

## 지하철에 의한 서울특별시 광역 지하수 유동 특성

신에스더<sup>1</sup> · 김형수<sup>1</sup> · 하규철<sup>2</sup> · 윤희성<sup>2</sup> · 이은희<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>중원대학교 신재생에너지학과

<sup>2</sup>한국지질자원연구원 지구환경본부 지하수연구실

## Regional Groundwater Flow Characteristics due to the Subway System in Seoul, Korea

Esther Shin<sup>1</sup> · Hyoung-Soo Kim<sup>1</sup> · Kyoochul Ha<sup>2</sup> · Heesung Yoon<sup>2</sup> · Eunhee Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Renewable Energy, Jungwon University

<sup>2</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

### ABSTRACT

Hydrogeologic environment of the Mega City such as Seoul, suffers from rapid changes caused by urbanization, construction of underground subway or buildings, and contaminant loading by diverse anthropogenic activities. Understanding the present condition of groundwater environment and water budget is necessary to prevent natural and man-made disasters and to prepare for sustainable water resource management of urban environment. In this study, regional groundwater flow and water budget status of Seoul was analyzed using numerical simulation. Modeling result indicated that groundwater level distribution of Seoul generally followed the topography, but the significant decreases in groundwater level were observed around the subway network. Steady-state water balance analysis showed groundwater recharge by rainfall and leakage from the water supply network was about 550,495 m<sup>3</sup>/day. Surface water inflow and baseflow rate via Han River and major streams accounted for 799,689 m<sup>3</sup>/day and 1,103,906 m<sup>3</sup>/day, respectively. Groundwater usage was 60,945 m<sup>3</sup>/day, and the total groundwater leakage along the subway lines amounted to 114,746 m<sup>3</sup>/day. Modeling results revealed that the subway could decrease net groundwater baseflow by 40%. Our study result demonstrated that the subway system can have a significant influence on the groundwater environment of Seoul.

**Key words** : Seoul, Subway, Groundwater budget, Regional flow, Numerical model

### 1. 서 론

대한민국의 수도 서울은 1960년대 이후 경제발전과 함께 도시화가 진행되어 세계적인 거대도시로 발전하였다. 서울시 인구는 대한민국 전체 인구의 1/5인 약 960만 명인데 비해 면적은 남한 면적의 약 0.6%에 불과한 대규모 인구 밀집 지역이다(KOSIS, 2014). 인구밀집에 따른 교통난을 해결하기 위해 서울시는 1974년 1호선 개통을 시작으로, 2009년까지 3번의 건설시기로 나누어 총 9개의 지하철 노선을 완공하였다. 현재 서울시의 지하철은 서울시 전체 대중교통인구를 분담하여 교통난을 줄이는데 일조하고 있다. 그러나 도심 지역에 지하철 또는 대형 건축

물을 시공하는 경우, 많은 양의 지하수 유출이 발생한다. 지하수 유출은 지하수위 하강, 지반 침하, 지하수 고갈 등의 장해를 유발할 수 있다(Chung, 2010). 지하철 역사에서의 과도한 지하수가 유출되는 경우 불용공의 발생이 증가하며, 지하수 수위의 강하로 2급수 이하 하천과 그 지천의 물들이 유입되어 지하수의 수질이 악화될 수 있다(Chung, 2010). 또한, 최근 서울 지역에 문제가 되고 있는 지반침하도 지하철 건설 과정에서 발생한 지하수 유출과 관련되어 있는 것으로 추정된다. 따라서 도심지역의 수위저하, 지반 침하 등의 지하수 장해 문제를 해결하기 위해서는 대도시 수리환경 및 대수층 특성과 지하철을 포함한 지하 구조물이 지하수 유동에 미치는 영향에 대한 연

\*Corresponding author : eunheelee@kigam.re.kr

Received : 2015. 2. 24 Reviewed : 2015. 4. 13 Accepted : 2015. 5. 18

Discussion until : 2015. 8. 31

구가 필요하다.

그러나 서울과 같은 대도시 지역의 수문지질환경은 지속적인 도시 개발 및 다양한 시설물 등의 밀집으로 인해 정확한 파악이 힘들다. 급속한 도시 확장에 따른 인위적 요인의 증가는 도시 수문 환경 데이터베이스 구축 및 분석을 어렵게 한다. 지속적인 도시 개발 및 지하수 공 관리 소홀, 시설 관정의 지하수 사용량 변동은 지하수위 및 수질에 영향을 미친다. 또한 지하철 노선 및 대형 건축물의 증가는 지하 굴착 심도를 증가시키는데, 이는 지하수 유출량을 더욱 증가시키는 원인으로 작용하여 서울시의 지하수위 및 지하수 물수지에 영향을 줄 수 있다.

서울의 수문지질환경을 파악하고 지하수 관리 방안을 마련하기 위해 다양한 연구가 수행되었다. Kim and Lee (1999)는 서울시의 수문지질학적인 특성을 분석하기 위해 다양한 변화 요인들을 지리정보시스템을 이용하여 형상화하고 이를 기반으로 대수층의 특성과 지하수시스템의 특성을 분석하였다. Kim et al.(2001)은 도시지역의 지하수 시스템의 주요구성요소를 식별하고 분석하였으며 이를 바탕으로 서울도시 지하수의 물수지 분석을 추정하였다. Lee and Woo(2002)는 지하철 설계구간에서 공사 이전의 지하수의 수질특성과 오염도를 파악하여 추후 공사로 인한 지하수의 수질 악화발생에 대처하기 위한 기초자료를 수집하였으며, Lee and Koo(2007)는 도시화가 지하수환경에 미치는 영향 및 대도시 지역의 문제에 대한 사례를 분석하였다. Woo(2009)는 지하철 5호선에 대한 전체 집수정의 지하수 유입량을 분석하고 지하철 집수정 및 터널 구간 유입량의 설계 기준과 비교하였으며, Chung(2010)은 서울시 지하철의 유출 지하수 현황과 문제점을 파악하였다.

그러나 기존의 연구데이터만으로는 아직 서울시의 지하수 수문환경과 지하수 유동 및 물수지를 충분히 파악할 수 없다. 더구나 최근에 행해진 서울시의 물수지 분석 자료는 약 10년 전으로, 현재의 서울시 지하수현황을 파악하는 기초자료로 사용하기에는 오래되었다. 지하철 연장 및 4대강 사업으로 인한 하천정비는 지하수위를 비롯한 한강 및 주요 지류의 수위·유량 등에 큰 영향을 줄 수 있다. 이렇듯 향후 발생할 수 있는 물 부족 사태에 대비하고 지반 침하 등의 주요 원인을 찾기 위해서 서울시 지역의 물수지 및 지하수에 대한 영향분석이 필요하다.

본 연구에서는 3차원 지하수 유동 모의를 통해 현재의 서울특별시 수문환경을 파악하고, 특히 지하철 운영에 따른 지하수의 광역적 유동 및 물수지 현황 변화를 분석하였다. 이를 위해 본 연구에서는 지하철 및 상하수도 누수율의 변화 등과 같은 최근의 수리 환경적 변화를 고려하

여 서울시의 지하수위 및 지하수 흐름을 계산하였으며 계산 결과를 바탕으로 서울시의 지하수 물수지를 분석하였다. 해당 연구 결과는 향후 서울시의 지하수 관리 및 지하수 현황 분석을 위한 기초자료로 용이하게 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 연구 지역 개황

### 2.1. 지형 및 지질

서울시는 도시의 중앙으로 한강이 동서방향으로 흐르고 있으며 북한산(837 m), 관악산(629 m), 도봉산(740 m), 불암산(510 m), 인능산 (326 m) 등으로 둘러싸인 분지형의 도시이다. 서울의 기반암은 선캄브리아기 경기편마암 복합체인 편마암류와 편암으로 이루어져 있으며 백악기의 화강암이 이를 관입하고 있는 것으로 조사되었다(Kim et al., 1998). 서울 도심지역의 심도별 토양 및 암석의 분포 상태 분석결과, 일부 암편을 포함한 매립토가 수 미터 깊이로 최상부에 분포해있으며 그 하부에 교란된 충적층과 풍화암이 순서대로 위치하고 있다. 비교적 평탄한 지역과 하상퇴적층에서는 충적층과 풍화암의 깊이가 20 m 이상 나타나기도 한다(Kim et al., 1998).

### 2.2. 수문기상

2010~2013년 사이 서울시의 평균 기온은 12.37°C, 평균 강수량은 1696.03 mm이다(KMA, 2014). 연별 강수량의 변화가 있지만 연 강수량의 50~60%가 여름에 내린다. 이러한 강수량의 분포는 서울지역 수리 시스템의 큰 영향을 주는 요소이다.

한강은 서울의 중간에 위치하여 동에서 서로 관통하여 흐르는 하천이다. 한강 이외에도 서울에는 청계천, 중랑천, 탄천, 홍제천 등의 주요 지류들이 흐르고 있다. 한강의 수위는 영동대교, 한강대교, 행주대교 4개의 관측소에서 관측되고 있으며, 주요 지류하천의 수위는 우이, 중랑교, 성남, 신정, 시흥 5개의 관측소에서 관측되고 있다. 2000~2014년까지의 관측된 한강 평균수위는 영동대교 3.07 m, 한강대교 3.10 m, 행주대교 2.88 m이다. 2011~2013년까지의 관측된 서울시 주요 하천의 평균수위는 우이 16.77 m, 중랑교 9.72 m, 신정 4.12 m, 성남 11.44 m이다(WAMIS, 2014).

### 2.3. 지하수 현황

현재 서울시의 지하수 부존량은 지표로부터 암반층 심도 100 m 이내에 약 1,480,000,000 m<sup>3</sup>/year으로 추정하고

있으며, 함양률을 고려한 서울시의 지하수 개발 가능량은 59,696,000 m<sup>3</sup>/year으로 산정된다(KIGAM, 2014). 2012년도의 서울시 총 지하수 사용량은 22,233,000 m<sup>3</sup>/year로 보고되었으며 상수도 사용량은 1,153,070,000 m<sup>3</sup>/year으로 지하수 이용 비율은 상수도에 비해 1.9%로 아주 낮다(KIGAM, 2014). 지하수 이용률이 가장 높은 곳으로는 강동구 4.3%, 가장 낮은 곳으로는 관악구 1.5%이다(KIGAM, 2014).

지하수위 변동추이 및 특성을 관찰하기 위해 서울시에 220개의 보조 관측망이 운영 중에 있다(2012년 기준). 이 중 160개소는 자동관측, 60개소는 월 2회 수동관측을 수행하고 있다. 지하수위의 변동 회귀분석 결과, 서울시의 전체 평균수위는 꾸준히 감소하고 있으며 특히 지하철 주변 지역을 중심으로 감소폭이 커지는 것으로 확인되었다(KIGAM, 2014).

서울의 지하철은 1~9호선 이외에도 분당선, 공항철도 등이 운영되고 있으며 현재에도 지하철 공사를 하고 있는 중이다. 지하철 등의 지하구조물의 건설은 대규모 지하수 유출을 유발하여 지하수위 감소를 가져온다. 서울시 지하철을 통해 발생한 유출지하수는 112,627 m<sup>3</sup>/day로 추정된다(KIGAM, 2014). 서울시의 경우 지속적으로 지하철 건설을 진행하고 있어 유출 지하수 발생량이 증가할 것으로 추정되며, 이에 따른 지하수위 강하와 지반침하 문제가 꾸준히 발생할 것으로 예상된다. 현재에는 지하철에서 유출된 지하수의 약 69% 정도가 재이용되고 있다. 유출지하수의 대부분은 하천유지용으로 방류되며(91%), 약 9% 정도만이 도로청소, 건물 등의 용수로 사용되고 있다(KIGAM, 2014).

### 3. 연구 방법

#### 3.1. 수치프로그램 및 모델 구성

본 연구에서 서울시 지하수 현황 분석을 위해 사용한 3D 수치해석 프로그램은 FEFLOW 6.0(Diersch, 2010)이다. 해당 프로그램의 지하수 유동 지배 방정식은 다음과 같다.

$$S_0 \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} = Q \tag{1}$$

$$q_i = -K_{ij} \left( \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) \tag{2}$$

$S_0$ 는 비저류 계수,  $h$ 는 대수층 내 지하수위,  $t$ 는 시간,  $q_i$ 는 다르시 플럭스,  $K_{ij}$ 는 수리전도도,  $Q$ 는 지하수 유입 유출량이다.

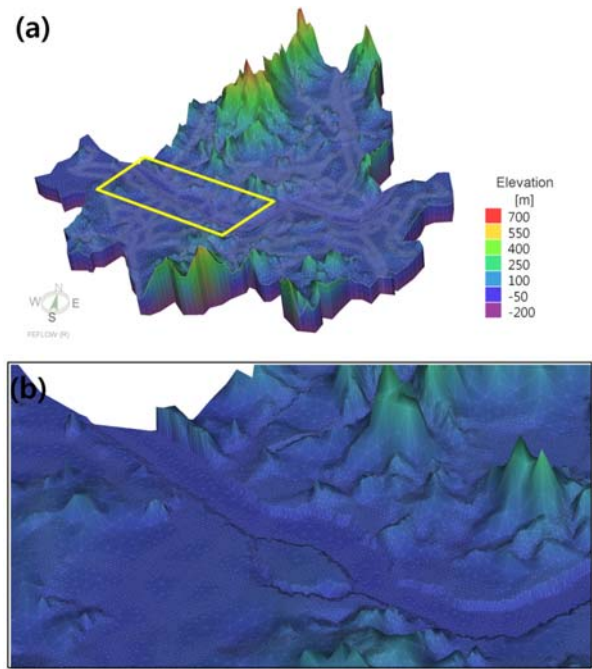


Fig. 1. (a) 3-D numerical domain used for simulation, (b) enlarged partial section of the study area.

FEFLOW는 자유면대수층 모사를 위해 지하수면을 따라 다음과 같은 경계조건을 자동적으로 할당한다.

$$\left( P_o - \epsilon_e \frac{\partial h}{\partial t} \right) n_l = -q_n \tag{3}$$

$$h = x_l \tag{4}$$

여기서  $P_o$ 는 지하수 함양률,  $\epsilon_e$ 는 공극률,  $n_l$ 은 노말벡터,  $q_n$ 는 다르시 노말 플럭스,  $x_l$ 은 고도를 나타낸다.

모델 영역은 서울시의 행정경계 및 서울시를 둘러싼 주요 산들의 능선을 따라 구성하였으며, 모델 전체 영역의 크기는 602.7 km<sup>2</sup>이다. 도메인은 삼각 요소를 사용하여 구성하였으며, 하천과 지하철 라인을 따라 요소를 세밀하게 구성하여 수치적 안정성을 획득하고 오차를 줄이고자 하였다. 3차원 도메인 구축을 위하여 서울시 DEM 정보를 이용(100 m 단위)하여 모델 고도를 설정하였다. Fig. 1(a)는 모의에 사용한 3차원 도메인 영역을, Fig. 1(b)는 확대된 영역을 보여준다. 남산, 북악산 주변으로 지형 고도가 높게 형성되고, 한강 하천과 지류를 따라서 하천의 지형이 반영된 것을 확인할 수 있다.

3차원 모사를 위해 서울시 관측 정에서 얻은 시추자료를 이용하여 모델영역을 3개의 수문층(충적층, 풍화+연암층, 기반암층)으로 구성하였다. 총 레이어 개수는 서울시 지하구조물, 지하철 역사 및 관정들의 고도위치를 반영하

고, 수치적인 안정을 취하기 위해서 7개로 구성하였다. 레이어1은 충적층 및 하상퇴적층, 레이어2, 3, 4는 풍화 + 연암층, 레이어5, 6, 7은 기반암층에 해당한다. 3차원 모델에 사용된 노드의 개수는 241,768개, 총 요소의 개수는 419,699개이다.

한강은 크게 3구간으로 나누어 고정수두 경계로 나타내었다. 고정 수두 경계 값은 각 관측소(행주대교, 한강대교, 영동대교)에서 10년(2003~2013)간 관측된 수위의 평균값을 사용하였다. 한강과 같은 큰 수계의 경우 강의 수위는 대수층의 수위 변동 외에도 상류 댐 수위 및 유량 변화에 복합적으로 영향을 받으므로 하천경계(Cauchy-type boundary condition) 대신 고정수두 경계조건(Dirichlet-type boundary condition)을 사용하여 나타내었다. Fig. 2

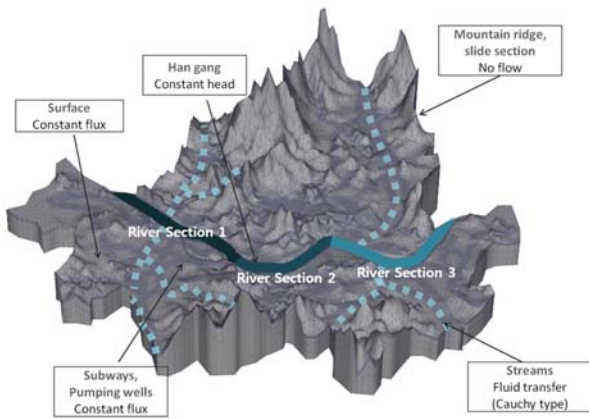


Fig. 2. Boundary conditions used for simulation.

는 모델의 사용된 경계조건들을 보여준다. 수두 경계값은 한강 수위소에서 관측된 수위에 따라 세 개의 구간으로 나누어 반영하였다. 구간 1(행주대교)의 한강 수위는 2.87 m, 구간 2(한강대교)의 수위는 3.09 m, 구간 3(영동대교)의 값은 3.06 m이다. 한강 하부 하상퇴적층의 경우 기존에 조사된 서울시 미고결 퇴적층의 수리전도도(평균:  $5.05 \times 10^{-4}$  cm/sec) 및 시추자료를 통해 얻은 하상 퇴적층의 두께를 반영하여 하천과 대수층간의 상호작용을 실제적으로 반영할 수 있도록 하였다(KIGAM, 2014). 주요 하천(우이, 신곡, 안양, 성남, 천왕)의 경우는 2011~2013년간 관측된 수위 값의 평균값을 하천경계로 할당하고, 관측 수위가 없는 하천의 경우는 지표 고도 값을 이용하여 경계수위를 할당하였다. 하천의 컨덕턴스 값은 기존 조사된 서울시 미고결퇴적층의 수리전도도 및 하상퇴적층 두께를 바탕으로 산정하였으며, 이후 관측수위와의 비교를 통해 보정을 수행하였다. 한강과 나머지 하천들을 제외한 면(능선)은 무흐름 경계로 나타내었다.

총 지하수 함양률은 강우에 의한 침투량과 상하수도 누수율을 더해 시군구별로 다르게 입력하였다. 강우에 의한 침투량은 기존 문헌을 참고하여 서울시 평균 함양률 1.9%를 적용하였다(Kim et al., 2001). 상하수도 누수율은 서울시의 총 상하수도 사용량에서 환경부에서 제시한 누수율 3.8%를 곱하여 산정하였다(Ministry of Environment, 2012; KIGAM, 2014). 지하철 양수량은 지하철역사에서 유출량을 참고하여 반영하였다(KIGAM, 2014). 지하

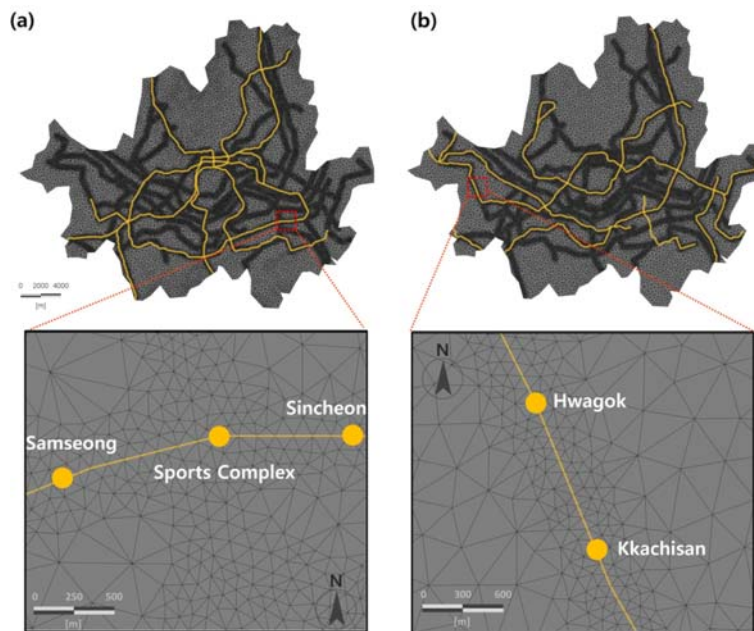


Fig. 3. Location of subway network of (a) Line1~Line 4 and (b) Line5~Line 9.



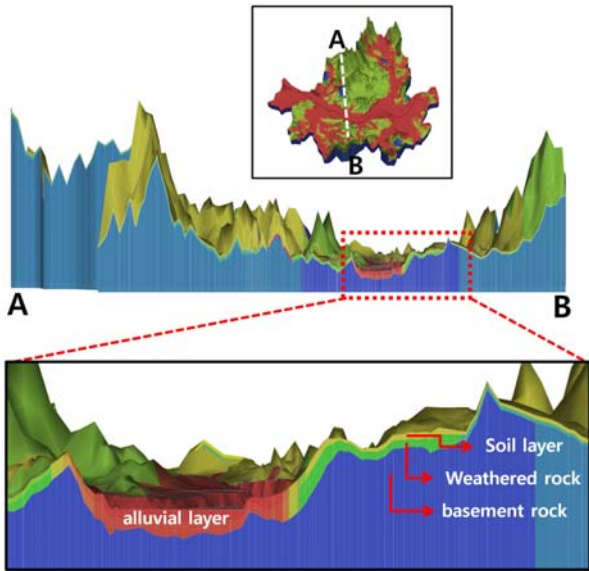


Fig. 4. Hydrogeologic profile of the study site along the AB section.

Table 1. Hydraulic conductivities used for simulation

	$K_{xx} (=K_{yy})$ (cm/sec)	$K_{zz}$ (cm/sec)
Alluvial layer	$3.3 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-1}$	$3.3 \times 10^{-6} \sim 1.5 \times 10^{-2}$
Weathered rock	$2.2 \times 10^{-5} \sim 1.2 \times 10^{-1}$	$2.2 \times 10^{-5} \sim 1.2 \times 10^{-1}$
Basement rock	$2.2 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-3}$	$2.2 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-3}$

철의 심도는 서울시 지하철 역사 1~4호선의 평균 배출 심도(15.8 m)를 고려하여 모델에 반영하였다. 지하철 경계는 지하철 역사를 따라 양수 경계조건을 할당하였고, 이 때 사용된 값은 기존의 지하철 역사 지하수 유출량을 참고 하였다. 그 후 지하철역과 역 사이를 선요소로 연결해서 지하철 라인을 따라 지하수가 유출되도록 하였다(Fig. 3). 지하수 이용관정의 양수량은 기존자료를 바탕으로 입력하였다(KIGAM, 2014). 이 때 양수량은 구별 지하수 사용량 및 양수정의 개수를 바탕으로 평균 양수량을 계산해서 구별로 할당하였다.

Fig. 4는 연구지역의 2차원 수직 단면도를 보여준다. 모델 영역은 서울시의 지층 분포 특성을 고려하여 크게 3개의 층(충적층, 풍화+연암층, 기반암)으로 구분하였다. 각 층의 수리전도도는 기존의 조사 값들을 참고하여 수위 데이터와의 보정을 통해 산정하였다. Table 1은 모의에 사용된 각 층의 수리전도도 값을 보여준다. 한강과 주하천 주변의 경우, 투수성이 높은 충적층이 발달되어 있으므로 상대적으로 높은 수리 전도도를 할당하였으며 기반암의 경우, 편마암과 화강암층을 분리하여 서로 다른 수리전도도를 할당하였다.

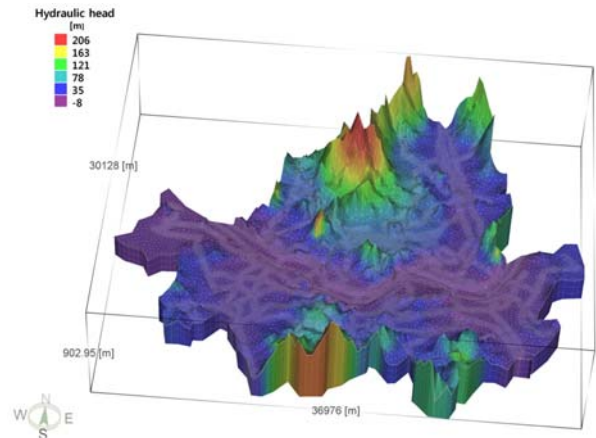


Fig. 5. 3-D hydraulic head distribution of the Seoul City.

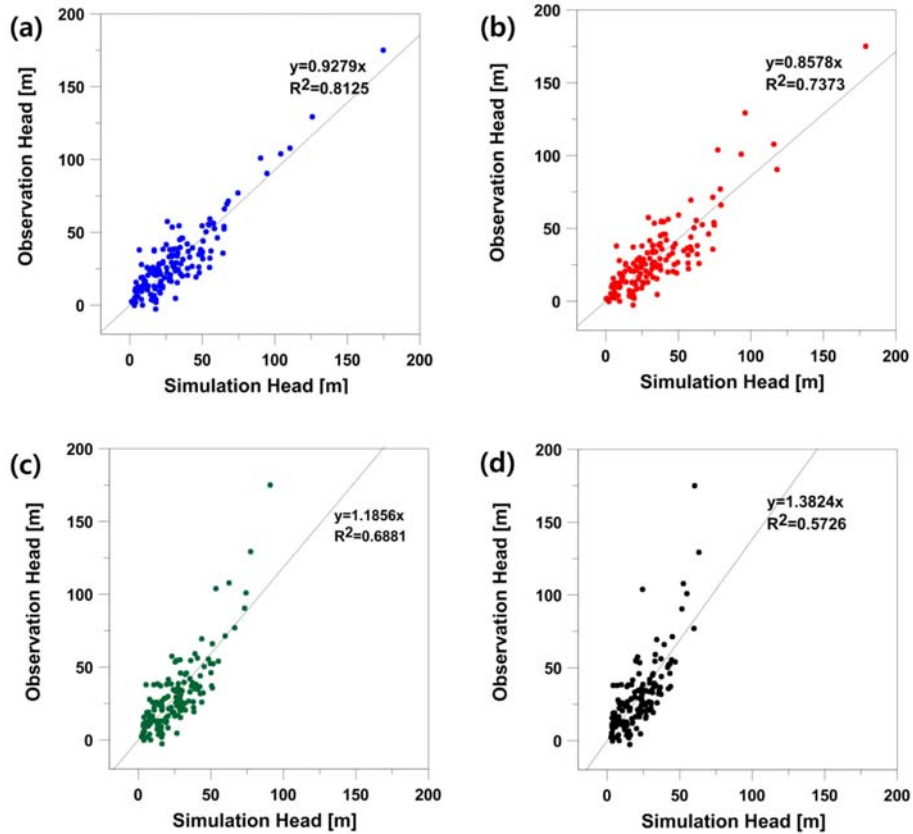
## 4. 모의 결과

### 4.1. 지하수위 분포 및 민감도 분석

본 연구에서는 서울시의 광역적 지하수 분포를 파악하기 위해, 정류 모의(Steady state)를 수행하였다. 정류 모델을 수행한 3차원 수위 결과는 Fig. 5와 같다. 모의 결과, 전체적인 수위 분포는 지표 고도를 따르고 있으며 남산, 북악산, 관악산 주변은 수위가 높고 한강주변에서는 수위가 낮은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 서울시 보조 관측망에서 측정한 수위와 시뮬레이션 수위를 비교한 결과이다. 약간의 오차는 보이지만 관측수위와 계산 수위가 비교적 일치하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 6(a)). 본 연구에서는 수리전도도(K)가 수위에 얼마나 영향이 미치는지를 파악하기 위해 수리전도도를 0.5배, 2배, 5배로 바꾸어 가면서 민감도 분석을 수행하였다(Fig. 6(b), Fig. 6(c), Fig. 6(d)). 분석 결과, 수리전도도는 서울시 지하수위 분포에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 수리전도도가 높을수록 계산 수위가 낮아지고 수리전도도를 낮출수록 계산 수위는 높아지는 경향을 보여주었다. 분석 결과, 최종 보정된 수리전도도(Fig. 6(a))를 사용한 경우가 보정 결과가 가장 좋은 것으로 나타났는데( $R^2=0.8125$ ), 이는 모델 보정이 비교적 잘 이루어졌음을 시사한다. 평균제곱근근차(Root Mean Square Deviation: RMSD), 정규평균제곱근근차(Normalized Root Mean Square Deviation: NRMSD), 변동계수(Coefficient of Variation: CV)를 활용한 오차분석 결과 역시 네 경우 중 최종 보정된 수리전도도에서 오차가 가장 최소임을 확인할 수 있다(Table 2).

Table 3은 최종 보정된 모델을 통해 얻은 서울시 지하



**Fig. 6.** Comparison of measured and calculated hydraulic heads according to the hydraulic conductivity (a) Simulation result based on the calibrated hydraulic conductivity (K), (b) Result when decreasing hydraulic conductivity by a factor of 0.5 (0.5K), (c) Result when increasing hydraulic conductivity by a factor of 2 (2K), (d) Result when increasing hydraulic conductivity by a factor of 5 (5K).

**Table 2.** Error analysis of simulation results according to the hydraulic conductivity (K: Result when using the calibrated hydraulic conductivity, 0.5K: Result when decreasing hydraulic conductivity by a factor of 0.5, 2K: Result when increasing hydraulic conductivity by a factor of 2, 5K: Result when increasing hydraulic conductivity by a factor of 5)

	RMSD	NRMSD	CV
0.5K	14.1449	0.07962	0.47949
K	11.1816	0.06294	0.37904
2K	15.0319	0.08461	0.50956
5K	18.9713	0.10679	0.6431

수의 총 물수지 분석결과이다. 분석 결과, 상하수도 누수 및 강우로부터 대수층으로 함양되는 지하수의 양은 약

550,495 m<sup>3</sup>/day로 나타났다. 하천과 대수층간의 연결성 분석 결과, 한강 및 주요 하천과 인근 대수층에서 활발하게 물 교환이 일어나는 것으로 추정된다. 대수층에서 한강 및 주요 하천으로 유출되는 지하수의 양(기저유출량)은 1,1103,906 m<sup>3</sup>/day이고, 한강 및 주요 하천에서 대수층으로 유입되는 양은 793,689 m<sup>3</sup>/day로, 대수층에서 기저유출량이 유입량보다 310,217 m<sup>3</sup>/day 많은 것으로 나타났다. 그러나 해당 결과는 한강 바닥의 저투수성 퇴적물 등의 분포를 고려하지 않았으므로, 실제 교환량은 계산 값과 일부 차이를 보일 수 있다. 서울시 전체 지하수 사용량은 60,945 m<sup>3</sup>/day, 지하철 누수량은 114,746 m<sup>3</sup>/day으로 분석되었으며, 이 둘의 합은 서울지역 전체 대수층 함양량의 약 32%를 차지한다.

**Table 3.** Groundwater budget analysis result of the Seoul City (unit: /day)

	Rainfall and sewage leakage	Han river and major streams	Groundwater usage	Subway leakage	Error
Inflow	550,495	793,689	0	0	64,587
Outflow	0	1,103,906	60,945	114,746	(4.8%)

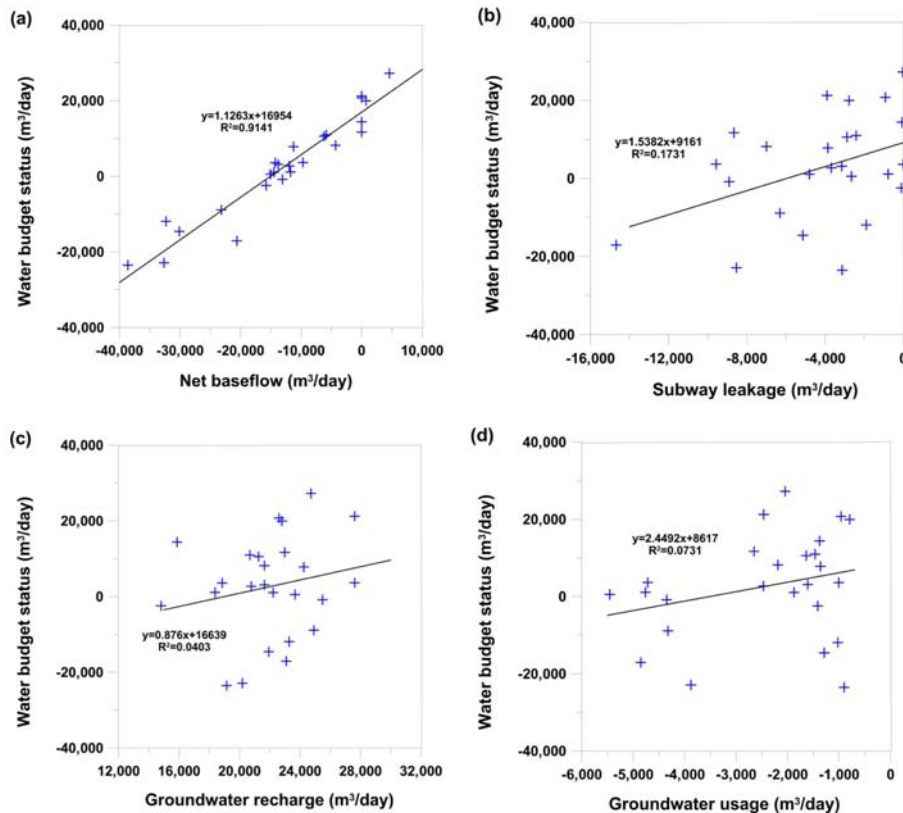


Fig. 7. Correlations between water budget status of the boroughs of the Seoul City and (a) net baseflow, (b) subway leakage, (c) groundwater recharge, (d) groundwater usage.

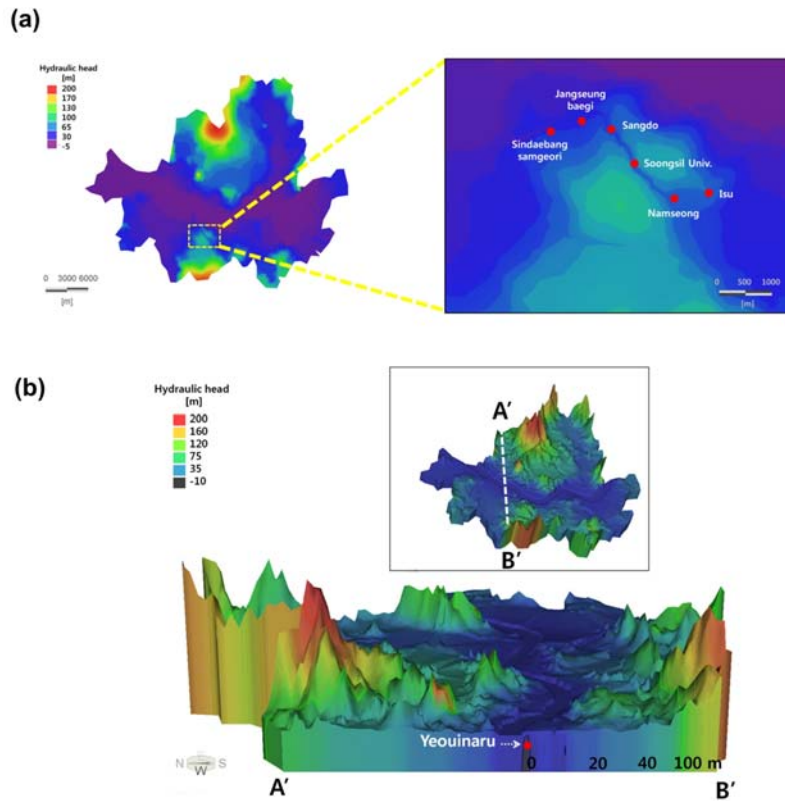
Fig. 7은 서울시의 자치구별 물수지 현황과 순기저유출량, 지하철유출량, 함양량 및 지하수 사용량간의 상관관계를 보여주고 있다. 모델링 결과, 자치구별 물수지 현황은 하천 교환량과 가장 큰 상관관계를 보여주고 있으며, 지하철 유출량 또한 일정부분 상관관계를 보여주었다. 이를 통해 서울시의 지하수 환경은 하천과 밀접하게 관련이 있음을 추정할 수 있다. 또한 지하철 등의 주요 지하 구조물이 도시 수문지질환경에 영향을 미치는 중요한 요소이며, 지속가능한 도시환경 유지를 위해 이에 관한 정량적 영향 평가가 수행되어야 함을 시사한다.

#### 4.2. 지하철 영향 평가

지하철 개발이 도시환경 지하수위에 미치는 영향을 평가하기 위해 주요 지하철 노선을 따른 수위 분포를 분석하였다. Fig. 8(a)는 7호선 지하철 일부 노선(신대방삼거리역, 장승배기역, 상도역, 송실대입구역, 남성역, 이수역)에 따른 수위분포를 보여주는데 지하철 노선을 따라서 지하수위가 주변 지역보다 하강한 것을 확인할 수 있다. Fig. 8(b)는 여의나루역의 수직단면 수위분포를 보여주는

데, 여의나루역 주변 역시 주변에 비해 지하수위가 낮게 나타난다. 이는 지하철 개발이 서울시의 지하수위 하강에 영향이 있음을 시사한다. 여의나루역 일대 주변을 중심으로 국부적 물수지 분석을 수행한 결과 또한 지하철의 영향을 보여주고 있다. Table 4는 여의나루역을 중심으로 분석 반경을 1~2 km로 바뀌며 물수지 분석을 수행한 결과이다. 분석 결과, 지하철 노선 운영에 따라 많은 양의 지하수 손실이 발생하고 있으며, 특히 여의나루 주변 반경 1 km에서는 지하철 구간을 중심으로 하천수(한강)의 유입량이 유출량보다 높은 것으로 나타나고 있다.

지하철이 서울시 지하수에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해서 지하철이 없는 경우를 가정하여 수치 모의를 수행하고 지하철이 있는 경우와 그 결과를 비교하였다. Table 5는 서울시의 지하철이 없을 경우를 가정한 물수지 분석 결과 값이다. 모의 결과, 지하철이 없음을 가정한 경우 한강 및 주요 하천으로의 유입, 유출 되는 양이 증가하는 것으로 나타났다. 특히 한강으로의 기저 유출량은 290,320 m³/day 증가하였다. 지하철이 있는 경우와 그렇지 않은 경우 한강 및 주요 하천으로의 순 기저 지하



**Fig. 8.** Effect of subway network on the hydraulic head decrease (a) 2-D horizontal hydraulic head distribution along the line 7 section, (b) 2-D vertical hydraulic head distribution at the Yeouinaru station.

**Table 4.** Groundwater budget analysis around the Yeouinaru station (unit: m<sup>3</sup>/day)

Analysis radius (km)	Rainfall and sewage leakage	Net baseflow	Groundwater usage	Subway leakage	Water budget
1	3,503	-135	1,424	4,103	-1,889
1.5	9,228	2,816	2,052	5,830	-1,476
2	13,204	17,180	2,663	9,189	-17,358

**Table 5.** Groundwater budget analysis of the Seoul City without considering the subway network effect (unit: m<sup>3</sup>/day)

	Rainfall and sewage leakage	Han river and major streams	Groundwater usage	Subway leakage	Error
Inflow	550,495	874,739	0	0	29,937
Outflow	0	1,394,226	60,945	0	(2.1%)

수 유출량(기저유출량-하천수유입량)을 비교해 본 결과, 지하철이 있는 경우가 그렇지 않은 경우보다 순 기저유출량이 약 40% 감소하는 것으로 나타났다. 지하철 역사로 유출된 지하수의 대부분은 한강으로 방류되므로 한강 전체 유량에는 큰 변화가 없을 수 있다. 그러나, 대수층과 하천을 연결하는 자연기저유출량은 크게 줄어들 것으로 예상되며 이는 하천-대수층 환경의 지화학적, 물리적 변화를 초래할 수 있다. 이는 도시 지하철이 지하수 시스템 및

수문 지질환경에 큰 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

### 5. 결론 및 제언

본 연구에서는 3차원 지하수 유동 모의를 통해 현재의 서울특별시 수문환경을 파악하고 지하 물수지 분석을 수행하였다. 이를 통하여 수리전도도에 따른 수위변화 및 지하철 개발에 따른 주변지역 지하수위 강하를 평가하였다.



모델링결과 전체적인 수위는 남산, 북악산, 관악산 주변에서 높고 하천방향으로 갈수록 감소하는 경향을 보여준다. 민감도 분석 결과, 수리전도도가 서울시의 지하수위 분포에 중요한 영향을 미치는 인자로 나타났다. 해당 연구에서는 서울시 지하수위의 정류모의(steady state model)만을 평가하였기 때문에 다른 수리인자(비저류계수, 비산출율)등에 대한 민감도 분석은 추후 비정류모의(transient model)에서 수행되어야 할 것이다. 지하철 노선 또한 서울시 전체 지하수위에 큰 영향을 주는 것으로 평가된다. 수위 분포 분석 결과, 주요 지하철 노선을 따라 수위가 하강하였으며 이러한 영향은 7호선(신대방삼거리역, 장승배기역, 상도역, 승실대입구역, 남성역, 이수역) 및 5호선 일부(여의나루) 주변 등지에서 두드러지게 관찰되었다.

물수지 결과, 강우 및 상하수도 누수로 대수층에 유입량은 550,495 m<sup>3</sup>/day, 한강 및 주요 하천의 유입량은 799,689 m<sup>3</sup>/day, 대수층에서 한강 및 주요 하천의 기저유출량은 1,103,906 m<sup>3</sup>/day, 지하수 사용량은 60,945 m<sup>3</sup>/day, 지하철 누수량은 114,746 m<sup>3</sup>/day이다. 지하철 누수량의 지하수 사용량은 각각 전체 대수층 함양량의 20.8%, 11.1%를 차지하고 있다.

지하철 영향을 살펴보기 위해 지하철이 있는 경우와 없는 경우를 가정하여 모의 결과를 비교하였다. 비교 결과, 지하철이 있는 경우가 그렇지 않은 경우보다 한강 및 주요 하천으로 유입량은 81,050 m<sup>3</sup>/day, 한강으로의 지하수 유출량은 290,320 m<sup>3</sup>/day 감소하였으며, 한강 및 주요 하천으로의 순 기저 지하수 유출량(기저유출량-하천수유입량)이 약 40% 감소하는 것으로 나타났다. 지하철 유출지하수는 대부분 하천으로 방류되기 때문에 한강의 총 유량 변화는 크지 않을 수 있다. 하지만 자연적인 기저유출량은 현저히 감소하며, 따라서 하천-대수층 전이대 환경은 큰 영향을 많이 받을 수 있다. 그러나 아직까지 서울시 수문환경의 기저유출량 감소가 하천-대수층 혼합대 환경에 어떠한 영향을 미치는 지에 대해서는 조사된 바가 없으며, 따라서 이에 대해 추후 연구가 진행되어야 할 것이다. 또한 지하철 개발은 서울시의 지하수위에 큰 영향을 미치므로 지하수위 하강에 따른 지반 침하 등의 문제가 유발되지 않게 사전조사를 충분히 하고, 지속적인 연구 및 모니터링을 통해 지하철 개발과 그에 따른 문제들의 상호 관련성을 파악하여 지속가능한 도시 개발을 유지해야 할 것이다.

현재 서울시의 지하수 사용량은 전체 물 사용량에서 비중이 낮다. 하지만 향후 발생할 수 있는 기후변화 및 수문환경 변화에 대비해 안정적인 용수원 확보를 위한 대책

은 반드시 확보되어야 한다. 수치모의를 통해 얻은 서울시의 지하수 이용량은 개발 가능량의 약 32% 정도이다. 지하수는 서울 도심 환경의 유용한 대체 수자원으로 활용될 수 있으며 효과적인 용수원 확보를 위해서는 체계적인 지하수 관리 및 개발이 진행되어야 한다. 다만 서울시의 지하수 함양은 상하수도 누수율, 기후 변화에 따른 강우량 변동에 따라 변하기 때문에 이러한 부분들을 고려하여 향후 서울시의 지하수 적정사용량을 산정하고 효율적인 지하수 활용 계획을 수립해야 할 것이다.

## 사 사

본 연구는 “서울특별시 지하수 관리계획 수립 용역(14-5208)” 및 한국지질자원연구원의 2015년도 기본사업(15-3415)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Chung, S.Y., 2010, Groundwater obstructions and countermeasures for groundwater discharge from subway in Seoul, Korea, *J. Geol. Soc. Korea*, **46**(1), 61-72.
- Diersch, H.J.G., 2010, FEFLOW 6 - User's manual, WASY GmbH, Berlin. 172 p.
- Kim, Y.Y., Lee, K.K., and Sung, I.H., 1998, Groundwater system in Seoul area: analysis of hydraulic properties, *J. Eng. Geol.*, **8**(1), 51-73.
- Kim, Y.Y. and Lee, K.K., 1999, GIS application to urban hydrogeological analysis of groundwater system in Seoul area, *J. GIS Assoc. Korea*, **7**(1), 103-117.
- Kim, Y.Y., Lee, K.K., and Sung, I.H., 2001, Urbanization and the groundwater budget, metropolitan Seoul area, Korea, *Hydrogeol. J.*, **9**, 401-412.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2014, Establishment of groundwater management plan for Seoul metropolitan city, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 491 p.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2014, Climate data (2011~2013), www.kma.go.kr. (Cited 12 Jan 2015).
- KOSIS (Korea Statistical information service), 2014, Population census, www.kosis.kr. (Cited 12 Jan 2015).
- Lee, B.S. and Woo, N.C., 2002, Groundwater quality and contamination in the 'A' section of Seoul metropolitan subway, *J. Eng. Geol.*, **12**(4), 379-394.
- Lee, J.Y. and Koo, M.H., 2007, A review of effects of land development and urbanization on groundwater environment, *J.*

*Geol. Soc. Korea*, **43**(4), 517-528.

Ministry of environment, 2012, 2011 Statistics of waterworks,  
Ministry of environment, 57 p.

WAMIS (Water Management Information System), 2014, www.

wamis.go.kr. (Cited 12 Jan 2015)

Woo, J.T., 2009, A study on comparison of a ground water  
influx quantity in Seoul subway tunnel, *Tunnel. Tech.*, **11**(4),  
353-359.