부의 지하수면은 약 10 m 하강되었다. Fig. 7c에서 터널의 입구 주변부는 굴착 후 장기간 터널 내부로의 지하수 유출이 발생하였기 때문에 굴착에 의한 영향 반경이 크게 나타난 반면, 출구 주변부는 상대적으로 단기간 유출이 발생하여 영향반경이 작게 나타나 등수위선도가 터널 굴착 방향으로 비대칭적인 모양임을 보여준다.

방수공사 후의 부정류모사

터널 방수공사 후의 지하수 유동 체계의 변화를 분석하기 위하여 방수공사 구간에 해당되는 격자를 비활성 격자로 변환하고 300일 동안 부정류 모사를 수행하였다. 방수공사는 터널 굴착 완료 직후 전 구간에 대하여 순간적으로 실시하였다고 가정하였으며, 터널 굴착 완료시의 모사 결과 계산된 수두 값을 방수공사 후 부정류 모사의 초기 조건으로 이용하였다. Fig. 8은 방수공사 10일 후, 100일 후, 200일 후, 300일 후 터널 층에서의 등수위선도를 나타낸 것이다. 방수공사 직후 터널 주변에서부터 전체적으로 수두 회복이 진행되며, 특히 터널 입구 주변에서는 빠르게 수두가 회복

됨을 볼 수 있다. 터널 주변과 달리 터널 외곽지역에서는 시간이 경과하면서 수두가 강하되는 것으로 모사되었는데 이는 본 모델에서 지하수 함양이 발생하지 않는 것으로 가정하였기 때문이다.

Fig. 9는 터널 주변에 설치한 가상의 관측정(Fig. 1)에서 터널 굴착 과정 및 방수공사 이후 동안의 수두 변화를 나타낸 것이다. OB-1은 터널 중간 지점에서 남쪽으로 20 m 떨어진 지점에 위치하며, OB-2는 터널 출구부에서 동쪽으로 20 m 떨어진 지점에 위치한다. OB-1의 경우 터널 굴착 초기에는 굴착의 영향이 거의 나타나지 않다가 터널 중간부가 굴착되기 시작하면서 급격한 수위 강하를 보였으며, OB-2는 터널 출구부가 굴착되면서 급격한 수위 강하를 보였다. 굴착 완료 시 OB-1과 OB-2의 수위 강하는 각각 17 m와 7 m 정도이며, 방수공사 직후 매우 빠르게 수위가 회복되는 양상이 뚜렷하게 나타났다.

실제 모델 적용 사례

앞에서 제시한 터널 모델링 기법을 실제 여수 지역의 터널 시공 예정 구간에 적용하여 3차원 부정류모사를 수행하였다. Fig. 10a는 터널 주변 지역의 지형 및

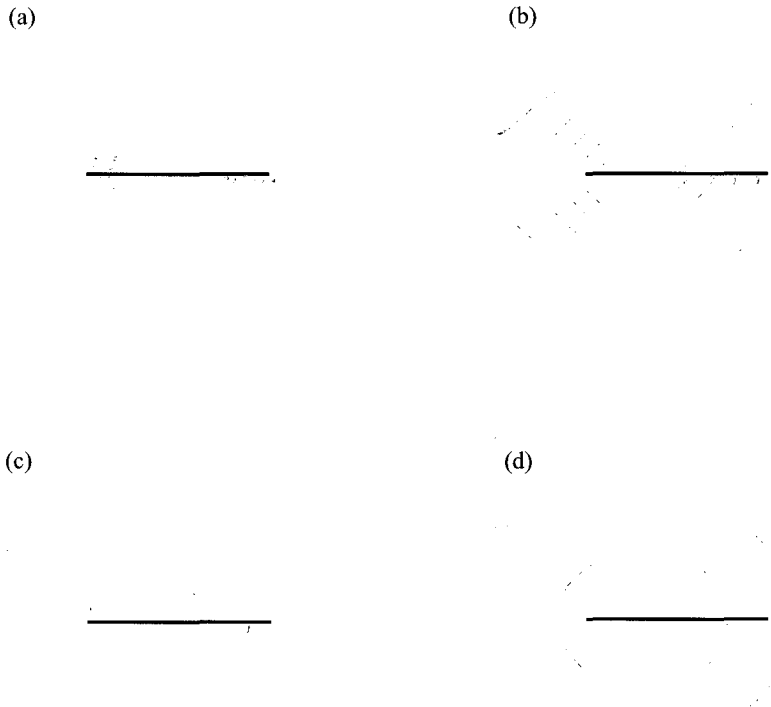


Fig. 8. Distribution of the hydraulic head: (a) 10 days, (b) 100 days, (c) 200 days, and (d) 300 days after watertight lining (contour interval: 1m).

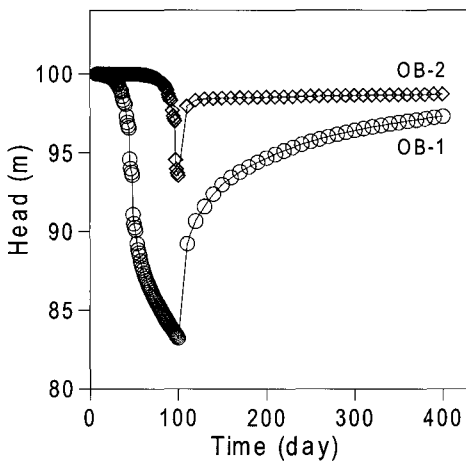


Fig. 9. Simulated head changes at 2 selected observation wells as given in Fig. 1a.

모델 영역을 도시한 것으로 터널 주변 지역의 지형은 북서쪽에서 약 400 m 정도로 고도가 가장 높으며, 전체적으로 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 낮아져 남쪽의 중앙부에서는 약 153 m 정도의 낮은 고도를 보인다. 터널이 통과하는 지역의 고도는 약 185~270 m 정도이며, 터널 동측의 남쪽방향으로 약 240 m 떨어진 곳에 저수지가 위치한다.

터널은 높이 7.6 m, 너비 7.5 m, 총길이 2,200 m이며, 저면 고도는 125.94 m로 지표아래 59~144 m 깊이에 위치하는 산악터널이다. 본 연구지역에는 터널 구간 913 m 및 2,513 m 지점에서 N30°E-80°NW, N50°E-80°SE 방향의 단층이 위치하며, 각각 1.87 km와 0.55 km 정도의 길이를 갖는 것으로 조사되었다 (Fig. 10b). 터널에 대한 이러한 정보는 모델 영역에 대한 격자망 설정 시 유용한 자료로 활용되었다.

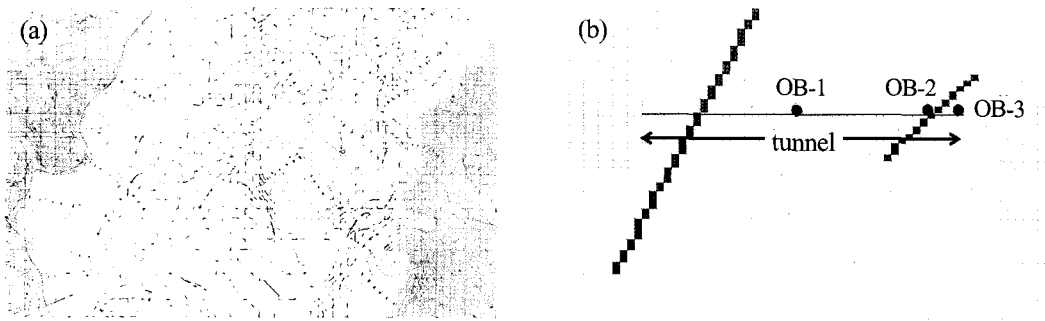


Fig. 10. (a) Topographic map of the tunnel construction site in Yosu and (b) the finite difference grid used in the simulation where 3 observation wells and 2 identified faults are illustrated.

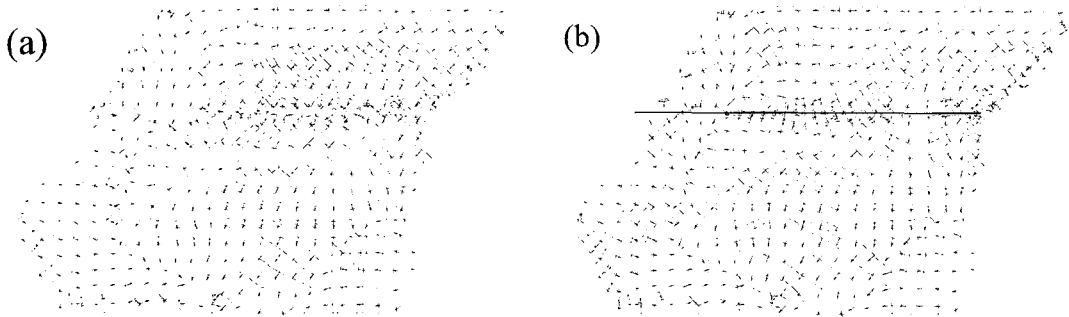


Fig. 12. Distribution of the hydraulic head: (a) 100 days and (b) 730 days after the tunnel lining.

모델설정

Fig. 10b는 모델 영역, 터널 구간, 단층의 위치, 및 격자망을 나타낸 것으로 모델 영역은 $3,351\text{ m} \times 1,983\text{ m} \times 350\text{ m}$ 이며, 총 50,384개의 격자로 구성된다. 격자망 설정 시 터널 굴착 구간에 대해서는 실제 터널의 크기에 일치하도록 행 격자의 크기를 설정하였으며, 터널 주변 영역은 터널에서 멀리 떨어진 지역보다 조밀하게 설정하였다. 열의 격자 간격은 터널 굴착 속도(5 m/day)를 고려하여 한 격자 당 굴착 기간이 10일이 되도록 50 m 로 일정하게 설정하였다. 층의 격자 간격은 터널 구간을 포함하는 3개 층은 터널의 높이인 7.6 m 로 설정하였으며, 터널 층에서 멀어질수록 격자 간격을 점점 크게 하였다. 터널의 고도는 $125.94\text{--}133.54\text{ m}$ 로 13층에 해당하며, 터널 굴착은 중간지점(33행, 20열 13층)에서 시작하여 좌우로 동시에 진행되는 것으로 모사하였다.

모델 영역에서 하천에 해당하는 격자점의 경우 지

형도 상에 나타난 하천 고도를 이용하여 일정수두경계로 처리하였으며, 층별로 하천의 고도를 입력함으로써 모델의 경계조건이 될 뿐 아니라 고도효과까지 반영되도록 하였다. 반면에 지형도 상에서 분수령에 해당하는 경계 외부는 모사결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상되므로 모든 층에서 비활성 격자점으로 설정하였다. 본 지역의 경우 하천 수두는 $153.5\text{--}225.94\text{ m}$ 의 범위를 나타내며, 모델의 6~10층에 걸쳐 위치한다.

모델 보정

터널 굴착 전 연구 지역의 지하수계를 규명하기 위하여 정류 모사를 수행하였으며, 현장 조사 결과를 이용하여 모델 보정을 실시하였다. 앞의 민감도 분석 결과에 나타난 바와 같이 터널 굴착 시 터널 내 지하수 유입량 및 영향 반경에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 수리전도도이다. 따라서 모델의 입력 변수인 지하수

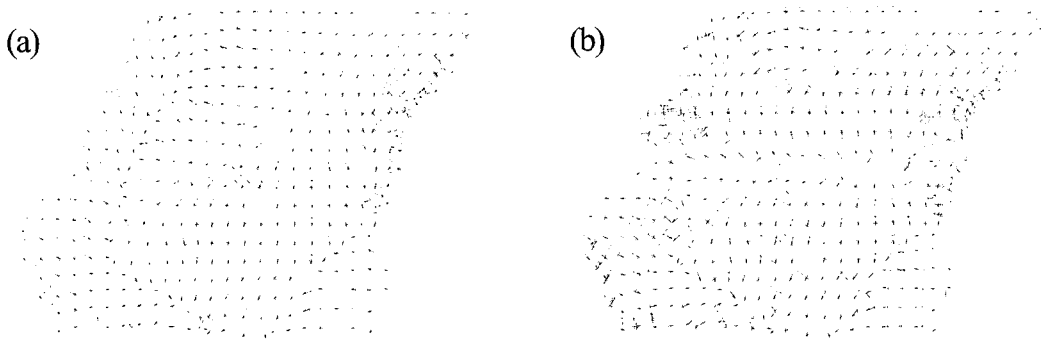


Fig. 11. Distribution of the hydraulic head: (a) before and (b) after the tunnel completion (240days).

함양률, 비저유계수 및 비산출률은 추정값을 이용하여 고정시키고, 수리전도도를 변화시키면서 정류모사를 반복 수행하여 모델을 보정하였다. 7개의 시험정을 대상으로 수압시험 및 순간충격시험을 통해 구한 수리전도도의 평균값과 1개 시험정의 양수시험 및 회복시험을 통해 구한 수리전도도의 평균값을 바탕으로 아래와 같이 모델 보정을 수행하여 수리전도도의 값을 유추하였다.

수압시험 및 순간충격시험을 통하여 획득한 수리전도도의 평균값(0.0167 m/day)에 의한 모사 결과 시험

정에서 계산된 수두는 실제 측정값과 유사하지 않을 뿐 아니라 모델 영역 전체에서 지하수면이 지표면의 고도보다 높게 나타났다. 따라서 터널 구간 중 극히 일부분에서 얻어진 지반의 수리전도도는 터널 모델링에서 모델 영역 전체의 대표 값으로 이용될 수 없음을 보여 주었다.

한편 양수시험을 통하여 획득한 수리전도도의 평균값(0.050 m/day)을 이용한 결과, 충적층이 발달한 계곡부 및 모델 영역 하부의 지하수면이 지표면의 고도보다 높게 나타났다. 수리전도도를 너무 작게 설정할 경우 정류모사 결과는 이와 같이 지하수면의 수두가 지표면의 고도보다 높게 나타나 터널 주변 지형의 고도가 반영되지 않는다. 한편 수리전도도를 과도하게 큰 값으로 설정한 경우 정류모사 결과는 모델 영역 내 일부 하천에서 지표수가 대수층으로 유입되는 손실하천이 된다. 국내의 경우 대부분의 하천은 하천으로 지하수가 유입되는 이득하천이므로 하천의 고도는 수리전도도의 대략적인 값의 범위를 추정하는데 이용될 수 있다.

일련의 정류모사를 통하여 시험정에서 측정된 지하수면과 모델링에 의해 계산된 지하수면의 고도를 비교하면서 최적의 수리전도도 값을 추정하였다. 시행착오법을 통하여 보정한 결과 암반층 및 충적층의 수리전도도가 각각 0.03 m/day 와 1.5 m/day 일 때 시험정의 지하수면과 모사 결과가 대체로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 한편 2개의 단층에 해당되는 격자점의 경우 주변 암반층의 수리전도도보다 클 것으로 예상되지만 어느 정도 규모인지에 대한 현장 자료가 전무하여 충적층의 대표 값인 1.5 m/day 로 가정하였다.

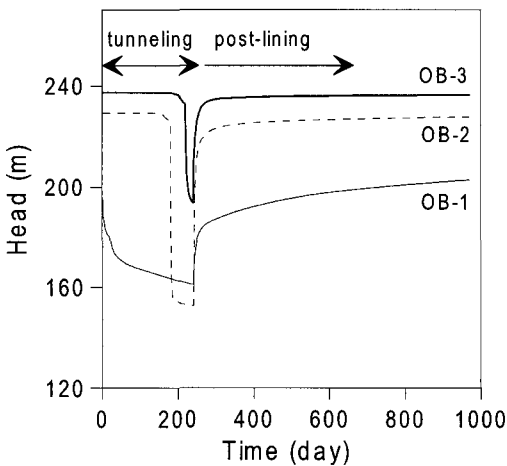


Fig. 13. Simulated head changes at 3 selected observation wells as given in Fig. 10b.

Fig. 11a는 터널 주변 지역의 정류모사 결과 나타난 등수위선도이다. 전체적으로 북동에서 남서 방향으로 지하수가 흐르며, 충적층이 발달한 계곡부 하천을 통하여 지하수가 배출된 후 남쪽의 저지대 하천으로 유입되는 경향을 잘 보여준다.

예측 모델링

터널 굴착 과정 및 굴착 후의 지하수 유동 체계의 변화를 분석하기 위하여 부정류모사를 수행하였다. Fig. 11a의 정류모사 결과를 부정류모사의 초기 조건으로 설정하였으며, 부정류 모사의 수행 방법은 앞에서 제시한 내용과 동일하다.

Fig. 11b는 터널 굴착 완료 후(터널 굴착 240일 후)의 등수위선도를 나타낸 것으로 터널 굴착 구간 주변에서의 수두 분포 및 지하수 유동 방향이 정류모사 결과와 상이한 양상을 보여준다. 터널 굴착에 의해 수위 강하가 발생한 영향범위는 터널의 북쪽으로 약 300 m, 남쪽으로 약 640 m 정도이다. 터널 하류의 경우 남 또는 남서의 지하수 흐름 방향이 굴착 후 터널 방향(북)으로 바뀌면서 터널 남측 400 m 지점에 분수령이 발생하였다.

터널 동남부에 위치하는 저수지는 저수지 북쪽의 계곡으로 기저유출되는 지하수에 의하여 담수량이 확보된다. 따라서 터널 굴착에 의하여 저수지 주변의 지하수 유동계가 변하는 경우 저수지의 담수량에 영향을 미칠 가능성이 존재한다. 정류모사 시 저수지 방향으로 유동하는 지하수의 일부가 굴착으로 인해 터널 내로 유입됨으로서 저수지로 유입되는 지하수의 양은 감소될 것으로 모사되었으며, 단층이 지나가는 터널 구간 주변은 단층의 주향방향을 따라서 수위강하가 더 크게 발생하였다.

터널 방수공사 후의 지하수 유동 체계 변화를 분석하기 위하여 방수공사 구간에 해당되는 격자를 비활성 격자로 설정하고 굴착 완료 후 730일 동안 시간에 따른 모델 영역 전체의 수두 변화를 모사하였다. Fig. 12는 터널 방수공사 100일 후와 730일 후의 등수위선도를 나타낸 것이다. 그림과 같이 방수공사 100일 후에는 터널 주변과 저수지 부근에서부터 수두가 회복되어 730일 후에는 전체적인 지하수 유동 체계가 굴착 전 정류상태(Fig. 11a)와 유사해 짐을 볼 수 있다.

Fig. 13은 터널 주변에 설치한 가상의 관측정(Fig. 10b)에서의 수두 변화를 나타낸 것으로 굴착시기에 따

른 수두 변화 양상을 잘 보여준다. OB-1은 터널 굴착 시작 지점 직상부에 설치된 가상의 관측정으로 터널 굴착 초기에 급격한 수위강하를 보인다. OB-3은 터널 우측의 직상부에 설치된 관측정으로 터널 굴착 초기에는 일정한 수두를 나타내며 터널의 후반부가 굴착되면서 급격한 수위강하를 보인다. OB-2는 단층에 인접한 관측정으로 터널 굴착 후 상대적으로 큰 수위 강하가 발생하였으며, 터널 내 지하수 유입량도 이 지점을 통과하면서 급증하는 것으로 모사되었다. 터널 주변의 관측정들은 방수공사 직후 수두가 빠르게 회복되어 약 150일 후에는 거의 정류상태에 도달하는 것으로 나타났다. 터널 굴착에 따른 지하수위 강하는 그림과 같이 터널로부터의 이격 거리 및 굴착 시기와 밀접한 관계가 있으며 모델에서 가정한 수리전도도의 변화에 따라 매우 민감하게 달라질 수 있다.

토의 및 결론

Visual Modflow를 이용하여 터널 시공 시 발생하는 지하수계의 변화에 영향을 미치는 수리 인자들에 대한 민감도 분석을 실시하였으며, 굴착 과정 및 방수공사를 모사할 수 있는 부정류 모델을 제시하였고 현장 사례 적용을 통하여 터널 모델링 수행 시 발생하는 제반 문제점들을 고찰하였다. 본 연구를 통하여 도출한 주요 결론은 다음과 같다.

1. 민감도 분석 결과 터널의 심도와 암반의 수리전도도는 터널 내부로의 지하수 유입량과 굴착 영향반경을 결정하는 가장 중요한 모델 변수인 것으로 나타났다. 터널 심도의 경우 굴착 후 시간이 경과하면서 지하수 유입량에 대한 민감도는 증가한 반면 영향반경에 대한 민감도는 감소하였으며, 수리전도도는 이와 상반된 경향을 보였다.

2. 한편 지하수 유입량 및 영향반경에 대한 비산출물의 민감도는 굴착 초기에는 매우 작았으나 시간이 경과하면서 점차 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 배수형 터널의 경우 비산출물은 수리전도도와 함께 터널 굴착으로 인한 주변 지역 지하수계의 변화에 지배적인 영향을 미치는 변수인 것으로 분석되었다.

3. 터널 굴착 과정 및 방수공사를 모사할 수 있는 부정류 모델을 제시하였으며, 본 모델은 방수형 터널 설계 시 주변 지역의 지하수 영향 평가 기법으로 유용하게 활용될 수 있다.

4. 터널 모델링에서 가장 중요한 수리 상수는 수리

전도도이며, 모델 보정을 통하여 최적의 값을 구하여야 한다. 실제 모델 적용 사례를 통하여 몇 개 우물의 현장시험을 통하여 획득한 수리전도도는 모델의 입력 자료로 활용하는데 한계가 있는 것으로 분석되었다. 특히 모델링 대상 지역에 층적층이 발달한 경우 암반과 층적층의 수리전도도를 구분하여 설정할 필요가 있으며, 이러한 점에 유의하여 현장 시험을 실시하여야 한다. 대상 지역 내 우물에서 관측된 지하수위 및 지하수 배출이 발생하는 주요 하천들의 수위는 모델 보정을 통하여 암반 및 층적층의 수리전도도를 추정하는데 매우 유용하게 활용될 수 있다.

5. 터널 구간 중 극히 일부분에서의 시추를 통하여 얻어진 지하수위와 암반의 수리전도도에 대한 자료를 이용하는 모델링 결과는 본질적으로 오차를 수반할 수밖에 없다. 특히 대수층의 불균질성을 간과하는 경우 지하수 유동 모델링의 신뢰도가 많이 저하되는 것으로 알려져 있다. 터널 모델링의 경우 암반에 발달된 투수성이 양호한 균열이나 파쇄대 구간을 터널 굴착 과정에서 접하는 경우 지하수 유입량은 급증할 수밖에 없으며, 이러한 현상을 모델링을 통하여 모사하기 위해서는 터널 구간 및 주변 지역에 대한 정밀한 지질 구조 조사가 요구된다. 하지만 모델 입력 자료의 신뢰도를 높이기 위한 목적으로 연구 지역에 대한 광범위한 지질 조사 및 현장 시험을 수행하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 터널 시공 시 터널 내 지하수 유입량을 관측하거나 주변 우물에서 지하수위 변동을 관측하여 획득한 사후 모니터링 자료를 통하여 모델을 보정 또는 검증하는 것이 예측 모델의 신뢰도를 높일 수 있는 현실적인 방안일 것이다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 3-2-2)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 고태영, 문현구, 2001, 절리 암반의 등가 수리전도도와 터널 내 지하수 유입량 예측에 관한 3차원 연구, 대한지질학회 2001년도 춘계학술발표회 논문집.
- 남기천, 이형원, 배정식, 나경웅, 1994, 터널시공에 따른 지하수위 변화의 모델링과 이를 고려한 완전방수 터널의 라이닝 설계 예, 터널과 지하공간, 4, 24-30.
- 이병대, 2001, 영천댐 도수로터널 굴착과 관련된 수리지질학적 특성 연구, 부산대학교 대학원 이학박사 학위논문.
- 이인모, 김용진, 이명재, 남석우, 1993, 지하수를 고려한 터널 설계 및 막장의 안정성 검토, 대한토목학회 1993년도 학술발표회 개요집(I), 607-610.
- 이인모, 남석우, 이명재, 1994년, 정상류 조건하의 토사 터널의 해석 및 설계, 한국지반공학회지, 10(2), 41-56.
- 이희근, 전효택, 이종운, 이대혁, 류동우, 오석영, 1995, 동해신광산 터널굴착공사와 관련된 지표수 및 지하수의 유동변화에 대한 조사연구(1)-수문학 및 암반 수리학적 접근을 중심으로, 터널과 지하공간, 5, 347-362.
- 장근무, 1998, 3차원 균열연결망 모델에서의 유효투수계수 평가 및 터널굴착 지하수 유동해석에 대한 수치실험, 터널과 지하공간, 8, 275-286.
- 정현영, 송무영, 이경주, 2001, 지하 석유비축기지 주변의 지하수 개발에 의한 수리지질학적 영향의 수치해석 연구, 지질공학, 11(1), 37-50.
- 최미정, 이진용, 구민호, 이강근, 2004, 터널모델링시 개념모델에 따른 지하수 유동 예측결과 비교 연구, 지질공학, 14(2), 223-233.
- 허준석, 정일문, 허준행, 조원철, 1997, 해저 및 하저터널로의 지하수 유입에 관한 정량적 분석, 대한토목학회 논문집, 17(II-1), 13-22.

투 고 일 2004년 8월 12일
 심 사 일 2004년 8월 13일
 심사완료일 2004년 9월 7일

김용제
 한국지질자원연구원, 지하수지열연구부
 대전 유성구 가정동 30
 Tel: 042-868-3378
 Fax: 042-863-9404
 Email: yjkim@kigam.re.kr

정복선

(주)희송지오텍
 137-890 서울시 서초구 양재동 90-9번지 한국빌딩 4층
 Tel: 02-576-3801
 Fax: 02-579-5835
 Email: eyppenii@hanmail.net

구민호

공주대학교 지질환경과학과
 314-701 충남 공주시 신관동 182
 Tel: 041-850-8515
 Fax: 041-850-8479
 Email: koo@kongju.ac.kr

이진용

(주)지오그린21
 151-818 서울시 관악구 봉천7동 산4-8 서울대학교
 연구공원 본관 520호
 Tel: 02-875-9491
 Fax: 02-875-9498
 Email: hydroleec@empal.com