

지하수 모델링 기법을 이용한 인공함양정 최적 위치 평가

이현주¹ · 구민호^{1*} · 김용철²

¹공주대학교 지질환경과학과

²한국지질자원연구원

Determining Optimal Locations of an Artificial Recharge Well using an Optimization-coupled Groundwater Flow Model

Hyeonju Lee¹ · Min-Ho Koo^{1*} · Yongcheol Kim²

¹Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

ABSTRACT

A Fortran program was developed to determine the optimal locations of an artificial recharge well. Three objective functions were considered: (1) maximizing the recovery rates, (2) maximizing the injection rates, and (3) minimizing the coefficient of variation of the increased pumping rates. We also suggested a new aggregate objective function which combined the first and the third objective functions. The model results showed that locating the injection well inside the cluster of pumping wells was desirable if either the recovery or the injection rate was taken into account. However, the injection well located outside the cluster evenly increased the pumping rates in existing pumping wells. Therefore, for clustered pumping wells, installing an injection well at the center or the upstream of the pumping wells seems beneficial. For linear arrangement of pumping wells parallel to the constant head boundary, locating the injection well in the upstream was recommended. On the contrary, in case of the linear arrangement perpendicular to the constant head boundary, the injection well installed on both sides of the central part of the pumping wells was preferable.

Key words : Groundwater flow model, Artificial recharge, Injection well, Optimization

1. 서 론

최근 국내 수변지역에서 시설재배와 수막재배의 면적이 증가하면서 총적층 지하수의 이용량이 크게 증가하고 있는 추세이다. 특히 수막재배는 지하수의 열에너지를 이용하여 비닐하우스를 난방하는 방법으로 다량의 지하수를 양수하게 되어 동절기에 일시적인 지하수 고갈 문제가 발생하며, 수변지역 하천과 대수층의 물 순환계를 크게 교란시키는 것으로 알려져 있다.

따라서 최근 국내에서는 지하수 과잉취수의 영향을 살펴보기나, 개발가능량 산정 및 지속적인 수자원확보에 대한 연구가 수행되고 있다. Jeon et al.(2005)은 경안천변의 총적층 지하수를 대상으로 농업활동 및 양수에 수반된

지하수 오염과 수리적 변동에 따른 수리지구화학 변화를 연구하였으며, Kim et al.(2012)은 하천변 지하수 양수가 하천-지하수 상호 유동계에 미치는 영향을 분석하였다. Hong et al.(2003)은 지하수 의존도가 높은 해안지역의 지하수 유출량을 평가하고 이를 토대로 해안 지역의 지하수 개발가능량을 평가하는 방법을 제시하였으며, Chung et al.(2008)은 우리나라의 지하수 개발가능량의 현황을 조사하고 개발가능량 산정의 개선방안을 도출하고자 하였다. 또한 수막재배지역의 지하수 취수량 감소 원인을 파악하기 위한 연구가 수행되었고, 지하수 이용량이 많은 도시 지역의 지하수 유동을 분석하기도 하였다(Cho et al., 2012; Bae and Lee, 2011). 국외에서는 지하수 과잉취수로 인한 세계적인 지하수 고갈문제를 살펴보고 지속가능

*Corresponding author : koo@kongju.ac.kr

Received : 2014. 3. 23 Reviewed : 2014. 4. 9 Accepted : 2014. 4. 9

Discussion until : 2014. 8. 31

한 지하수 관리의 중요성을 강조하였다(Kinzelbach et al., 2003; Wada et al., 2010).

지하수 인공함양 기법은 주입정을 설치하여 대수층으로 물을 인위적으로 주입하는 방법으로, 과도한 지하수 개발에 따른 문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라 지속적으로 수자원을 확보할 수 있는 유용한 방법이다. Seo et al. (2010)은 지하수 인공함양을 강우빈도가 특정 기간에 집중되어 있는 우리나라의 특성상 심화되는 기후변화에 대응하여 보조수자원을 확보할 유용한 방법이라고 제시하였으며, Kim and Kim(2010)은 지표수 중심의 우리나라 수자원 공급시스템이 갖는 한계를 효율적으로 해결할 보조수단으로서 인공함양기술이 새로운 패러다임이 될 수 있음을 제안하였다. 우리나라는 2000년대 이후 인공함양에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Oh et al.(2011)은 지하수 인공함양에 따른 지하수계 변화를 모의하는 지하수 모델을 개발하여 물수지를 정량적으로 분석하였으며, Seo et al.(2011)은 지리정보시스템(GIS)으로 인공함양 개발 유망지역을 분석 평가하였다. 국외에서도 수자원확보를 위한 효율적 방법으로 인공함양기법에 대한 연구가 수행되고 있다(Bouwer, 2002; Banerjee and Singh, 2011). 이처럼 국내·외로 인공함양기법을 실제 현장에 적용할 경우 지하수계 변화에 대한 연구가 활발히 수행되고 있지만, 인공함양정의 최적 위치를 선정하는 문제는 잘 다루지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 최적의 주입정 위치를 평가하기 위해 주입정 위치에 따른 기존 양수정의 양수량 변화를 수치 모의하는 모델을 개발하여 분석을 수행하였다. 이때 주입정을 순차적으로 이동시켜가며 주입정 설치 전, 후의 양수량 변화를 비교 분석하였다. 따라서 본고는 이와 같은 분석을 통해 시설재배지역에서 인공함양기법을 이용하여 수자원 확보 시 최적의 주입정 위치를 평가하는데 목적이 있다.

2. 최적화 모델

2.1. 개념 모델

Fig. 1은 수변지역 충적층에서의 지하수 흐름계를 모의하기 위하여 설정한 가상의 개념 모델이다. 균질, 등방성의 자유면대수층을 가정하였으며, 모델 영역의 동쪽 끝단에는 하천이 위치하며 10 m의 수위를 갖는 일정수두경계(constant head boundary)로 설정하였다. 모델 영역은 두께가 일정한 1개의 층으로 구성된 1 km × 1 km의 정사각형 모양으로 설정하였다. 격자의 크기는 10 m × 10 m이며,

격자망은 100행, 100열로 총 10,000개의 격자로 구성하였다.

다수의 양수정을 통하여 지하수를 취수하는 지역에 주입정을 설치할 경우 주입정을 중심으로 지하수위가 상승하며, 동시에 기존 양수정의 양수량이 증가하게 된다. 하지만 지하수위 및 양수량 변화를 동시에 모의하는 것은 수치해석적으로 매우 어려운 일이다. MODFLOW와 같은 대부분의 지하수 수치모델의 경우 우물의 양수량을 입력값으로 고정시키고 지하수위 변화를 모의하는 것이 일반적이다. 따라서 이와 같은 기존의 지하수 모델을 이용할 경우 주입정 설치 후 주변 지역에서 발생한 지하수위 상승량을 통하여 인공함양정의 효율성을 평가할 수 있다.

하지만 본 연구에서는 양수정의 지하수위를 일정하게 고정시키고 인공함양정 설치 후 양수량의 변화를 모의하는 방법으로 인공함양정의 효율성을 평가하였다. 개별 우물의 지하수위는 5 m, 즉 양수의 영향으로 포화대 두께의 50% 만큼의 수위강하가 발생하는 것을 가정하였으며, 이때 우물의 양수량은 모델에 의하여 계산되도록 하였다.

한편, 수치모델에서 우물이 설치된 격자(cell)에서 계산된 수두는 실제 우물에서의 수두와 다른 값을 가지는데, 이는 우물과 격자의 크기 차이 정도에 따라 달라진다. 따라서 우물의 수위를 일정하게 고정시키기 위해서 우물의 수두와 격자의 수두와의 관계식이 필요하며, 아래와 같은 Thiem의 방정식이 이용될 수 있다(Thiem, 1906).

$$h_w = \sqrt{h_{ij}^2 - \frac{Q}{\pi K} \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \quad (1)$$

여기서 h_w 는 반경이 r_w 인 우물의 수두(L), h_{ij} 는 격자에서 계산된 수두(L), Q 는 양수량(L³/T), K 는 수리전도도(L/T)이다. 이때 r_e 는 우물의 수두와 격자의 수두가 같아지는 유효반경(L)을 뜻하며, 정사각형 격자의 경우 Prickett의 방정식에 의해 다음과 같이 구할 수 있다(Prickett, 1967).

$$r_e = \exp\left(-\frac{\pi}{2}\right)\Delta x = 0.208\Delta x \quad (2)$$

여기서 Δx 는 정사각형 격자의 크기이다.

따라서 개별 우물의 양수량을 구하기 위해서는 양수량을 변화시키면서 지하수 흐름 모델로부터 격자의 수두를 계산하고 위 식을 이용하여 우물 수두를 계산하는 일련의 연산과정을 반복하면서 우물 수두가 모델에서 가정한 값이 되도록 하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 지하수 흐름 모델에 식 (1)과 식 (2)를 추가하여 우물 수위, 또는 허용수위강하량으로부터 우물 양수량을 구하는 Fortran 프

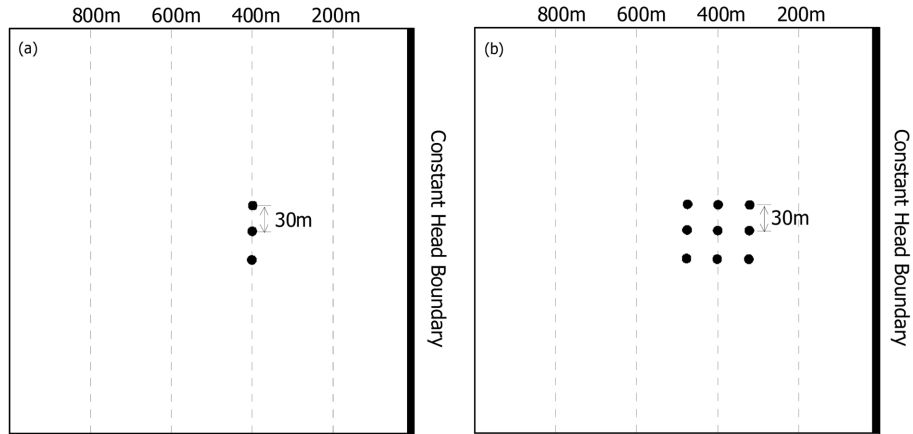


Fig. 1. Location of pumping wells: (a) linear arrangement and (b) clustered arrangement.

로그래를 개발하였다. 프로그램에서 지하수 흐름 방정식의 수치해는 PCG2(prepositioned conjugate gradient) solver를 이용하여 구하였다.

위의 개념모델을 바탕으로 구경 200 mm의 복수 양수정을 다양한 배열로 설치한 후, 수위강하량을 5 m로 제한하였을 경우의 개별 관정의 양수량을 계산하였으며, 임의의 지점에 주입정을 설치하여 양수량의 50%를 재주입하였을 때 기존 양수정의 양수량이 어떻게 달라지는지 모의하였다. 우물군은 하천으로부터 400 m 떨어진 지점을 중심으로 군집형태열과 선형태열로 각각 설치하였다. 군집형태열의 경우 정방향으로 우물 개수를 증가시켜가며 살펴보았으며, 선형태열의 경우 하천에 평행한 방향과 수직인 방향 두 가지 경우를 살펴보았다. 또한 우물들의 이격거리는 30 m로 설정하였다(Fig. 1).

2.2. 주입정 위치 최적화를 위한 목적함수

최적의 주입정 위치를 평가할 때 다양한 목적함수를 고려할 수 있지만, 본 연구에서는 다음과 같은 네 개의 서로 다른 목적함수를 고려하였다.

먼저 첫 번째 목적함수는 주입된 물의 회수율을 최대화하는 것으로, 다음과 같이 양수량 변화량을 주입량으로 나눠 백분율로 나타냈다.

$$\text{Maximize } \frac{\sum_i^n (Q_i' - Q_i)}{Q_{IW}} \times 100(\%) = \frac{\sum_i^n \Delta Q_i}{Q_{IW}} \times 100(\%) \quad (3)$$

여기서 Q_i 와 Q_i' 는 주입정 설치 전, 후 우물의 양수량(L^3/T), Q_{IW} 는 주입량(L^3/T)을 나타내며 n 은 우물 개수이다. 이때 제한조건은 다음 식과 같다.

$$h_{PW} = \frac{D}{2} \quad (4)$$

여기서 h_{PW} 는 우물 수두(L)이고 D 는 포화대 두께(L)이다. 즉, 각 우물에서의 수위를 포화대의 50%인 5 m로 고정했을 때의 양수량을 살펴보았다.

두 번째 목적함수는 주입정 설치 시 주입량을 최대화하는 것으로, 양수정 수위뿐만 아니라 주입정 수위도 지표면 고도로 고정하여 총 양수량과 주입 가능량을 살펴보았다.

$$\text{Maximize } Q_{IW} \quad (5)$$

이때 제한조건은 다음과 같다.

$$h_{PW} = \frac{D}{2} \quad (6)$$

$$h_{IW} = H \quad (7)$$

여기서 h_{IW} 는 주입정 수위이고 H 는 지표면의 고도를 나타낸다.

세 번째 목적함수는 양수량 변화량의 변동계수(coefficient of variation, CV)를 최소화하는 것으로 다음과 같다.

$$\text{Minimize } \left(\sqrt{\sum_i^n (\Delta Q_i - \overline{\Delta Q})^2 / n} \right) / \overline{\Delta Q} \quad (8)$$

여기서 $\overline{\Delta Q}$ 는 주입정 설치 후 공당 양수량 변화량의 평균이다. 이 경우 제한조건은 첫 번째 목적함수의 제한조건인 식 (4)와 같다. 공당 양수량 변화량의 변동계수는 물 주입 시 기존 양수정의 양수량을 고르게 증가시키는지 알아보기 위해 살펴보았다.

마지막으로 최적의 주입정 위치를 선정하기 위하여 고

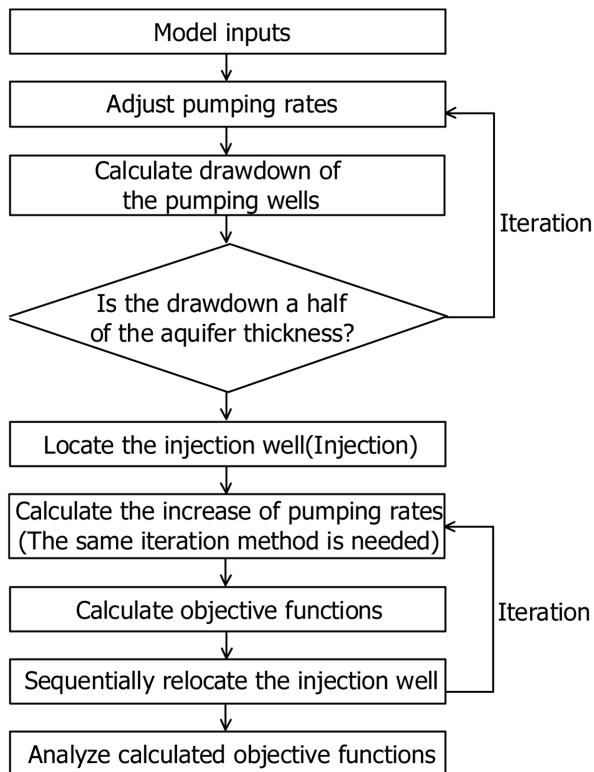


Fig. 2. Flow chart of the model development.

려해야할 여러 인자들을 통합하여 하나의 값으로 나타내면 주입정의 영향을 보다 간편하게 살펴볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 우물 군집에 대한 주입정의 영향 정도를 고려한 통합목적함수(aggregate objective function, AOF)를 제시하고, 이 통합목적함수를 최소화하는 것을 네 번째 목적함수로 설정하였다. 통합목적함수는 앞서 살펴본 첫 번째, 세 번째 목적함수인 양수량 변화량과 변동계수를 통합하여 다음과 같이 나타냈다.

$$\text{Minimize } \frac{CV}{\sum_i^n \Delta Q_i} \quad (9)$$

이때 CV 는 공당 양수량 변화량의 변동계수, ΔQ 는 물 주입 시 양수량의 변화량이며, 이 값이 작은 지점일수록 회수율은 높고 기존 양수정의 양수량을 고르게 변화시키는 곳으로 주입정 위치로 적합하다고 판단하였다.

주입정 위치에 따른 기존 우물의 양수량 변화를 살펴보기 위하여 주입정을 모델 영역 내 모든 격자에서 순차적으로 이동시켜가며 각각의 위치에서의 목적함수의 변화를 살펴보았다. Fig. 2는 단일 주입정 설치 시 최적의 주입정 위치를 평가하는 최적화 모델의 흐름도이다. 먼저 개

념모델에서 설명한 바와 같이 양수량을 변화시키면서 우물 수위가 포화대의 50%가 될 때까지 우물 수위 관계식을 반복 계산하여 주입정 설치 전의 총 양수량을 구하였다. 그 후 주입정을 설치하고 계산된 총 양수량의 50%를 재주입하였다. 다시 주입정 설치 후 양수량 증가량을 구하였으며 앞서 제시한 4개의 목적함수 값을 계산하였다. 주입정을 순차적으로 이동시켜가며 이와 같은 과정을 반복 수행하여 주입정 위치에 따른 목적함수 값을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 회수율의 최대화

주입정을 통해 주입되는 물의 회수율이 주입정의 위치에 따라 어떻게 달라지는지 살펴보았다.

3.1.1. 우물 배열에 따른 변화

우물이 모여 있는 군집형태의 경우, 회수율은 우물 군집 내부 상류지점에서 높은 값을 보였으며, 군집에서 멀어질수록 점차 낮은 값을 보였다. 이때 하천의 영향으로 회수율은 우물군집을 중심으로 비대칭적으로 감소하였다. 또한 우물 위치에 주입정을 설치하였을 때 주입된 물이 동일한 위치의 우물로 모두 회수되어 가장 높은 값을 보였다(Fig. 3a).

하천에 평행하게 선형배열로 우물을 설치하였을 경우, 회수율은 우물 배열 중앙부에서 가장 높았으며, 우물 배열 상류지역에서도 80% 이상으로 높은 값을 보였다(Fig. 3c). 반면, 하천에 수직하게 선형배열로 우물을 설치하였을 경우, 우물 배열 내 상류지점에서 주입량 회수율이 가장 높았으며 배열 측면부에서도 높은 값을 보였다(Fig. 3e). 총 양수량은 하천에 평행하게 우물을 설치할 때(549 m³)보다 수직하게 선형배열로 설치하였을 때(556 m³) 증가하였는데, 이는 우물을 하천으로부터 400 m 떨어진 지점을 기준으로 나열하였을 때 하류 쪽 우물에서는 하천에 의해 양수량이 많이 증가하고, 상류 쪽 우물은 비교적 적게 감소한 결과로 보인다.

3.1.2. 우물 개수에 따른 변화

다음으로 우물을 군집형태로 설치하고 우물을 9, 25, 49, 81개로 임의로 늘려가며 개수에 따른 변화를 살펴보았으며, 각각의 경우 주입량은 267 m³/day, 339 m³/day, 399 m³/day, 460 m³/day로 하였다. 이 경우 우물 개수가 증가하면 우물 상류지역과 우물 군집 내에서 주입된 물이 하천으로 빠져나가지 않고 모두 회수되어 더 넓은 범위에

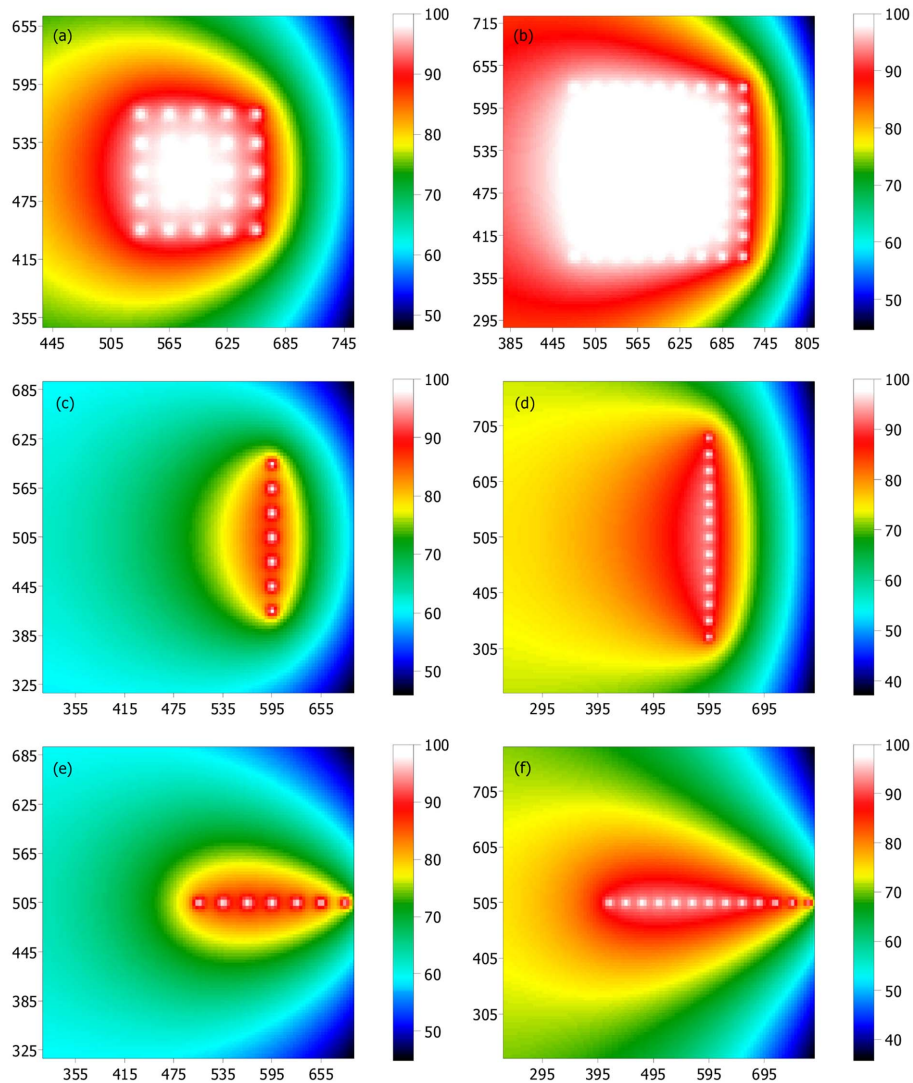


Fig. 3. Contour maps of the recovery ratio (%): (a) clustered arrangement of 25 pumping wells, (b) 81 pumping wells, (c) linear arrangement of 7 pumping wells parallel to the constant head boundary, (d) 13 pumping wells, (e) 7 pumping wells perpendicular to the constant head boundary, and (f) 13 pumping wells.

서 주입량 회수율이 크게 나타났다(Fig. 3b).

한편, 선형배열의 경우 우물 개수는 7, 13개로 임의로 정하였다. 하천에 평행하게 선형배열로 우물을 설치하였을 때, 각각의 경우 주입량은 274 m³/day, 343 m³/day로 하였고, 우물을 하천에 수직하게 선형배열로 설치하였을 때, 각각의 경우 주입량은 278 m³/day, 368 m³/day로 하였다. 회수율이 높은 지점은 우물 개수에 크게 영향을 받지 않았고, 우물 개수가 많아질수록 우물의 영향을 받는 상류지역이 넓어졌으며 높은 회수율을 보였다(Fig. 3d, f).

3.1.3. 우물 간격에 따른 변화

우물 간격에 따른 변화를 살펴보기 위하여 우물 간격을

100 m로 설정하였으며, 이 경우 모델영역을 1 km × 1 km로 설정하였기 때문에 우물 군집 내부의 경우만을 살펴보았다.

군집형배열의 경우 우물을 9, 25, 49개로 임의로 늘려가며 개수에 따른 변화를 살펴보았으며, 각각의 경우 주입량은 358 m³/day, 579 m³/day, 1035 m³/day로 하였다. 우물 간격을 100 m로 증가시키면 우물 간격이 30 m일 때보다 물 주입 시 회수율이 높은 지점이 상류지역으로 이동하였으며 더 넓은 지역에 영향을 주는 것으로 나타났다(Fig. 4a, b).

선형배열의 경우, 우물이 7개일 때 우물 간격을 100 m로 증가시켰으며, 하천에 평행한 경우와 수직한 경우의 주

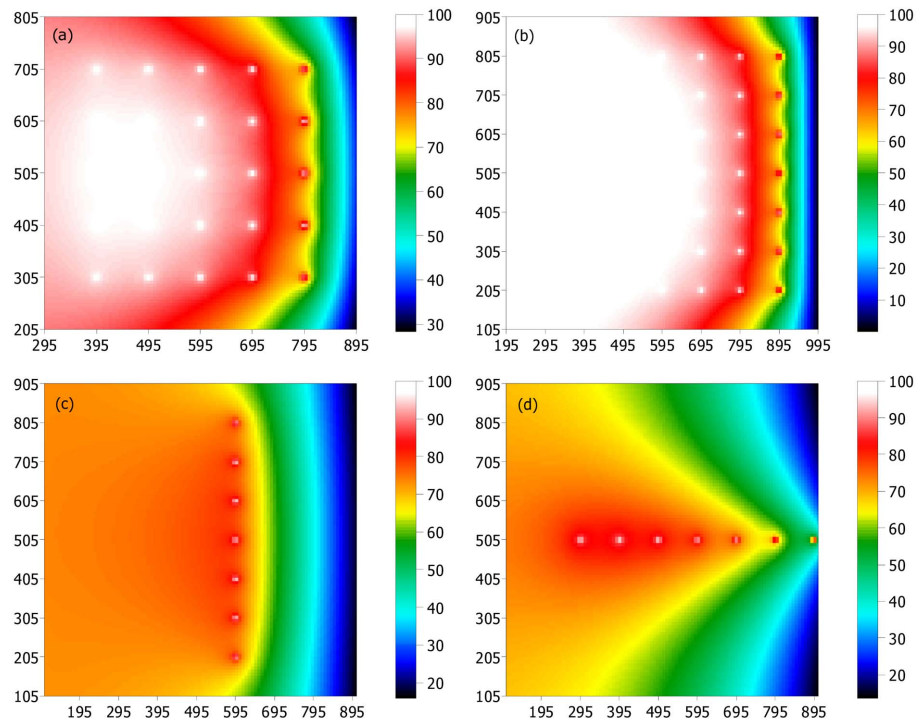


Fig. 4. Contour maps of the recovery ratio (%): (a) clustered arrangement of 25 pumping wells, (b) 81 pumping wells, (c) linear arrangement with 7 pumping wells parallel and (d) perpendicular to the constant head boundary.

입량은 각각 $345 \text{ m}^3/\text{day}$, $419 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 하였다. 먼저 하천에 평행하게 선형배열로 우물을 설치하였을 경우 우물 간격을 100 m로 증가시키면 각각의 우물 주변부에서 회수율이 가장 높았고 배열 중앙부와 그 상류에서도 높은 회수율을 보였다. 간격이 좁을 때(85-90%)보다 배열 중앙부의 회수율(75-80%)은 낮았지만, 우물 배열이 상류의 넓은 지역에 영향을 주었고, 양수량은 간섭효과의 감소로 30 m 간격일 때보다 높았다(Fig. 4c). 따라서 이 경우 우물 간격이 30 m일 때보다 더 상류지점에 주입정을 설치해도 주입정 위치로 적합한 것으로 분석되었다. 반면 우물을 하천에 수직하게 선형배열로 설치하였을 경우, 하천에 평행한 선형배열과 마찬가지로 우물 배열 내 회수율은 우물 간격이 좁을 때보다 낮았지만, 회수율이 높은 지점은 우물 배열 내 상류지점으로 동일하였다(Fig. 4d). 두 경우 모두 30 m 간격으로 우물을 많이 설치했을 때와 회수율의 분포 형태는 동일하였고, 70% 이상으로 높은 회수율을 보였지만 전체적으로 회수율은 약간 감소하였다.

3.1.4. 수리전도도 및 함양량에 따른 변화

대수층의 수리전도도와 지하수 함양량은 양수량에 영향을 주는 중요한 변수이다. 따라서 최적의 주입정 위치를 평가할 때 이 변수들이 미치는 영향을 살펴보았다.

먼저 수리전도도의 영향을 살펴보기 위하여 수리전도도를 1 m/day , 10 m/day 로 설정하고 주입정 위치에 따른 회수율을 살펴보았다. 주입정 설치 전 총 양수량은 $67.8 \text{ m}^3/\text{day}$ 와 $678 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 계산되어 $33 \text{ m}^3/\text{day}$ 와 $339 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 물을 각각 재주입하였다. 그 결과, 수리전도도가 증가하면 총 양수량 변화량은 증가하였지만 회수율과 그 분포는 일정하였다.

다음으로 지하수 함양량을 100 mm/yr 와 500 mm/yr 로 임의로 증가시켜 주입정 위치에 따른 회수율을 살펴보았다. 함양량의 영향으로 주입정 설치 전 총 양수량은 $793 \text{ m}^3/\text{day}$ 와 $1254 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 차이가 났으며, 계산된 총 양수량의 50%인 $396 \text{ m}^3/\text{day}$ 와 $627 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 물을 재주입하였다. 지하수 함양량을 증가시켰을 경우 또한 총 양수량 변화량은 증가하였지만 회수율과 그 분포는 일정하였다. 즉, 수리전도도와 지하수 함양량은 양수량에 많은 영향을 주는 중요한 변수이지만, 주입정 위치 선정에는 영향을 주지 않는 것으로 분석되었다.

3.2. 주입량의 최대화

주입정을 설치하였을 때 위치에 따른 주입가능한 물의 양 또한 취수정의 지하수 개발가능량에 많은 영향을 주므로 주입량도 중요한 인자가 될 수 있다. 따라서 식 (5)와

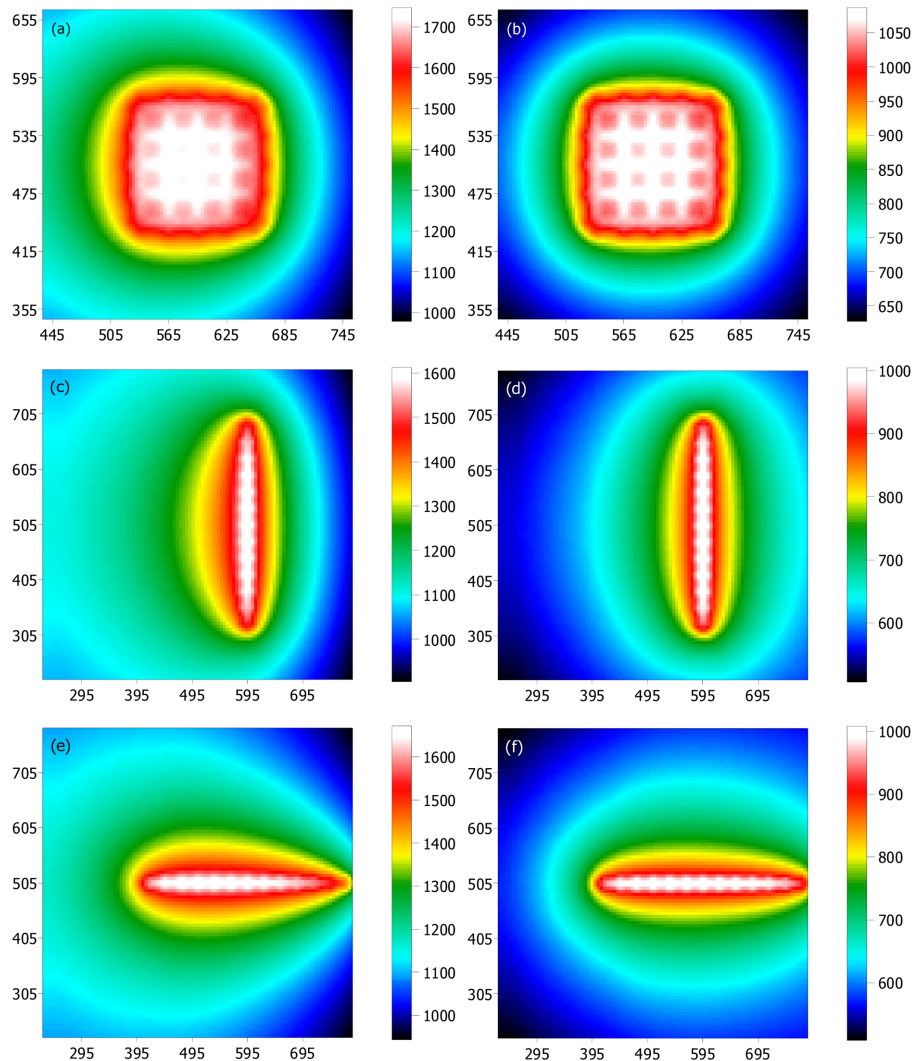


Fig. 5. Contour maps of (a) the pumping rate, (b) the injection rate for clustered arrangement and (c) the pumping rate, (d) the injection rate for the linear arrangement parallel to the constant head boundary and (e) the pumping rate, (f) the injection rate for the linear arrangement perpendicular to the constant head boundary.

같이 주입량을 최대화하는 것을 두 번째 목적함수로 설정하고 주입정 위치에 따른 주입 가능량을 살펴보았다.

Fig. 5는 우물 수위와 주입정 수위를 고정시켰을 때의 양수량과 주입 가능량을 보여주는 그림이다. 두 번째 목적함수에 대한 모델링 결과, 군집형배열의 경우 우물 군집 내부에 주입정을 설치할 때 주입된 물이 양수정에 의해 모두 회수되어 가장 많은 물을 주입할 수 있었다(Fig. 5b). 선형배열의 경우, 방향에 관계없이 우물 배열 중앙부에 주입정을 설치할 때 주입량이 가장 많았다(Fig. 5d, f). 하천의 영향으로 비대칭적인 모습을 보이는 양수량에 비해 주입량은 우물 배열을 중심으로 비교적 대칭적인 모습을 보였다. 또한 양수량이 주입량보다 전체적으로 높았

는데, 이때 양수량은 주입 전 우물 수위를 5 m로 고정하였을 때의 양수 가능량과 주입량을 합한 양이다.

따라서 회수율과 주입량만을 고려하여 주입정을 설치한다면 우물 배열에 관계없이 우물 군집 내부에 주입정을 설치해야 가장 효율적인 것으로 나타났다. 또한 우물 군집 상류지점에서도 회수율과 주입량이 높게 나타나 주입정 위치로 적합한 것으로 분석되었다.

3.3. 공당 양수량 변화량 변동계수의 최소화

다음으로 주입된 물이 기존 양수정의 양수량을 고르게 증가시키는 주입정의 위치를 살펴보았다. 표준편차는 평균값에 영향을 받아 증가, 감소하므로 다른 평균값을 가

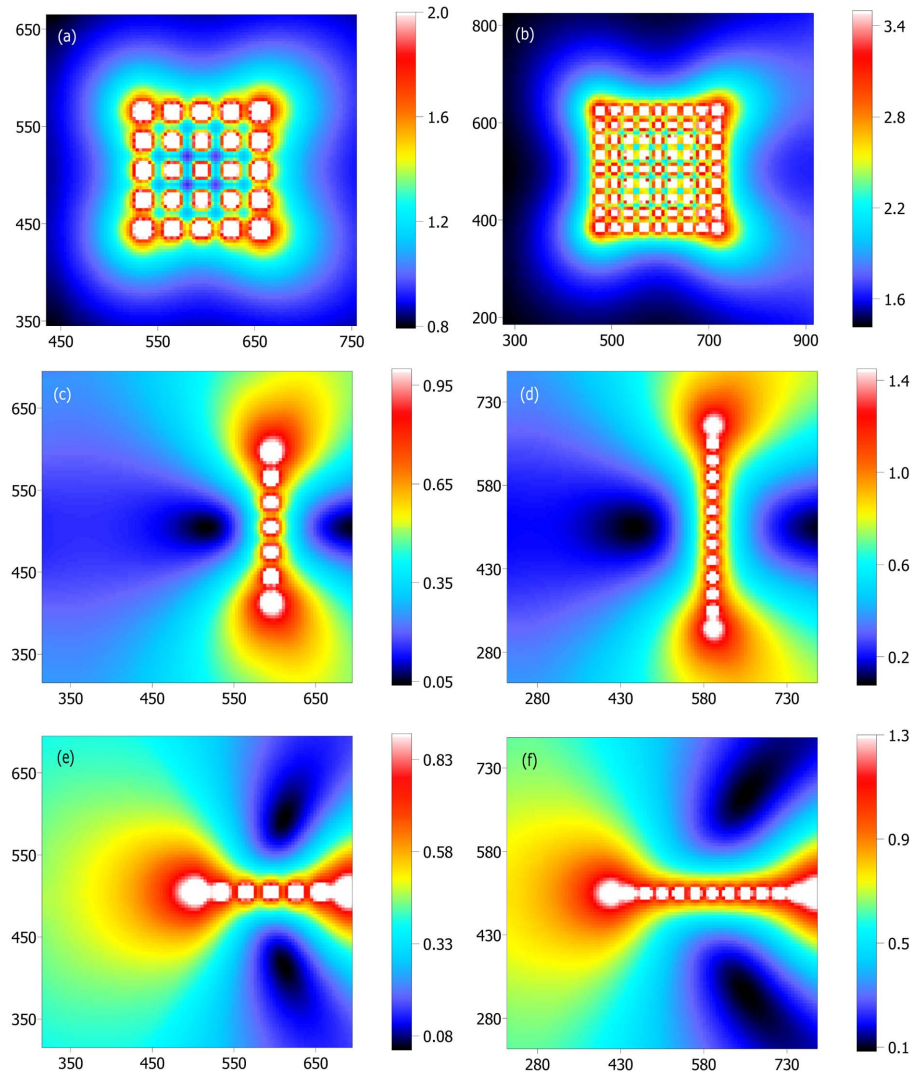


Fig. 6. Contour maps of the coefficient of variation: (a) clustered arrangement of 25 pumping wells, (b) 81 pumping wells and linear arrangement with 7 and 13 pumping wells parallel and perpendicular to the constant head boundary [(c), (d), (e) and (f)].

진 데이터를 비교하는 경우에는 기준으로 적당하지 않다. 하지만 변동계수는 표준편차를 평균값으로 나눔으로써 값을 표준화시키므로 평균값 차이에 의한 문제를 해결할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 식 (8)과 같이 양수량 변화량의 변동계수를 최소화하는 것을 세 번째 목적함수로 설정하고 우물 배열, 우물 개수, 우물 간격에 따른 변화를 살펴보았다.

3.3.1. 우물 배열에 따른 변화

공당 양수량 변화량의 변동계수는 우물 군집을 중심으로 상, 하류 방향에서 비교적 대칭적인 모습을 보였다.

군집형배열의 경우, 공당 양수량 변화량의 변동계수는 우물 군집 내 중앙부 또는 상, 하류 지점에서 작은 값을

보였으며, 회수율과 마찬가지로 우물 위치에 주입하였을 경우 한 개의 우물에만 영향을 주기 때문에 가장 큰 값을 보였다. 또한 군집 내부보다는 최외각에 위치한 우물, 특히 모서리에 있는 우물위치의 바깥쪽으로 보다 넓은 지역에서 높은 값을 보였다. 이는 이 지점에 주입정을 설치할 경우 비교적 적은 우물에 영향을 주는 것을 나타낸다.

한편, 선형배열의 경우에는 방향에 관계없이 우물 배열 측면부에서 작은 값을 보여 우물에서 어느 정도 떨어져야 모든 우물에 골고루 영향을 주는 것으로 나타났다(Fig. 6).

3.3.2. 우물 개수에 따른 변화

우물 개수에 따른 변화를 살펴본 결과, 두 배열 모두 우물 개수가 증가하여도 변동계수의 분포 형태는 유사하

였다. 군집형태열의 경우 우물 개수가 작아 우물이 주입정의 영향범위 내에 모두 위치할 때 우물 군집 내부에서도 비교적 작은 값을 보여 주입정을 우물 군집 내부에 설치하여도 기존 우물들의 양수량을 고르게 변화시키는 것을 알 수 있었다. 하지만 우물 개수가 증가하게 되면 우물 군집의 크기가 주입정의 영향범위보다 커지게 되어 우물 군집 내부에 주입정을 설치하였을 경우, 주입정 부근의 일부 우물에만 영향을 주게 된다. 따라서 우물 개수가 많을 경우에는 우물 군집 외부 상류지점에 주입정을 설치하는 것이 모든 우물의 양수량 증가에 고르게 영향을 주는 것으로 나타났다(Fig. 6b).

반면, 선형배열의 경우 우물 개수가 증가하여도 변동계수는 방향에 관계없이 우물 배열 측면부에서 작은 값을 보여, 모든 우물에 고르게 영향을 주는 주입정 위치는 우물 개수에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다(Fig. 6d, f).

3.3.3. 우물 간격에 따른 변화

우물 간격에 따른 변동계수의 변화를 살펴보기 위하여 우물 간격을 30 m에서 100 m로 증가시켜 양수량 변화를 살펴보았다. 이 경우 모델영역을 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 로 설정하였기 때문에 우물 군집 내부의 경우만을 살펴보았다.

그 결과, 우물 간격이 100 m로 증가하여도 변동계수의 분포 형태는 동일하였지만, 보다 더 넓은 지역에서 작은 값을 보였다. 군집형태열의 경우, 공당 양수량 변화량의 변동계수는 우물 군집 내 중앙부 상류지점에서 가장 작은 값을 보여 우물 간격이 30 m일 때 군집 내부만을 고려하였을 경우와 동일하였다. 또한 우물 개수가 많아도 변동계수는 우물 군집 내부에서 작은 값을 보였다. 하지만 주입정 위치를 우물 군집 외부까지 넓혀 살펴보면 우물 간격이 30 m일 때와 마찬가지로 우물 군집 내부보다는 외부에서 변동계수의 값이 작게 나타날 것으로 예상된다.

한편, 하천에 평행한 선형배열의 경우 변동계수는 상류지점에서만 작은 값을 보였다. 우물 간격이 작을 경우 하류지점에 주입정을 설치하여도 모든 우물에 고르게 영향을 주는 것으로 나타났지만, 우물 간격이 증가할 경우 우물이 설치되는 총 길이가 주입된 물의 영향범위를 벗어나게 되어 일부 우물에만 영향을 주는 것으로 분석되었다. 반면, 하천에 수직인 선형배열의 경우 우물 간격이 작을 경우와 유사하게 변동계수는 우물 배열 측면부에서 작은 값을 보였다.

3.4. 통합목적함수의 최소화

마지막으로 식 (9)와 같이 주입정 설치 시 회수량과 공

당 양수량 변화량의 변동계수를 모두 고려한 통합목적함수를 최소화하는 주입정 위치를 살펴보았다.

3.4.1. 우물 배열에 따른 변화

먼저 우물이 군집형태열, 하천에 평행한 선형배열과 하천에 수직인 선형배열로 설치되어 있을 경우, 우물 배열에 따른 통합목적함수 값의 변화를 살펴보았다.

군집형태열의 경우, 통합목적함수의 값은 우물 군집 내 중앙부 또는 외부 상류지점에서 작은 값을 보였다. 특히 하류지점에서 회수율의 영향으로 큰 값을 보여 주입정 위치로는 적합하지 않은 것으로 나타났다(Fig. 7a, b).

한편, 하천에 평행하게 선형배열로 우물을 설치하였을 경우 통합목적함수의 값은 배열 중앙부 상류지점에서 작은 값을 보여, 우물 배열 내부나 하류 지점보다 상류지점에 주입정을 설치하는 것이 효율적인 것으로 분석되었다(Fig. 7c). 하천에 수직하게 선형배열로 우물을 설치하였을 경우 통합목적함수에 대한 결과는 변동계수에 대한 모델링 결과와 유사하게 나타났으며, 통합목적함수의 값은 우물 배열 중앙 측면부에서 가장 작은 값을 보였다. 즉, 주입정을 우물 배열로부터 어느 정도 떨어진 지점에 설치해야 회수율도 높일 뿐만 아니라 모든 우물의 양수량을 고르게 증가시키는 것으로 분석되었다. 또한 상류지점에 주입정을 설치할 경우, 회수율은 상대적으로 높은 값을 보이지만 상류지점에 위치한 우물에만 영향을 주기 때문에 변동계수는 작아지게 되어 주입정 위치로 적합하지 않은 것으로 분석되었다(Fig. 7e).

3.4.2. 우물 개수에 따른 변화

다음으로 우물 개수를 증가시켰을 때 주입정 위치에 따른 통합목적함수 값의 변화를 살펴보았다. 그 결과, 군집형태열은 우물 개수에 따라 통합목적함수 값이 최소가 되는 주입정 위치에 차이가 있었다. 우물 개수가 25개일 때 통합목적함수의 값은 우물 군집 내 중앙부의 우물에서 가장 떨어진 지점에서 가장 작은 값을 보였지만, 우물 개수가 81개로 증가하면 우물 군집을 벗어난 상류지점에서 가장 작은 값을 보였다. 즉, 우물 개수가 너무 많아지면 주입정의 영향범위보다 우물 군집의 크기가 더 커지기 때문에 우물 군집 내부보다는 외부에 주입정을 설치해야 회수율을 높일 뿐만 아니라 많은 우물에 영향을 주는 것으로 나타났다(Fig. 7a, b).

군집형태열과 다르게 선형배열의 경우는 우물 개수가 증가하여도 통합목적함수 값의 분포 형태는 동일하였으며, 우물 배열의 길이 증가로 인하여 더 넓은 범위에서 통합

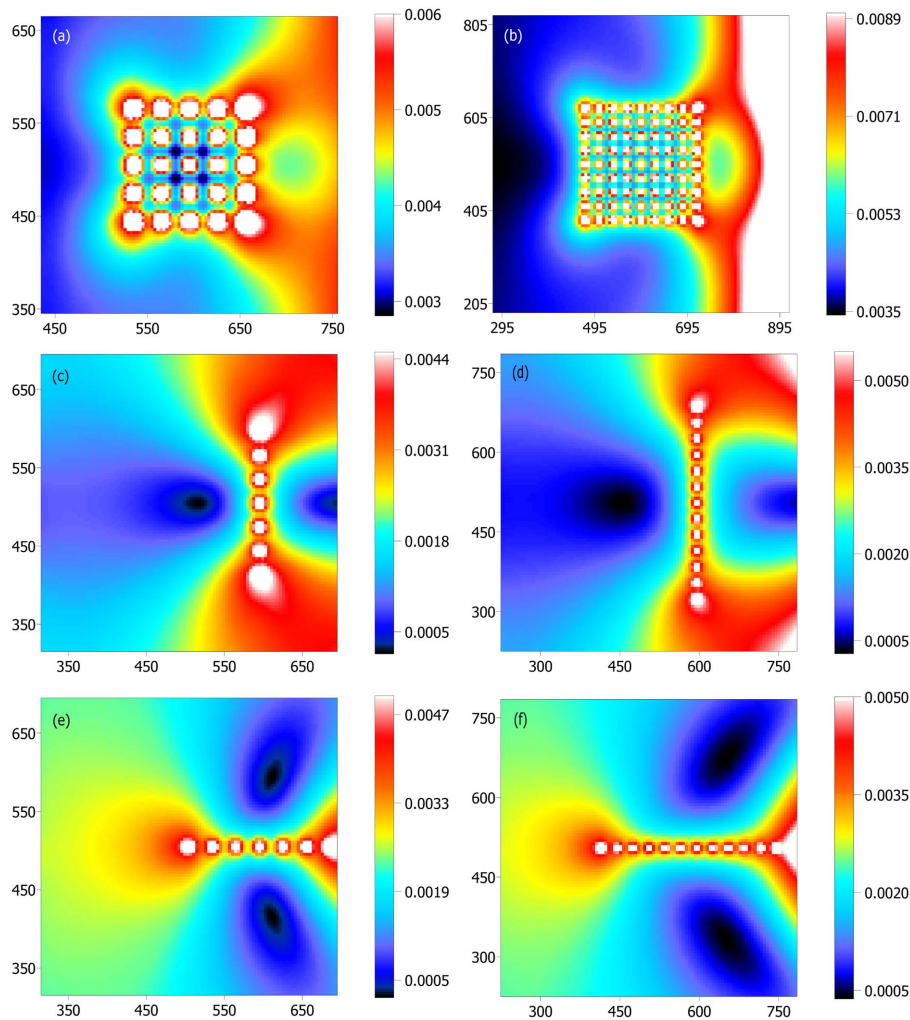


Fig. 7. Contour maps of the aggregate objective function: (a) clustered arrangement of 25 pumping wells, (b) 81 pumping wells and linear arrangement with 7 and 13 pumping wells parallel and perpendicular to the constant head boundary [(c), (d), (e) and (f)].

목적함수가 작은 값을 보였다. 따라서 우물개수에 관계없이 우물 배열이 하천에 평행한 경우는 우물 군집 상류지점이, 우물 배열이 하천에 수직인 경우는 우물 배열 측면부가 주입정 위치로 적합한 것으로 분석되었다(Fig. 7d, f).

3.4.3. 우물 간격에 따른 변화

우물 간격에 따른 통합목적함수 값의 분포를 비교하기 위하여 우물 간격을 30 m에서 100 m 증가시켜 살펴보았다. 이 경우 모델영역을 1 km × 1 km로 설정하였기 때문에 우물 군집 내부의 경우만을 살펴보았다.

그 결과, 우물 간격이 100 m로 증가하여도 통합목적함수 값의 분포 형태는 유사하였지만, 보다 더 넓은 지역에서 작은 값을 보였다. 군집형태배열의 경우, 통합목적함수 값은 우물 군집 내 중앙부 상류지점에서 가장 작은 값을

보여 이 지점에 주입정을 설치할 때 첫 번째, 세 번째 목적함수를 모두 만족시키는 것으로 나타났다.

하천에 평행한 선형배열의 경우 우물 간격이 30 m일 때와 마찬가지로 통합목적함수 값은 상류지점에서 작은 값을 보였으며, 하천에 수직인 선형배열의 경우 우물 배열 측면부에서 작은 값을 보였다.

3.5. 불균질 대수층의 경우

지금까지는 대수층이 균질 등방성일 경우 단일 주입정 위치에 따른 기존 우물의 양수량 변화를 살펴보았다. 하지만 실제 대수층은 매우 불균질한 매질로 구성되어있으므로 본 연구에서는 각기 다른 4개의 수리전도도(K) 임의장을 이용하여 단일 주입정 위치에 따른 기존 우물의 양수량 변화를 살펴보았다.

3.5.1. 불균질 대수층 설정

먼저 가상의 지하수계를 설정하기 위해 앞에서 설정한 모델영역에 부합하는 수리전도도 임의장을 산출하였다. 임의장은 Canada의 University of Waterloo내 Waterloo Centre for Groundwater Research에서 개발한 난수생성기(Cross-correlated random field generator for three or fewer dimensions)를 활용하여 산출하였다. 난수 생성기는 등방지수공분산함수(C_i) 및 이방지수공분산함수(C_a)에 기반을 두고 있으며, 다음과 같다.

$$C_i(r) = \sigma_Y^2 \exp\left(-\frac{r}{L}\right) \quad (10)$$

$$C_a(r) = \sigma_Y^2 \exp\left[-\left(\frac{r_1}{L_1} + \frac{r_2}{L_2} + \frac{r_3}{L_3}\right)^{\frac{1}{2}}\right] \quad (11)$$

여기서 σ_Y^2 은 $Y(=\ln K)$ 의 분산, r 은 분리거리, 그리고 L 은 상관거리이다.

두 등급의 불균질도($\sigma_Y^2 = 0.1, 1.0$)와 두 가지 상관거리($L = 5 \text{ m}, 50 \text{ m}$), 그리고 평균 $\ln K = 2.3$ 을 갖는 총 4개의 각기 다른 임의장을 생성하여 대수층의 불균질성을 표현하였다. Table 1은 난수생성기를 통해 계산된 수리전도도 임의장의 산술평균과 분산을 보여주는데 입력 값과 다소 차이를 보인다. 이러한 결과는 수리전도도의 상관거리가 모델 영역에 비해 크기 때문인 것으로 해석된다.

Table 1. Calculated input data for generating hydraulic conductivity fields

Random field	Mean of $\ln K$ (m/day)	Variance of $\ln K$	Correlation length (m)
K1	2.2	0.12	5
K2	2.1	0.091	50
K3	2.1	1.2	5
K4	1.7	0.91	50

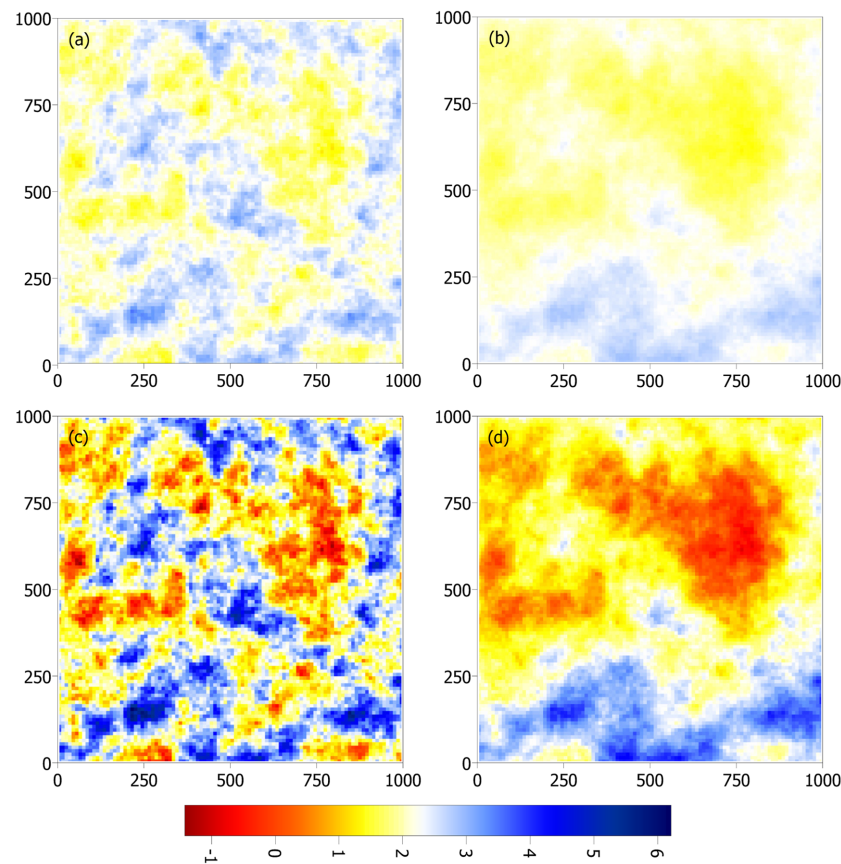


Fig. 8. Distribution of the hydraulic conductivity generated by using the cross-correlated random field generator: (a) K1, (b) K2, (c) K3, and (d) K4.

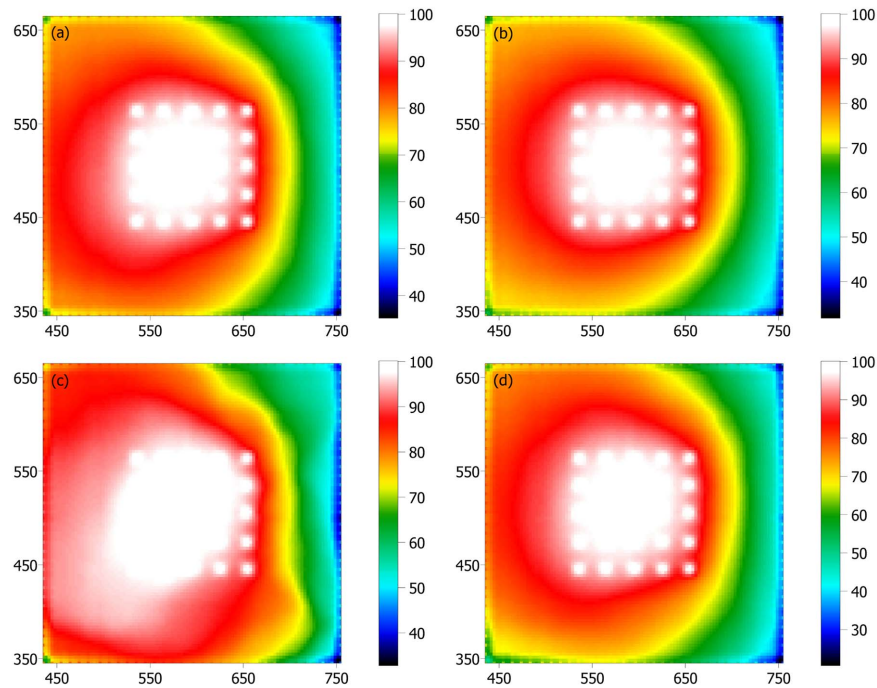


Fig. 9. Contour maps of the recovery ratio in heterogeneous aquifers: (a) K1, (b) K2, (c) K3, and (d) K4.

Fig. 8은 산출된 임의장 내 수리전도도 분포도이다. K1과 K2, K3과 K4는 각각 같은 불균질도를 가지지만 서로 다른 상관거리를 가진 임의장으로, 전체적으로 색깔의 명암은 같으나 임의장 내 색깔 변화의 빈도수가 다르게 나타난다. 반면, K1과 K3 또는 K2와 K4의 경우 각각 상관거리는 같지만 불균질도가 다르기 때문에 색깔 변화의 빈도수는 같으나 색깔의 명암 차이가 K3로 갈수록 커지는 것으로 나타났다. 즉, K1에서 K2로, K3에서 K4로 갈수록 수리전도도 값의 변화폭은 같지만, 유사한 수리전도도 값의 분포범위는 넓어지는 것으로 나타났다. 반대로 K1에서 K3로, K2에서 K4로 갈수록 값의 분포는 유사하고, 값의 변화폭은 커지는 것으로 나타났다.

3.5.2. 회수율의 최대화

이와 같이 구해진 4개의 수리전도도 임의장을 대상으로 우물 25개가 군집형배열로 설치되어 있을 경우, 단일 주입정 설치 시 기존 우물의 양수량 변화를 살펴보았다. 먼저 수리전도도 임의장에 따른 회수율 변화를 살펴보기 위하여 수리전도도가 일정하다고 가정하였을 경우 주입정 위치에 따른 회수율을 보여주는 Fig. 3a와 비교해보았다. 그 결과, Fig. 9와 같이 4개의 불균질한 대수층 모두 우물 군집 내부 상류지점에 주입정을 설치할 때 가장 높은 회수율을 보여 균질한 대수층일 경우의 결과와 매우 유사

하게 나타났다. 하지만 불균질도가 크고 상관거리가 작은 K3 임의장의 경우 주입정 위치가 우물 군집 외부라 하더라도 수리전도도가 높은 지점이면 주입된 물이 보다 빠르게 우물 군집 쪽으로 이동하여 높은 회수율을 보였다(Fig. 9c). 이는 K3 임의장이 4개의 수리전도도 임의장 중 가장 불균질하고 가장 큰 수리전도도를 포함하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 수리전도도가 높은 지점일수록 물 주입 시 높은 회수율을 보이는 것으로 분석되었다. 또한 불균질도가 클수록 수리전도도 분포는 회수율에 영향을 더 많이 주는 것으로 분석되었다.

3.5.3. 주입량의 최대화

다음으로 수리전도도 임의장에 따른 주입정 설치 시 주입 가능량을 살펴보았다. 그 결과 우물 군집 내부에서 가장 큰 주입 가능량을 보였던 균질대수층의 결과와 매우 다른 결과를 보였다. 4개의 불균질 대수층 모두 기존 우물의 위치에 관계없이 수리전도도가 높은 지점에 주입정을 설치할 때 가장 많은 양의 물을 주입할 수 있었다(Fig. 10). 이는 수리전도도가 높은 지점에 물을 주입할 때 주입된 물이 주변으로 빠르게 이동하여 더 많은 양의 물을 주입할 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한 불균질도가 커질수록 수리전도도 변화폭이 커지게 되어 주입 가능량의 변화폭도 크게 나타났다(Fig. 10c).

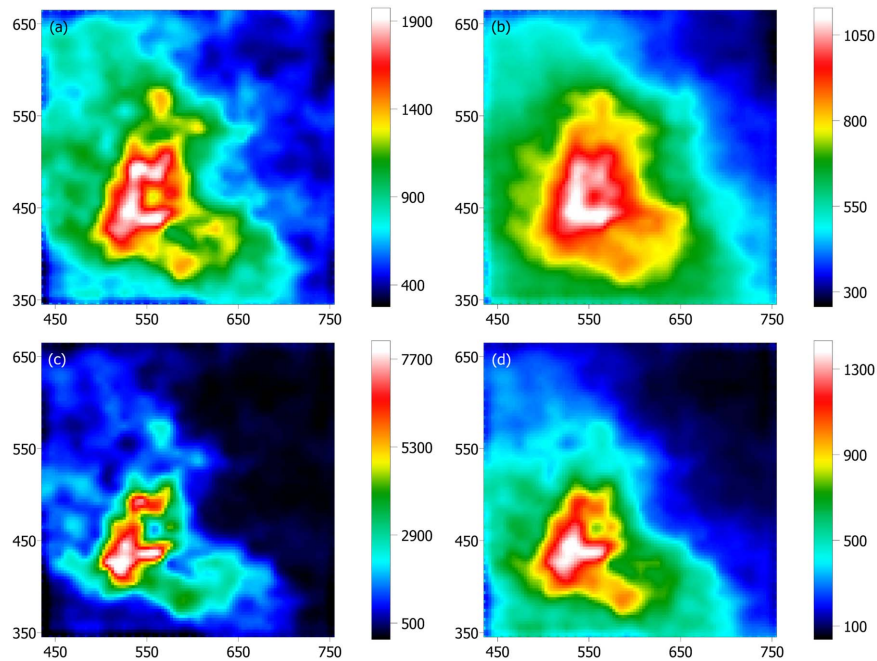


Fig. 10. Contour maps of the injection rate in heterogeneous aquifers: (a) K1, (b) K2, (c) K3, and (d) K4.

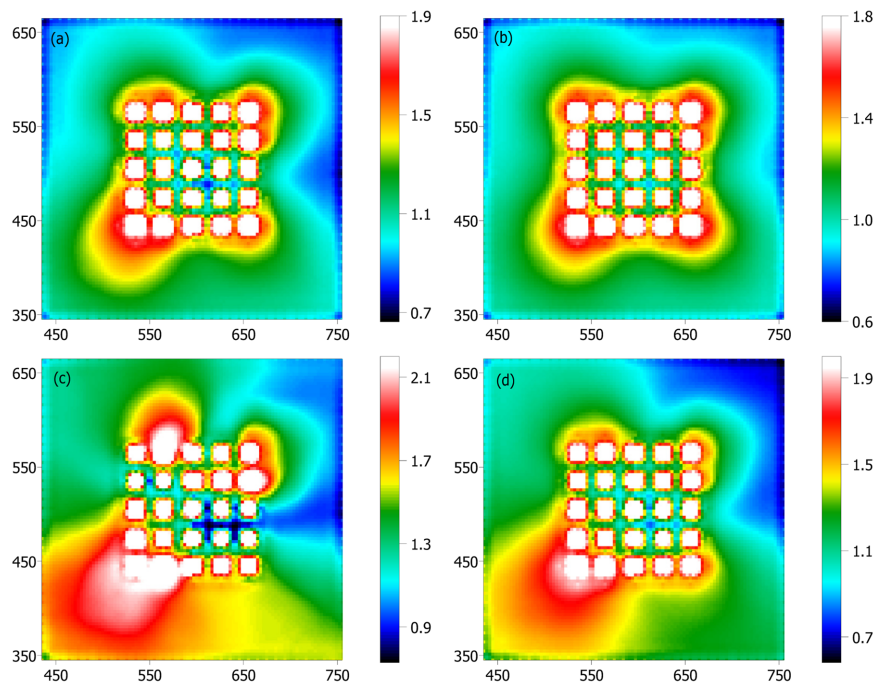


Fig. 11. Contour maps of the coefficient of variation in heterogeneous aquifers: (a) K1, (b) K2, (c) K3, and (d) K4.

3.5.4. 공당 양수량 변화량 변동계수의 최소화

대수층이 불균질할 경우 주입된 물이 기존 양수정의 양수량을 고르게 증가시키는 주입정 위치를 대수층이 균질할 경우와 비교하기 위해 주입정 위치에 따른 공당 양수

량 변화량의 변동계수를 살펴보았다(Fig. 11). 그 결과, Fig. 6a와 같이 우물 군집 내 중앙부 또는 상, 하류 지점에서 작은 값을 보이는 균질한 대수층의 결과와 유사하게 나타났지만 약간의 차이를 보였다. 수리전도도가 일정할

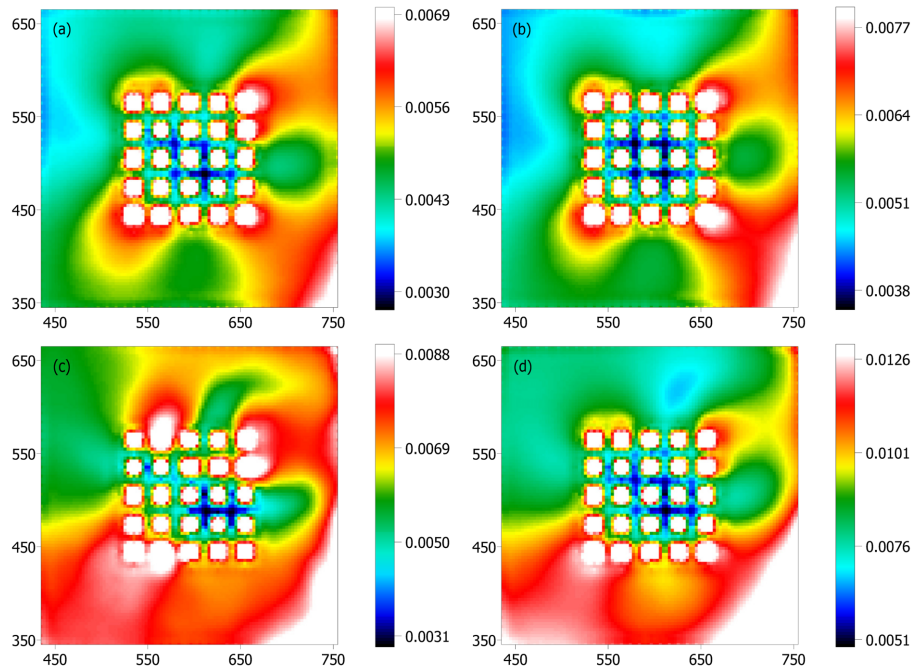


Fig. 12. Contour maps of the aggregate objective function in heterogeneous aquifers: (a) K1, (b) K2, (c) K3, and (d) K4.

경우와 마찬가지로 우물 군집의 모서리에 위치한 우물 바깥쪽으로 보다 넓은 지역에서 큰 값을 보였으며, 특히 수리전도도가 높은 지점에서 큰 값을 보였다. 이는 수리전도도가 작은 지점에 주입된 물은 천천히 이동하며 기존 우물의 양수량을 비교적 고르게 증가시키기 때문인 것으로 판단된다. 또한 불균질도가 클수록 변동계수는 수리전도도분포에 더 많은 영향을 받는 것으로 나타났다(Fig. 11c). 하지만 상관거리가 커지게 되면 불균질도의 영향이 약화되는 경향을 보였다(Fig. 11d). 따라서 불균질도가 작으면 주입정이 우물 군집으로부터 어느 정도 떨어지거나, 우물 군집 내부에 위치하는 것이 모든 우물에 고르게 영향을 주는 것으로 나타났다. 한편, 불균질도가 커지게 되면 수리전도도가 작은 지점에 주입정이 위치할 때 변동계수가 작은 것으로 나타났다.

3.5.5. 통합목적함수의 최소화

마지막으로 대수층이 불균질 할 경우 통합목적함수를 최소화시키는 주입정 위치를 살펴보았으며, 그 결과는 Fig. 12와 같다. 앞서 살펴본 다른 목적함수들과 마찬가지로 불균질도가 작은 임의장에서는 수리전도도가 일정할 경우와 비교적 유사한 통합목적함수 값의 분포 형태를 보였다. 따라서 불균질도가 작으면 우물 군집 내부에 주입정을 설치할 때 회수율은 높고 변동계수는 작게 나타나

주입정 위치로 적합한 것으로 분석되었다(Fig. 12a, b). 반면, 불균질도가 클 경우 회수율과 변동계수 모두 수리전도도의 영향을 많이 받아 통합목적함수 또한 수리전도도의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 회수율의 경우 우물 군집 내부뿐만 아니라 수리전도도가 높은 외부 지점에서도 높은 값을 보였지만, 수리전도도가 높으면 변동계수도 큰 값을 보여 통합목적함수 값은 커졌다. 따라서 이 경우 우물 군집 내 수리전도도가 비교적 작은 지점에 주입정을 설치하는 것이 적합한 것으로 분석되었다(Fig. 12c). 한편, 상관거리가 커지게 되면 불균질도가 커도 수리전도도의 영향이 약화되는 것으로 나타났으며, 우물 군집 내부에 주입정을 설치하는 것이 효율적인 것으로 분석되었다(Fig. 12d).

4. 결 론

지하수 모델링 기법을 이용하여 인공함양 시 양수량을 최대로 하고 기존 양수정의 양수량을 고르게 증가시키는 최적의 단일 주입정 위치를 알아보는 FORTRAN CODE를 개발하여 주입정 위치에 따른 기존 양수정의 양수량 변화를 예측 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 세 개의 목적함수에 대한 모델링 결과, 회수율과 주

입량만을 고려하여 주입정을 설치한다면 우물 배열에 관계없이 우물 군집 내부에 주입정을 설치해야 가장 효율적인 것으로 나타났다. 반면 공당 양수량 변화량의 변동계수만을 고려할 경우, 우물 군집 내부보다는 외부에 주입정을 설치하는 것이 기존 양수정의 양수량을 고르게 증가시키는 것으로 나타났다.

2) 회수량과 양수량 변화량의 변동계수를 모두 고려한 통합목적함수에 대한 모델링 결과, 군집형태배열의 경우 우물 개수가 작을 때는 우물 군집 내 중앙부가 주입정 위치로 적합한 것으로 분석되었지만, 우물 개수가 증가하면 우물 군집 내부보다는 외부에 주입정을 설치해야 많은 우물에 영향을 주는 것으로 나타나 우물 군집을 벗어난 상류지점이 주입정 위치로 적합한 것으로 분석되었다. 반면, 하천에 평행한 선형배열의 경우 우물 군집 상류지점이 주입정 위치로 적합한 것으로 분석되었으며, 하천에 수직한 선형배열의 경우 우물 군집 중앙부의 측면부가 주입정 위치로 적합한 것으로 분석되었다.

3) 실제 대수층과 같이 매질이 불균질한 서로 다른 4개의 수리전도도(K) 임의장을 생성하여 단일 주입정 위치에 따른 기존 우물의 양수량 변화를 살펴본 결과, 네 개의 목적함수 모두 불균질도가 커질수록 수리전도도 분포에 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 특히 두 번째 목적함수인 주입 가능량의 경우 수리전도도 분포에 가장 많이 영향을 받는 것으로 분석되었다. 또한 불균질도가 커져도 상관거리가 커지면 수리전도도 분포의 영향이 약화되는 것으로 나타났다. 따라서 최적의 주입정 위치를 평가할 경우 수리전도도 분포는 신중히 고려되어야 한다.

4) 최적의 주입정 위치를 평가하는 문제의 경우, 최적에 가까운 다수의 지역적 최소값 및 최대값이 존재하여 현장의 조건에 따라 주입정의 위치를 조정할 수 있는 것으로 판단된다. 또한 모델링 결과는 지하수를 과도하게 개발하는 지역에 수자원 확보를 위한 인공함양기법 적용 시 최적의 주입정 위치를 평가하는데 기초자료가 될 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 대수층의 불균질도가 주입정 위치 선정에 주는 영향에 대한 연구가 부족하여 보다 다양한 수리전도도 임의장을 생성하여 분석할 필요가 있다.

사 사

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 물관리연구사업(11기술혁신C05)에 의한 '수변지하수활용고도화' 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Bae, S.K. and Lee, S.H., 2011, Groundwater flow analysis in an urban area, Annual Meeting of Korea Water Resources Association, Daegu, p. 235-239.
- Banerjee, P. and Singh, V.S., 2011, Optimization of pumping rate and recharge through numerical modeling with special reference to small coral island aquifer, *Phys. Chem. Earth*, **36**, 1363-1372.
- Bouwer, H., 2002, Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering, *Hydrogeol. J.*, **10**, 121-142.
- 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 variations, *J. Eng. Geol.*, **22**, 195-205.
- Chung, I.M., Kim, J.T., and Kim, N.W., 2008, Method of enhancing the estimation of potential amount of groundwater development, Annual Meeting of Korean Society of Civil Engineers, Daejeon, p. 2902-2905.
- Hong, S.H., Han, S.Y., and Park, N.S., 2003, Assessment of potential groundwater development in coastal area, *J. Kor. Soc. Civil Eng.*, **23**(3B), 201-207.
- Jeon, J.W., Yun, S.T., Kwon, J.S., Yun, S.M., Kang, J.O., and Han, C., 2005, Hydrogeochemical study in groundwater from Gyeongancheon riverine alluvial aquifer, Annual Meeting of Korean Society of Soil and Groundwater Environment, Gongju, p. 332-335.
- 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, *J. Kor. Water Resour. Assoc.*, **45**(10), 1051-1067.
- Kim, Y. and Kim, Y., 2010, A review on the state of the art in the management of aquifer recharge, *J. Geol. Soc. Kor.*, **46**(5), 521-533.
- Kinzelbach, W., Bauer, P., Siegfried, T., and Brunner, P., 2003, Sustainable groundwater management problems and scientific tools, *Episodes*, **26**(4), 279-284.
- Oh, S.H., Kim, Y.C., and Koo, M.H., 2011, Modeling artificial groundwater recharge in the Hancheon drainage area, Jeju island, Korea, *J. Soil & Groundwater Env.*, **16**(6), 34-45.
- Prickett, T.A., 1967, Designing pumped well characteristics into electrical analog models, *Ground Water*, **5**(4), 38-46.
- Seo, J.A., Kim, Y.J., Kim, J.S., and Kim, Y., 2010, Development of evaluation method for potential artificial recharge site using GIS, Annual Meeting of the Geological Society of Korea, Gyeongju, p.313.
- Seo, J.A., Kim, Y., Kim, J.S., and Kim, Y.J., 2011, Site priorit-

zation for artificial recharge in Korea using GIS mapping, *J. Soil Groundw. Environ.*, **16**(6), 66-78.

Thiem, G., 1906, Hydrologische Methoden, J. M. Gebhardt, Leipzig.

Wada, Y., van Beek, L.P.H., van Kempen, C.M., Reckman, J.W.T.M., Vasak, S., and Bierkens, M.F.P., 2010, Global depletion of groundwater resources, *Geophysic. Res. Lett.*, **37**, L20402, doi:10.1029/2010GL044571.