

## 경북 고령군 강변여과 취수 지역의 지하수 유동 모사 및 민감도 분석

원이정<sup>1</sup> · 구민호<sup>2\*</sup> · 김형수<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국수자원공사 수자원연구원, <sup>2</sup>공주대학교 지질환경과학과

## Simulation of Groundwater Flow and Sensitivity Analysis for a Riverbank Filtration Site in Koryeong, Korea

Lee-Jung Won<sup>1</sup> · Min-Ho Koo<sup>2\*</sup> · Hyoung-Su Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

<sup>2</sup>Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University

### ABSTRACT

A 2-D unconfined flow model is developed to analyze annual variations of groundwater level and bank filtration rate (BFR) for an experimental riverbank filtration site in Koryeong, Korea. Two types of boundary conditions are examined for the river boundary in the conceptual model: the static head condition that uses the average water level of the river and the dynamic cyclic condition that incorporates annual fluctuation of water level. Simulations show that the estimated BFR ranges 74.3~87.0% annually with the mean of 82.4% for the static head boundary condition and 52.7~98.1% with the mean of 78.5% for the dynamic cyclic condition. The results illustrate that the dynamic cyclic condition should be used for accurate evaluation of BFR. Simulations also show that increase of the distance between the river and the pumping wells slightly decreases BFR up to 4%, and thereby indicate that it is not a critical factor to be accounted for in designing BFR of the bank filtration system. A sensitivity analysis is performed to examine the effects of model parameters such as hydraulic conductivity and specific yield of the aquifer, recharge rate, and pumping rate. The results demonstrate that the average groundwater level and BFR are most sensitive to both the pumping rate and the recharge rate, while the water level of the pumping wells is sensitive to the hydraulic conductivity and the pumping rate.

**Key words** : Riverbank filtration, Groundwater modeling, Sensitivity analysis, Dynamic cyclic boundary condition, Nakdong river

### 요 약 문

강변여과수 취수 방식의 도입이 고려되었던 경상북도 고령군 낙동강변의 충적대수층을 대상으로 2차원 지하수 유동 모사를 수행하여, 취수정 및 주변 대수층에서의 지하수위와 하천수 유입량의 계절적 변화를 분석하였다. 개념모델의 하천 경계조건은 연평균 하천수위를 고정 수두로 설정하는 경우와 실제 관측된 시계열 자료를 이용하여 변동 수두로 설정하는 경우로 구분하여 모사를 수행하였다. 모사 결과 산정된 하천수 유입 비율은 고정하천수두 모사의 경우 연중 74.3~87.0%의 범위를 보이며 연평균 82.4%인 반면, 변동하천수두 모사의 경우 52.7~98.1%, 연평균 78.5%로 나타났다. 따라서 시기별로 변동하는 하천수위가 하천수 유입 비율에 큰 영향을 미치며, 하천수 유입 비율을 정확하게 산정하기 위해서는 변동하천수두 조건을 이용해야 하는 것으로 해석된다. 강변으로부터 취수정까지의 이격거리를 변화시키면서 모사를 반복 수행한 결과 취수정 이격거리가 커질수록 하천수 혼합 비율은 다소 감소하지만 그 영향이 수 % 정도로 매우 작게 나타났다. 강변여과 취수 시 지하수위 및 하천수 혼합비율에 영향을 미치는 인자인 대수층의 수리전도도 및 저유계수, 지하수 함양량, 취수량 등에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 대수층의 평균 지하수위

\*Corresponding author : koo@kongju.ac.kr

원고접수일 : 2005. 9. 13 게재승인일 : 2005. 12. 14

질의 및 토의 : 2006. 6. 30 까지

와 하천수 유입 비율은 취수량과 지하수 함양량 변화에 민감한 반면, 취수정의 지하수위는 수리전도도와 취수량에 민감한 것으로 나타났다.

**주제어** : 강변여과, 지하수모델링, 민감도분석, 동적순환경계조건, 낙동강

## 1. 서 론

일반적으로 지하수는 지표수보다 수질이 양호하고 수온이 일정하다는 장점을 가지고 있어 음용수로 선호되고 있으나, 수량이 제한적이어서 국내의 경우 다량의 수자원 공급은 대부분 지표수에 의존하고 있다. 그러나 최근 지표수에서의 돌발적 수질오염 사고 및 수질 악화 등에 의해 고도의 정수처리 등이 불가피하게 되고 이에 따른 고가의 시설비 및 운영비의 투자가 요구되는 사례가 빈번히 발생하고 있어 취수원의 다변화 측면에서 지하 대수층에 관심이 모아지고 있다. 지하수가 존재하는 대수층은 수질 측면에서 자정능력이라는 커다란 장점을 가지고 있으며, 수량적 측면에서도 유도 함양 및 직접함양 등과 같은 지표수와의 적절한 연계를 통해 다량의 용수를 저비용으로 저장 가능하다는 이점이 있다. 이러한 수자원 공급 방식에는 크게 직접인공함양, 지하댐, 강변여과 등이 있다.

강변여과는 충적층의 오염저감 능력을 활용하여 하천수를 간접 취수하는 기법으로, 하천 인근에 취수정을 설치하여 하천 방향의 지하수 흐름을 취수정 방향으로 유도하는 방식이다. 강변여과 방식의 효과를 증대시키기 위해 취수정의 배후지에 인공함양 분지를 설치하기도 하며, 지하수의 비율을 높이기 위해 취수정을 하천에서 비교적 먼 거리에 설치하고 하천과 취수정 사이에 함양 분지를 통한 직접인공함양을 하기도 한다. 독일 쾰른 지역의 상수도 사업에서는 원래 사용하던 지하수의 양적인 부족과 수질 문제로 인해 라인강 인접부 약 100 m 지점에 취수정들을 설치하고 이들로부터 취수된 물을 송수관로를 통해 원 지하수 관정 쪽으로 이동하여 함양 분지에 포수하는 방식을 사용하고 있다. 이때, 강변여과로 인한 1차적 여과와 함께 포수분지를 통한 지하 대수층으로의 직접함양이 2차적으로 이루어지면서 화학·생물학적 유해 물질들이 제거되므로 정수 공정은 간단한 활성탄 여과만이 사용된다. 이처럼 지하 충적 대수층을 거대한 여과지로 활용하며 동시에 직접인공함양 방식과의 연계를 통해 지하수가 가진 수량적 제한 요소를 극복하는 사례가 빈번하다. 강변여과 방식을 통한 지표수의 유도는 그 지체시간과 그 자체의 자정능력을 감안할 때 돌발적인 수질사고에 대한 완충작용과, 현재 정수처리 공정에서 문제점이 되고 있는 홍수 시 탁도 제거에 효율적이라는 장점을 가지며, 이와 함께 균

등한 원수 수질을 유지할 수 있다는 점에서 정수 공정상의 그 경제성이 인정되고 있다.

독일, 네덜란드 등의 서유럽 국가들과 미국에서는 이미 19세기 초부터 강변여과 및 직접인공함양 방식의 수자원 공급이 시작되어 150여년이 넘게 성공적으로 사용되고 있다. 상대적으로 수자원에 대한 관심도가 높은 중동 지역의 쿠웨이트, 이란 등의 국가에서는 오래 전부터 유도 방식을 통한 지하수 취수를 사용하였다. 이를 통해 오염된 상수원을 개선하고 지하수에 대한 효율적 이용 방안을 강구하였으며, 수질 사고에 의한 지표수 오염과 같은 비상시를 대비하기 위한 각종 방법들이 연구되고 실제적으로 활용되어왔다(한국수자원공사, 1999).

국내의 경우 1990년대 이후 낙동강에서의 수질오염 사고 사례가 발생하면서, 강변여과 취수 방식의 다변화된 수자원 공급에 대한 타당성이 검토되기 시작하였다(한국수자원공사, 1995). 창원시는 2002년 2월 이후 대산면 및 북면 지역에 각각 일 10,000 m<sup>3</sup>의 상수도를 공급하고 있으며, 3단계를 걸친 시설 확장공사에 따라 2016년까지 일일 총 180,000 m<sup>3</sup>의 추가 수도 공급이 계획되어 그 확장공사가 진행 중에 있다(창원시 상수도사업소, 2003). 또한 함안군 이룡지구에서도 2006년 총 일일 45,000 m<sup>3</sup>을 목표로 개발이 진행 중에 있다(환경부, 2002). 이 외에 현재 강변여과수 취수 방식의 개발이 가능할 것으로 제시된 지점은 총 36개소로 유역별로 한강 6개소, 낙동강 21개소, 금강 4개소, 영산강 2개소 및 섬진강 3개소이다(한국수자원공사, 2002a).

상술한 바와 같이 최근 국내에서도 강변 여과 방식의 수자원 개발에 대한 관심이 높아지면서 강변여과 취수 부지에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다. 이들 연구는 주로 강변여과 취수 지역에 대한 지하수 모델링(함세영 등, 2004; 함세영 등, 2005), 강변여과 취수 시 인공함양 활용방안(이동기 등, 2004), 지구물리탐사 기법을 이용한 충적 대수층의 퇴적상 연구(김형수 등, 2002b), 충적 대수층 내의 미소 생물 연구(조주래 등, 2002), 강변여과수 개발 예정지 지하수의 수리지구화학 조사(김주환 등, 2003) 등으로 대별된다.

본 연구에서는 실제 강변여과 취수가 계획되었던 경상북도 고령군 다산면의 낙동강 주변 충적대수층을 대상으로 지하수 유동 모사를 수행하였으며, 취수정 및 주변 대

수층에서의 지하수위와 지하수 및 하천수 혼합 비율의 계절적 변화를 분석하였다. 본 연구의 목적은 1) 강변 여과를 모사하는 지하수 모델에서 물 공급원 역할을 하는 하천의 경계조건 설정 방법을 탐색하고, 2) 강변여과 취수 시 지하수위 및 하천수 혼합비율에 영향을 미치는 인자인 대수층의 수리전도도 및 저유계수, 지하수 함양량, 취수정의 취수량과 이격거리 등에 대한 민감도 분석을 수행하는데 있다. 강변여과 취수 방식을 이용한 상수도 공급에 있어 지하수위 및 하천수 유입 비율의 변화는 향후 강변여과수 개발 및 운영 시 수량과 수질의 관리에 중요한 요소가 되므로, 이들 영향인자들의 민감도 파악을 통해 향후 강변여과수 개발지 선정 시 타당성 검토 및 관리 운영 시의 주요점을 파악하고자 하는 것이 본 연구의 최종적 목표이다.

## 2. 연구지역 개요

### 2.1. 지형 및 지질

본 연구지역은 경상북도 고령군 다산면 노곡리 일원으로 북위 35도 49분에서 52분, 동경 128도 20분에서 30분에 해당된다. 본 지역은 영남내륙권 광역상수도 사업이 계획되었던 곳으로 당초 대구광역시 달성군, 경북 고령군 및 성주군 일원에 2016년까지 일 178,000톤의 공업용수 및 생활용수를 공급할 것으로 실시설계가 수행되었으나, 현재 용수배분계획에 따라 사업 추진이 중단되어있는 상황이다.

연구지역은 남진하던 낙동강이 급작스럽게 동진하여 급호강과 합류되는 지점의 약 5 km 상류 우안부에 해당되는 충적층 지역에 해당된다. 연구지역의 지형적 특징은 좌안의 경우 일부 계곡부를 제외하고는 대부분 낙동강의 인접부가 급한 경사를 갖는 사면인데 반해, 연구지역에 해당하는 우안은 동서 방향으로 약 4 km, 남북 방향으로 약 1 km 내외의 비교적 넓은 충적 대수층이 분포한다. 하천에서 약 200 m 전 후에 제방이 형성되어 있고 제내지의 경우 주로 담작물이, 제외지의 경우 대부분 전작물이 재배되고 있다(김형수 등, 2002a).

연구지역의 기반암은 경상누층계에 해당되는 중생대 상부 유라기 낙동통 및 백악기 하부 신라통에 해당되는 지층이다. 지역의 서쪽에서 동쪽으로 이동하면서 지층의 연령이 젊어지며 연구지역 서측에 낙동통 낙동층이 분포하며, 그 동편으로 본 층을 정합으로 덮고 있는 칠곡층, 다시 칠곡층을 정합으로 덮고 있는 신라통 신라역암층이 분포하고 있다(Fig. 1). 이들 지층은 주로 북동 방향의 주향

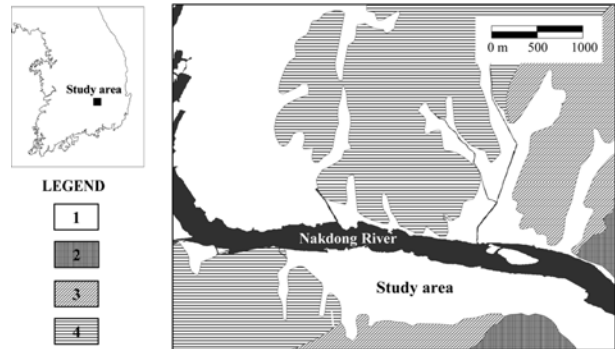


Fig. 1. Geological map of the study area: 1. Alluvium, 2. Silla Conglomerate, 3. Chilgok formation, and 4. Nakdong formation.

과 10°~20° 정도의 남서 방향 경사를 가진다. 진주층은 주로 회색, 녹회색의 사암, 이암, 셰일, 암회색 내지 흑회색 또는 흑색의 셰일, 사질 셰일과 역질 사암, 석회암 결핵체 등으로 구성되며, 칠곡층은 사암, 셰일, 역암으로 구성되고, 일부 원마도가 매우 불량한 현무암질의 화산암력이 포함된 지층이 나타나는 것으로 보고되었다. 신라통 신라역암층은 자색, 갈회색의 역암, 역질 사암, 사암, 이암, 사질 셰일, 회색 셰일로 구성되며 니회암(marl)의 결핵체가 발견된다(국립지질조사소, 1970). 현장 시추 조사에서 나타난 충적층 하부의 기반암은 연구지역 서측의 경우 주로 셰일의 풍화암 상태를 보여주는 반면, 동측의 경우 기반암 구간에서 역암이 발견되어 연구 지역의 하부가 낙동통과 신라통의 지질 경계를 포함하고 있음을 확인할 수 있었다(김형수 등, 2002a).

### 2.2. 연구 지역 현장 조사 개요

본 연구지역의 경우, 한국수자원공사에서 발주한 영남내륙권 광역상수도 실시설계 용역을 통해 1단계 예비타당성 조사 및 2단계 상세조사가 수행되었다(한국수자원공사, 2002b). 1단계 예비 타당성 조사에서는 전기비저항탐사, 예비시추조사, 관측정 설치, 시험 취수정 설치, 취수정에서의 대수성 시험, 실내시험, 수질시험 등이 수행 되었으며, 이를 토대로 2단계 상세조사가 실시되었다. 2단계 1차 상세조사에서는 시험관측정을 중심으로 대수성시험과 지하수 수위 및 수질 관측을 실시하였다.

## 3. 강변 여과 취수 현장에 대한 지하수 모델 설계

### 3.1. 모델 주요 입력 인자

지하수 모델 설계에서 요구되는 주요 입력인자들은 유역의 규모 및 경계, 지층구조, 수리전도도, 비산출률, 함양

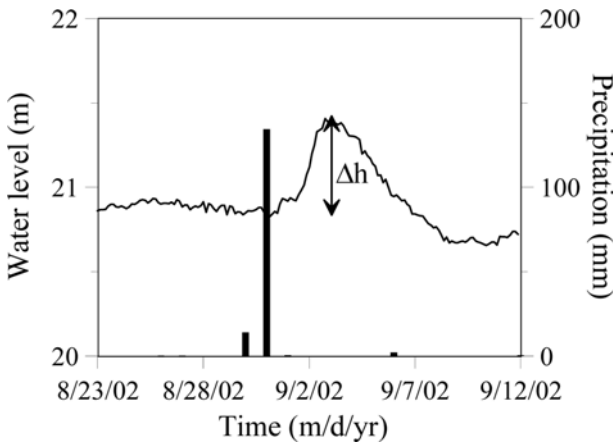


Fig. 2. Rainfall event and groundwater level change.

량 등이다. 지하수 함양률 산정법에는 물수지분석, 기저유출법 등과 같은 여러 가지 방법이 있으나, 본 연구지역은 작은 소유역에 불과하므로 지하수위변동법(구민호 · 이대하, 2002)을 적용하여 함양률을 산정하였다. Fig. 2는 본 지역에서 우기에 발생한 단일 강우 사건(event)에 대한 지하수위 상승량을 나타낸 것이며, 지하수위변동법을 적용하여 구한 강수량 대비 지하수 함양량의 비율은 최소 27%( $S_y = 0.07$ )에서 최대 76%( $S_y = 0.2$ )인 것으로 나타났다. 실시설계 당시 양수시험을 통해 산정된 비산출률(0.07)은 대상지역의 층적층이 조립질의 모래와 자갈로 구성되어 있음을 감안할 때 해석에 오류가 있는 비현실적인 값으로 사료되었으며, Morris and Johnson(1967)이 제시한 미고결 퇴적층의 대표 값을 참조하여 0.2 내외의 값을 가지는 것으로 추정하였다. 실제 이 지역의 함양률을 단정하기에는 실측 자료가 부족한 실정이나, 전국을 통해 평균한 지하수 함양률 평균값에 대한 검토와 본 유역 층적층의 구성 물질을 고려할 때, 이 지역의 함양률은 최소 40% 이상이 될 것으로 예상된다. 장기 지하수위 관측과 지하수 모델링 기법을 통한 함양률 산정이 가능할 것으로 사료되나 이는 향후 과제로 남겨두었으며, 본 연구에서는 지하수 유동 모델링 입력 기본 설정값을 40%로 설정하였다.

연구지역의 지층구조 및 수리전도도를 파악하기 위하여 유역의 지형 및 지질, 시추 주상도, 지하수위 및 양수시험 자료 등을 검토하였으며, Visual Modflow를 이용하여 4층으로 구성된 모델 영역을 상정하고 3차원 지하수 모델링을 수행하였다. Fig. 3은 대상유역의 지형 및 양수가 없던 2001년 11월 20일의 지하수위 등고선을 보여준다. Visual Modflow를 이용하여 각 층마다 수리전도도를 변

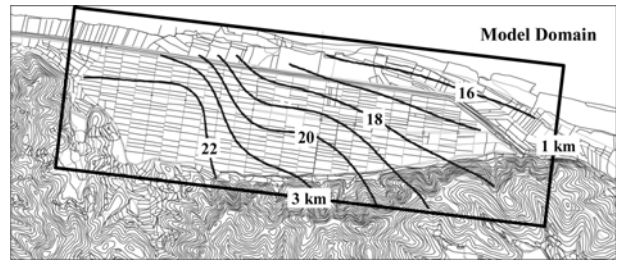


Fig. 3. Distribution of groundwater level in the model area (November 11, 2001).

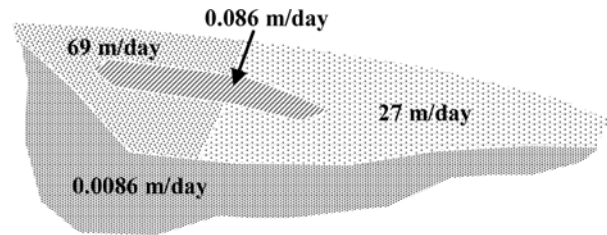


Fig. 4. Distribution of the hydraulic conductivity calibrated by 3-D groundwater flow model.

화시키며 정류모사의 결과 값이 양수가 없던 시기의 본 지역 지하수위 분포와 일치하도록 모델 보정을 수행하였다. 그 결과 주대수층인 제 2층의 층 분포 및 수리전도도가 Fig. 4와 같을 때 모사 결과가 Fig. 3의 지하수위 분포와 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 3차원 정류모사에서는 연중 일정한 함양량을 가정하였기 때문에 우리나라와 같이 함양량의 계절적 변화가 큰 지역에 적용할 경우 잘못된 결과가 도출될 수 있으며, 복잡한 지층구조를 가진 지역에서의 3차원 모델의 경우 정확한 지하 구조에 대한 정보 없이 모사를 하는 경우 단순한 2차원 모델보다 오히려 신뢰도가 떨어지는 결과를 유도 할 수도 있다.

따라서 본 연구에서는 전체 유역에 대한 3차원적인 상세 지층구조에 대한 정보가 부족한 것으로 판단되므로 2차원 모델링을 기본으로 다양한 유역경계와 영향인자 값들에 대해 모사를 수행하였다. Fig. 3에 표시된 직사각형은 이차원 모델링 수행 시 모델영역을 나타낸 것으로, 1개의 층을 가지는 2차원 모델을 상정하였으며 일별로 변화하는 함양량을 고려하였다. 모사 지역의 서측은 투수성이 나쁜 일부 층을 포함하므로 동측에 취수정을 설치하여 모사하였으며, 수리전도도는 3차원 모사를 통해 얻은 층별 대표값 중 주 대수층에 해당하는 제2층의 수리전도도 값인 27 m/day을 전체 대상 유역의 수리전도도 값으로

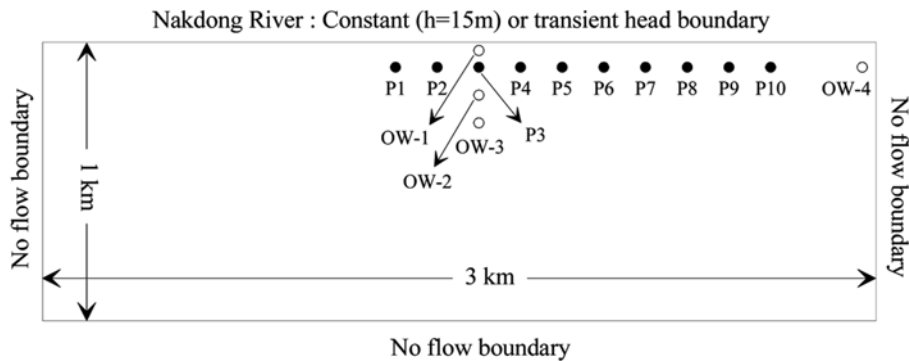


Fig. 5. The conceptual model for simulating riverbank filtration.

적용하였다. 보정된 수리전도도 값의 확인을 위해 장기양수시험 데이터를 분석 하였으며, Dupuit-Forchheimer 공식(Marsily, 1986) 중 다소 얇은 대수층에 대한 공식을 이용한 데이터 분석 결과 약 26 m/day라는 결과 값을 획득하여 모델링을 통해 유추한 수리전도도 값과 거의 같은 것으로 나타났다.

### 3.2. 모델 설계

본 연구에서는 이차원 모델링 설계를 바탕으로, 하루 1만 5천톤의 상수도를 안정하게 공급하는 취수 계획에서의 수두 강하량 및 하천수 유입량을 분석하였다. 전체 대상 지역은 3 km×1 km로 10 m 간격의 격자를 설정하였다 (Fig. 5). 전체 대수층은 자유면 대수층으로, 하천부는 일정 수두 경계로 설정하여 검토한 후, 실제 인근 취수장 (매곡취수장)에서 측정된 하천수위를 경계조건으로 설정하여 1년을 주기로 변동되는 하천의 영향을 반영하여 일정 수두경계와 비교 검토하였다. 하천의 일정수두는 EL. 15 m의 값을 적용하였으며, 이 값은 이 지역의 우측에 위치한 매곡취수장에서 2001년과 2002년에 측정된 하천 수위의 평균 관측값이다. 실제 하천의 평균 바닥고는 EL. 5 m로 하천의 실제 심도는 약 10 m 전후이다. 한편, 이 지역의 시추 자료 등에서 나타난 대상 지역 층적층의 평균 두께는 약 15~20 m이다.

하천부를 고정수두 경계와 변동수두경계로 구분하여 각각 수위와 하천수 유입 비율을 분석하였으며, 하천부 고정수두경계의 경우 하천부 전체를 EL. 15 m로 모사하거나, 하천이 서측에서 동측으로 일정한 흐름을 가지는 것을 가정하여 일정한 임의의 하천 수두경사 값을 주어 그 결과를 검토하였다. 함양은 과거 30년 동안 대구 지역의 일별 강우 자료를 근거로, 강우의 40%가 이루어지는 것으로 설정하였다. 이러한 일별 함양률의 입력은 실제 1년

을 주기로 변화하는 강우 현상을 반영할 수 있을 것으로 판단된다. 실제로 일별 함양률의 변화에 따라 지하수위 변동이 주기성을 가지는 경우는, 일반적으로 동적순환 초기 조건(dynamic cyclic initial conditions)을 이용하는데 (Anderson and Woussner, 1992), 이를 위해서 주기성을 갖는 함양률의 시계열 자료를 10년간 되풀이하여 마지막 1년의 모사 결과를 자료 분석에 이용하였다. 하천부 변동수두경계 조건의 경우도 함양과 같이 동적순환 초기조건을 이용하였다.

모델링을 위한 정호의 배치는 하천에서 90 m 이격시켜, 하천과 평행하게 150 m 간격으로 10개를 설치하였으며, 개별 정호의 취수량은 1,500 ton/day로 전체 취수량이 15,000 ton/day가 되도록 설정하였다. 취수정을 동측에 집중 배열한 것은 전술한 바와 같이 실제 본 현장의 서측에 투수성이 좋지 않은 층이 일부 분포하는 것으로 확인되었기 때문이다.

모델 검증(code verification)을 위하여 질량균형식을 이용하였으며, 아래 식과 같다.

$$mass\ balance\ error\ (\%) = \frac{|Q_{in}| - |Q_{out}|}{Q_{in}} \times 100 \quad (1)$$

$Q_{in}$ 은 대수층으로 유입되는 총유입량을,  $Q_{out}$ 은 취수정 및 일정수두경계를 통하여 대수층으로부터 배출되는 총유출량을 나타낸다.

## 4. 모사 결과

### 4.1. 고정하천수두경계 모사

#### 4.1.1. 지하수위 변화

Fig. 6은 연중 최저 함양기에 해당하는 3월 20일과 최고 함양기에 해당하는 8월 25일에 해당하는 지하수위 분

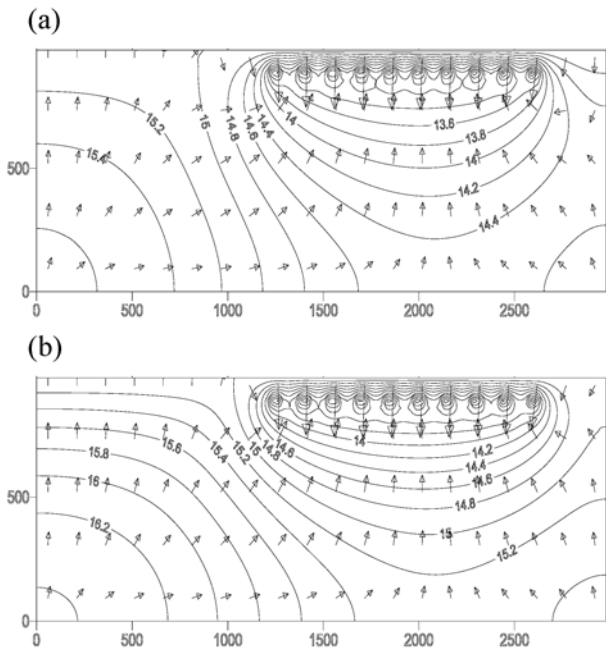


Fig. 6. Simulated groundwater level and flow directions: (a) March 20, (b) August 25.

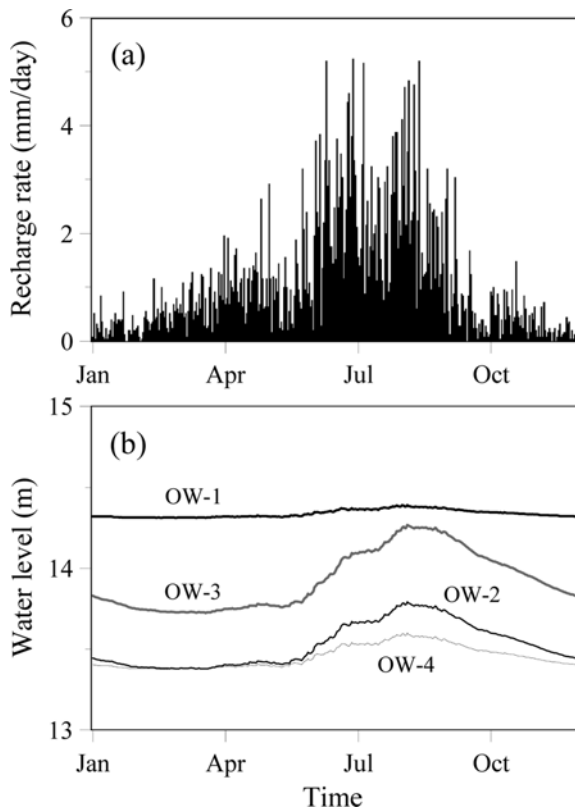


Fig. 7. Annual variations of (a) groundwater recharge (40% of precipitaton) and (b) simulated water level at 4 observation wells.

포를 나타낸 것으로 유역 전체 평균수위는 3월 20일에 14.58 m, 8월 25일에 15.12 m로 약 0.54 m의 차이를 보였다. 취수정 P6에서의 지하수위는 각각 11.08 m(3월 20일), 10.84 m(8월 25일)로 약 0.24 m의 차이를 보였다. 따라서 연중 최고 및 최저 함양기의 지하수위의 경우 전체유역 평균 지하수위의 차이가 취수정에서의 차이보다 약 2배 크게 나타났으며, 이는 뒤에 다루게 될 민감도 분석 결과와도 일치한다.

Fig. 7a는 강수량의 40%로 설정된 지하수 함양량의 연중 변화를, Fig. 7b는 Fig. 5의 4개 관측정에서의 지하수위 변동 모사 결과를 도시한 것이다. 하천에서 멀어질수록 함양에 영향을 많이 받아, 함양량의 주기성과 거의 일치하는 지하수위 변화를 보여준다. 함양량이 많은 여름철의 경우 지하수위는 상승하나, 건기인 겨울에는 상대적으로 급격한 지하수위 하강이 나타난다. 따라서 주기적인 함양에 따른 주기적 지하수위 변동을 고려할 때, 안정적인 지하수위를 유지하기 위해서는 월별 혹은 계절별 취수계획을 세우는 것이 검토되어야 할 수 있다. 이러한 운영계획을 위해서는 취수에 대한 지하수 영향범위를 결정하고, 이러한 범위 내에서 무리가 없도록 운영계획을 세워야 한다. 수위의 변화는 곧 유동 방향의 변화를 의미하므로 이러한 변화에 의한 영향범위내로의 유해물질 이동 등의 수질적 측면도 함께 고려하여야 한다.

#### 4.1.2. 하천수 유입 비율 변화

취수정의 지하수 및 하천수 유입 비율을 계산하기 위하여 다음과 같은 질량균형식을 이용하였다.

$$Q_{out}(Pumping) = Q_{in1}(riverbank\ filtration) + Q_{in2}(Groundwater) \quad (2)$$

하천 경계부에서 취수정 방향으로 유입되는 양을 산정하여 이를 하천수 유입량으로 보았다. Fig. 8은 모사 결과를 이용하여 계산된 연중 시기별 하천수 및 지하수 비율을 나타낸다. 하천수 유입 비율은 연중 74.3~87.0%의 범위를 보이며 연평균 82.4%이며, 최저 함양기인 3월 20일경의 하천수 비율이 가장 크며, 최고 함양기인 8월 25일경의 하천수 비율이 가장 낮은 것으로 나타났다.

취수정 이격 거리에 따른 하천수와 지하수 혼합 비율을 검토하기 위하여 하천에서 90 m 지점에서부터 30 m 씩 배후지 쪽으로 취수정을 옮겨가면서 유역내의 수위변화와 하천 경계면으로 유입되는 하천수량을 분석하였다. Table 1과 같이 취수정 이격 거리가 커질수록 하천수 혼합비율은 다소 감소하지만 그 영향이 매우 작은 것으로 나타났

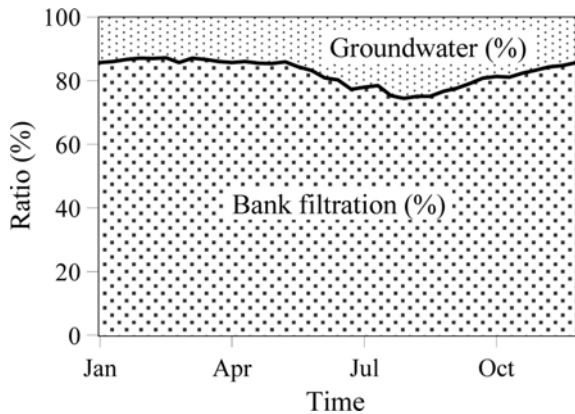


Fig. 8. Annual variation of bank filtration and groundwater rates.

Table 1. Effect of distance from the river to pumping wells on bank filtration rates (August 25)

distance	90 m	120 m	150 m	180 m	300 m
Riverbank filtration (%)	73.8	72.9	72.1	71.5	69.9
Ground water (%)	26.2	27.1	27.9	28.5	30.1

다. 하지만 본 분석 결과는 주기성을 가지는 함양률의 시계열 자료를 10년간 되풀이하여 지하수위 변동이 1년 주기로 동일하게 반복되는 동적인 평형 상태에 도달된 후의 상태를 나타낸다. 따라서 초기 양수 시점부터 동적 평형 상태에 도달하기까지의 기간에는 취수정 거리에 따른 하천수 유입 비율이 시기적으로 다른 양상을 보일 것으로 예상된다. 취수정의 이격거리가 짧을수록 하천수가 취수정으로 유입되는 포획 구간은 좁아지며, 수두경사가 커지므로 공극 유속이 증가하여 하천수의 대수층 채류 시간이 줄어들게 된다. 이는 물리적 여과 및 흡착, 화학적 반응, 미생물 분해 등과 같은 오염 저감 기작에 의한 수질 개선 효과에 영향을 미칠 수 있는 있으며, 또한 공극 막힘(clogging)을 가속시켜 안정적인 강변여과 시설의 운영에 악영향을 줄 수 있다. 따라서 실제 강변여과 시설의 취수정 이격거리 설계 시 하천수 혼합 비율과 함께 이러한 수질 영향 요소들이 동시에 고려되어야 한다.

#### 4.2. 변동수두경계 모사

실제 본 유역의 하천수위 변동값을 입력값으로 지하수위 및 하천수 유입량을 평가하였다. Fig. 9는 모델 유역의 우측에 위치하는 강정취수장과 매곡취수장에서 2001~2002년에 측정된 하천수위 변동을 나타낸 것으로 강우에 따라 하천수위가 지체시간 없이 증가하는 것을 볼

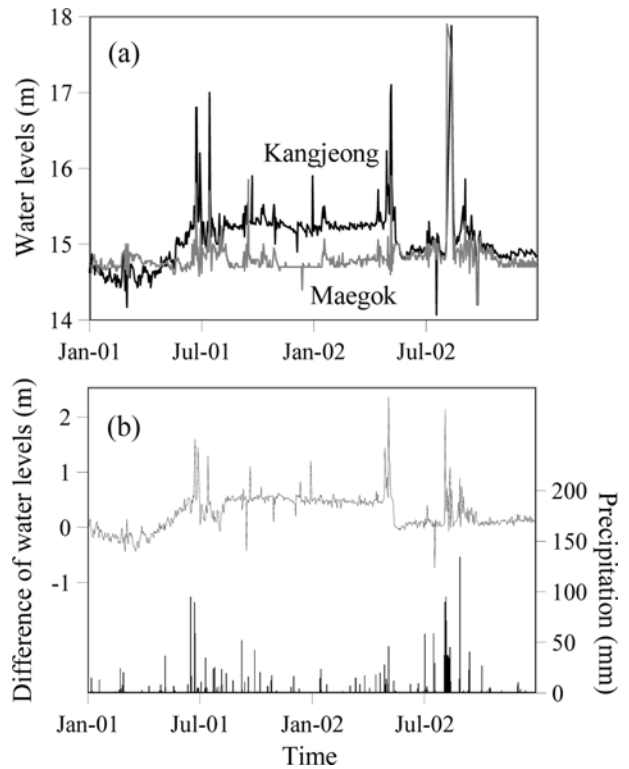


Fig. 9. Annual variations of (a) water level at Kangjeong and Maegok stations and (b) their differences.

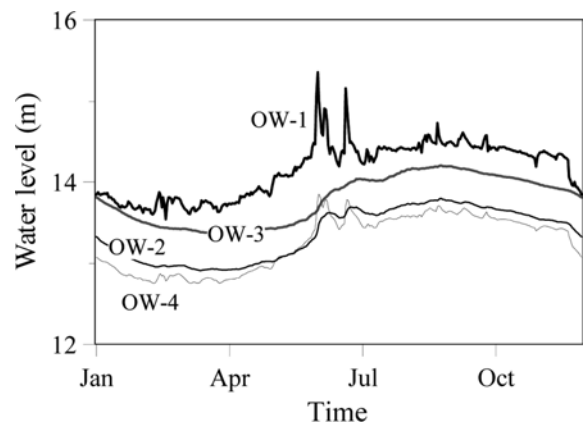


Fig. 10. Annual variations of groundwater level at 4 observation wells simulated with the dynamic river boundary condition.

수 있다. 연중 시기별 변화하는 하천수위를 모델에 반영하기 위하여 매곡취수장의 2001년 측정 자료를 하천수위 변동 자료로 이용하였다. 하천수위도 함양률과 같이 동적 순환 초기조건을 고려하여, 10년간을 모사하여 마지막 1년에 대한 모사 결과를 분석에 이용하였다.

Fig. 10은 변동수두경계로 모사된 4개 관측정에서의 지하수위 변동을 나타낸다. 지점별 지하수위 변화는 하천수

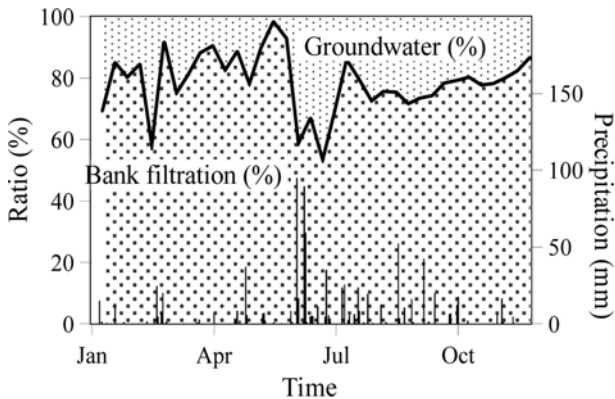


Fig. 11. Annual variation of bank filtration and groundwater rates simulated with the dynamic river boundary condition.

위를 EL. 15 m로 일정하게 두었을 때와는 달리 하천에 가까울수록 하천의 수위에 영향을 받아 수위변화가 비교적 큰 편이며, 하천에서 상대적으로 먼 지점은 하천수위의 변화 양상보다는 함양에 의한 변화 양상과 더욱 비슷한 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 전절에서 하천의 수두를 15 m로 일정하게 설정하고 지하수 및 하천수 유입 비율을 산정했던 것과 같은 방법으로 실제 매곡취수장의 수위 변화를 하천수두 경계로 두고 시기별로 그 유입 비율을 산정한 결과이다. 모사 결과 산정된 하천수 유입 비율은 연중 52.7~98.1%, 연평균 78.5%로 나타났으며, 이는 고정하천수두 모사 결과와 비교할 때 전체적으로 하천수 유입 비율의 변화양상은 거의 차이가 없으나, 연중 하천수 유입 비율의 변화가 상대적으로 크게 발생하며, 연평균은 다소 감소함을 의미한다.

하천수 유입 비율은 강수에 의한 지하수 함양량이 작을수록, 하천수의 수위가 높을수록 커진다. 여름철 풍수기의 경우 강수 시 함양량 증가와 하천수위 상승이 동시에 발생하므로 이는 하천수 유입 비율 변화와 관련하여 서로 상승되는 역할을 하게 된다. 이러한 현상은 Fig. 9에서 확인이 되는데 2001년 7월 10일 경의 강우현상과 하천수위 변화를 보면 강우현상 이후 4일에서 5일 정도의 지연 시간 이후 하천수위가 정점을 보인다. Fig. 11의 동일 시기 하천수 유입 비율을 보면 강수에 의한 지하수 함양에 의해 감소한 하천수 유입 비율이 뒤따르는 하천수위 상승으로 인해 급격하게 증가한 것을 볼 수 있다. 이처럼 하천수의 유입 비율은 함양량 뿐 아니라 하천수위의 변화에도 크게 영향을 받게 되므로, 함양량과 하천수위의 변동이 크고, 자주 발생하는 우기의 경우 하천수 유입 비율

변화가 클 것으로 예상된다. 따라서 강수량의 계절적 변화가 뚜렷한 국내의 경우 하천수 유입 비율을 정확하게 산정하기 위해서는 변동하천수두 조건을 이용해야 하는 것으로 해석된다.

오랜 기간 강변여과수 취수방식을 사용하고 있는 독일에서는 하천수위 변동이 하천바닥에서의 막힘 현상을 유발하여 하천수 유입량에 영향을 미치며 수질에도 악영향을 끼친다는 연구결과가 보고되었다(Schubert, 2002). 따라서 하천수위의 변동에 의한 강변여과 취수정에서의 수질 및 수량 변화 예측이 최상의 취수장 운영을 위해 필요한 것으로 사료된다.

## 5. 민감도 분석

실제 강변여과 시설의 장기적이고 성공적인 운영을 위해서는 지하수위와 하천수 유입량 변화에 대한 예측 및 관측이 중요하다. 지하수위의 변화는 적정양수량과 연계가 되며, 하천수 유입량은 수질관리에 있어 중요한 요소가 된다. 특히, 우리나라와 같이 건기와 우기가 뚜렷하며 강수의 대부분이 우기에 집중되는 경우, 이러한 기상조건에 따른 함양의 변화 또한 취수장 및 정수장의 운영에 크게 영향을 미친다. 본 절에서는 대상 지역의 각 영향인자에 대한 지하수위와 하천수 유입량의 민감도를 파악하고자 한다.

민감도 분석을 통해 연구지역의 수리전도도, 저유계수, 함양률, 및 양수량 등의 입력값에 대한 출력값의 민감도와 함께 어떠한 입력인자들이 지하수위와 하천수 유입량 모델링 결과에 가장 큰 영향을 끼치는지를 분석하였다. 기본적인 유역의 설계에서 경계조건은 전술한 바와 같이 하천을 제외한 모든 유역경계를 불투수경계로 설정하였으며, 하천의 경계는 15 m로 고정수두경계조건을 설정하였다. 함양은 1년을 주기로 변화하는 동적변동함양량을 적용하였으며, 수리전도도는 27 m/day, 함양률은 40%, 비산출률은 0.2, 각 정호의 양수량은 1,500 m<sup>3</sup>/day를 적용하였다.

### 5.1. 전체 유역에 대한 지하수위 및 하천수 유입 비율 영향인자 비교

Fig. 12는 본 대상지역에서 수리전도도, 함양률, 비산출률 및 양수량과 같은 영향인자들을 기본 설정값을 중심으로 각각 일정한 증감율을 주어 모사한 후 8월 25일에 해당하는 전체 유역에 대한 수위와 하천수 유입 비율을 정리한 것이다. 영향인자 중 수리전도도와 함양률의 경우 그 값들이 증가할수록 유역의 평균 지하수위가 함께 높아지며,



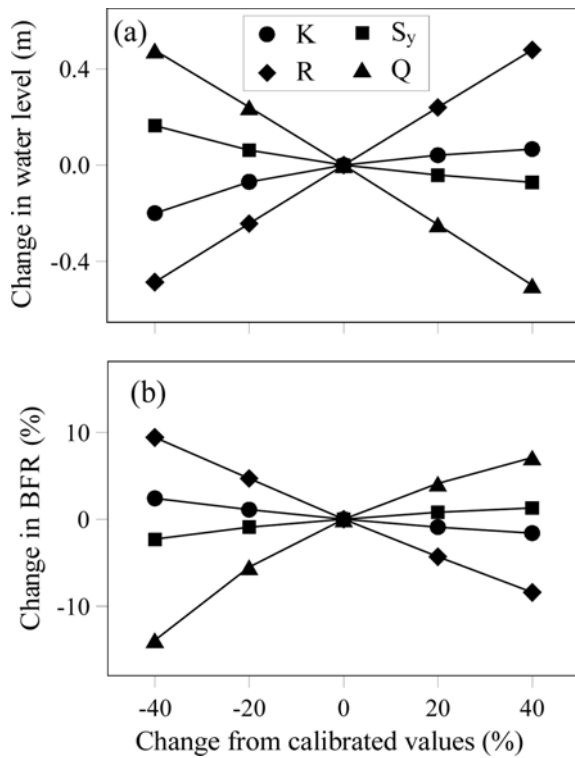


Fig. 12. Effects of varying model parameters on (a) the average water level and (b) the bank filtration rate (August 25); K,  $S_y$ , R and Q represent hydraulic conductivity, specific yield, recharge and pumping rate, respectively.

이 중 함양률에 대해 더 큰 폭으로 증가하는 경향을 보였다. 비산출률과 양수량의 경우 증가할수록 지하수위는 내려가는 경향을 보인다. 이러한 지하수위 변화 결과와는 반대로 하천수 유입 비율은 수리전도도와 함양률이 증가할수록 낮아지며 비산출률과 양수량이 증가할수록 높아지는 것으로 나타났다. Fig. 12는 기본 설정값에서 증감율을 주어 산출한 평균 지하수 수위 및 하천으로부터 유입되는 강변여과수의 비율의 값과 기본 설정값에서의 결과값과의 차이를 도시한 것이다. 유역 평균 수위의 경우 함양률과 양수율에 가장 민감하며, 수리전도도와 비산출률은 이에 비해 덜 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 하천수 유입 비율의 경우 각 영향인자가 설정값 보다 적은 경우 양수율이 가장 민감하게 반응을 보이나 설정값보다 클수록 함양률에 더 크게 지배를 받는 것으로 나타났다.

Fig. 13은 갈수기에 해당하는 3월 20일의 모사 결과를 도시한 것으로 전체적으로 Fig. 12와 매우 유사한 경향을 보인다. 평균 수위 변화량의 경우 Fig. 12에 비해 함양률 변화에 대한 민감도가 떨어진 것으로 나타났으며, 하천수 유입률 변화에 대한 민감도는 모든 인자에 대해서 약

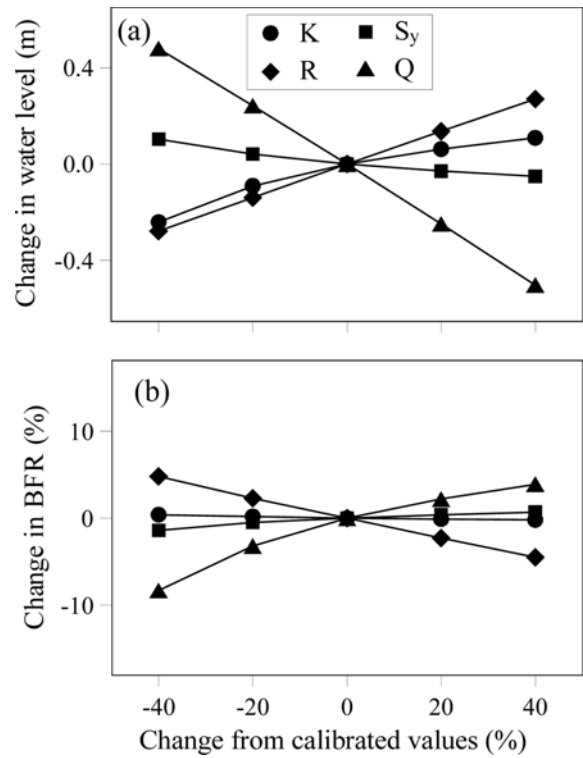


Fig. 13. Effects of varying model parameters on (a) the average water level and (b) the bank filtration rate (March 20).

50% 정도 감소한 것으로 나타났다. 3월 20일의 함양률은 8월 25일의 10분의 1에 불과하며, 함양률의 시기적 변화는 평균 지하수위 및 하천수 유입률에 큰 차이를 유발시킬 수 있음을 보여준다. Fig. 12 및 13과 같이 수리전도도와 비산출률은 하천수 유입 비율에 거의 영향을 미치지 않는 인자인 것으로 나타났다.

### 5.2. 취수정에서의 수위 영향인자 비교

Fig. 14는 취수정 P6에서의 설정값의 증감율에 대해 8월 25일에 해당하는 설정인자별 결과값과 기본 설정값과의 차를 도시한 것으로, 전체 유역의 평균수위변화에서의 각 인자별 민감도와는 다른 결과를 보여준다. 취수정에서 지하수위에 가장 영향을 미치는 요소는 양수량과 수리전도도로 양수량이 기본 설정값인 1,500 m<sup>3</sup>/day 이상인 경우 양수량에 크게 지배를 받으며 1,500 m<sup>3</sup>/day 미만인 경우 수리전도도값에 민감하게 반응한다. 함양률과 비산출률은 양수량과 수리전도도에 비해 취수정의 수위 변화에 미미한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 10개의 취수정 중 가운데에 위치한 P6의 경우 외곽에 위치한 P10보다 지하수위의 변화율이 크나 각 영향인자에 대한 변화는 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 취수정 수위변화

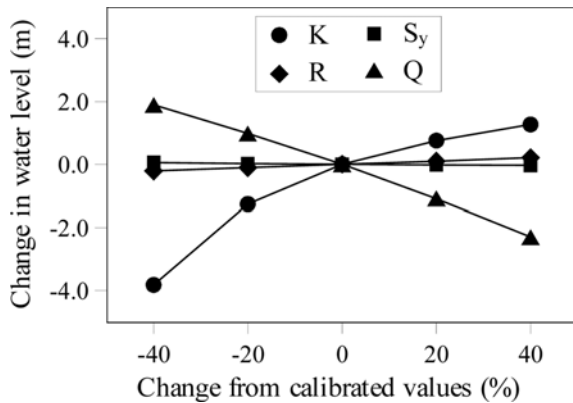


Fig. 14. Effects of varying model parameters on the water level at the pumping well P6 (August 25).

에 대한 민감도 분석 결과는 수리전도도보다 함양률의 변화에 더욱 민감하게 반응하는 유역전체 평균수위의는 확연히 다른 결과이다.

## 6. 토의 및 결론

강변여과 취수가 계획되었던 경상북도 고령군 다산면의 낙동강 주변 충적대수층을 대상으로 2차원 지하수 유동 모사 및 민감도 분석을 수행하여, 취수정 및 주변 대수층에서의 지하수위와 하천수 혼합 비율의 계절적 변화를 분석하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

1) 개념모델의 하천 경계조건은 연평균 하천수위를 고정 수두로 설정하는 경우와 실제 관측된 시계열 자료를 이용하여 변동 수두로 설정하는 경우로 구분하여 모사를 수행하였다. 변동하천수두 조건으로 모사할 경우 하천수 유입 비율의 연중 변화량은 더 크게, 연평균은 작게 나타났다. 따라서 강변 여과 시설 설계 시 하천수 유입 비율을 정확하게 산정하기 위해서는 변동하천수두 조건을 이용해야 하는 것으로 해석된다.

2) 강변으로부터 취수정까지의 이격거리가 커질수록 하천수 혼합 비율은 다소 감소하지만 그 영향이 수 % 정도로 매우 작게 나타났으며, 이는 취수정 이격거리는 하천수 혼합비율과 관련된 강변 여과 시설 설계 시 고려해야 할 주요 인자가 아닌 것으로 해석된다. 하지만 취수정의 이격거리가 짧을수록 하천수의 대수층 체류 시간이 줄어들게 되어 물리적 여과 및 흡착, 화학적 반응, 미생물 분해 등과 같은 오염 저감 기작에 의한 수질 개선 효과에 영향을 미칠 수 있으므로 취수정 이격거리는 여과수의 수질 측면에서 중요하게 고려되어야 한다.

3) 강변여과 취수 시 지하수위 및 하천수 혼합비율에

영향을 미치는 인자인 대수층의 수리전도도 및 저유계수, 지하수 함양량, 취수량 등에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 대수층의 평균 지하수위와 하천수 유입 비율은 취수량과 지하수 함양량 변화에 민감한 반면, 취수정의 지하수위는 수리전도도와 취수량에 민감한 것으로 나타났다.

4) 강우의 계절별 변화가 심하고 이에 따른 하천수위변동이 심한 우리나라의 경우 취수 지역에서의 안정적인 취수장 관리 및 운영을 위해서는 본 모델과 같이 1년을 주기로 변동하는 함양과 하천수위 적용 모사가 요구된다.

5) 강변여과 취수 방식을 이용한 상수도 공급에 있어 지하수위 및 하천수 유입 비율의 변화는 강변여과수 개발 및 운영 시 수량과 수질의 관리에 중요한 요소가 되므로, 본 연구를 통해 제시한 민감도 분석 결과는 향후 강변여과수 개발지 선정 시 타당성 검토 및 관리 운영 시 지표 자료로 이용될 수 있다.

## 사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 3-4-2)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 구민호, 이대하, 2002, 지하수위 변동법에 의한 지하수 함양량 산정의 수치해석적 분석, 지질학회지, 38(3), 407-420.
- 국립지질조사소, 1970, 한국지질도 1:50,000 현풍도폭(SHEET 6821-II).
- 김주환, 백건하, 김형수, 김진삼, 윤성택, 2003, 낙동강 함안군 칠서강변여과 개발 예정지역의 수리지구화학적 특성조사, 2003년 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회, 제주대학교, p. 561-564.
- 김형수, 박승기, 정찬, 백건하, 원이정, 신흥섭, 2002a, 낙동강 달서지구 강변 여과수 취수에 관한 예비 연구, 2002년 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회, 서울시립대학교, p. 93-97.
- 김형수, 이철우, 백건하, 2002b, 지하투과레이다(GPR)를 활용한 천부 충적대수층 퇴적상 연구, 2002년 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회, 부산대학교, p. 144-147.
- 이동기, 박재현, 박창근, 양정석, 남도현, 김대근, 정교철, 최용선, 부성안, 2004, 강변여과 취수시 과도한 지하수 하강을 저감시키기 위한 인공함양의 활용방안 연구, 지질공학 14(4), 391-400.
- 조주래, 김형수, 원이정, 2002, 충적 대수층내의 미소 생물(meiofauna) 생태고찰-외국의 연구 사례소개 및 고령군 다산면 강변여과 현장예비조사-, 2002년 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회, 부산대학교, p. 129-133.

- 창원시 상수도사업소, 2003, 창원시 강변여과수 개발관련 자료집.
- 한국수자원공사, 1995, 하상퇴적층 지하수 조사 보고서.
- 한국수자원공사, 1999, 지하수함양 및 활용증대방안 연구 보고서.
- 한국수자원공사, 2002a, 강변여과수 개발가능지점 및 개발가능량 조사 보고서.
- 한국수자원공사, 2002b, 영남내륙권 광역상수도(취수 및 관로시설) 실시설계 취수원개발방안 보고서.
- 함세영, 정재열, 김형수, 한정상, 류수희, 2004, 창원시 북면 낙동강 주변 하상퇴적층의 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.
- 환경부, 2002, 이릉지구 강변여과수 시범개발 조사사업 보고서.
- Anderson, M.P. and Woessner, W.W., 1992, *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*, Academic Press, San Diego, p. 381.
- Marsily, G. de, 1986, *Quantitative hydrogeology*, Academic Press, San Diego, p. 440.
- Morris, D.A. and Johnson, A.I., 1967, Summary of Hydrologic and Physical Properties of Rock and Soil Materials as Analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1839-D.
- Schubert, J., 2002, Hydraulic aspects of riverbank filtration-Field studies, *J. Hydrol.*, **266**, 145-161.