Journal of Environmental Science International
28(9); 737~749; September 2019

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2019.28.9.737

ORIGINAL ARTICLE

국내 시설농업단지의 수리지질 특성을 고려한 인공함양 민감도 분석 : 수리전도도 및 주입정과 양수정의 이격거리

최정찬 · 강동환[1)*]

부경대학교 지구환경과학과, [1)]부경대학교 환경연구소

Sensitivity Analysis of Artificial Recharge in Consideration of Hydrogeologic Characteristics of Facility Agricultural Complex in Korea : Hydraulic Conductivity and Separation Distance from Injection Well to Pumping Well

Jung Chan Choi, Dong-hwan Kang[1)*]

Department of Earth & Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Korea
[1)]Environmental Research Institute, Pukyong National University, Busan 48547, Korea

Abstract

In this study, the sensitivity analysis of hydraulic conductivity and separation distance (distance between injection well and pumping well) was analyzed by establishing a conceptual model considering the hydrogeologic characteristics of facility agricultural complex in Korea. In the conceptual model, natural characteristics (topography and geology, precipitation, hydraulic conductivity, etc.) and artificial characteristics (separation distance from injection well to pumping well, injection rate and pumping rate, etc.) is entered, and sensitivity analysis was performed 12 scenarios using a combination of hydraulic conductivity (10^{-1} cm/sec, 10^{-2} cm/sec, 10^{-3} cm/sec, 10^{-4} cm/sec) and separation distance (10 m, 50 m, 100 m). Groundwater drawdown at the monitoring well was increased as the hydraulic conductivity decreased and the separation distance increased. From the regression analysis of groundwater drawdown as a hydraulic conductivity at the same separation distance, it was found that the groundwater level fluctuation of artificial recharge aquifer was dominantly influenced by hydraulic conductivity. In the condition that the hydraulic conductivity of artificial recharge aquifer was 10^{-2} cm/sec or more, the radius of influence of groundwater level was within 20 m, but In the condition that the hydraulic conductivity is 10^{-3} cm/sec or less, it is confirmed that the radius of influence of groundwater increases sharply as the separation distance increases.

Key words : Facility agricultural complex, Artificial recharge, HydroGeoSphere modeling, Sensitivity analysis, Hydraulic conductivity, Separation distance

Received 1 July, 2019; **Revised** 10 August, 2019;
Accepted 31 August, 2019
***Corresponding author**: Dong-hwan Kang, Environmental Research Institute, Pukyong National University, Busan 48547, Korea
Phone : +82-51-629-7393
E-mail : dhkang@pknu.ac.kr

ⓒ The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

하천 주변의 넓은 평야 지역에 집중된 대규모 시설농업단지에서 이용되는 농업용수는 대부분 개인 지하수 관정을 통해 공급되고 있다. 시설농업단지 초기에는 용수가 충분하였으나, 수막 재배 방식이 도입된 이후로 시설농업단지에서 국내 농업용 지하수 사용량의 40% 정도를 이용하여 지하수의 고갈이 심각한 실정이다. 농촌 지역에서 농업 생산량의 감소와 직결된 지하수의 사용 자제는 현실적으로 어려운 실정이므로, 시설농업단지가 조성된 지역에서 용수 부족에 대한 대처 방안으로 강변여과수, 빗물, 수막용수, 지표수를 이용한 인공함양(artificial recharge) 사업이 필요한 실정이다. 인공함양 사업에 대한 현장의 수리지질학적 조사 방법, 인공함양 용수 및 시공 방법, 효율성 평가, 유지관리에 대한 연구 수행과 지침이 미흡하므로, 인공함양 사업을 위한 수리지질 특성 분석 및 지하수 모델링을 통한 최적의 인공함양량을 산정하여 시설농업단지의 지하수 환경을 복원하고 인공함양 사업의 활용도를 높이기 위한 연구가 필요하다.

인공함양은 시 · 공간적으로 여유가 있거나 버려지는 다양한 수자원을 지하 공간에 저장해 두었다가, 공급량이 부족한 시간과 공간에 양수하여 이용할 수 있도록 하는 방법이다. 지하수 인공함양은 강수, 지하수 및 하수 처리수의 여유 수자원을 관정, 인공 함양 분지 및 습지, 수로, 지하댐, 우수 침투 시설 등 인위적인 시설 또는 지표조건을 변경하여 강제로 지하로 침투시켜 불포화대 및 충적층의 투수성 및 정화 능력을 이용하여 양질의 지하수자원을 확보하는 것이다. 최근에는 인공함양을 대수층 함양 관리(MAR; Management of Aquifer Recharge)라고도 하며, 이는 계획적으로 대수층에 물을 저장하거나 지질 매체를 통해 수질을 개선한다는 의미이다(Dillon, 2005). 대수층 함양관리 기술의 세계적인 동향(Kim et al., 2010), 제주도 한천유역 지하수 모델 개발을 통한 인공함양 평가 연구(Oh et al., 2011), 창원지역 낙동강 하천수와 주변 충적층을 이용한 지하수 인공함양의 효율성 평가(Moon et al., 2014), 지하수 모델링 기법을 이용한 인공함양정 최적 위치 평가 연구(Lee et al., 2014), 담금질모사 기법을 이용한 인공함양정 최적 위치 결정(Lee et al., 2015), AHP 기반의 인공신경망 모델을 활용한 지하수 인공함양 후보지 선정 방안(Kim et al., 2018) 등이 수행되었다. 국외에서 수행된 인공함양 관련 연구는 2010년 이전에도 다수 수행되었으며, 2010년 이후 최근에 수행된 대표적인 연구 사례로는 미국과 캐나다에 걸쳐 있는 대평원 중 고지대 평원 대수층에 대한 인공함양 적용 및 비판적 검토(Gurdak et al., 2010), 혐기조건 하 대수층에서 NMOR을 함유한 재사용 물의 주입에 대한 실험 연구(Pitoi et al., 2011), Hutuo River bed를 대상으로 ASR 적용 및 적용 전후 대수층의 수질 변화 연구(Shanhai et al., 2012), 인공함양에 있어 서로 다른 지질학적, 수문학적 및 기후적 상황에 쉽게 적응할 수 있는 일반적 통합 방법론 개발 연구(Azaroual et al., 2013), 중동지역 각각의 대수층에서 수집된 자료를 종합, 최대의 효과를 낼 수 있는 종합적 프로그램 개발 연구(Maliva et al., 2014), 물균형 계산과 지하수 모델링을 이용한 개선된 물 확보 기술의 성능 및 수문학적 기능 조사 연구(Hashemi et al., 2015), 기존 연구된 사례를 검토하여 빗물 및 지하수 관리에 있어 마른 우물(dry well)의 성능 검토 연구(Edwards et al., 2016), 물 요구량 및 수위변동을 고려한 우수 확보와 인공함양 부지의 우선순위 확보를 위한 연구(Singh et al., 2017), 지속가능한 도시 수자원 관리 지원을 위한 폐수 재활용, 빗물 확보, 염수 침입, 홍수 관리 등의 사례 소개 연구(Page et al., 2018) 등이 있다.

국내에서 시설농업단지의 수막재배로 인한 지하수 고갈 문제 해결을 위한 인공함양 관련 연구로는 수막재배 지역에서 일최저기온과 지하수 이용량의 상관관계를 이용한 지하수위 변화 분석(Chang et al., 2014), 청원 수막재배 지역의 물수지 특성 분석(Chang et al., 2015), 통합수문해석에 의한 청원 수막재배단지의 장기물수지 분석(Chang et al., 2016), 수막재배지역의 수문성분 해석 및 평가(Chung et al., 2016), 시설농업단지에서 HydroGeoSphere 모델을 이용한 지하수 유동 및 물수지 분석 연구(Kang et al., 2017) 등이 수행되었다.

본 연구에서는 시설농업단지의 토양대수층(충적층)에서 수리전도도 및 주입정과 양수정의 이격거리에 따른 지하수위 변동 분석을 위해 HydroGeoSphere(이하 “HGS”로 표기) 모델을 적용하였으며, HGS를 이용한 지하수 유동 및 오염물 확산 연구는 북미와 유럽에서 활발하게 수행되었고 국내에서도 최근에 소수의 연구자들에 의해 수행되고 있다(Lee et al., 2008; Noh, 2012;

Kang et al., 2017). 국외에서는 다수의 연구자들에 의해 지표수와 지하수 유동 연구에 HGS 모델이 적용되었으며(Frei et al., 2010; Mustapha et al., 2011; Alaghmand et al., 2014; Lamontagne et al., 2014; Levison et al., 2014; Rasoulzadeh et al., 2014), HGS 모델을 이용한 토양층에서 수리특성 및 인공함양 관련 연구로는 독일의 매립 충적층에서 현장실험과 HGS 모델링을 통한 인공함양에 의한 충적층 지하수의 시공간적인 특성 연구(Freiburg, 2015), 중국의 상하이 지역에서 인공적인 지하수 함양을 통해 지반침하 저감 효과를 분석한 HGS 모델링 연구(Huang et al., 2015), HGS 모델을 이용한 다공성 토양층에서 수리학적 물질 거동 모의 연구(Frey et al., 2016), 하천 유역에서 기후변화에 따른 지하수-토양-식생-대기 사이의 수문학적 변수와 플럭스 모의 연구(Romano et al., 2018), 비정상 흐름에서 토양 종류별 물 흐름 모의 및 토양 내에서 물의 체류시간 산정 모의 연구(Abkenar et al., 2019), 남호주 지역에서 HGS 모델을 이용한 기후변화 적용과 미적용 시 지하수 저류량의 시공간적인 변동 특성 연구(Fu et al., 2019) 등이 수행된 바 있다. 국외에서는 인공적인 지하수 함양과 양수에 의한 지하수위 변동 특성을 HGS 모델링을 통해 수행되었으나, 국내에서는 시설농업단지와 같은 토양층 지하수에서 인공함양과 양수에 의한 지하수 유동 연구는 소수의 연구자에 의해 수행된 바 있다(Lee et al., 2010; Lee et al., 2014).

본 연구에서는 시설농업단지의 인공함양 설계를 위해 수리지질 특성과 주입정과 양수정 사이의 이격거리 등을 고려한 12개의 시나리오별 HGS 모델링을 수행하였으며, 모델링을 통해 수리전도도와 이격거리에 따른 주입정과 양수정 사이에서 지하수위의 변동 및 영향반경을 분석하여 시설농업단지에서 인공함양의 설계에 활용하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 시설농업단지에서 인공함양 적용 시에 수리전도도 및 주입정과 양수정 사이의 이격거리에 따른 지하수위 변동을 분석하기 위한 개념모델을 설계하였다. 개념모델 설계를 위해 HGS 모델을 이용하였으며, 국내 토양층의 수리지질 특성을 고려한 인공함양 대수층 조건, 초기 및 경계 조건을 설정하고 수리전도도와 주입정과 양수정 사이의 이격거리를 고려한 12개 시나리오를 적용하여 HGS 모델링을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

캐나다 University of Waterloo에서 개발된 HGS는 3차원 지하수 영역, 2차원 지표수 영역, 그리고 0차원 대기영역을 통합시킨 수리 수문 모델로서 한국을 포함한 아시아, 유럽 그리고 미 대륙에서 널리 사용되고 있는 모델이다(Fig. 1). HGS는 3차원 지표수-지하수 연계 모델링이 가능한 수치모델로서 지하수 및 지표수 흐름뿐만 아니라 오염물질의 거동을 안정적으로 계산하는 프로그램이다. 지표수 및 지하수 연계 모델링은 일반적으로 지표수 모델에 불포화대 모델을 수치적으로 결합시킴으로서 수행이 가능하다. 포화대와 불포화대에서 지하수 유동은 식 (1)과 같은 리차드 방정식(Richards' equation)으로 표현된다.

$$\nabla \cdot (\boldsymbol{K} \cdot k_r \nabla h) + Q + \Gamma = \frac{\partial}{\partial t}(\theta_s S_w) \tag{1}$$

여기서 $\boldsymbol{K}$는 포화투수텐서, k_r는 상대투수도, h는 수두 (=$\psi + z$: ψ는 압력수두, z는 위치수두), Q는 양수 또는 주입량, Γ는 지표와 지하의 유체 이동, θ_s는 포화함수도, S_w는 포화도를 나타낸다. 지표수 심도에 대하여 적분된 지표수 유동 방정식의 확산 파동 근사식(diffusion wave approximation)은 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial d_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(d_o K_{ox} \frac{\partial h_o}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(d_o K_{oy} \frac{\partial h_o}{\partial y}\right) - d_o \Gamma_o + Q_o \tag{2}$$

여기서 d_v는 체적심도 (volume depth), d_o는 유동심도, h_o는 지표수 수두, K_{ox}와 K_{oy}는 지표수 전도도이다. 지표수계와 지하수계의 상호작용은 지배식 (1)과 (2)에서 유체 교환 항을 통하여 표현되고, 지표수두와 지하수두의 차에 따른 유체 이동은 식 (3)과 같다.

$$d_o \Gamma_o = -\Gamma = (k_r)_{exch} K_{exch} (h - h_o) / l_{exch} \tag{3}$$

여기서 $(k_r)_{exch}$, K_{exch}, l_{exch}는 각각 유체 교환을 위한

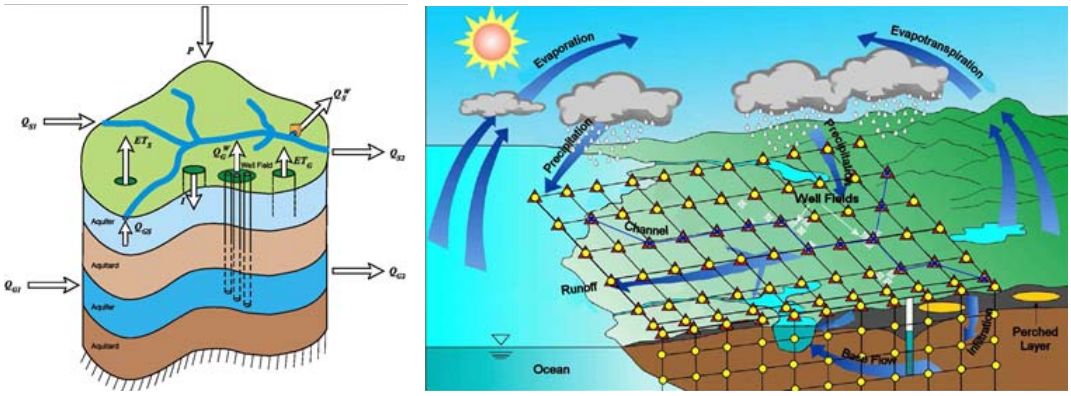


Fig. 1. Conceptual diagram of HydroGeoSphere model (Viessman et al., 1996).

상대투수도, 전도도, 연동길이를 나타낸다. 지표수와 지하수의 상호작용을 해석할 수 있는 모형은 완전연동모형이며, 불포화대에서 에너지 이동을 기술하는 지배방정식은 포화도와 체적 특성이 고려되어야 한다. 따라서 포화대와 불포화대 사이에서의 에너지 이동 방정식은 식 (4)와 같다.

$$\frac{\partial \rho_b c_b T}{\partial t} = -\nabla [q \rho_w c_w T - (k_b + c_b \rho_b D) \nabla T] \pm Q_T + \Omega_o \quad (4)$$

여기서 ρ는 밀도, c는 열용량, T는 체적 다공질 매질의 온도, t는 시간, q는 지하수 유동률, k_b는 체적 열전도도, D는 체적 열확산계수, Q_T는 열원으로부터의 유입, Ω_o는 지표수계와의 상호 열교환을 나타내며 아래첨자 b와 w는 각각 체적 특성과 액상 특성을 나타낸다. 식 (4)에서 지하수 유동이 해석되고, 지하수 유동률과 포화도는 Richards 지배식의 해로서 주어진다.

본 연구에서 수행된 HGS 모델링의 개념 모델에는 자연적 특성(지형과 지질, 강수량, 수리전도도 등)과 인공적 특성(주입정과 양수정의 이격거리, 양수량과 주입량 등) 조건들이 고려되었으며, 모델의 민감도 분석(12개 시나리오)에서는 국내 충적대수층에 적합한 수리전도도의 범위와 주입정과 양수정의 이격거리를 고려하여 모델링을 수행하였다.

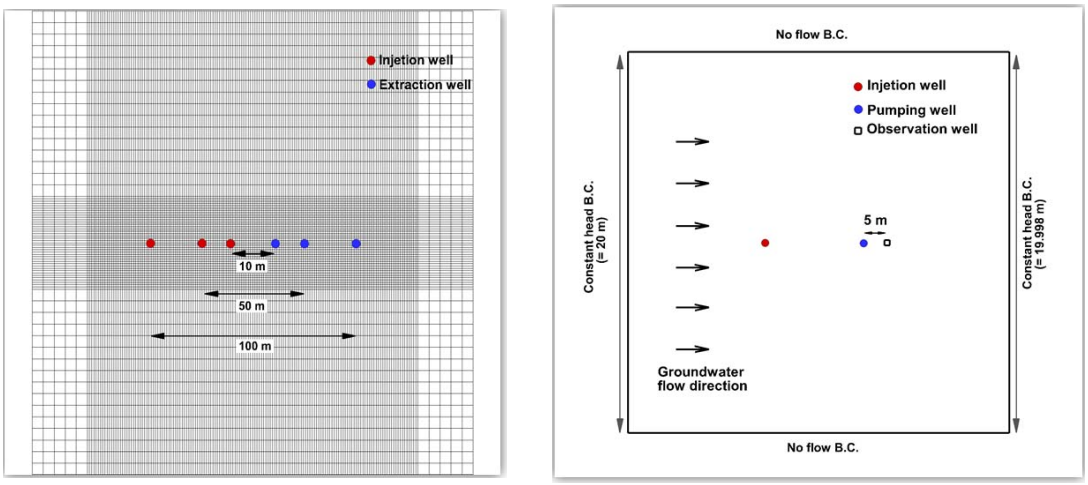
대수층의 지하수 저장 능력을 고려하여 인공함양 주입량을 결정해야 하고, 인공함양 주입량과 양수량은 인공함양 주입 속도는 시설농업단지 토양대수층의 수리지질 특성에 적합하게 산정하여 대수층의 저장 능력을 초과하지 않는 범위에서 산정해야 한다. 대수층의 개발가능량(Q)은 대수층 면적(A)과 수두변화($\triangle H$), 저류계수(S)를 이용한 식 $Q = A \times \triangle H \times S$으로, 저류계수는 비산출율($S_y$)과 비저류계수($S_s$), 피압대수층 두께($b$)를 이용한 식 $S = S_y + S_s b$으로 산출해야 한다. 자유면 대수층에서의 저류계수는 비산출율과 동일하고, 피압 대수층에서는 비저류계수와 대수층 두께를 곱하여 산정한다(Han, 1998).

본 연구에서 수행한 HGS 모델링에 입력한 인공함양 대수층의 규모와 수리지질 특성은 Table 1에 정리하였다. 국내 시설농업단지의 규모와 자유면 대수층의 특성을 반영하였으며, 지하수위 영향반경을 고려하여 인공함양 대수층의 길이와 너비는 각각 200~2,000 m, 두께는 20 m의 범위를 적용하였다. 국내 시설농업단지의 충적층을 대상으로 한 모델링 연구 사례들에서 설정한 충적층의 수리전도도는 10^{-4}~10^{-2} cm/sec의 범위이었다(Lee et al., 2014; Lee et al., 2015; Chang et al., 2016; Kang et al., 2017). 또한 국내 시설농업단지의 충적층은 자유면 대수층이고 대부분 모래와 실트로 구성된 점을 고려하여, 본 연구에서는 인공함양 대수층의 저류계수(비산출율과 동일)는 0.1, 수리전도도는 10^{-1}~10^{-4} cm/sec의 범위를 적용하였다.

인공함양 시설을 설계하는 단계에서 시설농업단지의

Table 1. Scale and hydrogeological characteristics of artificial recharge aquifer

Aquifer scale (m)			Storage coefficient	Hydraulic conductivity (cm/sec)
Length	Width	Thickness		
200~2,000	200~2,000	20	0.1	10^{-4}~10^{-1}



(a) Grid structure and injection/extraction wells (b) Boundary conditions and groudwater flow

Fig. 2. Simulation area and boundary conditions of conceptual model.

자연적 특성(지형, 강수량, 수리지질 특성 등) 및 인공적 특성(주입정과 양수정의 이격거리, 주입량과 양수량)을 고려하여 개념 모델을 설정하고 자연적 특성인자 중 수리전도도와 인공적 특성 중 주입정과 양수정의 이격거리를 현장 특성 범위 내에서 변화시켜가면서 민감도 분석을 수행하였다. 민감도분석 시 양수에 의한 영향 반경을 통해 수리전도도와 이격거리가 지하수의 수두와 수위강하량에 미치는 영향성을 분석하였다. 모의를 위한 격자는 x-축 방향으로 주입정과 양수정이 위치하는 주변 25~175 m의 영역에서는 1 m 간격, 그 외의 영역에서는 5 m 간격으로 설정하였다. y-축 방향으로는 65~105 m의 구간에는 1 m 간격, 그 외의 구간에서는 5 m 간격으로 격자를 구성하였다. 동일한 수리적 조건 하에서 주입정과 양수정의 이격거리를 10 m, 50 m, 100 m로 설정하였다(Fig. 2(a)).

경계 조건은 x-축 방향으로 모의 영역의 시작과 끝 지점이 되는 영역에 대하여 고정 수두 경계를 설정하였으며, x=0 m 지점에서는 고정수두 20 m이고 x= 200 m 지점에서는 고정수두 19.998 m이다. 나머지 영역은 불투수(no flow) 경계 조건으로 설정하였으며, 수리경사는 시설농업단지의 지형을 고려하여 10^{-5}으로 설정하였다. 모의 영역에서의 지하수 흐름은 x=0 m인 지점에서 x=200 m인 지점 방향으로 형성되도록 설정하였으며, 양수정 주변의 지하수 수위 변화를 파악하기 위해 양수정으로부터 하류부 방향으로 5 m 이격된 지점에 관측정을 설정하였다(Fig. 2(b)). 주입정의 위치는 지하수 흐름의 상류부에 위치하고 양수정은 하류부에 위치하도록 설정하였으며, 주입량과 양수량은 농업 지역에서 이용하는 지하수 사용량을 고려하여 모두 150 m^3/day로서 flux 경계조건으로 설정하였다.

개념 모델을 통한 민감도 분석을 위한 수리전도도와 주입정과 양수정의 이격거리에 따른 12개 시나리오를 Table 2에 정리하였다. 인공함양 대수층의 넓이는 case 1~8의 경우에는 40,000 m^2 (200 m × 200 m), case

Table 2. Scenarios used for sensitivity analysis

Hydraulic conductivity (cm/sec)	Separation distance from injection well to pumping well (m)		
	10	50	100
10^{-1}	case 1	case 2	case 3
10^{-2}	case 4	case 5	case 6
10^{-3}	case 7	case 8	case 9
10^{-4}	case 10	case 11	case 12

9~12의 경우에는 4 km^2 (2 km × 2 km)로 적용하였다. 대수층 두께는 20 m의 충적대수층으로서 적용하였으며, 대수층의 수리전도도는 모래와 실트가 혼합된 층으로 가정하여 10^{-1}~10^{-4} cm/sec의 범위로 적용하였다. 주입정과 양수정의 이격거리는 10 m, 50 m, 100 m로 적용하였으며, 이는 시설농업단지 지역의 충적층에서 인공함양에 의한 주입수를 양수할 수 있는 유효반경을 고려하여 설정한 것이다. 시설농업단지에서 인공함양 설치 및 운영을 위해서는 이상의 인자들이 충분히 고려한 모의가 수행되어야 하고, 모의 결과 분석을 통해 주입정과 양수정의 적절한 위치, 적정한 주입량과 양수량 조건을 제시하는 것이 필요하다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 관측정의 지하수위 강하량 분석

HGS 모델을 이용한 수리전도도와 주입정과 양수정의 이격거리에 따른 12개 시나리오별 민감도 분석을 수행하였으며, 양수정의 하류부에 설정된 관측정의 지하수위 강하량을 Table 3에 정리하였다. 관측정의 지하수위 강하량은 수리전도도가 낮아질수록 증가하고, 또한 주입정과 양수정의 이격거리가 멀어질수록 증가하였다. 본 연구에서 수행된 HGS 모델링 조건에서 관측정의 지하수위 강하량은 수리전도도보다는 주입정과 양수정의 이격거리에 의한 영향성이 높게 나타났다. 관측정의 지하수위 강하량은 동일한 수리전도도 조건에서 이격거리가 멀어질수록 증가하는 경향은 case 1~3(K=10^{-1} cm/sec)과 case 4~6(K=10^{-2} cm/sec)의 경우에는 유사하게 나타났으며, 동일한 수리전도도 조건에서는 이격거리가 멀어져도 관측정의 지하수위 강하량의 변동 폭이 0.2 m 이하로서 작았다. 이는 인공함양 대수층의 투수성이 높은 경우에는 주입정과 양수정의 이격거리에 의한 지하수위 변화의 영향성이 낮음을 의미하는 것이다(Lee et al., 2015). case 7~9(K=10^{-3} cm/sec)와 case 10~12(K=10^{-4} cm/sec)의 경우에는 이격거리에 따른 관측정의 지하수위 강하량이 전반적으로는 증가하는 경향을 보였으며, 이격거리 10 m에서 50 m로 멀어지는 경우에서는 지하수위 강하량이 약간 감소하다가 이격거리 100 m인 경우에서는 2배 이상 증가하였다. 이는 인공함양 대수층의 투수성이 낮은 경우에는 주입정과 양수정의 이격거리에 의한 지하수위 변동 폭의 영향성이 높음을 의미하는 것이다(Lee et al., 2015). 본 연구에서 수행된 HGS 모델링에 의한 관측정의 지하수위 강하량을 분석한 결과, 수리전도도가 10^{-2} cm/sec 이상이고 주입정과 양수정의 이격거리가 100 m 이내인 조건의 인공함양 대수층에서 주입량과 양수량 모두 150 m^3/day 정도의 시스템으로 설계한다면 지하수에 의한 안정적인 농업용수 공급이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 수행된 HGS 모델링 결과를 통해 인공함양 대수층의 수리전도도 및 주입정과 양수정의 이격거리를 적정하게 조절하는 것이 인공함양 설계에서 중요하다는 것을 알 수 있었다. 수리전도도는 자연적인 특성이고 주입정과 양수정의 이격거리는 인위적으로 조절이 가능하므로, 시설농업단지에서 현장수리시험을 통해 인공함양 대수층의 수리전도도가 산정되면 이에 적합한 주입정과 양수정의 이격거리를 설정해야 한다.

인공함양 대수층의 수리전도도와 주입정과 양수정의 이격거리에 의한 관측정의 지하수위 강하량을 분석한 결과를 고려하여, 동일한 이격거리 조건에서 수리전도도에 따른 관측정의 지하수위 강하량 변동을 정량적으로 파악하기 위해 회귀분석을 수행하였다(Fig. 3). 수리전도도를

Table 3. Drawdown in monitoring well by scenarios (unit: meter)

Hydraulic conductivity (cm/sec)	Drawdown with different separation distances from injection well and pumping well (m)		
	10	50	100
10^{-1}	0.02	0.03	0.04
10^{-2}	0.16	0.31	0.35
10^{-3}	3.64	3.37	7.77
10^{-4}	36.40	33.70	77.70

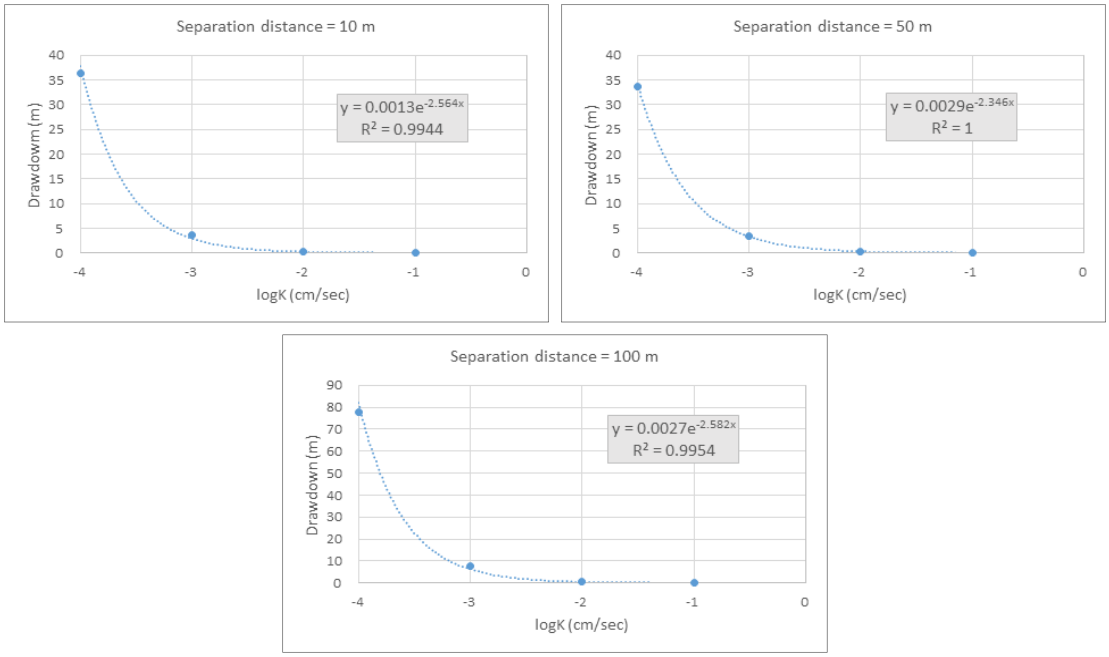


Fig. 3. Regression functions for drawdown as hydraulic conductivity with separation distances 10, 50, and 100 m.

상용로그로 변환한 값을 이용하여, 동일한 이격거리에서 변환된 수리전도도에 따른 관측정의 지하수위 강하량의 회귀함수를 추정하였다. 3가지 경우의 이격거리 모두에서 수리전도도가 증가할수록 관측정의 지하수위 강하량이 지수적으로 증가하는 함수가 최적인 것으로 추정되었으며, 추정된 함수와 원 자료의 적합도(goodness of fit)를 나타내는 결정계수가 0.99 이상으로 매우 높았다. 이격거리와 관계없이 인공함양 대수층의 수리전도도가 10^{-2} cm/sec 이상에서는 지하수위 강하량이 1 m 이하이었지만, 수리전도도가 10-3 cm/sec 이하인 조건에서부터 지하수위 강하량이 급격하게 지수적으로 증가함을 보였다. 이러한 결과는 시설농업단지에서 인공함양 설계 시에 대수층의 수리전도도가 10^{-3} cm/sec 이하인 경우에는 인공함양 주입량과 양수량을 150 m^3/day 이하로 조절해야함을 의미한다(Chang et al., 2016).

본 연구에서 수행된 HGS 모델링의 결과를 이용해 추정된 회귀함수를 통해 인공함양 대수층의 주입과 양수에 의한 지하수위 강하량은 수리전도도에 의해 지배적으로 영향을 받고 있음을 알 수 있었다(Lee et al., 2010; Lee et al., 2014; Lee et al. 2015). 시설농업단지에서 인공함양

설계 시에는 인공함양 대수층의 수리전도도를 산정하기 위한 신뢰성 높은 현장수리시험의 수행이 매우 중요하고, 또한 인공함양 대수층에서 산정된 수리전도도를 고려하여 주입정과 양수정의 이격거리를 설정해야 한다.

3.2. 민감도 분석을 통한 지하수위의 변동 및 영향반경 분석

인공함양 대수층에서 수리전도도와 주입정과 양수정의 이격거리에 대한 민감도 분석을 위한 HGS 모델링을 수행하였으며, 12개 시나리오별 주입정과 양수정에서 지하수위의 변동과 영향반경을 산출하였다(Fig. 4). 모의 영역은 고정수두 경계 조건과 영향반경을 고려하여 시나리오별로 설정하였으며, case 9~12의 경우에는 모의 영역을 2 km x 2 km 정도로 설정하였다.

수리전도도가 10^{-1} cm/sec인 시나리오(case 1~3)의 모델링 결과, 주입정과 양수정의 지하수위 변동은 0.2 m 이내이고 영향반경은 20~30 m 정도로 나타났다. 주입정과 양수정의 이격거리가 10 m인 경우(case 1)의 지하수위는 주입정에서 0.1 m 정도 상승하고 양수정에서 0.1 m 정도 강하하였으며, 영향반경은 20 m 이내인 것으로 나타났다. 주입정과 양수정의 이격거리가 50 m인 경우(case 2)의 지하수위는 주입정과 양수정에서 변화가 거의 없었으며, 영향반경은 20 m 정도인 것으로 나타났다. 주입정과 양수정의 이격거리가 100 m인 경우(case 3)의 지하수위 변동은 주입정과 양수정에서 0.1 m 이하이었으며, 영향반경은 30 m 정도인 것으로 나타났다. 수리전도도가 10^{-2} cm/sec인 시나리오(case 4~6)의 모델링 결과, 주입정과 양수정의 지하수위 변동은 1.0 m 이내이고 영향반경은 10~20 m 정도로 나타났다. 주입정과 양수정의 이격거리가 10 m인 경우(case 4)의 지하수위 변동은 주입정과 양수정에서 1.0 m 이하이었으며, 영향반경은 10 m 정도인 것으로 나타났다. 주입정과 양수정의 이격거리가 50 m인 경우(case 5)의 지하수위는 주입정과 양수정에서 변화가 거의 없었으며, 영향반경은 20 m 정도인 것으로 나타났다. 주입정과 양수정의 이격거리가 100 m인 경우(case 6)의 지하수위 변동은 주입정과 양수정에서 1.0 m 이하이었으며, 영향반경은 15 m 정도인 것으로 나타났다. 수리전도도가 10^{-3} cm/sec인 시나리오(case 7~9)의 모델링 결과, 주입정과 양수정의 지하수위 변동은 5.0 m 정도이고 영향반경은 10~90 m 정도로 폭넓게 나타났다. 주입정과 양수정의 이격거리가 10 m인 경우(case 7)의 지하수위 변동은 주입정과 양수정에서 5.0 m 정도이었으며, 영향반경은 14 m 정도인 것으로 나타났다. 주입정과 양수정의 이격거리가 50 m인 경우(case 8)의 지하수위는 주입정과 양수정에서 5.0 m 정도이었으며, 영향반경은 31 m 정도인 것으로 나타났다. 주입정과 양수정의 이격거리가 100 m인 경우(case 9)의 지하수위 변동은 주입정과 양수정에서 5.0 m 이하이었으며, 영향반경은 90 m 정도인 것으로 나타났다. 수리전도도가 10^{-4} cm/sec인 시나리오(case 10~12)의 모델링 결과, 주입정과 양수정의 지하수위 변동은 5.0 m 정도이고 영향반경은 160~940 m 정도로 나타났다. 주입정과 양수정의 이격거리가 10 m인 경우(case 10)의 지하수위 변동은 주입정과 양수정에서 5.0 m 정도이었으며, 영향반경은 160 m 정도인 것으로 나타났다. 주입정과 양수정의 이격거리가 50 m인 경우(case 11)의 지하수위 변동은 주입정과 양수정에서 5.0 m 정도이었으며, 영향반경은 650 m 정도인 것으로 나타났다. 주입정과 양수정의 이격거리가 100 m인 경우(case 12)의 지하수위 변동은 주입정과 양수정에서 5.0 m 정도이었으며, 영향반경은 940 m 정도인 것으로 나타났다.

이상의 결과를 통해, 동일한 이격거리에서 수리전도도가 감소할수록 지하수위의 변동이 크게 나타나고, 영향반경도 증가함을 알 수 있었다(Lee et al., 2010; Lee et al., 2014; Lee et al. 2015). 수리전도도가 10^{-3} cm/sec 이하인 조건에서 지하수위의 변동과 영향반경이 급격하게 증가하였으며, 이는 인공함양 대수층의 낮은 수리전도도로 인해 주입정에서 공급된 지하수가 양수정에 도달하는 시간이 오래 걸리므로 양수정에서 지하수위가 회복되지 못하였기 때문이다. 또한 주입정 주변에서도 주입 속도가 인공함양 대수층의 투수 능력에 비해 높아서 주입정의 지하수위가 상승하여 영향반경이 증가한 것이다(Lee et al., 2014). 수리전도도가 동일한 조건에서 주입정과 양수정의 이격거리가 멀어질수록 지하수위의 영향반경이 증가함을 알 수 있었다. 수리전도도가 10^{-2} cm/sec 이상인 조건에서는 이격거리에 따른 지하수위의 영향반경이 크게 차이가 나지 않았으나, 수리전도도가 10^{-3} cm/sec 이하인 조건에서는 이격거리가 멀어질수록 지하수위의 영향반경이 급격하게 증가하였다. 이는 인공함양 대수층이 균질 등방성의 동일한 수리전도도를

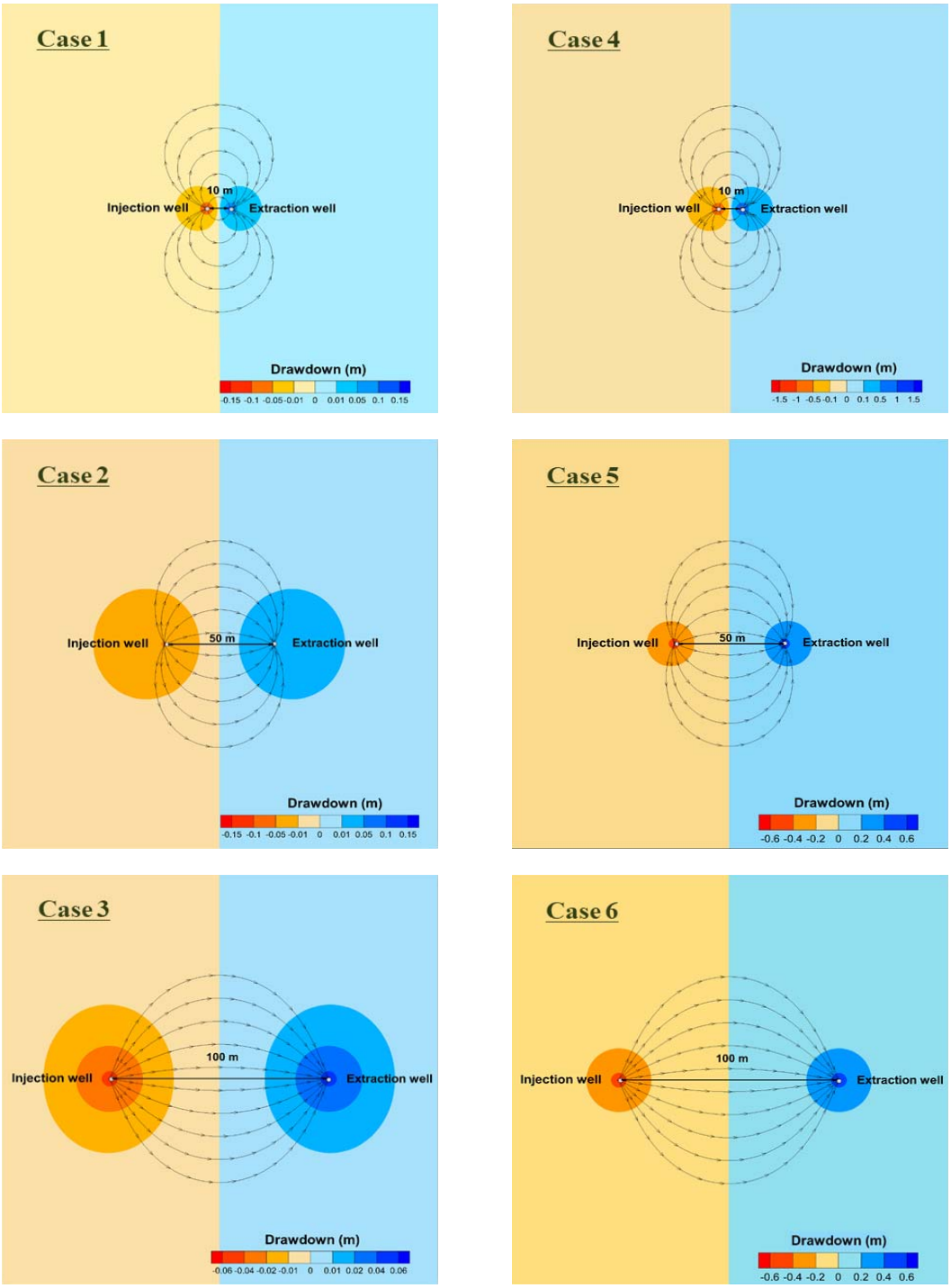


Fig. 4. Variation and influence radius of groundwater level by the scenarios.

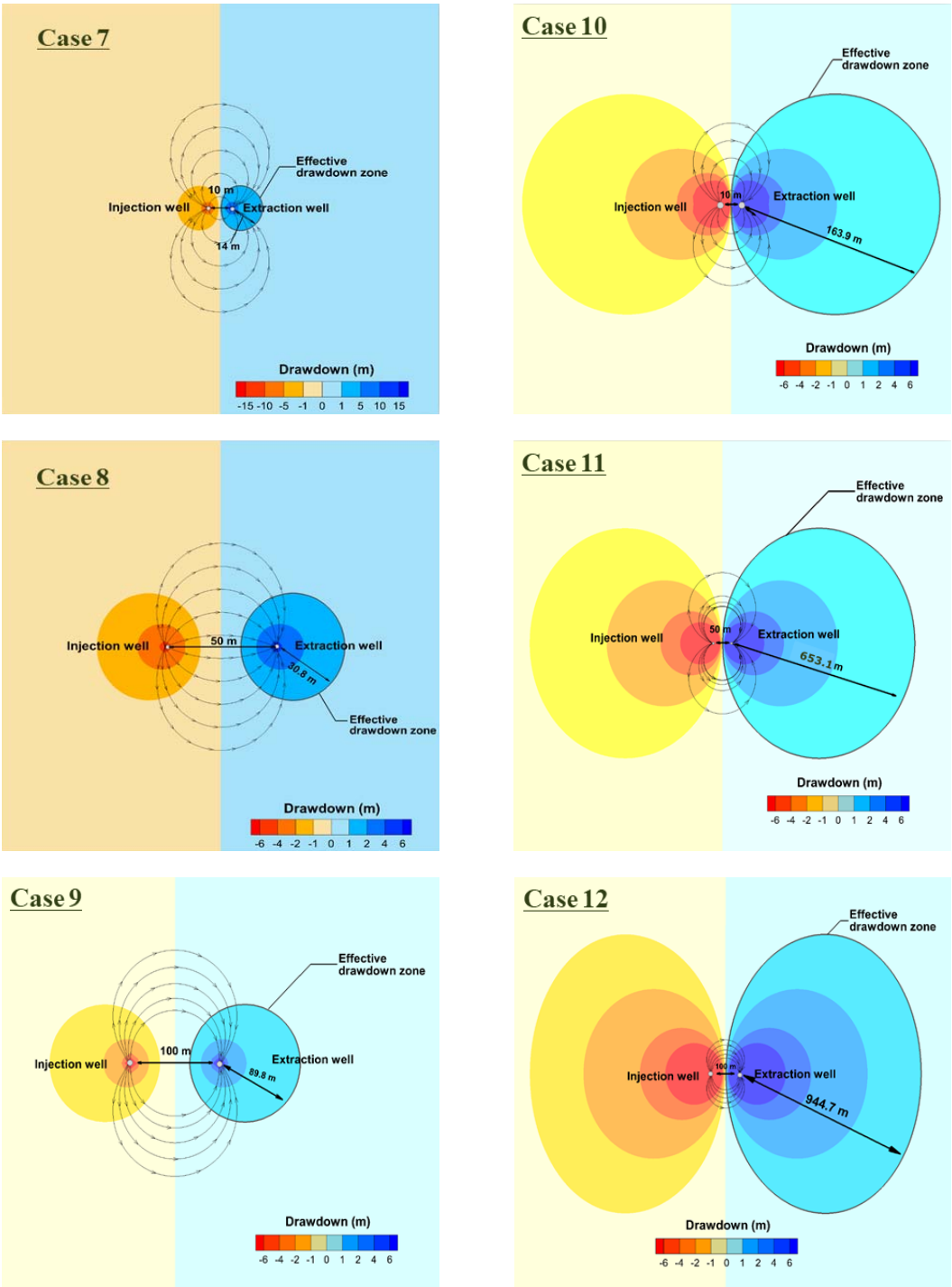


Fig. 4. (continue).

가지는 조건에서도 주입정과 양수정의 이격거리가 멀어질수록 주입정에 공급된 지하수가 양수정에 도달하는 시간이 소요되기 때문에 양수정에서 양수 후 지하수위 회복시간이 오래 걸려서 영향반경이 증가한 것이다. 따라서 수리전도도가 10^{-3} cm/sec 이하이고 주입정과 양수정의 이격거리가 10 m 범위 이상인 인공함양 대수층에 150 m3/day를 주입하면서 동시에 150 m3/day를 양수하는 시스템에서는 지하수위의 변동과 영향반경이 크게 발생하므로 주입량과 양수량의 조절이 필요하다(Lee et al., 2010; Lee et al., 2014).

4. 결 론

본 연구에서는 국내 시설농업단지의 수리지질 특성을 고려한 인공함양 대수층의 수리전도도와 주입정과 양수정의 이격거리에 따른 지하수위 변동 및 영향반경에 대한 민감도를 구명하기 위해 HGS 모델링을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같이 요약하였다.

1) 시설농업단지에서 인공함양 시설의 설계에 활용하기 위해 자연적 특성과 인공적 특성을 고려한 개념 모델을 구축하고, 국내 시설농업단지 특성 범위 내에 해당하는 수리전도도와 주입정과 양수정의 이격거리에 따른 지하수위 변동 및 영향반경을 분석하였다. HGS 모델을 이용한 민감도 분석에서는 인공함양 대수층의 주입량과 양수량은 모두 150 m^3/day, 수리전도도는 10^{-1}~10^{-4} cm/sec의 범위, 주입정과 양수정의 이격거리는 10 m, 50 m, 100 m로 설정하여 12개의 시나리오별로 수행하였다.

2) 시나리오별 민감도 분석을 수행한 결과, 양수정의 하류부에 설정된 관측정의 지하수위 강하량은 수리전도도가 낮아질수록 또한 주입정과 양수정의 이격거리가 멀어질수록 증가하였다. 주입정과 양수정의 이격거리가 동일한 조건에서 수리전도도에 따른 관측정의 지하수위 강하량에 대한 회귀분석을 수행한 결과, 수리전도도가 10^{-3} cm/sec 이하인 조건에는 관측정의 지하수위 강하량이 지수적으로 급격하게 증가하는 것으로 추정되었다. 따라서 국내 시설농업단지에서 수리전도도가 10^{-3} cm/sec 이하인 조건에 해당하는 인공함양 대수층에서는 인공함양 주입량과 양수량을 150 m^3/day 이하로 조절하는 것이 필요함을 알 수 있었다.

3) 민감도 분석을 통한 12개 시나리오별 주입정과 양수정에서 지하수위의 변동과 영향반경을 산출한 결과, 수리전도도가 감소하거나 주입정과 양수정의 이격거리가 멀어질수록 주입정과 양수정에서 지하수위의 변동과 그 영향반경도 증가하였다. 국내 시설농업단지에서 인공함양 설계 시에 주입과 양수가 동시에 수행되는 시스템에서는 인공함양 대수층의 수리전도도가 10^{-3} cm/sec 이상인 조건에서 주입정과 양수정의 이격거리를 50~100 m 범위로 설계한다면, 농업용수의 지속적인 공급량은 150 m^3/day 정도가 적정할 것으로 판단되었다.

4) 본 연구를 통해 국내 시설농업단지의 특성을 고려한 인공함양 대수층에서 수리전도도와 주입정과 양수정의 이격거리를 조절하면서 주입량과 양수량을 선정해야 함을 알 수 있었다. 향후 연구로는 주입과 양수가 연속적으로 동시에 이루어지는 시스템, 주입하여 수위 상승시킨 후에 양수하는 시스템, 양수하고 수위 하강 후에 주입하는 시스템 등 실제 시설농업단지 현장에서 적용할 수 있는 다양한 시스템에 대한 개념 모델을 수행하여 인공함양 시스템을 비교 분석하는 것이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCE

Abkenar, F. Z., Rasoulzadeh, A., Asghari, A., 2019, Performance evaluation of different soil water retention functions for modeling of water flow under transient condition, DOI: 10.1590/1678-4499.2017406, 1-12.

Alaghmand, S., Beecham, S., Woods, J. A., Holland, K. L., Jolly, I. D., Hassanli, A., Nouri, H., 2015, Injection of fresh river water into a saline floodplain aquifer as a salt interception measure in a semi-arid environment, Ecol. Eng., 75, 308-322.

Azaroual, M., Pettenati, M., Ollivier, P., Besnard, K., Casanova, J., Rampnoux, N., 2013, Procedia Earth and Planetary Sci., 7, 40-43.

Chang, S. W., Chung, I. M., 2014, Analysis of ground

-water variations using the relationship between groundwater use and daily minimum temperature in a water curtain cultivation site, J. Engineering Geol., 24(2), 217-225.

Chang, S. W., Chung, I. M., 2015, An Analysis of groundwater budget in a water curtain cultivation site, J. Korean Soc. of Civil Engineers, 35(6), 1259-1267.

Chang, S. W., Chung, I. M., Kim, Y. C., Moon, S. H., 2016, Long-term groundwater budget analysis based on integrated hydrological model for water curtain cultivation site: Case study of Cheongweon, Korea, J. Geol. Soc. Korea, 52(3), 201-210.

Chung, I. M., Chang, S. W., 2016, Analysis and evaluation of hydrological components in a water curtain cultivation site, J. Korea Water Resour. Assoc., 49(9), 731-740.

Dillon, P., 2005, Future management of aquifer recharge, Hydrogeol. J., 13, 313-316.

Edwards, E. C., Harter, T., Fogg, G. E., Washburn, B., Hamad, H., 2016, Assessing the effectiveness of drywells as tools for stormwater management and aquifer recharge and their groundwater contamination potential, J. Hydrology, 539, 539-553.

Frei, S., Lischeid, G., Fleckenstein, J. H., 2010, Effects of micro-topography on surface-subsurface exchange and runoff generation in a virtual riparian wetland - A modeling study, Advances in Wat. Resources, 33, 1388-1401.

Freiburg, I. Br., 2015, Characterization of spatial and temporal artificial recharge: Field testing and numerical modeling, Master's Thesis, Albert Ludwigs University, 57.

Frey, S. K., Hwang, H. T., Park, Y. J., Hussain, S. I., Gottschall, N., Edwards, M., Lapen, D. R., 2016, J. Hydrology, 535, 392-406.

Fu, G., Crosbie, R. S., Barron, O. B., Charles, S. P., Dawes, W., Shi, X., Niel, T. V., Li, C., 2019, Attributing variations of temporal and spatial groundwater recharge: A Statistical analysis of climatic and non-climatic factors, J. Hydrology, 568, 816-834.

Gurdak, J. J., Roe, C. D., 2010, Review: Recharge rates and chemistry beneath playas of the High Plains aquifer, USA, Hydrogeol. J., 18, 1747-1772.

Han, J. S., 1998, Groundwater environment and contamination, Bakyoungsa, 1071.

Hashemi, H., Berndtsson, R., Persson, M., 2015, Artificial recharge by floodwater spreading estimated by water balances and groundwater modelling in arid Iran, Hydrological Sci. J., 60(2), 336-350.

Huang, Y., Yang, Y., Li, J., 2015, Numerical simulation of artificial groundwater recharge for controlling land subsidence, J. Civil Eng., 19(2), 418-426.

Kang, D. H., So, Y. H., Kim, I. K., Oh, S. B., Kim, S. H., Kim, B. W., 2017, Groundwater flow and water budget analyses using HydroGeoSphere model at the facility agricultural complex, J. Eng. Geol., 27(3), 313-322.

Kim, G. B., Choi, M. R., Seo, M. H., 2018, Site selection method by AHP-based artificial neural network model for groundwater artificial recharge, J. Eng. Geol., 28(4), 741-753.

Kim, Y. C., Kim, Y. J., 2010, A Review on the state of the art in the management of aquifer recharge, J. Geol. Soc. Korea, 46(5), 521-533.

Kim, Y. C., Seo, J. A., Ko, K. S., 2012, Trend and barrier in the patents of artificial recharge for securing groundwater, J. Soil & Groundwater Env., 17(3), 59-75.

Lamontagne, S., Taylor, A. R., Cook, P. G., Crosbie, R. S., Brownbill, R., Williams, R. M., Brunner, P., 2014, Field assessment of surface water-groundwater connectivity in a semi-arid river basin (Murray-Darling, Australia), Hydrol. Processes, 28, 1561-1572.

Lee, E. H., Hyun, Y. J., Lee, K. K., Kim, H. S., Jeong, J. H., 2010, Evaluation of well production by a riverbank filtration facility with radial collector well system in Jeungsan-ri, Changnyeong-gun, Korea, J. Soil & Groundwater Env., 15(4), 1-12.

Lee, H. J., Koo, M. H., Kim, Y. C., 2014, Determining optimal locations of an artificial recharge well using an optimization-coupled groundwater flow model, J. Soil Groundw. Environ., 19(3), 66-81.

Lee, H. J., Koo, M. H., Kim, Y. C., 2015, Global optimization of placement of multiple injection wells with simulated annealing, J. Eng. Geol., 25(1), 2287-7169.

Levison, J., Larocque, M., Ouellet, M. A., 2014, Modeling low-flow bedrock springs providing ecological habitats with climate change scenarios, J. Hydrol., 515, 16-28.

Maliva, R. G., Herrmann, R., Coulibaly, K., Guo, W.,

2014, Advanced aquifer characterization for optimization of managed aquifer recharge, Environ. Earth Sci., DOI 10.1007/s12665-014-3167-z.

Moon, S. H., Ha, K. C., Kim, Y. C., Koh, D. C., Yoon, H. S., 2014, Examinationfor efficiency of groundwater artificial recharge in alluvial aquifer near Nakdong River of Changweon area, Korea, Econ. Environ. Geol., 47(6), 611-623.

Mustapha, H., Dimitrakopoulos, R., Graf, T., Firoozabadi, A., 2011, An Efficient method for discretizing 3D fractured media for subsurface flow and transport simulations, International J. Numerical Methods in Fluids, 67, 651-670.

Noh, O. S., 2010, Surface water - subsurface water flow modeling, Master's thesis, Kangwon National University, 79.

Oh, S. H., Kim, Y. C., Koo, M. H., 2011, Modeling artificial groundwater recharge in the Hancheon drainage area, Jeju island, Korea, J. Soil & Groundwater Env., 16(6), 34-45.

Page, D., Bekele, E., Vanderzalm, J., Sidhu, J., 2018, Managed Aquifer Recharge (MAR) in sustainable urban water management, Water 2018, 10, 239.

Pitoi, M. M., Patterson, B. M., Furness, A. J., Bastow, T. P., McKinley, A. J., 2011, Fate of N-nitrosomorpholine in an anaerobic aquifer used for managed aquifer recharge: A column study, Wat. Res., 45, 2550-2560.

Rasoulzadeh, A., Ghoorabjiri, M. H., 2014, Comparing hydraulic properties of different forest floors, Hydrol. Processes, 28, 5122-5130.

Rassam, D., Werner, A., 2008, Review of groundwater -surfacewater interaction modeling approaches and their suitability for Australian conditions, eWater Cooperative Research Centre, 52.

Romano, N., Nasta, P., Bogena, H., De Vlta, P., Stellato, L., Vereecken, H., 2018, Monitoring hydrological processes for land and water resources management in a Mediterranean ecosystem: The Alento River catchment observatory, Vadose Zone J., Special Section: Hydrological Observatories, 1-12.

Shanghai, D., Danmai, X., 2012, Groundwater quality variation affected by artificial recharge in Hutuo River bed, Procedia Env. Sci., 12, 555-560.

Singh, L. K., Jha, M. K., Chowdary, V. M., 2017, Multi-criteria analysis and GIS modeling for identifying prospective water harvesting and artificial recharge sites for sustainable water supply, J. Cleaner Production, 142, 1436-1456.

Viessman, W. (Jr.), Lewis, G. L., 1996, Introduction to Hydrology, 4th Edition, Harper Collins College Publisher, New York, 760.

Yin, Y., Sykes, J. F., Normani, S. D., 2015, Impacts of spatial and temporal recharge on field-scale contaminant transport model calibration, J. Hydrol., 527, 77-87.

• 최정찬, 부경대학교 지구환경과학과 교수
jcchoi@pknu.ac.kr
• 강동환, 부경대학교 환경연구소 리서치펠로우
dhkang@pknu.ac.kr