

천부 터널 굴착에 따른 지하수 유동체계 변화 모사 - 현장직용사례

차장환, 나한나, 구민호

공주대학교 지질환경과학과

(e-mail: hydro@kongju.ac.kr)

요 약 문

Visual MODFLOW를 이용하여 서울지하철 7호선 706공구에 계획된 터널 굴착에 따른 지하수 유동체계의 변화를 모사하였다. 경계조건은 모델 영역 내 하천(굴포천)의 경우 일정수두경계, 터널 굴착 구간은 경우 $0.39 \sim 0.58 \text{ m}^2/\text{day}$ 의 전도계수를 갖는 배수경계(Drain), 터널 개착구간은 Inactive cell이 존재하는 일정수두경계 조건으로 설정하였다. 모델 보정은 현장시험을 통해 구해진 수리상수는 일정하게 유지하고 함양률을 변화시키면서 실시하였으며, 정류모사를 반복 수행하여 최적의 함양률($150 \text{ mm}/\text{yr}$)을 결정하였다. 모사 결과 터널 구간으로의 지하수 유입량은 굴착 및 개착 완료 시 $623 \text{ m}^3/\text{day}$, 터널 완공 후 정류상태의 경우 $584 \text{ m}^3/\text{day}$ 인 것으로 나타났다. Zone Budget을 이용한 유출입량 분석 결과 정류 상태 시 터널 내로 유입되는 지하수의 69%는 터널 인근 하천수의 유입에 기인하며, 나머지 31%는 주변 지역에서 함양된 지하수에 의한 것으로 나타났다.

Key word : 수리전도도, 정류모사, 함양률, 배수경계, 유입량

1. 서 론

도로 및 철도 신설에 따른 터널 굴착으로 지하수가 유출될 경우 지하수 자원 고갈, 농업·생활용수 부족 및 지표수 유량의 변화 등이 예상된다. 이러한 터널굴착에 따른 지하수계의 변화를 예측하는데 있어 3차원 유한차분 모형인 MODFLOW가 가장 널리 이용되고 있다. 지하수 유동 모델링에 있어 대상 지역에 대한 개념 모델 설계가 중요하며, 이 개념 모델 설계를 위해서는 유역면적, 유역경계조건, 수리전도도, 함양률 및 대수층 구조 등의 여러 가지 요소들을 실제와 유사하게 선정하여야 한다. 본 연구의 목적은 천부 풍화대에 굴착되는 터널 시공 지역을 대상으로 지하수 모델링을 수행하여 터널 굴착으로 인한 지하수계의 변화를 예측함으로써 터널 설계 시 기초 자료로 활용하는데 있다.

2. 모델 개요

2.1 연구지역

본 연구지역은 서울지하철 7호선 706공구 지역으로 점토층, 사질토, 풍화토, 풍화암, 연암, 보통암 및 경암의 지층 분포를 보이고 있다. 지표면의 표고는 $107.4 \sim 110.2 \text{ m}$ 로 대체로 평탄하고, 지하수면은 $105.8 \sim 108.4 \text{ m}$ 로 지표면 아래 3m 내외에 위치한다. 연구지역 대수층의 수리전도도

는 $2.80 \times 10^{-6} \sim 7.50 \times 10^{-4}$ cm/sec의 값을 보인다. 연구지역은 4개의 층으로 나누었으며 동일한 층에서 암종의 변화가 있는 경우 암종의 두께를 고려한 수리전도도 값을 입력하였다.

2.2 모델 영역

모델 영역은 $2,150 \times 1,190 \times 41$ m로 격자망은 52행, 108열, 4층으로 총 22,464개의 격자 블록으로 구성하였다(그림 1). 격자망 설정 시 터널 굴착 구간에 대해서 실제 터널의 크기에 일치하도록 행과 열의 격자 간격은 터널 너비에 해당하는 10 m로, 층의 격자 간격은 터널의 높이를 고려한 9 m로 설정하였다. 터널 저면 고도가 87 m이므로 2층에 해당되며, 터널 주변 영역은 터널에서 멀어질수록 격자의 크기가 점진적으로 증가하도록 설정하였다.

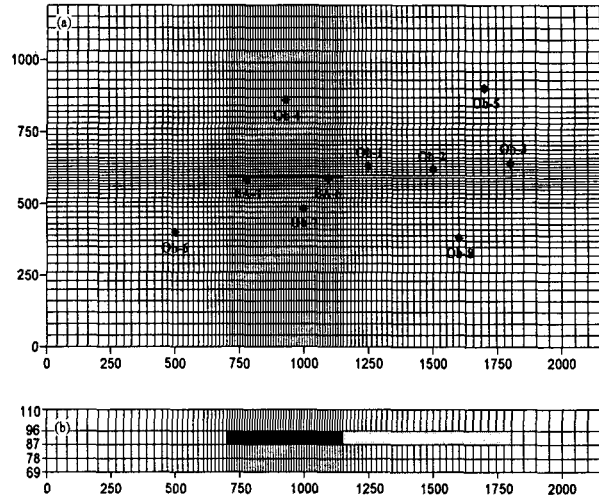


그림 1. 모사 영역 : (a) 터널, 관측점의 위치와 행·열의 격자망, (b) 층격자망.

2.3 경계조건

모델의 경계조건은 터널 굴착(0 ~ 450 m) 구간의 경우 Visual MODFLOW의 Drain Package를 이용하였고, 터널 개착(450 ~ 1,105 m) 구간은 일정수두경계로 설정하였다. 터널 굴착은 상반 링컷, 하반 분할굴착 및 상, 하반 굴착으로 시공하며, 강관우레탄 그라우팅 보조공법 및 강판단우레탄 그라우팅 보조공법으로 설계하였다. 또한 각 구간의 차수는 1.0×10^{-5} cm/sec의 투수성을 갖는 차수그라우팅을 실시할 예정이다. 터널 굴착구간의 굴진 속도는 1.5 m/day로 450 m의 길이를 300일 동안 실시하며 보강재의 두께는 약 2.1 m 이다. Drain Package의 입력 상수인 전도계수는 구간별로 0.39 ~ 0.58 m²/day를 이용하였다. 터널 개착구간은 1.8 m/day의 굴진속도로 655 m의 길이를 365일 동안 시공하며, 개착구간 주변은 CIP(Cast In concrete Pile)를 설치하여 Inactive cell로 처리하였다. 연구지역 내 존재하는 굴포천은 하천수위를 고려한 일정수두경계로 설정하였다.

2.4 모델 보정

함양률, 경계조건 및 수리전도도는 지하수 유동모델의 결과에 가장 큰 영향을 미치는 인자이다. 본 모델은 현장시험에 의해 얻어진 수리전도도, 비저유계수 및 비산출률 등의 입력변수를 일정하게 고정시키고, 함양률 변화에 따른 정류모사의 반복 수행으로 터널 시공 전의 지하수 유동계를 모사하였다. 최적의 함양률은 정류모사를 반복 수행하는 동안 관측점에서 측정된 지하수위와 모사 후 계산된 지하수위를 비교하여 150 mm/yr으로 결정하였다. 또한 함양률을 전 지역에 적용하지 않고, 도심지의 특성을 고려하여 학교, 공원과 같은 녹지를 구분하여 함양지역을 따로 설정하였다.

3. 모사 결과

3.1 터널 시공 전 정류모사

터널 시공 전 실시한 정류모사 결과는 터널 시공 후 주변 지역에서 일어나는 수위 변화 정도를 판단하기 위한 비교 자료로 활용하였다. 실제 관측된 시추공의 지하수위와 모사 결과 얻어진 지하수위를 비교 분석하여 보정을 실시하였고, 터널 공사로 인한 지하수 유동을 모사하기 전에 터널

공사 주변부에 가상의 관측정을 설치하여 시간에 따른 수위변화를 분석하였다. 정류모사 결과 지하수위는 105.87 ~ 107.27 m이며 전체적인 지하수 유동방향은 굴포천이 흐르는 남서방향이다(그림 3).

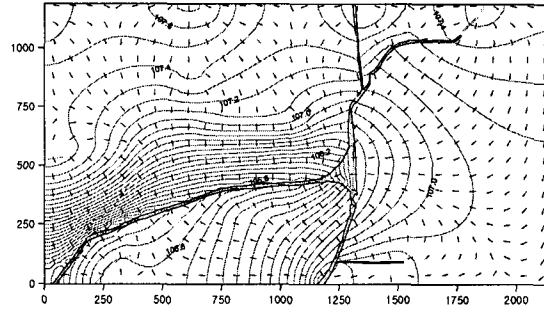


그림 3. 정류상태 모사 시 등수위선도 및 지하수 유동방향.

3.2 터널 시공에 따른 부정류모사

터널 굴착구간의 지하수 유동 체계의 변화를 분석하기 위한 Drain을 설정하였으며 300일 동안 부정류 모사를 통해 시간에 따른 수위강하를 파악하였다. 굴착 완료 후의 지하수위는 102.78 ~ 107.27 m로 분포하며(그림 4a), 수위강하량은 BA-1이 3.79 m, BA-6은 1.65 m 일어났으며(그림 4b) 터널과 110 m 이상 이격된 관측정에서의 수위강하는 1 m 이내로 나타났다.

터널 개착 구간의 부정류 모사는 일정수두경계로 설정하여 터널 시공 전 과정을 모사하였다. 그림 5a는 등수위선도, 지하수 유동방향 및 지하수면을 나타낸 것이며, 101.96 ~ 107.21 m의 지하수위 분포를 보인다. 관측정의 수위 강하는 터널 시점부의 BA-1에서 4.61 m로 가장 많이 일어났으며, 터널로부터 110m 이상 떨어져있는 OB-5에서 0.06 m로 가장 작게 발생하였다(그림 5b).

3.3 터널 시공 완료 후의 정류모사

터널 시공 완료 후 정류모사 결과 101.18 ~ 106.31 m의 지하수위 분포를 보이며 지하수 유동은 굴포천 및 터널로 유입되는 것을 알 수 있다(그림 6a). 터널 시공 전의 정류모사에서 나타난 지하수위 보다 0.52~5.39 m 지하수위 강하가 일어났으며(그림 6b), 터널 시공 후의 부정류모사와 비교하면 0.30 ~ 2.71 m의 수위강하가 발생함을 알 수 있다. 이는 터널 시공 완료 후에도 터널 내로의 지하수 유입이 발생하기 때문인 것으로 분석된다.

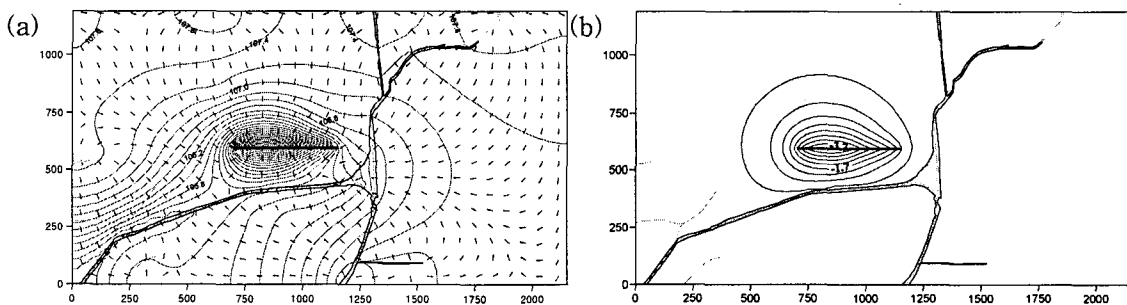


그림 4. (a) 터널 굴착 완료 후의 등수위선도, (b) 수위강하량.

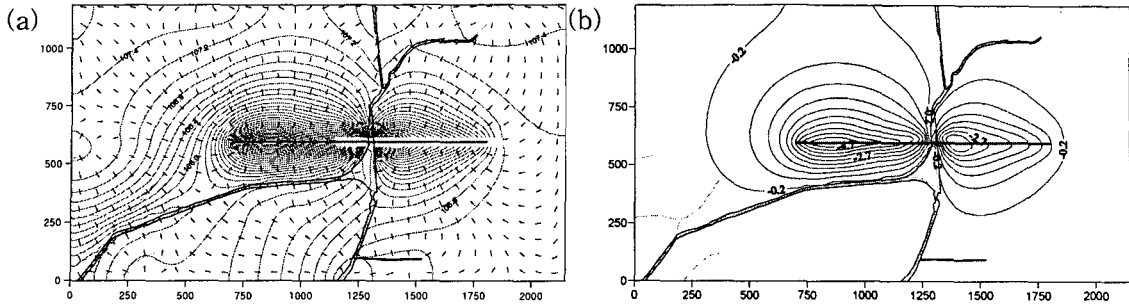


그림 5. (a) 터널 굴착 및 개착 완료 후의 등수위선도, (b) 수위강하량.

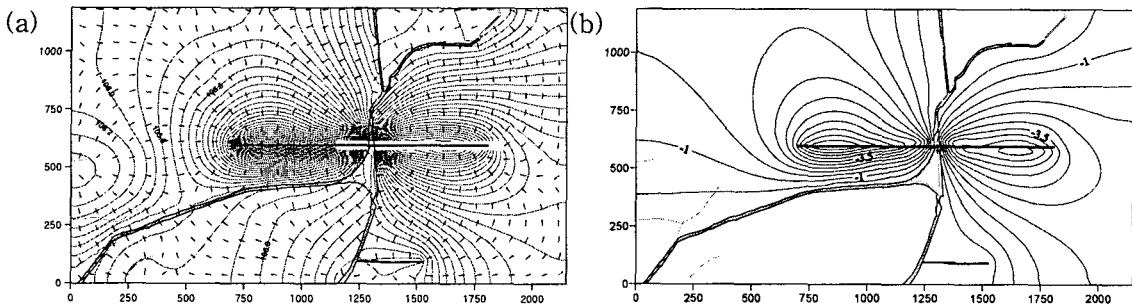


그림 6. (a) 정류모사에 의한 터널 시공 완료 후의 등수위선도, (b) 수위강하량.

3. 4 터널 시공에 따른 터널 내로의 지하수 유입량

연구지역의 지하수 유출입량은 터널 시공 전의 경우 함양에 의해 128 m³/day, 굴포천에 의해 52 m³/day가 대수층으로 유입되며, 유입된 지하수(180 m³/day)는 모두 굴포천으로 배출되는 것으로 분석되었다. 터널 시공 완료 후의 부정류모사 결과 지하수 유출입량은 함양 및 굴포천으로부터 각각 128, 539 m³/day이 대수층으로 유입되며, 유출은 굴착 구간, 개착구간 및 하천으로 각각 194, 429, 83 m³/day이 발생하였다. 즉, 623 m³/day이 터널 내로 유입되는 것으로 조사되었다(그림 7a).

터널 시공 후 정류모사 결과 함양으로 179 m³/day, 하천으로부터 405 m³/day 로 총 584 m³/day이 터널 내로 유입되며, 함양에 의해 31%, 하천에 의해 69%가 발생하는 것으로 나타났다. 터널 450 ~ 1,105 m 구간은 하천을 중심으로 지하수위 및 유입량의 차이를 보인다. 터널 굴착이 진행됨에 따라 단위길이 당 지하수 유입량은 굴착 구간의 Conductance에 따라 감소하고, 터널 680 m 부근에서 굴포천의 영향으로 증가한다. 또한 하천을 통과함에 따라 지하수위 강하 및 수두변화 폭 감소로 인해 유입량은 줄어든다.

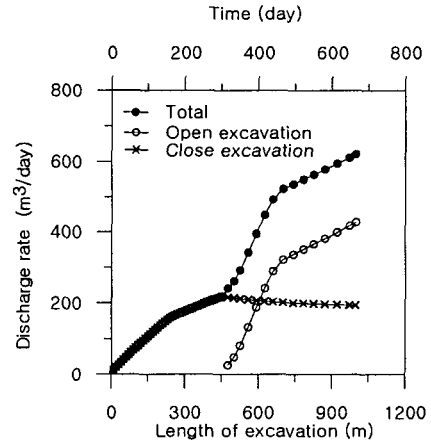


그림 7. 터널 내부로의 지하수 유입량 변화.