

터널굴착이 지반환경에 미치는 영향에 관한 연구 - 계룡산 터널의 시뮬레이션 결과를 중심으로 -

임형규* · 장윤영
광운대학교 환경공학과

Study on the Impact Of Tunnel Construction on Geo-environment - Simulation study on the Gyerong tunnel -

Hyung-gyu Lim* · Yoon-young Chang
Dept. of Environmental Engineering, Kwangwoon University

ABSTRACT

In this study, impact of tunnel construction on groundwater level and flow was investigated by simulation modeling, and tried to find optimal assessment method for minimization of geo-environmental problems due to tunnel construction. As a study area, Gyerong mountain area scheduled for tunnel construction was selected and the impact of tunnel construction on geo-environment compared to situation before construction was simulated. Simulation result showed that groundwater level down was observed during tunnel construction and recovered after completion of tunnel construction.

Key words : Tunnel construction, groundwater, impact, modeling, assessment

요 약 문

본 연구에서는 터널 굴착으로 인한 지하수 영향 등 지반 환경 문제 해결을 위한 합리적인 평가 방법을 정립하고 이를 국민적 초미의 관심사 중 하나인 호남고속철도 계룡산 터널 구간에 적용함으로써, 계룡산 구간을 통과하는 터널 구간에 대한 환경문제(지하수/토양)를 사전에 연구하여 최적의 대안을 도출코자 한다. 지하수 유동모델링 결과 터널 굴착에 따른 지하수의 유출 및 지하수위 강하가 발생하며 터널굴착 완료 후에 지하수위가 회복되는 양상을 보인다. 따라서 구간에 분포하는 연약구간에 대해서는 특수 그라우팅이 필요할 것으로 사료된다.

주제어 : 터널공사, 지하수, 환경영향, 모델링, 영향평가

1. 서 론

최근 국가적인 교통 수요 및 교통량의 급격한 증가로 인해, 국가기간교통망의 확충 및 다양한 종류의 교통 수요 해결, 여객 및 물류 수송 소요 경비의 대폭 단축을 위한 신규 도로 및 철도노선 선정과 연차별 건설사업 추진 계획을 제시하고 있다. 국토의 70% 이상이 산악 지형인 우리나라의 여건상, 대규모 건설 계획 노선에서 산악

지형의 통과를 피할 수 없다. 이러한 산악 지형의 통과를 위해 대형 절토 구간이 발생할 경우, 심각한 환경 피해 뿐 아니라, 산사태 등의 지반 재해 등을 초래할 수 있어 환경의 파괴를 최소화 할 수 있는 대안으로 터널 공사가 지속적으로 증가하고 있다(이영준 외, 2004).

터널 굴착 공사 및 운영 중 발생할 수 있는 주요 환경 영향은 터널 굴착시 과도한 지하수 유출로 인한 지하수원 고갈 및 지반 침하, 터널 굴착 구간 내에 폐갱 존재로 인한

*Corresponding author : hgrim2001@hanmail.net

원고접수일 : 2008. 9. 30 심사일 : 2008. 10. 1 게재승인일 : 2008. 10. 24
질의 및 토의 : 2008. 12. 31 까지

지반 불안정성 발생, 터널 내 대기질 환경기준의 미설정 및 환기로 인한 외부 영향, 터널 내 고속주행에 따른 차량 내 소음·진동 영향, 터널 상부 식생 영향 등이 있을 수 있다.

이와 같은 환경 영향이 여타의 다른 공중에 비해 그 영향 범위가 작다 하더라도, 이에 대한 원인 규명, 과학적 해석방법에 근거한 환경 위해 요소에 대한 평가와 이에 대한 저감 대책이 수립되지 않는다면 환경분쟁의 당사자들이 모두 수긍할 수 있는 해결책이 도출되지 않는다. 특히 최근 들어 대형 도로 및 철도건설사업 중 장대터널 굴착이 계획된 서울외곽순환고속도로 사패산 터널 건설 구간, 경부고속철도 원호 터널 천성산 및 정족산 통과구간 등 주요 터널 고사에서 터널 굴착시 지하수 유출 영향과 이로 인한 환경 피해에 대해 법정 소송 및 사업의 지연까지 야기되는 등 많은 사회적 문제점을 일으키고 있는 상황에서 이에 대한 대책이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 터널 굴착으로 인한 지하수 영향 등 지반 환경 문제 해결을 위한 합리적인 평가 방법을 정립하고 이를 국민적 초미의 관심사 중 하나인 호남고속철도 계룡산 터널 구간에 적용함으로써, 계룡산 구간을 통과하는 터널구간에 대한 환경문제(지하수/토양)를 사전에 연구하여 최적의 대안을 도출코자 한다.

2. 연구방법

2.1. 모델링 해석

터널굴착 시 시간에 따른 지하수위 변화 및 터널 내 지하수 유입량 분석을 위하여 지하수 모델링을 실시하였다. 모델영역 내 대수층 대표 수리 상수선정을 위해 순간 층격시험, 투수시험, 수압시험 및 양수시험 결과자료를 이용하여 지질조사 및 물리탐사를 근거로 지층별 대표값을 산출하여 모델링에 적용하였다.

모델링 도구는 다공질포화매질 내에서의 지하수 유동을 모의할 수 있는 3차원 유한차분 모형인 MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988) 프로그램을 이용하여 3차원적인 지하수의 유동과 터널 굴착단계별 유입수량 산정하였으며, 본 수치모델링의 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)로는 국제적으로 공인된 지하수 전문 프로그램인 Visual MODFLOW(Ver. 3.1)을 이용하였다.

해석 흐름은 Fig. 1과 같다.

2.2. 모델구성

2.2.1. 모델영역 및 격자망 설정

연구대상지역인 계룡터널 구간 내 구역경계는 터널 주

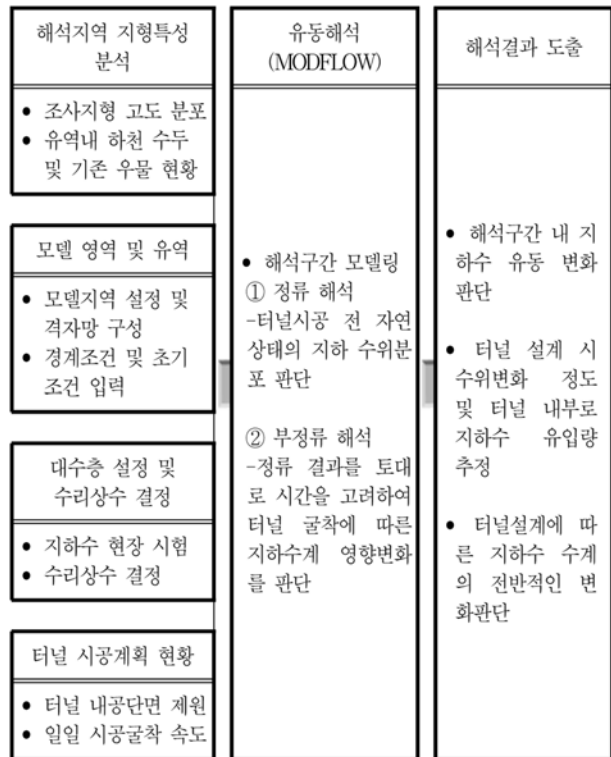


Fig. 1. Flow chart of modeling of impact of tunnel construction on ground water flow.

변 능선과 골짜기, 하천 등을 따라 설정하였으며, 공주시 일원으로 북쪽은 금강이 흐르며, 금강의 지류인 헐저천, 왕촌천 및 미암천이 남에서 북으로 관류하고 남쪽으로 계룡산이 위치한다. 수치지형도를 이용하여 DEM을 구성하고, 주 관심영역인 터널구간을 중심으로 설정하였다(Fig. 2).

격자망은 터널굴착 속도, 폭 및 높이를 고려하여 가로 15.15 km, 세로 11.10 km로 면적 168.17 km², 모델격자는 161행, 344열, 4층으로 구성(221,536셀)하였다. 터널구간의 경우 터널제원과 굴진장(10 m/day)을 고려하여 12 m × 30 m × 15 m의 격자 크기로 세분하여 설정하였다. 터널층(3층)은 29 km + 170 ~ 33 km + 200 구간까지 약 0.17도 기울어져 있으며 33km+200 ~ 36km+360 구간은 0.66도의 경사를 가지고 있다.

2.2.2. 초기조건 및 경계조건

앞서 실시한 현장시험 결과와 기존 문헌을 참조하여 지질조건에 따른 수리상수를 입력하였으며, 과업지역 지형도 및 수치지도를 이용하여 하천, 저수지 등 경계조건으로 설정하였다(Fig. 3).

터널굴착에 따른 지하수체계의 영향을 검토하기 위하여 과업구간 인근에 분포하는 기설 마을 관정, 시험정 및 가

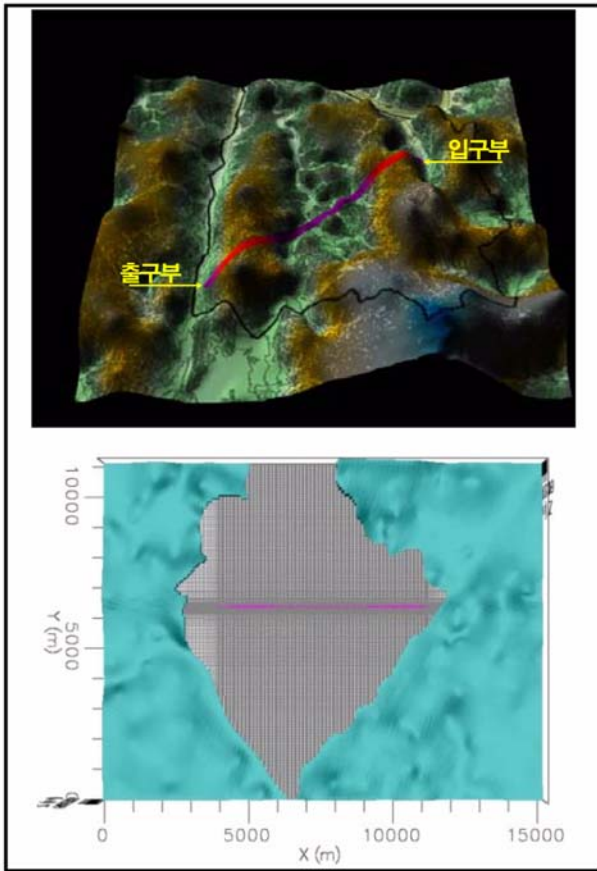


Fig. 2. Modeling area and grids of Gyeryong tunnel.

상의 관측정을 배치하였다. 지하수 함양량은 실제 풍수기와 갈수기에 따라 달라지고 이에 따라 지하수위도 변동하나, 본 조사에서는 한정된 기간의 지하수위에 의존하므로 계절적인 지하수위 변동은 고려하지 않았다. 지하수 함양량은 대전기상청의 10년간 연평균 강수량(1,530 mm)의 10%를 적용하였다. 북쪽을 흐르는 금강과 그 지류인 혈저천, 왕촌천 및 마암천 등을 일정수두 경계로 설정하였으며, 경계 조건은 일정수두경계(소류지), 하천패키지(소하천) 및 배수경계(건천화된 계곡부와 터널)로 설정하였다.

수리전도도 및 저유계수는 현장시험으로부터 측정된 값을 이용하여 지층별 수리전도도를 산정하였다. 3차원적인 지층 구조는 조사공의 시추자료를 고려하여 2개의 층(층

Table 1. Hydraulic conductivity of each soil layer

Layer	Hydraulic conductivity (K, cm/sec)	Specific storage coefficient S_s , m^{-1}	specific yield coefficient (S_y)	Total porosity (n_T)	Effective porosity (n_e)
1st layer	$2.28 \times 10^{-5} \sim 2.28 \times 10^{-4}$				
2nd layer					
3rd layer	5.26×10^{-6}	6.56×10^{-4}	0.2	0.3	0.25
4th layer					

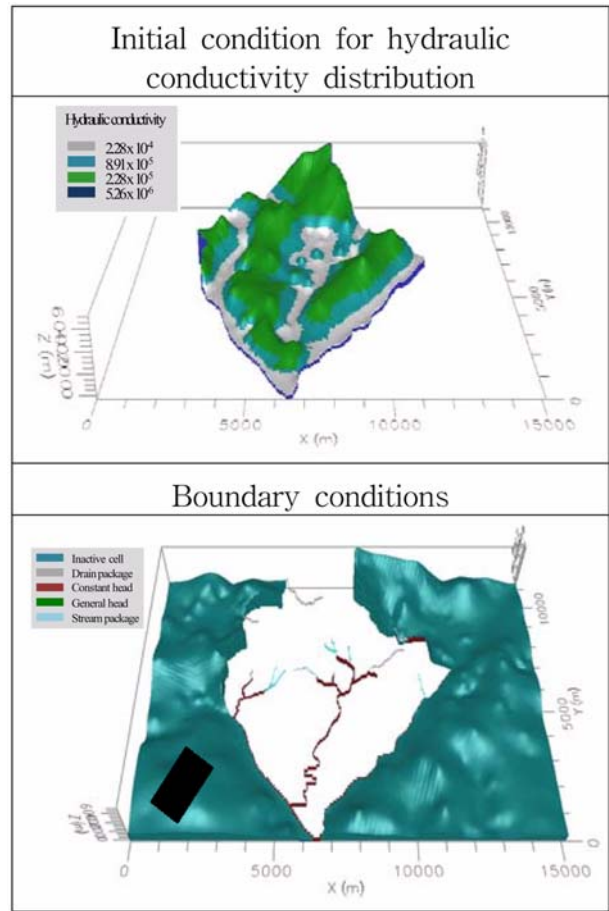


Fig. 3. Initial and boundary conditions.

적층, 암반층)으로 구분하였으며 이 중 암반층은 터널심도를 고려하여 다시 3개의 층으로 구분하였다. 각 지층의 수리전도도값은 등방(isotropic)하다고 가정하였으며, 투수시험, 수압시험, 순간충격시험, 양수시험 등을 통해 취득한 수리전도도를 기준으로 설정하였다(Table 1).

3. 연구결과

3.1. 터널굴착 전 정류모사 결과

현재의 지하수분포 및 유동체계를 모사하는데 정류모사를 이용하였으며, 터널굴착에 따른 주변 지역의 지하수위

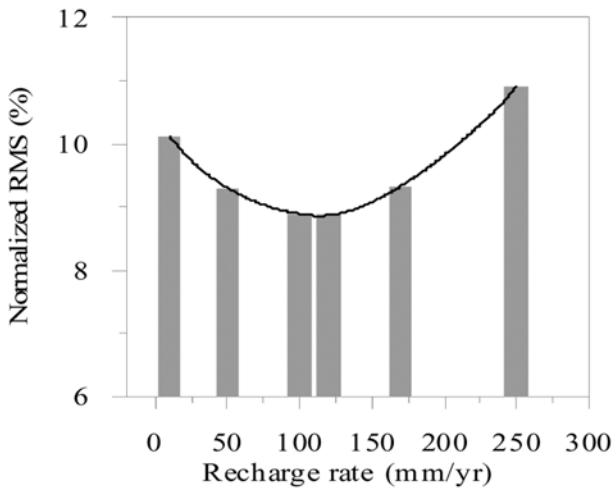


Fig. 4. Change of normalized RMS at different ground recharge rates before tunnel construction.

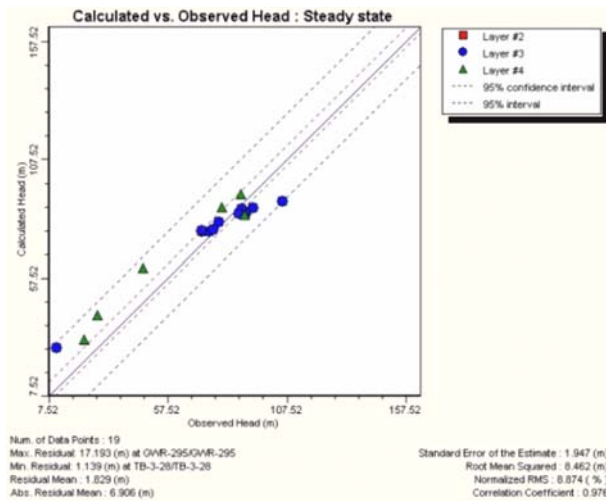


Fig. 5. Calculated and observed head at steady state conditions before tunnel construction.

변화 및 물수지 변화 정도를 판단하기 위한 비교 자료로 활용하였다.

모형 보정을 통한 현재 지하수위 상태를 정류상태 (steady state)로 모사하였다. 모델 보정은 지하수 함양에 의한 영향만을 고려하였으며, 현장에서 측정된 지하수위와 비교 분석하였다. 지하수 함양율을 100~300 mm/yr로 변화시켜 수행한 결과 120 mm/yr일 때 Normalized RMS값이 8.87%로 잘 일치하고 있다(Fig. 4~7).

지하수 유동은 금강과 그 지류인 혈저천, 왕촌천 및 마암천 등 소하천 방향으로 흐르며, 금강 부근은 급격한 지형경사를 보이고 있다. 전체적인 지하수위는 10.4~130.9 m에 분포하며 지형고도의 영향으로 남쪽은 높게 나타난다.

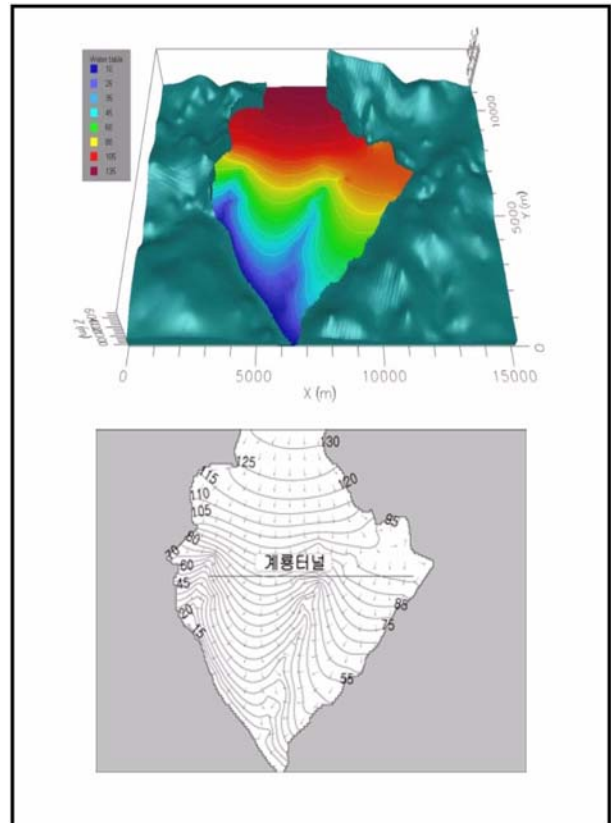


Fig. 6. Contour of groundwater level and flow at steady state in tunnel area before tunnel construction.

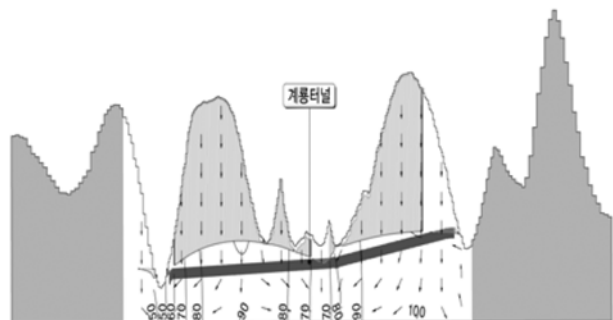


Fig. 7. Groundwater level distribution across the longitudinal section of the tunnel route before tunnel construction.

3.2. 터널굴착에 따른 부정류 모사 결과

터널굴착에 따른 지하수위 변화 및 지하수 유입량을 파악하고 이에 따른 영향을 예측하기 위해 부정류 모사를 실시하였다.

터널굴착은 10 m/day의 굴진율로 총 719일에 걸쳐 수행되는 것으로 설정하였으며, 굴착 완료 후 약 8년의 기간에 대해 부정류 모사를 실시하였다. 터널의 전도계수 (conductance)는 굴착 시 2 m²/day이며 굴착완료(방수처리) 시 0.183m²/day로 설정하였다.

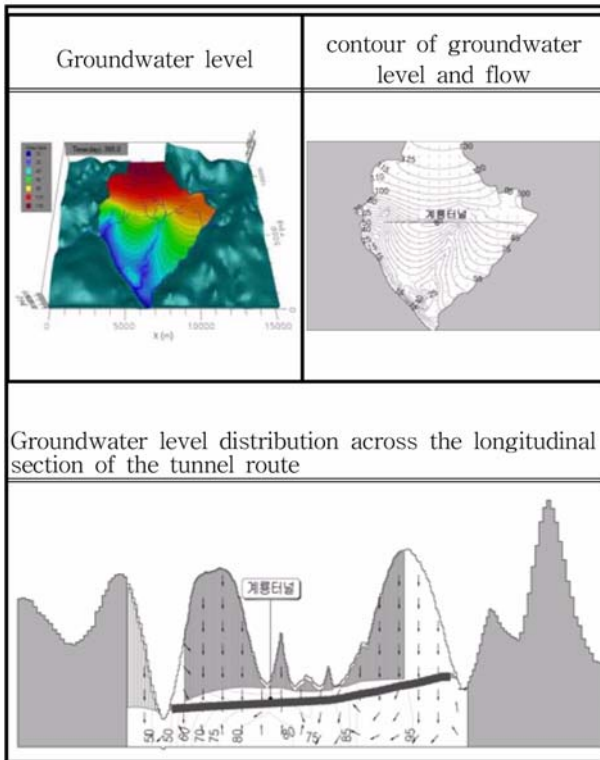


Fig. 8. Simulation of unsteady flow at 365 day after tunnel construction.

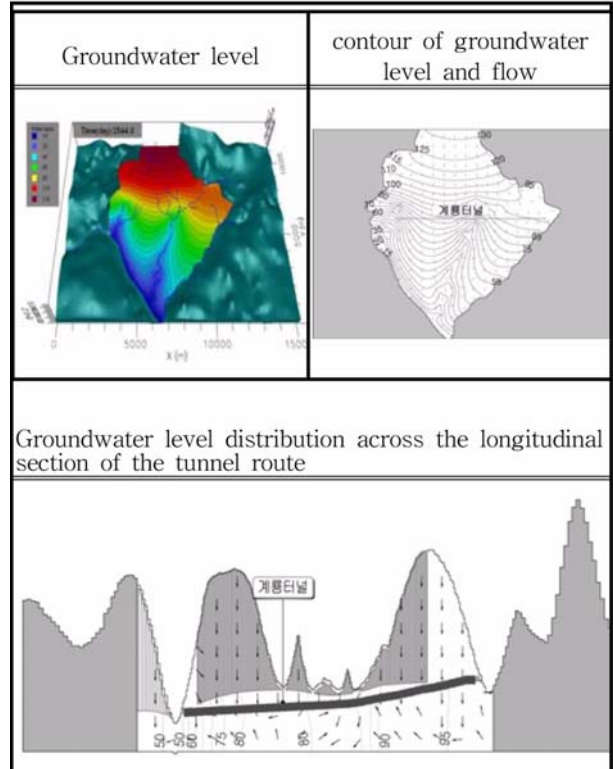


Fig. 10. Simulation of unsteady flow at 5 year after tunnel construction.

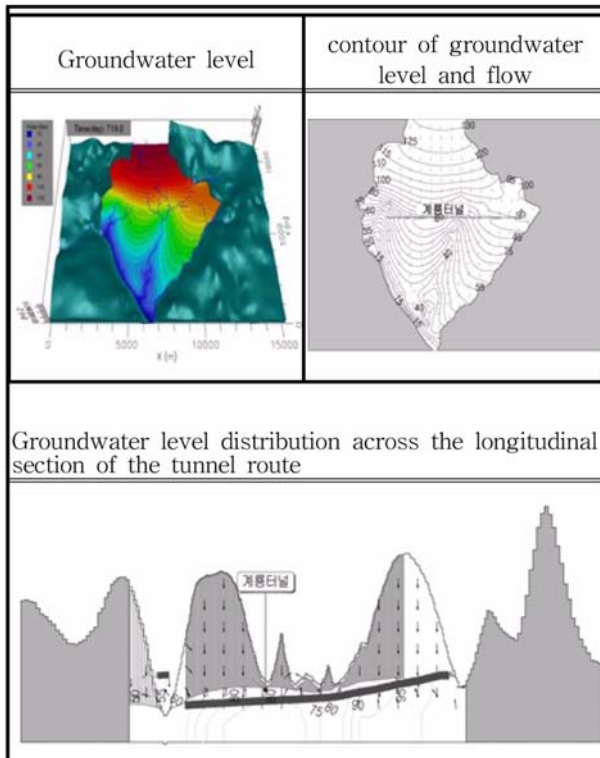


Fig. 9. Simulation of unsteady flow at 719 day after tunnel construction.

Fig. 8은 터널 굴착 개시 후 356일 경과 시점, Fig. 9는 터널 굴착 완료 시점 (719일 경과), Fig. 10은 터널 굴착 완료 후 5년 경과 시점, Fig. 11은 터널 굴착 완료 후 8년 이 지난 시점에 대한 부정류 모사 결과이다.

모델영역의 전반적인 지하수 유동은 정류상태와 유사하며 터널굴착에 따라 터널부근에서 굴착 진행방향으로 타원의 수위강하가 발생하고 있다. 터널굴착 완료 후 지하수위는 서서히 회복되는 양상을 보이나, 터널시공 후에도 터널 내로의 지속적인 지하수 유출로 인하여 초기수위에 비해 약 0.11~2.65 m의 감소를 나타내고 있다.

3.3 터널내 유입량 검토

Fig. 12는 터널 내 지하수 유입량을 시계열로 표시한 결과그래프이다. 숏크리트와 라이닝 설치 전 각 터널의 단위길이당 지하수 유입량은 초기에 0.636 m³/min/km에서 270일 경과 후 0.896 m³/min/km으로 증가하였다가 터널 굴착 완료시기인 719일이 경과하였을 때 0.672 m³min⁻¹ km⁻¹로 감소한다. 굴착 완료와 동시에 터널 전 구간에 숏크리트와 라이닝을 설치한 경우 각 터널의 단위길이당 지하수 유입량은 8년 경과 후 0.085 m³/min/km로 차수그라우팅의 효과는 91%에 해당한다.

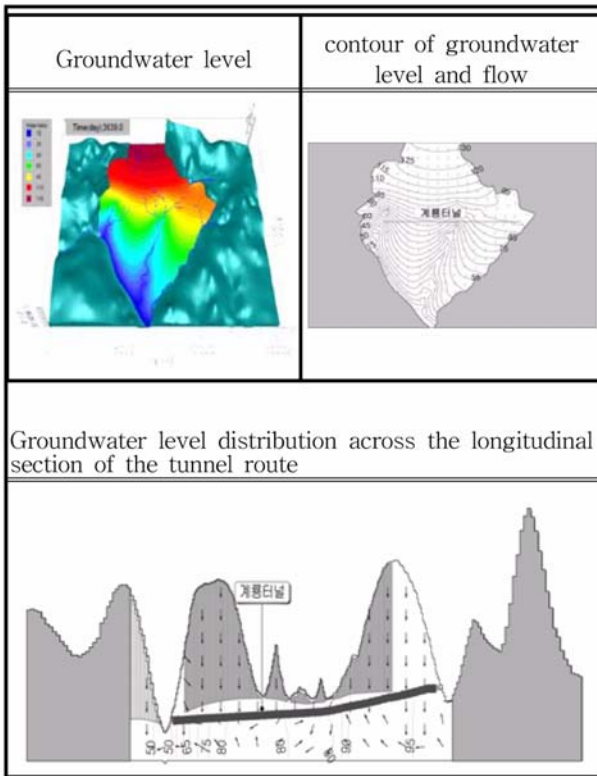


Fig. 11. Simulation of unsteady flow at 8 year after tunnel construction.

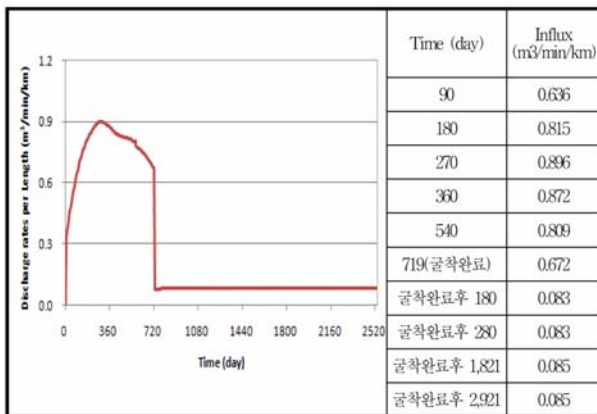


Fig. 12. Groundwater influx into tunnel per unit length of tunnel.

3.4. 지하수위 변화분석

계룡터널 노선을 따라 지하수환경영향평가 검토구간을 대상으로 Fig. 13과 같이 대표 가장 관측정을 설치하여 경시별 지하수위 변화 모사하였다. 터널 굴착부터 굴착 완료, 굴착완료와 동시에 터널 전 구간에 숏크리트 및 라이닝 설치를 실시하는 것으로 가정하여 터널굴착 후 8년 까지 지하수위 변화 모사한 결과, 계룡터널 노선 전 구간의 지하수위 강하는 터널굴착개시부터 터널굴착 완료 시

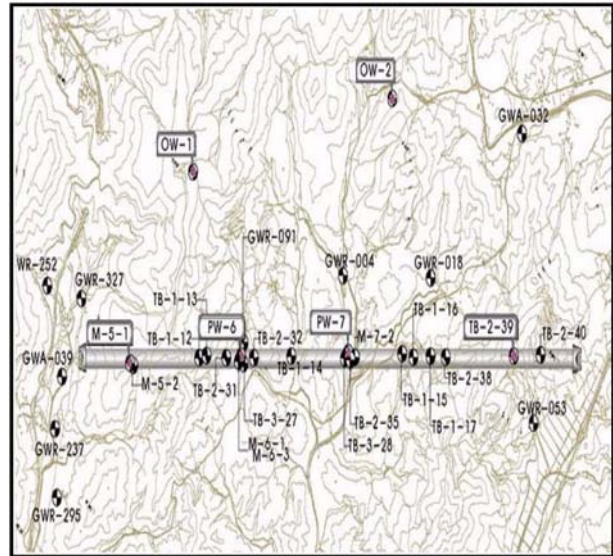


Fig. 13. Points of observation wells in modeling.

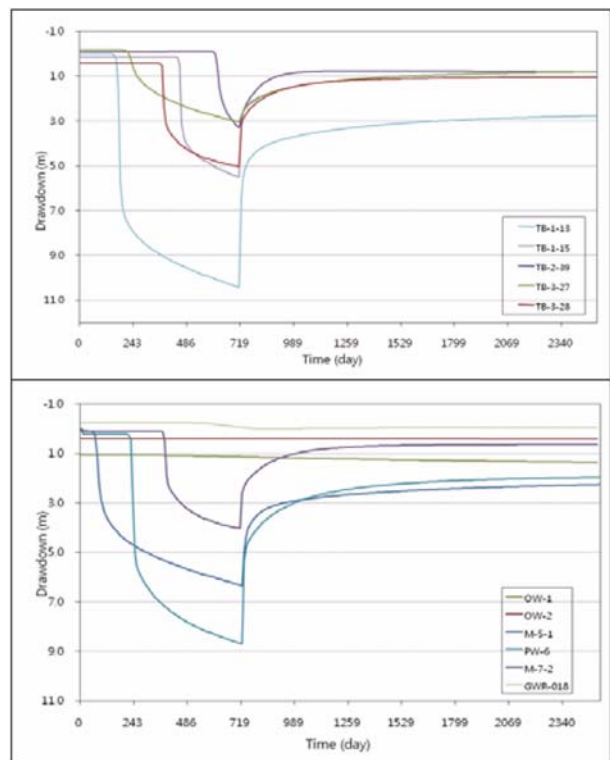


Fig. 14. Groundwater level-down at observation wells after tunnel construction.

점인 719일 까지는 지하수위가 급격히 하강하였으나, 터널 전 구간에 숏크리트와 라이닝을 설치한 후부터 300일 까지 지하수위가 급격히 상승하였고, 이후부터 수위강하가 평형상태를 유지되었다 (Fig. 14)

PW-5 지역의 M5-1와 M5-2의 최대 수위강하는 터널굴

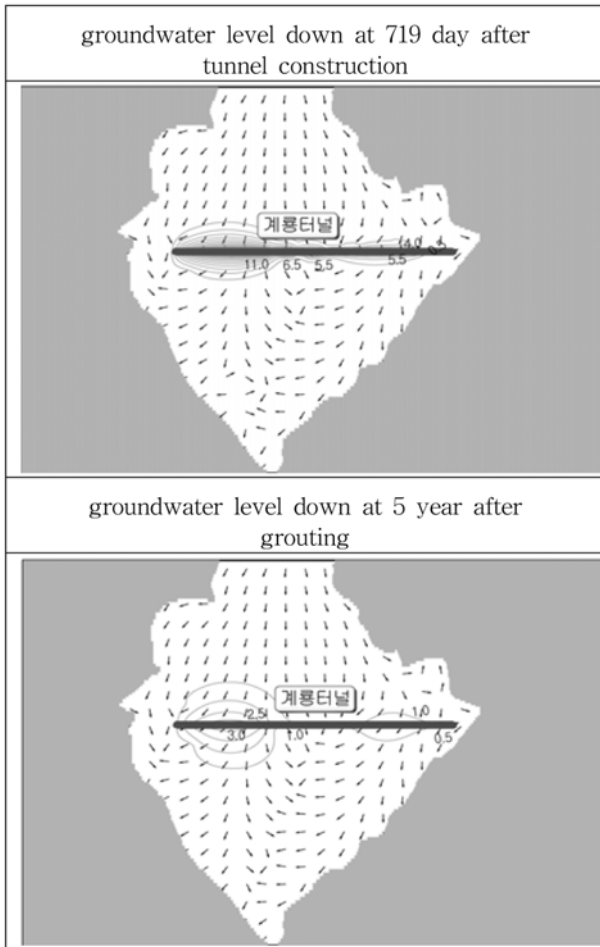


Fig. 15. Radius of influence of tunnel construction on groundwater level down.

착 완료 시점(719일)에 각각 6.34 m와 6.18 m 발생하였으며, PW-6 지역의 PW-6, M6-1, M6-3 및 TB3-27의 최대 수위강하는 각각 8.70 m, 8.59 m, 5.59 m 및 3.04 m 발생하였다. PW-7 지역의 PW-7, M7-2 및 TB3-28의 최대 수위강하는 각각 4.12 m, 4.04 m 및 6.48 m 발생하였고, 기산리 지역의 TB2-39의 최대 수위강하는 3.30 m 발생하였다. 전반적으로 계룡터널 노선구간은 약 3.04~10.71 m의 지하수위강하가 발생하였다.

3.5 터널굴착에 의한 지하수위강하 (영향반경)

지하수위 강하는 굴착 완료 후(방수공사 전) 최대 10.71 m 발생하였으며, 출구부 지역에서는 4.15 m 발생하였다(Fig. 15). 터널굴착에 따른 지하수위 강하 영향범위는 왕촌천을 기준으로 공사 전반부에 터널에서 약 1,160 m까지 나타났으며, 공사 후반부에서는 403 m의 영향범위를 보인다. 방수공사 후 8년 경과된 시점에서의 지

Table 2. Maximum level-down and influx of groundwater at each point of tunnel

Tunnel points	Max. level down (m)	Max. influx(m ³ /min/km)
PW-5	6.34	• During constuction period : 0.636~0.896 • After groputing : 0.083~0.085
Gyeryong- PW-6	8.70	
tunnel PW-7	4.12	
기산리	3.30	

하수위 강하량 및 영향반경은 각각 2.65 m, 1,245 m로 나타나며, 이는 지속적인 지하수 유출이 발생하여 나타나는 것으로 판단된다. 이때, 영향반경은 수위강하량 0.5 m를 기준으로 산정하였다.

4. 결 론

지하수 유동모델링 결과 터널굴착에 따른 지하수의 유출 및 지하수위 강하가 발생하며 터널굴착 완료 후에 지하수위가 회복되는 양상을 보인다.

계룡터널 구간은 대체적으로 고비저항대가 분포하는 양질의 암반이 분포할 것으로 예상되나 PW-5지역의 소규모 단층 F4, PW-6 지역의 L17, L17-1 선구조와 300~600·m의 저비저항대가 발달되어 있고, 모델링 결과 공사 중 계룡터널 내 최대 지하수 유입량은 0.896 m³/min/km이고, 숯크리트 설치 후 0.083 m³/min/km로 감소한다 (Table 2)

구간에 분포하는 연약구간에 대해서는 감시공에서의 용수량이 0.04 m³/min/km을 초과할 경우 방수 2, 3등급 기준에 의거 특수 그라우팅을 기본설계에 반영해야 할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 환경부의 “토양지하수정화관리 환경기술교육 혁신지원사업단”의 지원을 받은 과제입니다.

참 고 문 헌

건설교통부, 2002, 환경친화적인 도로설계기법 연구(1단계).
 고태영, 문현구, 2001, 절리 암반의 등가수리 전도도와 터널 내 지하수 유입량 예측에 관한 3차원 연구, 대한지질학회, 춘계학술 발표회 논문집, p. 175-180.
 대우건설, 2004, 태백선 제천~입석리간 복선 전철 건설사업 환경영향평가서.

동부건설, 2004, 신북~북산(배후령)국도개량공사 환경영향평가서.

문상기, 우남철, 2002, 수리지질학적 변수들의 지하수 함양률에 대한 기여도 평가, 자원환경지질, 35(5), 479-490.

성익환, 이병대, 조병욱, 이봉주, 김통권, 이병주, 채병곤, 김경수, 김중렬, 현혜자, 이종철, 김복철, 이동우, 김원영, 1998, 영천댐 도수터널 공사지역 지하수 유동조사, 한국자원연구소, 419.

이병대, 2001, 영천댐 두수로터널 굴착과 관련된 수리지질학적 특성연구, 부산대학교 대학원 이학박사 학위논문.

이수재, 최준규, 최상기, 이희선, 정홍락, 이관규, 강영현, 서성철, 2004, 도로 건설사업의 환경영향예측과 사후모니터링 비교 분석, 한국환경정책·평가연구원

이영준, 이현우, 박영민, 이정호, 유현석, 이영수, 최진권, 윤미경, 2004, 철도건설사업의 주요환경영향에 관한 연구, 한국환경정책·평가연구원

이인모, 김용진, 이명재, 남석우, 1993, 지하수를 고려한 터널 설계 및 막장의 안정성 검토, 대한토목학회, 학술발표회 개요집(1),

p. 607-610.

이정호, 이영준, 이수재, 2005, 터널로 인한 지하수 영향 저감방안 연구, 한국환경정책·평가연구원, p. 50-58.

이종운, 김선준, 전용원, 1996, 영천 도수터널 주변 지하수의 수리지구화학, 한국자원공학회, 33(4), 211-225.

정현영, 송무영, 이경주, 2001, 지하석유비축기지 주변의 지하수 개발에 의한 수리지질학적 영향의 수치해석연구, 지질공학, 11(1), 37-50.

조병욱, 성익환, 이병재, 추창오, 김통권, 이인호, 최경국, 김정숙, 1999, 터널내 구간별 지하수 유입량 산정방법: 유속계의 이용, 지원환경지질, 32(6), 661-667.

철도청, 2000, 경구고속철도 8-1공구 상촌터널 주변계곡의 수량 감소 원인조사 연구, 한국자원연구소.

태영건설, 2006, 대구 민자 고속도로 건설사업 환경영향평가서 한국고속철도건설공단, 1995, 고속철도 환경소음기준 및 진동기준에 대한연구.