

단열암반내 터널 굴착에 따른 지하수유출 및 주변지역의 지하수위 하강예측 모델링

이병대^{*1)} · 성익환¹⁾ · 정찬호²⁾ · 김용제¹⁾

¹⁾한국지질자원연구원 지하수지열연구부

²⁾대전대학교 지질공학과

Modeling on the Prediction of Flow Rate and Groundwater Level Drawdown Associated with Tunnel Excavation in Fractured rock

Byeong-Dae Lee^{*1)} · Ig-Hwan Sung¹⁾ · Chan-Ho Jeong²⁾ · Yong-Je Kim¹⁾

¹⁾Groundwater and Geothermal Div. Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

²⁾Dept. of Geological Engineering, The University of Daejeon

단열암반내 터널 굴착에 따른 지하수 유출로 인하여 하강되었던 주변 지역의 초기 지하수위 하강 값을 예측하였고, 또한 향후 굴착될 터널 구간에 대해서 발생할 수 있는 지하수 유출량과 지하수위 하강을 예측하였다. 이미 굴착된 터널 주변 지역의 초기 지하수위 하강은 해석적인 방법을 이용하여 예측하였고, 향후 굴착될 터널에 대해서는 수치 모델링을 이용하여 예측하였다. 해석적인 방법에서 초기 지하수위는 15.3m 까지 하강하는 것으로 예측되었다. 수치 모델링에서 터널 컨덕턴스 값의 변화를 고려하지 않은 상태에서 터널 내로의 지하수 유출은 1,870m³/day 유출되는 것으로, 주변 지역의 지하수위는 5~25m 하강하는 것으로 예측되었다. 그리고 컨덕턴스가 50% 증가할 경우 지하수 유출량은 2,518m³/day, 지하수위는 5~35m 하강하는 것으로 예측되었고, 컨덕턴스가 50% 감소시에는 지하수 유출량은 1,273m³/day, 지하수위는 2~12m 하강하는 것으로 예측되었다.

주요어 : 유출량, 지하수위, 모델링, 컨덕턴스

Groundwater level drawdown of the first stage resulted from groundwater leakage into tunnel was predicted by an analytical approximation. And numerical modeling was performed to predict the flow rates into tunnel and the groundwater level decline in the vicinity of future proposed tunnel area using a groundwater flow model MODFLOW. Groundwater level of the first stage was predicted to decrease by 15.3 m in analytical approximation. The flow rates in the total length of the future tunnel, when it is excavated, would be approximately 1,870 m³/day in numerical model. The model predicts that the groundwater levels in the area around the future tunnel are expected to drop between 5 to 25 m relative to current groundwater levels. Under condition for a 50% tunnel conductance increase, the flow rate was estimated to be 2,518m³/day and the groundwater level drawdown was predicted to be between 5 to 35 m. The flow rate and the predicted groundwater level drawdown under a 50% tunnel conductance decrease was estimated to be 1,273m³/day and between 2 to 12 m.

Key words : flow rate, groundwater level, modeling, conductance

* Corresponding author : blee@kigam.re.kr

서 론

터널 굴착시에 발생하는 지하수 유동 변화는 터널의 안정성뿐만 아니라 주변 지역의 환경 변화에 매우 중요한 요인으로 작용하고 있다. 또한, 터널 굴착시에 단층 및 단층파쇄대, 절리 등의 단열구조대를 통과하게 되면, 이 구조대를 따라서 주변 대수층의 지하수 흐름이 터널 쪽으로 향하고, 터널 내로 지하수가 유출된다. 이로 인하여 주변 지역의 지하수위가 하강하고, 농업용수, 공업용수, 그리고 생활용수 등에 영향을 미치게 된다. 따라서, 터널 굴착으로 인한 지하수 유출량 변화와 수리지질 매개변수와의 관련성을 정확히 이해하여, 터널 완공 후 터널 주변 지역의 지하수위 회복여부 및 회복시기를 예측, 모델링 하는 것이 매우 중요하다.

단열암반에서 지하수 흐름을 묘사하는 수치모델로서, Long et al.(1982, 1985), Smith and Schwartz(1984), Schwartz et al.(1983)은 분리단열모델을 단열 매질에서 유체 유동을 해석하는 도구로 이용하였다. Kitterod et al.(2000)은 단열암반 대수층에서 터널내로의 지하수 유출을 모델링하기 위하여 지구통계학적인 방법을 이용하였다. 이 연구결과에 의하면 터널 굴착시 동서방향의 단열대가 터널과 수리적으로 연결되어 있어, 많은 양의 지하수가 터널내로 유출되었다. 국내에서도 함세영과 성익환(1999), 함세영과 임정웅(1994), Park and Lee(1995) 등에 의해서 단열암반 대수층에서의 지하수 흐름 모델이 연구되었고, 안상도 등(2000)은 MODFLOW를 이용하여 초정지역의 지하수 유동을 해석하였고, 지하수 개발에 따른 지하수위 하강에 대한 환경변화의 예측 모델링을 실시하였다.

연구지역은 충북 음성군 맹동면 인곡리, 꽃동네 일대로(Fig. 1), 금광산 개발을 위한 지하 갱터널 굴착으로 인하여 터널 주변 대수층의 지하수가 터널내로 유출되면서 연구지역 내의 지하수위가 하강하였다. 본 연구는 지하수 유출로 인한 주변지역의 초기 지하수위 하강을 예측하고, 향후 계획된 터널 굴착에 의해 터널내로 유출되는 지하수 유출량과 유출에 따른 주변지역의 지하수위 하강을 예측하기 위한 것이다. 이를 위하여 야외지질조사 및 지질구조조사, 야외시험에 의한 수리전도도 산정, 터널내 초기 유출량 등을 측정하였다.

터널 개요

연구지역의 터널은 금광산 개발을 위한 터널로서 충북 음성군 맹동면 인곡리에 위치하고 있다. 이 터널은 인곡리 입구로부터 꽃동네 부근의 출구까지 총 1,186m의 길이를 가지는 터널로서 금을 채광하기 위하여 2000년 6월경에 터널을 굴착하였으나 주변지역의 민원으로 인하여 현재 굴착이 중단된 상태에 있다. 현재 기존에 굴착된 터널의 길이는 남동방향으로 약 350m 정도이고 기울기(slope)는 대략 0.19m/m이다. 굴착된 터널 입구부의 고도는 109m이고 굴착 마지막 부분의 고도는 43m로 고도차이는 66m이다. 터널 굴착공법은 재래식 공법인 발파에 의한 굴착공법(NATM)으로 굴착되었다. 앞으로 계획된 터널의 굴착방향은 동서방향과 남동방향으로 터널의 연장길이는 836m이고, 굴착시점의 고도는 43m이고 굴착 종료시점의 고도는 35m이다.

수리지질학적 개념모델

수리지질 및 단열

연구지역 서쪽에는 대보화강암류인 화강섬록암이 관입하고 있으며, 동쪽에는 이를 부정합으로 덮고 있는 백악기의 퇴적암층인 백야리층이 분포하고 있다(Fig. 2). 21번 국도 변을 따라서 조구조적 규모의 북북동방향의 단층대가 발달하고 있다. 이 북북동 방향의 단층운동에 수반되어 형성된 2차단열인 R-단열의 남북방향 단층 두조가 평행하게 발달하고 있으며, 이 단층대를 따라서 꽃동네가 위치하고 있다. 뚜아골, 장풍골에는 3조의 남북단층이 1km 이상의 연장 길이를 보이며, 이 단층대를 따라서 산성 암맥과 염기성 암맥이 관입하고 있다. 장풍골 수박정작지, 양달말, 음달말 지역에서 개발하여 사용하는 지하수는 뚜아골과 장풍골을 통과하는 두조의 남북방향 단층과 연계되어 있다. 금광산을 개발하기 위한 굴착초기에 갱터널이 북북동방향과 남북방향의 단층대와 사교하는 곳에서 425m³/day의 지하수가 유출되었다.

지하수위 분포

연구지역의 지하수위는 연구지역에 위치하고 있는 95개의 관측공을 이용하여 3회에 걸쳐 지하수위를 측정하였다. 측정된 지하수위는 지표하 최저 0.24m에서부터 최고 82.8m까지 분포하고 있다. 이를 다시 분류하면

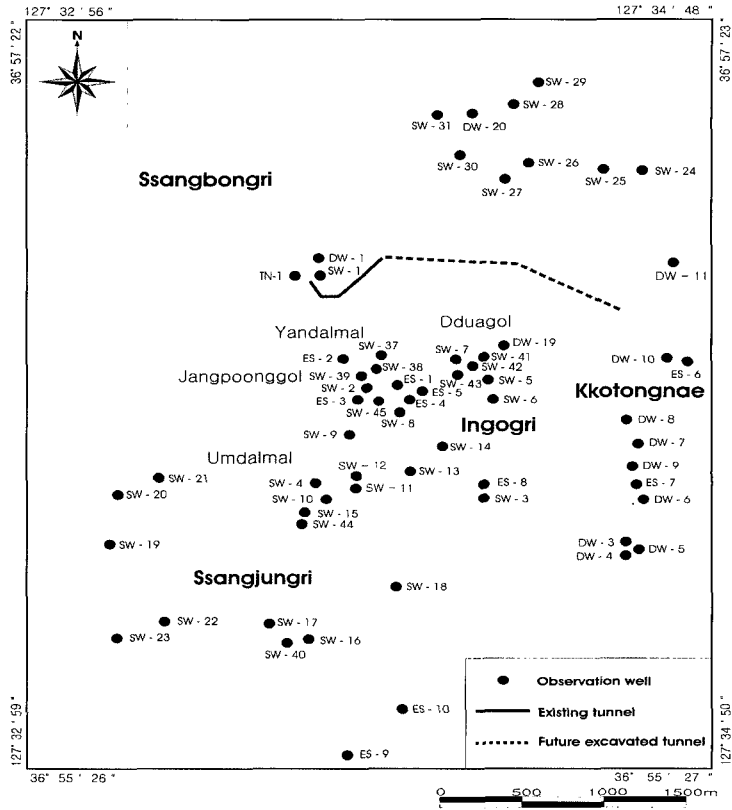


Fig. 1. Location of study area and the exing/future tunnel.

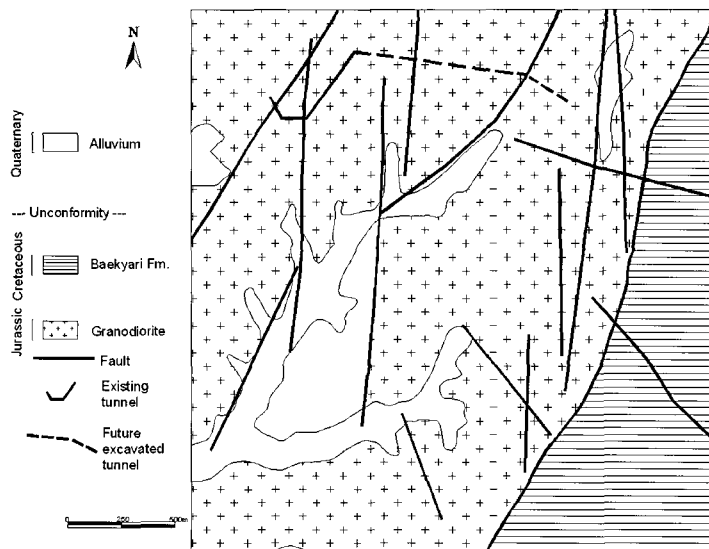


Fig. 2. Geologic map of the study area.

지표하 0.24m에서 7.98m까지의 얇은 지하수위 범위를 보이고 있는 지하수공들과 18.2m에서 82.8m까지 깊은 지하수위 분포를 보이고 있는 지하수공들로 나눌 수 있다. 얇은 범위에 속하는 지하수위는 기존의 지하수 연구 결과에 의하면(이병대의, 2000; 성익환외, 1998) 현재 연구지역의 전반적인 지하수위 분포양상은 양수나 터널 굴착공사에 의한 터널내로의 지하수 유출에 거의 영향을 받지 않는 자연상태의 지하수위를 나타내고 있다. 깊은 지하수위 분포를 보이고 있는 지하수공들은 꽃동네에 위치하고 있는 것으로, 양수정 혹은 양수정 주변의 지하수위 자료임으로 양수의 영향을 받고 있는 지하수공들의 지하수위 분포를 나타내고 있다.

수리전도도 분포

본 연구에서 수리전도도 값은 야외에서 수행한 수리시험을 기초로 결정하였다. 수리시험을 통해 얻어진 연구지역의 암석에 따른 수리전도도 분포는 퇴적암지역이 $2 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-7}$ m/s, 공극률은 0.03, 저류계수는 1×10^{-3} 이다. 화강암지역의 수리전도도는 $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-8}$ m/s, 공극률은 0.01, 저류계수는 1×10^{-2} 이다. 연구지역에서의 큰 강과 하천을 따라 분포하고 있는 하상퇴적물은 제4기층으로, 주 구성성분은 조립질 모래와 자갈이다. 이들 구성성분에 대한 수리전도도는 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$ m/s 이다. 연구지역에서 측정된 수위 자료 및 양수시험시 측정된 관측공들의 지하수위 하강 등의 다양한 수위자료들은 연구지역의 단층과 절리들이 불균질한 이방성의 단열계라는 사실을 입증해주고

있다. 그러므로 지질구조적인 특성은 터널지역에서의 지하수 유동모델에 있어서 아주 중요한 요인이다. 모델링시 현장조사 자료를 기초로 하여 주요 단층들은 증가된 수리전도도 값으로 모델에 반영하였다.

함양량 산정

함양율은 지하수 수치 모델링에서 중요한 입력자료로서, 이 연구에서는 미국의 토양보전국에서 개발하여 단위유역의 직접 유출량 산정에 사용하고 있는 SCS-CN 방법을 적용하여 지하수 함양율을 산정하였다. SCS-CN 방법은 직접 유출량의 크기에 직접적으로 영향을 미치는 인자로서, 유역을 형성하고 있는 토양의 종류, 토지이용상태, 식생의 피복상태, 온도, 강우강도 및 토양의 수문학적 조건 등을 고려하여 이들 인자들이 직접 유출에 미치는 복합적인 영향을 양적으로 표시하는 것이다. 연구지역의 함양율을 구하기 위하여 충주 기상대의 1992년에서 2001년까지 10년 간의 일별 강수량자료를 이용하여 CN값 변화에 대응하는 연도별 침투량을 계산하여 함양율을 산정하였다. 이 방법을 이용하여 산정된 연구지역의 함양량은 약 115 mm/yr이다.

터널내 지하수 유출량

지표하에 터널이 굴착되면 지하에서 수두차가 거의 없는 느린 유동상태에서 터널 굴착으로 야기되는 터널

Table 1. Flow rates recorded by current meter according to the date.

Date	Measured flow rates in tunnel (m ³ /day)
First stage of tunnel excavation	425
Oct. 7, 2002	120
Mar. 11, 2003	80
May 30, 2003	90
Aug. 20, 2003	105

주변과의 급격한 수두차로 인하여 주로 단열대를 따라서 지하수가 빠른 속도로 터널 내로 유출된다. 터널내 지하수 유출은 터널 굴착 과정에서 유출형태가 다양하고, 터널을 굴착할수록 유출량이 증가하는 것이 일반적이다. 연구지역에서 갱 터널 굴착으로 인하여 터널 내로의 유출량은 굴착 초기에는 $425\text{m}^3/\text{day}$ 의 지하수가 유출되었으나, 그 이후 유출량이 점차 줄어들다가 금번 연구가 시작된 2002년 10월 7일에 갱터널 입구에서 확인된 유출량은 약 $120\text{m}^3/\text{day}$, 그리고 2003년 3월 11일에는 약 $80\text{m}^3/\text{day}$ 의 지하수가 유출되었으며, 2003년 5월 30일에는 $90\text{m}^3/\text{day}$, 2003년 8월 20일에는 $105\text{m}^3/\text{day}$ 의 지하수가 유출되었다(Table 1). 이처럼 시기에 따라 유출량이 변하는 것은 계절에 따른 강우의 영향으로 해석된다.

수치모델 구성

연구지역의 금광산 개발로 인하여 야기될 수 있는 터널내로의 지하수 유출량 및 주변지역의 지하수위 하강을 모델링하기 위하여 유한차분 모델인 Visual MODFLOW를 이용하였다(Waterloo hydrogeologic, 2000). MODFLOW는 다공질 포화매체 내에서 2차원 또는 3차원의 지하수흐름을 모사하기 위해 미국지질조사소에서 개발된 프로그램이며, 유한 차분법으로 지하수 유동 평형방정식의 해를 구한다. 다공질 포화매체 내에서 일정한 밀도의 3차원 지하수 흐름 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) \pm W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 은 각각 x , y , z 방향의 수리전도도 (LT^{-1})이고, h 는 수두(L), W 는 지하수 함양율이나 배출율(T^{-1}), S_s 는 비저류계수(L^{-1}), t 는 시간(T)이다. 상기 식은 직교좌표계의 주축과 수리전도도의 주 텐서방향이 동일할 때, 불균질, 이방성 다공질매체 내에서 부정류상태하의 3차원의 지하수흐름 지배식이다.

단열암반내 지하수 흐름에 대한 연구방법에는 단열암반을 연속체로 보는 경우와 불연속체로 보는 경우가 있다. 단열암반을 연속체로 보면 그 암반은 수리지질학적으로 균등하면서 다공질로 해석할 수 있다. 이와 반대로 불연속체로 볼 경우에는 지하수 흐름은 여러 조의 단열을 따라서 일어나며, 개개 단열의 연장, 방향성, 경사, 빈도, 단열면의 성질뿐만 아니라 단열과

단열간의 연결성과 교차성이 지하수 흐름을 좌우할 것이다. 단열암반을 연속체로 보는 접근방법은 지하수 개발 또는 터널내 다량의 지하수유출과 관련된 지하수위 변화와 양적 평가를 하고자 할 때 적당하다. 이때 우리는 하나 하나의 단열을 따라서 일어나는 지하수 흐름이 아니라 어떤 구간에서 일어나는 지하수 유동량에 관심을 가진다. 연구지역과 같이 넓은 지역에 대해서 개개 단열들에 대한 충분한 자료없이 추계론적 분리단열모델과 같은 불연속체 모델을 적용할 때는 해석이 어려울 뿐만 아니라 오히려 오차가 더 커질 수도 있다. 그런 관점에서 원칙적으로 다공성매질 환경에서 사용되어지는 Visual MODFLOW를 연구지역에 적용하였다.

모델격자

전체 모델 범위는 280km^2 의 지역에 해당되며 모델 격자는 250열, 203행으로 구성되고, 각 모델 층에 대해 50,750 개의 격자 블록으로 나뉘어졌다. 격자 블록은 모델 예측 값의 정확도를 높이기 위하여 모델 경계 부근에서는 $135\text{m} \times 160\text{m}$ 의 큰 격자 블록을, 그리고 터널 인접 지역에서는 $35\text{m} \times 40\text{m}$ 크기의 좀더 세밀한 격자 블록이 이루어졌다(Fig. 3). 지하수 모델을 통해 수직 흐름을 모사하기 위해 격자는 3개의 층으로 구분하였다. 격자의 최고 고도는 연구지역의 전자지형도(DEM)를 이용하여 결정하였고, 최저 고도는 흐름이 수평으로 예상되는 곳, 즉 해발고도 0m로 설계하였다. 그리고 터널은 3개의 층에서, 층 2(layer 2)에 설정하였다.

경계조건

연구지역의 모델경계 영역은 터널 주변의 예측되는 영향권을 포함하여 영향권보다 훨씬 더 멀리 확장시켰다. 이는 연구지역의 모델 경계를 영향권보다 더 멀리 확장시킴으로써 모델 예측의 편차를 없애기 위함이다. 모델 경계는 물리적인 경계로 결정하였다. 동쪽과 북쪽의 높은 지형에서의 경계는 광역적인 흐름의 분수령에 따라 비유동 경계(no flow boundary)로 설정하였다. 서쪽과 남쪽 경계는 강과 큰 하천으로 고정수두 경계(river boundary), 소하천 및 터널은 배출경계(drain boundary)로 설정되었다. 수계의 컨덕턴스 값은 연구지역의 강과 하천의 폭과 구성물질 등을 이용하여 5m, 10m, 15m의 폭을 가진 강과 하천을 이용하여 구하였다.

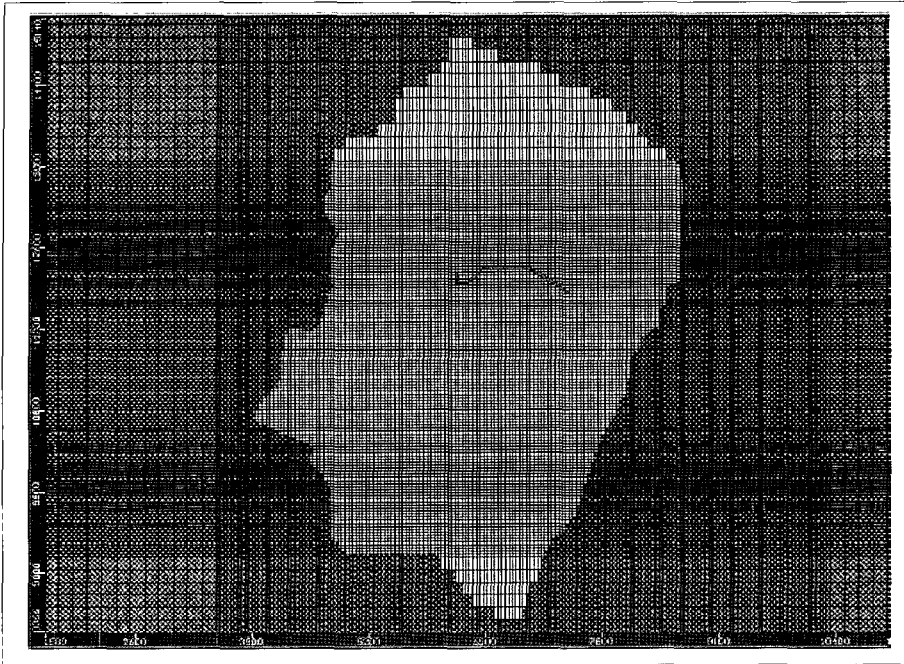


Fig. 3. Model grid blocks for modeling.

지하수위 및 터널내 유출량 보정

일반적으로 터널 쪽으로의 지하수유동은 국지적인 지하수 수두의 함몰과 같은 거동을 한다. 또한 모델영역 내에서 터널로부터 일정 거리가 떨어진 지역에서는 지하수가 터널보다는 하천으로 유출되며, 터널에서 가까운 지역에서는 터널 내의 수두강하로 인해 터널로 유입된다. 지하수위 측정자료는 터널 주변지역의 지하수 유동계의 역학적인 성질이 이미 굴착되어 있는 터널에 반응해 변화하고 있기 때문에 일시적인 값보다는 3회 측정자료의 평균값을 이용하였다. 총 95개의 관측정 중 모델영역을 벗어난 지역에 위치한 공들, 현장수리시험을 통해 거리상, 지형상, 지질학적으로 공들간의 관계가 모호한 공들을 제외한 44개 공의 자료를 모델 수행시에 이용하였다(Fig. 4).

Fig. 5는 갱터널 굴착후 정류상태의 보정된 지하수위 등고선도를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 연구지역의 지하수 흐름은 터널 굴착후 3년 이상의 시간이 경과하였고 또한 현재 굴착이 중단된 상태이며, 터널내로의 지하수 유출량과 지하수 함양량 간의 관계가 거의 평형상태를 유지하는 관계로 터널쪽으로 향하는 흐름보다는 전반

적으로 지형고도에 지배되고 있음을 알 수 있다.

관측된 지하수위 값과 보정된 지하수위 값에 대한 신뢰도를 평가하기 위하여 정량적 민감도 분석을 하였다(Fig. 6). 민감도 분석은 관측치와 모델링 결과치와의 오차를 보여주는 RMS(root mean square) 오차를 사용하였으며 연구지역의 전체적인 RMS 오차는 8.6%이며, 이는 평균과 절대 오차에서 -0.4~3.8m의 범위 내에 속함을 의미한다. 이 값은 연구지역 지질의 불균질성과 연구지역에 많이 발달되어 있는 단층 및 절리 등의 단열 특성을 고려하면 오차가 미미함을 의미한다. 일반적으로 RMS 오차가 10%보다 작고 평균 오차범위가 0에 가까울수록 보정이 잘된 것으로 해석할 수 있다(WHI, 1997).

연구지역의 갱터널 굴착으로 인한 터널내로의 지하수 유출량은 굴착초기에는 425m³/day이고, 이 연구 당시에는 약 80~125m³/day이다. 갱터널 입구에서 실제 관측된 배출량을 이용하여 현재 터널 내로 유출되는 지하수 양이 어느 정도인지를 모델링하였다. 터널 내 배출컨덕턴스 값과 관측된 터널 유입량과의 오차를 줄이기 위해서 반복해서 보정한 결과, 예측된 터널 내로의 유출량은 91m³/day이 유출되는 것으로 모델링되었다. 이는 이 연구가 시작된후 측정된 4회의 실제 평균 배출량과의 차이가 7m³/day로 불과 5% 내외의 오차 범위에 속한다.



Fig. 4. Groundwater wells for modeling.

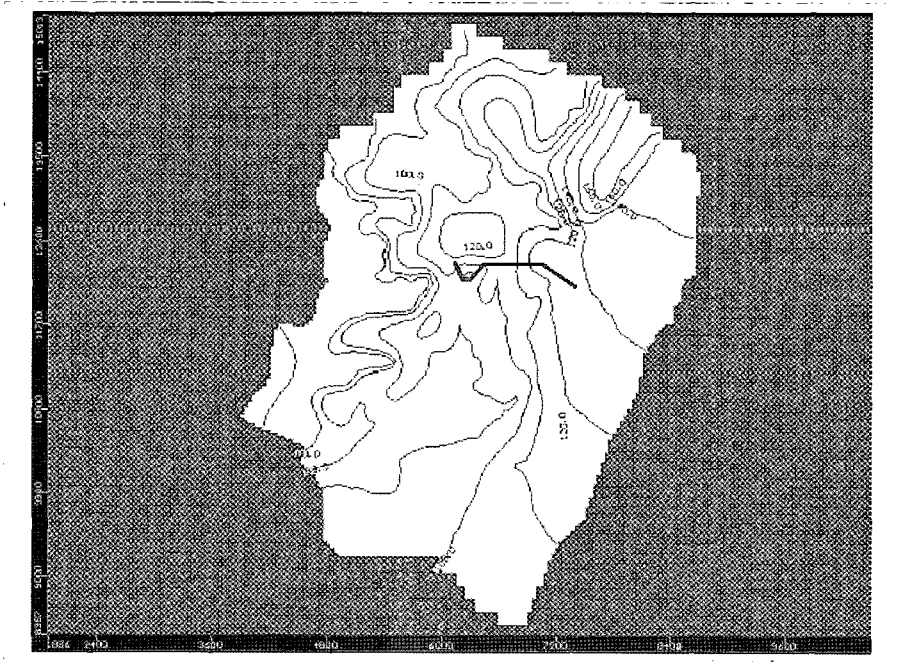


Fig. 5. Groundwater levels of steady state after existing tunnel excavation.

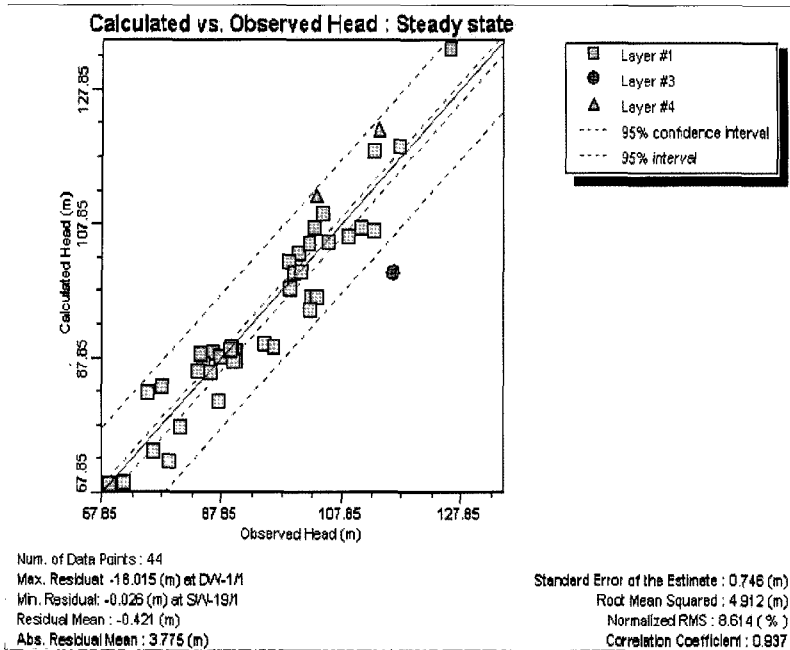


Fig. 6. Observed/Calibrated groundwater level and calibration statistics.

터널내 유출량 및 지하수위 하강 예측

터널이 굴착되지 않은 자연적인 환경에서는 지하수의 이동속도가 매우 느리다. 그러나 연구지역과 같이 지표하에 터널이 굴착되면 지하에서 수두차가 거의 없는 느린 유동상태에서, 터널 굴착으로 야기되는 터널 주변과의 급격한 수두차로 인하여 주로 단열대를 따라서 지하수가 빠른 속도로 터널내로 유출된다. 터널 굴착동안 지하수 유출은 안정성 및 작업 공정을 어렵게 하고, 또한 터널내로의 지하수 유출은 인위적인 양수와 마찬가지로의 효과로 주변 지역의 지하수위를 하강시킨다. 그러므로 터널 굴착시 지하수 유출량 및 유출구간, 그리고 주변 지역의 지하수위 하강을 예측하는 것이 필요하다 (Akama et al., 1988). 터널내로 유입되는 지하수의 양과 속도는 초기에는 상당히 많고 빠르나 시간이 흐름에 따라서 터널 주위에서 터널로의 흐름량과 터널내로 유입되는 양이 평형을 이루어 중국에는 일정한 양의 지하수만 터널내로 유입된다. 이 연구에서는 터널 굴착에 따른 연구지역내 초기 지하수위 하강을 해석적 방법을 이용하여 예측하였고, 수치모델링을 통하여 향후 계획된 터널의 굴착으로 인한 지하수 유출량과 모델지역 내의 지하수위 하강을 예측하였다.

해석적 방법에 의한 굴착 초기의 수위하강 예측

연구지역은 금광산 개발을 위한 갱터널 굴착으로 굴착 초기에 425m³/day의 지하수가 유출되었으며, 이로 인하여 주변 지역의 지하수위가 하강되었을 것으로 판단된다. 해석적인 방법에서는 굴착 초기의 지하수 유출량이 425m³/day로 많지 않은 관계로 터널로부터 200m 이내의 비교적 가까운 지역에 대하여 예측하였다.

터널 굴착에 의한 터널내로의 지하수 유출은 인위적인 양수와 마찬가지로의 효과이므로 Fetter(1988)의 피압대수층 내의 부정류에 의한 수위하강 방정식을 이용하여 갱터널 굴착 초기의 주변 지역 지하수위 하강을 예측하였다.

굴착 초기의 지하수위 하강폭을 파악하기 위하여 이용된 수리상수 값은 갱터널이 굴착된 지역에서 가장 가까운 인곡리 지역의 수리상수 값을 이용하였으며, 수리상수 값은 투수량계수 19.35m²/day, 저류계수 0.000443이다. 이 지역의 수리상수 값을 이용하여 파악된 터널 주변 지역의 초기 지하수위 하강은 15.3m까지 하강되는 것으로 분석되었다.

수치 모델링에 의한 유출량 및 수위하강 예측

향후 연구지역에서 광산 채굴을 위한 갱터널을 굴착할 경우를 가정하였을 때, 터널내로의 지하수 유출량과 주변 지역의 지하수위 하강을 평가하기 위하여 이미 굴착된 현재 상태의 모델에 추가적인 배출경계를 포함하였다. 추가적인 배출경계는 향후 굴착될 부분의 터널로서, 약 836m의 길이를 가지며, 굴착시점의 고도는 43m이고 굴착 종료시점의 고도는 35m이다. 연구지역에서 측정된 각종 모델링에 필요한 입력자료를 이용하여 향후 갱터널이 굴착될 경우 터널내로의 지하수 유출량과 주변지역의 지하수위 하강 정도를 정상류 상태에서 모델링하였다.

향후 갱터널이 완전히 굴착되었을 때 터널내로의 지하수 유출량은 터널 전 구간을 통해 약 1,870m³/day의 지하수가 터널 내로 유출되는 것으로 예측되었다. 그리고 지하수 유출로 인한 터널 주변 지역의 지하수위 하강은 터널에서 가까운 지역은 약 25m, 그리고 모델 경계부에 위치하고 있는 지하수공들과 같이 터널에서 멀리 떨어져 있는 지역은 약 5m 정도 하강되는 것으로 예측되었다(Fig. 7). 향후 터널 굴착후, 지하수 유출로 인한 각각의 지하수공에 대한 지하수위 하강을 파악하기 위하여

지하수위 하강을 나타내는 단면도를 작성하였다. Fig. 8은 SW-5공과 DW-20공에 대한 지하수위 하강변화 단면도의 한 예로서, 현재 기존 굴착되어 있는 터널과 앞으로 굴착할 가상의 터널간의 관계에서 주변 지하수위가 어떻게 변화될 것인가를 보여주고 있다. 이 그림에서 향후 계획되어 있는 터널이 굴착된 후에는 지하수위가 하강하는 것을 알 수 있으며, SW-5공의 인접부에서는 약 10m의 수위하강이 예측되며, DW-20호공에서는 약 7m 정도의 수위하강이 예측되었다.

토의 및 결론

연구지역 내의 금광산 개발을 위한 터널굴착 공사로 인하여 굴착 초기에 주변 지하수공들의 수위가 하강하였으며 지하수 흐름 체계의 변화를 일으켰다. 이 지하수 유출로 인한 주변지역의 초기 지하수위 하강 정도를 해석적인 방법을 이용하여 예측하였으며, 향후 굴착될 터널 구간에 대하여 지하수 유출량 및 지하수위 하강을 수치 모델링을 이용하여 예측하였다.

해석적인 방법을 통한 터널 주변 지역의 초기 지하수위는 15.3m까지 하강되는 것으로 예측되었고, 수치 모

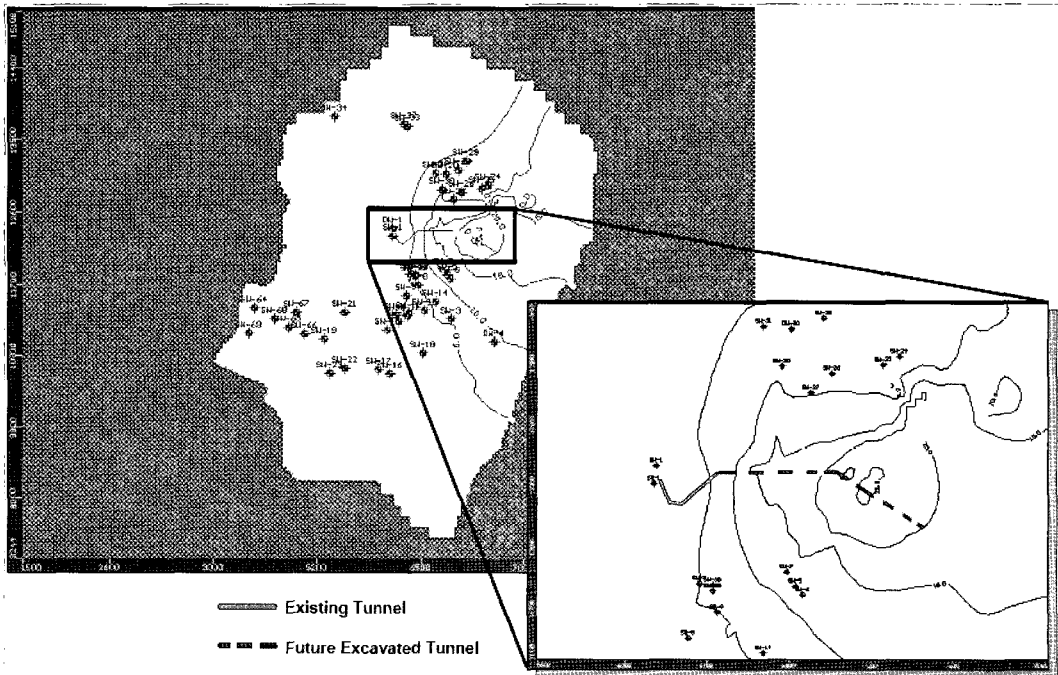


Fig. 7. Predicted drawdown of the groundwater levels after future tunnel excavation.

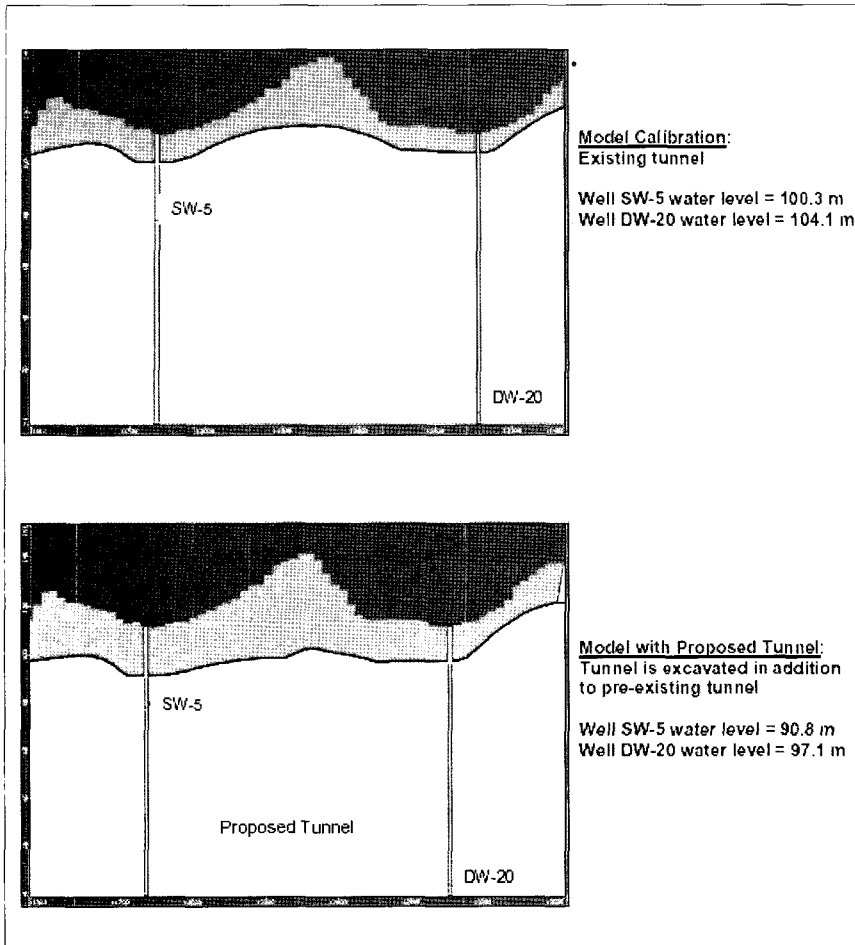


Fig. 8. Cross sectional view of tunnel water levels.

델링을 이용하여 예측된 향후 굴착될 터널내로의 지하수 유출량은 약 $1,870\text{m}^3/\text{day}$ 이고, 터널 주변 지역의 지하수위 하강은 터널에서 가까운 지역은 약 25m, 터널에서 멀리 떨어져 있는 지역은 약 5m 정도 하강하는 것으로 예측되었다. 수치 모델링으로 예측된 지하수위 하강값과 실제 굴착 초기의 지하수 유출량 자료를 이용하여 예측한 해석적인 방법과 비교해 볼 때, 굴착 초기의 유출량이 $425\text{m}^3/\text{day}$ 로 비교적 적은 양이라는 점을 감안하면 두 가지 방법의 의하여 예측된 지하수위 하강값은 거의 일치하고 있다.

그러나 수치 모델링으로 예측된 이 값은 터널 컨덕턴스 변화에 대한 고려없이 예측된 값이고, 향후 굴착될 터널과 주변 지하수 시스템간의 연결성에 대한 불확실성이 존재하므로, 이 불확실성을 평가하기 위해서는 터널 컨덕턴스의 변화를 고려하는 것이 필요하다. 본 연구에

서는 터널 컨덕턴스 값의 변화에 따른 지하수 유출량과 지하수위 하강 상태를 비교하기 위하여 컨덕턴스가 50% 증가할 경우와 50% 감소하는 두 가지 경우를 고려하여 지하수 유출량과 지하수위 하강을 다시 한번 예측하였다. 터널 컨덕턴스는 터널 수리전도 계수로서 터널 주변지역의 대수층에서 터널내로 지하수가 유출되는 용이성 정도를 지시한다. 터널내로의 지하수 유출량은 터널 내부와 외부의 압력차이로 인해 증가 혹은 감소되는 컨덕턴스와 비례한다.

컨덕턴스가 50% 증가할 경우와 50% 감소하는 두 가지 경우에 대해서 향후 굴착될 터널내로의 지하수 유출량 및 지하수위는 전자는 유출량은 $2,518\text{m}^3/\text{day}$, 지하수위는 터널로부터의 거리에 따라서 5m에서 35m까지, 후자의 경우는 유출량은 $1,273\text{m}^3/\text{day}$ 이고, 지하수위는 2m에서 12m까지 하강하는 것으로 예측되었다(Fig. 9;

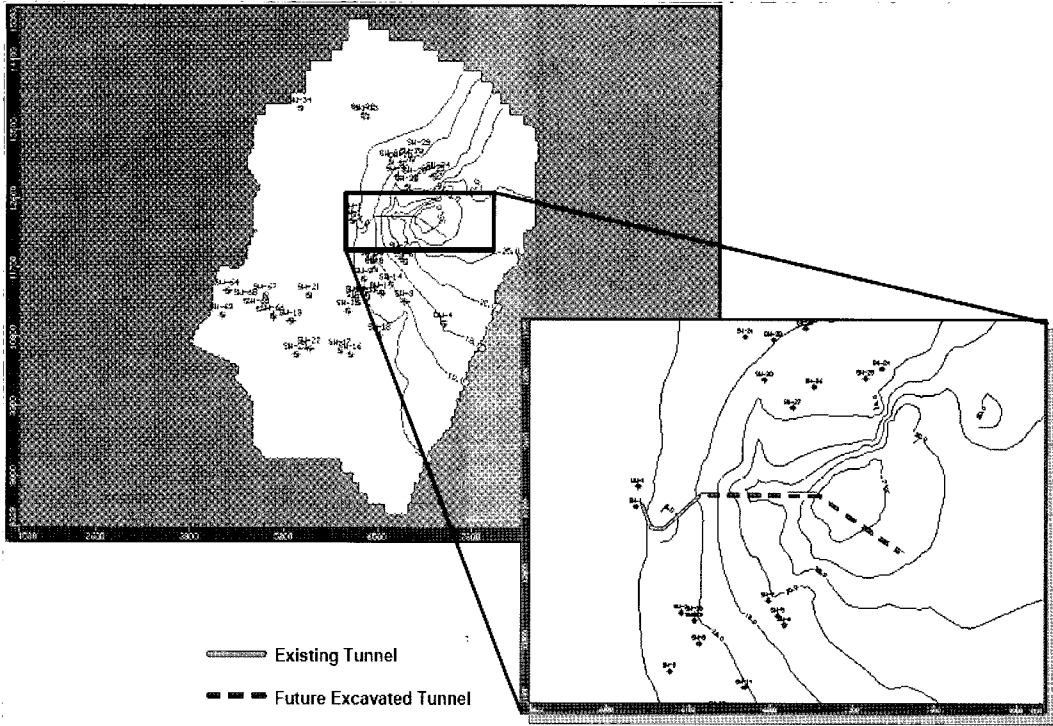


Fig. 9. Drawdown of water levels at the study area (conductance increase by 50%).

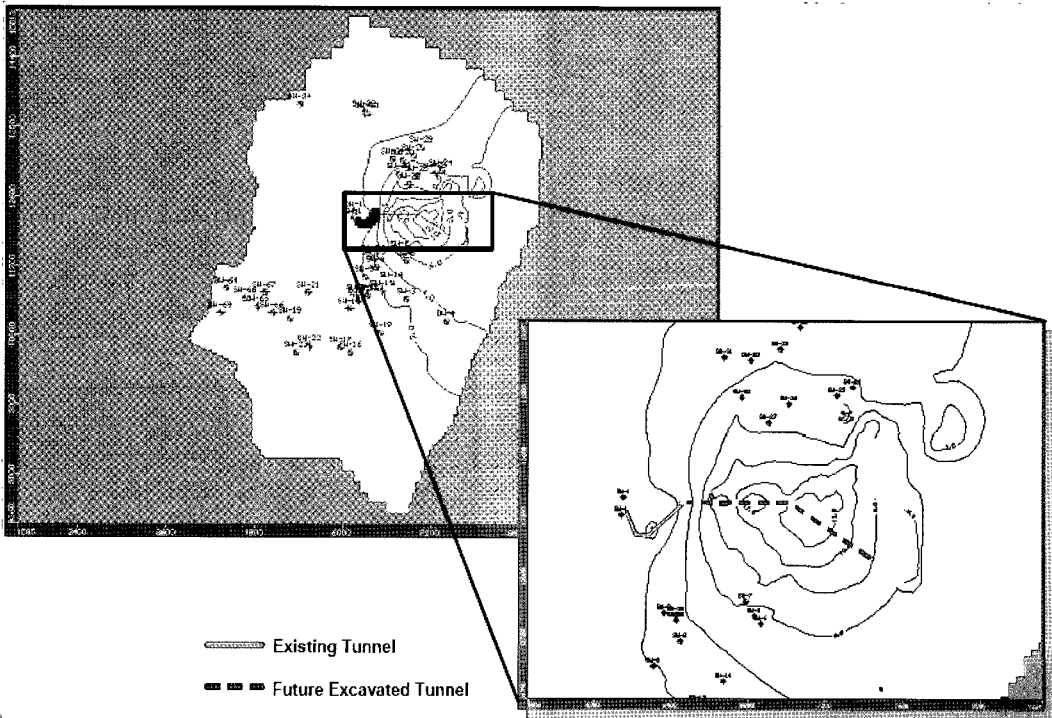


Fig. 10. Drawdown of water levels at the study area (conductance decrease by 50%).

Fig. 10). 이 두 가지 경우와 컨덕턴스 변화에 대한 고려 없이 예측된 값을 비교하면 전자는 당초의 모델링 값에 비해 유출량은 648m³/day 증가하고 지하수위는 10m가 더 하강하고, 후자는 유출량은 597m³/day 감소하고 지하수위는 13m 정도 상승한다.

컨덕턴스 값은 터널 굴착으로 인한 지하수 유출량에 영향을 주는 중요한 요소이므로 모델링시 정확한 컨덕턴스 값을 산정하는 것이 필요하다. 특히 단열암반 대수층 지역에서 터널을 굴착할 때 연구지역에 발달하고 있는 단열의 수리특성은 모델 영역내 컨덕턴스를 정의하는데 유용한 정보이므로, 연구지역의 단열대의 발달 범위와 분포 특성, 지하수흐름과의 수리적 관련성 등을 정확하게 묘사함으로써 터널 굴착시, 경제성과 안정성을 도모하고, 또한 터널 굴착으로 인한 주변지역의 지하수 고갈, 농작물 피해 및 주민들의 피해를 최대한 줄여야 할 것이다.

참고문헌

- 성익환, 이병대, 조병욱, 이봉주, 김통권, 이병주, 채병곤, 김경수, 김종렬, 현혜자, 이종철, 김복철, 이동우, 김원영, 1998, 영천댐 도수터널 공사지역 지하수 유동조사, 한국자원연구소, 419p.
- 안상도, 김경호, 정영훈 (2000) 초정지역의 지하수 유동해석. 대한지하수환경학회지, 7권, p. 133-140.
- 이병대, 성익환, 함세영, 조병욱, 김정숙, 박재현, 2000, 도수로터널 굴착에 따른 주변 지역의 지하수위 변동과 단열구조의 관련성 연구, 대한지질공학회지, 10(2), p. 143-162.
- 함세영, 성익환 (1999) 선형유동에 관한 이중공극 모델. 대한지하수환경학회지, 6권, p. 1-7.
- 함세영, 임정웅 (1994) 누수를 포함하는 지하수 유동의 프락탈 모델 적용에 의한 균열 암반 대수층의 수리상수 산출. 대한지질공학회지, 4권, p. 219-229.
- Akama, Y., T. Kitamura, and H. Kojo, 1988, On the behavior of groundwater around a tunnel during excavation in unconsolidated sandstone, *Tunnels and Water*, 1, p. 49-56.
- Fetter, C. W., 1988, *Applied hydrogeology*, Merrill publishing company, 592p.
- Kitterod, N.O., Colleuille, H., Wong, W.K. and Pedersen, T.S. (2000) Simulation of groundwater drainage into a tunnel in fractured rock and numerical analysis of leakage remediation, Romeriksporten tunnel, Norway. *Hydrogeology Journal*, v. 8, p. 480-493.
- 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*, v. 18, p. 645-658.
- Long, J.C.S., Gilmour, P. and Witherspoon, P.A. (1985) A model for steady fluid flow in random three-dimensional networks of discshaped fractures. *Water Resources Research*, v. 21, p. 1105-1115.
- Park, Y.C. and Lee, K. K. (1995) Simulation of groundwater flow of fractured porous media using a discrete fracture model. *Econ. Environ. Geol.*, v. 28, p. 503-512.
- Smith, L. and Schwartz, F. W. (1984) An analysis of the influence of fracture geometry on mass transport in fractured media. *Water Resources Research*, v. 20, p. 1241-1252.
- Schwartz, F. W., Smith, L. and Crowe, A.S. (1983) A stochastic analysis of macroscopic dispersion in fractured media. *Water Resources Research*, v. 19, p. 1253-1265.
- Waterloo hydrogeologic. (2000) *Visula MODFLOW v.2.8.2 User's Manual*. Waterloo hydrogeologic Inc. 311p.
- WHI (1997) *JEB pit dewatering model*. Waterloo hydrogeologic Inc. 7-2p.

투 고 일	2005년 8월 10일
심 사 일	2005년 8월 11일
심사완료일	2005년 9월 18일

이병대
한국지질자원연구원 지하수지열연구부
305-350, 대전시 유성구 가정동 30번지
Tel : 042-868-3088
E-mail: blee@kigam.re.kr

성익환

한국지질자원연구원 지하수지열연구부

305-350, 대전시 유성구 가정동 30번지

Tel : 042-868-3082

E-mail: sih@kigam.re.kr

김용계

한국지질자원연구원 환경지질연구부

305-350, 대전시 유성구 가정동 30번지

Tel : 042-868-3378

E-mail: yjkim@kigam.re.kr

정찬호

대전대학교 지질공학과

300-716, 대전시 동구 용운동 96-3번지

Tel : 042-280-2573

E-mail: chjeong@dju.ac.kr