

지하수 모델의 주요 경계조건에 대한 민감도 분석 사례

나한나¹ · 구민호^{1*} · 차장환¹ · 김용제²

¹공주대학교 지질환경과학과, ²한국지질자원연구원

Sensitivity Analysis of Groundwater Model Predictions Associated with Uncertainty of Boundary Conditions: A Case Study

Han-Na Na¹ · Min-Ho Koo^{2*} · Jang-Hawn Cha² · Yong-Je Kim¹

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Department of Geoenvironmental Science, Kongju National University

ABSTRACT

Appropriate representation of hydrologic boundaries in groundwater models is critical to the development of a reliable model. This paper examines how the model predictions are affected by the uncertainty in the conceptualization of the hydrologic boundaries including groundwater divides, streams, and the lower boundaries of the flow system. The problem is analyzed for a study area where a number of field data for model inputs were available. First, a groundwater flow model is constructed and calibrated for the area using the Visual Modflow code. Recharge rate is used for the unknown variable determined through the calibration process. Secondly, a series of sensitivity analyses are conducted to evaluate the effects of model uncertainties embedded in specifying boundary conditions for streams and groundwater divides and specifying lower boundary of the bedrock. Finally, this paper provides some guidelines and discussions on how to deal with such hydrologic boundaries in view of developing a reliable conceptual model for the groundwater flow system of Korea.

Key word : Conceptual model, Sensitivity analysis, Boundary condition, Groundwater divide, Fractured-rock aquifer

요 약 문

지하수 모델 개발 시 수문 경계를 실제 지하수계에 부합되도록 개념화하는 것은 모델의 신뢰도를 결정하는데 매우 중요하다. 본 논문에서는 지하수 분수량, 하천, 대수층의 하부 경계면 등의 수문 경계를 모델에서 개념화할 때 수반되는 불확실성이 모델 결과에 미치는 영향을 고찰하였다. 첫째, 연구지역을 대상으로 현장시험을 수행하여 모델 입력 자료를 확보하였으며, Visual Modflow 프로그램을 이용하여 연구지역에 대한 지하수 흐름 모델을 개발하였다. 지하수 함양량을 모델 보정 인자로 설정하였으며, 현장에서 관측된 지하수위 자료를 이용하여 모델을 보정하였다. 둘째, 민감도 분석을 통하여 지하수 분수량의 위치, 하천 지류들의 경계조건 설정 여부, 암반의 하부 경계면의 위치 등이 모델 결과에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 셋째, 민감도 분석 결과에 근거하여, 국내 지하수계를 대상으로 신뢰성 있는 개념 모델을 개발하고자 할 때 요구되는 주요 내용들을 토의하였으며, 현장조사 단계에서 부지특성화를 위해 필요한 효과적인 전략을 제시하였다.

주제어 : 개념모델, 민감도 분석, 경계조건, 지하수 분수량, 균열암반 대수층

*Corresponding author : koo@kongju.ac.kr

원고접수일 : 2007. 4. 21 게재승인일 : 2007. 6. 7

질의 및 토의 : 2007. 8. 31 까지

1. 서 론

국내의 지하수 모델링에 관한 연구는 1980년대 후반부터 시작되었으며(함세영, 김연기, 1989), 연구 내용은 주로 수치모델 기법에 관한 이론적 연구(이강근, 1993; 박유철 외, 1995; 박유철, 이강근, 1995; 박유철, 2002)와 연구 지역에 대한 지하수 모델 개발 사례(강병무 외, 1993; 김윤영, 이강근, 1999)로 대별된다. 2000년대에 오면서 강변여과 방식의 수자원 개발에 대한 관심이 높아지면서 강변여과 취수 부지에 대한 지하수 모델링 연구가 활발히 수행되고 있다(함세영 외, 2004; 함세영 외, 2005; 원이정 외, 2006). 한편 최근 국외의 지하수 모델링에 대한 연구는 주로 모델링 과정에서 발생할 수 있는 문제점에 대한 분석(Refsgaard, 1997), 유역 지하수계의 규명을 위한 연구(McKeown et al., 1999), 지표수와 지하수의 연계 모델(Ramireddygarri et al., 2000), 개념모델의 적정성 평가를 위한 모델링 기법 비교 연구(Selroos, et al., 2002) 등이 보고되었다.

최근 지하수 관련 업계에서는 지하수 개발 사업과 관련된 환경영향조사의 주요 내용으로 지하수 모델링을 수행하고 있으며, 도로, 철도, 및 터널 공사와 같이 일정 규모 이상의 국토개발 사업에서도 지하수 모델링의 필요성이 대두되고 있는 실정이다. 김장주(1999)는 그동안 업계에서 거의 형식적으로 수행하여 왔던 지하수 모델의 적용 현황과 문제점을 분석하였으며, 대부분의 경우 모델링 수행 과정에 상당한 문제가 있는 것으로 지적하였다. 국내의 경우 환경영향평가와 같이 일시적인 필요성에 의하여 단기 과제로 연구가 수행되어 지하수모델 규약(protocol)의 전 과정을 충실하게 이행한 신뢰성 있는 모델 개발 사례는 극히 드물다.

지하수 모델 개발은 일반적으로 모델의 목적 설정, 자료수집, 개념모델 수립, 모델 설계, 모델 보정, 민감도 분석, 예측, 결과제시 및 사후검사의 순으로 수행된다(Anderson and Woessner, 1992). 최근 Reilly and Harbaugh(2004)는 신뢰성 있는 지하수 모델 개발을 위해 필요한 주요 가이드라인을 제시한 바 있다. 개념모델은 지하수 흐름계를 도식화하여 표현한 것으로 지하수계의 구조(framework) 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. 개념모델은 모델 대상 지역에서 발생하는 지

하수 흐름계를 어떤 수리지질학적 관점에서 보느냐에 따라 크게 달라질 수 있으며, 이는 궁극적으로 지하수 모델에 의한 장기 예측 결과의 차이를 유발시킨다. 보정이 잘 수행된 모델이라도 개념 모델을 잘못 설정할 경우 예측 결과의 신뢰도는 떨어질 수밖에 없다. 따라서 모델 보정 결과가 다소의 오차를 포함하더라도 현장의 실제 상황이 잘 재현된 개념모델을 이용할 때 모델링 결과의 신뢰도를 높일 수 있다. 잘못 설정된 개념모델은 모델 결과의 관측 자료와의 일치 여부에 관계없이 잘못된 예측결과를 초래할 수밖에 없으며(Konikow and Bredehoeft, 1992), 이러한 이유로 개념모델의 중요성은 최근까지 활발히 논의되고 있다(Bredehoeft, 2003).

경계조건의 설정은 개념모델 수립 단계에서 가장 중요한 요소이며, 지하수 모델링 분야에서 그 중요성이 강조되고 있다(Franke et al., 1987; Franke and Reilly, 1987). 편미분방정식으로 표현되는 지하수흐름 방정식이 유일해(unique solution)를 갖기 위해서는 모델영역의 경계부에서 수두 또는 수두구배로 경계조건이 설정되어야 한다. 또한 모델 영역 내부에서 발생하는 지하수 함양, 지하수와 하천의 상호 작용 등도 다양한 경계조건으로 표현되므로 경계조건은 미분방정식을 구성하는 요소로서의 의미뿐만 아니라 지하수 흐름계를 지배하는 가장 중요한 인자라고 할 수 있다. Reilly(2001)는 지하수 모델에서 수리적 경계 역할을 하는 다양한 공급 및 배출원에 대하여 이들의 조건에 따라 또한 모델의 목적에 따라 어떤 경계조건을 설정해야 타당한지 논의하였다.

개념 모델 개발 시 모델 개발자들은 경계조건 설정과 관련하여 다음과 같은 불확실성의 문제들에 접하게 된다. 첫째는 모델 영역의 경계를 어떻게 설정하느냐의 문제이다. 지하수 모델의 경계로 설정되는 유역 분수령은 일반적으로 실제 지하수 분수령과 일치하지 않으므로 지하수 모델에서 불투수경계로 설정되는 분수령의 위치는 불확실성을 내포할 수밖에 없다. 둘째, 모델 영역 내에 흐르는 크고 작은 하천들을 모델에서 어느 정도 수준까지 경계조건으로 반영해야 하는지의 여부는 모델 설계 시 어려운 문제이다. 산지의 소규모 골짜기를 따라 흐르는 하천의 지류들은 주로 지표면에 노출된 기반암 위를 흐르며, 지형 및 지질구조에 따라 또는 시기에 따라 하부 지하수계와 연결 또는 단절되어 있어, 지하수 모델에서 이들의 경계조건으로서의 수용 여부에 따라 모델의 결과가 크게 달라질 수밖에 없다. 셋째, 산악지역이 국토 면적의 70%를 차지하는 국내 지하수계를 대상으로 모델 개발 시 암반층을 항상 고려해야 하며, 이 경우 모델에서 어느 심도까지

지하수 흐름계로 간주할 것인지에 대한 문제에 접하게 된다. 즉, 국내 지하수 모델에서는 암반의 하부 경계면 심도를 결정하는 것이 임의적일 수밖에 없다.

본 연구의 목적은 지하수 분수량, 하천, 암반층의 하부 경계면 등과 같은 모델의 주요 수문 경계들을 지하수 모델에서 개념화할 때 수반되는 불확실성이 모델 결과에 미치는 영향을 정량적으로 고찰하는데 있다.

2. 지하수 흐름 모델 개발

2.1. 연구지역

연구지역은 행정구역상 서울특별시 은평구 일원으로, 북동쪽으로는 북한산(836.5 m), 도봉산(740 m), 수락산(638 m) 등 해발 500 m 이상의 산들이 발달되어 있으며, 북한산에서 시작해 고양시를 거쳐 한강으로 유입되는 창릉천이 위치하고 있다. 연구지역의 지질은 주로 선캄브리아기의 호상편마암류와 이들을 관입한 중생대의 각종 화성암류로 대별되며, 이들을 모두 부정합으로 덮고 있는 제 4기의 충적층이 분포한다(Fig. 1). 편마암류들 중 특히 호상흑운모편마암 내에는 곳곳에 소량의 규암, 석회암 및 석회규산염암과 같은 퇴적 기원물 들을 내재하고 있다(홍성호, 1982).

2.2. 현장수리시험

연구지역은 택지개발을 위하여 조성된 부지로 지반조사를 위하여 86개 시추공이 개발되었다(Fig. 2). 시추공은 모두 NX공으로 기반암 상부 연암층까지 시추되었으며, 심도는 6~20 m의 범위이다. 시추공 주상도를 통해 확인된 연구지역 내 지층은 최상부에 매립층이 분포하며, 그 하

부에 사력질의 미고결퇴적층, 풍화대, 연암층을 포함하는 기반암이 분포한다. 매립층, 미고결퇴적층 및 풍화대의 두께는 각각 3.5~6.9 m, 1.6~7.4 m, 8.0~16.0 m이며, 지하수면은 해발 17.9~67.0 m에 위치한다(Fig. 3).

Fig. 2의 86개 시추공 중 37개의 시추공을 대상으로 양수시험과 순간수위변화시험을 수행하였다. 양수시험은 3~4개의 시추공이 밀집되어 분포하는 6개의 관정군에 대하여 실시하였으며, 나머지 공에 대하여는 순간수위변화시험을 수행하였다. 양수시험 시 양수정과 관측정간의 거리는 5~15 m이다. 수위변화는 자동계측기를 이용하여 10초 간격으로 측정하였으며, 일정 시간 간격으로 양수량을 측정하여 자료 해석 시 평균 양수량 산정에 이용하였다. Theis법 및 Cooper-Jacob법을 이용하여 산정된 수리전도도는 $3.0 \times 10^{-5} \sim 1.4 \times 10^{-2}$ cm/sec로 불균질성이 크게 나타났다.

순간수위변화시험은 외경 50 mm, 길이 1.4 m의 PVC 관(1.66 L)에 모래를 채우고 양단에 고리를 부착시켜 제작한 슬러그를 이용하여 실시하였으며, 시험 시 순간수위변화를 발생시키기 위하여 주입과 제거가 최대한 단시간에 이루어지도록 하였다. 수위변화는 자동계측기를 이용하여 0.5초 간격으로 관측하였으며, 슬러그 제거 후 80%의 수위회복이 이루어진 후 시험을 종료하였다. 시험 결과 동일한 부피의 슬러그를 이용하여 시험을 실시하였음에도 불구하고 일부 시험정의 경우 시험기작(주입, 제거)에 따라 초기 수위 변화량이 다르게 관측되었다. 이는 미고결층 구간에 설치된 PVC 케이싱과 공벽 사이의 빈 공간이 시험 결과에 영향을 미친 것으로 해석되며, 이러한 우물 저장효과는 시험 시작 직후 수 초 동안의 관측 자료에서 빠른 수위 변화로 나타났다. Bouwer-Rice법과

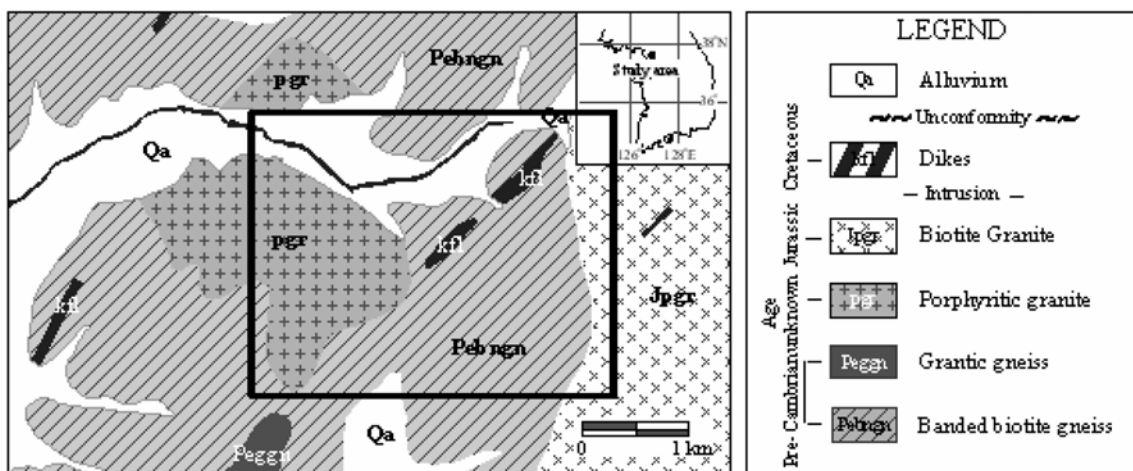


Fig. 1. Geologic map of the study area.

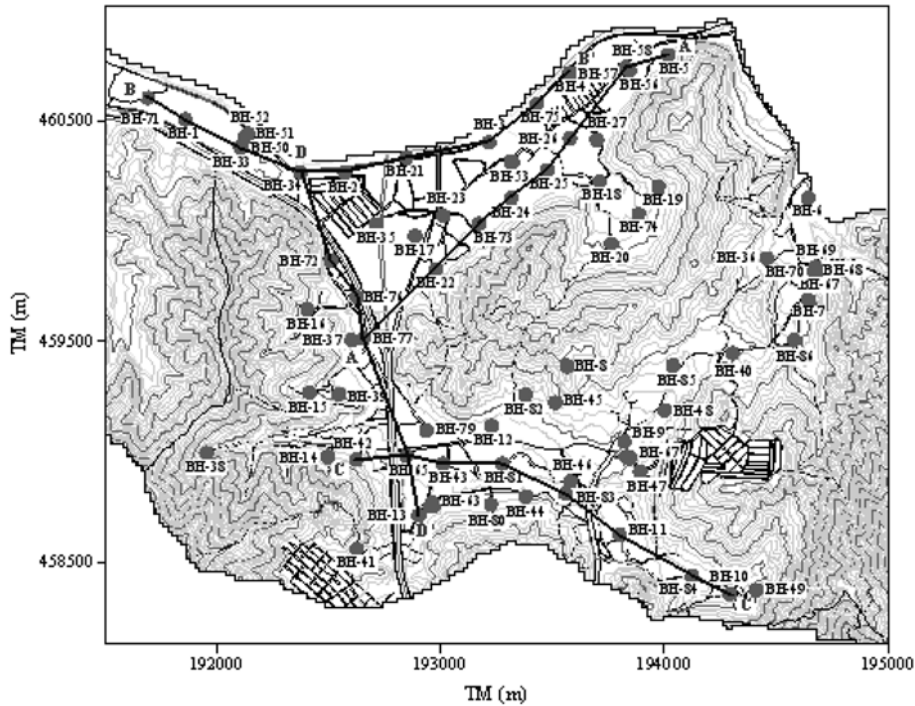


Fig. 2. Location of test boreholes.

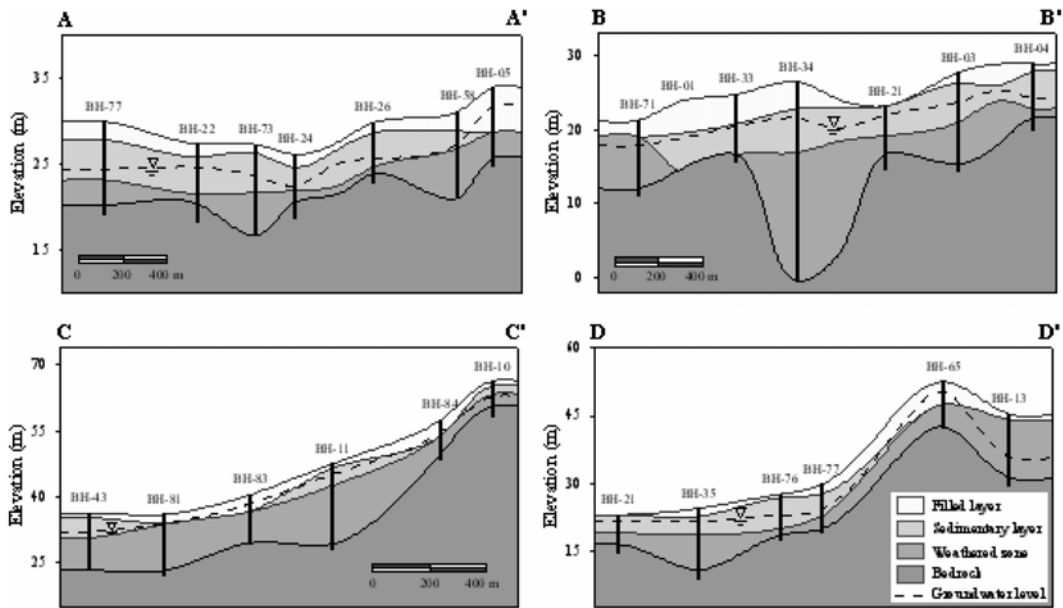


Fig. 3. Cross section of hydrogeologic formations. Fig. 2 shows the location of the cross section.

Hvorslev법을 이용하여 산정된 수리전도도는 $5.7 \times 10^{-6} \sim 1.3 \times 10^{-2}$ cm/sec이다.

연구지역 최상부에 위치하는 매립층의 수리전도도를 측정하기 위하여 디스크장력침투계를 이용하여 지표투수시험을 실시하였다. 6개 지점에 대한 지표투수시험 결과 매

립층의 포화 수리전도도는 $3.4 \times 10^{-4} \sim 8.5 \times 10^{-3}$ cm/sec이다.

2.3. 모델 설계

2.3.1. 수문지질단위(Hydrogeologic Units)

제1 수문지질단위는 연구지역 최상부층인 매립층 및 봉

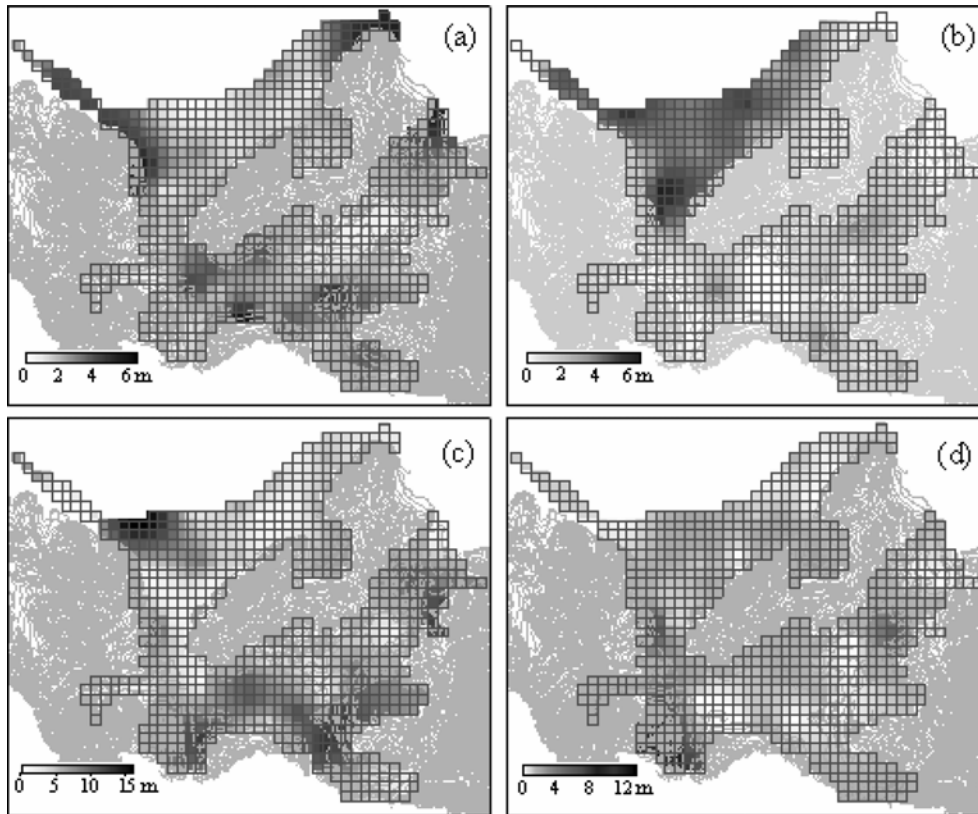


Fig. 4. Thickness of the hydrogeologic units: (a) filled layer, (b) alluvial layer, (c) weathered zone, and (d) weathered bedrock.

적층으로 실트 및 점토질 모래, 세립 내지 조립질 모래가 섞인 자갈 등으로 구성된다. 제2 수문지질단위는 매립층 하부에 분포하는 미고결퇴적층으로 주로 실트 및 자갈이 섞인 모래, 조립질의 모래가 섞인 자갈로 구성된다. 제3 수문지질단위는 풍화대이며 풍화토층과 풍화암층으로 구분된다. 풍화토층은 미고결퇴적층, 매립층, 또는 붕적층 하부에 위치하며 주로 실트질 모래로 구성된다. 풍화암층은 풍화토층 또는 붕적층 하부에 위치한다. 제4 수문지질단위는 풍화대 하부의 연암층을 포함하는 기반암층이다. 시추상도에 나타난 각 지층의 두께 자료를 크리강하여 층 후 분포도를 작성하였다(Fig. 4).

2.3.2. 수문 경계(Hydrologic boundaries)

하천은 지하수계의 수두 분포와 지하수 흐름에 가장 큰 영향을 미치는 대표적인 수문 경계라 할 수 있다. 하천은 지하수 모델에서 다양한 방법으로 개념화할 수 있다. Modflow에서 하천을 경계조건으로 개념화하는 방법은 5 가지로, 1) 하천이 위치한 셀에서의 하천 수두를 이용하는 일정수두 경계조건, 2) 하천과 지하수계 사이의 흐름량을 일정하게 정의하는 고정흐름 경계조건, 3) 하천과 지

하수계 사이의 흐름량을 지하수 수두와의 선형적인 관계 식으로 정의하는 수두종속흐름 경계조건, 4) 지하수 수두가 하천 수위보다 작을 경우 하천과 지하수계의 상호작용이 중단되는 배수 경계조건, 5) 하천 바닥고를 고려하여 하천과 지하수계의 상호작용을 정의하는 하천 경계조건 등이 이용될 수 있다. 개념화된 각각의 모델은 동일한 결과를 보이거나 매우 다른 결과를 보이기도 하므로, 어떤 방법을 사용할 것인지를 선택할 때 세심한 주의가 필요하다. 모델의 목적, 모델의 단순화 정도, 획득된 자료의 종류와 양 등이 고려되어야 하며 최종적인 판단은 결국 실제의 물리적인 시스템을 모델에서 반영할 수 있도록 모델 개발자가 선택하여야 한다.

본 연구지역의 경우 창릉천과 창릉천의 지류인 비봉천 및 진관천이 지하수 배출이 발생하는 주요 수문 경계이며 본 모델에서 일정수두 경계로 설정하였다(Fig. 5). 하천수위는 EL + 16.0~61.0 m이며 모델 영역의 나머지 경계는 유역의 경계에 해당하는 지하수 분수령이다.

2.3.3. 수리 특성(Hydraulic properties)

매립층(제 1층)의 수리전도도는 지표투수시험을 통해 구

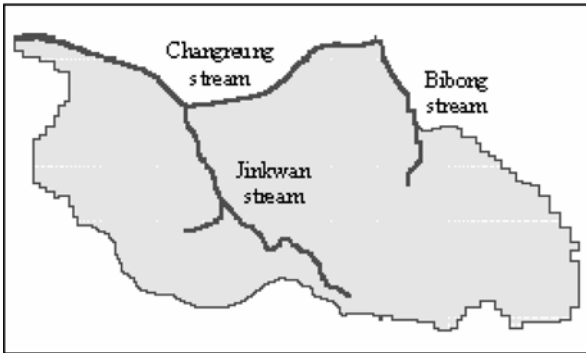


Fig. 5. Model grid and streams specified with constant head boundary conditions.

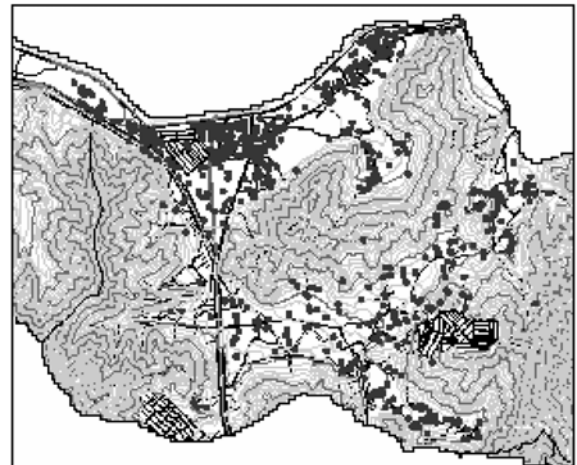


Fig. 7. Location of pumping wells in the study area.

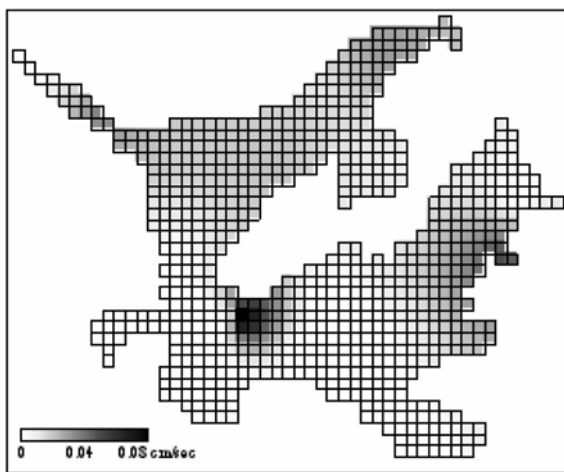


Fig. 6. Distribution of hydraulic conductivity for layer 2 of the model.

한 평균값인 1.28×10^{-3} cm/sec을 사용하였다. 미고결퇴적층(제 2층)은 본 모델의 주 대수층에 해당되므로 이 층의 수리전도도는 본 모델의 모사 결과에 가장 큰 영향을 미치는 변수이다. 각 시험정의 현장시험 결과 산정된 수리전도도로부터 각 층의 두께를 고려하여 퇴적층의 수리전도도를 계산한 후 크리깅을 통해 제 2층의 수리전도도 분포도를 작성하여(Fig. 6) 모델의 입력값으로 이용하였다. 풍화대(제 3층)의 수리전도도는 지층단면도를 통해 풍화대를 대표할 수 있다고 판단되는 시험정(BH-5, 13, 34, 65, 71 등)의 현장시험 자료를 이용하여 구하였다(8.73×10^{-4} cm/sec). 연암층을 포함하는 암반(제 4층)의 경우 시추공의 심도가 깊지 않아 수리전도도에 관한 자료를 얻을 수 없었으며, 우리나라 화강암지역의 암반평균값인 9.63×10^{-5} cm/sec을 이용하였다(전선금 외, 2005).

2.3.4. 공급원 및 배출원(Source and sinks)

모델의 지하수 공급원 및 배출원은 지하수 함양(areal

recharge), 하천과 지하수계와의 상호 작용, 우물을 통한 지하수 채수 등을 들 수 있다. 강수의 침투, 투과에 의해 발생하는 지하수 함양은 본 지역 지하수계의 주요 공급원이며, 본 지역에 대한 지하수 함양 산정 자료가 전무하므로 모델 보정을 통하여 추정하였다. 조사지역에서 사용되는 우물은 총 582공으로 은평구청에서 조사한 ‘2003년 지역별 지하수 이용현황’ 자료를 이용하여 우물위치를 파악하여(Fig. 7) 지하수 배출원으로 모델에 입력하였다. 또한 우물의 양수량은 지하수조사연보(건설교통부, 2004년)의 용도에 따른 동별 사용량을 이용하여 파악하였으며, 공당 평균 $1.26 \text{ m}^3/\text{day}$ 정도의 지하수를 사용하는 것으로 나타났다.

2.4. 모델 보정

현장 관측 자료가 전무한 지하수 함양량을 단일 보정인자로 사용하여 모델 보정을 수행하였다. 150 mm/yr의 함양률을 모델 보정의 초기값으로 설정하였으며, 이 경우 모사 결과의 지하수위가 실측 자료보다 전체적으로 높게 나타났다. 따라서 150 mm/yr이하의 범위에서 함양률을 점차 줄여가면서 모델 보정을 수행하였으며, Fig. 8a와 같이 함양률이 75 mm/yr일 때 Normalized RMS(Root Mean Square) 오차가 4.6%로 가장 작게 나타났다. 모델 보정 시 17개 관측정의 지하수위 관측 자료가 이용되었으며, Fig. 8b는 관측된 지하수위와 보정된 정류 모델의 모사 결과를 비교한 것이다.

3. 주요 모델 경계에 대한 민감도 분석

3.1. 지하수 분수령

지하수 모델에서 모델의 영역경계를 설정할 때 일반적

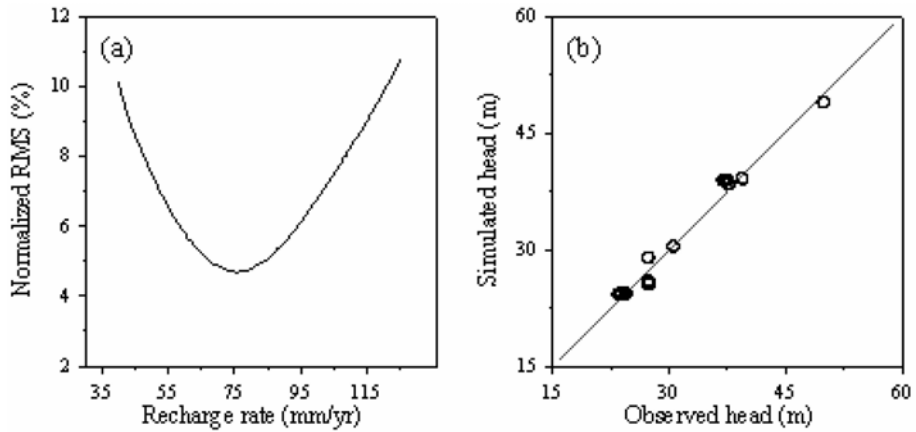


Fig. 8. Results of steady-state model calibration: (a) change of normalized RMS with recharge rate, (b) comparison of simulated and measured water levels at 17 selected wells.

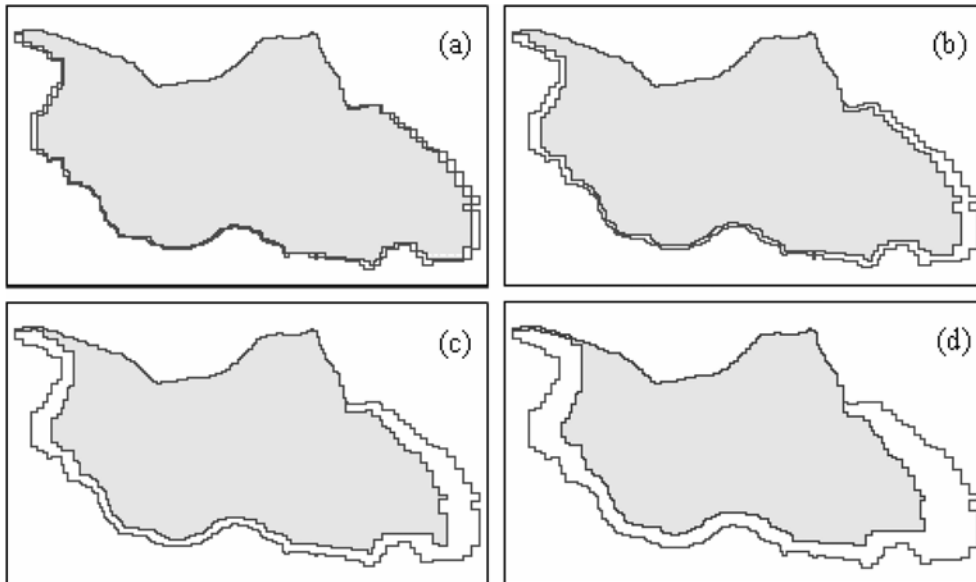


Fig. 9. Adjustment of locations of the groundwater divide: (a) Model A1, (b) Model A2, (c) Model A3, and (d) Model A4.

으로 유역의 경계에 해당하는 분수량을 찾아낸 후, 이를 해당 지하수계의 분수량으로 간주하여 모델에서 불투수경계로 설정한다. 하지만 지하수 분수량은 대수층의 구조, 대수층의 수리특성, 지하수 함양의 공간적 분포, 배출 지역의 위치 및 배출 기작 등 복잡한 수리지질학적 요인에 의하여 유역 분수량과 일치하지 않을 수 있으며, 결과적으로 대부분의 지하수 모델에서 지하수 분수량의 위치는 불확실성을 내포할 수밖에 없다. 설령 지하수 분수량이 유역 분수량과 일치하더라도, 지하수 개발로 인하여 모델 지역의 자연적인 지하수 순환계가 교란될 경우 지하수 분수량은 시간에 따라 위치가 변하는 동적인 경계가 되므로

모델 개발 시 이에 대한 검토 또는 민감도 분석이 요망된다.

본 연구에서는 모델의 영역 경계로 설정된 지하수 분수량 위치의 불확실성이 모델 결과에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석을 위하여 Fig. 9와 같이 분수량 위치를 이동시켜 모델영역을 4단계로 축소시키면서 모델을 재보정하였으며 기존 모델과 비교하였다. Model A1은 기존 모델의 분수량 경계에서 안쪽으로 격자를 하나씩 줄여 설정된 것으로 모델 영역의 면적은 기존 모델의 95.3%를 차지한다. Model A2는 2칸의 격자를 줄여 설정된 것으로 기존 모델 면적

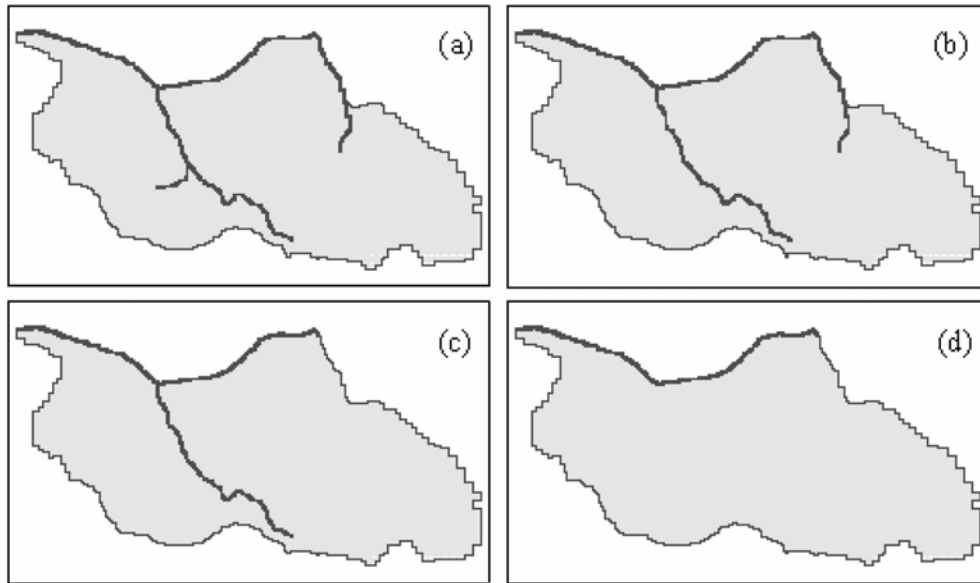


Fig. 10. Models for analyzing sensitivity of streams specified with constant head boundaries. Small tributaries are consecutively eliminated from the existing model: (a) original model, (b) Model B1, (c) Model B2, and (d) Model B3.

의 90.8%이다. Model A3 및 Model A4는 기존의 분수령 경계에서 각각 4칸, 7칸씩 축소하여 설정된 것으로 기존 모델 면적의 82.6% 및 73.1%이다.

3.2. 하천 지류의 경계조건

국내의 경우 산악지역이 국토 면적의 70%를 차지하는 지형적 특징으로 산지의 계곡부를 따라 흐르는 소규모 하천들이 잘 발달되어 있으며, 이들 지류들은 하부 대수층과 잘 연결되어 지하수계의 주요 공급 또는 배출원 역할을 하기도 하지만 규모가 작은 상류지역 세류의 경우 지하수계의 물수지에 영향을 미치지 않고 흐르기도 한다. 지하수 모델에서 산지의 소지류에 대하여 일정수두경계 또는 하천경계 모델을 적용할 경우 소지류가 지하수계의 공급원 역할을 하게 되므로 모델 결과의 신뢰도에 결정적인 오류로 작용될 수 있다. 따라서 지하수 모델에서 이들에 대한 경계조건 설정 여부는 지하수계와의 연결성에 따라 판단되어야 하므로 현장 조사 시 이를 파악할 수 있는 자료를 확보해야 한다.

본 연구의 모델영역 내 하천은 한강의 제1지류에 해당하는 창릉천과 창릉천으로 유입되는 남쪽의 폭포동 계곡 및 동쪽의 삼천리골 계곡의 지류로 구성되어 있다. 폭포동 계곡을 따라 흐르는 지류는 대부분 복개되어 도로로 이용되고 있다. 이들 하천은 기존 모델에서 일정수두경계로 설정하였으며, 하천의 수면고도는 16~61 m로 모델의 2층과 3층에 해당된다. 창릉천으로 유입되는 지류들의 경

계조건 설정 여부에 따라 모델 결과가 어떻게 달라지는지 알아보기 위해 Fig. 10과 같이 창릉천으로 유입되는 규모가 작은 지류들을 3단계에 걸쳐 순차적으로 제거하면서 모사를 수행하였다. Model B1은 기존 모델에서 폭포동 계곡부로 유입되는 지류를 제거한 경우, Model B2는 폭포동 계곡부로 유입되는 지류와 삼천리골 계곡부의 창릉천 지류를 제거한 경우, Model B3은 창릉천으로 유입되는 지류를 모두 제거한 경우이다.

3.3. 암반의 하부경계

미국의 Ogallala 대수층과 같이 규모가 큰 충적대수층의 경우 하부의 암반은 지하수계의 물수지에 큰 영향을 미치지 않으므로 지하수 모델 개발 시 모델 하부의 불투수경계로 간주한다(Blanford et al., 2003). Ogallala 대수층은 면적이 174,050 mi²이며, 평균 두께가 190 ft 정도인 것으로 보고되어, 규모면에서 국내 충적대수층과는 큰 대조를 보인다. 우리나라는 산악지역이 국토 면적의 대부분을 차지하며 충적대수층의 발달이 미약한 수리지질학적 특징을 가진다. 또한 충적층 지역이더라도 하부 암반을 통하여 흐르는 지하수량이 전체의 32% 정도를 차지하는 것으로 추정된 바 있으며(전선금 외, 2005), 이는 충적층이 잘 발달된 일부 평야 지대를 제외한 대부분 지역의 경우 충적대수층을 대상으로 지하수 모델을 개발하더라도 하부 암반을 통한 지하수 흐름을 고려해야 함을 의미한다. 따라서 지하수 모델 개발 시 암반은 모델의 최하부층을 점

할 수밖에 없으며, 모델의 불확실성을 나타내는 주요 요인으로 작용한다.

본 연구의 기존 모델에서는 모델 지역 암반에 대한 수리지학적 정보가 전무하여 국내 화강암 지역이 나타내는 평균수리전도도 값을 모델 입력값으로 이용하였으며, 암반의 하부경계면은 모델 영역 전체에서 -20 m로 일정하게 설정하여 모사를 수행하였다. 이와 같이 국내 지하수 모델에서는 암반의 하부 경계면 심도를 결정하는 것이 매우 임의적인 수밖에 없다. 충적층의 경우 시추 주상도를 통하여 대수층의 하부 경계를 비교적 분명하게 파악할 수 있지만, 암반의 경우 시추 심도가 임의적으로 결정되므로 지하수 모델에서 어느 심도까지 지하수 흐름계로 간주할 것인지는 어려운 문제이다.

본 연구에서는 암반의 하부경계면의 위치를 다양하게

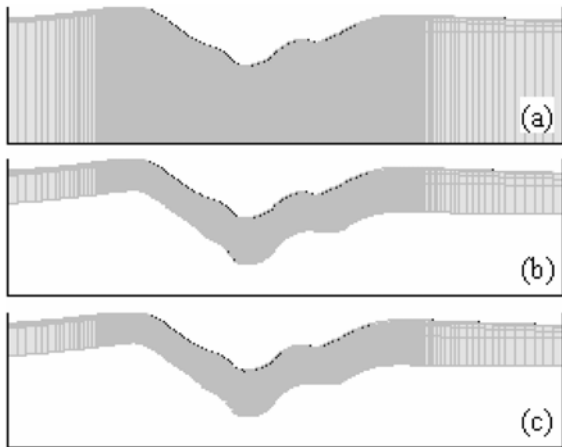


Fig. 11. Configurations of the bedrock aquifer (layer 4): (a) Model C1, (b) Model C2, and (c) Model C3.

변화시키며 모사를 수행하여, 이들이 모델 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 민감도 분석을 위한 모델에서는 충적층이 발달된 지역만을 모델 영역으로 설정하였으며, Fig. 11과 같이 충적층 하부 암반층의 모델 경계면의 고도가 전 지역에서 -20 m로 일정한 경우(Model C1), 충적층 하부 암반층의 두께가 20 m로 일정한 경우(Model C2), 암반층 전체를 불투수층으로 설정한 경우(Model C3)로 구분하여 모사를 수행하였다.

3.4. 분석 결과

Table 1과 Fig. 12는 분석 결과를 종합한 것으로 기존 모델과 민감도 분석을 위해 이용된 10개 모델의 모의 결과를 비교한 것이다. Fig. 12a는 각 모델의 RMS 오차와 모델 보정을 통해 산정된 지하수 함양률을 나타내며, Fig. 12b는 물수지 분석에 의해 계산된 총함양량과 하천으로의 기저유출량을 나타낸다.

먼저 지하수 분수령의 위치를 변화시킨 Model A의 결과를 보면 모델 면적이 감소하면서 보정 모델의 RMS 오차가 다소 감소하였으며, 함양률은 증가하는 것으로 나타났다. Model A4의 경우, 즉 모델 면적이 기존 모델의 73.1%일 때 지하수 함양률은 95 mm/yr로 기존 모델과 큰 차이를 보여 불확실하게 설정된 지하수 분수령이 모델 보정에 의해 산정된 지하수 함양률에 직접적인 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 반면 정류모사의 물수지 분석 결과를 보면 모델 영역의 축소에 따른 지하수 유출입량의 변화가 $\pm 5\%$ 이내로 나타났으며, 이는 지하수 분수령의 위치가 대수층의 물수지에 크게 영향을 미치지 않는 인자임을 보여준다. 하지만 지하수 분수령은 지하수계에 대해

Table 1. Comparison of calibrated water budgets

Models	Calibration RMS(%)	Recharge (mm/yr)	Inflows (m ³ /day)			Outflows (m ³ /day)	
			Prescribed head boundary	Recharge	Total inflows	Prescribed head boundary	Total outflows
Original	4.6	75	540.5	2094.0	2634.5	1917.7	2634.5
Model A1	4.4	80	524.7	2129.4	2654.1	1937.7	2654.1
Model A2	4.2	80	539.7	2026.9	2566.6	1851.0	2566.6
Model A3	3.9	85	544.9	1960.4	2505.3	1791.4	2505.3
Model A4	3.2	95	491.4	1940.7	2432.1	1740.5	2432.1
Model B1	4.0	75	458.2	2096.4	2554.6	1837.8	2554.6
Model B2	4.1	60	423.2	1650.4	2073.6	1356.2	2073.6
Model B3	14.7	35	49.9	981.2	1031.1	312.1	1031.1
Model C1	5.6	165	550.3	1634.5	2184.8	1470.1	2184.8
Model C2	5.7	115	559.1	1091.2	1650.3	1024.8	1650.3
Model C3	9.4	75	304.6	383.9	988.5	613.2	988.5

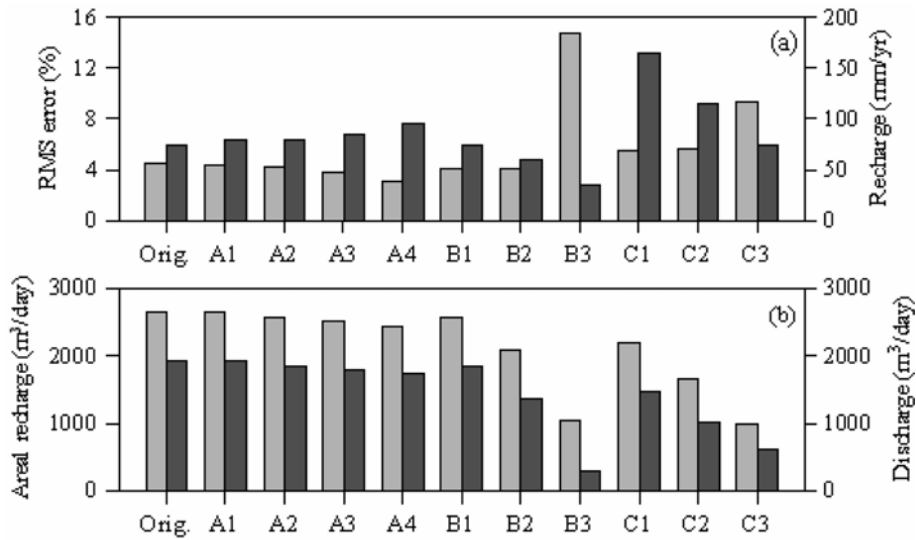


Fig. 12. Comparison of the original and the modified models: (a) calibrated RMS errors and recharge rate, (b) total amount of areal recharge and discharge to streams.

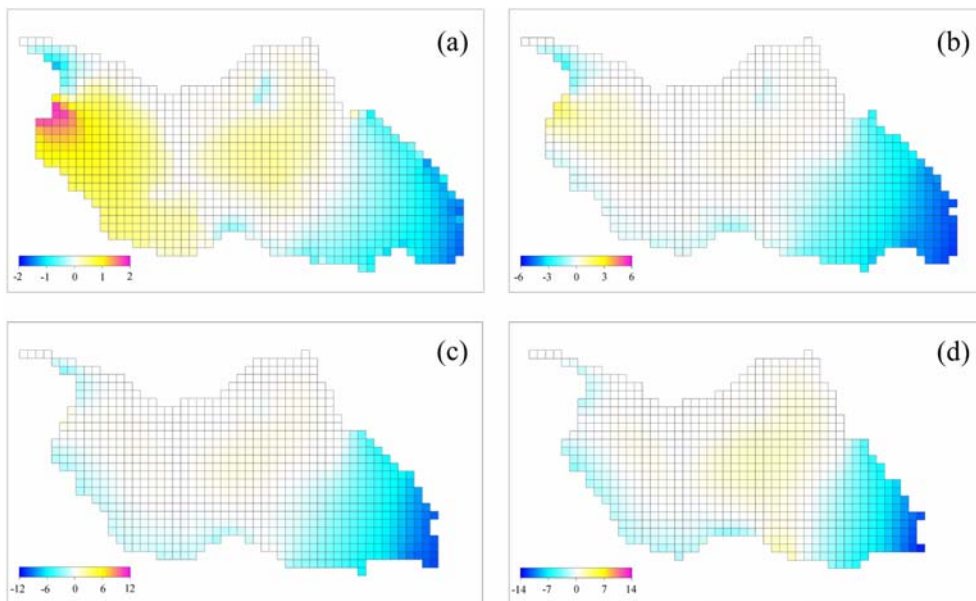


Fig. 13. Change of simulated water levels caused by adjusting locations of the groundwater divide: (a) Model A1, (b) Model A2, (c) Model A3, and (d) Model A4.

지는 스트레스에 의해 그 위치가 변할 수 있는 동적인 경계이므로 지하수 개발에 따른 물수지 변화를 예측하는 모델의 경우 지하수 분수량에 대한 모델의 민감도는 매우 높아질 것으로 예상된다.

Fig. 13은 지하수 분수량의 민감도 분석을 위해 이용된 모델과 기존 모델의 지하수위의 차를 도시한 것이다. 모델 면적이 감소함에 따라 기존 모델과의 수위 차가 점차 커지는 경향을 보이며, 주로 모델의 경계부에서 두드러지

게 나타났다. 지하수 분수량으로 설정된 모델의 경계부는 산지에 해당되며 관측정이 위치하지 않아 이 지역에서 발생하는 모델의 수위 변화가 모델 보정 시 전혀 반영되지 않았다. 지하수 분수량의 위치에 대한 모델의 민감도가 더 효율적으로 분석되기 위해서는 모델 보정에 이용될 수 있는 관측정이 유역 경계 부근에 설치되는 것이 바람직하다. 따라서 지하수 모델 개발의 측면에서 보면 대수층 특성화를 위한 지반 조사계획 설계 시 다소 경비가 소요되더라

도 유역 경계부에 해당하는 산지에 시험정을 설치하는 것을 고려해야 한다.

한편 Table 1에서 Model B의 결과를 보면 경계조건 설정 시 창릉천으로 유입되는 지류들을 모델에서 제거함에 따라 모델 보정 오차가 점차 증가하며, 함양률 및 물수지를 구성하는 각 성분도 기존 모델의 결과와 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 특히 창릉천으로 유입되는 모든 지류를 제거한 Model B3의 경우 보정된 모델의 RMS 오차가 14.7%로 큰 값을 보여 관측된 지하수위 분포를 잘 재현하지 못하는 것으로 나타났다. 또한 기존 모델과 비교할 때 보정된 모델의 지하수 함양률이 35 mm/yr로 매우 작은 값을 보였으며, 물수지 분석 결과에서 하천을 통한 지하수의 유입 및 유출량이 크게 줄어든 것으로 나타났다. 따라서 하천 지류들에 대한 이러한 민감도 분석 결과는 기존 모델에서 경계조건으로 설정된 창릉천의 지류들이 지하수계와 물의 유출입이 발생하는 공급원 또는 배출원 역할을 하고 있으며, 모델에서 이들을 고려하지 않을 경우 모사 결과가 크게 달라질 수 있음을 잘 보여준다. 결론적으로 경계조건 설정 시 지하수계와 상호작용을 하는 하천이 모델에서 제외될 경우 지하수 함양률이 과소 평가되며, 지하수 물수지에도 큰 영향을 미쳐 결국 모델의 신뢰도를 떨어뜨리는 결정적인 요인으로 작용한다.

Fig. 14는 창릉천의 지류가 제거된 모델과 기존 모델의 지하수위의 차를 나타낸 것으로, 주로 지류 주변부에서 모사 결과가 크게 달라지는 것을 볼 수 있다. 지류가 제거된 모델에서는 지류로의 지하수 유출이 발생하지 않는 것으로 모사되므로 기존 모델과 비교할 때 지류 주변의 지하수위가 높게 나타나며, 이 지역에 위치한 모델 보정용 관측정의 수위가 모사 결과와 불일치하면서 RMS 오차가 커지는 요인으로 작용하였다. 또한 지류가 제거된 모델에서는 기존 모델에 비하여 지하수 함양률이 작게 산정되면서 지하수 분수령에 해당하는 모델의 경계부에서 전체적으로 지하수위가 하강된 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 지하수 분수령에 대한 민감도 분석에서와 같이 관측정이 유역 경계 부근에 설치될 경우 보정 모델의 신뢰도가 높아질 수 있음을 시사한다.

기존 모델에서 경계조건으로 설정된 창릉천의 지류들은 상류지역에 이들 지류로 유입되는 세류들을 가지고 있으며, 이들 세류들을 모델에서 어느 정도 수준까지 경계조건으로 반영해야 하는지의 여부는 모델 설계 시 어려운 문제이다. 전술한 바와 같이 산지의 소규모 골짜기를 따라 흐르는 하천의 지류들은 하부 또는 주변 지하수계와 연결 또는 단절되어 있어, 지하수 모델에서 이들의 경계

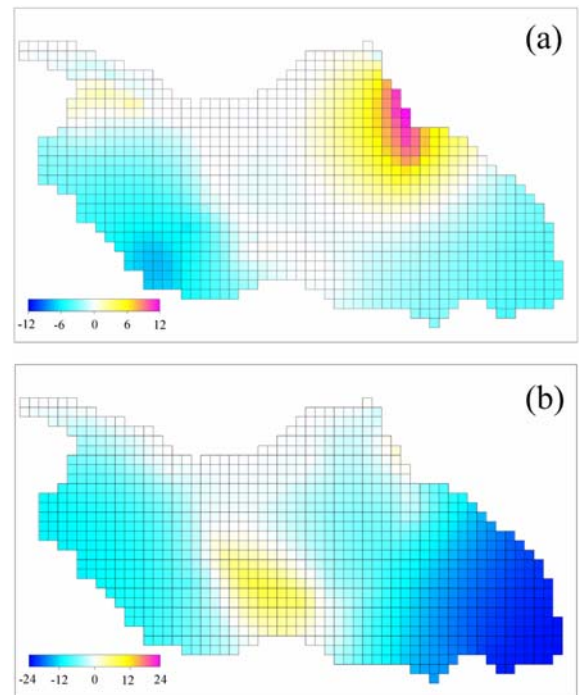


Fig. 14. Change of water levels caused by eliminating small tributaries specified with constant head boundaries in the original model: (a) Model B2, (b) Model B3.

조건으로서의 수용 여부에 따라 모델의 결과가 크게 달라질 수밖에 없다. 또한 규모가 작은 하천의 지류는 지하수 개발과 같은 수리적 스트레스가 가해지는 경우 지하수계와의 상호작용 과정이 쉽게 변할 수 있으므로 하천을 모의하는 다양한 경계조건 모델이 검토되고 모델 개발 과정에서 그 유효성이 지속적으로 재평가되어야 한다.

Table 1에서 Model C는 암반이 분포하는 산지를 비활성셀(inactive cell)로 처리한 수정된 모델들이다. 이들은 전체적으로 기존 모델과 비교할 때 RMS 오차가 크게 나타났다. 특히 충적층지역 하부 암반을 통한 지하수 흐름이 전혀 고려되지 않은 Model C3의 경우 보정된 모델의 RMS 오차가 9.4%로 나타나, 암반의 지하수 흐름을 고려하지 않는 개념 모델은 모델 지역에서 관측된 수두 분포를 잘 재현할 수 없는 것으로 해석된다. 또한 Fig. 11과 같이 암반층의 하부 경계를 모델에서 어떻게 설정하느냐에 따라 모델 보정을 통해 산정된 지하수 함양률이 크게 달라지며, 결과적으로 지하수의 유출입과 관련된 물수지 분석 결과에도 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 15는 Model C2와 기존 모델의 지하수위의 차를 나타낸 것으로, 주로 모델의 경계부에서 수위 차가 크게 발생하였다. 수정된 모델은 산지 암반을 비활성셀로 설정하였으므로, 산지에서 충적층 지역으로의 지하수 흐름이

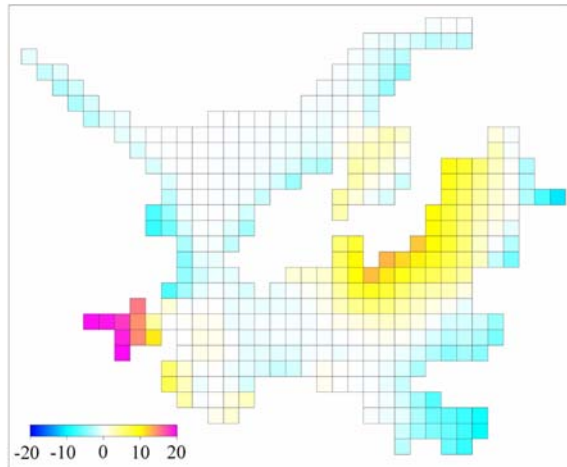


Fig. 15. Change of water levels caused by adjusting configuration of the bedrock aquifer (Model C2).

전혀 고려되지 않는다. 따라서 모델의 경계부에서 층적층과 암반 사이의 수평적인 지하수 흐름이 차단되면서 모델 결과에 큰 영향을 준 것으로 해석된다. 따라서 암반 지역에 대한 관측 자료가 부족하여 모델 영역에서 암반을 제외할 경우 모델 설계 및 보정 과정에서 다음 사항들이 고려되어야 한다. 첫째, 층적층 지역만을 대상으로 모델 영역을 선정한 후 암반의 경계부와 접하는 활성셀들은 고정흐름 경계조건으로 설정해야 한다. Modflow의 경우 함양 또는 우물 패키지를 사용할 수 있으며, 이 때 각 셀에 대한 입력값은 암반에서 층적층으로의 지하수 흐름량으로부터 계산될 수 있다. 둘째, 암반에서 층적층으로의 지하수 흐름량에 대한 정보가 전무한 경우 이를 모델 보정 인자로 설정하여 추정할 수 있다. 하지만 이를 함양량과 함께 보정 인자로 사용할 경우 모델 보정이 매우 복잡해지며 보정 과정 및 결과에 대한 면밀한 해석과 검토가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 시범 지역을 대상으로 현장시험을 통해 획득된 자료를 이용하여 지하수 흐름 모델을 개발하였으며, 개발된 모델에 대한 민감도 분석을 통하여 하천 및 지하수 분수령, 암반층의 하부 경계면 등과 같은 모델의 주요 수문 경계들을 모델에서 개념화할 때 수반되는 불확실성이 모델 결과에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같이 요약된다.

1) 지하수 분수령의 위치는 모델 보정을 통해 산정된 지하수 함양률에 직접적인 영향을 주지만 지하수계 전체

의 물수지 변화에는 크게 기여하지 않는 인자인 것으로 나타났다. 지하수 분수령은 지하수계에 가해지는 스트레스의 정도에 따라 그 위치가 변할 수 있는 동적인 경계이므로 지하수 개발에 따른 물수지 변화를 예측하는 모델의 경우 지하수 분수령에 대한 모델의 민감도는 매우 높아질 것으로 예상된다.

2) 창릉천으로 유입되는 하천의 지류를 모델의 경계조건에서 제외할 경우 모델 보정 오차가 점차 증가하였으며, 함양률 및 물수지를 구성하는 각 성분도 기존 모델의 결과와의 차이가 점차 크게 발생하였다. 특히 물수지 분석 결과에서 하천을 통한 지하수의 유입 및 유출량이 크게 줄어들면서 지하수 유출이 발생하는 지류 주변의 지하수위가 높게 모사되었으며 모델 보정 시 RMS 오차가 커지는 요인으로 작용하였다.

3) 암반층의 하부 경계를 모델에서 어떻게 설정하느냐에 따라 모델 보정을 통해 산정된 지하수 함양률이 크게 달라지며, 결과적으로 지하수계의 물수지에도 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 우리나라 대부분 지역의 경우 층적대수층을 대상으로 지하수 모델을 개발하더라도 하부 암반을 통한 지하수 흐름을 고려해야 하며, 개념 모델의 불확실성을 나타내는 주요 요인으로 작용할 수밖에 없다. 따라서 부지 특성화를 위한 현장 조사 단계에서 암반과 관련된 자료 확보를 항상 염두에 두어야 하며, 개념 모델 수립 및 모델 보정 과정에서 암반과 관련된 모델의 불확실성이 지속적으로 재평가되어야 한다.

4) 지하수 모델의 불확실성은 상존할 수밖에 없으나 부지 특성화를 위한 현장 조사를 모델의 목적에 부합되도록 수행할 경우 불확실성의 문제는 다소 완화될 수 있다. 특히 본 연구 결과는 국내의 경우 유역 경계부에 해당하는 산지에 시험정을 설치하여 지하수위 자료를 확보하고 현장시험을 통해 암반의 수리특성을 파악하는 것이 모델 개발을 위한 부지특성화 단계에서 매우 중요함을 보여준다. 또한 모델 지역에 하천이 흐르는 경우 하천의 시점 및 종점부에서 유출량을 측정하여 개념 모델 수립 시 이용하게 되면 물수지 분석 시 매우 유용한 자료로 이용될 수 있다.

사 사

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

참 고 문 헌

- 강병무, 김천수, 배대석, 김경수, 기정석, 1993, 분리열극개념을 이용한 지하공동주변의 지하수유동해석, *지질공학*, **3**(2), 125-148.
- 건설교통부, 2004, 지하수조사연보.
- 김강주, 1999, 지하수환경영향예측을 위한 지하수모델의 적용현황 및 문제점: 환경영향평가서와 먹는 샘물환경영향조사서를 중심으로, *지하수환경*, **6**(2), 66-75.
- 김윤영, 이강근, 1999, 한강의 수리시스템과 한강변 대수층의 수리지질 특성, *지하수환경*, **6**(1), 33-41.
- 박유철, 2002, 자연요소법을 이용한 지하수 유동 모델 개발, *지질학회지*, **38**(4), 551-561.
- 박유철, 이강근, 1995, 불연속파쇄모델을 이용한 파쇄매질에서의 지하수 유동 시뮬레이션 자원환경지질, **28**(5), 503-512.
- 박유철, 이강근, 박창업, 1995, 산지 지역에서 지하수 유동과 지열 흐름에 관한 수치적 연구, *지질학회지*, **31**(6), 608-621.
- 원이정, 구민호, 김형수, 2006, 경북 고령군 강변여과 취수 지역의 지하수 유동 모사 및 민감도 분석, *지하수토양환경*, **11**(2), 45-55.
- 이강근, 1993, 판상대수층군에서의 지하수유동 시뮬레이션: 유사삼차원적 모델, *지질학회지*, **29**(2), 176-182.
- 전선금, 구민호, 김용계, 강인욱, 2005, 국가지하수 관측망의 양수시험 자료를 이용한 국내 대수층 특성의 통계적 분석, *한국지하수토양환경학회지*, **10**(6).
- 함세영, 김연기, 1989, 익산 지역의 지하수 유동 모델, *광산지질*, **22**(4), 381-393.
- 함세영, 정재열, 김형수, 한정상, 류수희, 2004, 창원시 북면 낙동강 주변 하성퇴적층의 지하수유동 모델링 연구, *자원환경지질*, **37**(5), 499-508.
- 함세영, 정재열, 김형수, 한정상, 차용훈, 2005, 창원시 대신면 강변여과수 취수부지 주변의 지하수 유동 모델링, *자원환경지질*, **38**(1), 67-78.
- 홍성호, 1982, 한국지질도: 서울도폭 (1: 50,000).
- Anderson, M.P. and Woessner, W.W., 1992, Applied Groundwater Modeling Simulation of flow and advective transport, Academic Press, Inc., San Diego, Calif., p. 381.
- Blandford, T.L., Blazer, D.J., Calhoun, K.C., Dutton, A.R., Naing, T., Reedy, R.C., and Scanlon, B.R., 2003, Groundwater Availability of the Southern Ogallala Aquifer in Texas and New Mexico: Numerical Simulations Through 2050, Texas Water Development Board.
- Bredehoeft, J.D., 2003, From models to performance assessment: The conceptualization problem, *Ground Water*, **41**(5), 571-577.
- Franke, O.L. and Reilly, T.E., 1987, The effects of boundary conditions on the steady-state response of three hypothetical ground-water systems-Results and implications of numerical experiments, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2315, p. 19.
- Franke, O.L., Reilly, T.E., and Bennett, G.D., 1987, Definition of boundary and initial conditions in the analysis of saturated ground-water flow systems - An introduction, U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations 3-B5, p. 15.
- Konikow, L.F. and Bredehoeft, J.D., 1992, Ground-water models cannot be validated, *Advances in Water Resources*, **15**, 75-83.
- McKeown, C., Haszeldine, R.S., and Couples, G.D., 1999, Mathematical modelling of groundwater flow at Sellafeld, UK, *Engineering Geology*, **52**, 231-250.
- Ramireddygar, S.R., Sophocleous, M.A., Koelliker, J.K., Perkins S.P., and Govindaraju, R.S., 2000, Development and application of a comprehensive simulation model to evaluate impacts of watershed structures and irrigation water use on streamflow and groundwater: the case of Wet Walnut Creek Watershed, Kansas, USA, *Journal of Hydrology*, **236**, 223-246.
- Refsgaard, J.C., 1997, Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models, *Journal of Hydrology*, **198**, 69-97.
- Reilly, T.E., 2001, System and boundary conceptualization in ground-water flow simulation, U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 3, Chapter B8, p. 26.
- Reilly, T.E. and Harbaugh, A.W., 2004, Guidelines for evaluating ground-water flow models, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004-5038, p. 30.
- Selroos, J.-O., Walker, D.D., Strom, A., Gylling, B., and Follin, S., 2002, Comparison of alternative modelling approaches for groundwater flow in fractured rock, *Journal of Hydrology*, **257**, 174-188.