

# Numerical analysis of stream-groundwater flow exchange in a losing stream

현윤정, 이강근, 양재하, 최두형, 전성천, 김윤영\*

서울대학교 지구환경과학부, \*중앙대학교 인삼연구센터 (e-mail: yjhyun@snu.ac.kr)

## <요약문>

현재 복원사업이 진행 중인 서울시 청계천은 상류와 하류에서 하천의 유량이나 하폭 등에서 서로 다른 특성을 보인다. 본 연구에서는 청계천 상류와 하류에서의 지하수 유동을 모델링을 통하여 해석하였다. 그 결과 청계천 상류에서는 하천과 지하수면이 서로 분리되어 있는 분리손실하천의 형태를 보이는 반면, 청계천 하류에서는 하천과 지하수면이 서로 연결되어 있는 연결손실하천의 형태로 나타났다. 또한, 본 연구에서는 지하수 모델링 결과를 이용하여 하천-지하수의 상호작용을 zone analysis 통하여 분석하였다. 청계천 상, 하류 모두 대수층으로 유입되는 대부분의 물이 하천에서 오지만, 하류에서는 대수층에서 하천으로도 물이 유출되는 것을 확인할 수 있었다. 그 외에도 zone analysis의 결과는 손실하천에서의 유량 확보 또는 유지를 위한 계획을 구상하는 데에 있어서 중요한 지표를 제시해줄 수 있다.

**key word** : 하천-지하수 상호작용, 지하수 모델링, 분리 손실하천, 연결 손실하천, zone analysis

## 1. 서론

주로 하천의 물이 대수층으로 유입되는 손실 하천의 경우 물순환계 분석에 있어서 지하수계의 유동 해석은 매우 중요한 부분을 차지한다고 볼 수 있다. 하천과 인접하고 있는 지하수계에서의 지하수 유동은 그 대수층의 특성뿐 아니라, 하천과의 상호작용에 의해서도 크게 좌우된다. 하천과의 상호작용을 파악하는 데에 있어서는 하천에서 대수층으로 유입되거나 또는 대수층에서 하천으로 유출되는 지하수의 양을 분석하는 것이 가장 중요하다. 따라서, 본 연구의 목적은 손실하천에서 일어나는 하천과 대수층간의 유입, 유출되는 하천 유량 또는 지하수량을 모델링을 통하여 보다 정확하게 예측하고자 한다.

## 2. 이론: 지하수 유동 방정식

본 연구에서는 변동 포화대에서의 지하수 유동 방정식을 사용하였다 (Huyakorn et al., 1986).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} k_{rw} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} k_{rw} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} k_{rw} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = \phi \frac{\partial S_w}{\partial t} + S_w S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

여기에서  $x, y, z$  는 Cartesian 좌표 [L];  $K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$  는 각각  $x, y, z$  방향으로의 수리전도도 주성분;  $k_{rw}$  는 상대 투수계수;  $h$  는 수두(=  $\psi$  (압력수두)+  $z$  (고도));  $W$  는 source 또는 sink [1/T];  $\phi$  유효공극률 (=  $S_y$ );  $S_w$  는 포화도;  $S_S$  는 비저류계수 [1/L];  $t$  는 시간을 나타낸다. 식 (1)을 풀기 위해서는  $k_{rw}, S_w, \psi$  가 주어져야 한다.  $k_{rw}$ 는  $S_w$ 의 함수이고  $S_w$ 는  $\psi$ 의 함수이다.  $k_{rw}$ 와  $S_w$ 의 관계는 Brooks-Corey (1966) 와 van Genuchten (1980)의 관계식, 또는 Pseudo soil relation 을 사용하여 계산한다. 본 연구에서는 청계천 유역의 지하수계를 분석하기 위하여 3차원 지하수 모델인 MODFLOW-SURFACT (미국 Hydrogeologic 회사)을 사용하였다.

### 3. 지하수 모델링

본 연구에서는 현재 복원사업이 진행중인 청계천의 상류와 하류에서의 하천과 지하수의 상호작용에 대해 살펴보았다. 청계천은 길이 약 5.8 km의 서울 도심부의 중앙을 동서로 가로지르는 매우 긴 하천으로서, 그 상류에서 하류로 가면서 다양한 수리지질학적 특성이 관측된다. 특히, 청계천 상, 중류에서는 하천의 폭이 좁고 건천이면서 지하수면이 매우 낮게 관측되었고, 청계천 하류에서는 중랑천, 성북천의 합류로 그 폭이 넓어지고 상류보다는 조금 높은 곳에서 지하수면이 관측되었다. 본 연구에서는 서로 다른 특성을 보이는 청계천 상류와 하류의 수직 횡단면, U-U' 와 D-D' 에서의 지하수계의 특성을 분석하였다(그림 1).

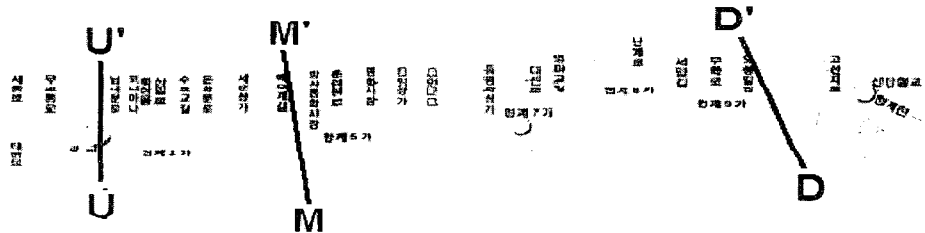


그림 1. 청계천 지하수 모델링을 위한 수직단면의 위치도

모델링에서는 청계천을 중심으로 하여 남북 양 옆으로 약 100 m 정도의 대수층을 고려하였다. 이 유역의 지하수 함양은 청계천을 따라서만 일어난다고 가정하고, 함양률은 서울시 연평균 강우량인 1200 mm/year 로 가정하였다. 청계천 남북쪽에서의 경계조건은 인근 지하철 역사로의 지하수 유입량을 이용하여 지정해주었다. 청계천의 토양 함수 자료가 없는 관계로 불포화대의 흐름 모사에는 Pseudo soil relation을 사용하였다.

#### 3.1. 청계천 상류 (U-U')

청계천 상류에서의 지하수 유동을 모사하기 위하여 단면 U-U'의 개념모델을 그림 2와 같이 설정하였다.  $200 \times 28m^2$  의 면적을 가지고, 하천 주변에는  $1 \times 1m^2$ 의 미세 격자를 구성하고 하천에서 멀어질수록 격자의 크기를 증가시켜 불규칙적 격자망을 구성하였다. 대수층은 크게 상부의 자갈과 모래가 혼합된 충적층과 하부의 풍화토층으로 나누어져 있다. 여기에서는 충적층을 5개의 층으로 나누어 총 6개의 층의 모델을 구성하였다. 상부 충적층(K1)과 하부 풍화토층(K2)의 수리전도도는  $K1 = 1.0E-5$  m/sec 와  $K2 = 1.0E-6$  m/sec 이다. 이 값은 청계천에서 실시한 순간 충격 시험 결과와 문헌을 근거로 정해진 것이다. 하부에는 풍화받지 않은 기반암으로서 No Flow 경계조건을 지정하였다. 양 옆으로는 인근 종각

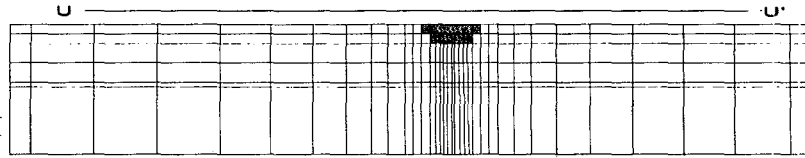


그림 2. 분리 손실 하천 U-U' 단면의 개념 모델

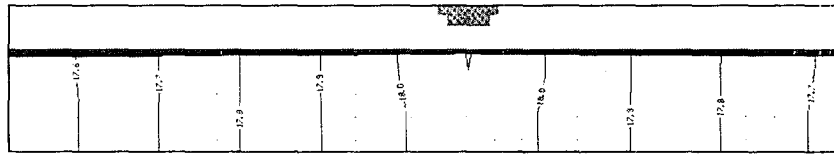


그림 3. 정상상태에서의 지하수면 분포도 (청계천 상류 U-U')

역과 을지로 입구 지하철 역사로의 지하수 유출을 고려하여 drain을 설정하고 이를 그림 1에서는 회색으로 표시하였다. Drain conductance 는 서울시 지하철 공사에서 보고한 2003년 평균 지하수 유출량을 사용하였다. Drain conductance 계산에 사용된 지하수 유출량은 종각역의 경우는  $37m^3/day$ , 을지로 입구역의 경우는  $42m^3/day$  이다. 본 연구에서는 하천수위 계산을 위하여 Manning's equation을 사용하였고 이를 위해 사용한 하상의 roughness 값은 0.025 이다. Streambed 의 수리전도도는  $5.0E-5 m/sec$  을 사용하였다. 하천 바닥은 21.8 m 에 위치하고 있고 1m 의 두께를 가진다고 가정하였다.

U-U' 단면에서의 정상상태에서의 지하수면을 모델링하였다. 그림 3에서 보이는 것처럼 U-U' 단면에서의 청계천은 지하수위와 떨어져 있는 분리 손실 하천임을 알 수있다. 이러한 분리 손실 하천에서의 하천과 대수층의 상호작용을 살펴 보기 위하여 Zone Analysis를 수행하였다. Zone Analysis를 하기 위하여 먼저 대수층을 4개의 구간으로 나누었다. 대수층을 Zone 1 으로 지정하였고, 양 옆의 flow boundary, 즉, drain을 zone 2, 3 으로 정하였고, 마지막으로 하천을 Zone 4 로 정하였다. 그림 4 와 5는 zone analysis 결과 대수층과 하천, 즉 Zone 1 과 Zone 4 로의 유입과 유출되는 양을 도시화한 것이다. 그림 4에서 보면 대수층으로 유입되는 양의 대부분이 하천에서 오는 것을 알 수 있고 유입된 양은 양 쪽의 drain 으로 유출되는 것을 알 수 있다. 한편, 그림 5에서 보면 하천으로 유입되는 양은 상당 부분이 지하수 함양에 의한 것이고 나머지는 하천의 누수에 의한 것이고 유입된 양은 인근 대수층으로 모두 유출되는 것을 알 수 있다. 이는 대수층으로부터의 하천으로의 유입의 전혀 없는 것으로 보아 U-U' 은 분리손실하천임을 재확인해준다. Zone analysis 결과는 손실하천의 경우 하천의 유량 확보를 위한 대책을 마련할 경우 정당한 지표를 제공해 줄 수 있다. 예를 들어, U-U' 의 경우에는 하천의 물이 모두 인근 대수층으로 유출되므로 이를 방지해주는 방안이 적당하다고 볼 수 있다.

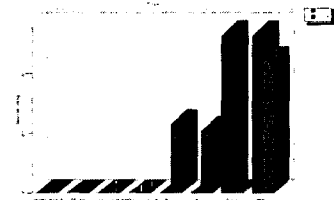


그림 4. 정상상태에서 Zone 1의 Zone Analysis 결과 (U-U')



그림 5. 정상상태에서 Zone 4의 Zone Analysis 결과 (U-U')

### 3.2. 청계천 하류(D-D')

청계천 하류에서의 지하수계 유동 분석을 위해 D-D' 단면에서의 개념모델을 설정하였다(그림 6). U-U' 에서와 같이 상부 충적층과 하부 풍화토층으로 구분하여 각 층의 수리전도도는  $K1=5.E-5 m/sec$ ,

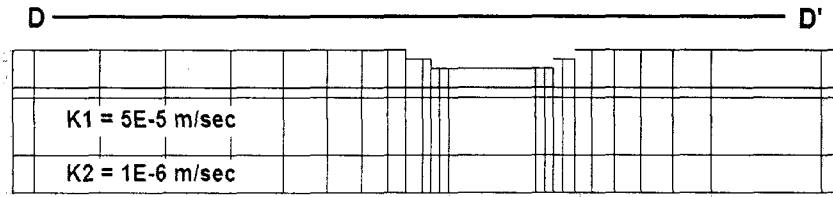


그림 6. 연결 손실 하천 D-D' 단면의 개념 모델

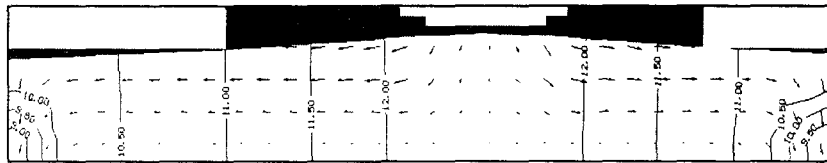


그림 7. 정상상태에서의 지하수면 분포도 (D-D')

$K2 = 1.E-6 \text{ m/sec}$  이다. 이 경우에 하천은 20 m 의 폭을 가지고 다른 하천으로의 유입을 고려하여 앞의 경우와 좀 많은 하천 유입량을 지정해주었다. 양 쪽 경계에 고대, 길음, 상왕십리역등 깊은 곳에 있는 지하철 역들이 있어서 drain 의 conductance를 크게 정해 주었다. 정상상태의 모델링 결과로 얻은 지하수면의 분포는 그림 7과 같다. 이 경우, U-U' 과는 달리 천과 지하수위가 연결되어 있는 연결 손실 하천임을 알 수 있다. 그림 8과 9는 D-D' 단면의 정상상태의 지하수 유동 분석시 대수층과 하천에서의 zone analysis 결과이다. 그림 8에서 주목해야 할 점은, 하천으로부터 많은 양이 대수층으로 유입되는 동시에, 적은 양이지만 대수층에서 하천으로의 유출 또한 존재하는 것을 알 수 있다. 이는 D-D' 은 손실하천이지만, 연결 손실하천이므로 하천과 대수층이 서로 상호작용을 하는 것을 보여준다. 한 편, 그림 9에서 보면 하천으로 유입되는 양이 거의 없고 하천의 누수로 인한 대수층으로의 유출만이 있는 것을 알 수 있다. 이는 D-D'에서 지하철역사로의 많은 지하수 유출로 인해 대수층의 물의 많은 양이 drain 으로 빠져 나가기 때문인 것으로 추정된다. 이는 drain 의 zone analysis 결과를 보면 확인할 수 있다 (그림 10). 이와 같은 경우에는 하천유량확보를 위해서 stream leakage를 조절할 수 있는 방안이 적당하다고 볼 수 있다.

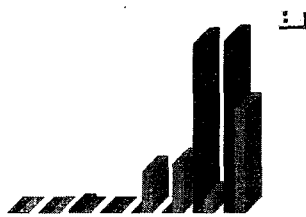


그림 8. 정상상태에서 Zone 1 의 Zone Analysis 결과 (D-D')

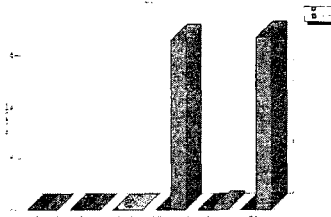


그림 9. 정상상태에서 Zone 4 의 Zone Analysis 결과 (D-D')

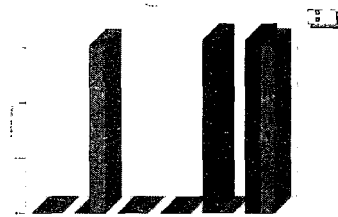


그림 10. 정상상태에서 Zone 3 의 Zone Analysis 결과 (D-D')

## 4. 결과 및 토론

본 연구에서는 손실하천의 특성에 따라서 하천 또는 대수층에서의 유출입되는 양의 성분이 서로 다른 것을 알 수 있었다. 특히, 분리 손실하천의 경우 대수층에서 하천으로의 물의 유입의 전혀 없는 반면에 연결 손실하천의 경우 대수층과 하천간의 물의 유, 출입이 있는 것을 zone analysis를 통해 확인할 수 있었다. 이는 현재 진행 중인 청계천 복원 사업에서와 같이 하천 유량의 유지 또는 확보를 위한 방안을 구상하거나 계획할 때 중요한 정보를 제공해줄 수 있다.

## 참고문헌

1. Brooks, R. H. and Corey, A. T., Properties of porous media affecting fluid flow, *J. Irrig. Drain. Div.*, **6**, 61, 1966,
2. Huyakorn, P.S., P.F. Andersen, F.J. Molz, O. Guven, and J.G. Melville, Simulations of two-well tracer tests in stratified aquifers at the Chalk River and Mobile Sites, *Water Resources Research*, **22**(7). 1016-1030, 1986.
3. Van Genuchten, M. Th., A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**(5), 892-898, 1980.