

## 수치모사를 이용한 하천변 수막재배 지역 대수층-하천간 물 유출입의 시기적 변동 정량화

권홍일<sup>1</sup> · 고동찬<sup>1,2,\*</sup> · 정병주<sup>2</sup> · 하규철<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>과학기술연합대학원대학교 광물·지하수자원학과

<sup>2</sup>한국지질자원연구원 지질환경연구본부 지하수생태연구센터

### 요 약

국내에서 겨울철 비닐하우스 난방을 보조하기 위해 1980년대에 시작된 수막재배는 하천에 인접한 충적평야를 중심으로 전국적으로 실시되고 있다. 최근 연구에 의하면 이러한 수막재배는 겨울철의 높은 지하수 수요로 인해 대수층에 큰 부담을 줄 수 있는 것으로 알려지고 있다. 이번 연구에서는 논산시에 위치한 노성천의 하천변 지역에서 시기적으로 변화하는 대수층과 하천간 물 유동을 정량화하여 수막재배가 대수층과 하천-대수층 상호작용에 미치는 영향을 평가하였다. 현장 자료와 3차원 유한차분 코드인 MODFLOW를 이용하여 3개 대수층으로 구성된 지하수 유동 수치모형을 구축하고 자동변수 추정법인 PEST를 이용하여 수리지질학적 매개변수를 보정하였다. 물수지와 민감도 분석 결과는 연구지역의 하천변 대수층이 하천과 밀접하게 연관되어 있음을 시사하였다. 물수지 분석에서 수막재배 시기에 대수층내로 유입된 하천수가 지하수 양수량의 47%~83%를 차지하는 것으로 산정되었다. 수리지질학적 매개변수에 대한 민감도 분석에서 하류지역 하천바닥 전도도와 상부 대수층인 충적층의 수평 수리전도도가 지하수위에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 수막재배에 의한 과잉양수는 충적대수층의 고갈을 유발할 수 있을 뿐만 아니라 대수층과 수리적으로 잘 연결된 하천 유량에도 영향을 줄 수 있음을 시사한다. 이번 연구는 다양한 현장조사 자료를 기반으로 구축된 지하수 유동 수치모형이 지하수 사용과 기후변화 양상의 변화에 따른 수막재배지 하천변 대수층 내 물질 이동과 환경 변화 연구 등에 활용될 수 있다는 점에서 의의가 있다.

**주요어:** 충적대수층, 농업활동, 시기적 양수, MODFLOW, 지하수 고갈

**Hong-Il Kwon, Dong-Chan Koh, Byeongju Jung and Kyoochul Ha, 2017, Quantification of seasonally variable water flux between aquifer and stream in the riparian zones with water curtain cultivation activities using numerical simulation. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 2, p. 277-290**

**ABSTRACT:** In Korea, water curtain cultivation activities were started to compliment heating film houses during winter in 1980s and they are now commonly practiced nationwide in alluvial plains near streams. Recent studies showed that these agricultural activities can cause considerable burden on the aquifers due to heavy demand of groundwater. This study assessed impact of the activities on the aquifer and stream-aquifer interactions by quantifying seasonally variable water flux between aquifer and stream in riparian zones near Noseongcheon stream of Nonsan. A groundwater flow model with three aquifer layers was established using MODFLOW, a 3D finite difference code, based on input data measured in the field and the hydrogeologic parameters of the model were calibrated by PEST, an automatic parameter estimation method. Results of water budget and sensitivity analysis indicated that the riparian aquifer is closely associated with the stream. From water budget analysis, 47% to 83% of pumpage was derived from stream during water curtain cultivation in winter. Sensitivity analysis on the hydrogeologic parameters revealed that riverbed conductance and horizontal hydraulic conductivity of alluvium had the most largest impact on the simulated groundwater levels. These results suggest that excessive pumping during water curtain cultivation period can cause depletion of the alluvial aquifer, which in turn affect discharge of the stream connected to the aquifer. The constructed groundwater flow model in this study can be employed for the study on mass transport and environmental changes in the riparian zones affected by water curtain cultivation under variable groundwater use and climate change.

**Key words:** alluvial aquifer, agricultural activity, seasonal pumping, MODFLOW, groundwater depletion

\* Corresponding author: +82-42-868-3079, E-mail: [chankoh@kigam.re.kr](mailto:chankoh@kigam.re.kr)

(Hong-Il Kwon, Dong-Chan Koh, and Kyoochul Ha, University of Science and Technology (UST), Daejeon 34113, Republic of Korea; Dong-Chan Koh, Byeongju Jung, and Kyoochul Ha, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 34132, Republic of Korea)

## 1. 서론

지하수와 지표수는 밀접하게 연관된 수자원의 구성요소로서 수량과 물질순환 측면에서 서로 영향을 주고받는다(Winter *et al.*, 1999). 이와 관련하여 지하수-지표수 경계대가 유역 환경변화에 미치는 영향이 중요하게 대두됨으로서 지하수와 지표수를 모두 포함하는 수자원과 생태계가 결합된 지속가능한 관리에 대한 연구의 필요성이 제시되고 있다(Hayashi and Rosenberry, 2002). 지하수는 전 지구적 물 순환에서 통로 역할을 하고 중요한 비중을 차지하기 때문에 지하수의 유출 혹은 유입량을 정량화하려는 시도는 예전부터 지속적으로 이루어져 왔다(Church, 1996). 특히 하천변 지역(riparian zone)은 물순환과 수생태에 미치는 영향이 습지와 유사할 정도로 기여도가 높다는 연구들이 발표됨에 따라 국가 정책에 반영하려는 움직임이 선진국들에서 나타나고 있다(Brinson *et al.*, 2002). 또한, 하천변 지역 수리지질학 조건 변화에 의해 주변 지하수의 양적변화와 생태환경의 변화에 대한 다양한 연구가 수행되고 있는 추세이다(Butturini *et al.*, 2002; Hancock, 2002; Schmidt *et al.*, 2006). 따라서 지하수-지표수 경계대의 특성을 파악하고 오염물질과 영양염류의 이동을 이해하기 위해서는 물의 유출입 특성 규명이 필요하다.

국외에서는 지하수 이용 시설들이 많은 지역에서 지하수 이용과 하천 고갈과의 관계를 관측하고 대책 마련을 위한 다양한 방식의 예측이 이루어진 바 있다(Nyholm *et al.*, 2002; Kollet and Zlotnik, 2003; Barlow and Leake, 2012). 캐나다 소유역에서 하천 유량측정법, 수두측정법, 침윤계(seepage meter)를 이용한 방법 그리고 물 안정동위원소를 이용한 방법을 이용하여 하천으로 유출입 되는 지하수를 정량적으로 평가하고 정량화 방법들을 비교하는 연구가 수행되었고(Cey *et al.*, 1998), 하천과 지하수의 온도자료 또는 헬륨 동위원소를 이용하여 지하수와 하천과의 관계를 정량적으로 평가한 연구도 진행되었다(Gardner *et al.*, 2011; Bartsch *et al.*, 2014). 그리고 수치모사를 이용한 연구는 토양의 물수지 모형과 지

하수 모형을 결합하여 지하수-지표수 경계대에서 물의 이동을 정량화하는 단계에 이르렀다(Krause *et al.*, 2007a). 또한 지하수 수치모사를 이용해 토지이용과 지하수이용밀도가 지하수-지표수 경계대에서 물수지에 미치는 영향을 분석한 사례도 있다(Krause *et al.*, 2007b).

국내 지하수 이용은 대부분 농업용수로 이용되는 경우가 많다. 특히 지하수 이용량이 단기간에 많은 수막재배라는 시설재배 기법은 1984년에 국내에 도입된 기술로 겨울철 지하수를 열원으로 이용하여 시설 내 온도를 일정하게 유지하는 방법으로 온실 및 비닐하우스 시설 내에 설치된 다른 비닐막 혹은 시설 내 수로에 지하수를 살수함으로써 겨울철 야간에 보온 및 단열 효과를 높인다. 이 기법의 도입 이후 Park *et al.* (1988) 의해 수막재배의 장점과 단점, 수막재배의 계절별 사용법들이 한차례 정리된 적이 있지만 지속적인 조사는 수행되지 않았다. 국내 대부분 지역에서는 비순환식 수막재배를 사용하는데 비순환식의 경우 시설 내 보온을 위해 이용한 지하수를 재사용 혹은 대수층에 재주입 하지 않고 배수로로 통해 하천으로 방류하는 방식이다. 최근에는 사용한 지하수를 대수층에 재주입하여 대수층 고갈을 방지하는 방법인 순환식 수막재배 방법을 연구 중이다(Park *et al.*, 2016). 수막재배는 하천에 인접된 층적평야를 중심으로 전국적으로 실시되고 있으며, 실시면적은 1991년에는 1,100 ha, 2006년에는 10,746 ha로 조사된 반면(Kim *et al.*, 2007), 농림축산식품부가 제공하는 2013년 시설채소 온실현황 자료에 의하면 2013년 수막재배 면적은 전체 5,649 ha 중 순환식 수막재배 면적은 1,215 ha, 비순환식 수막재배 면적은 4,433 ha로 추정하였다(MAF, 2014). 수막재배는 유류에너지 대체효과가 커서 막대한 경제적 효과를 가져다주는 유용한 기술이지만 비순환식 수막재배의 경우 지하수 사용량이 막대한 장기적 지하수 고갈과 하천변 환경변화를 초래할 가능성이 크다. 따라서 수막재배가 하천변 인근 지역 물 순환에 미치는 영향을 정량적으로 평가하여 지속적으로 관리가 필요할 것으로 보인다.

이러한 수막재배에 의한 대수층 영향과 관련해

계절적 영향과 인위적 영향이 고려된 물순환에 대한 다양한 연구가 수행되어왔다. 청원-충주 지역에서 수막재배용 지하수 사용량 및 배출량을 일 최저기온과의 상관성을 이용해 지하수 이용량을 추정하는 연구를 수행하여 인위적인 영향을 정량적으로 고려할 수 있는 기초를 마련했고(Moon *et al.*, 2012), 이를 바탕으로 Chang and Chung (2014)은 지하수유동모형을 구축해 지하수위 변화를 분석하고 더 나아가 유역모형(SWAT)을 이용하여 정밀한 함양량을 산정한 후 지하수 유동모형을 구축해 청원지역 물수지 특성을 분석하였다(Chang and Chung, 2015, Chang *et al.*, 2016). 하천과 관측점에서 수위와 온도를 측정하여 수막재배 시기 손실하천이라는 것을 증명했고, 하천바닥 침윤계 실험 결과와 관측된 지하수위 자료를 이용해 하천 유량 감소율을 정량적으로 도출하였다(Kim *et al.*, 2012). 또한 하천 고갈율과 하천 고갈인자라는 개념을 적용하여 계절양수가 하천의 유량변화에 미치는 영향을 정량적으로 평가한 연구가 수행되었다(Lee *et al.*, 2016).

이번 연구에서는 농업활동이 활발한 하천변 지역에서 수행된 수막재배이용량에 대한 연구(Lee *et al.*, 2015)와 인위적인 요인에 의한 지하수위변화 연구

(Cho *et al.*, 2012) 그리고 현장 조사 자료를 바탕으로 1) 지하수 유동 수치모사를 수행하여 수막재배지역 지하수위 변화를 유의성 있게 모사하고 2) 물수지 분석을 통해 하천변 지역 대수층의 양적변화와 지하수위에 대한 다양한 제어 인자들의 정량적 변화를 계산하고 지하수-지표수간 물의 이동을 정량적으로 평가하며 3) 변수 추정방법을 통해 수리지질학적 매개변수들이 지하수위 변화에 미치는 민감도를 평가해 각 매개변수간의 상대적 영향력을 평가하고자 한다.

## 2. 연구지역과 방법

### 2.1 연구지역

연구지역은 충남 논산시 광석면 왕천리와 천동리, 향월리를 포함하는 면적 7.6 km<sup>2</sup>의 지역으로 남쪽에 노성천이 위치하고, 중앙과 동북쪽에 각각 평야지대와 구릉지가 분포한다. 해발고도는 6 m에서 95 m이며, 금강으로 이어지는 논산천의 지류인 노성천은 하천폭이 20 m ~ 30 m이며 동에서 서로 흐른다(그림 1). 연구지역의 지질과 수리지질학적 특성은

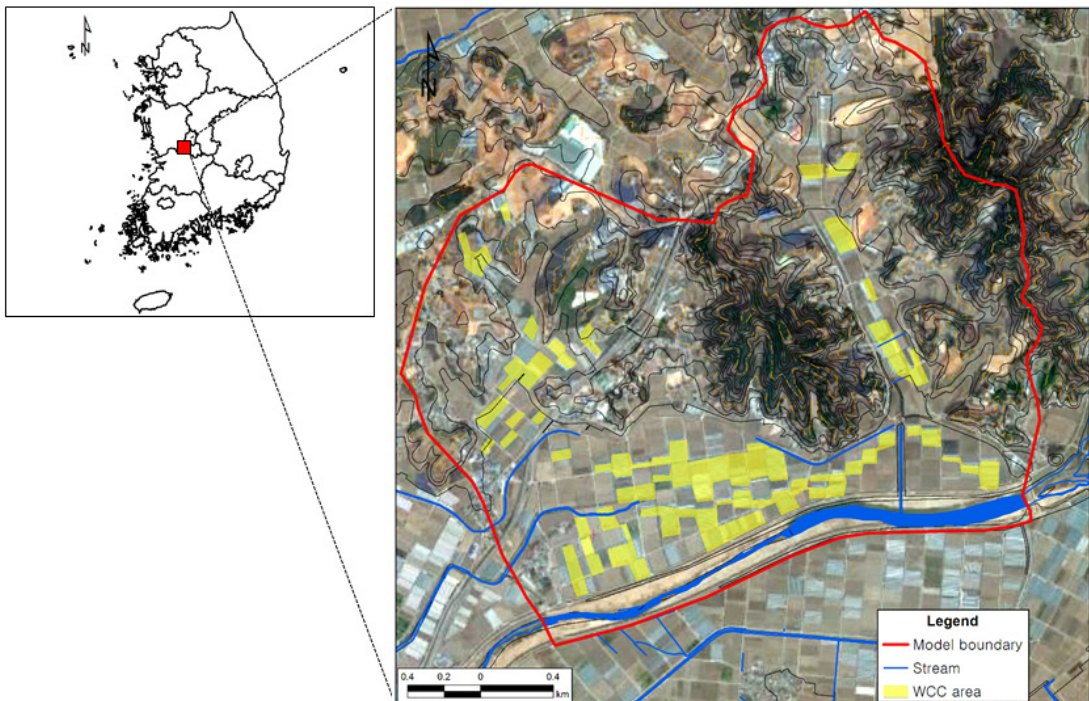


Fig. 1. Satellite image of study area with highlighted greenhouse area (image from Google Earth).

KIGAM (2011)의 5개 관정 시추자료에서 층적층의 심도는 평균적으로 20 m ~ 30 m이며 하부 풍화대의 두께는 15 m 이고, 최하부는 단열이 발달된 기반암으로 확인된다. 기반암은 흑운모화강암 혹은 각섬석 화강암으로 이루어져 있다(Chang and Hwang, 1980). 연구지역 내 노성천에는 보가 중앙에 설치되어 있어 노성천 상류의 수위를 일정하게 유지시켜줄 뿐만 아니라 농농사에 필요한 물의 공급원으로 사용된다. 평야지대에서는 여름에는 농농사가 주로 시행되고 겨울에는 시설재배가 주로 시행된다. 그러나 지하수의 이용량에서는 수막재배로 인해 시설재배의 비중이 농농사에 비해 월등히 크다.

연구지역은 토지이용에 의한 농업활동 유무로 인해 다양한 인자들이 제어된다. 예를 들어 해당지역 질산성 질소 오염과 거동이 토지이용에 따라 달라진다는 선행 연구가 있는데 물의 유출입의 경우도 토지이용에 의한 농업활동 차이로 인해 변화할 것으로 예상된다(Koh *et al.*, 2010). 연구지역은 과거 농농사가 주를 이루는 지역이었지만 2003년부터 수막재배

비닐하우스 면적이 증가하고 있다. 이 지역에서 수막재배 비닐하우스 면적은 2010년 기준으로 약 0.26 km<sup>2</sup>로 알려져 있고 그림 1에서 위성사진을 통해 수막재배에 이용되고 있는 비닐하우스의 분포를 나타내고 있다. 수막재배에 이용되고 있는 논산 전체 지하수공은 약 200개로 추정되며 연구지역에는 26개가 분포하며 관정들의 굴착심도는 20 m ~ 120 m로 다양하다(KIGAM, 2010). 연구지역에서 통상적으로 수막재배는 일 최저기온이 0°C 이하일 때 실시되나 시설의 구조와 재배 품종에 따라 일 최저기온이 0 ~ -5°C의 범위일 때 유동적으로 실시된다. 월별로는 11월 - 4월 사이의 야간에 주로 시행되며 이 기간 동안 다량의 지하수가 양수되어 상당한 지하수위 저하를 유발하게 된다(Cho *et al.*, 2012).

2.2 지하수위 관측

연구지역 관정들의 지하수위 변화와 수막재배시기와의 관계를 알아보기 위하여 Cho *et al.* (2012)의 월별 지하수위 관측 자료를 그림 2와 같이 도시하였

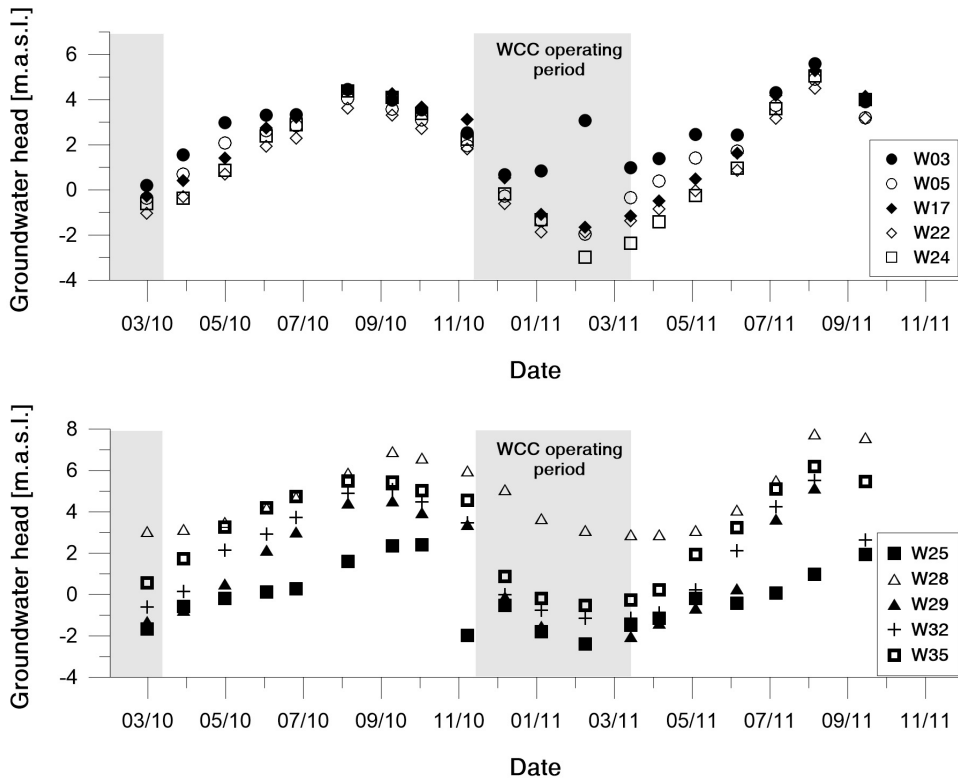


Fig. 2. Monthly groundwater level fluctuation (modified from Cho *et al.*, 2012).

다. 조사대상으로 선정된 10개의 농업용 관정들은 지면의 고도는 유사하지만 다양한 지하수위 분포를 보여주고 있다. 평균적으로 가장 수위가 높은 관정은 W28이며 평균적으로 가장 수위가 낮은 관정은 W25이다. 일별로 2011년 2월 23일에 측정된 지하수위가 가장 낮았고 2011년 8월 19일에 측정된 수위가 가장 높았다. 시기별 지하수위 변화는 3월부터 8월까지는 수위가 상승하고 나머지 기간에는 수위가 떨어지는 형태의 주기를 가지며 음영으로 표시한 수막재배기간에 특히 수위가 큰 폭으로 떨어진다(그림 2).

### 2.3 수치모사 방법

이번 연구에서는 지하수 유동식의 유한차분 근사식을 이용한 3차원 지하수 유동 모형인 MODFLOW (GMS ver. 10.1)을 적용하였다(Wang and Anderson, 1995). MODFLOW는 다공질 포화매체 내에서 지하수 흐름을 모사하는 프로그램으로 유체의 흐름은 층상흐름이며, 유체의 온도와 밀도는 일정하다고 가정한다(McDonald and Harbough, 1998).

연구지역내 경계조건들을 구현하기 위하여 하천 패키지(river package), 함양 패키지(recharge package), 관정 패키지(well package)를 이용하였다. 모형영역 남측에 위치하는 노성천은 하천패키지를 이용하여 모사하였다. MODFLOW내 하천패키지는 지표수를 지하수와 분리시키는 seepage layer를 이용해 이를 통과하는 지하수와 지표수간의 물의 이동을 모사한다. 하천 패키지에 입력되는 주요한 인자인 하천바닥 전도도(riverbed conductance)는 Darcy's law(식 1)의 우변에서  $\Delta H$ 를 제외한 나머지 값을 지칭하는 인자로 MODFLOW에서 이를 이용해 경계조건에 영향 받아 모형으로 유출입 되는 물의 양을 결정한다(식 2, 3).

$$Q = k \frac{\Delta H}{L} A \quad (1)$$

$Q$ : 경계조건에서 물의 유출입량 [ $L^3/T$ ]

$k$ : 수리전도도 [ $L/T$ ]

$A$ : 흐름방향 수직 단면의 넓이 [ $L^2$ ]

$\Delta H$ : 수두차 [ $L$ ]

$L$ : 수두차가 발생한 지점간의 거리 [ $L$ ]

$$C = \frac{k}{L} A = \frac{k}{t} lw \quad (2)$$

$C$ : 하천바닥 전도도 [ $L^2/T$ ]

$t$ : 흐름방향의 매질의 두께 [ $L$ ]

$lw$ : 흐름방향에 수직인 단면의 넓이 [ $L^2$ ]

$$C_{poly} = \frac{k}{t} lw = \frac{k}{t} \quad (3)$$

$C_{poly}$ : 단위 면적당 하천바닥 전도도 [ $(L^2/T)/L^2$ ]  
또는 [ $1/T$ ]

수치모사는 정상류와 부정류에 대해 실시하였으며, 수렴조건은 하나의 시간간격(time step)에 대한 지하수위가 0.01 m 이하로 변동하면 수렴하도록 설정하였다. 부정류모사에서 시간 간격은 강우와 수막재배에 의한 지하수 양수를 모의하기 위해 1일로 짧게 설정하였다.

수치모형 보정에 소비되는 시간과 노력을 최소화하고 보정결과를 향상시키기 위하여 Model-Independent Parameter ESTimation (PEST)을 사용하였다. PEST는 모형에 독립적인 비선형 변수 추정 프로그램이고 여기에 사용된 비선형 변수추정 알고리즘은 복잡한 환경을 구현하는 모형에 강력하게 작용한다. PEST는 기능적으로 크게 3 단계; 변수 정의와 판별, 관측값 정의와 판별 그리고 비선형 예측과 예측분석 알고리즘으로 구성되어 있다. 비선형 예측과 예측분석 알고리즘은 비선형 예측 기술(nonlinear estimation technique) 중의 하나인 Gauss-Marquardt-Levenberg (GML)기법을 사용하여 인자를 최적화하며, GML기법은 다른 최적화 방법에 비해서 모형의 실행횟수가 적기 때문에 최적화에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다(Doherty, 2005). 이번 연구에서는 각 층의 수리전도도, 비저류계수, 비산출율을 현장실험과 문헌조사를 통해 얻어진 값들을 최댓값과 최솟값으로 설정하고 PEST를 이용하여 모형에 알맞은 값들을 추정하였다. 국내에서 Park and Chung (2004)에 의해 수리지질학적 매개변수와 대수층 두께 및 양수정 위치에 대한 민감도를 분석하여 대수층의 지속가능 개발량을 분석한 연구와 Lee et al. (2006)에서 SWAT모형을 이용해 기상, 지하수, 취수량, 토지이용 변화에 대한 건기 총 유출량의 민감도 분석을 통해 기후변화에 의한 건기 유출량을 예측한 연구가 있었다. 이번연구에서 민감도의 경우 PEST에 의해 자동적으로 모든 반복계산에서 식 4와

같이 Jacobian 행렬을 이용해서 각각의 매개변수와 관련된 민감도와 관련된 수치를 계산하였다.

$$csp_i = \frac{[J^T QT]_{ji}^{1/2}}{n} \quad (4)$$

*csp*: 합성 매개변수 민감도 (composite parameter sensitivity)

*i*: 각 매개변수들

*J*: Jacobian 행렬

*Q*: 가중치 행렬

*n*: 변수추정에 이용되는 관측 값들의 개수

2.4 수치모델 구성

대수층 모형은 연구지역의 불균질한 천부지층 특성을 단순화하고, 불필요한 dry cell 생성을 방지하기 위해 3 층으로 나누었으며, 가장 작은 격자 크기는 가로 10 m, 세로 10 m이고 전체 격자수는 55,408 개이다. 천부 대수층으로 볼 수 있는 충적층(alluvium)과 풍화대(weathered zone)를 각각 1 대수층과 2 대수층으로 나누었고 파쇄대를 포함하는 기반암층(fractured bedrock)을 3 대수층으로 대수층 모형을 구성하였다. 1 대수층의 두께는 지표고도와 시추자료를 이용해 10 m, 2 대수층의 두께는 15 m, 3 대수층은 전체 지하수 관정들의 심도를 반영하여 바닥 고도를 -200 m a.s.l.로 설정하였다(그림 3).

모사영역은 노성천과 분수령인 능선을 경계로 산정하여 외부경계조건은 모두 무흐름 경계조건으로 설정하였다. 모사영역 내에 존재하는 보를 모사하기 위해 노성천을 상류와 하류로 나누어 각각 해면고도 6.75 m와 9.00 m의 수위를 적용하여 모사하였다(그림 4). 노성천 수위 관측 자료에 의하면 하천수위변화가 지하수위 변화에 비해 변동 폭이 작기 때문에 하천수위를 일정하게 설정하였다. 연구지역의 수막

재배 방법은 비순환식으로 이용된 지하수는 2개의 주 수로를 통해 연구지역 내 노성천 최하류로 방출되므로 수막재배 배출수가 연구지역 하천수위 변동에 미치는 영향이 미미하다고 판단되어 수치모사에서 배출되는 지하수는 고려하지 않았다.

이번 수치모사에서 이용한 대수층의 수평 수리전도도( $K_h$ , horizontal hydraulic conductivity)는 KIGAM (2011)에서 수행된 양수시험에서 도출된 값과 KIGAM (2015)에서 수행된 순간충격시험 결과 값을 모형에 적용하였다. 수평 수리전도도 값의 범위는 1 대수층은 medium sand에 해당하는 6 ~ 64 m/day, 2 대수층은 fine sand에 해당하는 1 ~ 30 m/day 그리고 3 대수층은 단열이 발달한 암반을 대표할 수 있는 값인 0.01~0.1 m/day을 입력하였다. 충적층의 분포가 광역적으로 불균질하기 때문에 1 대수층과 2 대수층의 수평수리전도도를 불균질하게 입력하였으며 수직 수리전도도( $K_v$ , vertical hydraulic conductivity)는 가장 일반적인  $K_h$ 의 1/10로 설정하였다. 비저류계수( $S_s$ , specific storage)는 KIGAM (2011)에서 수행된 양수시험 결과 값을 3층에 적용하였다(표 1).

지하수 유동모사에서 중요한 인자인 함양율의 범위는 MLTM (2012)에서 지하수위 변동법을 이용해 계산된 논산천 유역 함양율인 7.15~11.75%를 참고하였다. Moon *et al.* (2004)에서 국가 지하수 관측망 자료를 지하수위 변동 곡선법을 이용해 산정된 금강 유역 함양율의 소유역면적 가중 평균치는 8.3%로 산정되었는데 이는 MLTM (2012)에서 제시한 범위 내이다. 따라서 MLTM (2012)의 함양율 범위가 유의하다고 판단되어 수치모사에 적용하였다.

하천패키지에 입력된 하천바닥 전도도는 직접 측정된 값은 없으나 하천에서 5 m 이내 관측정의 수리전도도와 식 3에 근거하여 결정하였다. 하천바닥 전도도의 범위는 하천 상류와 하류지역에 동일하게 적

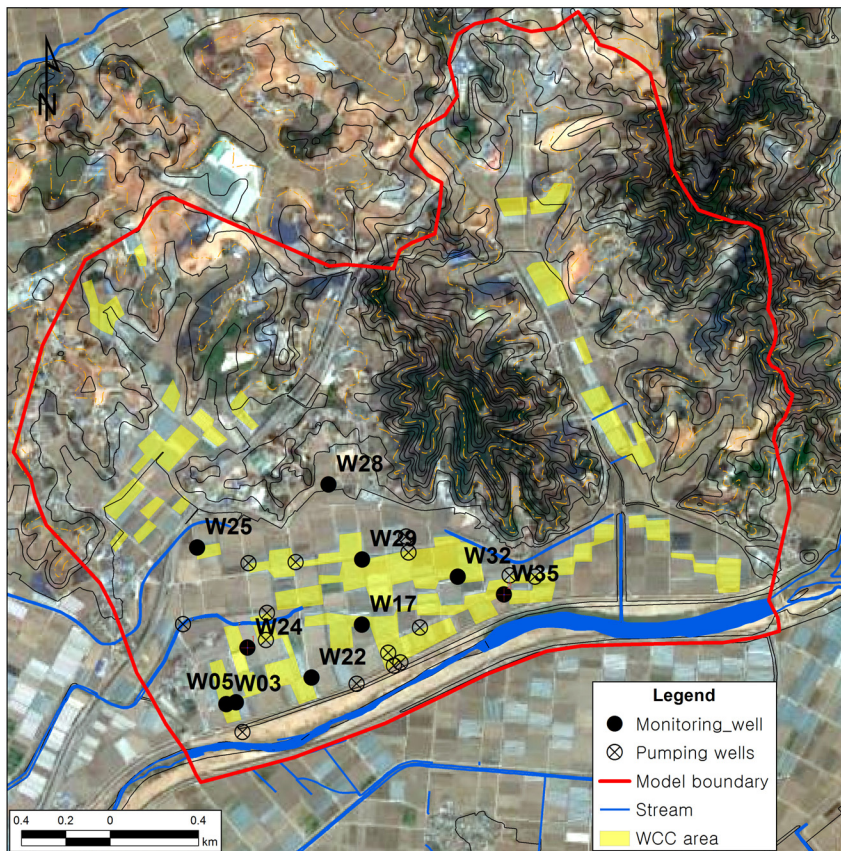


Fig. 3. Cross-section of the constructed aquifer model.

**Table 1.** Hydrogeological parameters used in numerical simulation.

Input hydrogeological parameters							
Aquifer	Thickness	$K_h$	$K_v$	$S_y$	$S_s$	$C_{poly}^{1)}$	Recharge <sup>2)</sup>
	[m]	[m/day]	[m/day]	-	[1/m]	[1/day]	[%]
Layer 1	15	6-64	0.6-6	0.01-0.3	-	Upstream	7.15-11.75
Layer 2	10	1-30	0.1-3	0.01-0.3	-	Downstream	
Layer 3	170	0.01-0.1	0.01-0.1	-	$2 \times 10^{-6}$ $-1 \times 10^{-5}$	0.1-15	
Estimated hydrogeological parameters by PEST							
Aquifer	Thickness	$K_h$	$K_v$	$S_y$	$S_s$	$C_{poly}^{1)}$	Recharge <sup>2)</sup>
		[m/day]	[m/day]	-	[1/m]	[1/day]	[%]
Layer 1	15	6-64	6	0.3	-	Upstream	
Layer 2	10	1-30	3	0.3	-	Downstream	11.7
Layer 3	170	0.06	0.01	-	$2 \times 10^{-6}$	0.5	

<sup>1)</sup> streambed conductance by unit area, <sup>2)</sup> percent of precipitation



**Fig. 4.** Location of groundwater wells and the Noseongcheon stream (image from Google Earth).

용하였다.

Lee *et al.* (2015)에 의하면 수막재배 기간 연구지역의 양수량은 420 m<sup>3</sup>/day/ha으로 계산되었다. 연구지역에 수막재배 면적이 26 ha이고 수막재배 이용 관정수가 26개임을 고려하여 수막재배에 의한 각 관정의 최대양수량은 420 m<sup>3</sup>/day로 산정하였다. 양수량의 경우 일 최저기온이 0°C이었던 2010년 10월 27일부터 점진적으로 증가하여 2010년 11월 30일부터는 최고 양수량으로 양수하고 2011년 3월부터 다시 점진적으로 하강하여 양수량이 0으로 도달하는 것으로 입력하였다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 지하수 유동 수치모사 결과

##### 3.1.1 정상류 수치모사

연구지역 대수층의 평균적인 지하수위 분포를 추정하기 위해 정상류 모사를 실시하였다. 수치모델의 보정을 위해 KIGAM (2011)의 2010년 3월 20일에 측정된 10개 관정(W03, W05, W17, W22, W24, W25, W28, W29, W32, W35)의 수위자료를 사용하였다. 표 1는 PEST를 이용하여 각 입력인자들의 추정 값을 나타내었다.

정상류 수치모사 결과 측정된 지하수위와 모의된 지하수 수위를 그림 5와 같이 나타내었고 상관관계

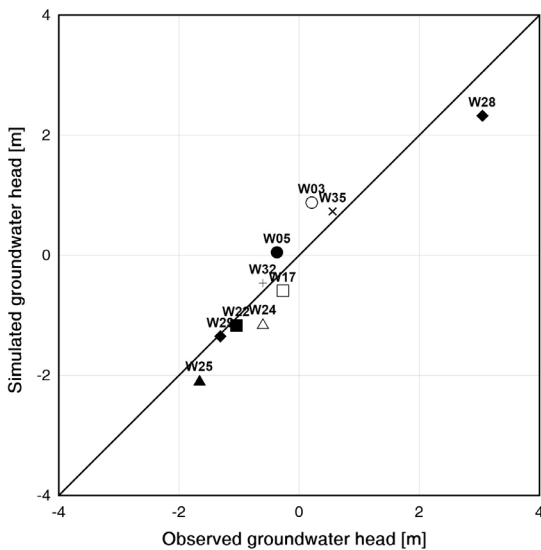


Fig. 5. Calibration curve of steady-state model.

(R<sup>2</sup>)는 0.89로 나타났다(표 2). 관측 값이 0 근처에 분포하기 때문에 추가적으로 RMSE (root mean square error)와 MAE (mean absolute error)를 이용하여 구축된 정상류 지하수모형이 유의한지 검증하였다. RMSE는 0.42 m, MAE는 0.36 m로 나타나 지하수 사용이 많은 시기임에도 불구하고 두 값 모두 0.5 m 이하로 나타났기 때문에 모형이 유의할 것으로 판단하였으며 (표 2), RMSE와 MAE가 0.07 m의 작은 차이를 보이는 것은 이 모형이 이상치의 영향을 거의 받지 않았음을 지시한다(Legates and McCabe, 1999). 모의된 지하수 등수위선도에서 지하수 흐름은 구릉지의 경우 지형경사를 반영하고 있지만 평야지대에서는 수막재배용 양수정이 밀집해 있는 지역 방향으로 지하수 흐름이 형성되었다(그림 6).

##### 3.1.2 부정류 수치모사

연구지역의 수막재배와 하천이 영향을 주는 지하수위 변동의 시간적 변화를 유의성 있게 모사하기 위해 부정류 수치모사를 수행하였다. 정상류 수치모

Table 2. Results of goodness-of-fit of the steady-state model.

R <sup>2</sup>	RMSE	MAE
0.89	[m] 0.42	[m] 0.36

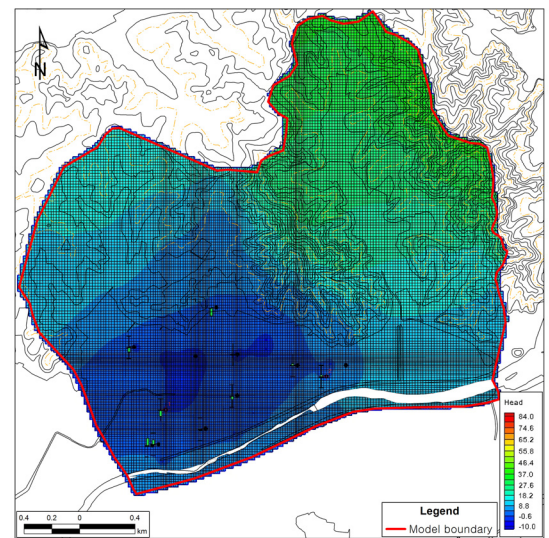


Fig. 6. Equipotential map of the calibrated steady-state model.



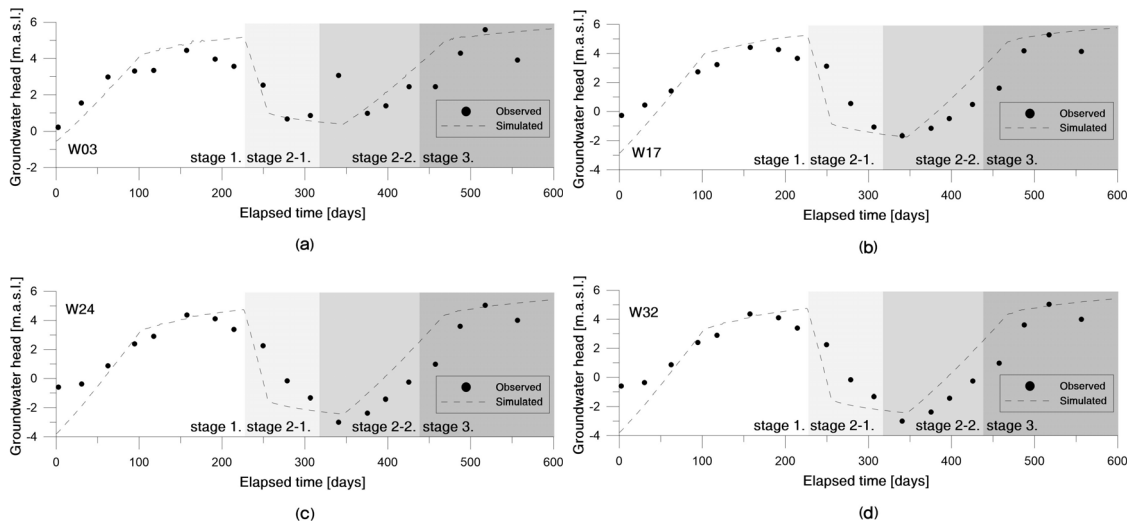
사를 바탕으로 관측 시작일인 2010년 3월부터 2011년 11월 까지 약 620일 동안의 지하수위 변화를 모사했다(그림 7). 모사기간을 크게 네 구간으로 나누어 살펴보면 첫 번째 구간은 2010년 3월 20일부터 2010년 10월까지 이전 수막재배의 영향으로 수위가 최저로 내려간 후 지하수 함양과 하천수 유입에 의해 수위가 회복되는 시기이며 기온이 상승하여 지하수 이용량이 점차 감소하는 시기이다. 두 번째 구간은 2010년 11월부터 2011년 1월 31일까지로 수막재배로 인해 수위가 급격하게 하강하는 구간이다. 세 번째 구간인 2011년 2월 1일부터 2011년 3월 31일까지는 수막재배에 의한 양수량이 최대에서 점점 감소하는 시기이다. 마지막 구간은 2011년 4월 1일부터 모사가 끝나는 2011년 11월 30일까지로 수막재배가 끝나고 양수가 없는 기간이다.

연구지역 수막재배에 의한 수위변화를 대변할 수 있는 관정 4개(W03, W17, W24, W32)를 선택하여 관측된 수위자료와 지하수 유동 모사를 통해 계산된 수위 값을 비교하였다. 각 관정의 부정부류 모사 결과와 관측된 값을 이용해 R<sup>2</sup> 값을 계산하였다. W03 관정은 0.45로 가장 낮았고, W17 관정은 0.58, W24 관정은 0.60, 그리고 W32 관정은 0.70로 가장 높았다. 모사 시작 시기에는 -3.8 ~ -0.5 m a.s.l.의 수위분포를 형성하고 200일이 지난 시기에는 최대수위를 보이며 4.6 ~ 5.2 m a.s.l.의 범위를 형성한다. 수위가

모사 시작 시기에 비해 최대 약 8 m 회복되었다. 수막재배가 시작되는 시기부터 수위가 급격히 하강해 340일이 지난 시기에 수위는 -2.4 ~ 0.4 m a.s.l.로 모사된다. 수막재배가 끝난 시기부터 수위는 회복되어 다시 최대수위로 회복된다.

### 3.2 물수지 분석

물수지란 해당 영역에 들어오는 물의 양과 나가는 물의 양의 차는 해당 영역내 물의 양적변화와 동일하다는 개념으로 정의된다(Thornthwaite, 1955). 국내외에서 수치모사 결과를 이용해 유역 내 물수지를 분석하여 다양한 제어인자들 간의 관계를 연구한 사례들은 종종 보고된 바 있다(Krause *et al.*, 2007b, Chang and Chung, 2015). 대수층 중심의 물수지에서 주요 유입인자는 강우에 의한 함양과 지표수로부터의 유입이 있다. 유출인자의 경우 지표수로의 유출, 증발산 그리고 지하수 이용이 있다. 연구지역에서 물수지에 크게 영향을 주는 4 가지 주요 인자인 지하수 이용(well out), 강우 함양(recharge in), 하천수 유입(river leakage in)과 저류 지하수 유입(storage in)이 물수지에서 차지하는 기여도를 모사기간 전체에 걸쳐 나타내었다 (그림 8). 구간별로 제어 인자의 기여도 변화를 살펴보면 1 단계에서 지하수 이용은 최대량에서 감소하여 0 m<sup>3</sup>/day에 도달하여 일정기간 유지되며, 이때 하천수로부터의 유입량(8,771 m<sup>3</sup>/day)



**Fig. 7.** Comparisons between observed and simulated groundwater levels for seasonal change of groundwater level in the four selected wells of (a) W03, (b) W17, (c) W24, and (d) W32.

이 지하수 이용량( $9,522 \text{ m}^3/\text{day}$ )의 대부분을 차지하며, 양수량보다 더 많은 물이 하천수에서 유입되어 지하수위가 회복되는 기간도 존재한다. 2-1 단계는 수막재배가 시작되는 시기로 지하수 이용량이 급격히 증가해 최대 이용량까지 도달한다. 이 때 지하수

이용량( $10,500 \text{ m}^3/\text{day}$ )은 대수층에 저류되어 있던 지하수( $5,491 \text{ m}^3/\text{day}$ )와 하천에서 유입된 하천수( $4,986 \text{ m}^3/\text{day}$ )가 비슷한 비율로 구성된다. 2-2 단계에서는 이전보다 하천수의 유입 비율이 더 높아졌다(well out:  $7,593 \text{ m}^3/\text{day}$ , river leakage in:  $6,296$

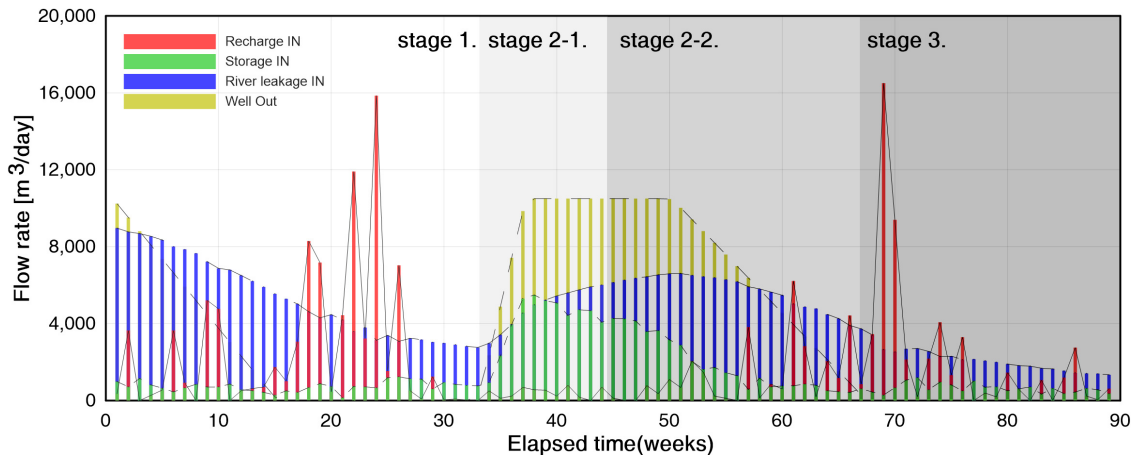


Fig. 8. Temporal variation of water budget components.

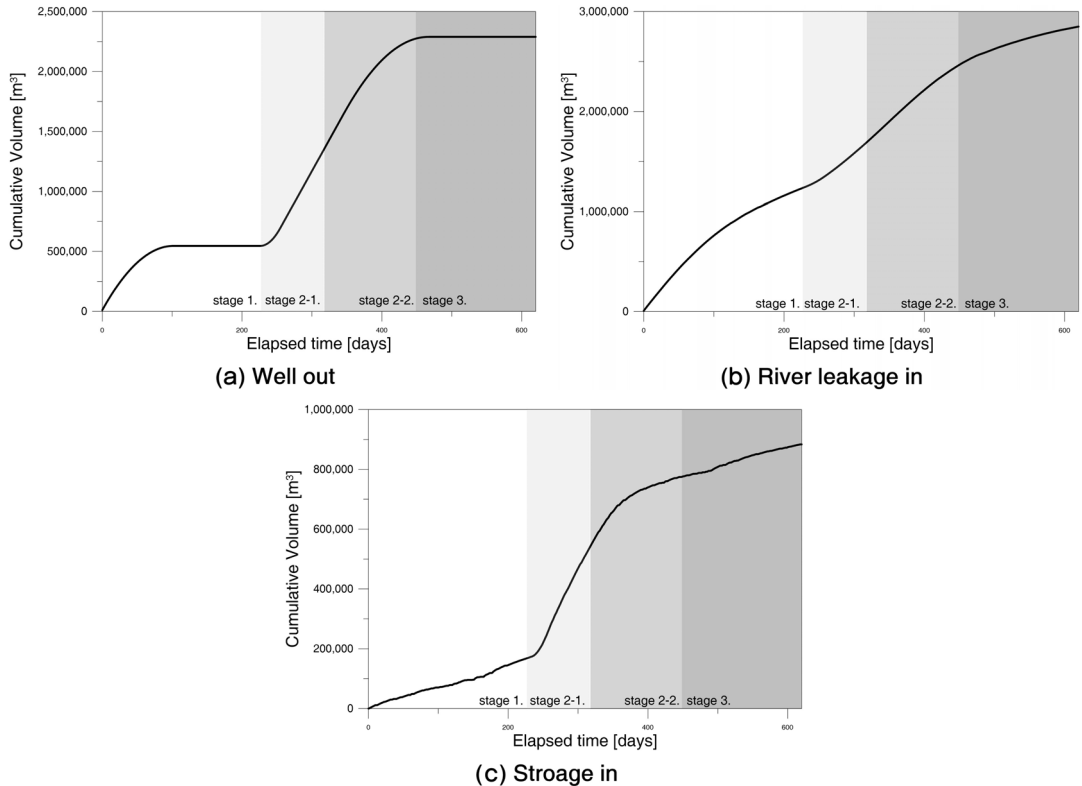


Fig. 9. Cumulative volume of water budget components.

$m^3/day$ , storage in:  $1,447 m^3/day$ ). 3 단계는 수막 재배가 중단된 이후로 대수층 저류량이 강수 함양과 하천수 유입으로 인해 증가한다.

물수지 분석 결과 대표적인 제어인자인 지하수 이용(well out), 하천수 유입(river leakage in), 저류 지하수 유입(storage in)의 각 단계별 변화율을 관찰하기 위해 누적 지하수이용량을 시기별로 도시하였다(그림 9). 누적 지하수 이용은 1 단계에서 감소하여 증가하지 않고 2-1 단계에서는 급격히 증가하며 2-2 단계에서 점차 기울기가 감소하여 3 단계에서 일정한 값을 보인다. 누적 하천수 유입은 2-1 단계와 2-2 단계에서 기울기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 수막재배로 인해 이 기간 동안에 수막재배를 시행하지 않는 기간보다 더 많은 물이 하천수에서 지하수로 유입된다는 것을 잘 보여 준다. 누적 저류 지하수 유입의 경우 2-1 단계에서 수막재배에 의해 이전에 함양되었던 지하수가 지하수 이용으로 인해 감소하는 양상을 보여주며 2-2 단계에서는 강우에 의해 함양되었던 지하수의 고갈로 증가율이 감소하는 양상을 보인다.

### 3.3 수리지질학적 매개변수의 민감도 분석

부정류 수치모사에 적용된 수리지질학적 매개변수들의 값이 주어진 범위 내에서 변함에 따라 모의된 지하수위에 미치는 민감도를 분석하였다. PEST에 의한 민감도 분석 결과 하류 하천바닥 전도도(0.014), 1 대수층의 수평 수리전도도(0.011), 2 대수층의 비산출율(0.007), 상류 하천바닥 전도도(0.004) 그리고 2 대수층의 수직 수리전도도(0.002) 순으로 민감도가 높은 것으로 계산되었다(그림 10). 2 대수

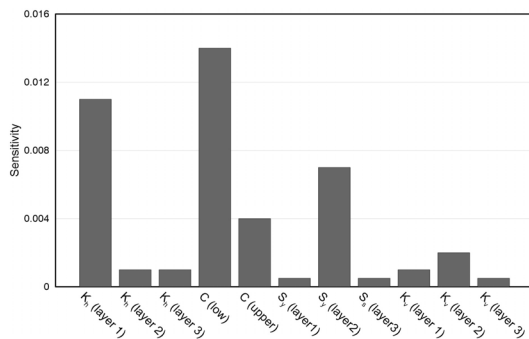


Fig. 10. Results of sensitivity analysis of hydrogeological parameters.

층과 3대수층의 수평 수리전도도, 1 대수층과 3 대수층의 수직 수리전도도와 1 대수층의 비산출율, 3 대수층의 비저류계수는 모두 0.001 이하의 낮은 민감도를 보였다.

## 4. 토 의

정상류 지하수 유동 수치모사에서 PEST를 이용하여 입력 변수를 보정하였고, 구축된 지하수 유동 모형으로부터 수막재배의 마지막 시기의 연구지역 지하수위 분포를 추정하였다. 수리지질학적 매개변수는 현장 조사와 문헌조사를 바탕으로 입력되었기 때문에 유의하다고 할 수 있으며 1 층과 2 층의 수평적 불균질성을 잘 대변한다고 생각된다. 겨울철에 연구지역의 지하수위는 수막재배 관정이 밀집한 지역에서 가장 낮으나 하천 인접 지역에서는 대수층으로 하천수가 유입되어 지하수위가 유지되므로 전체적으로 지하수위가 평야지대 중심부에서 가장 낮게 묘사되는데, 이는 실제 관측 값과 잘 일치한다.

물수지 분석을 이용해 하천변 지역 지하수와 지표수 사이의 물 이동을 정량적으로 평가해 보았는데 시기별 4 개로 나눈 단계마다 지하수와 지표수간의 물 이동특성이 다르게 나타났다. 1 단계에서는 지하수 양수가 끝난 후부터 강우에 의한 함양과 하천수의 유입으로 인해 저류량이 증가하여 2-1 단계에 수막재배에 이용되는 물에서 지하수가 차지하는 비율이 50%였다가 저류량 감소로 인해 하천수의 비율이 높아졌다. 3 단계에서는 수막재배가 종료되었지만 지하수위가 하천수위보다 낮기 때문에 하천수에서 지하수로의 이동량이 존재하였다. 따라서 물수지 분석을 통해 시기별 각 제어 인자들의 기여도와 중요한 세 가지 제어인자인 양수량, 하천수 유입량, 저류 지하수 유입량의 시기별 증가양상의 변화에 대한 평가가 가능하였다.

수리지질학적 매개변수에 대한 민감도 분석은 물수지 분석과 유사한 결과를 보였다. 하류지역 하천바닥 전도도가 가장 높은 민감도를 보이는 것은 하천수가 지하수 저류량에 기여하기 때문으로 추정된다. 하천 상류와 1 대수층 수평 수리전도도의 민감도가 높은 것도 동일한 과정에 의한 것으로 볼 수 있다. 이러한 특성은 연구지역의 대수층이 하천과 직접적으로 연결되어 하천과의 상호작용에 의해 지하수위

가 크게 영향을 받았음을 지시한다.

이번 연구에서 구축된 지하수 유동 모형은 물리적 인자인 지하수위만을 이용해 수치모형을 보정하였기 때문에 해의 유일성(uniquness)에서 한계를 가질 수 있다. 그리고 사용 중인 관정에서 지하수위를 측정하였으므로 측정값의 불확실성이 높고 장기적인 자료를 이용할 수 없었다. 따라서 향후 잘 설계된 지하수 관측정에서 장기적으로 관측된 지하수위, 하천유량 관측 자료, 수리지구화학과 동위원소 인자 등을 이용하여 모형을 추가적으로 보정하고 검증할 필요가 있다.

이번 연구결과는 하천변 대수층에서 하천변 지역에서 수막재배 시행 등으로 지하수가 과다하게 양수될 경우에 하천수가 대수층으로 유입되는 양이 커짐에 따라 대수층 내 환경변화와 대수층 고갈뿐만 아니라 지표수의 고갈도 유발할 수 있음을 시사하고 있다(Nyholm *et al.*, 2002; Kollet and Zlotnik, 2003; Barlow and Leake, 2012). 비닐하우스 난방의 에너지 효율성 측면에서 수막재배를 중단할 수 없는 상황에서는 예를 들면 비순환식에서 순환식 수막재배로 변경하는 등 겨울철 과다 양수로 인해 대수층에 주는 영향을 줄이는 노력이 필요하다. Kim *et al.* (2015)에 의해 순환식 수막재배에 대해서는 효율적 수행과 관련하여 다양한 인자들을 도출하기 위한 노력이 이루어지고 있다. 또한 다양한 측면에서 지하수 이용에 대한 하천변 대수층의 환경변화 양상을 바라보아야 할 것이다. 더불어 해당 자료를 바탕으로 하천변 수생태계에 대한 영향 평가와 향후 기후변화에 대한 요인도 고려되어야 할 것이다.

## 5. 결론

겨울철 수막재배가 이루어지는 하천변 지역 대수층에 대해 현장 조사 자료에 근거하여 지하수 유동 수치모사를 수행하고, 물수지와 민감도 분석을 통해 수리지질학적 매개변수와 대수층의 양적변화를 제어하는 주요 요인들을 평가하여 세부적으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 인위적 영향을 크게 받고 있는 하천변 대수층에 대해 구축된 지하수 유동 수치모형은 연구 지역의 대수층 특성을 유의성 있게 구현하였으며, 수막재배를 포함한 인위적인 요인에 의한

지하수위의 공간적 분포와 시기적으로 인위적 요인과 계절적 요인에 의해 큰 변동성을 가지는 연구지역 지하수위의 시계열적 변동을 유의성 있게 모사하였다.

- 2) 물수지 분석을 통해 시기별 지하수 이용, 지하수 함양, 하천수 유입과 대수층내에 저류되어 있던 지하수의 유입이 지하수와 지표수간 유출입 특성변화에 미치는 영향을 분석하여, 수막재배기간에는 대수층으로 유입된 하천수가 양수량의 47% ~ 83%를 차지하는 것으로 산정되어, 수막재배에 의해 대수층에 대한 하천수의 영향이 클 수 있음을 잘 보여주었다.
- 3) 수리지질학적 매개변수가 지하수위에 미치는 영향에 대한 민감도 분석 결과 하류지역 하천바닥 전도도와 1 대수층의 수평 수리전도도 값이 높은 민감도를 보이는 반면 3 대수층의 비저류계수와 수직 수리전도도가 가장 낮은 민감도를 보였다.

## 사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 '수리생태학적 기법을 활용한 수권 경계면에서 물질 순환 평가 기술 개발(15-3420)' 과제의 지원으로 수행되었습니다. 사려 깊은 심사평을 주신 익명의 두 분 심사자에게 감사드립니다.

## REFERENCES

- Barlow, P.M. and Leake, S.A., 2012, Streamflow depletion by wells-Understanding and managing the effects of groundwater pumping on streamflow. No. 1376, US Geological Survey, 95 p.
- Bartsch, S., Frei, S., Ruidisch, M., Shope, C.L., Peiffer, S., Kim, B. and Fleckenstein, J.H., 2014, River-aquifer exchange fluxes under monsoonal climate conditions. *Journal of Hydrology*, 509, 601-614.
- Brinson, M.M., MacDonnell, L.J., Austen, D.J., Beschta, R.L., Dillaha, T.A. and Donahue, D.L. *et al.*, 2002, Riparian areas: Functions and strategies for management. National Academy of Sciences, Washington DC, 444 p.
- Butturini, A., Bernal, S., Sabater, S. and Sabater, F., 2002, The influence of riparian-hyporheic zone on the hydrological responses in an intermittent stream. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6(3), 515-526.

- Cey, E.E., Rudolph, D.L., Parkin, G.W. and Aravena, R., 1998, Quantifying groundwater discharge to a small perennial stream in southern Ontario, Canada. *Journal of Hydrology*, 210(1), 21-37.
- Chang, S., Chung, I.-M., Kim, Y. and Moon, S.-H., 2016, Long-term groundwater budget analysis based on integrated hydrological model for water curtain cultivation site: Case study of Cheongweon, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52(3), 201-210 (in Korean with English abstract).
- Chang, S.W. and Chung, I.M., 2014, Analysis of groundwater variations using the relationship between groundwater use and daily minimum temperature in a water curtain cultivation site. *The Journal of Engineering Geology*, 24(2), 217-225 (in Korean with English abstract).
- Chang, S.W. and Chung, I.M., 2015, An analysis of groundwater budget in a water curtain cultivation site. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 35(6), 1259-1267 (in Korean with English abstract).
- Chang, T.W. and Hwang, J.H., 1980, Geological report of the Nonsan sheet (1: 50,000). Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources, 29 p (in Korean).
- Cho, B.-W., Yun, U., Lee, B.-D. and Ko, K.-S., 2012, Hydrogeological characteristics of the Wangjeon-ri PCWC area, Nonsan-city, with an emphasis on water level variation. *The Journal of Engineering Geology*, 22(2), 195-205 (in Korean with English abstract).
- Church, T.M., 1996, An underground route for the water cycle. *Nature*, 380, 579-580.
- Doherty, J., 2005, PEST: Software for model-independent parameter estimation, Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia. <http://www.pesthomepage.org/Home.php> (January 15, 2017).
- Gardner, W.P., Harrington, G.A., Solomon, D.K. and Cook, P.G., 2011, Using terrigenic <sup>4</sup>He to identify and quantify regional groundwater discharge to streams. *Water Resources Research*, 47, W06523, doi:10.1029/2010 WR010276.
- Hancock, P.J., 2002, Human impacts on the stream-groundwater exchange zone. *Environmental Management*, 29(6), 763-781.
- Hayashi, M. and Rosenberry, D.O., 2002, Effects of ground water exchange on the hydrology and ecology of surface water. *Ground water*, 40(3), 309-316.
- KIGAM, 2010, Integrated technologies in securing and applying groundwater resources to cope with Earth environment changes. GP2009-009-01-2010(2), 347 p (in Korean with English abstract).
- KIGAM, 2011, Integrated technologies in securing and applying groundwater resources to cope with Earth environment changes. GP2009-009-01-2011(3), 559 p (in Korean with English abstract).
- KIGAM, 2015, Assessment of mass exchange in hydro-spheric interfaces through eco-hydrological technologies. GP2013-021-2015(3), 294 p (in Korean with English abstract).
- Kim, N.W., Lee, J., Chung, I.M. and Kim, C.H., 2012, Change of groundwater-streamflow interaction according to groundwater abstraction in a green house land. *Journal of Korea Water Resources Association*, 45(10), 1051-1067 (in Korean with English abstract).
- Kim, H., Jeon, J., Paek, Y., Pyo, H., Jeong, J. and Kim, Y., 2015, Analysis of temperature changes in greenhouses with recirculated water curtain system. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 24(2), 93-99 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.J., Lee, S.Y., Lee, J.H., Bak, E., Jeon, H., Cho, M.H., Yu, I.H., Rhu, H.R., Kim, K.D. and Park, J.S., 2007, Technology for vinyl house water curtain cultivation. National Institute of Horticultural and Herbal Science, 88 p (in Korean).
- Koh, D.C., Mayer, B., Lee, K.S. and Ko, K.-S., 2010, Land-use controls on sources and fate of nitrate in shallow groundwater of an agricultural area revealed by multiple environmental tracers. *Journal of contaminant hydrology*, 118(1), 62-78.
- Kollet, S.J. and Zlotnik, V.A., 2003, Stream depletion predictions using pumping test data from a heterogeneous stream-aquifer system (a case study from the Great Plains, USA). *Journal of Hydrology*, 281(1), 96-114.
- Krause, S., Bronstert, A. and Zehe, E., 2007a, Groundwater-surface water interactions in a North German lowland floodplain-implications for the river discharge dynamics and riparian water balance. *Journal of hydrology*, 347(3), 404-417.
- Krause, S., Jacobs, J. and Bronstert, A., 2007b, Modelling the impacts of land-use and drainage density on the water balance of a lowland-floodplain landscape in north-east Germany. *Ecological Modelling*, 200(3), 475-492.
- Lee, B.-J., Kim, Y., Cho, B.-W., Yoon, U., Ha, K., Lee, B.-D., Moon, S.-H., Yoon, P. and Kim, S.-Y., 2015, Estimation of Groundwater usage for water curtain cultivation using a raing curve. *The Journal of Engineering Geology*, 25(1), 35-43 (in Korean with English abstract).
- Lee, H., Koo, M.-H., Lim, J., Yoo, B.-H. and Kim, Y., 2016, Impacts of seasonal pumping on stream depletion. *Journal of Soil Groundwater Environment*, 21(1), 61-71 (in Korean with English abstract).
- Lee, K.S., Chung, E.-S. and Shin, M.-J., 2006, Effects of changes of climate, groundwater withdrawal, and land-use on total flow during dry period. *Journal of Korea*

- Water Resources Association, 39(11), 923-934 (in Korean with English abstract).
- Legates, D.R. and McCabe, G.J., 1999, Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resources research*, 35(1), 233-241.
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1998, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, 586 p.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAF), 2014, <http://www.data.go.kr/dataset/3055095/fileData.do> (as of November 19, 2014).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs of Korea (MLTM), 2012, National Groundwater Management Plan. 543 p (in Korean with English abstract).
- Moon, S.H., Ha, K., Kim, Y. and Yoon, P., 2012, Analysis of groundwater use and discharge in water curtain cultivation areas: Case study of the Cheongweon and Chungju areas. *The Journal of Engineering Geology*, 22(4), 387-398 (in Korean with English abstract).
- Moon, S.K., Woo, N.C. and Lee, K.S., 2004, Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge. *Journal of Hydrology*, 292(1), 198-209.
- Nyholm, T., Christensen, S. and Rasmussen, K.R., 2002, Flow depletion in a small stream caused by ground water abstraction from wells. *Ground Water*, 40(4), 425-437.
- Park, G., Lee, H., Koo, M.-H. and Kim, Y., 2016, Strategies for an effective artificial recharge in alluvial stream-aquifer systems undergoing heavy seasonal pumping. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52(3), 211-219 (in Korean with English abstract).
- Park, J.-C., Ahn, C.-K. and Han, K.-Y.V., 1988, Effects of water curtain system with ground water in film houses on heating and cooling air temperature. *The Journal of the Institute for Agricultural Resource Utilization*, 22(1), 107-121 (in Korean with English abstract).
- Park, K.J. and Chung, S.O., 2004, Sensitivity analysis of the groundwater flow model parameters in a small rural water shed. *Journal of Korea Water Resources Association*, 37(8), 687-693 (in Korean with English abstract).
- Schmidt, C., Bayer-Raich, M. and Schirmer, M., 2006, Characterization of spatial heterogeneity of ground-water-stream water interactions using multiple depth streambed temperature measurements at the reach scale. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3(4), 1419-1446.
- Thornthwaite, C.W., 1955, The water balance (No. 551.57 T515w). Drexel Institute of Technology, Centerton, NJ (EUA), Laboratory of Climatology, 104 p.
- Wang, H.F. and Anderson, M.P., 1995, Introduction to groundwater modeling: Finite difference and finite element methods. Academic Press, 236 p.
- Winter, T.C., 1999, Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal*, 7(1), 28-45.

---

Received : November 8, 2016

Revised : January 22, 2017

Accepted : January 25, 2017