

3차원 정밀수치모사를 통한 안성천변 방사형집수정의 취수가능량 평가

차장환¹ · 이재영^{1,†} · 이치형² · 김규범³

¹(주)인시티 인프라연구소

²(주)인텔리지오

³대전대학교 건설안전방재공학과

요 약

최근 수자원 확보 방안으로 강변여과수 방식을 활용한 방사형 집수정에 의한 취수에 많은 관심을 보이고 있으며 이번 연구에서는 안성천에 시공된 방사형 집수정을 대상으로 수치모사를 통해 취수가능량을 평가하였다. 취수가능량 평가는 집수정 가동 전과 후의 정류상태에서의 계산된 압력수두와 현장에서 측정된 압력수두를 비교 분석하였으며 그 결과 RMSE (Root Mean Square Error)는 0.40 m이며 정규화된 RMSE는 8.9%로 나타났다. 또한, 취수가능량 평가결과 각각의 수평정에서 취수가능량은 430 ~ 1,810 m³/day로 현장에서 측정된 취수량을 비교한 결과 정규화된 RMSE는 12.0%로 나타났다. 또한 총 취수가능량은 5,510 m³/day로 측정값과 4.3%의 오차를 보이고 있는 것으로 나타나 관측값을 잘 재현하고 있음을 확인하였다. 본 연구결과를 통해 수변지역에서의 방사형 집수정의 취수가능량을 정량적으로 예측할 수 있고 이를 통해 운전효율을 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 강변여과, 방사형 집수정, 수치모델링, 취수가능량 평가

Jang-Hwan Cha, Jae Young Lee, Chi-Hyung Lee and Gyoo-Bum Kim, 2016, Evaluation of pumping capacity at a radial collector well located in the Anseong stream using a 3-D numerical modeling. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 4, p. 465-474

ABSTRACT: In recent years, there is a growing interest in the application of radial collector wells in a riverbank filtration system in order to secure water resources. A radial collector well, composed of several horizontal arms centered around a vertical storage well, was installed for riverbank filtration in Anseong stream. In this study, its pumping capacity of the radial collector well was evaluated using numerical modeling. Specifically, its capacity was estimated by comparing the computed and observed pressure heads at steady state before and after the operation of the radial collector. Our results indicated that the RMSE (Root Mean Square Error) and NRMSE (Normalized Root Mean Square Error) of the collector were 0.40 m and 8.9%, respectively. The yield of individual horizontal arms was estimated to range over 430 ~ 1,810 m³/day, and 12.0% NRMSE was obtained by comparing them to those measured at monitoring wells. In addition, the total yield of the radial collector well was estimated to be 5,510 m³/day, which gave a small difference (4.3%) from the measured yield. In this study, our simulation approach was proven to accurately estimate the pumping capacity and operation efficiency of radial collector wells employed for riverbank filtration.

Key words: Riverbank filtration, Radial collector wells, Numerical modeling, Pumping rates

(Jang-Hwan Cha and Jae Young Lee, Infra Research Institute, Incity Co. Ltd., Seoul 06184, Republic of Korea; Chi-Hyung Lee, Intellego Co. Ltd., Seoul 08390, Republic of Korea; Gyoo-Bum Kim, Department of Geotechnical Disaster Prevention Engineering, Daejeon University, Daejeon 34520, Republic of Korea)

1. 서 론

일정한 수량과 양호한 수질을 유지할 수 있는 간접

취수 방식의 강변여과수 개발은 4대강 살리기 사업 이후 하천 수위의 안정적 유지가 가능해지면서 수량 확보차원에서 개발여건이 크게 향상되었고 이에 따라

[†] Corresponding author: +82-2-6959-3038, E-mail: jylee@incity.co.kr

방사형 집수정을 통한 수자원 개발이 부각되고 있다 (Kim *et al.*, 2014). 이와 관련된 조사, 설계, 시공 등 다양한 기술이 개발되고 있으며 특히 방사형 집수정의 취수가능량 평가 기술개발이 활발하게 이루어지고 있으나 아직 부족한 실정이다. 방사형 집수정의 취수량 평가는 경험식에 의한 방법과 수치모델링을 통한 방법이 있다. Chung *et al.* (2004), Oh *et al.* (2012) 그리고 Kim *et al.* (2014) 등은 수리인자를 토대로 산정한 Petrovic, Milojevic, Kordas 경험식을 이용하여 취수량을 산정하였다. 구체적으로 Oh *et al.* (2012)는 광역 지하수조사 및 전국 층적층 지하수조사 보고서의 자료를 경험식에 적용하여 주요 국가하천 유역에 대해 취수가능량을 평가하였으며 Kim *et al.* (2014)는 4대강 살리기 사업 이후 보 상류지역에서의 하천수위 상승에 따른 개발가능량을 경험식을 적용하여 평가하였다. 반면에 Chung *et al.* (2004), Kim (2008), Kim and Jeong (2009), Lee *et al.* (2010) 그리고 Park *et al.* (2015) 등은 수치모델링을 활용하여 방사형 집수정의 개발량을 평가하였다. 특히, Lee *et al.* (2010)는 HydroGeoSphere (Therrien *et al.*, 2005)와 연동하여 방사형 집수정의 수평정 내에서의 지하수 유동영역을 반영할 수 있는 유한요소 모델을 개발하였으며 Park *et al.* (2015)은 COFAT3D (Kim and Yeh, 2004)를 이용하여 방사형 집수정 성능 및 효율에 대한 수평정의 방향, 개수, 사잇각 등 배열의 영향을 정량적으로 평가하였다.

본 연구에서는 시공된 방사형 집수정을 대상으로 불포화-포화 대수층영역을 변동적으로 모의할 수 있는 WASH123D (Yeh *et al.*, 2005) 모델을 활용하여 집수정 가동 전의 지하수 분포상태와 집수정 가동에 따른 취수가능량 및 지하수 수위변동을 예측하고 실측된 취수량 및 지하수위 자료를 활용하여 비교분석 하고자 한다.

2. 이론적 배경

포화-불포화 다공성 매체(saturated-unsaturated porous media)를 통한 밀도종속 지하수 유동에 대한 지배방정식은 수체질량 보존법칙에 근거하여 식 (1)과 같이 기술될 수 있다(Yeh, 1987; Yeh *et al.*, 1994; Lin *et al.*, 1997).

$$\frac{\rho}{\rho_o} F \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\mathbf{K} \cdot \left(\nabla h + \frac{\rho}{\rho_o} \nabla z \right) \right] + \frac{\rho}{\rho_o} q \quad (1)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도; ρ_o 는 물의 기준밀도; h 는 기준 압력수두[L]; t 는 시간[T]; K 는 수리전도도[L/T]; z 는 위치수두[L]; ρ^* 는 유입수의 밀도; q 는 유출/유입항 [L³/L³/T]; F 는 수분함량[1/L]을 나타내며 다음 식으로 주어질 수 있다.

$$F = a' \frac{\theta_e}{n_e} + \beta' \theta_e + n_e \frac{ds}{dh} \quad (2)$$

여기서 a' 는 매체의 수정 압축률[1/L]; θ_e 는 유효수분량[L³/L³]; n_e 는 유효공극률[L³/L³]; β' 는 물의 압축률[1/L]; S 는 포화도를 나타낸다. 한편, Darcy 유속은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{V} = -\mathbf{K} \cdot \left(\frac{\rho_o}{\rho} \nabla h + \nabla z \right) \quad (3)$$

지하수 유동에 대한 부정류 해석을 수행하기 위해 초기조건을 다음과 같이 지정할 수 있다.

$$h = h_i(\mathbf{x}) \quad \text{in } R \quad (4)$$

여기서 R 은 대상영역을 나타내며 h_i 는 식 (1)에 대한 정류해석이나 관측치를 통해 얻을 수 있는 압력수두[L]를 나타낸다.

또한 수치모사를 위해 다음과 같은 5가지 형태의 경계조건들이 고려될 수 있다.

① Dirichlet 경계조건

압력수두가 경계면에 지정될 수 있을 때 적용가능하며 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$h = h_d(\mathbf{x}, t) \quad \text{on } B_d(\mathbf{x}) = 0 \quad (5)$$

여기서 $h_d(\mathbf{x}, t)$ 는 경계면($B_d(\mathbf{x}) = 0$)에서의 Dirichlet 수두를 나타낸다.

② Neumann 경계조건

압력수두 경사에 의해 발생된 유동이 시간의 함수로 주어질 때 적용가능하며 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{K} \cdot \frac{\rho_o}{\rho} \nabla h = q_n(\mathbf{x}, t) \quad \text{on } B_n(\mathbf{x}) = 0 \quad (6)$$

여기서 $q_n(\mathbf{x}, t)$ 는 Neumann 유동, $B_n(\mathbf{x}) = 0$ 은

Neumann 경계면을 나타낸다.

③ Cauchy 경계조건

본 경계조건은 전수두 경사에 의해 발생된 유동이 시간의 함수로 주어질 때 적용가능하며 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$-\mathbf{n} \cdot \left(\mathbf{K} \cdot \frac{\rho_o}{\rho} \nabla h + \mathbf{K} \cdot \nabla z \right) = q_c(\mathbf{x}, t) \quad (7)$$

on $B_c(\mathbf{x}) = 0$

여기서 $q_c(x, t)$ 는 Cauchy 유동, $B_c(x) = 0$ 은 Cauchy 경계면을 나타낸다.

④ 하천 경계조건

대상영역내에서 하천과 지하매체가 분리된 얇은 지반층이 존재하는 경우 적용가능하며 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{K} \cdot \left(\frac{\rho_o}{\rho} \nabla h + \nabla z \right) = -\frac{K_R}{b_R} (h_R - h) \quad (8)$$

on $B_r(\mathbf{x}) = 0$

여기서 K_R 은 얇은 지반층의 수리전도도; b_R 은 얇은 지반층의 두께; h_R 은 하천의 수심; $B_r(x) = 0$ 는 하천과 지하매체간의 표면을 나타낸다.

⑤ 변동 경계조건

지표와 지하시스템의 연계가 고려되지 않을 때 지표면 경계면에 대해 적용되며 우기와 건기에 대한 두 가지 식으로 기술될 수 있다.

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{K} \cdot \left(\frac{\rho_o}{\rho} \nabla h + \nabla z \right) = q_p(\mathbf{x}, t) \quad \text{if } h \leq h_p \quad (9)$$

on $B_v(\mathbf{x}) = 0$ (우기)

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{K} \cdot \left(\frac{\rho_o}{\rho} \nabla h + \nabla z \right) = q_c(\mathbf{x}, t) \quad \text{if } h \geq h_m \quad (10)$$

on $B_v(\mathbf{x}) = 0$ (건기)

여기서 $h_p(x, t)$ 는 담수심(ponding depth); $q_p(x, t)$ 는 강우에 의한 유동; $h_m(x, t)$ 는 최소 압력수두; $q_c(x, t)$ 는 변동 경계조건인 지표면($B_v(x) = 0$)에서의 잠재증발

률을 나타낸다.

밀도중속 지하수 유동의 지배방정식인 식 (1)은 공간적으로 Galerkin 유한요소기법을 시간적으로 유한차분기법을 각각 적용하여 수치적으로 이산화 될 수 있으며 공간상의 유한요소 이산화 방정식은 식 (11)로 기술될 수 있다.

$$h \approx \hat{h} = \sum_{j=1}^N h_j(t) N_j(x, y, z) \quad (11)$$

여기서 N_j 는 절점 j 에서의 기저함수(base function)를 나타내며 가중잔차(weighted residual)를 고려한 유동방정식으로 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left[\int_R N_i \frac{\rho}{\rho_o} F N_j dR \right] \frac{dh_j}{dt} \\ & + \left[\int_R (\nabla N_i) \cdot \mathbf{K} \cdot (\nabla N_j) dR \right] h_j \\ & = \int_R N_i \frac{\rho}{\rho_o} q dR - \int_R (\nabla N_i) \cdot \mathbf{K} \cdot \frac{\rho}{\rho_o} \nabla z dR \\ & + \int_B \mathbf{n} \cdot \mathbf{K} \cdot \left(\nabla h + \frac{\rho}{\rho_o} \nabla z \right) N_i dB \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)를 행렬식으로 나타내면 다음과 같이 수식화 할 수 있다.

$$[M] \left\{ \frac{dh}{dt} \right\} + [S] \{h\} = \{Q\} + \{G\} + \{B\} \quad (13)$$

여기서 $\{dh/dt\}$ 와 $\{h\}$ 는 모든 절점에서의 dh/dt 와 h 의 값을 포함하는 열벡터(column vector); $[M]$ 은 저류항에서 계산된 질량행렬(mass matrix); $[S]$ 는 전도도의 거동으로부터 계산된 강성행렬(stiff matrix); 행렬 $\{Q\}$, $\{G\}$ 및 $\{B\}$ 는 내부 source/sink, 중력 및 경계조건들을 각각 반영한 하중벡터(load vector)를 나타낸다. 질량행렬, 강성행렬은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{ij} = \sum_{e \in M_e} \int_{R_e} N_\alpha^e \frac{\rho}{\rho_o} F N_\beta^e dR \quad \text{and} \quad (14)$$

$$S_{ij} = \sum_{e \in M_e} \int_{R_e} (\nabla N_\alpha^e) \cdot \mathbf{K} \cdot (\nabla N_\beta^e) dR$$

여기서 R_e 는 요소 e 의 영역; M_e 는 global side $i-j$

에 해당하는 local side α - β 를 포함하는 요소군; N_α 는 요소 e 의 α 번째 local 기저함수를 나타낸다. 또한 상기의 세 하중벡터는 식 (15)와 식 (16)과 같이 정의될 수 있다.

$$Q_i = \sum_{e \in M_e} \int_{R_e} N_\alpha^e \frac{\rho}{\rho_0} q dR \tag{15}$$

$$G_i = - \sum_{e \in M_e} \int_{R_e} (\nabla N_\alpha^e) \cdot \mathbf{K} \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \nabla z dR$$

$$B_i = - \sum_{e \in N_e} \int_{B_e} N_\alpha^e n \cdot \left[-K \cdot \left\{ \nabla h + \frac{\rho}{\rho_0} \nabla z \right\} \right] dB \tag{16}$$

여기서 N_{se} 는 global 절점 i 에 해당하는 local 절점 α 를 포함하는 경계분할면(boundary segment); B_e 는 경계분할면 e 의 길이를 나타낸다.

대부분의 수치모델에서 Darcy 유속성분은 모의된 수두의 편미분항을 고려하여 다음과 같이 수치적으로 계산될 수 있다.

$$\mathbf{V} = -\mathbf{K} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0} (\nabla N_j) h_j + \nabla z \right) \tag{17}$$

한편, 시간에 대한 수치적 이산화는 유한차분기법에 의한 시간가중법(time weighted method)을 적용하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{[M]}{\Delta t} (\{h\}_{t+\Delta t} - \{h\}_t) + \omega [S] \{h\}_{t+\Delta t} + (1-\omega)[S] \{h_t\} = \{Q\} + \{G\} + \{B\} \tag{18}$$

여기서 행렬 $[M]$, $[S]$, $\{Q\}$, $\{G\}$ 및 $\{B\}$ 는 시간 $(t + \omega \Delta t)$ 에서 산정되며 ω 는 시간가중인자를 나타낸다.

3. 연구지역

연구지역은 경기도 평택시 유천동과 안성시 공도읍 중북리로 안성천(제외지)과 농경지(제내지)로 남쪽은 충청남도 천안시 서북구 성환읍 신가리와 인접하고 있다(그림 1). 연구지역의 기반암은 선캄브리아기 경기편마암복합체에 해당하는 흑운모편마암과 이를 관입한 중생대 주라기 흑운모화강암으로 구성되어 있으며 이들 상부에 제4기 충적층이 분포하고 있다(Kim *et al.*, 1980). 지형은 평야지대가 발달해 있으며 수계는 소지류들이 안성천으로 유입하여 서해로 흘러간다.

시추조사 결과 충적층의 평균 두께는 7.6 m로 상부로부터 0~4 m 심도는 투수성이 낮은 실트와 점토가 우세한 실트질 모래층이며, 4~6 m 심도는 투수성이 좋은 자갈 섞인 모래층이 1~4 m 내외의 두께로 분포한다. 충적층 하부는 풍화암으로 구성되어 있다.

4. 수치 모사

본 연구에서는 강변여과수 취수를 수치 모사하기 위해 불포화-포화 대수층영역을 변동적으로 모의할 수 있는 WASH123D (Yeh *et al.*, 2005) 모델을 채택하였다.

WASH123D는 포화-불포화 다공성 매체를 통한

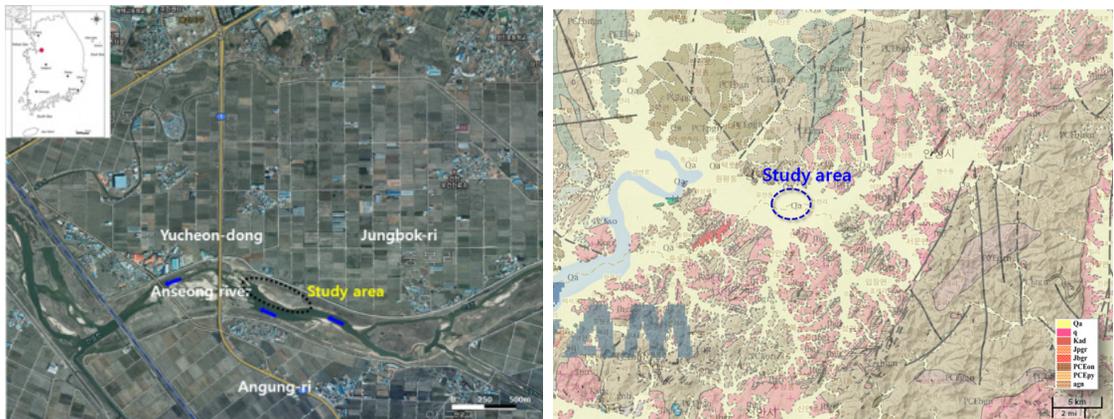


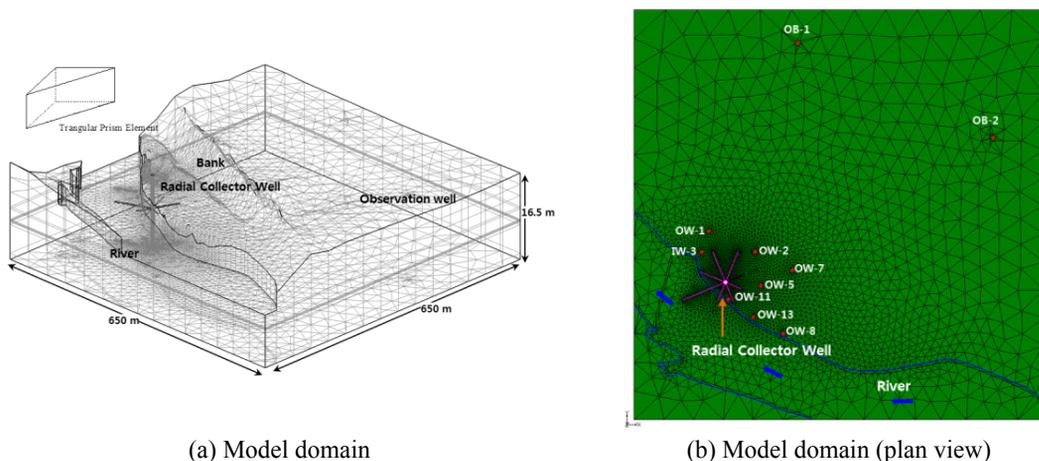
Fig. 1. Location and geologic map of the study area.

지하수 밀도종속 유동을 모의할 수 있는 3차원 지하수 유동모델로써 유동과 상태변수들간의 상관관계와 관련된 유체, 운동량 및 질량에 대한 보존법칙에 근거한 물리적 기반의 유한요소해석 기법을 적용하고 있다. 또한 물리적 현상에 근거한 다양한 형태의 경계조건들이 지배방정식에 추가되었으며 정상류 모의결과나 관측치로부터 얻은 적절한 초기조건을 이용하여 부정류 모의를 할 수 있도록 구성되었다. 본 모형은 비정형 사면체 요소, 삼각기둥 요소 및 육면체 요소 등을 이용하여 복잡한 자연지형을 반영할 수 있으며 하천-대수층간의 연계현상도 모델링할 수 있다. 특히, 불포화 대수층에서 수정된 Richards 방정식을 기반으로 비선형적 유동현상을 모사하기 위해 Picard 기법을 도입하여 해의 수렴성 및 안정성을 개선하였다.

모델구축은 하천변에서의 방사형 집수정 취수를 고려하기 위하여 대수층, 하천, 하상퇴적층 및 방사형 집수정과 수평정으로 구성된 불포화-포화 대수층과 하천을 연계하여 이루어졌다. 수치모사 영역은 안성천에 시공된 방사형 집수정을 대상으로 650 m (동서방향) × 650 m (남북방향) × 16.5 m (높이)이며 하천 깊이 및 하상퇴적층의 두께는 각각 4.5 m, 0.5 m로 설정하였다(그림 2). 또한, 측정된 하천 수위는 집수정 인근 보를 중심으로 상류의 경우 4.5 m, 하류의 경우 4.0 m이며 이를 모델에 반영하였다. 시공된 방사형 집수정은 우물통 내경 6.0 m, 벽체 두께 0.7 m, 높이 14.7 m이고(Kim *et al.*, 2015) 수평

정은 직경 0.3 m이며 길이와 개공률(opening ratio)은 각각 24~70 m, 25~50%로 총 7개로 구성되어 있다. 또한, 관측정은 그림 2(b)와 같이 방사형 집수정 주변과 제내지에 10공이 설치되어 있으며 이들 관측정의 지하수 수위 관측자료를 활용하여 모델 보정 및 취수량 평가 시 검증에 수행하였다. 이러한 방사형 집수정 모델은 총 52,953개의 절점(node)과 95,586개의 삼각기둥(prism) 요소로 이산화되었으며 지층 및 수평정의 위치를 고려하여 12개의 층으로 구성하였다. 또한, 최상부 층의 지표고도는 연구지역의 고도자료(DEM 자료)를 입력값으로 정규 크리깅 방법을 적용하여 구성하였으며 하천은 하상퇴적층의 깊이를 고려하여 하상퇴적층 상부의 절점과 요소를 제거하였다. 경계조건은 모사영역의 남동쪽에서 서쪽으로 흐르는 안성천의 경우 하천수위를 고려하여 고정수두(Dirichlet) 경계를 설정하였으며 모사영역의 하부 및 북쪽, 동쪽, 서쪽은 무흐름(no-flow) 경계로 설정하였다. 또한, 집수정과 수평정 경계면을 제외한 집수정 내부면은 무흐름(no-flow) 경계로 설정하였으며 집수정 내 수평정 끝단은 집수정의 운영 수위(전수두 EL. -1.0 m)를 고려하여 고정수두 경계조건을 적용하였다. 모사영역의 상부는 변동(variable) 경계로 천안기상대의 10년(2006~2015년) 평균 연강수량(1,246 mm/yr) 자료를 적용하였다.

대수층의 수리지질학적 특성의 하나인 수리상수는 연구지역에서 수행한 시추조사 및 현장시험 결과를 통해 획득한 자료를 사용하였다. 표 1은 대수



(a) Model domain

(b) Model domain (plan view)

Fig. 2. Schematic diagram of aquifer, river, and radial collector well (modeling domain). The vertical axis is enlarged 8 times.

층, 하상퇴적층 및 수평정의 입력변수를 나타낸 것으로 실트질 모래층, 자갈 섞인 모래층 및 풍화토층은 현장 투수시험 및 양수시험 결과를 활용하였으며 실트질 모래층, 자갈 섞인 모래층 및 풍화토의 수리전도도는 각각 2.60×10^{-5} , 4.39×10^{-4} , 2.45×10^{-5} m/s이다. 또한, 집수정 부근은 수평정 시공 시 측정된 입도분석 자료를 활용한 수리전도도 값을 이용하여 자갈 섞인 모래층의 일부를 구획화하였다. 하상퇴적층의 수리전도도는 연구지역의 상류인 안성천에서 Lee *et al.* (2015)에 의해 조사된 자료(평균 2.82×10^{-4} m/s)를 활용하였으며 기반암의 수리전도도 및 각 지층의 공극률은 기존 문헌자료(van Genuchten, 1980; Jeon *et al.*, 2005)를 사용하였다. 수평정은 Darcy-Weisbach 방정식을 이용하였으며 수평정 시공 시 사용한 개공률(25~50%)을 적용하였다. 집수정은 수평정 끝단을 제외하면 내부를 통해 배수가 발생

하지 않기 때문에 집수정 내부의 절점 및 요소를 제거하였다. 이번 연구에서는 제내지에 존재하는 지하수 관정의 사용여부 및 사용량에 대한 정보 획득이 쉽지 않아 고려대상에서 제외하였다.

5. 모사 결과 분석

대용량 취수시설인 방사형 집수정이 주변 대수층에 미치는 영향을 평가하기 위해 집수정 가동 전 정류상태(steady state) 와 가동 후 부정류상태(transient state)에서 수치모사를 수행하였으며 취수가능량 평가는 가동 전과 후 정류상태의 수치모사를 통해 수행하였다.

5.1 지하수 흐름 분석

그림 3은 집수정 가동 전 정류상태의 압력수두 분

Table 1. Hydrogeological properties in the study area.

Media	Layer	Hydraulic conductivity (m/s)		Porosity (n)
		K_x, K_y	K_z	
Silty sand	1~4	2.60×10^{-5}	2.60×10^{-5}	0.38
Gravelly sand	5~10	4.39×10^{-4}	4.39×10^{-4}	0.35
Weathered soil	11	2.45×10^{-5}	2.45×10^{-5}	0.30
Bedrock	12	8.80×10^{-7}	8.80×10^{-7}	0.08
Riverbed	4	2.82×10^{-4}	2.82×10^{-4}	0.42

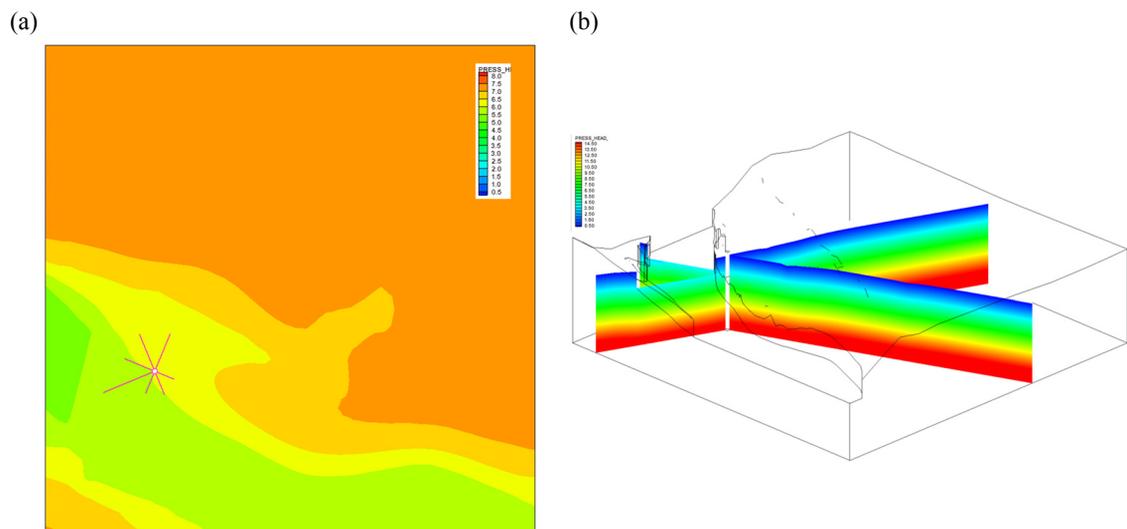


Fig. 3. The computed pressure head distributions before the operation of a radial collector well (a) plan view in a single layer at depth of a horizontal arm and (b) cross-sectional view along #1-#5 and #6 arms.

포를 나타낸 것으로 그림 3a는 수평정 설치 심도인 EL. (-)1.5 m에서의 압력수두이며 그림 3b는 #1과 #5 수평정을 지나는 수직단면과 #6 수평정을 지나는 수직단면에서의 압력 수두를 나타낸 것이다. 모사결과 연구지역의 압력수두는 6.0~8.0 m로 나타났으며 지하수 흐름은 북동쪽에서 안성천 방향으로 흘러 안성천은 이득하천으로 모사되었다.

그림 4는 집수정 가동에 따른 부정류모사를 수행한 것으로 가동 후 30일 경과 시 압력수두 분포를 나타낸 것이다. 모사결과 연구지역의 압력수두는 0.5~8.5 m로 나타났으며 지하수 흐름은 수평정을 통해 집수정으로 유입되는 것으로 모사되었다. 특히, 수평정이 근접한 집수정 부근에서 급격한 수위 강하가 발생한다. 집수정 가동에 따른 수위강하 범위는 수위

강하량 0.5 m를 기준으로 하였을 때 약 180 m로 나타났다. 그러나 제내지에 존재하는 관측정의 경우, 집수정 가동 이후에 측정된 압력수두는 5.47 m로 가동 전과 비교하면 약 2.1 m의 수위강하를 보이고 있으며 이는 방사형집수정 주변의 관측정(OW-01, OW-02, OW-05 및 OW-07)에서 실측된 수위강하량(1.54~2.38 m)에 비해 다소 크게 발생하는 것으로 볼 때 제내지의 지하수 이용에 따른 영향으로 판단된다. 이는 제내지(농경지)의 지층특성 및 수리상수, 지하수 사용량 등 관련자료 부족에 기인한 것으로 제내지에서의 수위강하량에 대한 면밀한 분석을 위해서는 제내지의 지층특성, 수리상수 및 지하수 사용량에 대한 상세한 정보취득이 필요할 것으로 판단된다.

그림 5는 집수정 가동에 따른 각 관측공에서 지하

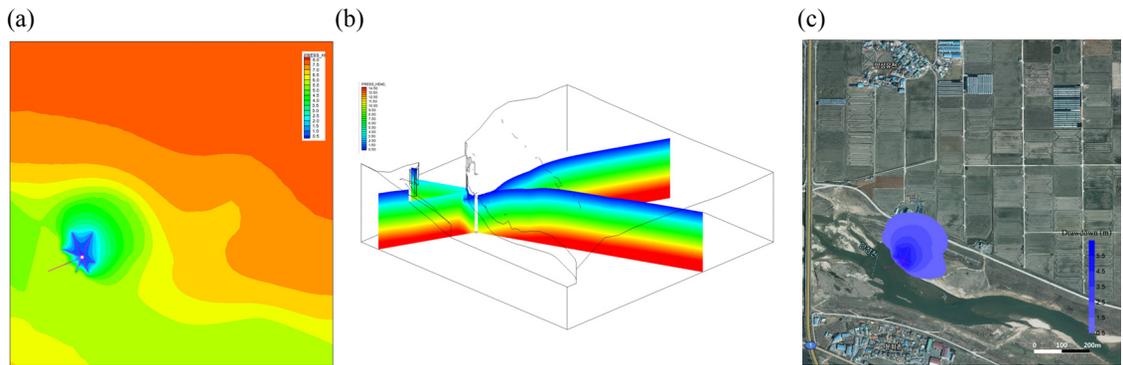


Fig. 4. The computed pressure-head distribution after the 30-day operation of a radial collector well; (a) plan view in a single layer at depth of a horizontal arm and (b) cross-sectional view along #1-#5 and #6 arms, and (c) the influence range corresponding to 0.5 m drawdown.

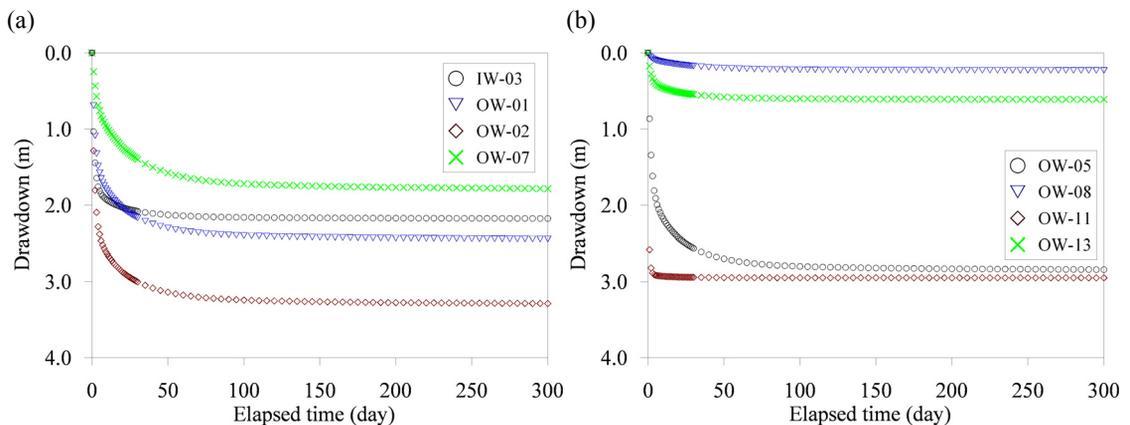


Fig. 5. Pressure head drawdown due to the operating of a radial collector wells (a) observation wells IW-03, OW-01, OW-02, and OW-07, (b) observation wells OW-05, OW-08, OW-11, and OW-13.

수위 강하량을 도시한 것으로 #1, #8 수평정에 인접한 IW-03, OW-01, OW-02 및 OW-07에서의 수위강하량은 집수정 가동 후 30일 경과 시 각각 2.08, 2.17, 3.00, 1.40 m 발생하였다. 또한, #3, #4 수평정에 인접한 OW-05, OW-08, OW-11, 및 OW-13의 수위강하량은 2.56, 0.17, 2.94, 0.55 m 발생하였으며 가장 수위강하량이 적은 OW-08, OW-13은 상대적으로 수평정과 거리가 멀며 하천과 인접하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 이후 지하수 수위는 천천히 감소하며 수평정과 가까운 관측정인 OW-01, OW-02, OW-05, OW-07의 경우 약 150일 이후 안정된 압력수두를 유지하는 것으로 모사되었다.

특히, 수변지역에서 방사형 집수정과 같은 취수 시설의 설계 및 시공 시 제내지뿐만 아니라 제외지 및 하상퇴적층에 대한 현장조사가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

5.2 지하수 취수가능량 평가

방사형 집수정은 대용량의 수자원확보를 위한 시

설로써 취수가능량 평가가 중요하다. 이에 이번 연구에서는 집수정의 취수가능량을 평가하기 위해 집수정 가동 후 정류상태에서의 수치모사에서 계산된 관측정의 압력수두와 집수정 가동 이후 정류상태의 현장 관측 압력수두를 비교/분석하였다. 계산된 압력수두는 수평정 심도에서추출하였으며 현장 관측 수위는 압력수두로 변환하였다. 그 결과 계산된 압력수두는 3.17~7.79 m로 평균 5.00 m이며 관측된 압력수두는 3.38~5.85 m로 평균 4.52 m이다(그림 6). 이들 압력수두의 오차율은 제내지의 OB-01, OB-02을 제외하며 1.9~13.4%로 평균계급근오차(RMSE)는 0.40 m이며 정규화된 RMSE는 8.9%로 모사결과 는 적합한 것으로 판단된다. 제내지에 존재하는 관측정의 경우 집수정 가동 후 정류상태의 압력수두는 5.47 m로 모사결과와 비교하여 약 2.3 m 차이를 보이고 있다. 이는 수치모사에서 제내지에 존재하는 지하수 관정의 사용여부 및 사용량에 대해 고려가 필요할 것으로 판단된다.

취수가능량 평가는 모사결과 각각의 수평정에서

Table 2. Measured and calculated pumping rates of radial arms.

Pumping rate (m ³ /day)	#1	#3	#4	#5	#6	#7	#8	Total
Measurement	723	477	917	309	2,088	291	475	5,280
Calculation	700	490	910	550	1,810	430	620	5,510

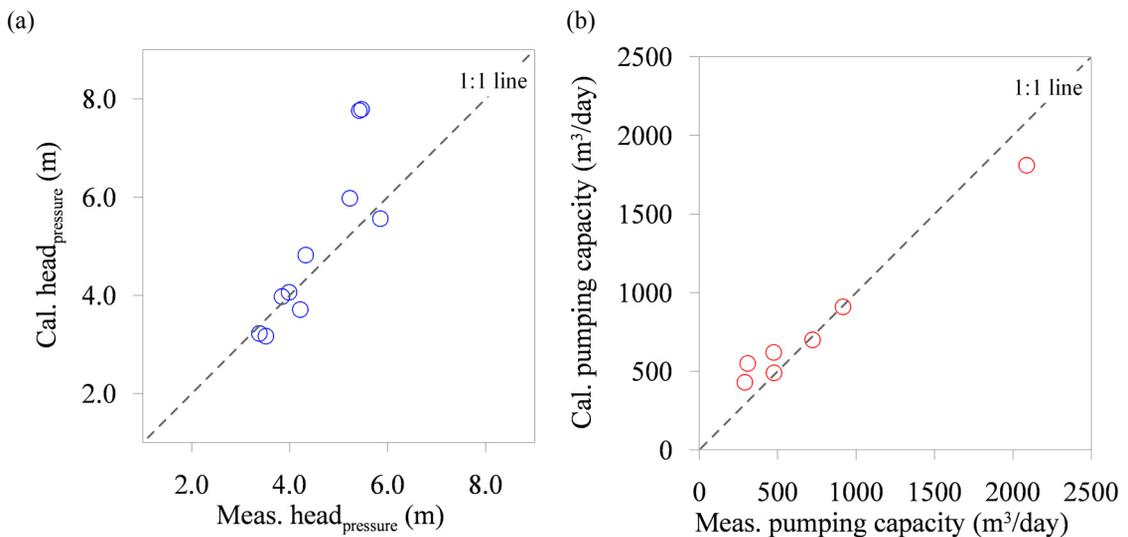


Fig. 6. Comparison of simulated and observed pressure head and pumping capacities under steady-state conditions; (a) pressure heads and (b) pumping capacity.

산출된 취수량과 전체 취수량을 평가하였다. 각각 수평정에서의 취수가능량은 430~1,810 m³/day으로 총 5,510 m³/day로 산출되었다(표 2; 그림 6). 계산된 취수가능량과 현장에서 측정된 취수량을 비교한 결과 오차율은 0.8~56.1%로 정규화된 RMSE는 12.0%로 산정되어 모의결과는 양호한 것으로 판단되었다.

6. 결론

이번 연구에서는 수치모사를 통해 강변여과수 취수방식인 방사형 집수정에 대한 취수가능량 및 취수에 따른 지하수 영향을 검토한 것으로 실제 시공이 완료된 시설을 대상으로 수치모사를 수행하였으며 실측자료와 비교분석하였다.

집수정 가동 전 정류모사 결과 연구지역의 압력수두는 6.0~8.0 m로 나타났으며 지하수 흐름은 북동쪽에서 안성천 방향으로 흘러 안성천은 이득하천으로 모사되었다. 집수정 가동에 따른 부정류모사 결과 가동 후 30일 경과 시 압력수두는 0.5~8.5 m로 나타났으며 지하수 흐름은 수평정을 통해 집수정으로 유입되는 것으로 나타났다. 집수정 가동에 따른 지하수위 강하량은 #1, #8 수평정에 인접한 IW-03, OW-01, OW-02 및 OW-07에서 동 후 30일 경과 시 각각 2.08, 2.17, 3.00, 1.40 m 발생하였다. 또한, #3, #4 수평정에 인접한 OW-05, OW-08, OW-11 및 OW-13의 수위강하량은 2.56, 0.17, 2.94, 0.55 m 발생하는 것으로 모사되었다. 150일 이후 안정된 압력수두를 유지하는 것으로 모사되었다.

수치모사 검증은 집수정 가동 후 정류상태의 수치모사에서 계산된 관측정의 압력수두와 집수정 가동 이후 정류상태의 현장 관측 압력수두를 비교/분석하였으며 그 결과 계산된 압력수두와 관측된 압력수두의 평균은 각각 5.00 m, 4.52 m이다. 이들 압력수두의 평균제곱근오차(RMSE)는 0.40 m이며 정규화된 RMSE는 8.9%로 모사결과는 적합한 것으로 판단된다. 취수가능량 평가는 모사결과 각각의 수평정에서 산출된 취수량과 전체 취수량을 평가하였다. 각각 수평정에서의 취수가능량은 430~1,810 m³/day으로 총 5,510 m³/day로 산출되었다. 계산된 취수가능량과 현장에서 측정된 취수량을 비교한 결과 오차율은 0.8~56.1%로 정규화된 RMSE는 12.0%

로 나타나 모델검증이 적합한 것으로 판단된다. 단, 제내지의 압력수두 강하에 대한 영향 검토가 필요할 것으로 판단된다.

이상에서 살펴본 바와 같이 수평정을 포함한 방사형 집수정에 대한 개발가능량 평가에 있어 제내지, 제외지 및 하상퇴적층에 대한 현장조사가 필수적이며 신뢰성 있는 조사자료를 토대로 수치모의를 수행할 경우 향후 방사형집수정에 대한 설계, 시공성 평가 및 운전효율에 대한 개선안을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

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

REFERENCES

- Chung, J.H., Park, J.H., Park, C.K., Yang, J.S., Kim, D.K., Jeong, K.C., Choi, O.S. and Bu, S.A., 2004, Calculation of the yield of bank filtration by using the horizontal collector wells. *The Journal of Engineering Geology*, 14(4), 417-427 (in Korean with English abstract).
- Jeon, S.K., Koo, M.H., Kim, Y.J. and Lang, I.O., 2005, Statistical analysis of aquifer characteristics using pumping test data of national groundwater monitoring wells for Korea. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 10(6), 32-44 (in Korean with English abstract).
- Kim, D.H., Choi, W.C. and Chang, T.W., 1980, The geological map of the Pyeongtaeg sheet. Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources, 31 p.
- Kim, G.B., Jeong, J.H. and Lee, S.H., 2014, Evaluation of groundwater yield from riverbank filtration system considering water levels' increase in the middle Nakdong river. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50(3), 401-407 (in Korean with English abstract).
- Kim, G.B., Lee, J.W. and Lee, C.H., 2015, Estimation of drilling velocity for horizontal wells based on alluvial sediment characteristics. *The Journal of Engineering Geology*, 25(2), 273-280 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.S., 2008, Characterization of groundwater flow to horizontal or slanted well using numerical modeling. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 13(2),

- 54-61 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.S. and Jeong, J.H., 2009, Numerical analysis of horizontal collector well in riverbank filtration. *Journal of the Geological Society of Korea*, 14(1), 1-10 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.M. and Yeh, G.T., 2004, COFAT3D: A finite element model for fully coupled groundwater flow and solute and heat transport in three-dimensional saturated-unsaturated porous and fractured media. version 1.0. Technical Report GGEL-2004-12, Geological and Groundwater Engineering Laboratory, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea, 404 p.
- Lee, E.H., Lee, K.K., Kim, H.S. and Jeong, J.H., 2010, Evaluation of well production by a riverbank filtration facility with radial collector well system in Jeungsan-ri, Changnyeong-gun, Korea. *The Journal of Soil and Groundwater*, 15(4), 1-12 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.W., Chun, S.K., Yi, M.J., Kim, N.W., Chung, I.M. and Lee, M.H., 2015, Measurements of streambed hydraulic conductivity using drive-point piezometers and seepage meters in the upper reaches of Anseong stream, *The Journal of Engineering Geology*, 25(3), 413-420 (in Korean with English abstract).
- Lin, H.C., Richards, D.R., Yeh, G.T., Cheng, J.R., Cheng, H.P. and Jones, N.L., 1997, FEMWATER: A Three-Dimensional Finite Element Computer Model for Simulating Density-Dependent Flow and Transport in Variably Saturated Media. Report CHL-97-12, U.S. Army Corps of Engineers, 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, MS39180-6199.
- Oh, S.H., Jeong, J.H. and Park, S.G., 2012, Evaluation of pumping capacity of radial collector wells using Milojevic equation in the national river watershed, Korea. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 17(3), 10-20 (in Korean with English abstract).
- Park, J.Y., Choi, S.M., Kim, J.M. and Kim, G.B., 2015, Evaluation of impacts of radial arm configurations on performance and efficiency of radial collector wells using a detailed numerical modeling technique. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51(1), 81-92 (in Korean with English abstract).
- Van Genuchten, M.T., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- Therrien, R., McLaren, R.G., Sudicky, E.A. and Panday, S.M., 2005, HydroGeoSphere: A three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport. Manual (Draft), HydroGeoLogic Incorporation, Herndon, Virginia, USA, 322 p (reprinted in 2010, Groundwater Simulations Group, Waterloo, Ontario, Canada, 430 p).
- Yeh, G.T., 1987, 3DFEMWATER: A Three-Dimensional Finite Element Model of Water Flow through Saturated-Unsaturated Porous Media. Report 2904, Oak Ridge National Laboratory, U.S.A.
- Yeh, G.T., Huang G.B., Zhang, F., Cheng, H.P. and Lin, H.C., 2005, WASH123D: A numerical model of flow, thermal transport, and salinity, sediment, and water quality transport in WATERSHed systems of 1-D stream-river network, 2-D overland regime, and 3-D subsurface media, Technical report Submitted to US. EPA, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Central Florida, 4000 Central Florida Blvd., Orlando, FL.
- Yeh, G.T., Chang, J.R., Gwo, J.P., Lin, H.C., Martin, W. and Richards, D., 1994, 3DSALT: A Three-dimensional Salt Intrusion Model in Saturated-Unsaturated Media. Instruction Report HL-94-1. Waterway Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS.

Received : June 9, 2016

Revised : June 20, 2016

Accepted : June 20, 2016