

An Analysis of Groundwater Levels Surrounding Jungyeong Tunnel Using Visual-MODFLOW

Jun Oh Oh[#], Jong Jin Lee⁺, Ju Young Jeon

Department of Civil and Urban Engineering, Inje University, 197 Inje-ro, Gyeongsangnam-do, Gimhae, Korea

Abstract

With a growing demand for railroads and the local government's desire to attract railroads, the expansion of railway facilities is inevitable. This study used Visual-MODFLOW to evaluate the impact of construction of the Jungnyeong tunnel as the part of the Dodam-Yeongcheon double-track railroad project on underground water environments in the upper Sobaeksan area. The Jungnyeong tunnel construction project was divided into seven steps, for each of which the discharge level of groundwater level as well as groundwater level were analyzed to calculate the range of the impacts of construction. It is found that the amount of discharged groundwater increases and the groundwater level decreases as tunnel digging begins. As tunnel digging was completed and the grouting proceeded, however, the amount of discharged groundwater decreased and the groundwater level returned to the initial level before construction. The findings suggest that the groundwater problem in the Sobaeksan area due to the construction of the Jungnyeong tunnel would be minimal.

Key words: Jungnyeong tunnel, Groundwater level, Visual-MODFLOW

1. 서론

우리나라는 수도권 및 주요 광역시를 중심으로 인구 및 경제 등이 발달되어 왔다. 과거 경부고속도로 개통으로 서울-부산은 일일생활권이 형성되었고 지속적인 철도시설 발전과 고속철도 등장으로 이제는 전국 일일생활권이 형성되었다. 이에 철도수요가 증가하고 국가균형발전 및 각 지자체의 철도 유치 희망이 커짐에 따라 철도시설의 증설이 불가피한 상황이다.

전철화 및 고속화를 위한 중앙선 도담~영천 복선전철 건설 사업은 간선철도 기능강화 및 남북방향 내륙지역의 철도서비스 향상과 철도교통 경쟁력 향상 등의 목적으로 시행되었다. 본 연구대상인 중앙선 도담~영천 복선전철 구간 중 건설사업 중 죽령터널 구간은 <Figure 1>과 같이 본 터널 8,748 m, 경사갱1 1,229 m, 경사갱2 775 m로 구성되어 있으며 소백산 국립공원을 관통하기 때문에 지하수 저하, 하천유량 감소로 인한 생태계 영향, 지하수 고갈로 인한 주민불안 등 다양한

[#] The 1st author: Jun Oh Oh, Tel. +82-55-320-3432, Fax. +82-55-321-3410, e-mail. symmoh@inje.ac.kr

⁺ Corresponding author: Jong Jin Lee, Tel. +82-55-320-3432, e-mail. jongjin2@inje.ac.kr



Figure 1. Map of study area at surrounding Jungnyeong tunnel

문제가 발생할 가능성이 있다. 따라서 터널 굴착이 주변 환경에 미치는 영향을 사전에 검토하고, 변화가 예상될 경우 대책 수립이 필요하다.

국내에서는 터널공사에 따른 지하수 영향 분석이나 하천 주변부 지하수 분석에 대한 연구가 많이 진행되었으며 지역에 따라 기반암의 특성이 다르고 터널의 규모가 상이하여 터널공사 시 터널공사에 따른 주변부 지하수 변화 분석이 반드시 필요하다. 터널공사에 따른 지하수 영향검토에 대한 선행연구를 살펴보면 Heo(2003)는 범기터널 공사에 따른 지하수 유동분석을 통해 시공상의 장애를 사전에 파악하기 위하여 MODFLOW모델을 이용하여 터널굴착에 따라 지하수 유출량을 추정하였다. Jeong & Koo(2015)는 터널 지하수 유출량 산정을 위한 수치모델에서 격자망 설계가 터널 유출량 산정 결과에 큰 영향을 주기 때문에 신뢰도 향상을 위한 격자망 설정방법에 대하여 연구하여 터널 크기와 격자 크기의 관계식을 도출하였다. Lee, et. al.(2010)은 기흥터널 건설에 따른 지하굴착 지역의 지하수 유입량과 주변 지역의 지하수 변화를 평가하기 위하여 수치모델링을 실시하였으며 터널 굴착기간 및 터널 완공 후 터널 그라우팅의 효율에 따른 지하수 유출량을 예측하였다. Lee, et. al.(2009)은 지하수 변동 자료와 모델링을 이용하여 직리터널의 지하수 유출량

을 평가하였으며 터널 굴착후 지하수 모니터링 자료, 국가지하수관측망 자료, 전기비저항탐사 자료 등을 이용하였다. 그 결과 터널 공사로 하강되었던 지하수위가 터널 공사 완료 약 1년 후 터널 굴착 이전으로 회복되는 것으로 평가하였다. Yoo, et. al.(2005)은 터널시공과 지하수의 상호작용이 터널의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 터널 굴착으로 인한 지하수 유동이 발생하는 구간을 중점으로 응력-간극수압 연계해석을 이용한 매개변수 연구를 수행하였다. Koh, et. al.(2006)은 MODFLOW를 이용하여 지하터널 설치에 따른 지하수 유동변화 특성을 분석하였으며 지하구조물의 구성에 따라 지표 및 지하수자원에 미치는 영향을 최소화하며 지하수의 관리 및 활용을 극대화할 수 있는 방향을 제시하고자 하였다.

국외의 연구사례를 살펴보면 터널 공사로 인해 주변부 지하수위 변동에 대한 연구 보다는 터널 공사로 인해 발생하는 유출지하수량에 대한 해석, 유출지하수를 외부로 배출하기 위한 방법론에 관한 연구가 많이 진행되었다. Ii & Kagami(1997)은 일본 마쓰모토시에 건설되는 터널 주변에 대한 터널 공사 전·후 지하수위 및 수질에 대한 비교를 실시하였다. 분석결과에서 터널 공사 후 지하수위가 하강하고, 그 원인을 터널 유출수 발생과 봄철 가뭄 영향이라고 제시하였다.

Tullia & Roberta(2003)은 철도터널 공사로 인한 주변부 지하수위 변화 예측을 위한 수치모델 개발에 대한 연구를 하였으며, 분산지하수 모델을 사용하면 매우 복잡한 수문지질학적 시스템에 대한 해석 및 복잡한 지하수 시나리오에 대한 해석도 가능하다고 하였다. Surinaidu, *et. al.*(2015)은 지하터널 공사로 인한 지하수 유동을 MODFLOW를 통해 수치해석을 실시하고 지하터널로 유입된 지하수를 외부로 배출시키는 방법에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 연구대상 지역의 터널 공사로 인한 주변부 지하수위 분석을 공사 단계를 총 7단계로 나누어 분석하였다.

II. Visual-MODFLOW 설명

지하수 유동현상을 해석하는데 이용되는 대표적인 수치해석 방법으로는 유한차분법(FDM, Finite Difference Method), 유한요소법(FEM, Finite Element Method), 해석요소법(AEM, Analytical Element Method) 등이 있다. 본 연구에서 지하수 흐름해석을 위해 사용한 모형은 세계적으로 널리 사용되고 있는 3차원 모형인 Visual-MODFLOW이다. Visual-MODFLOW는 수치해석 방법 중에서 가장 오래되었으면서도 가장 보편적으로 쓰이고 있는 유한차분법을 이용하고 있다. 유한차분법은 지배식의 모든 편미분 방정식을 유한차분으로 근사적 표현하고 있으며 수식전개 과정은 간단명료하나 불규칙한 경계면을 정확히 표현하고 취급할 수 없는 단점이 있다.

본 연구에서 사용한 지하수 흐름해석 모형인 Visual-MODFLOW의 기본이론은 다음과 같다. 일정한 밀도를 가지는 다공성 매질을 통해서 흐르는 3차원 지하수유동은 Eq.(1)과 같은 편미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

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

여기서, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 는 x , y , z 좌표축에 따른 투수계수이며, h 는 대수층 내 수두, W 는 단위체적당 유입 flux, S_s 는 비저류율 t 는 시간이다. 한편 S_s , K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 는 공간의 함수($S_s = S_s(x, y, z)$, $K_{xx} = K_{xx}(x, y, z)$, etc)이고, W 는 시간과 공간의 함수($W = W(x, y, z, t)$)이며, Eq.(1)은 불균질, 비등방성 매질에서의 비평형 상태하에서 지하수 흐름을 나타낸다.

그러나 Eq.(1)의 해석적 해는 거의 불가능하므로 근사해를 얻기 위해서는 매우 다양한 수치적 기법들이 적용되어야만 한다. 그러나 접근 중의 하나가 유한차분법을 이용한 지하수 흐름 방정식의 전개는 연속방정식의 적용을 통해 셀에서 유입되고 유출되는 모든 흐름의 합은 셀 내부에서 저류변화율에 대해 반드시 같아야 한다. 따라서 지하수 밀도가 일정하다는 가정하에 셀에 대한 흐름의 평형을 나타내는 연속방정식은 Eq.(2)로 나타낼 수 있다.

$$\sum Q_i = S_s \frac{\nabla h}{\nabla t} \nabla V \quad (2)$$

여기서, Q 는 셀로 유입되는 흐름율(L^3T^{-1}), S_s 는 유한차분 형태에서 비저류율이며, Eq.(1)에 대한 S_s 로 써, 대수층에 있어 단위 수두변화에 따른 단위 체적당 유입되는 물의 체적(L^{-1})을 나타내고, V 는 셀의 체적(L^3) 및 h 는 수두변화이다(Hur, *et. al.*, 2018).

III. 연구지역 및 범위

본 연구 대상지역인 소백산 죽령터널은 백두대간을 동서 관통하는 터널로 서쪽에는 죽령터널과 동쪽에는 회방사역 사이에 위치해 있다. 죽령터널 북쪽에는 소백산(비로봉) EL. 1,440 m, 남쪽에는 흰봉산 EL. 1,261 m이 위치하고 있으며 죽령터널 영주시 입구측에는 남원천과 서천이 단양군 입구측에는 죽령천이 흐르고 있다.

연구대상 지역의 기상특성 분석을 위해 주변에 위

치한 단양관측소와 영주관측소의 최근 10년간 (2008~2017년) 기상자료를 조사하였다. 단양의 평균기온은 11.7 °C, 연평균강수량이 971 mm이며 영주의 평균기온은 11.7 °C, 연평균강수량이 1,202 mm인 것으로 조사되었고 죽령을 사이에 두고 단양과 영주의 강수량 차이가 확연하게 나는 것으로 조사되었다.

죽령터널 상부에는 소백산 국립공원이 위치하고 있는데 소백산 국립공원에는 철쭉 등 1,349종의 식물이 서식하고 있고 2,610종의 포유류, 124종의 고등균류, 128종의 담수 조류가 서식하고 있는 생태의 보고이기도 하다. 이에 터널 건설에 따른 지하수, 하천유량, 생태계 등 다양한 분야의 조사와 관찰이 필요한데 본 연구에서는 죽령터널 복선화 공사에 따른 인근 지하수 변동 분석을 수행하였다.

죽령터널 구간에 대한 암종 및 지질특성을 알아보기 위하여 기 수행된 조사보고서를 살펴보았다. 죽령터널 구간에는 9개의 암종이 분포하고 석회암 및 편마암이 주를 이루고 있는 것으로 조사되었다. 또한 셰일, 규암, 퇴적암이 일부 분포하고 있는 것으로 조사되었다.

IV. 지하수위 분석

지하수 모델링을 수행하기 위해서는 기초자료 조

사 및 모형 구축을 수행하였다. 지하수 모델링의 순서는 수치표고를 분석하여 지형적 특성을 알아보고자 모델의 격자를 구성하였다. 경계조건을 설정하고 기초조사된 지층 자료를 바탕으로 층별 투수계수를 입력하고, 현재 상태를 바탕으로 정류상태 지하수 모델링을 수행하여 모델을 검·보정을 실시하였다. 다음 비정상류 상태에 대한 지하수 모델링 수행하여 지하수위를 예측하였다.

본 연구에서 수행한 지하수 모델영역은 본 연구의 대상인 중앙선 복선전철 건설사업 중 죽령터널 구간을 중심에 두고 지하수 분수령을 경계로 설정하였으며 동서방향 14,000 m, 남북방향 7,500 m로 선정하였다.

1. 수치표고분석 및 격자망 구성

국토지리정보원에서 제공하는 1:5,000 수치지형도를 이용하여 표고분석(DEM)을 실시한 결과 <Figure 2>와 같고 본 연구에서 사용한 지하수 모델인 Visual-MODFLOW의 격자망 구성은 사각형 격자만 구성이 가능하기 때문에 곡선 형태의 유역을 정확히 표현할 수 없는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 시행착오법(trial and error)을 이용하여 모델링 수행에 있어 최적의 격자망을 선정하였으며 구성한 격자망은 <Figure 3>과 같이 X, Y, Z방향에 각각 350개, 188개, 12개, 총 789,600개

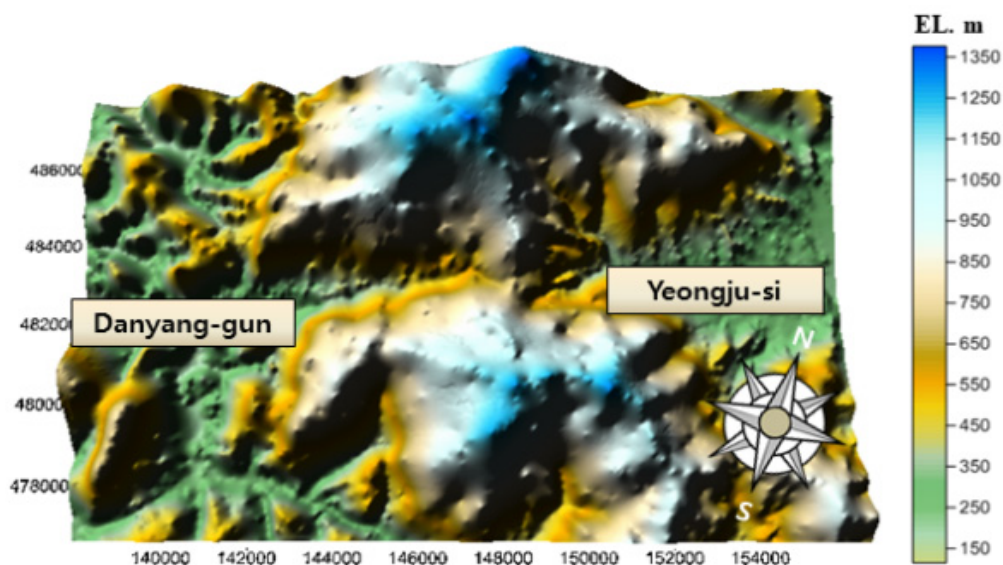


Figure 2. Digital elevation map of study area

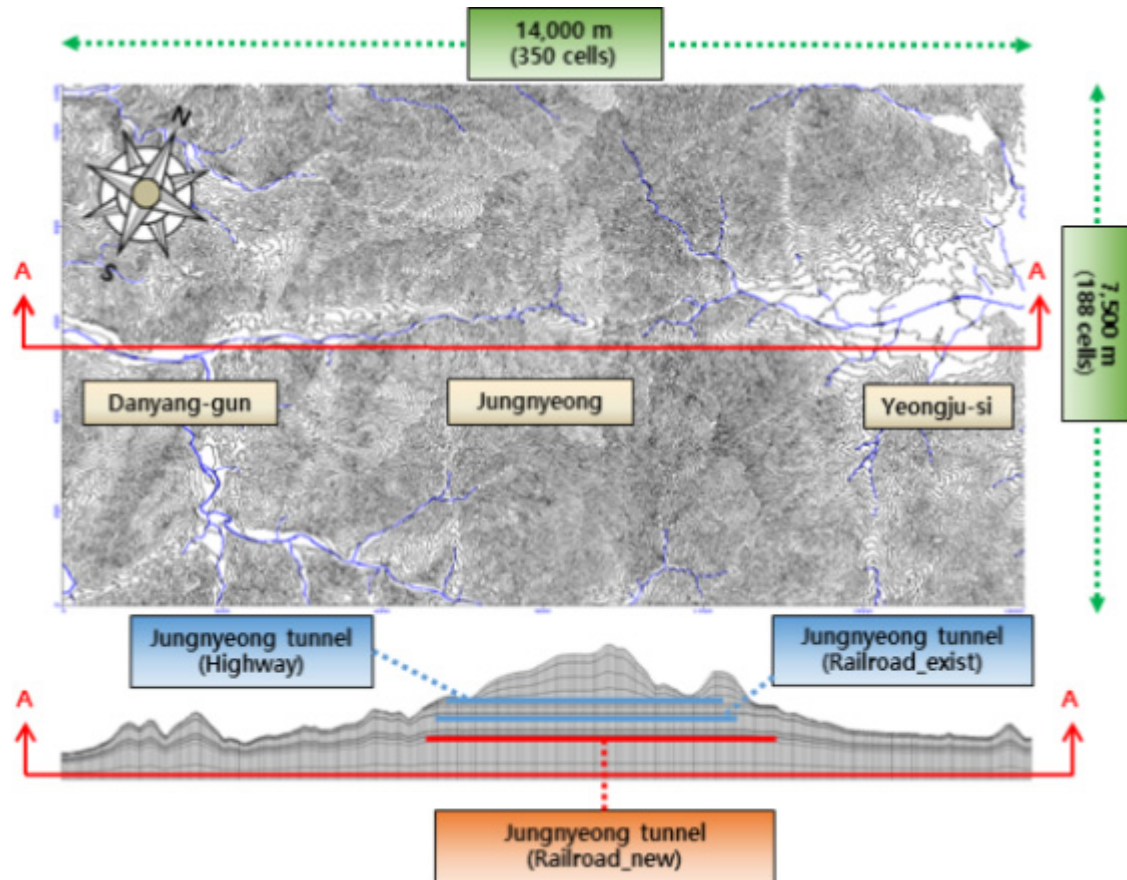


Figure 3. Consist of grids in this study

이며 격자간격은 가로 40 m, 세로 40 m의 정방향으로 설정하였다.

2. 경계조건 설정 및 투수계수 입력

전반적인 지하수 흐름특성을 파악하기 위하여 지하수 분수령을 경계로 하여 유역 내 구간을 활성격자(active cells)로 구성하고 터널을 중심으로 수리경계가 되는 주변 하천은 하천 경계(river), 수계 분수선 지점에는 일반수두경계(general head)기존 중앙고속도로 및 중앙선 철도터널에서 발생하는 유출지하수는 배수 경계조건(drain)으로 설정하였다.

연구대상지역에 대한 지층 및 투수계수는 기 조사·연구된 문헌자료와 현장조사 결과를 이용하여 <Figure 4>와 같이 적용하였다.

3. 정류상태 지하수 보정

본 연구에서는 <Figure 5>와 같이 강우유출 모형인

SWMM(Storm Water Management Model)을 이용하여 유황 및 함양량(Recharge) 분석을 실시하였다. 수문분석은 죽령을 기준으로 영주측 유역과 단양측 유역으로 나누어 실시하였으며 장기유출분석 결과에서 평균 유출률은 약 52.6 % 이고, 지하수 유출은 전체강우의 약 12.4 % 로 분석되었다. 이 결과들을 바탕으로 현재 상태에 대한 정류상태(steady state) 모델링을 먼저 수행하였다. 정류상태에 대한 물수지 분석결과에서 연구 대상지역으로 유입되는 유량은 강수에 의한 함양등으로 298,710 m^3/day , 연구영역 외부로의 유출량은 298,670 m^3/day 인 것으로 분석되었다. 정류상태 지하수 모의 결과 <Figure 6>과 같이 지하수 흐름방향은 지형적으로 고지대인 소백산으로부터 저지대의 남원천 및 죽령천으로 이동하는 양상을 보이며 지형의 고저가 커서 지하수 흐름이 빠르게 형성되는 것으로 분석되었다.

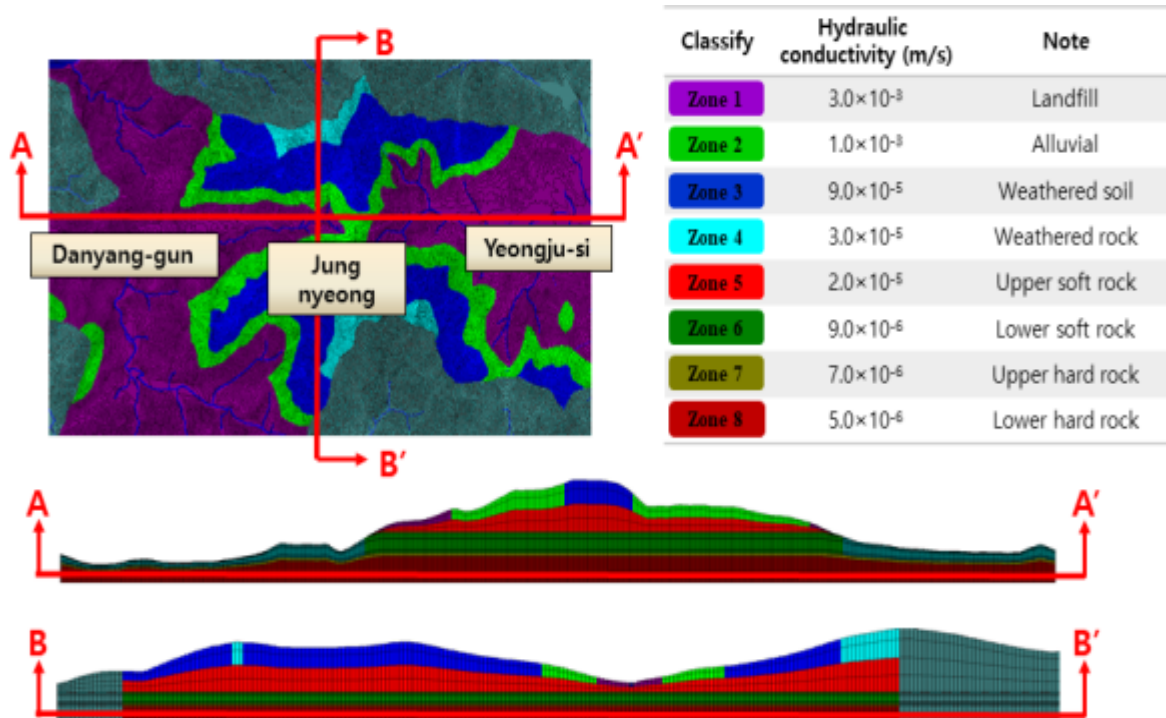


Figure 4. Applied strata and hydraulic conductivity

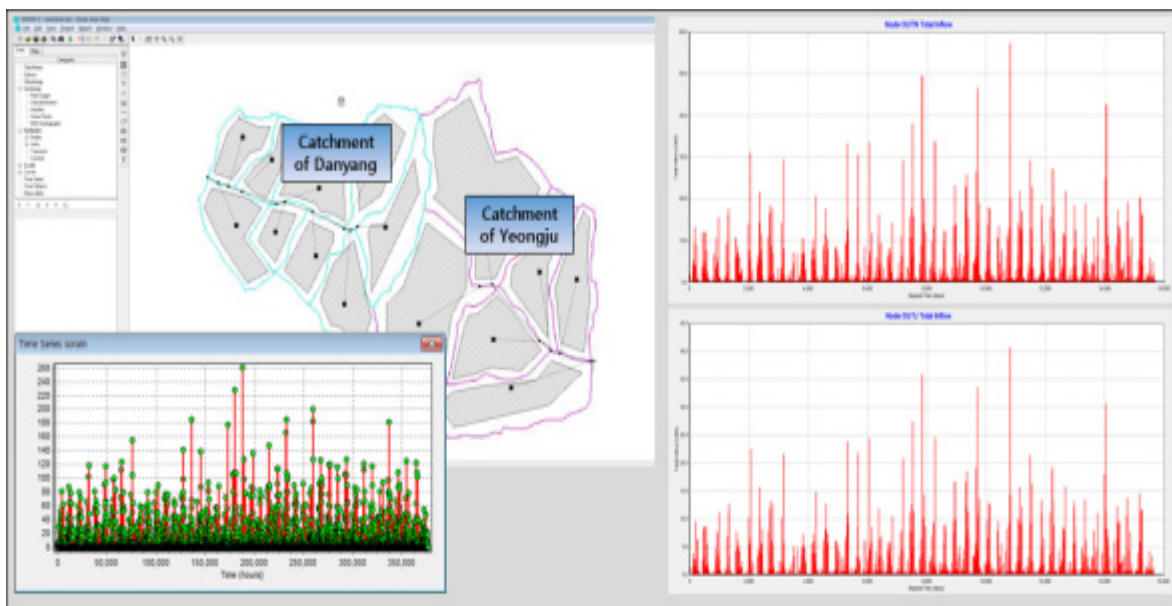


Figure 5. Analysis of long-term runoff using SWMM(1973~2017)

4. 터널 굴착에 따른 지하수위 변동

본 연구에서는 죽령터널 공사 단계에 따른 주변부 지하수위를 분석하였으며 지하수 부정류 모의를 실시한 시나리오는 <Table 1>과 같이 죽령터널 공사를 총 7단계로 나누어 터널 입구부(단양측, 영주측)굴착, 경사갱1, 경사갱2, 굴착 후 차수 그라우팅 작업까지를 6

개월 단위로 구분하여 지하수 변동을 모의하였다.

단계별 유출지하수량을 분석한 결과 1단계에서 단양 측 입구부에서는 $6 \text{ m}^3/\text{day}$, 경사갱 1557 m^3/day , 경사갱2 232 m^3/day 이며 영주 측 입구부에서는 굴착이 진행되지 않아 유출량이 없고 2단계에서는 단양 측

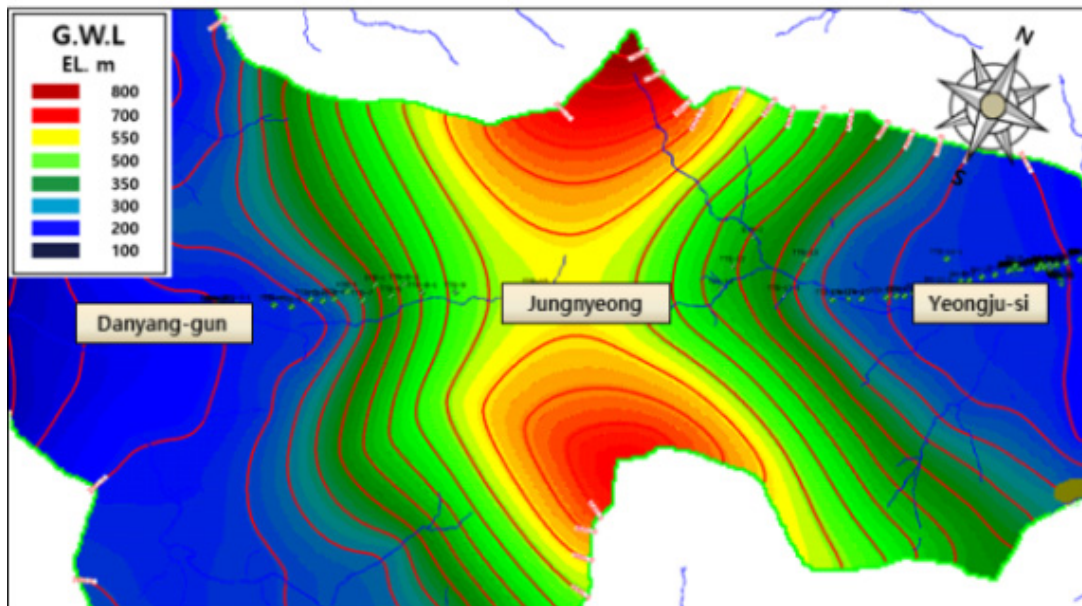


Figure 6. Contour diagram of groundwater level(steady state)

Table 1. Modeling condition of step by step

Step	Modeling period	Modeling condition(Unsteady flow)
Step 1.	2015.07~2015.12	Digging at entrance of Danyang, inclined tunnel 1 and inclined tunnel 2
Step 2.	2016.01~2016.06	Digging at entrance of Danyang, inclined tunnel 1, inclined tunnel 2 and entrance of Yeongju
Step 3.	2016.07~2016.12	Digging at entrance of Danyang, inclined tunnel 1, inclined tunnel 2 and entrance of Yeongju Pass through at inclined tunnel 2 and entrance of Yeongju
Step 4.	2017.01~2017.06	Digging at entrance of Danyang, inclined tunnel 1, inclined tunnel 2 and entrance of Yeongju Pass through at inclined tunnel 1 and entrance of Danyang
Step 5.	2017.07~2017.12	Digging at inclined tunnel 1 and inclined tunnel 2, Pass through at inclined tunnel 1 and inclined tunnel 2
Step 6.	2018.01~2018.06	Finish of digging, Start of grouting
Step 7.	2018.07~2018.12	Finish of grouting

입구부에서는 $10 \text{ m}^3/\text{day}$, 경사갱1 $689 \text{ m}^3/\text{day}$, 경사갱2 $637 \text{ m}^3/\text{day}$, 영주 측 입구부에서는 $686 \text{ m}^3/\text{day}$ 이다. 굴착기간이 경과함에 따라 굴착정도가 심해지기 때문에 유출지하수량이 증가하는 것으로 분석되었다. 3단계에서는 단양 측 입구부에서 $33 \text{ m}^3/\text{day}$, 경사갱1에서 $150 \text{ m}^3/\text{day}$, 경사갱2에서 $750 \text{ m}^3/\text{day}$, 영주 측 입구부에서 $481 \text{ m}^3/\text{day}$ 이 발생하는 것으로 분석되었으며 경사갱2와 영주 측 입구부가 관통되었지만 유출지하수량에는 큰 변화가 없는 것으로 모의되었다. 4단계에서는 단양 측 입구부에서 $71 \text{ m}^3/\text{day}$, 경사갱1에서 $431 \text{ m}^3/\text{day}$, 경사갱2에서 $2,708 \text{ m}^3/\text{day}$, 영주 측 입구부에서 $1,710 \text{ m}^3/\text{day}$ 이 발생하며 단양 측 입구부

와 경사갱1이 관통되어 유출지하수량이 일부 증가하고 경사갱2와 영주 측 입구에서의 유출지하수량이 크게 증가하는 것으로 모의되었다. 5단계에서는 단양 측 입구부에서 $665 \text{ m}^3/\text{day}$, 경사갱1에서 $1,923 \text{ m}^3/\text{day}$, 경사갱2에서 $1,615 \text{ m}^3/\text{day}$, 영주 측 입구부에서 $4,759 \text{ m}^3/\text{day}$ 이 발생하며 경사갱1과 경사갱2 구간이 관통되어 단양 측 입구부, 경사갱1, 영주 측 입구부에서의 유출지하수량이 증가하고 경사갱2에서의 유출지하수량이 감소하는 것으로 분석되었다. 6단계에서는 단양 측 입구부에서 $1,664 \text{ m}^3/\text{day}$, 경사갱2에서 $1,168 \text{ m}^3/\text{day}$, 영주 측 입구부에서 $5,204 \text{ m}^3/\text{day}$ 이 발생하며 7단계에서는 단양 측 입구에서 $555 \text{ m}^3/\text{day}$, 경사갱2에서 343

m^3/day , 영주 측 입구부에서 $179 m^3/day$ 이 발생한다. 6단계와 7단계에서는 각각 차수작업이 진행되고 차수작업이 완료됨에 따라 유출지하수량이 감소하는 것으로 모의되었다.

단계별 굴착진행에 따른 주변 지하수위 변동 분석 결과는 <Table 2>와 <Figure 7>이다. 총 7단계의 굴착 단계 중 지하수위 변동이 가장 큰 시기는 굴착이 시작된 1단계로 분석되었다. 죽령터널 중앙에서 상부 지점인 죽령(MW-3)에서 $7.3 m$ 의 지하수위 하강, 영주 측 입구부 부근(MW-5)에서는 $2.9 m$ 의 지하수위 하강, 경사갱1(MW-6)과 단양 측 입구부(MW-1) 부근에서는 약 $5.7 m$ 의 지하수위 하강이 발생하는 것으로 분석되

었다. 이후 단계별 굴착진행이 완료되고 차수작업이 진행되면서 마지막 단계에서는 공사 전 지하수위 (steady state)까지 대부분 회복하는 것으로 모의되었다. 따라서 공사초기 경사갱과 양측 입구에서 동시에 시작된 굴착공사는 소백산 전체 지하수위에 일시적인 변동을 발생시키지만 죽령터널이 완료된 시점에는 공사 전 지하수위와 큰 차이가 없는 것으로 모의되었다.

단계별 굴착진행에 따른 지하수위 변화 분석 결과를 바탕으로 연구대상지역의 지하수 변동 범위를 살펴보면 3단계 후 지하수위는 <Figure 8>과 같이 경사 갱1 주변에서 약 $3.11 km^2$ (종방향으로 최대 약 $1.7 km$, 횡방향으로 약 $3.7 km$), 경사갱2 주변에서 약

Table 2. Groundwater level results by step and monitoring point

Monitoring well name	Groundwater level(EL.m)							
	Steady state	Step. 1	Step. 2	Step. 3	Step. 4	Step. 5	Step. 6	Step. 7
MW-1	271.8	266.1 (↓ 5.7m)	272.3 (↑ 0.5m)	267.7 (↓ 4.1m)	268.8 (↓ 3.0m)	269.8 (↓ 2.0m)	270.2 (↓ 1.6m)	269.9 (↓ 1.9m)
MW-2	373.1	366.6 (↓ 6.5m)	370.1 (↓ 3.0m)	368.9 (↓ 4.2m)	369.3 (↓ 3.8m)	367.5 (↓ 5.6m)	370.1 (↓ 3.0m)	373.3 (↑ 0.2m)
MW-3	461.0	453.7 (↓ 7.3m)	457.1 (↓ 3.9m)	456.7 (↓ 4.3m)	456.5 (↓ 4.5m)	452.9 (↓ 8.1m)	456.8 (↓ 4.2m)	462.9 (↑ 1.9m)
MW-4	353.0	349.9 (↓ 3.1m)	350.7 (↓ 2.3m)	350.3 (↓ 2.7m)	350.2 (↓ 2.8m)	349.4 (↓ 3.6m)	350.3 (↓ 2.7m)	353.3 (↑ 0.3m)
MW-5	288.1	285.2 (↓ 2.9m)	286.2 (↓ 1.9m)	285.7 (↓ 2.4m)	285.4 (↓ 2.7m)	283.6 (↓ 4.5m)	285.4 (↓ 2.7m)	287.3 (↑ 0.8m)
MW-6	323.6	317.8 (↓ 5.8m)	321.8 (↓ 1.8m)	320.0 (↓ 3.6m)	320.3 (↓ 3.3m)	319.4 (↓ 4.2m)	321.2 (↓ 2.4m)	320.6 (↓ 3.0m)

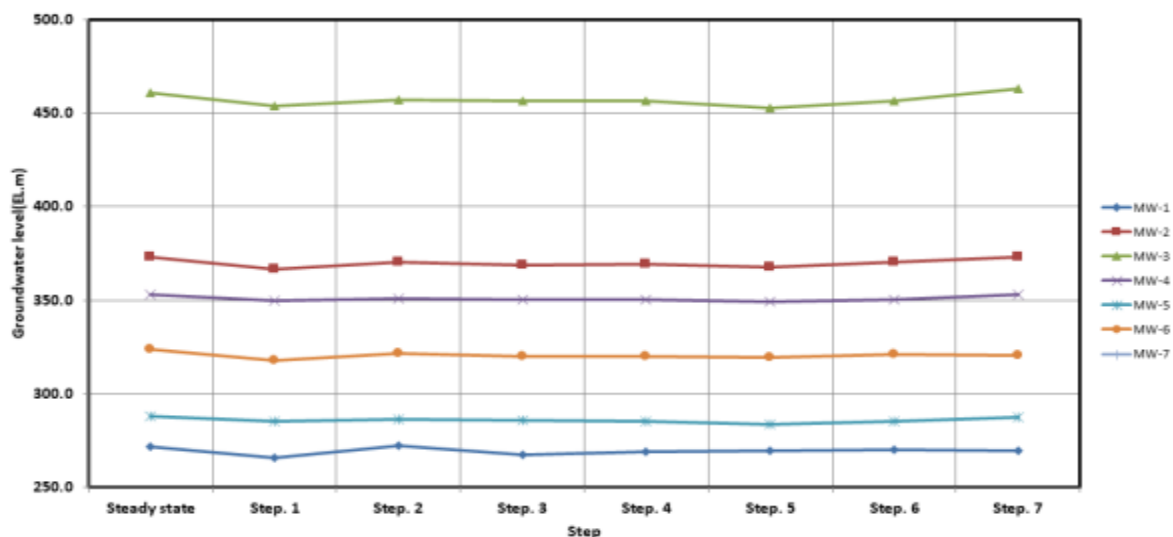


Figure 7. Groundwater level for monitoring point

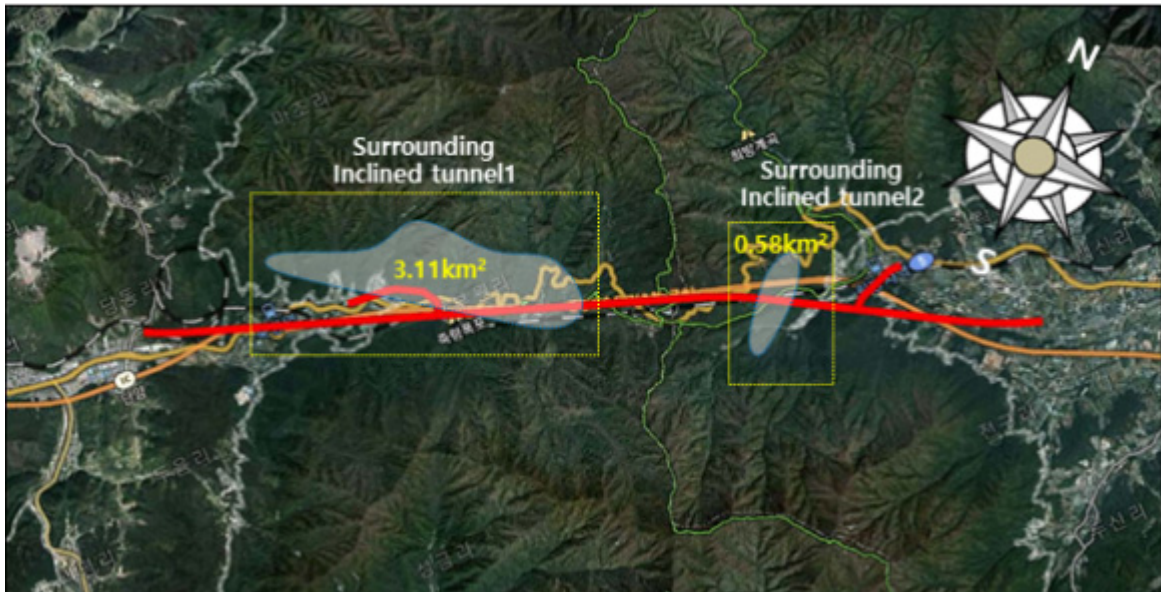


Figure 8. Range of groundwater fluctuation at step 3.

0.58 km^2 (종방향으로 최대 약 1.6 km , 횡방향으로 약 0.5 km)범위 내 지하수위가 최대 1 m 변동이 발생하는 것으로 분석되었다. 굴착진행이 완료된 6단계 이후 지하수 변동 범위를 살펴보면 <Figure 9>와 같이 단양 측 입구부 주변에서는 약 6.21 km^2 (종방향 약 3.3 km , 횡방향 약 2.4 km), 경사갱1 주변에서는 약 6.02 km^2 (종방향 약 2.1 km , 횡방향 약 5.0 km), 경사갱2 주변에서는 약 1.12 km^2 (종방향 약 0.9 km , 횡방향 약 0.6 km)범위 내 지하수위가 최대 1 m 변동하는

것으로 분석되었다. 이는 지속적인 굴착과 터널 내부 차수작업이 반영되지 않아 유출지하수량이 지속적으로 증가하면서 죽령터널 공사 구간주변 전 구간에서 지하수위 하강이 발생한 것으로 판단된다. 터널 내부 차수시설이 모두 완료된 7단계 이후 지하수 변동범위를 살펴보면 <Figure 10>과 같이 단양 측 입구부 주변에서는 약 0.58 km^2 (종방향 약 0.7 km , 횡방향 약 1.5 km), 경사갱1 주변에서는 약 3.58 km^2 (종방향 약 1.0 km , 횡방향 약 4.7 km), 경사갱2 주변에서는 약 0.94

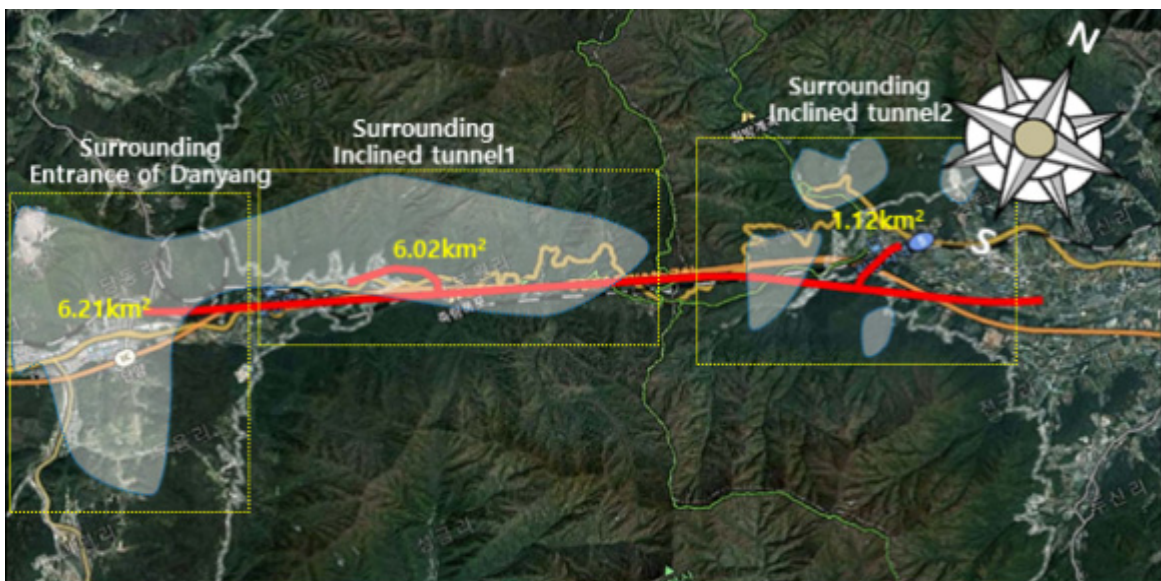


Figure 9. Range of groundwater fluctuation at step 6.

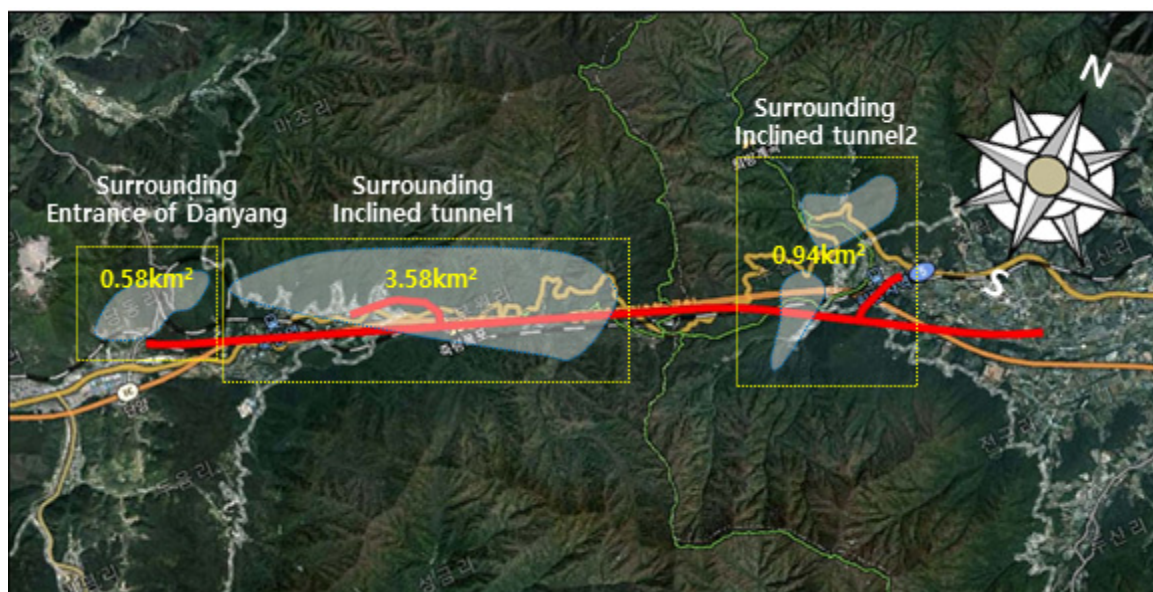


Figure 10. Range of groundwater fluctuation at step 7.

km^2 (종방향 약 1.2 km , 횡방향 약 0.3 km) 범위 내에서 지하수위가 최대 1 m 변동하는 것으로 분석되었다. 6단계 결과와 비교하면 지하수위 변동 범위가 확연히 줄어든 것으로 분석되며 이는 차수작업의 영향으로 판단되고, 공사가 완료되는 시점에는 하부 죽령터널 공사로 인한 소백산 상부와 주변 지역의 지하수 영향은 미미할 것으로 판단된다.

위 결과들로 바탕으로 죽령터널 굴착공사 완료와 차수작업이 완료되면 유출지하수량 및 지하수위 변동 범위가 감소하고 남원천 및 죽령천으로 유입되는 기저유출량 변화 또한 미미할 것으로 판단된다. 향후 죽령터널 공사 이후 장기적인 지하수위 변동 특성 분석과 상부 소백산 생태계 변화에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

V. 결론

본 연구에서는 Visual-MODFLOW를 이용하여 죽령터널 공사로 인한 상부 소백산 및 주변부 지하수 영향 분석을 실시하였으며 터널 굴착 단계에 따른 유출지하수량 변화 및 지하수위 변동을 분석하여 공사 단계

별 지하수 영향 범위를 평가하였다.

1. 유출지하수량은 터널 굴착구간이 증가함에 따라 증가하고 굴착완료 후 차수작업이 진행되고 완료되면서 감소하는 것으로 분석되었다.

2. 지하수위는 터널굴착이 시작된 직후 가장 많이 하강하지만 굴착공사가 진행되고 차수작업을 수행함으로써 공사 전 지하수위로 서서히 회복 하는 것으로 분석되었다.

3. 터널굴착이 진행됨에 따라 지하수위가 하강하는 지역은 터널 전체 구간 주변부로 확대되지만 굴착완료 후 차수작업 수행으로 지하수위 하강 범위가 점점 줄어드는 것으로 분석되었다.

4. 죽령터널 공사로 인한 상부 소백산의 지하수 영향을 검토한 결과 죽령터널 공사로 인한 지하수 영향은 극히 미미할 것으로 예측된다.

5. 소백산 지하수위 변화와 기저유출 감소로 주변 남원천 및 죽령천에서의 유량 감소와 이로 인한 하천 건천화 문제는 없을 것으로 판단된다.

6. 죽령터널 공사로 인한 상부 소백산의 생태계 변화 등에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 SK건설(주)의 연구비 지원을 받아 수행되었음.

References

- Heo, Chang Hwan. 2003. Groundwater Flow Analysis Using MODFLOW in the Tunnel. *Journal of Korea Water Resources*. 36(1): 129-142.
- Hur, Young Teck, Gu Young Park, Jin Hyeog Park, and Hyung San Kim. 2018. Improvement of the Long-term Discharge Simulation Linked with K-DRUM and MODFLOW. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 18(7): 555-562.
- Ii, Hiroyuki and Hiroo Kagami. 1997. Groundwater Level and Chemistry Changes Resulting from Tunnel Construction Near Matsumoto City, Japan. *Environmental Geology*. 31(1): 76-84.
- Jeong, Jae Hyeon and Min Ho Koo. 2015. Numerical Simulation of Groundwater Discharge into a Tunnel: Considerations of Grid Design for Increased Accuracy. *The Journal of Engineering Geology*. 25(3): 369-376.
- Koh, Byoung Ryoum, Yun Yeong Choi, and Soo Hyeon Ko. 2006. Characteristics of Groundwater Movement Variation according to Establishment of Underground Tunnel. *Journal of Korean Society of Water Science and Technology*. 14(4): 59-68.
- Lee, Jeong Hwan, Se Yeong Hamm, Jae Yeol Cheong, Jae Hyeon Jeong, Nam Hoon Kim, Ki Seok Kim, and Hang Tak Jeon. 2009. Estimation of Groundwater Flow Rate into Jikri Tunnel Using Groundwater Fluctuation Data and Modeling. *Journal of Soil and Groundwater Environment*. 14(5): 29-40.
- Lee, Jeong Hwan, Se Yeong Hamm, Jae Yeol Cheong, Jae Hyeon Jeong, Ki Seok Kim, Nam Hoon Kim, and Gyoo Bum Kim. 2010. Numerical Simulation of the Change in Groundwater Level due to Construction of the Giheung Tunnel. *The Journal of Engineering Geology*. 20(4): 449-459.
- Surinaidu, Lagudu, Velidi Venkata Surya Gurunadha Rao, Mogali Jayaraja Nandand, Chander Shekhar Khokher, Yugraj Verma, and Shiv Kumar Choudhary. 2015. Application of MODFLOW for Groundwater Seepage Problems in the Subsurface Tunnels. *Journal of Indian Geophysical Union*. 19(4): 422-432.
- Tullia, Bonomi and Bellini Roberta. 2003. The Tunnel Impact on the Groundwater Level in an Urban Area: a Modeling Approach to Forecast It. *Materials and Geoenvironment*. 50(1): 45-48.
- Yoo, Chung Sik, Sun Bin Kim, Gyu Jin Bae, and Hyu Sung Shin. 2005. Effect of Tunneling and Groundwater Interaction on Tunnel Behavior. *Tunneling Technology*. 7(2): 97-108.
- ### Korean References Translated from the English
- 고병련, 고수현, 최운영. 2006. 지하터널 설치에 따른 유동변화 특성. *한국수처리학회지*. 14(4): 59-68.
- 이정환, 정재열, 정재형, 김기석, 전항탁, 함세영, 김남훈. 2009. 지하수 변동자료와 모델링을 이용한 직리터널의 지하수 유출량 평가. *지하수토양환경*. 14(5): 29-40.
- 이정환, 정재열, 정재형, 박삼규, 김남훈, 김규범, 함세영. 2010. 기흥터널 건설에 따른 지하수 변화 수치모델링. *지질공학*. 20(4): 449-459.
- 정재현, 구민호. 2015. 터널 지하수 유출량 산정을 위한 수치모델: 신뢰도 향상을 위한 격자망 설정 방법. *지질공학*. 25(3): 369-376.
- 허영택, 박구영, 박진혁, 김형산. 2018. K-DRUM과 MODFLOW를 연계한 장기유출량 정확도 개선. *한국방재학회지*. 18(7): 555-562.
- 허창환. 2003. MODFLOW를 이용한 터널의 지하수 유동해석. *한국수자원학회논문집*. 36(1): 129-142.

Received: Mar. 19, 2020 / Revised: Apr. 14, 2020 / Accepted: Apr. 14, 2020

Visual-MODFLOW를 이용한 죽령터널 부근 지하수위 변동 분석

국문초록 철도수요 증가와 각 지자체의 철도 유치 희망이 커짐에 따라 철도시설의 증설이 불가피한 상황이다. 이에 본 연구에서는 중앙선 도담 ~ 영천 복선전철 건설 사업 중 죽령터널 공사가 상부 소백산 지역의 지하수 환경에 미치는 영향을 Visual-MODFLOW를 이용하여 평가하였다. 이를 위하여 죽령터널 공사 단계를 총 7단계로 구분하였으며 단계별 유출지하수량 및 지하수위를 분석하여 공사 진행에 따른 지하수위 영향 범위를 산정하였다. 그 결과 터널굴착이 시작됨에 따라 터널 내부 유출지하수량이 증가하고 상부지역에서 지하수위가 하강하지만 터널굴착이 완료되고 차수작업이 진행됨에 따라 유출지하수량이 감소하고 하강했던 지하수위가 공사전 지하수위로 회복되는 것으로 분석되었다. 본 연구 결과 죽령터널 공사로 인한 상부 소백산의 지하수 문제는 미미한 것으로 평가되며, 주변 남원천 및 죽령천에서의 기저유출량 감소로 인한 하천건천화 문제는 없을 것으로 판단된다.

주제어 : 죽령터널, 지하수위, Visual-MODFLOW

Profiles **Jun Oh Oh** : He received his B.A., M.A., Ph.D. from Inje university, Korea in 2018. He researches subjects has urban flood, rainwater storage and drainage system and groundwater fluctuation. He published recently are increased pressure n rainwater storage and drainage system by undular bore, influence of undular bore on the hydraulic stability at rainwater storage and drainage system(symmoh@inje.ac.kr).

Jong Jin Lee : He Obtained a doctor of engineering degree in “A Study on Spatio-Temporal Characteristics of Rainfall Distribution in Urban area”(August, 2018) from Inje University. He is a adjunct professor of the Department of civil and urban engineering at Inje University. The main areas of research are regional rainfall distribution, ecological flowrate and low impact development(jongjin2@inje.ac.kr).

Ju Young Jeon : He received his B.A., M.A. from Catholic Kwandong university, Korea in 2016. He is a doctoral candidate of the Department of civil and urban engineering at Inje university. His field of interest includes : groundwater modeling, urban flood and hydrologic analysis(jeon880@naver.com).