

철도건설사업시 터널지하수 유출에 관한 환경영향평가 사례 연구

Case Study of Environmental Impact Assessment about Groundwater Outflow during Railroad Tunnel Construction

이정호* 유현석** 이영수** 박창석*
Lee, Jeongho Yoo, Heonseok Lee, Young Soo Park, Chang Sug

ABSTRACT

It is recently reported that the importance of environmental impact assessment(EIA) about groundwater outflow problems is being raised in the case of tunnel excavation during railroad construction. The EIA about groundwater outflow into railroad tunnel is generally performed using the results of numerical analysis embodied through groundwater flow modeling program like MODFLOW. The basic data for this modeling include (1) the geological and hydrogeological investigation data along the planned block of tunnel excavation, (2) total amount of outflowed groundwater during tunnel excavation, and (3) the status of groundwater level fluctuation in the water-supply wells distributed in the planned block of tunnel excavation. In this study, the authors analyzed the cases of the computational modeling about groundwater outflow in three planned blocks of railroad tunnel, and suggest the environmental impact factors and mitigation plan during EIA of tunnel excavation in railroad construction.

1. 서론

국내 환경영향평가 실시의 근거가 되는 환경·교통·재해등에관한영향평가법 및 동법 시행령의 규정에 의하면, 철도법, 도시철도법 및 고속철도건설촉진법상에 명시된 모든 철도건설사업 중 총길이 1km 이상인 경우에 있어서는 사업계획 또는 실시계획 승인 이전에 철도건설 공사 및 운영시 발생할 수 있는 모든 환경적 영향에 관하여 환경영향평가를 실시하게 되어 있다. 그간 시행되어 왔던 철도사업 관련 환경영향평가에서는 철도교량 및 구조물 공사시 수질환경 악화 및 소음·진동 영향, 철도차량 운행시 대기질 악화 등이 주요 평가 대상이었으나, 최근에는 상기와 같은 기본적 평가항목에 더불어 계획노선 구간 내의 생태환경적 변화, 역사 및 정비창 운영시 토양오염, 터널 굴착시 지하수 유출 등 다양한 분야의 항목들이 영향평가의 대상으로 포함되고 있는 실정이며, 그의 중요성은 갈수록 증가하고 있다.

* 이정호 한국환경정책평가연구원 책임연구원

** 유현석 한국환경정책평가연구원 연구위원

** 이영수 한국환경정책평가연구원 연구위원

* 박창석 한국환경정책평가연구원 책임연구원

특히 철도터널 굴착에 따른 지하수 유출 및 그로 인한 주변 환경 영향에 대한 평가는, 그 범위 및 수행 방법, 수행 결과에 대한 판단 결정이 비교적 명확히 이루어지는 평가 항목이므로, 2003년 이후 실시된 철도건설사업 환경영향평가 전반에 걸쳐 터널지하수 유출에 대한 영향평가가 수행되고 있는 실정이다.

터널 굴착에 따른 지하수 유출에 관한 국외 연구는 1960년대 말 이후부터 북유럽 및 일본의 도로터널, 에너지 저장용 또는 방사능폐기물 처분용 터널 등의 굴착 사례 등을 비롯하여 다수의 연구가 현재까지 진행되고 있으나, 주로 대수층-터널 구간의 지하수 유동 메카니즘 규명 및 지하수의 터널 내 유출 방지를 위한 최적의 공학적 설계공법 제시 등이 주된 연구 결과이며, 철도건설사업 지하수 환경영향평가 및 의사 결정에 관련된 연구 보고 및 문헌자료는 거의 찾아보기 힘든 실정이다. 국내의 경우, 고속철도의 도입 및 초장대터널 굴착, 그로 인한 다양한 환경영향이 관심의 대상이 되고 있으며, 터널지하수 유출로 인한 고산 습지 생태환경 영향성 등은 이미 사회적으로 논란의 대상이 된 적이 있으므로, 향후 이러한 분야에 대한 환경과학적 연구 성과 및 환경평가 측면에서의 개선점 등은 크게 증가할 것으로 사료된다.

본 논문에서는 터널 굴착과 그에 따른 지하수의 터널 내 유출, 또 그로 인한 주변 지역 지하수 환경의 영향에 관한 평가 방법(지하수유동모델링) 및 결과 분석 과정, 실제 평가 사례 등을 소개하고, 각 평가 사례의 예측 결과에 따른 최종 환경영향 유무 의사결정 및 환경영향 저감을 위한 저감방안, 향후 철도터널 관련 지하수 환경영향평가에 관한 전망 및 대책을 제시하고자 한다

2. 본 론

2.1 평가대상지역 및 모델링 프로세스

본 논문에서 적용된 평가 사례는, 2003년도에 실시된 전라선 성산~여천 구간 철도개량사업(총 길이 23.5km)과 전라선 여천~여수 구간 철도개량사업(총 길이 10.28km) 내 계획된 6개소의 터널에 정구간 중 3개소의 터널에 대한 지하수 유출 해석 결과에 관한 것이며, 각 터널의 연장 및 위치, 본 포지질 등의 정보는 도표 1에 수록하였다.

도표 1. 3개소 터널 계획 구간에 관한 기본 개요

| 구분 | 해룡터널 | 발흥터널 | 마래터널 |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| 위 치(시점부) | 익기[현]155km560 | 익기[현]158km366 | 익기[현]181km660 |
| 연장(km) | 2,379 | 1,414 | 1,923 |
| 굴착공법 | NATM | NATM | NATM |
| 지하수 유출량 (m ³ /min) | 1.97 | 1.17 | 1.60 |
| 지 질 | 백악기 응회암류 화산쇄설성 퇴적암 | 백악기 응회암류 화산쇄설성 퇴적암 | 안산암류 |

현재 터널지하수 유출에 관한 환경영향은 해당 터널 및 터널 인근 배수구역을 포함한 지역에 대한 지하수유동모델링을 수행하여, 그 결과를 분석한 후, 터널 굴착으로 인해 주변에 분포하는 가용 지하수 관정의 지하수위 저하에 미치는 영향 정도를 판단하는 것으로 그 수행절차가 이루어지고 있다. 따라서, 평가대상이 되는 터널 주변에 생활용 또는 농업용 관정의 분포 및 사용 현황, 지하수위 등의 기본 정보는 필수적으로 갖추어져 있어야 하며, 터널 중심부를 기준으로 300m 이내에 이격된

지하수 관정의 지하수위 영향을 중심으로 평가한다.

영향평가를 위한 지하수유동모델링에는 이론의 과학적 타당성과 현장 적용성이 높은 것으로 인정되어 일반 지하수 전문 연구기관은 물론 미국 지질조사소(United States Geological Survey)에서도 가장 활용도가 높은 MODFLOW를 사용하였다. 지하수유동모델링은 대수층의 지질학적 조건과 지하수의 흐름 등의 자연상태를 수식으로 표현하고 수치해석을 통해 결과를 산출하는 것으로서, 입력자료의 정확도에 따라 그 분석결과의 신뢰성이 좌우되므로, 현장조사에서 얻어지는 모든 정확한 분석과 입력, 이에 대한 검증이 필수적이다.

모델 구축을 위해 먼저 해당 터널 및 인근 실제 대수층의 유역경계와 지하수 수문사의 대규모 경계조건을 파악하고, 현장시험 등을 통하여 얻은 대수층 수리상수(수리전도도, 저류계수 등)와 기타 토양자료, 기상자료, 터널 유출량 등의 조사자료들을 검토하고 종합하여 수학적 모델로서 현장의 대수층을 그대로 묘사할 수 있도록 프로그램에 현장자료를 입력한다. 본 논문에서 수행된 3개소의 터널 및 주변 대수층 지하수유동모델링에 필요한 입력자료는 도표 2에 수록하였다.

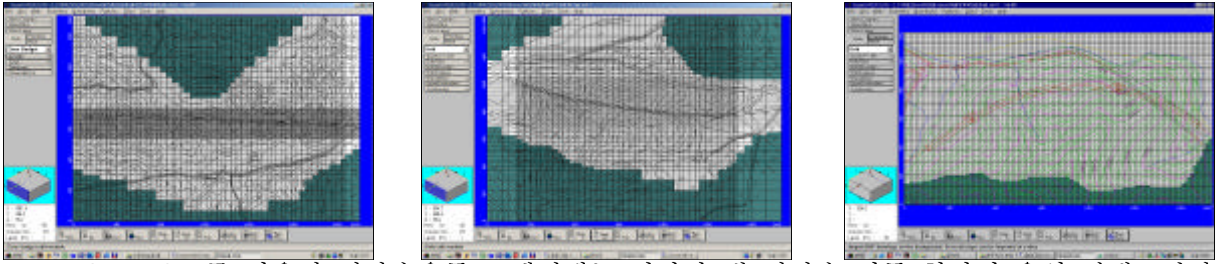
도표 2. MODFLOW 모델링에 적용된 각종 입력자료

| 입력인자 | 해룡터널 | 발흥터널 | 마래터널 |
|-------------------|--|-----------------------|--|
| 대수층의 형태 | 자유면대수층 1층구조 | | |
| 초기수위 | 굴착 전 각 시추공에서 측정한 수두를 이용하여 작도한 PM map의 수위 | | |
| 수리전도도 (cm/sec) | 1.08×10^{-4} | 1.08×10^{-4} | $1.07 \times 10^{-5} \sim 9.76 \times 10^{-7}$ |
| 저류계수 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| 증발산량 (mm/year) | 422.3 | 422.3 | 503.6 |
| 함양량 (mm/year) | 211.1 | 211.1 | 126.9 |
| 공극률 | 0.3 | 0.3 | 0.1 |

2.2 모델링 수행 결과

현장 주변 지역을 포함하여 터널 구간을 중심으로 격자의 수를 설정하였으며, 터널 통과구간의 격자는 세립격자로 다시 구분하여 격자를 구성하여 그림 1에 도시된 바와 같이 계획노선 내 모델링 적용 대상인 3개소의 터널별 격자망 구성을 나타내었다. 모델링 적용구간 내에서 집수유역을 벗어나는 지역은 지하수 유동에 직접적인 영향을 미치지 않으므로 지표수 분수령으로 Inactive Cell로 지정하였으며, 유역내의 격자는 Active Cell로 지정하였다.

그림 2. 지하수유동모델링을 위한 격자망도(왼쪽부터 해룡터널, 발흥터널, 마래터널의 격자망도)



MODFLOW를 이용한 지하수유동 모델링에는 격자망 내 지하수 이동 현상이 유역 경계조건과 평형을 형성하여, 완전히 안정화된 시점에 도달한 경우를 구현하는 정류상태(Steady-State) 흐름 모델링과 일정한 시간간격을 두고 지하수 흐름의 변화를 계산하는 부정류상태(Transient State) 흐름 모델링으로 구분된다. 본 논문에서는 지하수의 터널 유출과 대수층 내 흐름을 비평형상태로 가정하고, 터널 굴착 전후 일정 시점을 기준으로 지하수 유동을 예측하는 부정류상태 모델링을 실시하였다. 모델링 수행 후 산출된 터널 굴착 전후의 지하수 유동 등수위선 분포는 그림 2 및 그림 3에 도시하였다

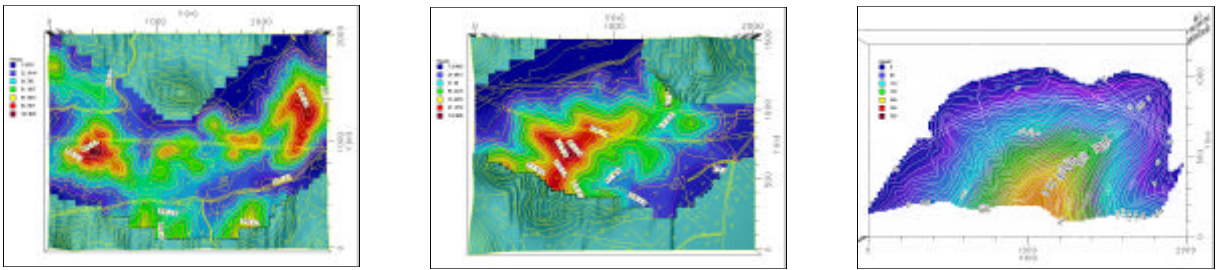


그림 2. 터널굴착 전 지하수 유동 등수위선도(왼쪽부터 해룡터널, 발흥터널, 마래터널 순)

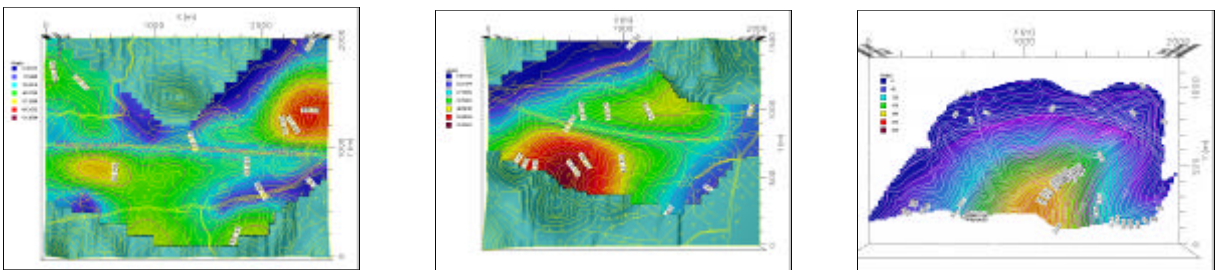


그림 3. 터널굴착 후 지하수 유동 등수위선도(왼쪽부터 해룡터널, 발흥터널, 마래터널 순)

그림 2와 3을 비교해서 볼 때, 해룡터널 및 발흥터널 구간에서는 터널 굴착 전의 경우, 지하수 흐름 분포는 모델 적용 구간의 지형 분포와 매우 유사하며 구간 내 최고 지하수위는 103~119m(EL)의 분포를 나타냄을 알 수 있다. 그러나 터널 굴착 후 계획구간 횡단면을 따라서 지하수위가 급격하게 하강하여 최대 18~53m의 지하수위 하강 현상이 예측되어, 본 구간 내 포함된 지하수 관정의 지하수위에 영향을 주는 것으로 판단된다. 그러나 마래터널 구간의 경우, 터널굴착 전-후를 비교하여 지하수위 강하량은 최소 0.2m에서 최대 5.2m로 예측되어, 터널 굴착 및 지하수 유출로 인한 주변관정의 영향은 거의 없는 것으로 판단된다. 각 터널 3개소의 시점부, 중앙부, 종점부에 대한 지하수위 강하량 예측결과를 도표 3에 정리하였다.

상기와 같은 모델링 결과에서 터널 굴착에 의한 지하수위 강하량은 각 계획터널 구간의 수리지질학적 인자의 차이에 의해서 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 마래터널 구간의 경우, 다른 2개소의 터널과 지질학적인 조건이 상이하다. 마래터널 구간의 구성암석인 안산암류는 치밀하고 선구조 발달이 일반적으로 미약하기 때문에, 터널 굴착시 암반균열 연결성에 따른 지하수 유출 가능성은 타

2개소 터널 구성암체에 비해 통계적으로 적은 편에 속한다. 또한, 대수층의 성질을 대표하는 수리전도도 및 공극률의 크기는 타 2개소의 터널구간에 비해 수리전도도의 경우 약 10~100배, 공극률의 경우 3배 정도 작은 값을 갖는다. 이는 터널 굴착으로 인하여 터널 공동의 수두가 급격히 하강하면, 대수층 내 지하수 유속이 10배 이상 빠르고 수분을 함유할 수 있는 공극이 3배 이상 높은 2개소의 터널에서 지하수의 유출이 훨씬 높게 나타날 수 있음을 증명한다.

도표 3. 조사공의 모델링 시뮬레이션에 의한 수위강하량

| 구 분 | 계획고 (EL.m) | 지하수위 | | | |
|------|------------|--------------|--------------|-----------|---------|
| | | 터널 굴착전(EL.m) | 터널 굴착후(EL.m) | 수위 강하량(m) | |
| 해룡터널 | 시 점 | 15 | 27~37 | 24~27 | 3~10 |
| | 중 앙 | 18 | 35~46 | 26~28 | 9~18 |
| | 종 점 | 22 | 28~35 | 25~28 | 3~7 |
| 발흥터널 | 시 점 | 23 | 28~40 | 26~32 | 2~8 |
| | 중 앙 | 21 | 79~87 | 30~34 | 49~53 |
| | 종 점 | 18 | 27~35 | 25~29 | 2~6 |
| 마래터널 | 시 점 | 20 | 23~27 | 20~25 | 0.2~1.7 |
| | 중 앙 | 20 | 68~75 | 63~72 | 1.8~4.8 |
| | 종 점 | 20 | 50~80 | 44~75 | 1.1~5.2 |

3. 결 론

철도터널 굴착과 터널지하수 유출에 따른 지하수 환경평가 모델링 결과, 2개소의 터널 주변 일부 구간에서 급격한 지하수위 하강이 예측되어, 터널예정구간에서 300m 이내에 위치한 가용 지하수 관정의 경우 용수 공급 및 사용에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 저감방안으로는, 우선 터널계획구간 주변 300m 이내의 지하수 관정의 1일 이용량 및 관정 규모를 조사한 뒤, 10m 이상의 지하수위 하강이 예측되는 관정에 대해서는 대체 용수공급원(상수도 또는 지하수위 하강 영향반경 외가부의 신규 관정 설치)을 확보하도록 하고, 실제 터널 굴착시 터널 유출량 및 주변 관정의 지하수위의 지속적인 모니터링을 실시하도록 한다.

현행법상 터널 굴착 또는 기타 건설사업으로 인한 지하수 수자원 이용 영향에 관한 특별한 환경 기준은 아직 설정되지 못한 상황이므로, 철도터널 굴착과 관련된 지하수 환경의 영향평가는 해당 건설사업 개개의 경우에 따라 적용되는 기준이 달라질 수 있는 게 현 실정이다. 차후, 철도터널 굴착으로 인한 지하수 유출 평가 사례 자료가 축적되고, 그에 대한 집중적인 연구 및 평가에 필요한 모델링 기법이 발전하면, 향후 모든 철도사업에 범용으로 적용할 수 있는 평가기준이 설정될 것으로 전망되며, 이에 대한 연구도 지속적으로 이루어져야 한다.

참고문헌

1. 환경부(2001), 환경·교통·재해등에관한영향평가법
2. 환경부(1997), 환경영향평가서 검토편람
3. 환경부(2001), 환경영향평가 관련 규정집(고시·훈령·예규 등)
4. 송영일 등(2002), 사전환경성검토제도의 개선방안, 한국환경정책·평가연구원
5. 철도청(2003), 전라선 성산~여천간 철도개량 환경영향평가서
6. 철도청(2003) 전라선 여천~여수간 철도개량 환경영향평가서
7. Molinero, J., Samper, J., and Juanes, R.(2002), Numerical modeling of the transient

hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks, *Engineering Geology*, Vol.64, pp.369–386