

터널굴착으로 인한 지하수위 저하 및 수질영향 평가

김민규¹ · 김민수² · 정교철³ · 이정우⁴ · 정일문^{5*}

¹한국건설기술연구원 국토보전연구본부, 전임연구원

²대림산업, 상무

³안동대학교 지구환경과학과, 교수

⁴한국건설기술연구원 국토보전연구본부, 연구위원

⁵한국건설기술연구원 국토보전연구본부, 선임연구위원

Evaluation of Groundwater Level Decline and Water Quality Due to Tunnel Excavation

Min Gyu Kim¹ · Minsoo Kim² · Gyocheol Jeong³ · Jeongwoo Lee⁴ · Il-Moon Chung^{5*}

¹Department of Land, Water and Environment Research, KICT, Research Specialist

²Daelim Industrial Co. Ltd., Director

³Department of Earth and Environmental Science, Andong National University, Professor

⁴Department of Land, Water and Environment Research, KICT, Research Fellow

⁵Department of Land, Water and Environment Research, KICT, Senior Research Fellow

Abstract

In this study, the flow analysis to evaluate the extent of groundwater decline and the effect of the small valleys caused by the decrease of groundwater level in the construction of road tunnel, and the pollutant movement analysis to evaluate pollution of nearby water source by pollutant discharge during tunnel construction, respectively. The decrease of the groundwater during the 30 month tunnel excavation period was maximum 27 m and it was found to be the largest within 50 m from the tunnel center. The flow of groundwater is shown in the form of flowing into the tunnels and the effects of groundwater level decline were observed up to a tunnel radius of 200 m. As a result of the numerical modeling of the contaminant transport to examine the influence of the polluted water discharge from the tunnel, the range of the turbid water generated at the end of the tunnel is up to 120 m and it is estimated that the risk of contamination of the small river is not large.

Keywords: tunnel excavation, groundwater level drawdown, contaminant transport, effective distance

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Il-Moon Chung
E-mail: imchung@kict.re.kr

Received: 23 May, 2019

Revised: 20 June, 2019

Accepted: 20 June, 2019

© 2019 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

본 연구에서는 도로터널 건설시 감소하는 지하수위 저하의 범위와 이로 인한 인근 계곡 소하천의 영향을 평가하기 위한 유동해석 및 터널공사 시 오탍수 배출에 의한 인근 수원의 오염여부를 평가하기 위한 오염물 이동 해석을 수행하였다. 터널굴착 공기인 30개월 동안 하강하는 지하수의 저하량은 최대 27 m로 나타났고 터널중심에서 50 m 이내에서 가장 큰 것으로 확인되었다. 또한 이로 인한 지하수의 유동이 터널 내로 유입되는 형상으로 보여주고 있으며 터널반경 200 m까지는 적지만 수위저하의 영향이 나타났다. 터널에서 배출되는 오탍수 배출의 영향을 검토하기 위한 오염물 이동 수치모델링 결과 터널중단부에서 발생하는 탁수의 거동범위는 최대 120 m내외이며 이로 인한 소하천의 오염 위험은 크지 않을 것으로 평가되었다.

주요어: 터널굴착, 지하수위 강하, 오염물 이동, 영향거리

서론

20세기 이후 국내외를 막론하고 부족한 지표공간의 활용이라는 장점때문에 도로, 철도, 하천개수, 건축물, 에너지저장 시설 등의 공사 시 지하공간을 활용하려는 노력이 경주되고 있다(Chung et al., 1997; Chung et al., 2003; Lee and Kim, 2008). 이와 같은 지하굴착공사는 그 규모가 커질수록 오랜 시간이 소요되며, 지하수위저하 및 인근 지역의 식수원 고갈문제 등이 제기될 수 있다. 그 중에서도 터널공사 시 발생하는 지하수의 유동변화는 매우 전형적인 형태를 보이는데 주변 대수층의 흐름이 터널 쪽으로 향하고, 공사기간 중 터널 내로 지하수가 유출된다(Lee et al., 2005). 따라서 터널공사 시 인근 지역에서 용수로 사용되는 지하수의 고갈이나 터널굴착으로 인한 오염원의 환경적인 피해 유발 요소는 반드시 검토해야 할 항목으로 이와 같은 평가는 건설공사 평가 시 필수 요소에 포함되고 있다.

이와 관련된 연구로 Kim(2011)은 산악터널 건설에 따른 인근 용수관정에서의 수위 저하를 평가하기 위한 지하수 유동 해석을 수행한 바 있으며, Moon et al.(2017)은 터널내 지하수 유입량 산정을 위한 지하수위 강하 및 투수계수 감소효과를 파악하는 수치해석 연구를 수행하였다. Yoo(2008)는 해저 터널굴착 시 불연속 암반매질에서의 안정성 해석에 있어서 지하수의 영향을 검토하였고, Zhang and Franklin(1993)은 해석해를 이용한 터널내로의 유입량 예측을 수행하였다. Heo et al.(1996)은 해저 및 하저터널에서의 유입량 평가를 위해 다양한 지반 및 흐름조건 변화에 따른 터널 유입량과 수두분포를 예측한 바 있다.

터널굴착으로 인한 지하수 장애중 대표적인 사례는 산악지역을 통과하는 도로터널 건설에 의한 인근 마을의 지표수량 감소 문제로서 주민들과 건설 업체 간에 그 원인에 관한 분쟁 발생사례가 보고되고 있다(Lee et al., 2005; Park et al., 2007). 통상 터널은 산악을 통과하는 경우가 많으며 이 경우 비록 유량이 적은 계곡수임에도 하류부 소규모 저수지에 공급되어 인근 주민들이 생활용수로 사용하고 있기에 고갈시 민원제기의 가능성이 있다.

본 연구에서는 도로터널 건설시 감소하는 지하수위 저하의 범위와 이로 인한 인근 계곡 소하천의 영향을 평가하기 위한 유동해석 및 터널공사 시 오탍수 배출에 의한 인근 수원의 오염여부를 평가하기 위한 오염물 이동 해석을 수행하였다. 이를 위해 “A” 터널공사가 진행된 현장에서 수집된 자료(SK Engineering and Construction, 2001)를 바탕으로 수치모델링과 해석적 방법을 연계하여 검토하였다.

해석 방법 및 모형의 개요

본 연구에서 검토하고자 하는 A터널은 산악지역을 통과하는 도로터널로서 굴착에 따른 가장 큰 영향은 터널주변 지하수위의 저하 및 유동의 변화이다. 터널굴착으로 인한 단위 면적당 유입량을 산정하기 위해 식 (1)의 해석해(Goodman et al., 1965)를 사용했다.

$$Q_0 = \frac{2\pi KH_0}{2.3\log(2H_0/r)} \quad (1)$$

여기서, Q_0 : 유입량(m^3/sec)

H_0 : 터널내부로 작용하는 일정지하수두

K: 투수계수(m/sec)

r: 터널반경

수치해석을 위해서는 범용프로그램인 AQUA3D(VATNASKIL Consulting Engineers, 1992)를 사용하였다. AQUA3D는 지하수리학 분야에서 전 세계적으로 널리 이용되고 있는 프로그램으로 지하수 유동 및 용질이동을 해석하며, 유한요소법을 기반으로 하여 불규칙한 형상을 해석하는데 특히 유용하다. 지배방정식은 연속방정식과 Darcy의 운동방정식을 결합한 형태로 정상상태인 경우 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다(Freeze and Cherry, 1979).

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + W = S_s (\frac{\partial h}{\partial t}) \tag{2}$$

여기서, K_x, K_y : x, y방향의 투수계수(m/sec)

h: 지하수두(m)

W: 주입량(+), 또는 양수량(-)(m³/sec)

S_s : 비저류계수(specific storage)

또한, 용질이동의 지배방정식은 비반응 용질의 이송확산 방정식으로 다음 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta C) = D_x \frac{\partial^2}{\partial x^2}(\theta C) + D_y \frac{\partial^2}{\partial y^2}(\theta C) - \frac{\partial}{\partial x}(V_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(V_y C) \tag{3}$$

여기서, D_x, D_y : x, y방향의 분산계수(m/sec)

C: 오염원의 농도

θ : 공극률

오염물 이동해석을 위해 필요한 입력상수인 분산계수(D_x, D_y)는 다음 식 (4)와 같다.

$$D_x = \alpha_L V_x + D^*, \quad D_y = \alpha_L V_y + D^* \tag{4}$$

종분산지수(longitudinal dynamic dispersivity)인 α_L 은 현장 추적자시험을 통해 산출되어야 하나, 현장시험이 불가능하므로 일반적으로 사용되는 Neuman의 경험식(Neuman, 1990)인 식 (5)에 의해 종분산지수를 산출하여 적용했다(Fetter, 1994).

$$\alpha_L = 0.0175 L^{1.46} \tag{5}$$

여기서, α_L : 종분산지수(m)

L: Flow path 길이(m)

터널굴착에 따른 지하수위 하강 범위 추정

터널굴착 전후 유동 모델 구축

터널구간 예상심도의 암층을 시추조사와 수압시험결과를 기초로 산정한 결과 지하심부의 수리전도도는 대부분 경암 (hard rock)으로 구성되어 있고 평균 값은 $3.2 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$ 으로 매우 치밀한 암반인 것으로 나타났다. 이 지역의 지하수 함양률은 지역 평균인 연강수량의 12%를 적용하였다.

모델링을 통한 해석영역은 3차원 영역을 수평2차원으로 단순화하고, A터널 통과구간(1.75 km)을 포함하는 영역 2.85 km^2 (1900 m \times 1500 m)으로 구축하였다(Fig. 1). 터널 중심부는 지형적으로 가장 높고, 터널 시점과 종점으로 갈수록 지형이 낮아지고 있으므로, 방사상의 지하수 유동이 진행되고 있다. 상부, 좌우측이 산악으로 둘러싸여 인근 계곡부의 개천 (stream)이 발달하였다. 모델링의 영역 내에서 지하수 유동은 터널주변의 대표적인 5개의 계곡하천에 대해서 일정 수두값을 입력하였고, 지하수위의 변화가 적은 좌우측 경계 역시 일정 수두 경계를 적용하였다. 상, 하단의 경계는 흐름이 없는 경계조건(no-flow boundary)으로 설정하였으며, 경암은 터널심도 및 심정에서의 스크린 구간을 포괄하고 있어 모델링을 위한 매개변수로 등방성 평균 투수계수($3.2 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$)와 대표 저류계수(0.0001)를 적용하였다.

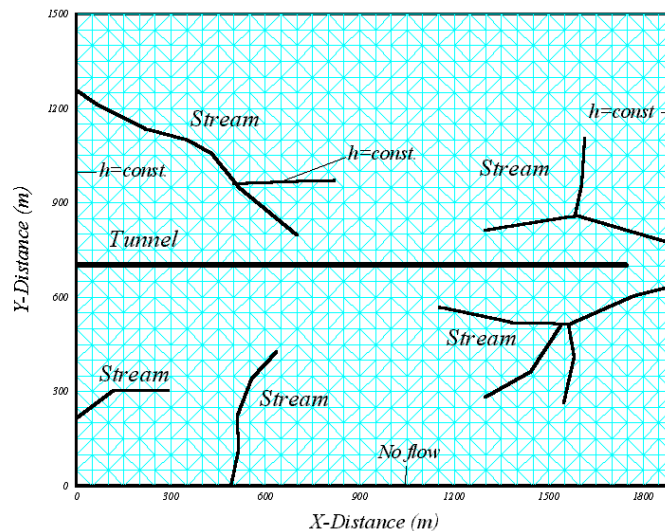


Fig. 1. Finite element meshes for the groundwater flow analysis.

Table 1에 제시한 관측 시추공 5개소에서 측정된 지하수위값과 계산된 지하수위를 비교하여 모델 보정을 실시하였으며 매개변수의 보정 범위는 평균투수계수와 저류계수의 $\pm 5\%$ 범위에서 수행하였다. 상관성을 나타내는 결정계수(R^2)는 0.98, 평균제곱근오차(RMSE)는 6.7 m로 나타나 양호한 적합을 보이는 것으로 판단되었다(Fig. 2).

Table 1. Measured groundwater level and rock characteristics

Well	TB1	TB4	TB9	TB12	TB16
GW level (E.L. m)	171	182.5	280	225	146
Rock	Granite Soft rock	Diorite Hard rock	Diorite Hard rock	-	-

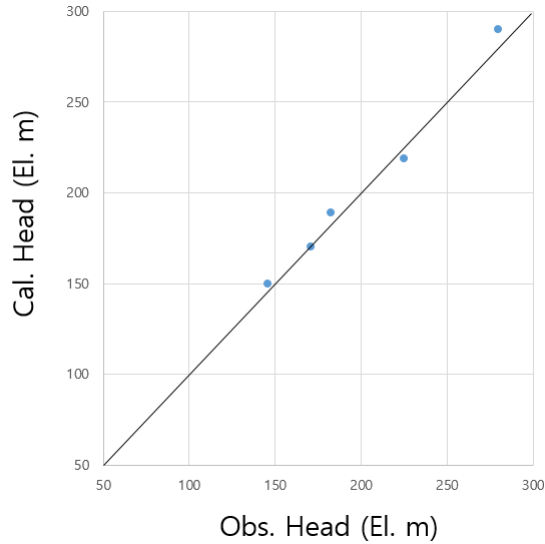


Fig. 2. Result of model calibration.

터널굴착 전후 지하수위 강하 분석

Goodman(1965)식으로 계산하면, 터널구간 전체에 대한 유입량은 터널반경(6.4 m)과 터널상부에서 지하수위까지의 높이(50.0 m)를 고려하면 약 700 m³/day으로 계산되고, 터널굴착공기인 30개월 동안 계산유입량을 적용하여 지하수 유동해석을 수행하였다. 물론 실제 유입량은 굴착단계별로 산정되므로, 계산 결과에 비해 훨씬 적을 것으로 판단되나 안전을 고려하여 다소 과다한 유입량을 기준으로 모의를 수행하였다. 예상한 것처럼 지하수위강하는 터널중심부에서 가장 크게 나타나 터널중심으로 반경 50 m 이내의 영향권에서 지하수위 강하량(Δh)은 11~27 m로 나타났다. 터널중심부로부터 멀어질수록 영향은 크게 줄어들어 터널중심으로부터 50~100 m범위에서는 지하수위강하량(Δh)이 5~11 m, 터널중심으로부터 100~200 m의 범위에서는 5 m 이내의 수위강하가 발생하는 것으로 나타났다(Table 2).

Table 2. The spatial range of groundwater drawdown by tunnel construction

Item	Range	Δh
Groundwater drawdown	Within 50 m from tunnel center	11~27 m
	50~100 m from tunnel center	5~11 m
	100~200 m from tunnel center	0~5 m

터널굴착 전후의 지하수위 분포는 Fig. 3과 같고 유속분포도는 Fig. 4와 같다. 터널굴착 전후의 지하수위는 터널공사 지점을 중심으로 하강하는 것이 나타나고 있으며(Fig. 3), 터널내부를 향해 주변 지하수위가 유입되는 형상을 나타내고 있다(Fig. 4).

다음 Fig. 5는 터널굴착 후의 지하수위 강하량의 분포를 나타낸 것으로 공사가 마친 후의 최종 지하수의 강하의 공간적 범위를 나타내고 있다. 주요 계곡부의 본류를 포함하는 구간에서는 터널굴착으로 인한 지하수위 저하량이 3 m 이내인 것으로 나타나 계곡부 하천수에 미치는 직접적인 영향은 그리 크지 않을 것으로 사료된다.

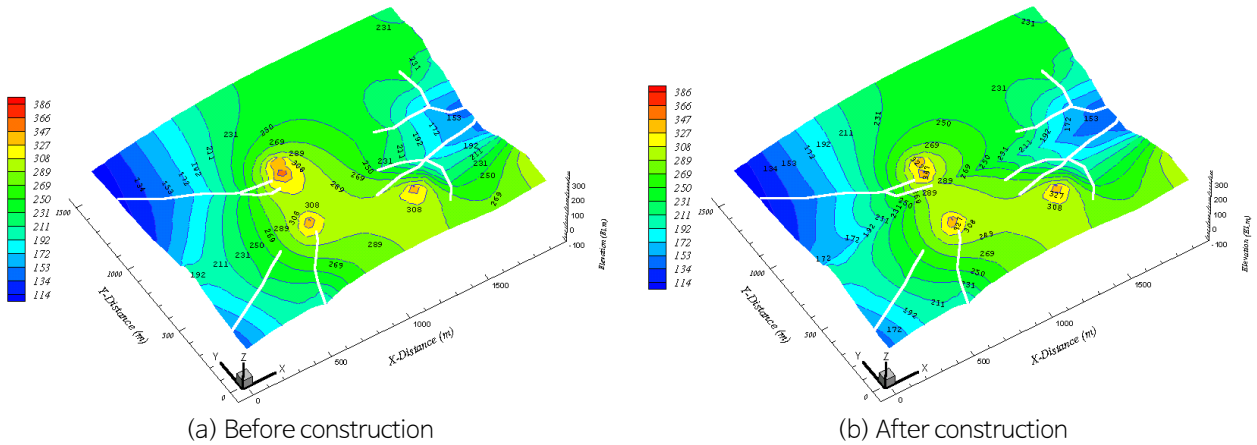


Fig. 3. Groundwater drawdown by tunnel construction.

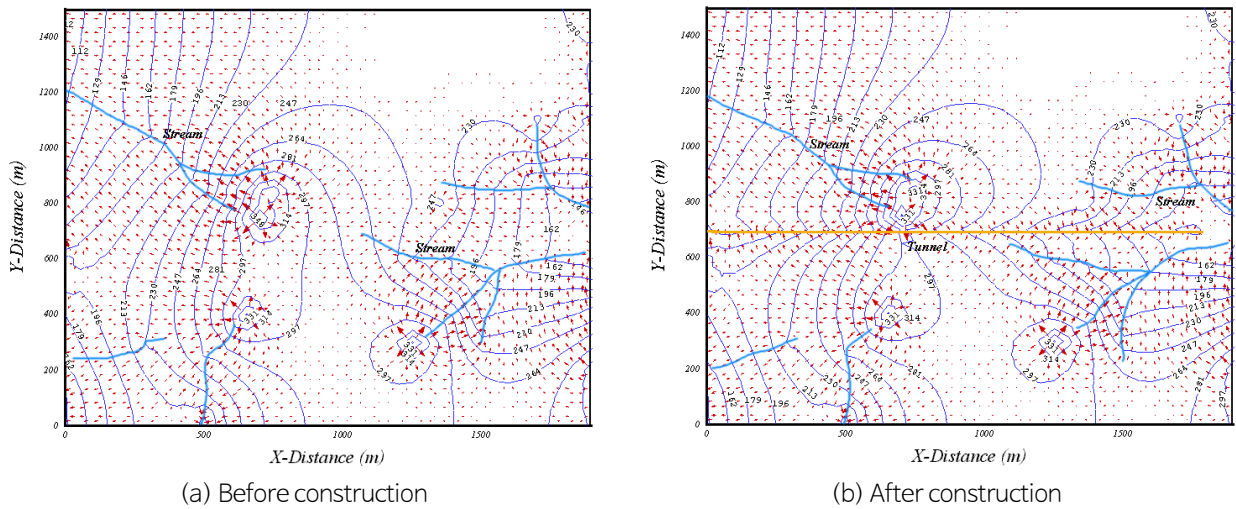


Fig. 4. Groundwater velocity distribution by tunnel construction.

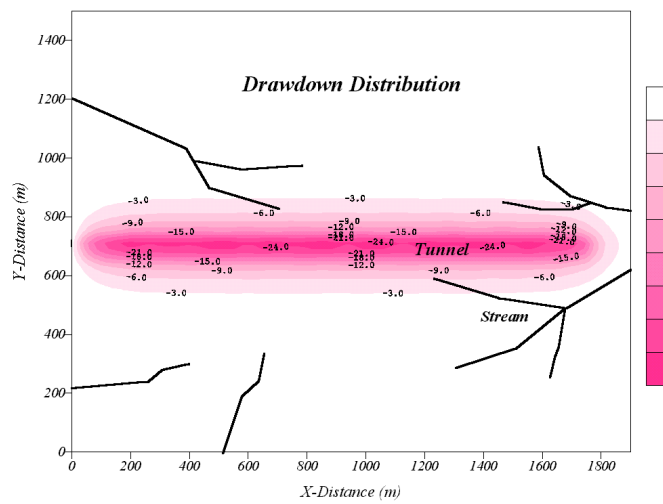


Fig. 5. Distribution of groundwater drawdown.

터널 탁수 배출에 따른 오염 영향

모델 구축 및 입력치 산정

A 터널굴착 후 발생가능한 오락수의 확산경로를 예측함으로써 인근수리환경에 미치는 영향을 평가하고 필요시 적절한 대책방안을 마련하기 위해 오염물 이동해석을 수행하였다. 터널굴착 후 터널종점부의 오락수 배출에 의한 오염물 이동 확산 예측을 하는 이유는 터널배출수중 가장 큰 영향을 미치는 pH 및 SS의 발생량이 터널종단부에서 방류되면서 인근지역으로 퍼져 나가기 때문이다.

용질 이동해석은 지하수 유동해석에 사용한 유한요소프로그램인 AQUA3D를 이용했고, 터널굴착 후 종단부에서 오락수의 배출 및 오염원의 농도분포의 연차적 해석(1년, 2년, 3년 후)을 수행하였다.

모델링에 사용된 격자망 및 흐름조건은 굴착 후의 흐름해석조건과 동일하게 적용한다. 해석영역 내의 주 오염원은 오락수로써 터널종단부에 위치한다. 오염물질의 농도는 터널공사 중 발생하는 오락수 처리방안 연구(KOWACO, 1995)에 의거 산정하였으며, 본 해석에서는 환경영향평가결과 SS에 대한 검토를 수행하여 추정 평균발생량 1750 mg/L를 사용했다. 본 과연구간은 1일 배출량 2000 m³ 이하이므로 적용수질기준은 다음 Table 3과 같다.

Table 3. Standard of water quality for under 2000 m³/day discharge

Region	Under 2000 m ³ /day		
	BOD max	COD max	SS max
Clean area	40	50	40
“A” class	80	90	80
“B” class	120	130	120
Exceptional area	30	40	30

본 연구에서 적용한 오염원에서 하천까지의 최단거리 L은 100 m이고 이에 따른 α_L 은 14.56 m으로 적용하였고, 확산 계수(D*)는 물속에서의 주요 양이온 음이온에 대한 값으로 1.0×10^{-9} m/sec를 사용하였다. 터널굴착 시 발생하는 오락수는 방류 후 1년, 2년, 3년 후의 세 가지 경우로 수행하였으며, 터널종점부를 오염원(source)위치로 정하고, 연속주입(continuous injection)으로 지정 후, 시간에 따른 오염원의 공간적 분포를 모델링했다. 오염원의 상대농도(C/C₀)의 분포를 계산한 후, 계곡부 수질에 미치는 영향을 검토하였다.

해석결과

오염원의 방출 3년 후 최대 이송확산되는 오염물농도는 120 m범위에서 허용치인 5% (80 mg/L) 이내로 나타나 이송확산의 범위는 그리 크지 않고 오염원은 계곡수로 유입되지 않는 것으로 나타났다. 그러나 시간에 따라 오염원은 점차 확산되며, 한번 오염된 지하수질은 회복이 거의 어려우므로 적절한 대책이 요구된다. 터널건설 이전과 동일한 수준의 계곡수 수질을 유지하기 위해서는 오락수의 배출시 정화시설의 설치가 필수적인 것으로 판단된다. Case 1, 2, 3의 경우, 오염원의 이동범위는 다음 Table 4와 같다.

Table 4. Spatial range of contaminant transport

Scenario	Spatial range of diffusion				
	80 mg/L	350 mg/L	875 mg/L	1400 mg/L	1750 mg/L
Case 1	100 m	50 m	20 m	5 m	0.1 m
Case 2	113 m	60 m	40 m	17 m	0.8 m
Case 3	120 m	67 m	47 m	23 m	1.0 m

터널굴착 후 종점에서 유발된 오락수 오염원의 연차별 농도분포는 Figs. 6~8에 나타났다. 또한 거리별 오염원의 분포도는 Fig. 9와 같다.

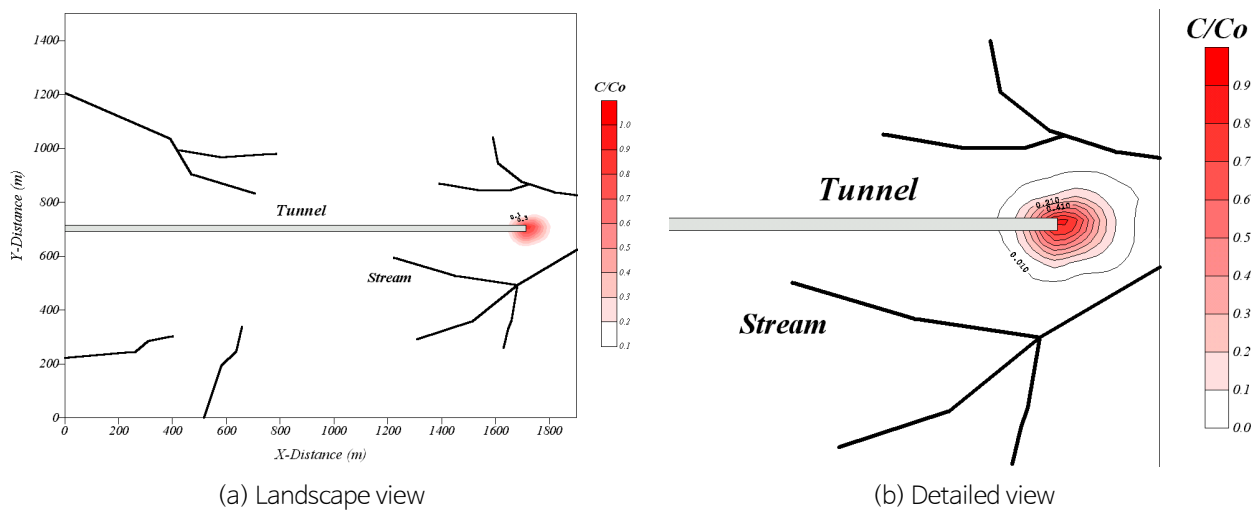


Fig. 6. Distribution of contaminant concentration (after 1 year).

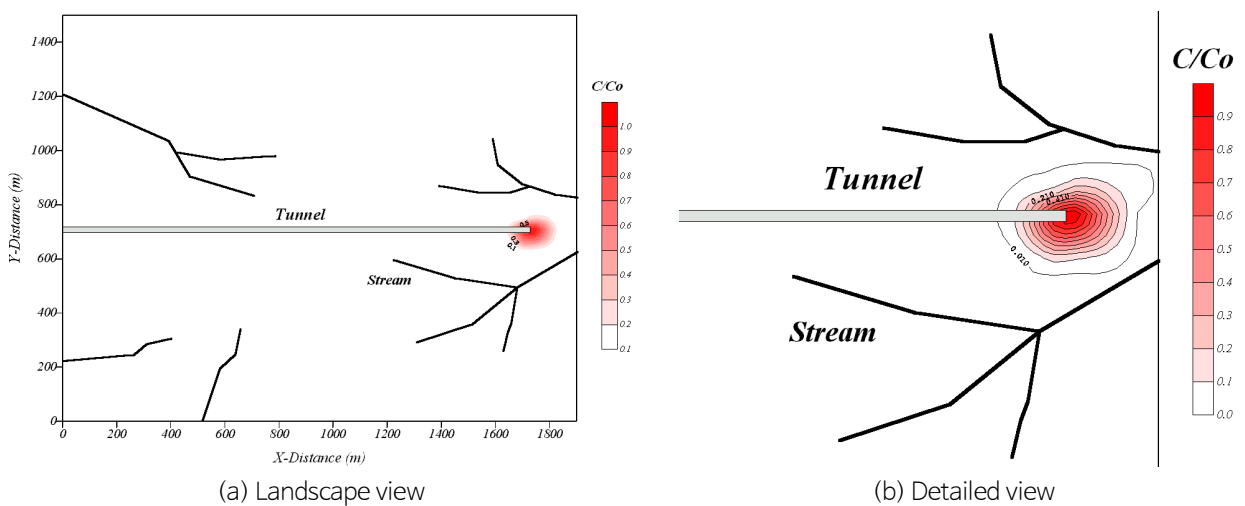


Fig. 7. Distribution of contaminant concentration (after 2 years).

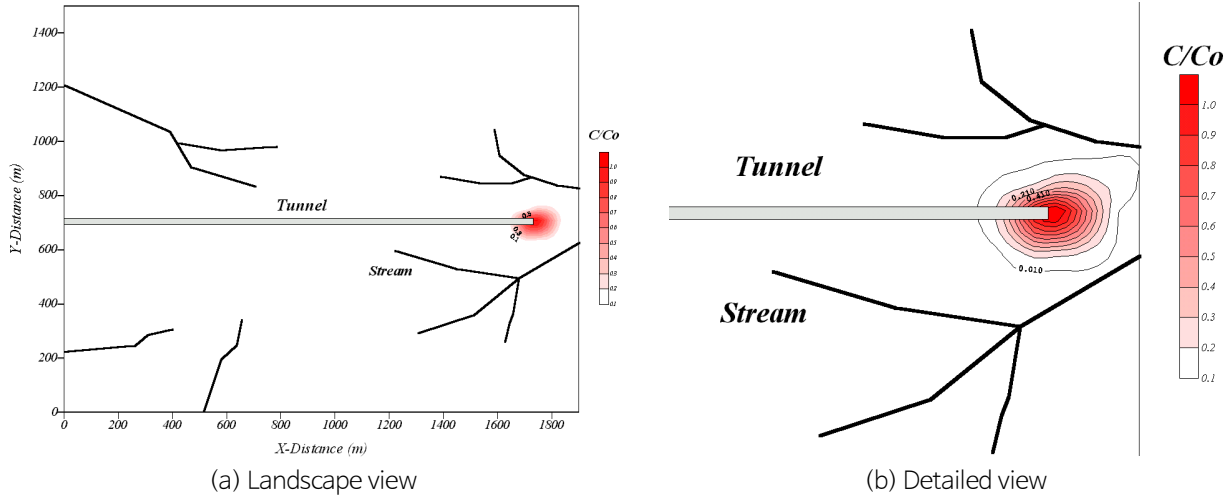


Fig. 8. Distribution of contaminant concentration (after 3 years).

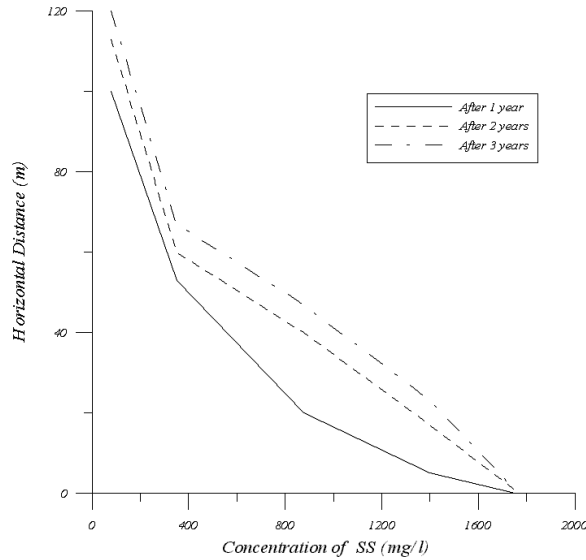


Fig. 9. Distribution of contaminant concentration according to the distance.

결론

최근 도로터널공사 시 발생하는 대부분의 민원발생은 대부분 산악지역에 위치한 마을 주민들의 생활용수로 활용되는 기존 관정이나 소하천 등의 고갈과 같은 현상에 미치는 지하수위 저하의 문제가 대표적이다. 한편, 터널굴착에 의한 지하수위의 변화는 공사직후까지 영향을 미치며 그 이후에는 차수공법 등에 의해 더 이상 지하수위가 하강하지 않고 회복되는 것이 일반적이다. 따라서 공사 중에 일어나는 지하수위의 저하의 공간적 영향범위를 평가하고 또한 터널굴착으로 인한 탁수 배출의 영향에 대해서 정량적이면서 합리적인 결과제시는 공사 전에 검토해야 할 필수 사항이라고 하겠다. 본 연구에서는 “A” 터널공사의 시공에 따른 지하수의 영향범위와 유동의 변화 그리고 탁수 배출의 영향이 인근지역에 미치는 영향을 해석적, 수치해석적 방법에 의해 분석하였다. 분석결과 터널굴착 공기인 30개월 동안 하강하는 지하수의 지하량은 최대

27 m로 나타났고 터널중심에서 50 m 이내에서 가장 큰 것으로 확인되었다. 또한 이로 인한 지하수의 유동이 터널 내로 유입되는 형상으로 보여주고 있으며 터널반경 200 m까지는 적지만 수위저하의 영향이 나타났다. 터널에서 배출되는 오탁수 배출의 영향을 검토하기 위한 이송확산 수치모델링 결과 터널중단부에서 발생하는 탁수의 거동범위는 최대 120 m내 외이며 이로 인한 소하천의 오염 위험은 크지 않을 것으로 평가되었다. 추후연구에서는 터널 굴진 단계별 유동해석을 수행할 필요가 있으며, TBM(Tunnel Boring Machine)의 경우 막장에서 지하수 유출이 가장 크게 발생하는 현상을 반영한 모의를 수행하고자 한다.

References

- Chung, I.M., Cho, W., Bae, D.H., 1997, Establishment of numerical model for groundwater flow (Water Curtain) analysis around underground caverns, *Journal of Korea Water Resources Association*, 30(1), 63-73.
- Chung, I.M., Cho, W., Heo, J.H., 2003, Stochastic hydraulic safety factor for gas containment in underground storage caverns, *Journal of Hydrology*, 284(1-4), 77-91.
- Fetter, C.W., 1994, *Applied hydrogeology*, Prentice Hall.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*, Prentice Hall.
- Goodman, R.E., Moye, D.G., Van Schalkwyk, A., Javandel, J., 1965, Groundwater inflows during tunnel driving, *Engineering Geology*, 2, 39-56.
- Heo, J.S., Chung, I.M., Heo, J.H., Cho, W., 1996, A quantitative analysis of the inflow to deeply located tunnel, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 17(1), 13-22.
- Kim, S.-M., 2011, Hydraulic and hydrological study on the change in groundwater level during tunnel construction, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 13(2), 97-114.
- KOWACO, 1995, A study on the turbid water treatment during tunnel construction.
- Lee, B.D., Sung, I.H., Jeong, C.H., Kim, Y., 2005, Modeling on the prediction of flow rate and groundwater level drawdown associated with tunnel excation in fractured rock, *Journal of Engineering Geology*, 15(3), 289-301.
- Lee, J., Kim, H., 2008, Study on environmental impact and mitigation plan for groundwater outflow during tunnel excavation, *Environmental Policy Research*, 7(1), 31-52.
- Moon, J.S., Zheng, A.-Q. Jang, S., 2017, Assessment of groundwater inflow rate into a tunnel considering groundwater level drawdown and permeability reduction with depth, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 19(2), 109-120.
- Neuman, S.P., 1990, Universal scaling of hydraulic conductivity and dispersivities in geologic media, *Water Resources Research*, 26(8), 1749-1758.
- Park, S.H., Chang, Y.Y., Kang, H.S., Choi, J.G., Yang, K.H., 2007, A study on the prediction of outflow of groundwater in tunnel construction areas, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 16(6), 407-419.
- SK Engineering and Construction, 2001, Report on the "A" Tunnel geological investigation.
- VATNASKIL Consulting Engineers, 1992, AQUA3D user's manual, Reykjavik, Iceland.
- Yoo, C.-S., 2008, 3D coupled analysis on tunneling under groundwater, *Tunnelling Technology*, 5(2), 175-187.
- Zhang, L., Franklin, J.A., 1993, Prediction of water flow into rock tunnels: an analytical solution assuming an hydraulic conductivity gradient, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract*, 30(1), 37-46.