

지하 터널 건설을 위한 굴착 시 지하수 유동 분석

Groundwater Flow Analysis During Excavation for Underground Tunnel Construction

이 성 열¹⁾ · 백 원 진²⁾ · 김 진 영³⁾ · 정 창 성⁴⁾ · 강 재 모[†]

Sungyeol Lee · Wonjin Baek · Jinyoung Kim · Changsung Jeong · Jaemo Kang

Received: May 8th, 2024; Revised: May 8th, 2024; Accepted: May 14th, 2024

ABSTRACT : Urban densification has necessitated the development of subterranean spaces such as subway networks and underground tunnels to facilitate the dispersal and movement of populations. Development of these underground spaces requires excavation from the ground surface, which can induce groundwater flow and potentially lead to ground subsidence and sinkholes, damaging structures. To mitigate these risks, it is essential to model groundwater flow prior to construction, analyze its characteristics, and predict potential groundwater discharge during excavation. In this study, we collected meteorological, topographical, and soil conditions data for the city of ○○, where tunnel construction was planned. Using the Visual MODFLOW program, we modeled the groundwater flow. Excavation sections were set as drainage points to monitor groundwater discharge during the excavation process, and the effectiveness of seepage control measures was assessed. The model was validated by comparing measured groundwater levels with those predicted by the model, yielding a coefficient of determination of 0.87. Our findings indicate that groundwater discharge is most significant at the beginning of the excavation. Additionally, the presence of seepage barriers was found to reduce groundwater discharge by approximately 59%.

Keywords : Underground tunnel, Visual MODFLOW, Groundwater flow, Water blocking effect

요 지 : 도심지의 인구 밀집화로 인해 인구의 분산 및 이동을 위해 지하철도 및 지하 터널의 개발과 같은 지하공간에 대한 개발이 이루어지고 있다. 지하공간을 개발하기 위해서는 지반 상부로부터 굴착이 진행되어야 하며, 굴착 시 주변 지하수 유동이 발생할 수 있다. 지하수의 유동은 지반의 침하 및 함몰을 야기하여 구조물의 손상을 발생시킬 수 있다. 따라서 시공 전 지하수 유동을 모델링하여 지하수 유동 특성을 분석하고 굴착 시 발생하는 지하수 유출을 예측하여 대비해야 한다. 본 연구에서는 지하터널 건설을 위한 굴착공사가 이루어지는 ○○시를 대상으로 기상 및 지형, 지반 조건 등을 수집하여 Visual MODFLOW 프로그램을 통해 지하수 유동을 모델링하였다. 또한, 모델을 통해 굴착구간을 배수 지점으로 설정하여 굴착 공정에 따른 지하수 유출을 확인하였으며, 차수 조건에 따른 지하수 유출 감소 효과를 확인하였다. 실측 지하수위와 모델의 지하수위를 비교하여 모델을 검증한 결과, 0.87의 결정계수가 도출되었으며, 해당 모델을 통해 대상지역 굴착 공정에 따른 지하수 유출을 비교하였다. 그 결과, 굴착 초기에 지하수 유출이 가장 많이 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 차수 유무에 따른 지하수 유출 저감 효과를 확인한 결과, 차수 구조물 설치 시 약 59%의 지하수 유출 저감 효과를 보이는 것으로 나타났다.

주요어 : 지하터널, Visual MODFLOW, 지하수 유동, 차수효과

1. 서 론

국내 도심지를 중심으로 인구가 밀집됨에 따라, 도심지 내에서 인구의 이동 및 외곽지역으로 분산하기 위한 광역 도시철도망의 확보가 이루어지고 있다. 지하철 및 도시철도망은 지하공간의 터널 구조물에 의해 구축되고 있으며, 이를 위해서는 반드시 굴착 공사가 선행되어야 한다(Lee et

al., 2024). 도심지의 경우 인구가 밀집된 공간에서의 개발이 활발히 진행되고 있으나, 구조물 인근에서 굴착 시 주변지반의 교란 및 지하수위의 변동, 수평변위의 발생 등으로 인해 주변 구조물의 균열, 배면지반의 침하 등의 위험이 발생할 수 있다. 따라서 위험을 최소화하기 위해 터널 등의 지하 구조물 시공을 위한 굴착 시 안정성을 충분히 확보하여야 한다.

1) Postdoctoral Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

2) Professor, Department of Rural & Biosystems Engineering, Chonnam National University

3) Senior Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

4) Executive Director, Dong-A Eng. Co. Ltd.

† Senior Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (Corresponding Author : jmkang@kict.re.kr)

도심지에서의 지하 터널 구조물 건설에 따른 개착 저부와 지하수위와의 수두차 등에 의한 지하수의 유동이 지반 공학적으로 많은 문제를 야기할 수 있다(Dnyana et al., 2024). Hubbert(1940)은 지하수 유동이론을 모델링하여 해석하였다. 그 이후 비균질성 유역에서 지하수 흐름을 수치해석적 모델로 해석한 연구가 수행되었으며(Freeze & Witherspoon, 1966), 포화-불포화 영역에서 흐름 해석을 위한 3차원 유한차분법과 유한요소법이 개발되었다(Freeze, 1971; Wang & Anderson, 1982).

국내에서도 도심지 개발에 따른 지하수 유동에 관해 다양한 연구가 수행되었다. 유한차분법을 활용하여 대구지역의 개발에 의한 지하수 유동을 3차원 유한차분법을 활용하여 해석한 연구가 발표된 바 있다(Bae, 1989). 또한 제주도를 중심으로 지하수 수온과 방사성 동위원소 및 수질 등의 분석을 통해 지하수 유동을 분석한 연구가 발표되었다(Kim, 2018). 최근 지하수의 유동 분석은 MODFLOW 프로그램에 의해 해석되는 경우가 많다. 지반조사의 결과를 활용하여 지하수위의 변동 양상 및 터널 굴착 시 구간에서의 지하수 유출량을 추정하는 연구가 발표되었으며(Lee & Kim, 2008), 터널 굴착 시 터널 내부로 유입되는 지하수량과 유동에 따른 영향반경에 관한 연구가 발표되었다(Jung et al., 2004). 이외에도 MODFLOW 프로그램을 통해 투수계수 값을 활용하여 시간의 흐름에 따른 지하수위의 유출량 및 오염물질의 확산 분석이 발표되었으며(Choi, 2015), 터널 굴착에 따른 지하수위의 유동량 분석(Kim, 2004), 제주도 지역의 지하수 함양률 변화에 따른 인공 함양 평가에 관한 연구가 발표되었다(Oh et al., 2011).

이와 같이 도심지 지하터널 건설에 따른 주변 지하수 유동을 MODFLOW 프로그램을 활용하여 분석되고 있다. 따라서 본 연구에서는 현재 도심지 지하철 공사가 진행 중인 ○○시를 대상지역으로 선정하였으며, Visual MODFLOW 프로그램을 활용하여 저심도 지하터널 건설을 위한 굴착 시공 구간을 모델링하였고, 실제 지하수위 측정결과와 모델링의 결과를 비교하여 모델을 검증하였다. 또한 굴착 시 차수 여부에 따른 지하수위 유동량을 확인하였으며, 가시설물에 의한 차수효과를 확인하였다. 이를 위해서 대상지역의 지반조사 결과 및 지하수위, 저류계수, 지하수 함유량 등의 정보를 수집하고, 지표에서의 지하수 유출 흐름을 분석하여 모델에 적용하였다. 본 연구를 통하여 지하 터널 건설 시 굴착 중 지하수 유동량의 예측 방안을 제시하고, 차수에 따른 지하수 유출 방지 효과를 제시하였다.

2. 지하수 유동 모델링

2.1 연구대상 지역

본 연구는 도심지 지하철 시공이 진행 중인 ○○시로 선정하였다. 대상지역은 도시철도 시공 시 지하 터널을 매설을 위해 약 6.4km 구간에서의 굴착 공사를 계획하고 있다. 본 연구의 목적인 지하수 유동 예측을 위한 모델링 및 굴착에 따른 지하수 강하량을 예측하기 위해서는 대상지역의 기상현황, 지하수 이용현황, 시간별 지하수위, 지표수 등의 정보가 확보하여 모델 구축 시 인자로 적용해야 한다.

2.1.1 강수량

대상지역의 기상현황 지상 관측소에서 관측된 값을 활용하여 유역의 30년(1991~2020년) 기상자료를 수집하였다. 대상지역의 연평균 강수량은 1,380.65mm이며, 월평균 강수량은 115.05mm로 나타났다. 또한, 월별 강수량은 6월~9월에 약 67%가 집중적으로 발생한 것으로 나타났다.

2.1.2 지하수위 변화

대상지역의 평균 지하수위 변화는 지하터널 건설을 위한 굴착 시 지하수위 영향범위 선정의 기준으로 활용이 가능하다. 따라서 본 연구의 대상지역의 2011년~2019년까지 대상지역에서 약 5km 떨어진 국가 지하수위 관측망과 8개 지역의 보조 관측망에서 측정된 자료를 활용하여 지하수위 변화폭을 산정하였다. 대상지역의 월·일별 지하수위 변동량을 확인하고 평균 변화폭을 산정한 결과 약 1.5m의 변화가 발생하는 것으로 나타났다.

2.1.3 지표수 현황

○○시는 국가하천 3개 및 지방하천 32개소 등이 260km에 걸쳐 포함되어 있으며, 본 연구의 대상지역인 지하터널 굴착 구간 인근에 지하수위 함양량에 영향을 미칠 것으로 판단되는 지표수로는 각각 2개의 하천과 저수지가 존재한다.

2.1.4 지하수 이용 현황

대상지역의 관정 현황을 조사하여 실제 지하수위의 변화량을 확인해야 한다. 지하 터널 건설을 위한 굴착공사 지점을 중심으로 반경 500m 구간에서 인·허가된 관정은 총 222개이며, 실제 사용되고 있는 50개의 관정을 선정하였다. 해당 관정에서 수집한 정보를 바탕으로 지하수위 변화 모델링에 활용하였다.

2.2 수리입력상수

지하 터널 건설을 위한 굴착 시 지하수 유동을 확인하기 위하여 Visual MODFLOW 프로그램을 활용하였다. MODFLOW를 활용하여 모델링하기 위해서는 수리입력상수를 선정해야 한다. 본 연구에서 활용한 수리입력상수에는 지하수 함양량 및 투수계수, 비저류계수, 비산출율, 유효공극률, 전공극율이며, 문헌조사 및 지반조사결과를 이용하여 해당 데이터를 수집하였다(Jeong, 2021).

2.2.1 지하수 함양량

지하수 함양량은 강우에 의한 침투수 및 하천과 저수지 등에 의한 지표 침투수를 포함한다. 지하수 함양량은 기상청의 자료와 지하수위 실측값을 Eq. (1)의 식에 적용하여 연간 강우량에 의한 지하수위 함양량을 산정하였다(Jacob, 1979).

$$N = \alpha(P - P_0), P > P_0 \quad (1)$$

N = 연간 자연함양량(mm)

α = 자연함양계수

P = 연 강수량(mm)

P_0 = 함양 시작 강수량(mm)

대상지역의 연평균 강수량은 1,380.65mm이며, 대상지역의 지반은 투수성을 나타내고 있으므로 이를 고려하여, 지하수 함양량 174.03mm/yr을 입력하였다. Fig. 1은 대상지역의 지하수위를 모델링한 결과이다.

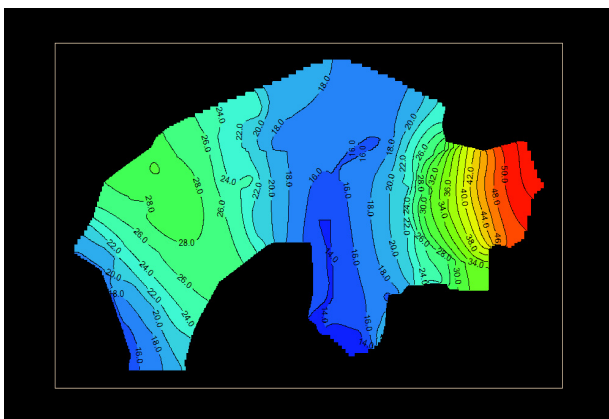


Fig. 1. Groundwater level distribution map of the study area

2.2.2 투수계수

지반 모델링을 위해 투수계수를 입력정수로 반영하였으며, 대상지역을 중심으로 지반조사를 수행하였다. 투수계수

를 구하기 위해 지하 터널 건설을 위한 굴착공사 현장 주변으로 39개 공의 시추조사를 수행하였으며, 21개 공의 시료를 채취하여 정수위 및 변수위법을 이용한 현장투수시험을 수행하였다. 그 결과 Table 1에 나타난 바와 같이, 풍화암 ($9.11 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$)이 모암으로 위치하여 있고 풍화토층은 $5.37 \sim 1.88 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$, 자갈 퇴적층은 $5.60 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$, 사질토 퇴적층은 $4.69 \sim 5.17 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$, 점성토 퇴적층 $1.46 \times 10^{-4} \text{cm/sec} \sim 3.92 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 의 범위를 나타냈으며, 가장 상부에 위치한 점성토층의 경우 $7.81 \sim 6.72 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 으로 나타났다. 지반조사 결과, 대상지역은 크게 토사층, 풍화대, 암반층으로 구분할 수 있으며, 지하수의 유동을 3차원으로 표시하기 위해 k_x , k_y , k_z 의 투수계수를 적용하였다. k_z 는 수평투수계수인 k_x 와 k_y 의 1/10를 적용하였다. Table 2는 모델링을 위해 적용한 투수계수를 나타낸 것이다.

Table 1. Permeability test results

No.	Depth (m)	Soli Layer	Permeability Coefficient (cm/sec)
1	6.0~7.0	Weathered	5.23×10^{-4}
2	1.0~2.0	Embankment	7.38×10^{-4}
3	6.0~7.0	Weathered	3.21×10^{-4}
4	11.9~14.7	Soft Rock	8.81×10^{-5}
5	15.0~18.0	Hard Rock	5.08×10^{-5}
6	5.0~6.0	Sand Sediment	4.69×10^{-4}
7	4.0~6.0	Clay Sediment	1.46×10^{-4}
8	7.0~8.0	Weathered	2.33×10^{-4}
9	9.0~10.0	Weathered	5.00×10^{-4}
10	5.0~6.0	Sand Sediment	5.17×10^{-4}
11	3.0~4.0	Embankment	7.81×10^{-4}
12	8.0~9.0	Weathered	2.89×10^{-4}
13	1.0~2.0	Embankment	6.72×10^{-4}
14	1.0~2.0	Weathered	1.88×10^{-4}
15	3.0~10.0	Moderate Rock	7.80×10^{-5}
16	9.0~10.0	Weathered	5.37×10^{-4}
17	6.0~7.0	Clay Sediment	8.75×10^{-5}
18	8.5~11.8	Soft Rock	3.60×10^{-5}
19	4.0~5.0	Gravel Sediment	5.60×10^{-3}
20	5.0~6.0	Clay Sediment	3.92×10^{-5}
21	12.0~13.0	Weathered	9.11×10^{-5}

Table 2. Permeability coefficient applied for modeling

Layer	k_x (cm/sec)	k_y (cm/sec)	k_z (cm/sec)
Embankment	9.6×10^{-4}	9.6×10^{-4}	9.6×10^{-5}
Weathered	2.6×10^{-4}	2.6×10^{-4}	2.6×10^{-5}
Rock	9.0×10^{-5}	9.0×10^{-5}	9.0×10^{-6}

2.3 정상류 해석

대상지역의 자연 상태에서 지하수 유동 및 지하 터널 건설을 위한 굴착에 의한 지하수 유동을 Visual MODFLOW 4.0을 활용하여 모델링하여 재현 및 분석하였다. MODFLOW는 유한차분법을 활용하여 미국지질조사소에서 개발한 3차원 지하수 유동해석 프로그램이다(Kim et al., 2006). 지하수계를 독립적으로 활성화가 가능하며, 지하수 유동을 격자 중심으로 구분하여 유한차분법을 통해 분석이 가능하다. 외부에서 발생하는 지하수 활용량, 지하수 함양량, 증발산량, 하천에 의한 지하수위 유입과 같은 영향도 분석이 가능하다(Chung et al., 1994). 3차원 지하수 유동식은 Eq. (2)를 통해 산출이 가능하다. Fig. 2는 대상지역을 모델링한 모습이다. Fig. 2에서 빨간색 선은 대상지역의 범위를 나타내며, 노란색 선은 굴착공사 지역을 나타낸 것이다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} : x,y,z축 방향의 수리전도도

h : 수두, t : 시간

W : 단위체적 내에서의 흐름

S_s : 다공성 매체의 비저류계수

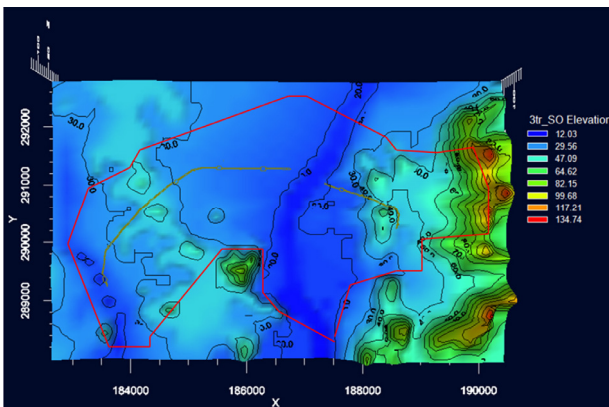


Fig. 2. Modeling of the study area

본 연구에서는 대상지역의 모델링을 위해 정상류 상태에서의 해석을 수행하였다. 지하 터널 건설을 위한 굴착 중 지하수위의 유동을 확인하기 위해 문헌 및 현장조사를 통해 대상지역의 지형 및 지질, 수두경계조건을 적용하였다. 또한 격자망은 굴착지역에서 멀어질수록 격자크기를 확대 적용하였으며, 굴착 폭과 시공 일정을 반영하였다.

모델링 범위는 대상지역 내에 위치한 하천 및 저수지를 고정수두로 적용하였고, 총 굴착구간은 약 6.5km이다. 해당

지역을 중심으로 성토층, 풍화층, 암반층으로 구분하고, 국가공간정보포털에서 수집한 DEM 데이터 및 현장 측량을 통해 지형의 고도 및 하천의 수위 값을 추출하여 모델에 적용하였다.

모델에 정상류 해석은 모델링 해석단면의 검증을 위해 실시하였다. 모델의 정상류 해석을 통해 해석된 지하수위 값과 실제 지하수위 값을 비교하여 검증하였으며, 합리적인 범위에서의 투수계수 조절을 통해 최종 모델을 도출하였다. 모델링된 지하수위와 실제 지하수위의 비교는 총 39개 공의 관정을 대상으로 하였으며, Fig. 3과 같이, 실제 계측 값과 모델링의 지하수위 값의 결정계수를 분석한 결과 약 0.87의 R^2 정도의 상관성이 있는 것으로 나타났다. 또한, 정류상태에서의 지하수위의 범위는 약 116.5~134.0m로 나타났다.

모델의 지하수 유입과 유출량을 비교하기 위해서 물수지 분석을 수행하였다. 유입과 유출량은 Constant head와 Wells, Drain, Recharge 항목으로 산정하였으며, 그 결과 유입량과 유출량의 차이가 0으로 나타나 모델링이 성공적으로 이루어졌다고 판단하였다.

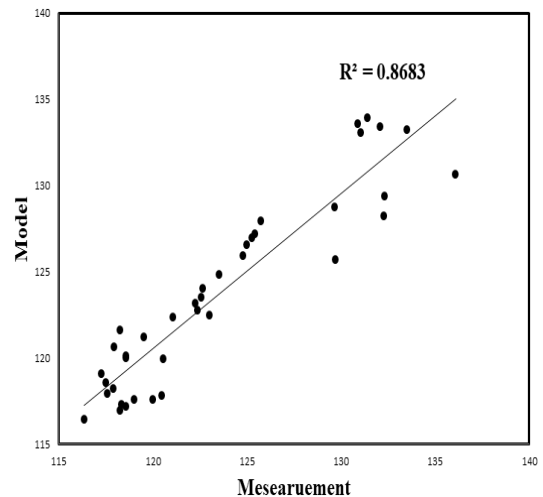


Fig. 3. Coefficient of determination between measurement and model values

3. 굴착에 따른 지하수위 변화

지하 터널 건설 시 굴착공사 공사기간 동안 지하수위가 굴착 지점으로 유입됨에 따라 주변 지하수위의 유동이 발생하고 주변 지반의 침하 및 관정의 지하수위를 강화시킬 수 있다. 따라서 정상류 상태의 지하수위를 바탕으로 굴착구간을 배수지점으로 설정하여 터널 굴착에 따른 지하수위 유동을 분석하기 위해 부정류 분석을 수행하였다.

부정류 분석은 정상류 분석에서 활용한 정수를 주로 이용

하였으며, 굴착 시공기간과 심도와 같은 터널 굴착 정보를 추가적으로 고려하여 굴착구간과 인접한 50개 관정 지역의 시공단계별 지하수위 배출을 모사하였다. 또한, 차수 역할을 하는 흙막이 가시설이 지하수위 유동에 미치는 영향을 확인하고자 차수 유무에 따른 지하수 유출량을 확인하였다.

차수가 반영되지 않은 조건(굴착만 반영)에서의 지하 터널 건설을 위한 굴착 단계에 따른 지하수 유출량을 확인하기 위하여 대상지역을 모델링하여 굴착 공사의 공정 단계별로 수행하였으며, 초기수위, 25%, 50%, 75%, 100%의 조건에서 50개 관정의 평균적인 지하수 유출량을 예측한 결과를 Table 3에 나타냈다. 굴착에 의한 지하수 유출은 지형적 특성에 따라 상이할 것으로 판단되지만, 관정의 분포의 한계로 인하여 평균을 활용하였다. 그 결과, 대상지역에서의 지하 터널을 건설하기 위한 일정 심도(구간별 상이)까지의 굴착 공사를 수행하면 약 2m 가량의 지하수위 강하가 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 굴착 초기의 지하수 유출량이 가장 많은 것으로 나타났다.

가시설을 활용하여 지하수 유입을 차단한 조건에서의 지하 터널 건설을 위한 굴착 단계에 따른 지하수 유출을 예측한 결과를 Table 4에 나타냈다. 굴착 초기 25% 단계에서는 평균 약 0.294m의 지하수위 강하가 발생하였으며, 50%에서는 0.582m, 75%에서는 0.702m, 지하 터널 건설을 위한 굴착이 완료되었을 때에는 총 0.827m의 지하수위 강하가 발생하였다.

지하 터널 건설을 위한 굴착 공사 시 차수를 위한 가시설물을 활용할 경우 지하수 유출을 최소화할 수 있다고 알려져 있다(Seong et al., 2011). 따라서, 도심지 도시철도망 구축을 위한 지하 터널 공사 현장을 대상으로 모델링하여 굴착 시 지하수 유출 분석을 통해 차수 효과를 확인하였다. 굴착초기 단계부터 완료 시 까지 각 단계별로 약 59%의 지

하수 유출을 방지하는 것으로 나타났다. 대상지역의 경우 저심도 지하 터널을 구축하는 시공 현장이므로 굴착 심도가 깊어질수록 지하수 유출 방지 효과가 클 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 도심지 지하 터널 건설을 위한 굴착 공사 시 지하수 유출 예측 및 분석을 위해 MODFLOW 프로그램을 활용하여 대상지역을 모델링하였다. 또한, 실제 지하수위 측정 결과와 모델 예측 결과를 비교하여 모델을 검증하고 굴착 구간을 배수 지점으로 설정하여 차수 시설물 유무에 따른 지하수 변화량을 확인하였다. 본 논문의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 대상지역의 지하수 유출을 모사하는 모델링을 위해서는 강우에 의한 침투수와 지형 및 지반 조건을 고려한 지표수의 침투를 고려하여 모델에 반영해야 하며, 실제 측정된 지하수위와 모델의 예측 지하수위를 비교한 결과, 약 0.87의 결정계수가 나타났다.
- (2) 모델을 통해 지하터널 건설을 위한 굴착 공정률에 따른 지하수 유출량을 확인한 결과, 굴착 초기에 지하수 유출이 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 터널 건설 계획 시 지하수 관리 및 유출 대책을 단계적으로 세우는데 활용할 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 모델을 통해 굴착 구간의 차수 조건을 적용하여 지하수 유출 감소율을 확인한 결과, 가시설물을 활용하여 차수를 적용하면 약 59%의 지하수 유출을 방지할 수 있는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구 결과를 활용하여 터널 건설 시 지하수 문제를 사전에 대응하여 지하수 유출 감소를 분석하여 효과적인 차수 시설을 활용할 수 있을 것으로 판단되며, 굴착 중 지하수 유출로 인한 주변 지반 침하를 방지하여 위험 관리가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업) 사업으로 수행되었습니다(지하 공간 정보 정확도 개선 및 매설관 안전관리 기술개발(5/5)).

Table 3. Ground Water Displacement under non-water blocking conditions

Construction Progress	Ground Water Flow (m)
25%	-0.722
50%	-1.412
75%	-1.710
100%	-2.006

Table 4. Ground Water Displacement under water blocking conditions

Construction Progress	Ground Water Flow (m)
25%	-0.294
50%	-0.582
75%	-0.702
100%	-0.827

References

1. Bae, S. K. (1989), Groundwater flow analysis using a steady state three-dimensional model in an upland area, *Journal of Korean Association of Hydrological Sciences*, Vol. 22, No. 1, pp. 81~90. (In Korean)
2. Choi, J. H. (2015), Evaluation for the rate of groundwater and simulation of contamination using MODFLOW, The University of Seoul, Degree of Master thesis. (In Korean)
3. Chung, S. O., Lee, Y. D. and Min, B. H. (1994), An analysis of groundwater flow at Bugok area using MODFLOW, *Water for future*, Vol. 27, Issue. 1, pp. 79~88. (In Korean)
4. Dayana, C. C., Edgar, Q. and Mehrab, M. (2024), Land subsidence due to groundwater exploitation in unconfined aquifers: experimental and numerical assessment with computational fluid dynamics, *Water*, Vol. 16, No. 3, 467.
5. Freeze, R. A. and Witherspoon, P. A. (1966), Theoretical analysis of regional groundwater flow ; 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model. *Water Resources Research*, Vol. 2, Issue. 4, pp. 641~656.
6. Freeze, R. A. (1971), Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin, *Water Resources Research*, Vol. 7, Issue. 2, pp. 347~366.
7. Hubbert, M. K. (1940), The theory of groundwater motion, *The Journal of Geology*, Vol. 48, No. 8, pp. 785~944.
8. Jacob (1979), *Hydraulics of groundwater*, McGraw-Hill Book Co., New York.
9. Jeong, C. S. (2021), Analysis of groundwater fluctuation and stability of back-ground according to installation of retaining walls, Chonnam National University Degree of Doctor. (In Korean)
10. Jung, B. S., Koo, M. H., Kim, Y. J. and Lee, J. Y. (2004), Sensitivity analysis of a transient groundwater flow modeling for tunnel excavation, *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 14, No. 3, pp. 287~300. (In Korean)
11. Kim, H. S., Park, J. M. and Jang, Y. S. (2006), 3-D groundwater flow analysis of excavated ground by reliability method, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 22, No. 10, pp. 69~76. (In Korean)
12. Kim, H. S. (2004), Reliability approach to groundwater flow analysis in underground excavations, Dongguk University Degree of Doctor thesis. (In Korean)
13. Kim, M. C. (2018), Hydraulic Watershed Classification and Flow Characteristics Analysis of Groundwater in Jeju Island, Jeju National University, Degree of Doctor thesis. (In Korean)
14. Lee, J. H. and Kim, H. M. (2008), Study on environmental impact and mitigation plan for groundwater outflow during tunnel excavation, *Environment Institute*, Vol. 7, No. 1, pp. 32~52. (In Korean)
15. Lee, M. W., Lee, J. Y. and Jang, J. W. (2024), Numerical modeling of groundwater system with tunnel construction in an urban area of Korea: implications for land subsidence and mitigation measures., *Environmental Earth Sciences*, Vol. 83, 80.
16. Oh, S. H., Kim, Y. C. and Koo, M. H. (2011), Modeling artificial groundwater recharge in the Hancheon drainage area, Jeju island, Korea, *J. Soil & Groundwater Env.*, Vol. 16, No. 6, pp. 34~45. (In Korean)
17. Seong, J. H., Jung, S. H. and Shin, j. Y. (2011), A study for safety management on ground excavation by analysis of accident events, *ournal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 15, No. 6, pp. 175~183. (In Korean)
18. Wang, H. F. and Anderson, M. P. (1982), *Introduction to Groundwater Modeling-Finite Difference and Finite Element Method*, W. H. Freeman and company.