

지하수 모델의 주요 수문 요소에 대한 민감도 분석 사례 연구

나한나¹·구민호²·차장환²·김용제¹

¹한국지질자원연구원

²공주대학교 지질환경과학과

e-mail: mama@kongju.ac.kr

요약문

지하수 모델 개발은 모델의 목적 설정, 자료수집, 개념모델의 수립, 모델 설계, 모델 보정 및 민감도 분석, 예측, 결과제시, 사후검사의 순으로 수행된다. 본 연구의 목표는 신뢰성 있는 지하수 모델 개발을 위해 주요 수문요소(hydraulic features)들을 개념화하는 단계에서 부딪히게 되는 문제점들을 국내의 지하수 환경에 비추어 고찰하였고, 하천 및 지하수 분수령에 대한 경계조건 설정, 암반층의 하부 경계면 설정 등과 같은 수문요소들이 내포하는 불확실성을 논의하였다. 또한 시범지역의 지하수 모델에 대한 민감도 분석을 통하여 이들이 모델 결과에 미치는 영향을 정량적으로 제시하였다.

Key word : 지하수 모델링, 개념모델, 경계조건, 수문요소, 민감도 분석

1. 서론

개념모델 수립은 지하수 모델 개발의 수행과정 중 가장 중요한 단계이다. 개념모델은 지하수 흐름계를 도식화하여 표현한 것으로 지하수계의 구조(architecture) 및 지하수계에서 발생하는 복잡한 흐름 과정(process)을 모델링이 가능하도록 단순화하는데 그 목적이 있다. 개념모델을 구성하는 요소로는 주요 수문지질단위, 물수지 성분, 지하수의 공급원과 배출원, 경계조건 등이며, 이들 요소들은 현장에서 획득된 자료를 분석하여 수립하게 된다. 따라서 모델 개발자가 모델 대상 지역에서 발생하는 지하수 흐름계를 어떤 수리지질학적 관점에서 보느냐에 따라 개념모델은 크게 달라질 수 있으며, 이는 궁극적으로 지하수 모델에 의한 장기 예측 결과의 차이를 유발시킨다. 잘못된 선정된 개념모델은 모델 결과의 관측 자료와의 일치 여부에 관계없이 잘못된 예측결과를 초래할 수밖에 없으며(Konikow and Bredehoeft, 1992), 개념모델의 중요성은 최근까지 활발히 논의되고 있다(Bredehoeft, 2003). 본 연구에서는 시범지역을 대상으로 지하수 모델을 개발한 후 민감도 분석을 통하여 하천 및 지하수 분수령에 대한 경계조건 설정, 암반층의 하부 경계면 설정 등과 같은 국내 지하수 순환계의 주요 수문요소들이 내포하는 불확실성이 모델 결과에 미치는 영향을 정량적으로 제시하였다.

2. 모델의 주요 수문요소에 대한 민감도 분석

1) 연구지역 및 모델 개요

서울특별시 은평구 일대를 대상으로 현장수리시험(양수시험, 순간충격시험, 지표투수시험)을 수행하였으며, 수행 결과 산출된 대수성 수리특성 자료를 모델링의 입력 자료로 활용하였다. 또한 본 모델의 경계조건은 인근에 흐르고 있는 창릉천 및 창릉천 지류를 일정수두경계(Constant

head boundary)로 설정하였으며, 그 외 지역은 지하수 흐름에 직접적으로 영향을 미치지 않는 지형적인 분수령이므로 불투수경계조건(No-flow boundary)로 처리하였다. 함양은 본 연구지역 지하수계의 주요 공급원으로 본 연구지역에 대한 지하수 함양 산정 자료가 전무하므로 모델 보정을 통하여 추정하였으며, 3차원적인 지층구조를 나타내기 위하여 수치지도의 지형 및 시추주상도 자료를 이용하여 지표로부터 매립층, 퇴적층, 풍화대, 연암층으로 구분하였다. 모델 입력변수인 수리전도도는 비균질한 것으로 층별로 다른 값을 입력하였다. 이렇게 개발된 지하수 모델을 대상으로 하천 및 지하수 분수령에 대한 경계조건 설정, 암반층의 하부 경계면 설정 등과 같은 국내 지하수 순환계의 주요 수문요소들이 내포하는 불확실성이 모델 결과에 미치는 영향을 알아보기 위해 민감도 분석을 수행하였다.

2) 지하수 분수령에 대한 민감도 분석

지하수 모델 영역 설정 시 지형도를 이용하여 분수령을 따라 불투수경계로 설정한다. 하지만 지하수 분수령은 수리적 스트레스가 가해질 경우 유역 분수령과 일치하지 않을 수 있으므로, 대부분의 지하수 모델에서 지하수 분수령의 위치는 불확실성을 내포하고 있다. 본 연구에서는 분수령 위치를 모델 영역 내부로 이동시키면서, 즉 모델 영역을 4단계로 축소시키면서(4.72 ~ 26.88%) 모델 보정을 수행한 후 물수지 분석 결과를 비교하였다(Fig. 1). Fig. 2는 전 단계별 모델 보정 결과를 요약한 것으로, 모델 영역의 면적이 감소하면서 모델 보정 RMS 오차는 다소 감소하고, 함양률은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 분수령 경계의 이동으로 발생한 모델영역의 축소가 지하수 함양률에 직접적인 영향을 미치고, 물수지에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 사료된다.

Fig. 3은 민감도 분석을 위해 가정한 축소된 모델과 기존모델의 수위차를 나타낸 것으로 면적이 감소함에 따라 모델의 경계부에서 수위차가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 모델 경계부인 산지지역에 관측정이 위치하지 않아 수위변화가 모델 보정 시 전혀 반영되지 않았기 때문이다.



Fig. 1. Adjustment of locations of groundwater divide for sensitivity analysis(CASE A).

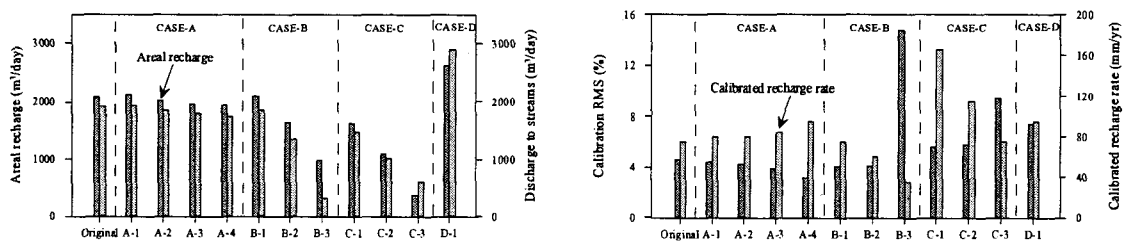


Fig. 2. Sensitivity of water balance to each CASE.

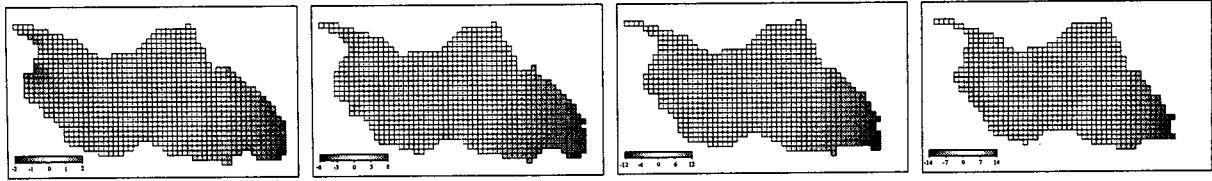


Fig. 3. Change of water levels with adjusting locations of groundwater divide.

3) 하천 지류의 경계조건 설정에 대한 민감도 분석

국내의 경우 지형적 특징으로 산지의 계곡부를 따라 흐르는 소규모 하천들이 잘 발달되어 있다. 하지만 규모가 작은 상류지역의 세류는 지하수계의 물수지에 영향을 미치지 않고 흐르기 때문에 이런 소규모 지류들의 입력여부에 따라 모델 결과의 신뢰도에 결정적인 오류로 작용될 수 있다. 따라서 지하수 모델에서 이들에 대한 경계조건 설정 여부는 지하수계와의 연결성에 따라 판단되어야 하므로 현장조사 시 이를 파악할 수 있는 자료를 확보해야 한다. 본 연구의 모델영역 내 하천은 한강의 제1지류에 해당하는 창릉천과 남쪽의 폭포동 계곡, 동쪽의 삼천리골 계곡으로 구성되어 있다. 창릉천으로 유입되는 지류들을 규모가 작은 지류부터 3단계에 걸쳐 순차적으로 제거하면서 모사를 수행하였다(Fig. 4).

각 단계별 모사결과는 하천의 지류를 제거할수록 보정 오차가 증가하고 함양률 및 물수지 분석 결과도 기존 모델과 큰 차이를 보여준다. 특히 모든 지류를 제거한 3단계의 경우 전체적인 지하수 흐름을 잘 반영하지 못함을 알 수 있다. 따라서 기존모델에서 경계조건으로 설정된 창릉천의 지류들이 현재 지하수계와 물의 입출입이 발생하는 공급원 또는 배출원 역할을 하고 있으며, 모델에서 이들을 고려하지 않을 경우 모사 결과가 크게 달라질 수 있음을 잘 보여준다.

Fig. 5는 창릉천의 지류가 제거된 모델과 기존모델의 수위차를 나타낸 것으로 주로 지류 주변부에서 모사 결과가 크게 달라지는 것을 볼 수 있다. 지류가 제거된 모델에서는 지류로의 지하수 유출이 모사되지 않으므로 지류로의 지하수 유출이 발생하는 기존 모델과 비교할 때 지류주변의 지하수위가 높게 모사되었으며, 이 지역에 위치한 보정용 관측점의 수위가 모사 결과와 불일치하면서 RMS오차가 커지는 요인으로 작용하였다. 또한 지류가 제거된 모델에서는 기존 모델에 비하여 지하수 함양률이 작게 산정되면서 지하수 분수량에 해당하는 모델의 경계부에서 전체적으로 지하수위가 하강된 것을 볼 수 있다.

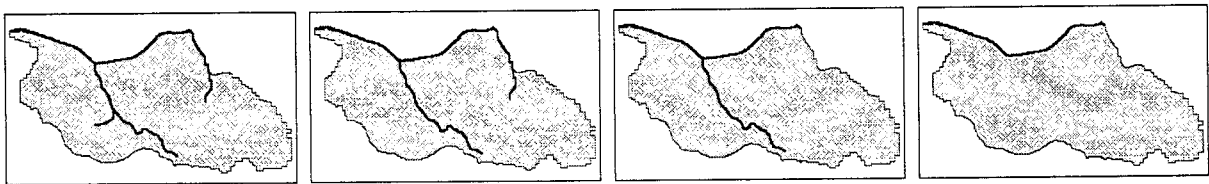


Fig. 4. Models for analyzing sensitivity of streams specified with constant head boundaries; small tributaries are consecutively eliminated from the existing model(CASE B).

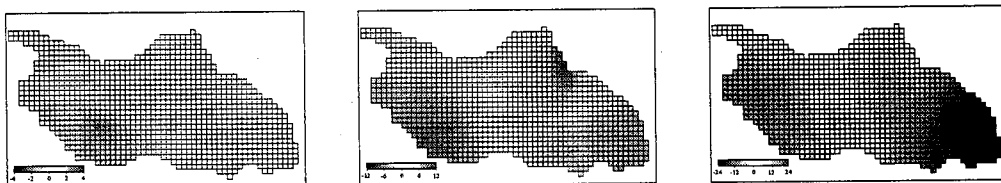


Fig. 5. Change of water levels caused by eliminating small tributaries which is specified with constant head boundaries in the existing model.

4) 암반의 하부경계에 대한 민감도 분석

우리나라는 산악지역이 국토 면적의 70%를 차지하며 충적대수층의 발달이 미약한 수리 지질학적 특징을 가진다. 또한 지하수는 암반을 통하여 32%, 충적층을 통하여 68% 흐르는 것으로 추정되었으며(전선금 외, 2005), 이는 우리나라 대부분 지역의 경우 충적대수층을 대상으로 지하수 모델을 개발하더라도 하부 암반을 통한 지하수 흐름을 고려해야 함을 의미한다. 따라서 개념 모델 수립 시 암반은 모델의 최하부층을 점할 수밖에 없으며, 개념 모델의 불확실성을 나타내는 주요 요인으로 작용한다. 따라서 본 절에서는 암반의 하부 경계면의 위치를 다양하게 변화시키면서 모사를 수행하여, 이들이 모델 결과에 어떤 영향을 미치는지 분석하였다. 민감도 분석을 위한 모델에서는 먼저 충적층이 발달된 지역만을 모델 영역으로 선정하였으며, 충적층 하부의 암반층은 하부 경계면의 고도가 전 지역에서 -20 m로 일정한 경우(CASE C-1), 층의 두께가 20 m로 일정한 경우(CASE C-2), 암반층 전체를 불투수층으로 가정하여 비활성셀로 설정한 경우(CASE C-3)로 구분하여 모사를 수행하였다(Fig. 6). 암반이 분포하는 산지를 비활성셀로 처리한 수정된 모델들은 기존모델에 비해 RMS가 크게 나타났다. 특히 암반을 모두 불투수층으로 설정하여 지하수 흐름이 전혀 고려되지 않은 CASE C-3의 경우 보정된 모델의 RMS 오차가 9.4%로 나타나, 암반의 지하수 흐름을 고려하지 않는 개념 모델은 모델지역에서 관측된 수두 분포를 잘 재현할 수 없는 것으로 해석된다. Fig. 7은 CASE C-1 및 CASE C-2 모델과 기존모델의 수위차를 나타낸 것으로 주로 모델 경계부에서 수위차가 크게 나타났다. 이는 모델의 경계에 해당하는 충적층 발달 지역의 주변부에서 충적층과 암반사이에 발생하는 수평적인 지하수 흐름이 차단되면서 모델 결과에 큰 차이를 보인 것으로 해석된다.



Fig. 6. Adjustment of configurations of the bedrock aquifer(layer 4) for sensitivity analysis.

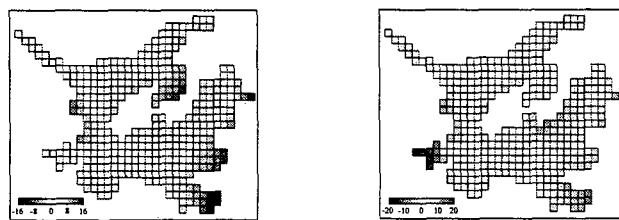


Fig. 7. Change of water levels with adjusting configurations of the bedrock aquifer (CASE C-1 and CASE C-2).

5) 단순화된 2차원 모델에 대한 민감도 분석

본 절에서는 3차원 지하수 흐름을 1층 구조인 2차원으로 수정하여 모사를 수행하고 기존 모델과 비교하였다. 기존 모델에 입력한 수리전도도는 1.28×10^{-3} (매립층), $1.89 \times 10^{-5} \sim 1.78 \times 10^{-2}$ (퇴적층), 8.73×10^{-4} (풍화대) 및 8.49×10^{-5} cm/sec(연암층)이며, 2차원 지하수 흐름 모사에 입력된 수리전도도는 각 층의 두께와 층의 수리전도도를 고려하여 산술평균하여 3.24×10^{-4} 을 구하였다. 모사 결과는 2차원으로 수정된 모델은 보정 오차가 7.4%로 크게 산정되

어 기존 모델에 비하여 현장자료의 재현성이 떨어지는 것으로 나타났다. 수위차를 비교한 결과 (Fig. 8)는 모델영역 대부분 지역에서 수위차가 발생하는 것을 알 수 있었다. 산지지역은 함양률의 증가로 기존모델보다 수위가 상승하는 것으로 나타났고, 충적층이 발달한 대부분의 지역은 수위가 하강하는 것으로 나타났다. 이는 차원을 단순화하면서 산술평균하여 구한 수리전도도가 기존의 충적층 지역의 수리전도도보다 낮게 입력된 지역임을 알 수 있다.

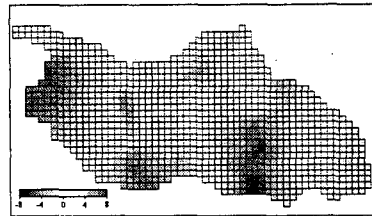


Fig. 8. Comparison of water levels of simplified 2-D model to the existing 4-layered 3-D model.

3. 결론

국내 지하수 순환계의 주요 수문요소들이 내포하는 불확실성이 모델 결과에 미치는 영향을 알아보기 위해 수행된 민감도 분석 결과 모델의 불확실성은 현장조사를 모델의 목적에 부합되도록 수행할 경우 불확실성의 문제는 다소 완화될 수 있는 것으로 판단된다. 특히 본 연구 결과는 산지에 시험정을 설치하여 현장시험을 통해 암반의 수리상수를 파악하고 지하수위 자료를 확보하는 것이 모델 개발 단계에서 매우 중요함을 보여주었다. 또한 하천의 유출량의 중요성을 인지하고 하천의 시작부와 끝부분의 유출량을 측정하여 개념 모델 수립 시 이용하게 되면 물수지 분석 시 유용한 자료로 모델의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원 (3-2-2)에 의해 수행되었습니다.

4. 참고문헌

- Konikow, L.F., and Bredehoeft, J.D., 1992, Ground-water models cannot be validated: *Advances in Water Resources*, 15, 75-83.
- Bredehoeft, J.D., 2003, From models to performance assessment: The conceptualization problem: *Ground Water*, 41(5), 571-577.
- 전선금, 구민호, 김용제, 강인옥, 2005, 국가지하수 관측망의 양수시험 자료를 이용한 국내 대수층 특성의 통계적 분석, *한국지하수토양환경학회지*, 10(6).