

지하수 흐름특성 분석을 위한 동시 검색기반 파일럿 포인트 방법 적용 - 다양한 데이터 활용 기반

정 용*

Jung, Yong*

Subsurface Characterization using the Simultaneous Search based Pilot Point Method (SSBM) in Various Data Applications

ABSTRACT

Pilot Point Method (PPM) is one of the popular methods to search hydraulic conductivities in the inverse method using groundwater flow equations. In this study, the Simultaneous Search based Pilot Point Method (SSBM) was applied with diverse information (e.g. hydraulic heads and/or tracer concentration) applications over previously developed sensitivity based Pilot Point Method (e.g. D-optimality based Pilot Point Method: DBM). In the case of DBM, due to the minimized the variance size, tracer concentration can be recognized as a tool to control the searching space of hydraulic conductivities. SSBM reduced the procedure of hydraulic conductivity searching, though it produced more variance for exploring hydraulic conductivities. In addition, SSBM was dependent on the initial hydraulic conductivity values for search finalized hydraulic conductivities. When tracer concentration was applied, searching hydraulic conductivities was more preferable than only when hydraulic head was applied. Applications of various data for searching hydraulic conductivities is recommended as a more efficient way.

Key words : Simultaneous Search based Pilot Point Method (SSBM), Hydraulic conductivity, Hydraulic heads, Tracer concentration

초 록

지하수의 흐름의 특성에 가장 큰 영향을 미치는 투수계수 정보에 대한 탁월한 추정 방법으로 파일럿 포인트 방법(Pilot Point Method: PPM)이 있다. 이는 투수계수 정보를 비교적 풍부한 측정자료(e.g. 지하수 수두 정보)를 활용하여 얻어내는 역함수 방법의 하나이다. 본 연구는 지하수 수두 정보에 추적자 정보를 활용하여 기 개발된 민감도 분석을 활용한 파일럿 포인트 방법(D-optimality based Pilot Point Method: DBM)과 동시 검색기반 파일럿 포인트 방법(Simultaneous Search based Pilot Point Method: SSBM)의 활용성을 검증하였다. 그 결과 지하수 수두 정보만을 활용하는 것에 비해 추적자 정보를 활용하는 것이 SSBM이나 DBM 모두 투수계수를 찾는 편차를 축소시켰다. 이는 동일한 조건하에 추적자 농도 정보가 투수계수를 찾는 범위를 한정할 수 있음을 보이는 한 예라고 할 수 있다. SSBM의 경우 민감도 분석이 없어 투수계수를 찾는 절차는 감소시켰지만 DBM에 비해 투수계수를 찾는 편차가 늘어나는 경향을 보였으며 초기 투수계수의 값에 의해 투수계수를 찾는 데 영향을 받음을 보였다. 본 연구를 통해 동시 검색기반 파일럿 포인트 방법으로 지하수 수두와 추적자 농도를 활용하는 것이 투수계수를 추정하는 데 적합한 것으로 사료된다.

검색어 : 동시 검색기반 파일럿 포인트 방법, 투수계수, 지하수 수두, 추적자 농도

* 종신회원 · 교신저자 · 원광대학교 토목환경공학과, 조교수, 공학박사 (Corresponding Author · Wonkwang University · yong_jung@wku.ac.kr)

Received August 9, 2019/ revised August 22, 2019/ accepted August 27, 2019

1. 서론

지하수의 개발 및 환경 등의 문제를 해결하기 위해 지하수 흐름에 대한 분석은 필수적이다. 하지만, 지하수의 흐름의 특성을 좌우하는 투수계수 정보가 충분하지 않아 직접적인 측정 또는 간접적인 추정방법으로 투수계수 정보를 확보한다. 직접적인 측정 방법은 많은 경우 비용의 문제나 측정 여건의 어려움으로 실행에 어려움이 있어 지하수 흐름에 대한 정보를 얻기 위해서는 간접적인 방법으로 투수계수를 확보하려는 노력이 적극적으로 이루어지고 있다 (RamaRao et al., 1995; LaVenue et al., 1995; Klaas and Imteaz, 2017; Baalousha et al., 2019).

간접적인 투수계수 측정 방법의 하나인 파일럿 포인트 방법(Pilot point method: PPM)은 일정한 영역을 대표값으로 하는 Zonal Representation Method (ZRM)나 통계적 접근 방법을 활용한 Geostatistical Representation Method (GRM)와 함께 널리 사용된다. ZRM이나 GRM의 경우 투수계수와 지하수 수두 사이의 선형적인 관계를 가정하고 여러 개의 격자를 구분하여 각자의 격자를 동일한 투수계수로 하고 투수계수의 분포를 작은 범위로 한정하는 한계 때문에 이질적 투수계수를 확보하는데 어려움이 있다(Certes and de Marsily, 1991; Hendricks-Franssen, 2000; Fahs et al., 2014; Anderson et al., 2015; Rajabi et al., 2018). 이에 반해 PPM은 지하수 흐름에 대한 역함수 방법을 이용해 관심지역의 투수계수를 구한다. 또한, 투수계수 추정의 불확실성을 줄이고 이질적인 투수계수 분포를 찾아내는데 탁월하다(LaVenue et al., 1995; Doherty, 2003; Alcolea et al., 2006).

PPM의 불확실성을 더욱 감소시키기 위해 투수계수를 추정하는 단계에서 추정 범위를 축소하거나, 추정하는 투수계수의 급작스런 변화를 막는 등 투수계수의 타당성 확보를 위한 방법들이 활용되기도 한다(RamaRao et al., 1995; LaVenue et al., 1995; Gomez-Hernandez et al., 1997). Doherty(2003)와 Fienen et al.(2009)은 매개변수 정규화를 통해 불확실성을 축소하는 방법에 대해 설명하였으며 이를 활용해 Doherty(2019)는 매개변수 추정 프로그램인 PEST (parameter estimation and uncertainty analysis package)에 매개변수 정규화를 활용해 매개변수의 수를 축소하여 다양한 지하수 문제에 대해 불확실성을 감소시켰다. 또한, 불확실성을 줄이기 위한 방법으로 파일럿 포인트의 수와 위치에 관심을 갖는 연구들이 이루어지고 있다(Cooley, 2000). Jung et al.(2011)은 파일럿 포인트의 민감도를 이용해 포인트의 위치를 잡아 측정 투수계수의 공간통계학적 값을 유지하는 방법을 연구하였고 Klaas and Imteaz(2017)는 모델의 공간적인 구조를 분석하여 파일럿 포인트의 분포를 정하는 방법을 발표하였다. 투수계수의 불확실성에 대한 관심은 추정된 투수계수 분포 값으로 얻어낸 지하수 수두값

이 측정 지하수 수두에 근접하게 나타날 수 있지만 추정된 투수계수 분포가 실제 투수계수 분포와 전혀 다른 불확실성이 존재하기 때문이다. 이와 같은 불확실성을 줄이기 위해서 양질의 측정값을 보유하는 것이 바람직하며 측정 정보의 다변화가 투수계수 추정에 도움이 될 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 측정된 지하수 수두만을 가지고 투수계수를 추정하던 것에 더하여 측정된 추적자의 농도 정보를 이용해 투수계수를 구하고 최적의 파일럿 포인트를 찾는 방법의 간소화 방법에 대해 알아보았다. 이를 위해 기존의 투수계수를 찾는 방법과 비교분석하고 간소화 방법의 활용가능성과 추가 정보의 효용성을 제안하였다.

2. 동시 검색기반 파일럿 포인트 방법(Simultaneous Search based Pilot Point Method: SSBM)

파일럿 포인트 방법은 de Marsily et al.(1984)에 의해 소개되었으며 실행 순서를 선형 그래프로 간단하게 표현하면 Fig. 1과 같다. 첫째, 실제 존재하는 투수계수 분포(True K distribution)에서 세 개의 투수계수 측정값을 가지고 있다고 가정하고 이를 바탕으로 크리깅을 통해 투수계수 분포(Kriged K distribution)를 얻는다. 하지만, 크리깅을 통해 얻어진 투수계수 분포는 실제 투수계수 분포와 동일 하지 않으므로 투수계수 보정을 통해 실제 투수계수 분포에 가까운 투수계수를 확보한다. 이때 투수계수 보정을 하려고 선정하는 지점을 파일럿 포인트라고 하며 이는 측정된 투수계수의 값보다 많은 정보를 보유하고 있는 지하수 수두 값을 기준으로 지하수 흐름식을 통해 투수계수의 값을 보정한다. Fig. 1(b)에서는 선정된 파일럿 포인트에서 투수계수 보정을 통해 측정된 지하수 수두값에 추정된 지하수 수두값을 맞추며 최종적으로 파일럿 포인트에 얻어진 보정 투수계수의 값(Kp)이다. 이때 측정된 투수계수 값은 보정하지 않고 파일럿 포인트에서만 조정되는 투수계수의 값을 보여 주고 있다. 마지막으로 파일럿 포인트에서 얻어진 투수계수 값과 측정된 투수계수의 값을 조합하여 크리깅을 통해 최종의 투수계수 분포(Adjusted K distribution, Fig. 1(c))를 알아내는 것이다.

동시 검색기반 파일럿 포인트 방법(Simultaneous Search based Pilot Point Method: SSBM)은 글로벌 최적화 방법을 기반으로 하는 PPM 중 하나로(Jung et al., 2013), 일반적인 PPM과 차별되는 것은 파일럿 포인트를 먼저 찾고 선정된 지점의 파일럿 포인트의 투수계수 값의 변동을 찾아내는 것이 아니라 이를 동시에 실행하는 것이다. 이때 사용되는 기준은 측정된 지하수 수두값과 추정된 수두값의 차이 값이다. 따라서 SSBM은 파일럿 포인트를 선정하는데 필요한 민감도 분석과 같은 추가적인 추정을 하지 않기 때문에 투수계수를 찾는 과정이 간소화 되었다. SSBM의 최종 목적함수인 수두 값의 차이를 이용해 파일럿 포인트 선정과 동시에 투수계수의

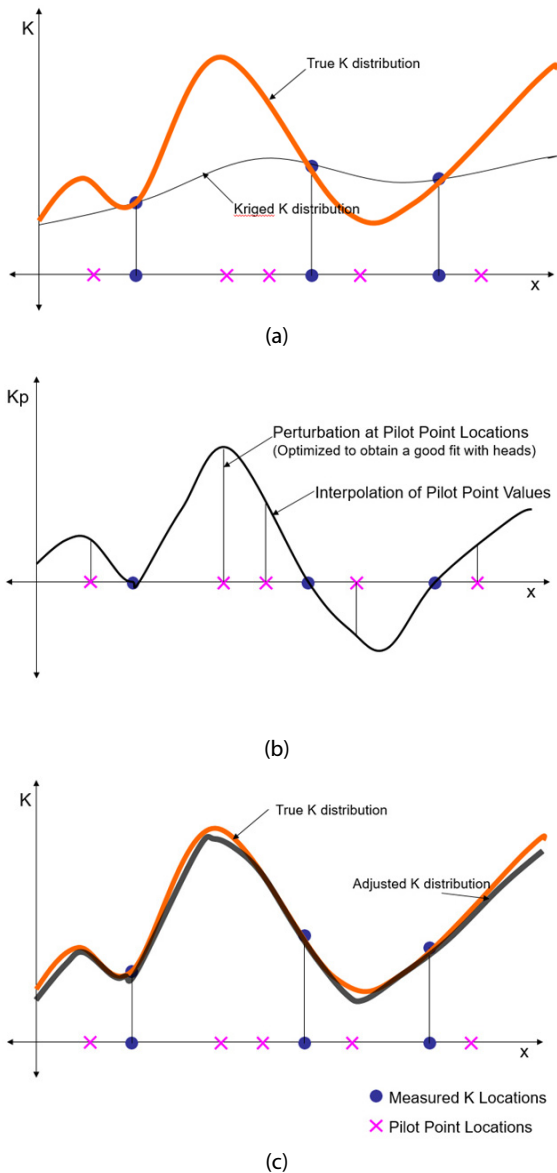


Fig. 1. Schematics of the Explanation of Pilot Point Method Developed by De Marsily et al.(1984)

값을 찾기 위해 글로벌 최적화 방법인 유전 알고리즘(Genetic Algorithm: GA)를 활용하였다. SSBM의 흐름도를 Fig. 2에 보여 주고 있다. 일반적인 PPM처럼 초기 투수계수 분포는 측정값을 기반으로 일반 크리깅(Ordinary Kriging)이 적용된 값이며 GA를 활용하여 파일럿 포인트와 선정된 파일럿 포인트에 적용되는 투수 계수값을 동시에 찾아 목적함수를 최소화 하였다.

SSBM의 목적함수는 obj_2로 이를 최소화 하는 파일럿 포인트와 선정된 파일럿 포인트의 투수계수 값을 얻어 실제로 존재하는 투수계수 분포(True K distribution)에 가장 가까운 투수계수 분포를 얻어내는 것이 최종 목적이다. 본 연구에서는 위의 SSBM의

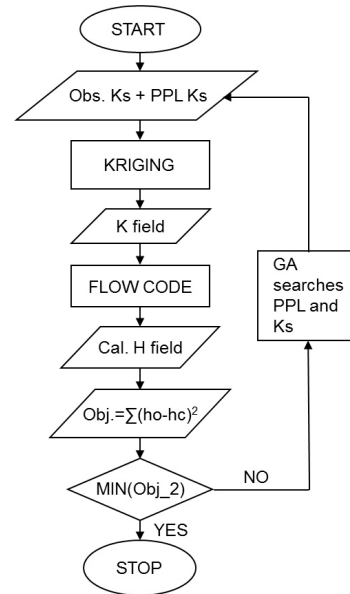


Fig. 2. Simultaneous Search based Pilot Point Method (Ks: K values, ho and hc: observed and calculated hydraulic heads)

일반적인 흐름에서 지하수 수두값 만을 고려하는 것이 아니라 화학적인 반응이 없는 추적자의 흐름에 의한 추적자 농도(tracer concentration)의 변화 또한 고려한 목적함수를 Eq. (1)과 같이 활용하였다.

$$\text{MINIMIZE } obj_2 \tag{1}$$

$$= W_a \sum_i \left(\frac{h_i^{obs} - h_i^{cal}}{h_i^{obs}} \right)^2 + W_b \sum_i \sum_t \left(\frac{C_{it}^{obs} - C_{it}^{cal}}{C_{it}^{obs}} \right)^2$$

여기서, $W_{a,orb}$: 가중계수(Weighting coefficient)

h^{obs}, C^{obs} : 측정 지하수수두와 추적자 농도(Observed hydraulic head and tracer concentration)

h^{cal}, C^{cal} : 추정 지하수수두와 추적자 농도(Calculated hydraulic head and tracer concentration)

다양한 데이터를 활용한 SSBM방법의 적용가능성 파악을 위해 Jung et al.(2011)이 개발한 D-optimality를 기반으로 하는 PPM (D-optimality based Pilot Point Method: DBM)을 적용하였다. DBM방법(Jung et al., 2011)은 기존의 PPM 방법처럼 두 개의 구분된 순서(파일럿 포인트 선정과 선정된 파일럿 포인트에서의 최적화된 투수계수 선정)를 가지고 있다. DBM방법에 적용된 D-optimality는 민감한 파일럿 포인트를 찾기 때문에 측정된 지하수 수두자료를 가장 잘 활용할 수 있으며 작은 투수계수 변화로 지하수 수두자료를 비교적 정확하게 추정할 수 있다. 또한 파일럿

포인트들끼리 상호 연관성이 가장 작은 곳을 선정하는 특성이 있다(Jung et al., 2011). 투수계수 검색의 범위를 줄이기 위해서 측정된 투수계수의 기하평균을 활용하였다(Eq. (2)). 만일 추정된 파일럿 포인트의 투수계수 값의 기하평균과 측정된 투수계수의 기하평균의 차가 측정된 투수계수의 기하평균의 값의 75 % 보다 크면 Eq. (2)와 같은 값을 주어 GA의 투수계수 검색 범위를 줄였다.

$$\begin{aligned} & \dots \\ & \text{if } \frac{|gm - gp|}{gm} > 0.75 \\ & \text{obj_2} = \text{obj_2} + \frac{|gm - gp|}{gm} \\ & \text{end} \\ & \dots \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, gm : 측정 투수계수의 기하평균(geometric mean of observed hydraulic conductivities)

gp : 추정 투수계수의 기하평균(geometric mean of calculated hydraulic conductivities)

3. 가상모형

3.1 투수계수 분포

가상모형을 이용하여 동시 검색기반 파일럿 포인트 방법(SSBM)에 대한 다양한 정보 활용성을 점검하였다. 가상모형은 2차원의 100 m X 100 m의 격자를 가지고 있는 700 m X 1000 m 면적의 직사각형 대지이다. 이 대지의 지하수 흐름은 좌에서 우로 진행하며 좌우 양측에 20 m와 15 m의 고정수위를 가지고 있다.

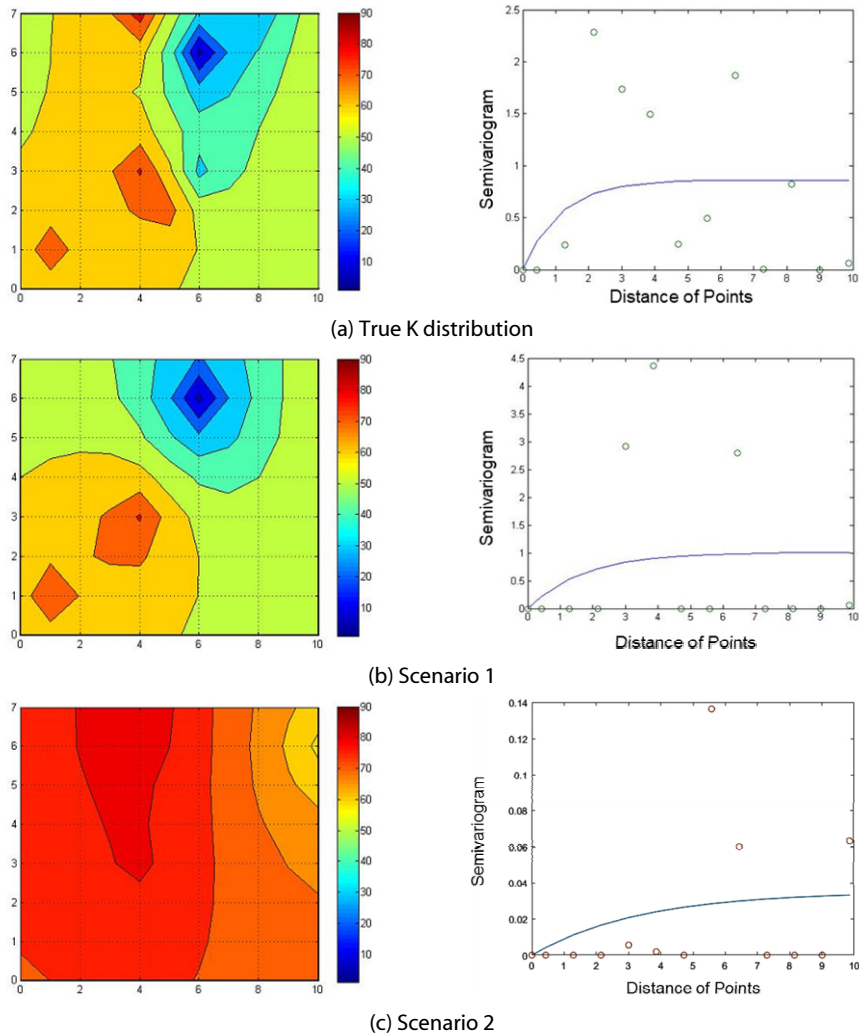


Fig. 3. Synthetic Groundwater Field: (a) True K Distribution and Semivariogram, (b) Scenario 1 and Semivariogram, and (c) Scenario 2 and Semivariogram

상하의 경계는 지하수가 흐르지 않는 것으로 가정 하였다. 지하수가 흐르는 대지의 특성은 등방성의 이질적인 투수계수를 가지며 지하수 상하 단면이 불투수층으로 갠힌 구조이다. 이 가상의 대지는 9개의 무작위로 선정한 위치에 무작위로 추출된 투수계수의 값을 크리깅을 통해 인위적으로 만들어 실제 투수계수 분포(True K distribution)라 하였다. 크리깅을 적용할때는 exponential semi-variogram 모형(Eq. (3))을 활용하였다. 크리깅은 고유정상성을 가정하며 이는 측정값의 평균이 모든 곳에서 동일하고 측정값의 차이는 거리에만 좌우된다는 것이다.

$$\gamma(h) = c_0 + c_1 \cdot (1 - e^{-3 \|h\|/a}) \quad (3)$$

여기서, c_1 : 쉘(sill: the maximum of semi-variogram of measured hydraulic conductivity)

a : 영향범위(range: the correlation distance of observations)

c_0 : 동일지점 측정값 미소 차이(micro scale variance of observations at the same point)

h : 두 지점의 간격(distance of two points)

실제 투수계수 분포를 Fig. 3(a)에 나타내었다. Figs. 3(b) and 3(c)는 실제 투수계수에서 임의의 점 4곳에서 투수계수를 추출하여 측정 투수계수로 선정하고 이를 기반으로 크리깅을 실시하여 얻은 투수계수 분포이다. Fig. 3(b)는 실제의 투수계수의 분포와 유사한 분포를 지니며 Fig. 3(c)는 실제 투수계수 분포와 상이함을 보인다. Semi-variogram의 경우 Fig. 3(b)는 sill 값이 크게 변화가 없는 것으로 나타나지만 Fig. 3(c)는 sill 값이 작게 나타나며 이는 각각의 투수계수의 값의 공간적 상관성이 작다는 것을 보인다. 영향범위인 range의 경우는 Fig. 3(c)의 경우 더욱 긴 값을 갖는 것으로 보인다.

본 연구에서는 Figs. 3(b) and 3(c)을 각각 시나리오 1과 2로 구분하였다.

3.2 추적자 분포

2차원의 가상 지하수 흐름의 경계조건을 기반으로 하는 지하수 흐름을 오염물질 운송에 대한 이류항을 활용하여 추적자를 순간적으로 주입하여 분포시켰다. 추적자의 농도 모의는 종과 횡분산계수를 100과 10으로, 분자분산계수는 0.01로, 지연계수는 1로, 주입하는 추적자 농도는 200 ppm으로, 주입기간은 2일로 고정하였다. 추적자의 농도는 400일 동안 측정하는 것으로 하였으며 20일, 100일의 추적자 농도 등고선 지도(Tracer concentration contour maps)를 Fig. 4에 나타내었다.

3.3 수치비교

SSBM이나 DBM의 경우 최적화된 투수계수를 찾는 이유는 몇몇의 측정된 투수계수의 값을 최대한 활용하여 실제로 존재하는 투수계수 분포에 가장 가깝게 모의하고자 하는 것이다. 그러므로, SSBM이나 DBM의 활용성을 분석하기 위해 측정된 투수계수와 최적화된 투수계수 값의 차이를 투수계수 차이 평균(K_{diff} , Eq. (4))과 투수계수 차이 최대값($MaxeK$, Eq. (5))을 활용하였다. 본 연구를 위한 지하수 흐름과 추적자의 분포는 MATLAB을 기반으로 개발되었다.

$$K_{diff} = \frac{1}{N_t} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_t} (K_{ci} - K_{ri})^2} \quad (4)$$

$$MaxeK = Max [|K_{ci} - K_{ri}|], \forall i \quad (5)$$

여기서, K_{ci} , K_{ri} : 점 i 의 추정 및 측정 투수계수(calculated

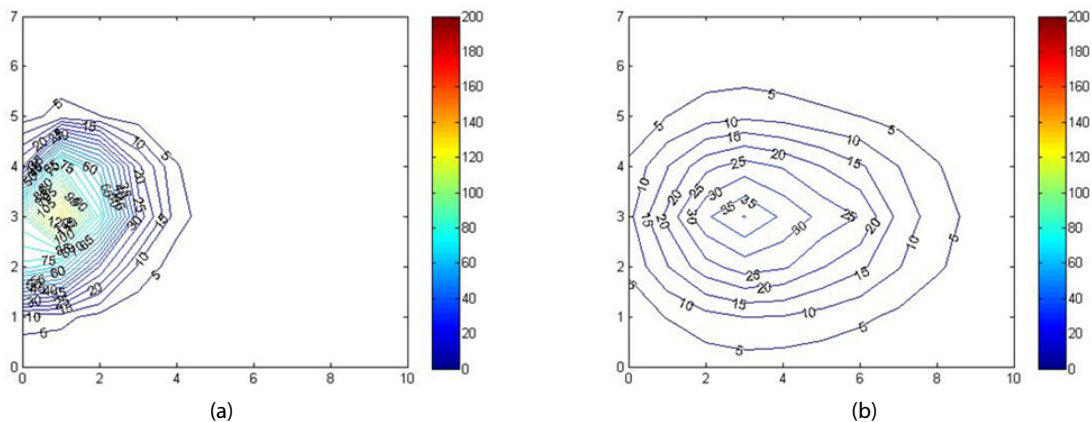


Fig. 4. Tracer Concentration Contour Maps for 20 Days (a) and 100 Days (b) After Injection of Tracer

and observed (true) hydraulic conductivity at grid point i)

N_i : 점 i 의 합계(total number of grid points)

4. 결과 및 토론

SSBM은 파일럿 포인트와 투수계수의 값을 동시에 찾기 때문에 DBM에서 적용된 GA의 탐색 범위의 모집단(population size)을 DBM보다 더 크게 정하였다. 또한 목적함수는 지하수 수두와 추적자의 농도 차이를 동시에 적용하였다. SSBM과의 비교를 위한 DBM 적용의 경우, 지하수 수두값의 민감도 값을 기준값으로 파일럿 포인트를 찾았으며 선정된 파일럿 포인트의 투수계수를 찾는 데는 두 가지 자료를 적용하였다. 하나는 지하수 수두 값(H: height)만을 사용하여 투수계수의 값을 찾았으며 나머지는 지하수 수두 값과 추적자의 농도의 값(HC: height and concentration)을 동시에 적용하였다. SSBM의 경우는 지하수 수두와 추적자의 농도(HC)를 동시에 적용하였다. Fig. 5는 DBM과 SSBM을 비교하였다. DBM에 표기한 H_H나 H_HC는 파일럿 포인트를 찾는 기준과 투수계수를 찾는 기준 값을 순차적으로 나타낸 것이다. SSBM이나 DBM은 시나리오 1과 시나리오 2를 각각 10회씩 적용하여 그 평균값을 비교 하였다. H_H의 경우와 H_HC의 경우를 비교하면 H_HC의 경우는 투수계수 차이 평균(K_{diff})과 투수계수 차이 최대값($MaxK$)이 모두 작게 나타났으며 분산 또한 현저하게 작게 나타났다. 이는 추적자 농도의 효과를 보이는 것으로 추적자의 농도가 투수계수를 찾는데 불확실성을 효과적으로 줄이는 것으로 볼 수 있다. 특히, 시나리오 1의 경우는 그 값의 변화가 현저하게 나타나고 있는데 평균값의 경우 5.46 mm/s의 차이에서 0.61 mm/s의 차이로 추적자의 효과가 크게 나타나고 있다. 하지만, 투수계수 분포의 변화가 큰 시나리오 2는 H_H경우나 H_HC의 경우 모든 값이 작게 나타났다. 이를 통해 투수계수 값을 찾는 것에 있어 측정

지하수 수두와 추적자의 농도를 모두 활용하는 것이 투수계수 값을 찾는 과정의 불확실성을 감소시킬 수 있음을 보인다.

SSBM의 경우는 DBM을 적용했을 때의 지하수 수두와 추적자 농도 두 가지를 사용할 때(DBM (H_HC))의 값보다는 크게 나타나지만 지하수 수두만을 활용할 때(DBM (H_H))의 값보다는 투수계수 평균값이 4.14 mm/s 작게 나타나는 것을 보인다(시나리오 1). 하지만, 시나리오 2의 경우는 지하수 수두만을 사용하는 경우와 지하수 수두와 추적자의 농도를 동시에 사용하는 경우보다 수치의 차이가 모두 크게 나타났다. 이는 초기 투수계수가 실제 투수계수와 차이가 큰 경우로 GA만을 의지한 투수계수를 추정하는 것이 수월하지 않을 수 있음을 보인다. 하지만, GA만을 사용하는 SSBM 방법이 두 가지 순서를 가지는 DBM에 크게 벗어나지 않아 파일럿 포인트의 위치와 투수계수를 동시에 찾는 것도 PPM에 적용 가능할 것으로 보인다. 만일 SSBM과 같이 GA만을 사용할 때, 투수계수의 값을 찾는 것에 더 많은 시간을 제공한다면, 분산을 축소하며 실제 투수계수 분포(True K distribution)에 부합한 투수계수 분포를 찾을 수 있을 것으로 보인다.

Fig. 6은 SSBM을 통해 최종적으로 얻어진 투수계수의 분포와 그의 Semi-variogram을 나타내고 있다. 시나리오 1의 경우는 실제 투수계수 분포(True K distribution)와 전체적인 패턴은 비슷하지만 (9, 3)지점에서 낮은 투수계수의 값을 지닌 것으로 분석하였다. Semi-variogram에서 실제 투수계수의 sill은 1보다 작았으나 SSBM으로 얻어진 sill은 1보다 큰 것으로 나타났다. 이는 측정점 상호간의 투수계수의 추정값이 실제 투수계수 분포에 비해 다소 상이하게 나타남을 알 수 있다. 하지만, 영향범위인 range는 실제 투수계수 분포와 비슷하게 나타났다. 시나리오 2는 실제 투수계수 분포의 값에 비해 sill이 훨씬 크게 나타났다. 이는 (6, 7)지점에 주위 투수계수와 큰 차이가 나는 낮은 투수계수의 값을 찾았기 때문으로 보인다. 또한 range의 범위는 4에 가깝게 나오는 것으로 나타났다. 본 연구에서 사용된 실제 투수계수 분포는 (6, 6)점의

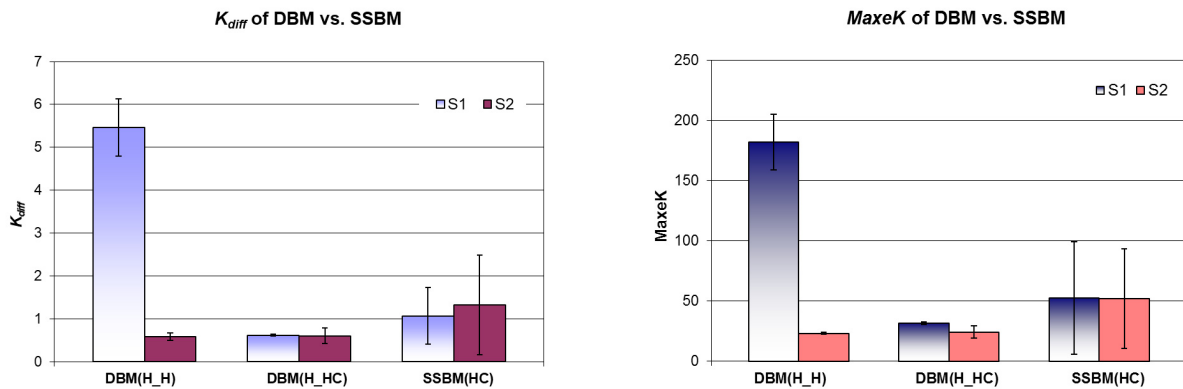


Fig. 5. Numerical Comparisons of between SSBM and DBM with Various Data Applications

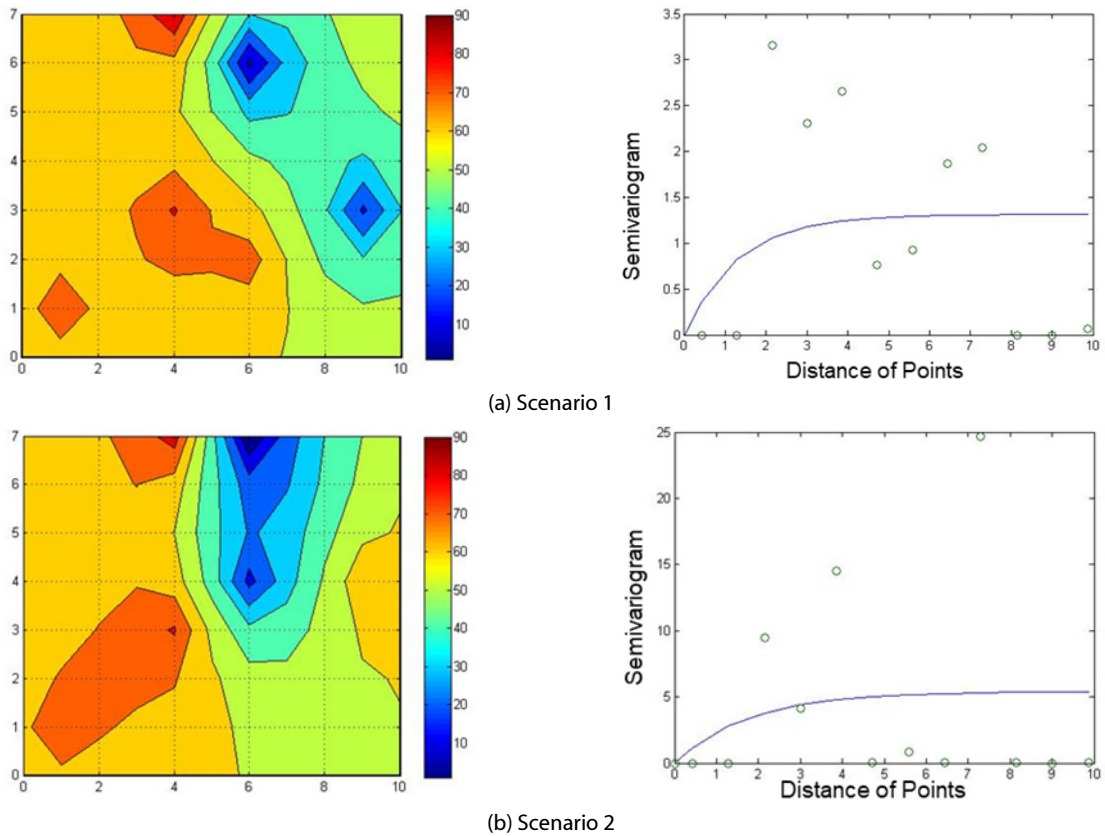


Fig. 6. Final Hydraulic Conductivity Distribution of Scenario 1 (a) and Scenario 2 (b) using SSBM

투수계수(Fig. 3)가 다른 곳에 비해 현저하게 작는데 이를 찾아내는
 나가 실제 투수계수 분포와 비슷한 투수계수 분포를 찾아내는
 핵심이었다. 두 가지 시나리오에 대한 SSBM의 적용성에서 시나리
 오 1은 (6, 6)값을 기준에 지니고 있어 커다란 변화가 없지만
 시나리오 2의 경우는 (6, 6)를 정확하게 찾지 못하고 (6, 7)을
 파일럿 포인트로 선정하고 투수계수를 찾아 전체적 투수계수의
 분포가 실제 투수계수 분포에 비슷한 투수계수 분포를 얻었다.
 본 연구를 통해 SSBM에 의해 얻어진 투수계수의 분포는 실제
 투수계수 분포에 상응하게 표현할 수 있음을 보였다.

5. 결론

투수계수의 분포는 지하수의 흐름에 대한 정보를 제공하는데
 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 매개변수이다. 하지만, 투수계수의
 분포를 충분히 측정할 곳이 많지 않아 이를 개선하기 위해 파일럿
 포인트 방법(Pilot Point Method: PPM)을 다양한 방법으로
 적용하였다. 본 연구에서는 동시 검색기반 파일럿 포인트 방법
 (Simultaneous Search based Pilot Point Method: SSBM)에
 다양한 정보의 적용 가능성을 점검하기 위해 기존에 개발된

D-optimality based Pilot Point Method (DBM)과 비교 하였다.
 두 개의 시나리오에 지하수의 수두 정보와 추적자의 농도 정보를
 적용 후 찾아낸 투수계수 분포 값을 비교 하였다. SSBM을 통해
 추정된 투수계수의 값은 DBM에 의해 추정된 투수계수의 값에
 크게 벗어나지 않는 투수계수 분포를 찾아낼 수 있었다. 본 연구에서
 는 단순히 지하수의 수두 값을 적용한 투수계수의 분포에 비해
 추적자의 농도의 값이 동시에 적용된 투수계수의 분포가 실제
 투수계수 분포(True K distribution)에 더 가까운 투수계수의 분포
 를 찾아내었다. 자료의 활용에 있어 추적자의 농도는 투수계수의
 크기에 대한 제한을 가지며 지하수 수두값은 투수계수의 분포의
 경향성을 나타내는 것으로 보인다. 따라서, 두 가지의 정보를 동시에
 사용하는 것이 투수계수를 찾는 과정 중에 필수적일 수 있을 것으로
 보인다. SSBM은 DBM에 비해 투수계수를 찾는 것에 있어 큰
 분산의 값을 보이지만 투수계수의 값을 찾는 데에 절차를 단순화하
 여 적용할 수 있다는 점에서 PPM에 적용가능한 또 다른 방법의
 하나로 볼 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구는 고정된 투수계수의
 분포를 기반으로 실시된 연구로 본 연구의 한계점을 개선하기
 위해 투수계수 분포의 non-uniqueness에 대한 연구가 더욱 더
 진행되어야 할 것으로 파악된다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 원광대학교 교내연구지원을 받아 수행된 연구임.

References

- Alcolea, A., Carrera, J. and Medina, A. (2006). "Pilot points method incorporating prior information for solving the groundwater flow inverse problem." *Advances in water resources*, vol. 29, pp. 1678-1689.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W. and Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport*, Academic press. California, USA.
- Baalousha, H. M., Fahs, M., Ramasomanana, F. and Younes, A. (2019). "Effect of pilot-points location on model calibration: application to the northern karst aquifer of qatar." *Water*, Vol. 11, No. 4, pp. 1-18
- Certes, C. and de Marsily, G. (1991). "Application of the pilot point method to the identification of aquifer transmissivities." *Advances in Water Resources*, Vol. 14, No. 5. pp. 284-300.
- Cooley, R. L. (2000). "An analysis of the pilot point methodology for automated calibration of an ensemble of conditionally simulated transmissivity fields." *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 4, pp. 1159-1163.
- de Marsily, G., Lavedan, G., Boucher, M. and Fasanino, G. (1984). "Interpretation of interference tests in a well field using geostatistical techniques to fit the permeability distribution in a reservoir model." *Geostatistics for Natural Resources Characterization, Part, 2*, D. Reidel Publishing Company. Boston, USA.
- Doherty, J. (2003). "Ground water model calibration using pilot points and regularization." *Ground Water*, Vol. 41, No. 2, pp. 170-177.
- Doherty, J. (2019). *PEST model-independent parameter estimation user manual part I: PEST, SENSAN and Global Optimiser*. Watermark Numerical Computing Brisbane, Australia, p. 393.
- Fahs, H., Hayek, M., Fahs, M. and Younes, A. (2014). "An efficient numerical model for hydrodynamic parameterization in 2D fractured dual-porosity media." *Advances in Water Resources*, Vol. 63, pp. 179-193.
- Fienen, M. N., Muffels, C. T. and Hunt, R. J. (2009). "On constraining pilot point calibration with regularization in PEST." *Groundwater*, Vol. 47, No. 6, pp. 835-844.
- Gomez-Hernandez, J. J., Sahuquillo A. and Capilla J. (1997). "Stochastic simulation of transmissivity fields conditional to both transmissivity and piezometric data-I. Theory." *Journal of Hydrology*, Vol. 203, No. 1-4, pp. 162-174.
- Hendricks-Franssen, H. J. (2000). *Inverse stochastic modeling of groundwater flow and mass transport*. Ph.D. dissertation, Universidad Politecnica de Valencia, Spain.
- Jung, Y., Mahinthakumar, G. and Ranjithan, R. (2013). "Development of a simultaneous search-based pilot point method for subsurface characterization." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 27, No. 8, pp. 2003-2013.
- Jung, Y., Ranjithan, R. S. and Mahinthakumar, G. (2011). "Subsurface characterization using a D-optimality based pilot point method." *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 13, No. 4, pp. 775-793.
- Klaas, D. K. and Imteaz, M. A. (2017). "Investigating the impact of the properties of pilot points on calibration of groundwater models: case study of a karst catchment in Rote Island, Indonesia." *Hydrogeology Journal*, Vol. 25, No. 6, pp. 1703-1719.
- LaVenue, A. M., RamaRao, B. S., De Marsily, G. and Marietta, M. G. (1995). "Pilot point methodology for automated calibration of an ensemble of conditionally simulated transmissivity fields Application." Vol. 31, No. 3, pp. 495-516.
- Rajabi, M. M., Ataie-Ashtiani, B. and Simmons, C. T. (2018). "Model-data interaction in groundwater studies: Review of methods, applications and future directions." *Journal of Hydrology*, Vol. 567, pp. 457-477.
- RamaRao, B. S., LaVenue, A. M., De Marsily, G. and Marietta, M. G. (1995). "Pilot point methodology for automated calibration of an ensemble of conditionally simulated transmissivity fields: 1. Theory and computational experiments." *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 3, pp. 475-493.