

## 담금질모사 기법을 이용한 인공함양정 최적 위치 결정

이현주<sup>1</sup> · 구민호<sup>1\*</sup> · 김용철<sup>2</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 지질환경과학과, <sup>2</sup>한국지질자원연구원

### Global Optimization of Placement of Multiple Injection Wells with Simulated Annealing

Hyeonju Lee<sup>1</sup>, Min-Ho Koo<sup>1\*</sup>, and Yongcheol Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University

<sup>2</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Received 14 February 2015; received in revised form 7 March 2015; accepted 11 March 2015

---

선형 또는 군집형으로 배치된 양수정 배열 조건에서 최적의 복수 주입정 위치를 결정하는 최적화 프로그램을 개발하였다. 다양한 목적함수를 제시하였으며 담금질모사 기법을 이용하여 목적함수를 만족시키는 주입정의 최적 위치를 평가하였다. 주입수의 회수율의 최대화를 목적함수로 설정할 경우, 우물 배열에 관계없이 두 개의 주입정을 모두 우물 군집 내부에 설치하는 것이 가장 효율적인 것으로 나타났다. 회수율의 최대화와 동시에 기존 양수정의 양수량을 고르게 증가시키는 통합목적함수를 고려하여 두 개의 주입정을 설치할 경우, 우물 배열에 관계없이 우물 배열의 양측면부가 주입정 위치로 적합한 것으로 분석되었다. 주입정 위치 최적화를 위한 다수의 시나리오 분석 결과, 최적의 결과에 근접하는 지역적 최솟값 또는 최댓값이 다수 존재하는 것으로 나타났으며, 이는 주입정의 최적 위치를 현장의 조건에 맞게 선택적으로 결정할 수 있는 개연성이 존재하는 것을 의미한다. 결론적으로, 본 연구는 담금질모사 기법이 다양한 목적함수에 부합하는 복수 주입정의 최적 위치 평가에 성공적으로 이용될 수 있음을 보여 주었다.

**주요어:** 담금질모사, 최적화, 지하수흐름모델, 인공함양, 주입정

A FORTRAN program was developed to determine the optimal locations of multiple recharge wells in an aquifer with different arrangements of pumping wells. The simulated annealing algorithm was used to find optimal locations of two recharge wells which satisfied three objective functions. The model results show that locating two injection wells inside the cluster of pumping wells is efficient if the recovery rate only was taken into account. In contrast, placing injection wells to the side of the cluster is desirable if the simulation considers aggregate objective function. Therefore, installing an injection well on each side of the cluster seems to yield the maximum recovery rates for the existing pumping wells, and it yields similar increases in pumping rate for all wells in the cluster. The locations of recharge wells can be arranged in numerous configurations, because there are multiple near-optimal local minima or maxima. These results indicate that the simulated annealing can yield effective evaluations of the optimal locations of multiple recharge wells. In addition, the suggested aggregate objective function can be utilized as an appropriate multi-objective optimization.

**Key words:** simulated annealing, optimization, groundwater flow model, artificial recharge, injection well

---

\*Corresponding author: [koo@kongju.ac.kr](mailto:koo@kongju.ac.kr)

© 2015, The Korean Society of Engineering Geology

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.

## 서 론

현재 국내에서는 수변지역 총적 대수층에서의 시설재배와 수막재배를 위한 지하수 사용량이 전체 지하수 사용량의 많은 부분을 차지하고 있으며 꾸준히 증가하고 있다. 또한 지하수의 직접적인 사용 외에 에너지 자원으로서의 간접적인 사용도 증가하고 있는 추세이다. 이와 같은 지나친 지하수 개발 및 이용은 시설재배기간에 지하수 고갈문제를 발생시킬 뿐만 아니라 이로 인한 수질 오염 문제와 인접한 하천의 수량 감소 등 많은 문제를 초래하고 있다.

따라서 이러한 문제를 예방하고자 개발가능량 산정 및 지속적인 수자원확보를 위한 연구가 국·내외로 수행되고 있다(Bouwer, 2002; Banerjee and Singh, 2011). Hong et al. (2003)는 지하수의존도가 높은 해안지역의 지하수 유출량을 평가하고 이를 토대로 해안 지역의 지하수 개발가능량을 평가하는 방법을 제시하였다. Chung et al. (2008)는 우리나라의 지하수 개발가능량의 현황을 조사하고 개발가능량 산정의 개선방안을 도출하고자 하였다. 특히, 최근 국내에서는 수자원 확보를 위한 인공함양 및 지하댐의 중요성이 인식되면서 이에 따른 효과를 분석하기위해 관련 연구가 활발히 수행되고 있다(Oh et al., 2010; Seo et al., 2010; Kim et al., 2014). Kim and Kim (2009)은 인공함양을 통해 과잉채수지역의 대수층 고갈을 막고 수자원을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 해안 대수층의 염수침입을 방지하는 등 수질개선 효과와 오염저감 효과도 기대할 수 있을 것으로 평가하였다. 또한 Lee et al. (2004)는 지하수위 하강을 저감시키기 위한 방안으로 인공함양정을 설치하는 방법을 제안하였으며, Kim et al. (2012)는 지하수자원 확보를 위한 인공함양 기술의 국내의 특히 기술동향을 분석하였다. Kim et al. (2009)는 지표수, 지하수 연계해석 프로그램인 SWAT-MODFLOW를 지하댐 건설 예정지인 황천강 일대에 적용하여 지하댐 건설 전, 후의 지하수위 변화를 예측하였다.

또한 최적화 기법을 이용하여 갈수기 용수공급방안을 검토하거나, 수질모형의 최적 매개변수를 추정하는 연구가 수행되었다(Shim et al., 2001; Cha et al., 2007). Hyun et al. (2011)은 유전자 알고리즘을 이용하여 지하수 종속 생태계에서의 지하수 유동 및 오염물질 거동을 분석하였으며, Park et al. (2003)은 유전자 알고리즘을 이용하여 해안지역에서 최적의 지하수 양수량 또는 우물 위치를 평가할 수 있는 모형을 개발하였다. 또한

Lee et al. (2014)는 인공함양정 설치 시 고려해야할 여러 인자들을 통합한 통합목적함수를 제시하였고, 지하수 모델링 기법을 통해 균질, 불균질 대수층에서 최적의 인공함양정 위치를 평가하였다. 국외에서도 최적화 기법을 이용하여 지하수 개발가능량을 산정하거나, 양수정 위치 및 양수량을 결정하기 위한 연구가 수행되었다(Mantoglou et al., 2004; Ayvaz and Karahan, 2008). Li et al. (1987)은 수자원확보를 위해 인공함양 기법을 적용할 때, 인공함양정의 위치를 최적화 기법을 통해 선정하고자 하였다. 이처럼 국·내외로 수자원 확보를 위한 다양한 방법들에 대한 연구가 활발히 수행되고 있지만, 대부분 지하수위 및 지하수 확보량 예측과 같은 정량적인 평가가 대부분이며, 실제 현장 적용 시 위치 평가에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 취수정의 지하수 개발가능량에 영향을 주는 인자들을 살펴보기 위해 각 변수에 따른 양수량 변화를 비교 분석하였다. 또한 다양한 우물 배열에서 최적의 복수 주입정 위치를 평가하기 위해 주입정 위치에 따른 기존 양수정의 양수량 변화를 수치 모의하는 FORTRAN 프로그램을 개발하였다. 복수 주입정의 경우, 경우의 수가 많기 때문에 담금질모사 기법을 적용하여 목적함수를 만족시키는 주입정 위치를 평가하였으며, 이때 최적의 복수 주입정 위치 선정 시 담금질모사 기법의 적용가능성을 평가하였다.

## 연구 방법

### 개념모델

Fig. 1은 수변지역 총적대수층에서의 지하수 흐름을 모사하기 위해 설정한 가상의 개념모델이다. 균질, 등방성의 자유면대수층을 가정하였으며, 모델 영역의 동쪽 끝단은 10 m 수위를 갖는 일정수두경계(constant head boundary)로 설정하였고, 하천을 제외한 나머지 유역 경계는 영향을 최소화하기 위하여 불투수경계로 설정하였다. 모델 영역은 1 km × 1 km의 정사각형 모양으로 설정하였으며, 두께가 일정한 1개의 층으로 구성하였다. 격자의 크기는 10 m × 10 m이며, 격자망은 100행, 100열로 총 10,000개의 격자로 구성하였다. 투수성이 좋은 수변지역 총적 대수층을 표현하기위하여 수리전도도는 10 m/day로 설정하였다.

MODFLOW와 같은 대부분의 지하수 수치모델의 경우 우물의 양수량을 입력 값으로 고정시키고 지하수위 변화를 모의하는 것이 일반적이다(Lee et al., 2014). 하

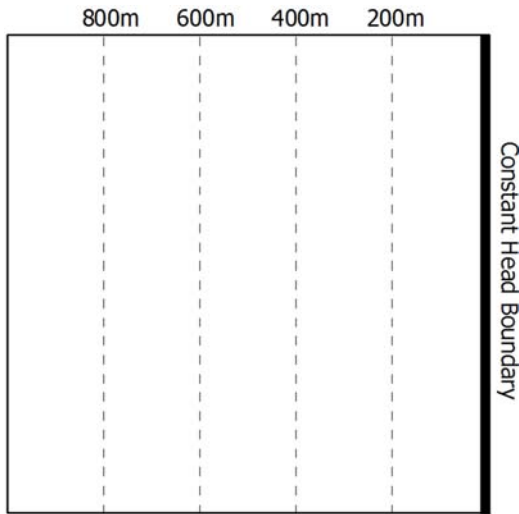


Fig. 1. Schematic diagram of the model domain and boundary conditions.

지만 본 연구에서는 양수량에 따른 지하수위 변화를 모의하는 일반적인 연구 방식과 다르게 양수정의 지하수위를 고정시킨 후, 인공함양 시 양수량의 변화를 모의하였다. 개별 우물의 지하수위는 양수 후 포화대 두께의 50% 만큼의 수위강하가 발생하는 것을 가정하였으며, 이때 양수정 및 주입정 위치에 따른 양수량 변화를 모의하였다.

한편, 지하수위 계산 시 MODFLOW와 같이 격자 내의 평균 수위가 계산되어 실제 우물 수위보다 과대평가되는 문제를 해결하기 위하여, 실제 우물에서의 수위를 우물의 수두와 격자의 수두와의 관계식을 이용하여 계산하였다. 이때 우물 수위는 아래와 같은 Thiem의 방정식을 이용하여 계산할 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 우물 반경이  $r_w$ 일 때의 우물 수두(L),  $h_{ij}$ 는 격자에서 계산된 수두(L),  $Q$ 는 양수량( $L^3/T$ ),  $K$ 는 수리전도도(L/T)이다. 이때  $r_e$ 는 실제 수두와 계산된 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  $\Delta x$ 는 정사각형 격자의 크기이다.

따라서 개별 우물의 양수량을 구하기 위해서 지하수 흐름 모델에 식 (1)과 식 (2)를 추가하여 실제 우물에서의 수위와 양수량을 계산하는 FORTRAN 프로그램을 개발하였다. 이때 개별 우물의 양수량은 취수정의 양수량을 변화시키면서 격자의 수두를 계산하고 위 식을 이용하여 우물 수두를 계산하는 일련의 연산과정을 반복하여 구해진다. 프로그램에서 지하수 흐름 방정식의 수치해는 PCG2 (prepositioned conjugate gradient) equation solver를 이용하여 계산하였으며, 정류상태를 모사하였다.

### 복수 주입정 위치 평가를 위한 최적화 기법

#### 목적함수 및 제한조건

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

먼저 첫 번째 목적함수는 주입정 설치 시 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  $Q$ 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.

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

$$\text{Minimize } \left( \sqrt{\frac{\sum_i^n (\Delta Q_i - \overline{\Delta Q})^2}{n}} \right) / \overline{\Delta Q} \quad (4)$$

여기서  $\overline{\Delta Q}$ 는 주입정 설치 후 공당 양수량 변화량의 평균( $L^3/T$ )이다. 공당 양수량 변화량의 변동계수는 물 주입 시 기존 양수정의 양수량을 고르게 증가시키는지 알아보기 위해 살펴보았다.

마지막으로 우물 군집에 대한 주입정의 영향 정도를 고려한 통합목적함수(aggregate objective function, AOF)를 최소화하는 것을 네 번째 목적함수로 설정하였다. 통합목적함수는 앞서 살펴본 첫 번째, 두 번째 목적함수인 양수량 변화량과 변동계수를 통합하여 다음과 같이 나타냈다.

$$\text{Minimize } \frac{CV}{n} \tag{5}$$

$$\sum_i \Delta Q_i$$

여기서 CV는 공당 양수량 변화량의 변동계수,  $\Delta Q$ 는 물 주입 시 양수량의 변화량( $L^3/T$ )으로, 이 값이 작은 지점일수록 회수율은 높고 기존 양수정의 양수량을 고르게 변화시키는 곳으로 주입정 위치로 적합하다고 판단하였다. 이때 세 개의 목적함수에 대한 제한조건은 우물 수위로 다음 식과 같다.

$$h_{pw} = \frac{D}{2} \tag{6}$$

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

**담금질모사 기법**

복수 주입정의 경우 단일 주입정과 다르게 경우의 수가 많기 때문에 주입정을 순차적으로 이동시켜가며 우물의 양수량 변화를 계산하는데 많은 시간이 필요하므로 최적화 기법이 필요하다. 최적화에는 목적, 필요한 정보의 종류와 양에 따라 다양한 기법이 있으며, 담금질모사 기법과 유전알고리즘 기법이 다양한 분야에서 사용되고 있다(Goffe et al., 1994; Rye et al., 2005; Rye, 2005; Lee and Park, 2008). 본 연구에서는 주입정이 2개일 경우 담금질모사 기법을 사용하여 세 개의 목적함수를 만족시키는 최적의 주입정 위치를 살펴보았다.

담금질모사 기법(simulated annealing, SA)은 고온 물질의 분자가 식어가면서 점차 안정화되어 가는 과정을 묘사하여 광역적 최적화(global optimization)를 수행하는 알고리즘이다. 담금질모사 기법의 과정을 살펴보면, 먼저 임의의 지점에서 목적함수의 초기 값을 계산한다. 그

후 0~1 사이의 난수를 발생시켜 값을 교란시킬 격자를 결정하고, 새로운 난수를 발생시켜 선택된 격자점에서의 변수 값을 변화시킨다. 변화된 값을 이용하여 목적함수의 값을 다시 계산한 후 목적함수 값의 변화에 따라 교란된 값의 수용 여부를 결정한다. 이때 교란된 새로운 해의 수용 여부는 다음과 같이 Metropolis 기법을 이용하여 결정한다(Metropolis et al., 1953).

$$p = \begin{cases} 1 & \text{if } \Delta E > 0 \\ e^{-\Delta E/T} & \text{if } \Delta E < 0 \end{cases} \tag{7}$$

여기서  $\Delta E$ 는 목적함수의 변화량, T는 온도를 나타내며, p는 주어진 온도 T에서  $\Delta E$ 가 나타날 확률을 의미한다.

최댓값을 구하는 문제의 경우, 목적함수가 증가하면 그 변화를 무조건적으로 받아들인다. 반면, 목적함수가 감소할 경우에는 식 (7)을 통해 계산된 확률을 새로 발생한 난수와 비교하여 난수 값이 작으면 그 변화를 수용하여 새롭게 생성된 값을 자료 값으로 사용하고, 만약 난수 값이 더 크면 변화를 받아들이지 않고 변화 이전의 값을 그대로 유지한다. 위 과정을 목적함수가 원하는 기준으로 수렴할 때까지 반복 수행하면 최댓값을 구할 수 있다.

Table 1는 담금질모사 기법으로 회수율이 높은 2개의 주입정 위치를 찾아가는 과정을 보여준다. 여기서 Cell 1과 Cell 2는 첫 번째 주입정의 좌표를 나타내며 Cell 3과 Cell 4는 두 번째 주입정의 좌표를 나타낸다. RN은 난수를 의미하며, E는 목적함수로 여기서는 회수율을 의미한다. 이 경우 회수율의 목표 값은 98%로 설정하였다. 또한 초기온도는 1, 온도 감소율은 0.7이며, 최대교란수는 3으로 설정하였다.

담금질모사 기법을 적용하기에 앞서 2개의 주입정 위

**Table 1.** Example of the calculation process of simulated annealing.

T	No.	RN1	Cell No.	RN2	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4	E	$\Delta E$	p	RN3	Decision
0.7	1				505	515	665	525	89				
	2	0	1	0.02	405	515	665	525	84	-5	0.004	0.35	reject
	3	0.66	3	0.96	505	515	755	525	73	-16	0	0.83	reject
0.49	1	0.33	2	0.91	505	595	665	525	86	-3	0.008	0.79	reject
	2	0.83	4	0.34	505	515	665	485	89	0	0.989	0.87	accept
	3	0.09	1	0.88	575	515	665	485	93	3.6			
0.49	1	0.70	3	0.73	575	515	705	485	85	-8	0	0.3	reject

치를 임의로 지정하였으며, 이때 회수율은 89% (E)로 목표 값보다 작은 값이 나왔다. 먼저 주입정의 이동 방향 및 이동량을 결정하기 위한 난수 값(RN1, RN2)을 발생시켜 선택된 첫 번째 주입정의 X좌표를 이동시킨 결과 회수율이 이전보다 5% 감소하였다. 이 경우 최댓값을 구하는 것이 목표인데 회수율이 감소하였으므로 식 (7)을 통해 계산된 확률과 난수를 비교하여 수용 여부를 판단하였다. 그 결과, 계산된 확률이 난수(RN3)보다 작은 값을 보여 이 변화를 수용하지 않고 초기 값을 그대로 사용하였다. 위 과정을 회수율이 앞서 설정한 목표 값인 98%에 도달할 때까지 반복 수행하면 회수율이 높은 2개의 주입정 위치를 구할 수 있다.

**연구 결과**

**취수정의 지하수 개발가능량 평가**

수자원 확보를 위해 인공함양정 설치 시 인근 취수정의 지하수 개발가능량은 인공함양 시스템의 효율성에 영향을 줄 수 있으므로 인공함양정 위치 선정 시 중요하게 고려되어야 한다. 이는 인공함양정을 통해 주입된 물의 회수율 및 주입량에 직접적으로 영향을 줄 수 있다. 따라서 최적의 복수 주입정 위치를 평가하기에 앞서 취수정의 지하수 개발가능량에 영향을 주는 인자들을 살펴보았다. 이때 각 변수에 따른 양수량 변화를 하천으로부터의 거리에 따라 비교 분석하였다.

**수리전도도가 개발가능량에 미치는 영향**

Fig. 2는 대수층의 수리전도도에 따른 양수량 변화를 나타낸 그림이다. 1개의 우물이 하천으로부터 200, 400, 600, 800 m 거리에 위치 할 경우 수리전도도 변화에 따른 양수량을 살펴보았다. 하천으로부터의 거리에 관계없이 수리전도도가 증가할수록 양수량도 증가하였다. 한편, 수리전도도가 일정할 경우, 우물이 하천으로부터 멀어질수록 양수량은 감소하였다. 이때 거리에 따른 양수량의 감소량은 수리전도도가 클수록 증가하였다. 이는 우물이 하천 인근에 위치할 경우 대수층의 수리전도도가 크면 양수 시 대수층뿐만 아니라 하천으로부터도 물이 빠르게 공급되어 양수량이 증가한 것으로 판단된다. 일반적으로 우물이 하천으로부터 가까운 곳에 위치하거나 그 지역에 함양량이 많을 경우 지하수 개발가능량은 증가할 수 있지만, 수리전도도가 작다면 지하수 개발가능량은 제한적일 것이다.

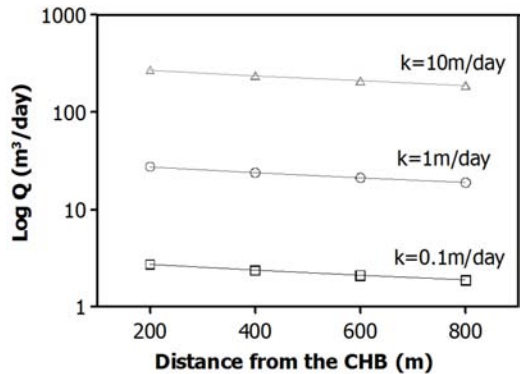


Fig. 2. Effects of the hydraulic conductivity (K) and the distance from the constant head boundary (CHB) on the pumping rate (Q).

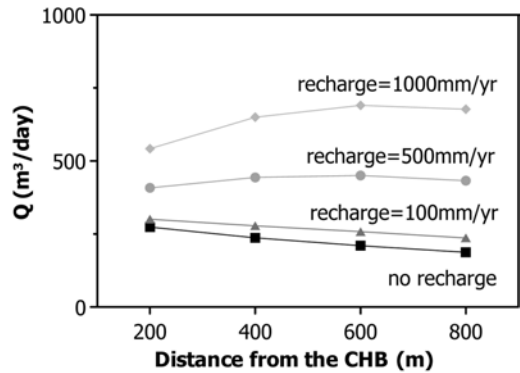


Fig. 3. Effects of the recharge and the distance from the constant head boundary on the pumping rate.

**함양량이 개발가능량에 미치는 영향**

Fig. 3은 함양량에 따른 양수량 변화를 보여주는 그림이다. 함양이 없다고 가정하였을 경우 우물의 거리에 관계없이 양수량이 가장 작았으며, 함양량이 증가할수록 양수량도 증가하였다. 함양량이 없거나 적을 경우, 우물이 하천에서 멀어질수록 하천수 유입이 감소하여 양수량은 감소하였다. 하지만 함양량이 일정 이상 증가하면 우물이 하천에서 멀어지더라도 함양의 영향을 많이 받아 양수량은 약간 증가하였다.

함양의 영향을 좀 더 살펴보기 위하여 Fig. 3의 자료를 이용하여 함양이 있을 때와 없을 때 두 경우의 양수량 비율을 계산하였다. 그 결과, 우물이 하천에서 멀어질수록 양수량 비율이 감소하였다. 이는 함양이 있을 때와 없을 때의 양수량 차이가 하천에서 멀어질수록 크게 나타나는 것으로, 함양의 영향을 더 많이 받는 것을 뜻한다. 그 이유는 우물이 하천으로부터 멀어질수록 함양

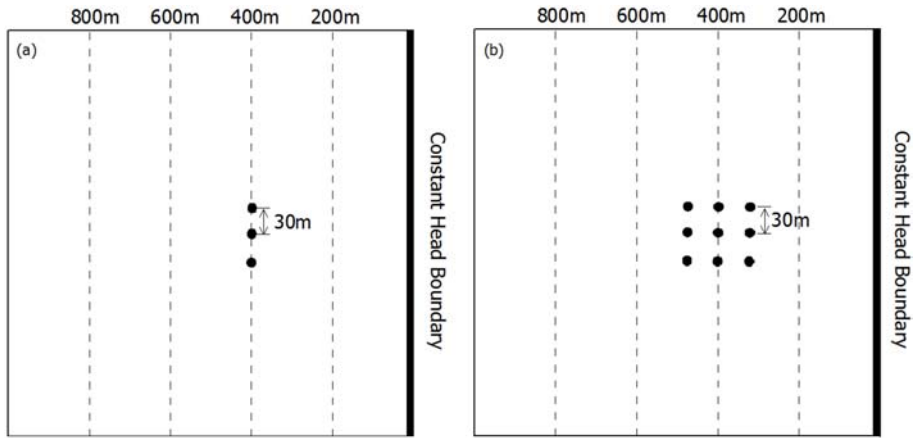


Fig. 4. Location of pumping wells: (a) linear arrangement, (b) clustered arrangement.

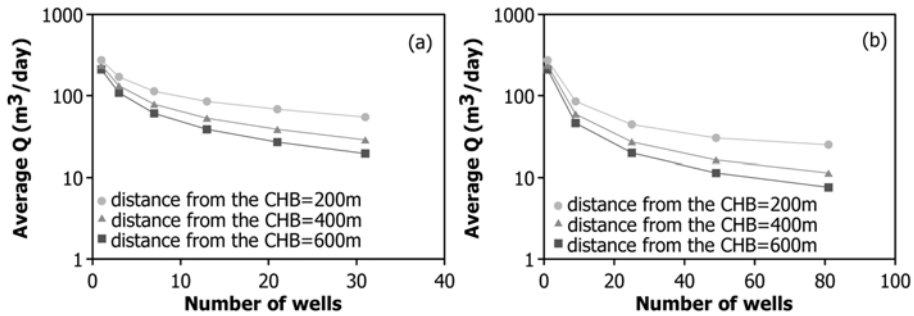


Fig. 5. Effects of the number of wells, their arrangement and the distance from the constant head boundary on the average pumping rate: (a) linear arrangement and (b) clustered arrangement.

시 하천으로 배출되는 물의 양이 감소하기 때문으로, 함양의 유무에 따른 양수량의 차이가 커지는 것으로 판단된다.

#### 우물 배열 및 우물 개수에 따른 개발가능량 변화

지금까지 1개의 우물을 설치하였을 경우 개발가능량에 영향을 주는 수리인자들을 살펴보았다. 하지만 실제 현장에서는 동일한 지역에 여러 개의 우물을 설치하여 동시에 지하수를 채수하는 경우가 많으며, 이러한 경우 개개 우물에 의해 생긴 수위강하구역이 서로 중복되어 간섭현상을 일으키므로 한 개 우물 채수 시 발생했던 수위강하보다 훨씬 큰 수위강하가 발생한다(Han, 2000). 따라서 우물 배열 및 우물 개수에 따른 개발가능량 변화를 살펴보기 위하여 2개의 서로 다른 배열의 모델을 비교하였다.

Fig. 4는 우물 배열을 보여주는 그림으로, 우물은 하천으로부터 400 m 떨어진 지점을 중심으로 선형 배열과

군집형 배열로 각각 설치하여 살펴보았다. Fig. 4a는 선형 배열로 우물을 하천에 평행하게 위치시킨 경우이며, Fig. 4b는 군집형 배열로 정방형으로 우물 개수를 증가시킨 경우이다. 이때 우물 간 거리( $d_w$ )는 30 m로 설정하였다.

Fig. 5는 우물 배열 및 우물 개수에 따른 공당 평균 양수량의 변화를 나타낸 그림이다. 두 배열 모두 하천에서 멀어질수록 하천수 유입에 의한 영향이 감소하여 평균 양수량도 감소하였다. 또한 하천으로부터의 거리에 관계없이 우물 개수가 증가할수록 우물 간 간섭효과에 의해 평균 양수량은 감소하였다.

한편, 우물 배열에 따른 양수량 변화를 비교하기 위하여 우물 개수를 9개로 동일하게 설정하고 선형 배열과 군집형 배열로 각각 설치하여 공당 평균 양수량을 살펴보았다. Fig. 6은 우물 배열에 따른 공당 평균 양수량의 변화를 보여주는 그림이다. 두 배열 모두 하천에서 멀어질수록 경계효과에 의해 양수량과 그 변화량이 감

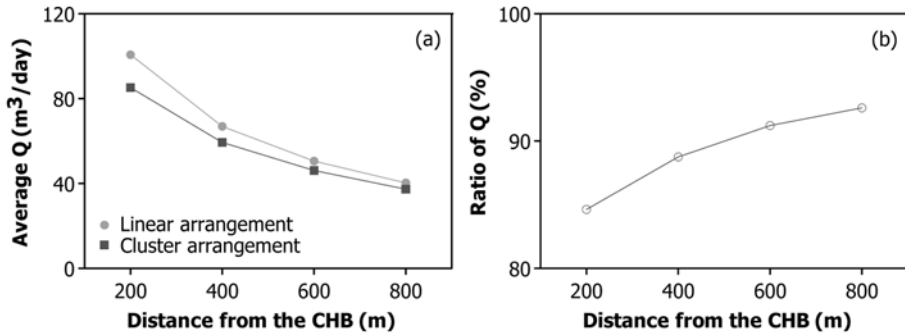


Fig. 6. Effects of well arrangement on the average pumping rate: (a) change in pumping rate, and (b) ratio of the average pumping rate of the linear arrangement to that of the clustered arrangement.

Table 2. Effect of well arrangement on the average pumping rate in the case of nine wells.

Distance from the CHB (m)		200	400	600	800
Q (m³/day)	Linear arrangement (a)	100.6	66.9	50.5	40.3
	Clustered arrangement (b)	85.2	59.3	46.1	37.3
Ratio (%) (b/a)		85	89	91	93

소하였으며, 하천으로부터의 거리에 관계없이 선형 배열이 군집형 배열보다 평균 양수량이 많았다. 이는 우물이 모여 있는 형태의 군집형 배열이 일렬로 설치된 선형 배열보다 우물 간 간섭효과가 크게 발생하여 양수량이 감소한 것으로 분석되었다(Fig. 6a).

우물 배열에 따른 양수량 변화를 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 두 배열의 양수량 비율을 계산하였다(Table 2). 그 결과, 우물이 하천에서 멀어질수록 두 배열 간 양수량 비율은 증가하였다(Fig. 6b). 이는 우물 배열의 영향으로 두 배열의 양수량 차이가 하천에 가까울수록 크다는 것을 의미한다. 선형 배열의 경우, 하천과 평행하게 우물이 설치되기 때문에 하천으로부터의 거리에 관계없이 하천의 넓은 범위에서 양수의 영향을 받게 되어 우물 간 간섭효과가 작아진다. 하지만 군집형 배열의 경우, 하천에 가까울수록 양수에 의해 영향을 받는 하천의 범위가 좁아져서 간섭효과가 커지기 때문에 하천으로부터 대수층으로 유입되는 물의 양 또한 적어지게 된다. 또한 우물이 모여 있는 형태의 군집형 배열이 선형 배열보다 우물 간 간섭효과가 크기 때문에, 두 배열의 양수량 차이는 하천에 가까울수록 큰 것으로 분석되었다.

**우물 간 간섭효과 및 경계효과**

앞서 우물 배열의 영향을 통해 살펴본 바와 같이 우물 간섭은 취수정의 지하수 개발가능량에 많은 영향을 준다. 따라서 우물 간섭효과를 더 자세히 살펴보기 위하

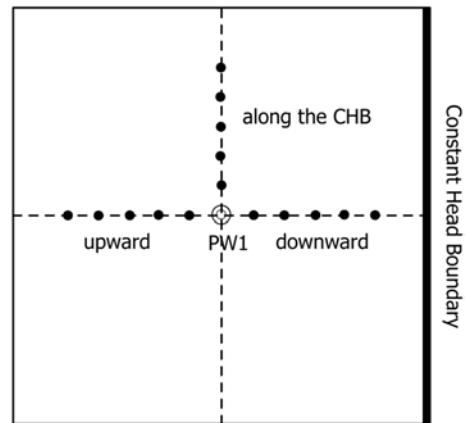


Fig. 7. Locating a new pumping well near an existing pumping well (PW1).

여 다른 수리인자는 고정시킨 채 Fig. 7과 같이 가운데 우물 하나를 설치하고 하천에 평행한 방향(along the CHB), 하천의 상류방향(upward)과 하류방향(downward)으로 각각 하나의 우물을 더 설치하여 거리를 임의로 늘려가며 가운데 우물(PW1)의 양수량 변화를 살펴보았다.

Fig. 8은 우물 간 간섭효과 및 경계효과에 의한 가운데 우물의 양수량 변화를 보여주는 그림이다. 우물 간격이 100 m 이하일 경우, 방향에 관계없이 우물 간격이 커질수록 간섭효과가 작아져서 가운데 우물의 양수량이 일정하게 증가하였다. 반면 우물 간격이 100 m 이상일

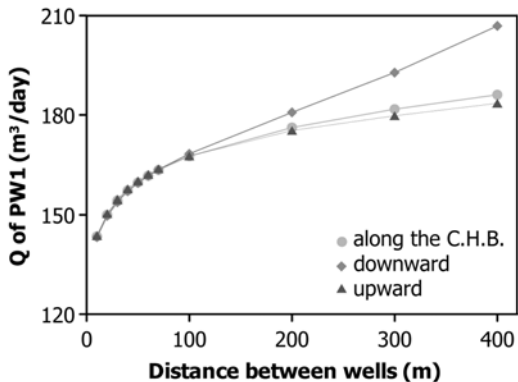


Fig. 8. Effects of well interference and the constant head boundary on the pumping rate.

경우, 우물 간섭에 의한 영향은 작아지고 경계의 영향이 나타나 우물의 이동 방향에 따라 가운데 우물의 양수량 변화에 차이가 나타났다. 즉, 하천 쪽으로 하나의 우물을 이동시키는 경우 우물이 하천에 가까워질수록 하천으로부터 물이 유입되어 다른 두 방향에 비해 양수량이 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 우물을 하천 반대방향으로 이동시키는 경우 하천의 영향이 감소하여 양수량도 감소하였다.

#### 담금질 모사 기법을 이용한 복수 주입정 최적 위치 평가

취수정의 지하수 개발가능량 영향인자들을 고려한 최적의 주입정 위치를 평가하기 위하여 위의 개념모델을 바탕으로 구경이 200 mm인 양수정을 설치하였으며, 주입정을 설치하기 전 양수량의 50%를 재주입하는 모델을 개발하였다. 하천으로부터 우물까지의 거리는 취수정의 지하수 개발가능량에 영향을 주었지만, 최적의 주입정 위치 평가에는 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 따라서 우물을 하천으로부터 400 m 떨어진 지점을 중심으로 균집형 배열과 선형 배열로 각각 설치하여 살펴보았으며, 선형 배열의 경우 하천에 평행한 방향과 수직인 방향 두 가지 경우를 살펴보았다(Fig. 4).

#### 입력변수 민감도 분석

복수 주입정의 최적의 위치를 평가하기 위하여 담금질모사 기법을 적용하기 위해서는 먼저 초기온도(T) 및 온도 감소율( $\Delta T$ ), 각 온도에서의 최대교란수(NO)를 구해야 한다. 이때 초기온도는 비교적 큰 값을 사용하여  $p(\Delta E)$ 의 값을 1에 가까운 값이 되도록 하여, 초기에는 많은 교란을 허용하여 다양한 해를 모색하고 시뮬레이

션이 진행될수록 점차로 유리한 방향의 해만 수용하여 광역적 최솟값에 수렴하게 한다(Choi, 2007).

따라서 담금질모사 기법을 적용하기에 앞서 본 연구에 적합한 변수들을 알아보기 위하여 초기온도, 온도 감소율, 각 온도에서의 최대교란수를 변화시켰을 때의 목적함수의 변화를 살펴보았다. 하천으로부터 400 m 떨어진 지점에 25개의 우물이 균집형 배열로 설치되어 있을 때, 2개의 주입정을 설치하는 경우를 살펴보았다. 우물 간 거리는 30 m로 설정하였으며, 주입정을 설치하기 전 총 양수량의 25%를 각각의 주입정에 주입하였다. 또한 변화시키는 변수를 제외한 나머지 값들은 일정하게 고정시켜 하나의 변수의 영향만을 살펴보았다.

Fig. 9와 Fig. 10은 담금질 모사 기법을 이용하여 최적의 복수 주입정 위치를 결정할 때 입력변수의 민감도 분석 결과를 보여주는 그림이다. 그 결과, 최적화 과정에 사용되는 난수들과 초기온도가 값이 수렴하는데 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 반면, 온도 감소율과 각 온도에서의 최대교란수는 상대적으로 영향을 적게 주는 것으로 나타났다. 먼저 회수율의 최대화를 목적함수로 설정하였을 경우, 초기온도는 0.5~1°C 사이가 적합한 것으로 분석되었다(Fig. 9a). 양수량 변화량의 변동 계수를 최소화하는 것을 목적함수로 설정하였을 경우의 초기온도는 0.005~0.01°C, 통합목적함수의 최소화를 목적함수로 설정하였을 경우의 초기온도는 10<sup>-6</sup>~10<sup>-5</sup>°C 사이가 적합한 것으로 분석되었다(Fig. 10). 하지만 이 값들은  $p(\Delta E)$ 의 값이 1에 가까운 값이 되게 하는 비교적 큰 값이 아니다. 이는 본 연구의 경우 지역적 최댓값 및 최솟값(local maximum or local minimum)과 광역적 최댓값 및 최솟값(global maximum or global minimum)의 차이가 크지 않기 때문이다. 따라서 담금질모사 기법을 통해 최적의 주입정 위치를 평가하는 경우, 초기온도로 비교적 작은 값을 주는 것이 오히려 원하는 기준에 더 빨리 수렴하는 것으로 분석되었으며, 초기온도는 우물 배열 및 우물 개수에 따라 차이가 있는 것으로 분석되었다.

반면, 온도 감소율은 일반적으로 0.8~0.95의 값을 사용하지(Choi, 2007), 최적의 주입정 위치를 평가하는 문제의 경우 큰 값을 주어 온도를 조금씩 변화시키면 원하는 기준에 늦게 수렴하여 0.7 이하가 적합한 것으로 분석되었다(Fig. 9b). 각 온도에서의 최대교란수는 민감도 분석 결과 3~5가 적합한 것으로 분석되었으며(Fig. 9c), 온도 감소율과 각 온도에서의 최대교란수는 상호보완적인 결과를 보였다.



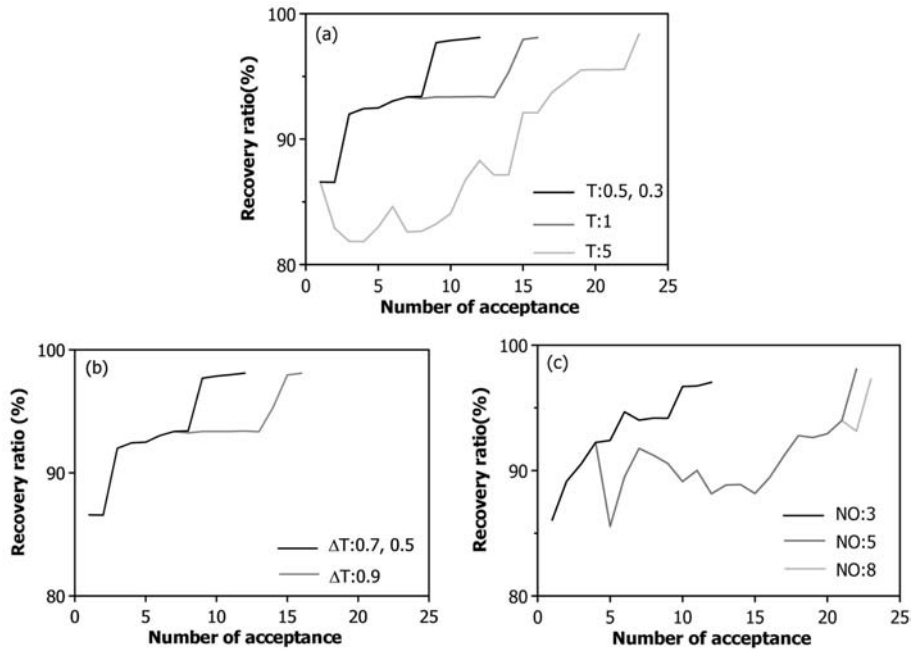


Fig. 9. Sensitivity analysis of simulated annealing for the objective function of maximizing the recovery rates: (a) temperature, (b) temperature reduction and (c) the number of repetitions.

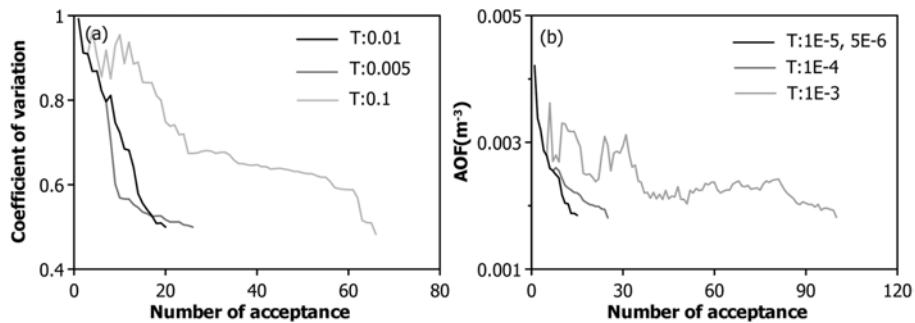


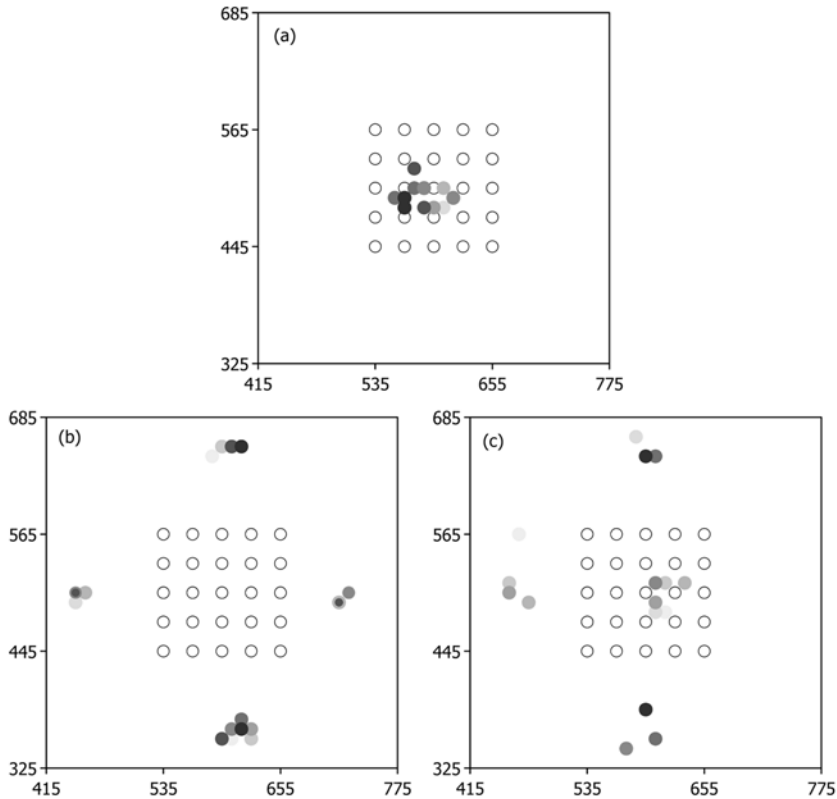
Fig. 10. Sensitivity analysis of simulated annealing for objective functions: (a) minimizing the coefficient of variation and (b) minimizing the aggregate objective function.

### 담금질모사 기법 적용 결과

이와 같이 구해진 초기온도, 온도 감소율, 각 온도에서의 최대교란수를 사용하여 최적의 주입정 위치를 살펴보았다. Fig. 11은 세 개의 목적함수를 만족시키는 2개의 주입정 위치를 보여주는 그림이다. 먼저 회수율을 최대화시키는 2개의 주입정 위치를 살펴보기 위하여 목적함수의 목표 값을 98%로 설정하고 담금질모사 기법을 적용하였다. 초기 주입정 위치는 우물 군집의 상류 또는 하류의 2개 지점으로 설정하거나 상, 하류에 각각 1개 지점에 임의로 설정하여 최적화를 수행하였다. 그

결과, 2개의 주입정이 모두 우물 군집 내부의 상류지점에 위치할 때 높은 회수율을 보였다. 이는 주입정이 우물 군집 내부에 있을 때 주입된 물이 주변 우물로 모두 회수되기 때문인 것으로 분석되었다. 또한 주입정이 우물 군집 내부의 중앙이 아닌 약간 상류지점에 위치하는 것은 지하수가 동쪽에 위치한 하천으로 배출되기 때문에 주입정이 우물 군집 내부의 상류지점에 위치할 때 주입된 물이 기존 양수정으로 더 많이 회수되는 것으로 분석되었다(Fig. 11a).

다음으로 2개의 주입정을 설치하였을 때 기존 양수정



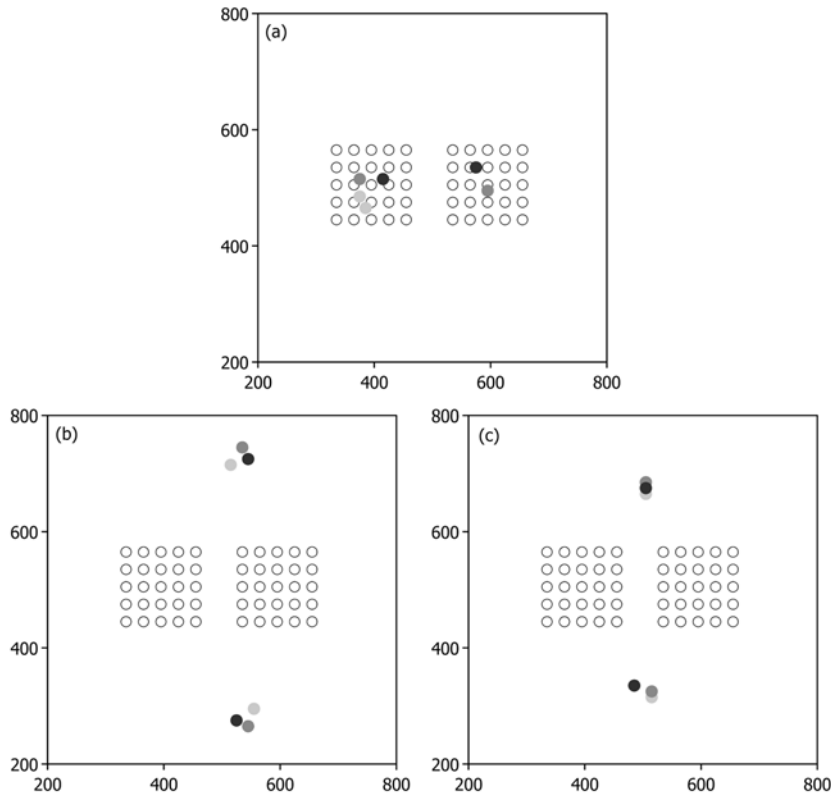
**Fig. 11.** Results of simulated annealing showing the optimal locations of two injection wells (filled circles) for the objective functions: (a) maximizing the recovery rates, (b) minimizing the coefficient of variation and (c) minimizing the aggregate objective function.

의 양수량을 가장 고르게 증가시키는 주입정의 위치를 살펴보기 위하여, 양수량 변화량의 변동계수를 목적함수로 설정하였다. 이때 목적함수의 목표 값은 주입정이 1개일 경우의 결과 값(Lee et al., 2014)을 고려하여 수행한 시행착오법을 통해 구하였으며, 이때 값은 0.5로 설정하였다. 담글질모사 기법을 적용한 결과, 주입정이 상, 하류지점에 1개씩 또는 우물 군집 양측면부에 1개씩 위치할 때 변동계수가 작은 값을 보였다. 즉, 주입정이 우물 군집을 중심으로 서로 반대방향에 위치할 때 모든 우물의 양수량을 가장 고르게 증가시키는 것으로 나타났다(Fig. 11b).

마지막으로 통합목적함수를 목적함수로 설정하였을 경우의 주입정 위치를 살펴보았다. 통합목적함수의 경우도 변동계수의 경우와 마찬가지로 시행 착오법을 사용하여 목적함수의 목표 값을 결정하였으며, 그 값은 0.0018이다. 회수량과 기존 양수정의 양수량을 고르게 증가시키는 정도를 통합하여 보여주는 통합목적함수를

목적함수로 설정하였을 경우, 주입정이 우물 군집 양측면부에 1개씩 위치할 때 목적함수가 기준 값에 수렴했다. 즉, 이 위치에 주입정을 설치할 경우 회수율도 높일 뿐만 아니라 모든 우물의 양수량을 고르게 증가시키는 것으로 나타났다. 또한 주입정이 우물 군집 내, 외부에 각각 1개씩 위치할 때도 통합목적함수는 기준 값에 수렴했다. 이때 우물 군집 내부에 설치된 주입정은 회수율을 크게 증가시키며, 외부에 설치된 주입정은 모든 우물의 양수량을 고르게 증가시키는 것으로 분석되었다. 우물 군집 내부에 위치한 주입정은 회수율을 목적함수로 설정하였을 경우와 다르게 약간 하류지점에 위치하였는데, 이는 상류지점에 위치한 우물들은 우물 군집 외부에 설치된 주입정의 영향을 받기 때문에 우물 군집 내부에 위치한 주입정이 내부 하류지점에 위치하여야 모든 우물의 양수량을 고르게 증가시키는 것으로 판단된다(Fig. 11c).

세 개의 목적함수를 각각 만족시키는 2개의 주입정



**Fig. 12.** Results of simulated annealing showing the optimal locations of two injection wells (filled circles) for the objective functions: (a) maximizing the recovery rates, (b) minimizing the coefficient of variation and (c) minimizing the aggregate objective function.

위치는 주입정이 1개일 때의 결과와 상응하는 결과를 보였다(Lee et al., 2014). 앞서 언급한 바와 같이 본 연구의 경우 지역적 최댓값 및 최솟값과 광역적 최댓값 및 최솟값의 차이가 크지 않다. 그 결과 특정한 2개의 주입정 위치가 정해지지 않고, 최적에 가까운 다수의 지역적 값이 존재하여 목표 값에 수렴하는 최적의 주입정 위치가 다수 존재하였다. 따라서 담금질모사 기법에 의해 선정된 2개의 주입정 위치들은 목적함수를 만족시키는 최적의 결과라고 판단되며, 이는 현장의 조건에 따라 주입정의 위치를 조정할 수 있어 이점이 될 수 있다.

앞서 살펴본 담금질모사 기법의 결과의 타당성을 살펴보기 위하여 2개의 우물 군집에 최적화 기법을 적용하여 결과를 살펴보았다. 2개의 우물 군집은 모델영역의 가운데 지점을 기준으로 100 m 떨어진 상, 하류지점을 중심으로 각각 25개의 우물을 군집형 배열로 설치하였으며, 우물 간 거리는 30 m로 설정하였다. 최적화 기법 적용에 대한 결과는 Fig. 12과 Table 3와 같다. 먼

저 회수율이 99%가 되는 주입정 위치를 살펴본 결과, 2개의 주입정이 각각의 우물 군집 내부에 하나씩 설치되거나 상류의 우물 군집 내부에 모두 설치될 때 목적함수가 기준 값에 수렴하였다. 이는 1개의 우물 군집에 최적화 기법을 적용한 결과와 상응하는 결과를 보였다. 하천으로 배출되는 지하수 흐름을 고려하면 상류의 우물 군집 내부에 2개의 주입정을 모두 설치하여도 2개의 우물 군집에 모두 영향을 주기 때문에 회수율이 높게 나타나는 것으로 분석되었다(Fig. 12a).

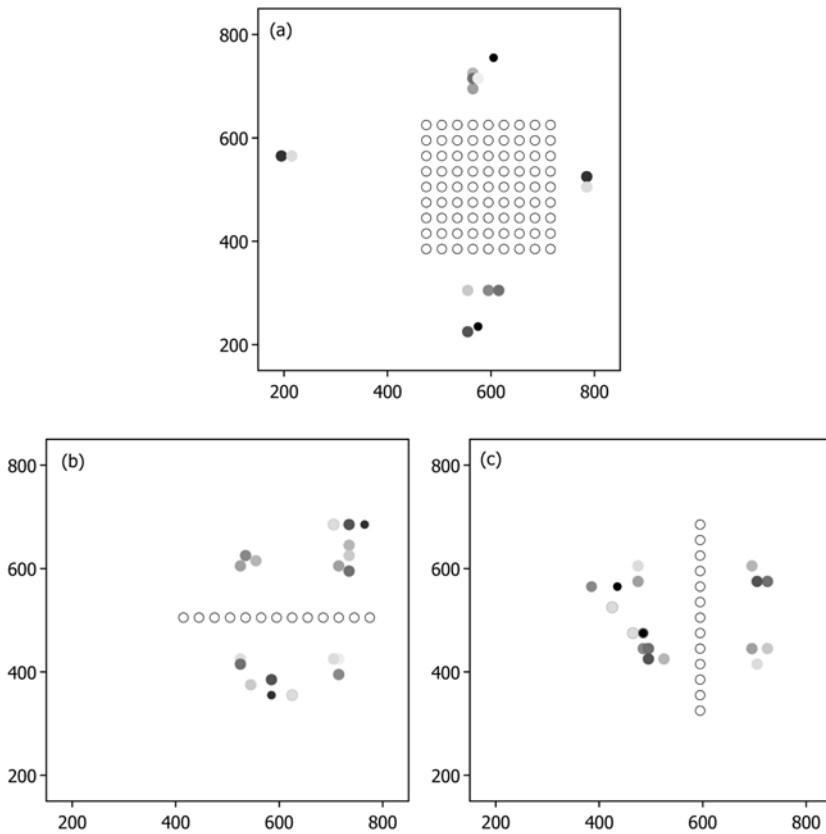
양수량 변화량의 변동계수를 목적함수로 설정하였을 경우, 2개의 우물 군집의 중앙부의 양측면부에 주입정을 설치하는 것이 적합한 것으로 나타났다. 이때 주입정은 우물 군집으로부터 어느 정도 떨어져야 모든 우물에 고르게 영향을 주는 것으로 분석되었다(Fig. 12b).

통합목적함수를 고려하였을 경우 최적의 주입정 위치를 살펴본 결과, 변동계수를 목적함수로 설정하였을 경우와 마찬가지로 2개의 우물 군집 중앙부의 양측면부에

**Table 3.** Results of simulated annealing for two clusters of pumping wells.

Objective function		Acceptance No.	Reject No.	Recovery rates	CV*	AOF**
Recovery rates (%)	99	11	5	99	1.777	0.00498
	99	12	16	99	1.188	0.00333
	99	19	20	99	1.226	0.00344
CV	0.54	118	137	77	0.54	0.00195
	0.54	80	43	74	0.539	0.00203
	0.54	99	57	75	0.537	0.00198
AOF (m <sup>-3</sup> )	0.0019	171	103	82	0.559	0.00189
	0.0019	141	35	82	0.555	0.00189
	0.0019	147	55	84	0.57	0.0019

CV\* = Coefficient of variation  
 AOF\*\* = Aggregate objective function



**Fig. 13.** Results of simulated annealing showing the optimal locations of two injection wells (filled circles) for the aggregate objective function: (a) clustered arrangement, (b) linear arrangement perpendicular to the river, and (c) linear arrangement parallel to the river.

주입정을 설치하는 것이 적합한 것으로 나타났다. 하지만 변동계수를 목적함수로 설정하였을 때보다 주입정이 우물 군집에 좀 더 가깝게 위치해야 효율적인 것으로

나타났다. 이는 각각의 주입정이 2개의 우물 군집 중앙부의 양측면부에 위치해야 모든 우물의 양수량을 고르게 증가시키는 반면, 우물 군집과 일정 거리 이하에 위치해

야 회수율도 증가시키는 것으로 분석되었다(Fig. 12c).

이와 같은 결과는 복수의 주입정 위치를 평가하는데 담금질모사 기법이 적절히 사용될 수 있음을 보여줄 뿐만 아니라 본 연구에서 제시한 통합목적함수가 최적의 주입정 위치를 평가하는데 적합함을 보여준다. 즉, 통합목적함수를 목적함수로 설정하여 최적화 기법을 적용하였을 때, 변동계수는 변동계수만을 고려하였을 경우와 유사한 값을 보였으며, 회수율은 회수율만을 고려하였을 경우보다는 약간 감소하였지만 비교적 높은 값을 보였다(Table 3).

따라서 다른 우물 배열 및 우물 개수에 위 방법을 적용하여 통합목적함수를 목적함수로 설정하였을 경우의 최적의 주입정 위치를 살펴보았다(Fig. 13). 먼저 우물을 하천으로부터 400 m 떨어진 지점을 중심으로 군집형 배열로 설치하였을 경우 우물 개수를 81개로 증가시켜 살펴보았다. 우물 개수를 제외한 나머지 기본 설정은 25개 우물을 군집형 배열로 설치하였을 때와 동일하게 하였다. 우물이 증가하여 우물 군집의 크기가 주입정의 영향범위보다 커지게 되면, 주입정을 우물 군집 내부보다는 외부에 설치하는 것이 회수율을 증가시킬 뿐만 아니라 모든 우물에 고르게 영향을 주는 것으로 나타났다(Fig. 13a). 만약 주입정을 우물 군집 내, 외부에 각각 1개씩 설치하면, 내부에 위치한 주입정으로 주입된 물이 모두 회수되어 회수율은 높아질 것이다. 하지만 주입정 부근의 몇몇 우물에만 영향을 주게 되어 변동계수도 높아져 결국 통합목적함수의 값은 증가하게 된다.

반면, 우물이 선형 배열로 설치되어 있을 경우, 배열 방향에 관계없이 주입정을 우물 배열 양측면부에 각각 1개씩 설치할 때 통합목적함수는 작은 값을 보였다. 이는 상, 하류지점에 관계없이 주입정이 우물 배열의 양측면부에 위치하여야 회수율도 높이고 모든 우물의 양수량을 고르게 증가시키는 것으로 분석되었다(Fig. 13b, c). 또한 복수 주입정을 설치할 경우 우물 배열을 기준으로 서로 반대방향에 설치하여야 회수율을 높일 수 있는 것으로 분석되었다.

## 결 론

지하수 모델링 및 담금질모사 기법을 이용하여 인공함양 시 양수량을 최대로 하고 기존 양수정의 양수량을 고르게 증가시키는 최적의 복수 주입정 위치를 살펴보았다. 이를 위해 주입정 위치에 따른 기존 양수정의 양수량 변화를 수치 모의하는 FORTRAN 프로그램을 개

발하여 분석을 실시하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 취수정의 지하수 개발가능량에 영향을 주는 인자들에 대해 살펴본 결과, 취수정의 지하수 개발가능량은 인공함양 시스템의 효율성에 많은 영향을 주는 것으로 확인되었다. 특히 우물 배열의 경우, 군집형 배열보다 선형 배열이 하천의 넓은 범위에서 양수의 영향을 받기 때문에 우물 간 간섭효과가 작아지는 것으로 나타났다. 따라서 우물을 하천에 평행한 선형 배열로 설치하는 것이 취수정의 지하수 개발가능량을 증가시키는 것으로 나타났다으며, 대수층의 수리전도도가 좋고, 함양량이 큰 지역에서 양수할 경우 지하수 개발가능량이 증가하는 것으로 나타났다.

2) 담금질모사 기법을 통해 통합목적함수를 최소화 시키는 복수 주입정의 위치를 살펴보았다. 그 결과, 최적화 기법을 통해 구해진 2개의 주입정 위치는 모든 우물의 양수량을 고르게 증가시킬 뿐만 아니라 회수율도 증가시키는 것으로 나타났다. 따라서 최적의 복수 주입정 위치 선정 시 담금질모사 기법이 적용 가능할 뿐만 아니라 본 연구에서 제시한 통합목적함수가 최적의 주입정 위치를 평가하는데 적합한 것으로 확인되었다.

3) 최적의 복수 주입정 위치를 평가하기 위한 담금질모사 기법 적용 결과, 회수율만을 고려하여 주입정을 설치할 경우, 우물 배열에 관계없이 우물 군집 내부에 주입정을 모두 설치하는 것이 가장 효율적인 것으로 나타났다. 통합목적함수를 고려하여 2개의 주입정을 설치할 경우, 우물 배열에 관계없이 우물 배열의 양측면부가 주입정 위치로 적합한 것으로 분석되었다. 또한 군집형 배열의 경우, 우물 개수가 적을 때는 우물 군집 내, 외부에 주입정을 1개씩 설치하는 것이 적합한 것으로 나타났으며, 우물 개수가 증가하면 우물 군집 내부보다는 외부에 주입정을 설치하는 것이 모든 우물의 양수량을 고르게 증가시키는 것으로 나타나 우물 군집 외부 상, 하류지점에 주입정을 1개씩 설치하는 것이 효율적인 것으로 나타났다.

4) 최적의 주입정 위치를 평가하는 문제의 경우, 최적에 가까운 다수의 지역적 최솟값 및 최댓값이 존재하여 현장의 조건에 따라 주입정의 위치를 조정할 수 있는 것으로 판단된다. 또한 모델링 결과는 지하수를 과도하게 개발하는 지역에 수자원 확보를 위한 인공함양 기법 적용 시 최적의 주입정 위치를 평가하는데 기초자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리연구사업(11기술혁신C05)에 의한 ‘수변지하수활용고도화’ 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- Ayvaz, M. T. and Karahan, H., 2008, A simulation/optimization model for the identification of unknown groundwater well locations and pumping rates, *Journal of Hydrology*, 357(1-2), 76-92.
- Banerjee, P. and Singh, V. S., 2011, Optimization of pumping rate and recharge through numerical modeling with special reference to small coral island aquifer, *Physics and Chemistry of the Earth*, 36(16), 1363-1372.
- Bouwer, H., 2002, Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering, *Hydrogeology Journal*, 10, 121-142.
- Cha, K., Cheong, T. S., and Ko, I., 2007, Validation of the surface-ground waters interaction and water supplying to upper region of Geum River basin by optimal method for drought season, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 27(5), 507-513 (in Korean with English abstract).
- Choi, J. G., 2007, *Statistics for earth*, Sigmappress, 436p (in Korean).
- 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*, 2902-2905 (in Korean).
- Goffe, W. L., Ferrier, G. D., and Rogers, J., 1994, Global optimization of statistical functions with simulated annealing, *Journal of Econometrics*, 60(1-2), 65-99.
- Han, J. S., 2000, *Groundwater environment and contamination*, Pakyoungsa, 1071p.
- Hong, S. H., Han, S. Y., and Park, N. S., 2003, Assessment of potential groundwater development in coastal area, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 23(3B), 201-207 (in Korean with English abstract).
- Hyun, Y., Ko, N. Y., Lee, K. K., and Yang, J. H., 2011, Optimal design of contaminated groundwater control in groundwater dependent ecosystems, *Journal of the Geological Society of Korea*, 47(3), 299-308 (in Korean with English abstract).
- Kim, J. T., Kim, G. B., Chung, I. M., and Jeong, G. C., 2014, Analysis of flow duration and estimation of increased groundwater quantity due to groundwater dam construction, *The Journal of Engineering Geology*, 24(1), 91-99 (in Korean with English abstract).
- Kim, J. T., Kim, M. I., Chung, I. M., Kim, N. W., and Jeong, G. C., 2009, An analysis of groundwater level fluctuation caused by construction of groundwater dam, *The Journal of Engineering Geology*, 19(2), 227-233 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y. and Kim, Y., 2009, Artificial recharge technology coping with the climate change, *Magazine of Korea Water Resources Association*, 42(5), 58-65 (in Korean).
- Kim, Y., Seo, J. A., and Ko, K., 2012, Trend and barrier in the patents of artificial recharge for securing groundwater, *The Journal of the Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 17(3), 59-75 (in Korean with English abstract).
- Lee, D. K., Park, J. H., Park, C. K., Yang, J. S., Nam, D. H., Kim, D. K., Jeong, G. C., Choi, Y. S., and Boo, S. A., 2004, Application of the artificial recharge to reduce the ground-water drawdown of the riverbank filtration, *The Journal of Engineering Geology*, 14(4), 391-400 (in Korean with English abstract).
- Lee, H., Koo, M. H., and Kim, Y., 2014, Determining optimal locations of an artificial recharge well using an optimization-coupled groundwater flow model, *The Journal of Soil and Groundwater Environment*, 19(3), 66-81 (in Korean with English abstract).
- Lee, S. Y. and Park, C. H., 2008, Multiobjective optimization using simulated annealing, *Annual Meeting of The Institute of Electronic Engineers of Korea*, 31(1), 651-652 (in Korean with English abstract).
- Li, C., Bahr, J. M., Reichard, E. G., Butler, J. J., and Remson, I., 1987, Optimal siting of artificial recharge: an analysis of objective functions, *Ground Water*, 25(2), 141-150.
- Mantoglou, A., Papantoniou, M., and Giannouloupoulos, P., 2004, Management of coastal aquifers based on nonlinear optimization and evolutionary algorithms, *Journal of Hydrology*, 297(1-4), 209-228.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H., and Teller, E., 1953, Equations of state calculations by fast computing machines, *The Journal of Chemical Physics*, 21(6), 1087-1092.
- Oh, S. H., Koo, M. H., and Kim, Y. C., 2010, Modeling the artificial recharge in reservoir of Hanchun drainage area, Jeju island in Korea, *The Korea Society of Engineering Geology Conference*, 351-352 (in Korean).
- Park, N., Hong, S. H., and Shim, M. G., 2003, Development of optimal pumping model for coastal region using Genetic Algorithms and parallel processing, *The Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 23(5B), 397-403 (in Korean with English abstract).
- Prickett, T. A., 1967, Designing pumped well characteristics into electrical analog models, *Ground Water*, 5(4), 38-46.
- Rye, D. W., 2005, Prediction of ground condition and evaluation of its uncertainty by simulated annealing, *The Journal of Korea Society for Rock Mechanics*, 15(4), 275-287 (in Korean with English abstract).
- Rye, D. W., Son, B. K., Song, W. K., and Joo, K. S., 2005, A study of probabilistic groundwater flow modeling considering the uncertainty of hydraulic conductivity, *Journal of Korea Society for Rock Mechanics*, 15(2), 145-156 (in Korean with English abstract).
- 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, 313 (in Korean).

Shim, S. B., Kim, Y. K., Kim, M. S., and Shim, K. C., 2001, Estimation of optimal parameter on WASP5/EUTRO5 model using Genetic algorithm, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 21(4B), 315-326 (in Korean with English abstract).

Thiem, G., 1906, Hydrologische methoden, J. M. Gebhardt, Leipzig, 56p.

**이현주**

공주대학교 지질환경과학과  
314-701 충남 공주시 공주대학로 56  
E-mail: hyun5359@naver.com

**구민호**

공주대학교 지질환경과학과  
314-701 충남 공주시 공주대학로 56  
Tel: 041-850-8515  
E-mail: koo@kongju.ac.kr

**김용철**

한국지질자원연구원  
305-350 대전광역시 유성구 과학로 124  
Tel: 042-868-3086  
E-mail: yckim@kigam.re.kr