

정밀 수치 모델링 기술을 이용한 방사형 집수정 성능 및 효율에 대한 수평정 배열의 영향 평가

박재용¹ · 최소망¹ · 김준모^{1,*} · 김규범²

¹서울대학교 지구환경과학부

²한국수자원공사 K-water연구원

요 약

수변 지하수 취수를 위한 방사형 집수정 성능 및 효율에 대한 수평정 배열(방향, 개수, 사잇각)의 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 정밀 수치 모델링 기술을 이용한 일련의 수치 모델링을 수행하였다. 정밀 수치 모델링 기술은 방사형 집수정 형태의 정밀 이산화, 방사형 집수정 취수 방식의 정확 구현 및 포화-불포화 지하수 유동 특성의 정확 고려와 같은 세 가지 요소로 구성되어 있다. 그리고 실제 수변 지역에서의 방사형 집수정 취수를 고려하여 대수층-하천 연계 방사형 집수정 모델을 구축하여 사용하였다. 수치 모델링 결과들은 본 연구에서 사용된 대수층-하천 연계 방사형 집수정 모델에서는 하천 방향으로 수직한 수평정을 포함하여 수평정 3개가 서로 45.0°의 사잇각을 가지면서 배열할 때에 방사형 집수정 성능 및 효율이 최적임을 보여준다. 이는 수평정 배열에 따른 수평정과 하천 간 거리 및 수평정들 간 수리학적 경쟁 및 간섭이 방사형 집수정 성능 및 효율을 결정하는 데에 중요한 역할을 함을 의미한다. 이와 같이 본 연구에서 이용된 정밀 수치 모델링 기술과 수치 모델링 결과들은 향후 방사형 집수정을 이용한 수변 지하수 대용량 간접 취수 시 방사형 집수정 성능 및 효율을 정량적으로 평가하고 최적화하는 데에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 방사형 집수정, 성능, 효율, 수평정 배열, 정밀 수치 모델링 기술

Jai-Yong Park, So-Mang Choi, Jun-Mo Kim and Gyoo-Bum Kim, 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. v. 51, no. 1, p. 81-92

ABSTRACT: A series of numerical simulations is performed using a detailed numerical modeling technique to evaluate quantitatively impacts of radial arm configurations (orientation, number, inter-arm angle) on performance and efficiency of radial collector wells for riverside groundwater intake. The detailed numerical modeling technique consists of three components such as precise discretization of complicated shapes of radial collector wells, rigorous realization of actual intake schemes of radial collector wells, and integrated simulation of saturated-unsaturated groundwater flow. An aquifer-river linked radial collector well model is also established and used considering groundwater intake with a radial collector well at an actual riverside area. The results of numerical simulations show that the performance and efficiency of the radial collector well is optimal when three radial arms are arranged with an inter-arm angle of 45.0° in the aquifer-river linked radial collector well model used in this study. This implies that the distance between the river and the arms and the competition and interference between the arms play important roles in determining the performance and efficiency of the radial collector well. The detailed numerical modeling technique used in this study and its results can be usefully applied in evaluating and optimizing the performance and efficiency of radial collector wells for large-capacity indirect intake of riverside groundwater using radial collector wells.

Key words: radial collector wells, performance, efficiency, radial arm configurations, detailed numerical modeling technique

(Jai-Yong Park, So-Mang Choi and Jun-Mo Kim, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Republic of Korea; Gyoo-Bum Kim, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-2-880-8190, E-mail: junmokim@snu.ac.kr

1. 서론

최근 기후변화 및 수질오염에 따른 국제적인 물 부족 현상은 과학적, 환경적, 사회적 및 경제적 측면에서 매우 중요한 문제로 떠오르고 있다. 특히 지속적으로 안정적인 수량 및 안전한 수질의 수자원을 확보하기 위해서는 어느 한 가지 수자원에 의존할 수 없으며, 수자원의 다변화가 필요하다. 따라서 다양한 방법으로 수자원을 확보하기 위한 연구들이 국내외적으로 활발히 진행되고 있다. 그러한 방법 중에서 수변 지하수 간접 취수는 강이나 호수 주변에 분포되어 있는 충적층의 여과 능력을 이용하면서 간접적으로 지표수 및 배경 지하수를 동시에 취수하는 방식으로 대용량의 안전한 수질의 수자원 확보가 가능한 중요한 취수 방식으로 지목되고 있다. 실제 수변 지하수 간접 취수는 근접한 곳에 수자원이 있는 수변 지역을 중심으로 개발되기 때문에 대용량의 수자원 확보가 가능할 뿐만 아니라 일반 정수 과정에서 처리하기 힘든 지표수의 오염 물질들도 충적층에 의하여 물리적 및 화학적 여과와 흡착 등에 의해 자연적으로 처리되기 때문에 안전한 수질의 수자원 확보가 가능하다(Hunt *et al.*, 2003).

수변 지하수 간접 취수는 수직정, 수평정, 경사정, 방사형(방사상) 집수정 등의 다양한 정호 형태로 이루어진다. 선진국의 경우에는 방사형 집수정을 활용한 수변 지하수 간접 취수가 많이 이루어져 왔으나 국내의 경우에는 아직 이 분야에 대한 기술 개발 및 경험이 선진국에 비해 초보적인 단계이다. 실제 방사형 집수정(radial collector well)은 한 개의 수직 원통형 집수정(collector, caisson)과 한 개 이상의 수평 방사형 수평정(radial arm, lateral) 무리로 구성되어 있어서 일반적인 수직정, 수평정, 경사정 등에 비해서 복잡한 형태를 이루고 있다. 방사형 수평정 무리의 특성은 수평정 방향, 수평정 개수 및 수평정 사이각 등으로 결정되어지며, 이를 수평정 배열(configuration, arrangement, array)이라 한다. 이러한 수평정 배열은 취수되는 물의 수질 및 수량을 변화시키는 중요한 인자로 알려져 있다(Moore *et al.*, 2012). 또한 실제 방사형 집수정 취수 방식은 방사형 수평정들의 끝이 집결되어 있는 수직 원통형 집수정 내 수위를 조절함으로써 방사형 수평정의 스크린을 따라 유입되어 수직 원통형 집수정으로 배수

되는 지하수와 지표수를 취수 및 양수하는 방식이다. 방사형 집수정은 일반적인 수직정, 수평정, 경사정 등에 비해서 대수층과의 접촉 면적이 넓어 광범위한 지역에 걸쳐 지하수위 하강이 적게 일어나 대용량 취수 시설로 적합하며, 유지 관리비가 저렴하다는 특징이 있다(Hunt, 2003). 반면에 방사형 집수정은 대형 구조물로 설치가 어렵고 비용이 많이 소요된다. 또한 일단 설치가 완료되면 재설치가 어렵다는 단점이 있다. 따라서 방사형 집수정을 이용하여 비용 대비 합리적으로 수자원을 확보하기 위해서는 방사형 집수정을 시공하기 전에 현장 지역의 지질학적 및 수리지질학적 특성을 고려하여 방사형 집수정 성능(performance) 및 효율(efficiency)을 정량적으로 평가하는 것이 매우 중요하다.

방사형 집수정에 대한 수치 모델링 연구는 MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988)를 이용하여 지하수위 하강을 분석하는 것이 대부분이었다(Ray *et al.*, 2002; Schafer, 2006; Ismail *et al.*, 2013). MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988)와 같은 유한 차분법(finite difference method, FDM)을 이용하여 공간 이산화하는 수치 모델은 직사각형 또는 직육면체의 격자를 가지기 때문에 방사형 수평정의 복잡한 형태를 정확하게 고려하기에는 무리가 있다. 한편 Su *et al.* (2007)은 적분 유한 차분법(integral finite difference method, IFDM)을 사용하여 공간 이산화하는 수치 모델인 TOUGH2 (Pruess *et al.*, 1999; Pruess, 2004)를 이용하여 방사형 집수정과 하천을 구현한 후에 방사형 집수정 운영 시 하천 근처 및 바닥에 생성되는 불포화대를 관찰하였다. 이 연구는 수변 지역에서 방사형 집수정 운영 시 불포화대가 광범위하게 생성될 수 있으며, 방사형 집수정 성능 및 효율 평가에 불포화대에서의 지하수 유동 연구가 필요함을 보여주었다. 또한 FEFLOW (DHI-WASY GmbH, 2009)와 같은 유한 요소법(finite element method, FEM)을 이용한 방사형 집수정 수치 모델링도 수행되었다. FEFLOW (DHI-WASY GmbH, 2009)의 일차원 선형 불연속 특징 요소(Diersch, 2009)를 활용하여 수평정을 표현한 후에 하천 및 하상퇴적층을 고려하여 방사형 집수정에서의 수위 하강을 평가하는 연구가 수행되었다(Kim, 2008; Kim and Jeong, 2009). 그리고 Lee *et al.* (2010)은 HydroGeoSphere (Therrien *et al.*,

2005)와 연동하여 방사형 집수정의 수평정 내에서의 지하수 유동 영역을 반영할 수 있는 유한 요소 모델을 개발하였다. 그러나 이러한 유한 요소 모델을 이용한 연구들도 수평정들을 삼차원 부피 요소로 정밀하게 이산화하지 못하고 일차원 선형 요소로 단순히 이산화하여 수치 모델링을 수행하였다. 이러한 기존 연구는 방사형 집수정 성능 및 효율에 큰 영향을 미칠 수 있는 수평정 배열을 포함한 실제 방사형 집수정 형태 및 제원을 정밀하게 평가할 수 없다는 한계를 지니고 있다. 또한 대부분의 기존 연구가 집수정 내 수위를 조절하는 실제 방사형 집수정 취수 방식을 경계 배수(drainage) 조건을 이용하여 정확하게 구현하지 못하고 내부 흡수(sink) 조건을 이용하여 간편하게 목표 또는 추정 취수량을 수평정에 할당하여 수치 모델링을 수행하였다. 이러한 기존 연구는 대수층 내 지하수위 하강 특성만으로 취수가량을 추정하거나 범위로 제시하기 때문에 방사형 집수정 성능 및 효율에 큰 영향을 미칠 수 있는 실제 방사형 집수정 취수 방식을 정확하게 평가할 수 없다는 한계를 지니고 있다. 따라서 이와 같은 기존 방사형 집수정 수치 모델링의 한계를 극복하는 새로운 수치 모델링 기술이 요구되고 있다.

본 연구의 목적은 정밀 수치 모델링 기술을 이용하여 수변 지하수 간접 취수를 위한 방사형 집수정 성능 및 효율에 대한 수평정 배열(방향, 개수, 사잇각)의 영향을 정량적으로 평가하는 것이다. 이를 달성하기 위하여 실제 하천 지역에서의 방사형 집수정 취수를 고려한 대수층-하천 연계 방사형 집수정 모델을 구축하고 구축된 모델 내에서 다양한 수평정 배열에 대한 일련의 수치 모델링을 수행하였다.

본 연구에서 방사형 집수정 성능(performance)은 전체 수평정에서의 정상 상태 취수율(steady-state water intake rate)로, 방사형 집수정 효율(efficiency)은 전체 수평정 길이 당 전체 수평정에서의 정상 상태 취수율(steady-state water intake rate per length of total radial arms)로 정의하였다. 그리고 개별 수평정 성능은 개별 수평정에서의 정상 상태 취수율로, 개별 수평정 효율은 개별 수평정 길이 당 개별 수평정에서의 정상 상태 취수율(steady-state water intake rate per length of individual radial arms)로 정의하였다.

2. 정밀 수치 모델링 기술

2.1 요소 1: 방사형 집수정 형태의 정밀 이산화

실제 방사형 집수정은 한 개의 수직 원통형 집수정과 여러 개의 수평 방사형 수평정들로 구성되어 있어서 일반적인 수직정, 수평정, 경사정 등에 비해서 그 형태가 매우 복잡하다. 그러나 기존 수치 모델링 기술은 방사형 집수정을 삼차원적으로 정밀하게 이산화하지 못하고 주로 대응 수직정(McWhorter and Sunada, 1977), 균우물(Chung *et al.*, 2004) 및 일차원 수평정(Kim and Jeong, 2009; Lee *et al.*, 2010) 등으로 단순히 이산화하였다. 이러한 기존 수치 모델링 기술은 방사형 집수정 성능 및 효율에 대한 삼차원적인 수직 집수정과 방사형 수평정의 특성 및 배치 등의 영향을 정밀하게 평가할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 삼차원 부피 요소를 이용하여 실제 방사형 집수정 형태를 정밀하게 이산화하는 요소 기술을 포함한 정밀 수치 모델링 기술을 사용하였다.

2.2 요소 2: 방사형 집수정 취수 방식의 정확 구현

실제 방사형 집수정 취수 방식은 방사형 수평정들의 끝이 집결되어 있는 수직 원통형 집수정 내 수위를 조절함으로써 방사형 수평정의 스크린을 따라 유입되어 수직 원통형 집수정으로 배수되는 지하수와 지표수를 취수 및 양수하는 방식이다. 그러나 기존 수치 모델링 기술은 방사형 집수정의 단순 이산화 등의 이유를 포함하여 집수정 내 수위를 조절하는 실제 방사형 집수정 취수 방식을 경계 배수(drainage) 조건을 이용하여 정확하게 구현하지 못하고 내부 흡수(sink) 조건을 이용하여 간편하게 목표 또는 추정 취수량을 수평정에 할당하였다(Su *et al.*, 2007; Kim and Jeong, 2009; Lee *et al.*, 2010). 이러한 기존 수치 모델링 기술은 방사형 집수정의 성능 및 효율에 대한 집수정으로 배수되는 방사형 집수정 취수 방식의 영향을 정확하게 평가할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 경계 배수 조건을 이용하여 실제 방사형 집수정 취수 방식을 정확하게 구현하는 요소 기술을 포함한 정밀 수치 모델링 기술을 사용하였다.

2.3 요소 3: 포화-불포화 지하수 유동 특성의 정확 고려

실제 포화-불포화 지하수 유동 특성은 방사형 집

수정 운영에 의해 그 주변에서 광범위하게 지하수면이 하강함에 따라서 불포화대가 생성되고 지표면 아래에서 포화-불포화 지하수 유동이 동시에 삼차원적으로 발생하는 것이다(Su *et al.*, 2007). 그러나 기존 수치 모델링 기술은 주로 방사형 집수정 운영 시 지하수면 위에서의 불포화 지하수 유동은 고려하지 못하고 지하수면 아래에서의 포화 지하수 유동만을 고려한다(Ray *et al.*, 2002; Schafer, 2006; Kim and Jeong, 2009; Lee *et al.*, 2010; Ismail *et al.*, 2013). 이러한 기존 수치 모델링 기술은 방사형 집수정 성능 및 효율에 대한 포화-불포화 지하수 유동 특성의 영향을 제대로 평가할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 포화-불포화 지하수 유동 모델 및 물성을 이용하여 실제 포화-불포화 지하수 유동 특성을 정확하게 고려하는 요소 기술을 포함한 정밀 수치 모델링 기술을 사용하였다.

2.4 수치 모델

본 연구에서는 상기한 정밀 수치 모델링 기술의 세 가지 요소 기술들을 수치학적으로 정확하게 실현하기 위하여 범용 다차원 수리동역학적 분산 수치 모델인 COFAT3D (Kim and Yeh, 2004)를 채택하였다. COFAT3D (Kim and Yeh, 2004)는 GMS (Groundwater Modeling System, <http://www.aquaveo.com>) 내에 포함되어 있는 3DFEMFAT (Yeh *et al.*, 1994)으로부터 교육과학기술부 21세기 프론티어 수자원의 지속적 확보 기술 개발사업 연구 성과의 하나로 개발되었다. 이 수치 모델은 범용 다차원 복합 유한 요소 모델(generalized multidimensional hybrid Lagrangian-Eulerian finite element model)로서 복잡한 지질 구조와 경계를 가지는 포화-불포화 불균질 진이방성 다공질, 파쇄질 및 파쇄다공질 지질 매체와 개별 절리 내에서의 밀도 의존적 지하수 유동(density-dependent groundwater flow) 및 다성분 용질 이동(multicomponent solute transport) 현상은 물론 강수-증발산-침투-삼출(precipitation-evapotranspiration-infiltration-seepage) 현상도 모델링할 수 있다. 이러한 COFAT3D (Kim and Yeh, 2004)는 선(2 절점) 요소, 사면체(4 절점) 요소, 삼각기둥(6 절점) 요소 및 육면체(8 절점) 요소 등을 이용하여 복잡한 내외부 구조를 구현할 수 있다. 또한 Dirichlet, Neumann, Cauchy 및 mixed-type (variable) 등과 같은 다양한 지하수 유동 및 용질 이동 경계 조건을 설정할 수

있다. 그리고 12개의 포화-불포화 지하수 유동 모델(예, van Genuchten, 1980)을 고려하여 불포화대 내에서의 지하수 유동 및 용질 이동을 모델링할 수 있다.

3. 수치 모델링 개요

실제 수변 지역에서의 방사형 집수정 취수를 고려하기 위하여 하천, 대수층, 하상퇴적층 및 방사형 집수정으로 구성된 대수층-하천 연계 방사형 집수정 모델을 구축하였다(그림 1). 수치 모델링 영역(modeling domain)의 크기는 동서 방향 길이(x 축)가 2,000 m, 남북 방향 길이(y 축)가 1,000 m, 높이(z 축)가 15 m이다. 하천의 폭은 50 m, 깊이는 4.5 m이며, 하상퇴적층의 두께는 균일하게 0.25 m이다. 방사형 집수정의 제원은 다음과 같다. 집수정 중심으로부터 하천변까지의 거리는 53.5 m, 집수정 깊이는 지표면 아래 9 m, 집수정 내경은 6 m, 집수정 두께는 0.5 m, 집수정 내 수위는 수평정 중심에서 상부로 1 m이다. 수평정 설치 심도는 지표면 아래 7.5 m, 수평정 내경은 0.3 m, 수평정 길이는 100 m, 수평정 개공률(opening ratio)은 10%, 개수는 0~16개 사이에서 조절이 가능하다. 이러한 대수층-하천 연계 방사형 집수정 모델은 총 161,847 개의 절점과 150,874개의 삼차원 육면체 요소로 이산화되었으며, 이 중 집수정을 구성하는 요소는 1,680 개, 개별 수평정을 구성하는 요소는 40~48개이다.

수치 모델링 영역의 초기 조건은 지표면 아래 2.5 m에 위치하는 지하수면을 고려하여 모든 위치에서 수리 수두를 12.5 m로 설정하였다. 수치 모델링 영역의 상하 및 남북 경계면에는 비유동(no-flow) 경계

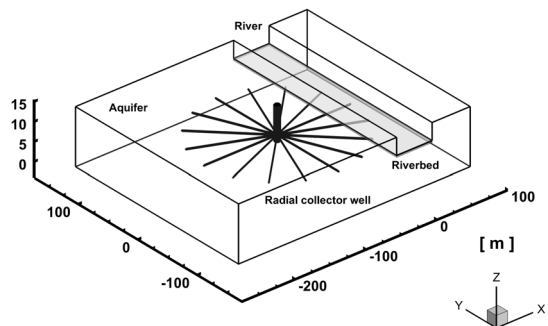


Fig. 1. Schematic diagram of the aquifer, river, riverbed, and radial collector well (modeling domain). The vertical coordinate axis is exaggerated 5 times.

조건을, 동서 및 하천 경계면에는 수리 수두가 12.5 m인 수두 고정(Dirichlet) 경계 조건을, 집수정 내부면(수평정 끝 경계면 제외)에는 비유동(no-flow) 경계 조건을, 그리고 집수정 내 수평정 끝 경계면에는 지표면 아래 7.5 m에 위치하는 집수정 내 수위를 고려하여 수리 수두가 8.5 m인 수두 고정(Dirichlet) 경계 배수(drainage) 조건을 적용하였다.

본 연구에 사용된 대수층의 수리지질학적 물성은 경기도 안성시 및 평택시에 위치한 안성천 일대 방사형 집수정 설치 현장 지역에서 취득된 시추 자료의 분석 결과를 사용하였다. 안성천 일대에 분포하는 세립~중립질 모래층(fine to medium-grained sand)에서의 현장 투수 시험 결과로부터 도출된 포화수리전도도 1.78×10^{-5} m/sec를 대수층(aquifer)에 적용하였다. 반면에 미사질층(silt)에 해당되는 하상퇴적층(riverbed)의 포화수리전도도에 대한 현장 자료가 존재하지 않고 국내 문헌 자료 또한 충분하지 않기 때문에 대수층 포화수리전도도의 1%인 1.78×10^{-7} m/sec로 가정하였다. 대수층 및 하상퇴적층의 포화-불포화 물성은 기존 문헌(van Genuchten, 1980; Carsel and Parrish, 1988)의 자료를 이용하였다. 한편 본 연구에서는 수평정(radial arm)을 파이프(pipe)로 고려하기 위하여 Darcy-Weisbach equation (Munson *et al.*, 1998)을 이용하였다. 이에 수평정과 평행한 방향의 수평정 포화수리전도도는 파이프 내경 0.3 m에 해당하는 2.76×10^{-4} m/sec로, 수평정과 수직한 방향의 수평정 포화수리전도도는 개공

물 10%를 고려하여 2.76×10^{-3} m/sec로 가정하였다. 이와 같이 수치 모델링에 사용된 대수층, 하상퇴적층 및 수평정의 수리지질학적 물성 값은 표 1에 정리되어 있다. 한편 상기한 바와 같이 집수정은 수치 모델링 영역에 비해서 그 크기가 매우 작고 그 내부면(수평정 끝 경계면 제외)을 통해서는 배수가 발생하지 않기 때문에 지하수 유동에 크게 기여하지 않는다. 따라서 대수층과 동일한 수리지질학적 물성 값을 집수정에도 사용하였다. 한편 본 연구에서는 대수층 구성 입자에 의한 수평정의 막힘 현상 및 그에 따른 수리지질학적 물성 변화는 고려하지 않았다.

본 연구에서는 하천이 존재하면서 360도 수평정 8개 중 8개 모듈을 운영하는 경우 1 (Case 1), 수평정 8개 중 3개를 운영하는 경우 2 (Case 2), 180도 수평정 9개 중 홀수 개를 운영하는 경우 3 (Case 3) 및 180도 수평정 9개 중 3개를 운영하는 경우 4 (Case 4)에 대해 방사형 집수정 성능 및 효율을 정량적으로 평가하였다. 경우 1과 경우 2를 위하여 수치 모델링 영역 내 구현된 16개의 수평정 중에서 360도에 걸쳐 45.0도 간격으로 8개의 수평정을 선별하였다. 선별된 8개의 수평정은 그림 2a에 도시되어 있다. 또한 경우 3과 경우 4를 위하여 수치 모델링 영역 내 구현된 16개의 수평정 중 하천 방향의 180도에 걸쳐 22.5도 간격으로 9개의 수평정을 선별하였다. 선별된 9개의 수평정은 그림 2b에 도시되어 있다. 한편 본 연구에서의 하천은 동수 구배가 없기 때문에 하천 수직 방향의 대칭을 고려하여 수평정을 선별하였다.

Table 1. Hydrogeological properties of the aquifer, riverbed, and radial arm.

Property	Aquifer (fine to medium sand)	Riverbed (silt)	Radial arm (pipe)
Porosity, n	0.41	0.36	1.00
Saturated hydraulic conductivity tensor			
$K_{sat\ x_1x_1}$ [m/sec]	1.78×10^{-5}	1.78×10^{-7}	2.76×10^4
$K_{sat\ x_2x_2}$ [m/sec]	1.78×10^{-5}	1.78×10^{-7}	2.76×10^3
$K_{sat\ x_3x_3}$ [m/sec]	1.78×10^{-5}	1.78×10^{-7}	2.76×10^3
Compressibility, β_b [m^2/N]	7.46×10^{-5}	1.11×10^{-2}	0.00
Residual water saturation, S_{wr}	0.1585	0.1944	1.0000
van Genuchten's (1980) unsaturated hydraulic parameters			
α_v [m^{-1}]	7.50	0.50	0.00
n_v	1.89	1.09	1.00

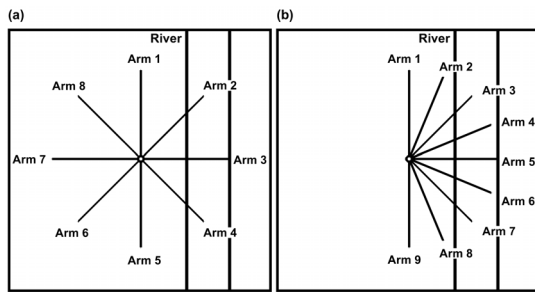


Fig. 2. Configurations of (a) 8 radial arms in 360 degree for Cases 1 and 2 and (b) 9 radial arms in 180 degree for Cases 3 and 4.

4. 수치 모델링 결과

4.1 경우 1: 360도 수평정 8개 중 8개 모두 운영

개별 수평정 성능 및 방사형 집수정 성능에 대한 하천 방향 및 하천 반대 방향 등과 같이 다양한 방향의 수평정들이 동시에 존재하는 배열의 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 360도 수평정 8개 중 8개 모두를 운영하는 경우 1 (Case 1)에 대하여 수치 모델링을 수행하였다. 경우 1의 수평정 배열은 그림 2a와 같다.

그림 3은 경우 1에 대한 개별 수평정 성능 및 방사형 집수정 성능을 도시한 그림이다. 가장 높은 개별 수평정 성능은 수평정 3에서의 $545 \text{ m}^3/\text{day}$ 이다. 수평정 3 다음으로 개별 수평정 성능이 높은 순서는 수평정 2와 수평정 4 ($429 \text{ m}^3/\text{day}$), 수평정 1과 수평정 5 ($90 \text{ m}^3/\text{day}$), 수평정 6과 수평정 8 ($36 \text{ m}^3/\text{day}$) 및 수평정 7 ($28 \text{ m}^3/\text{day}$)이다. 즉 하천 방향에 위치한 수평정 성능이 하천 반대 방향에 위치한 수평정 성

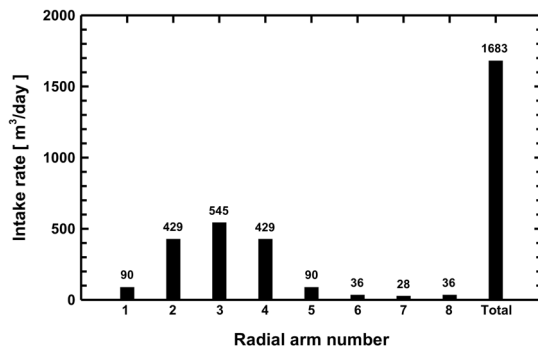


Fig. 3. Performance of individual radial arms and total radial collector well for Case 1.

능보다 현저하게 높다. 이는 하천 방향에 위치한 수평정이 하천 반대 방향에 위치한 수평정보다 하천으로부터 보다 많은 물을 공급받기 때문이다. 한편 방사형 집수정 성능은 $1,683 \text{ m}^3/\text{day}$ 이다.

이와 같이 360도 수평정 8개 중 8개 모두를 운영하는 경우에 대한 수치 모델링 결과는 하천이 존재하는 경우에 수평정 방향이 개별 수평정 성능 및 방사형 집수정 성능에 크게 영향을 미침을 보여준다. 따라서 개별 수평정 성능 및 방사형 집수정 성능에 대한 수평정 배열의 영향을 보다 더 다양한 경우에 대하여 정량적으로 평가할 필요가 있다.

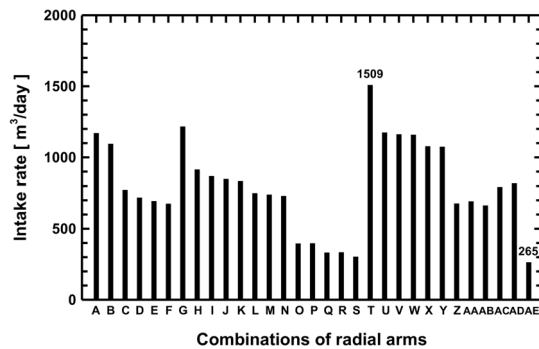
4.2 경우 2: 360도 수평정 8개 중 3개 운영

개별 수평정 성능 및 방사형 집수정 성능에 대한 수평정 방향의 영향을 보다 더 정량적으로 평가하기 위하여 360도 수평정 8개 중 3개를 운영하는 경우 2 (Case 2)에 대하여 수치 모델링을 수행하였다. 경우 2의 수평정 배열은 그림 2a와 같다. 360도 수평정 8개 중 임의의 수평정 3개를 운영하는 수학적 경우의 총수는 56개이다. 하지만 본 연구에서의 하천은 동수 구배가 없기 때문에 하천 수직 방향의 대칭을 고려하면 중복을 제외한 실제 경우의 총수는 31개가 된다. 예를 들면 수평정 1, 수평정 2 및 수평정 3을 운영하는 경우는 수평정 3, 수평정 4 및 수평정 5를 운영하는 경우와 같다. 이와 같은 총 31개 실제 경우의 수평정 번호 조합은 표 2에 정리되어 있다.

그림 4는 경우 2에 대한 방사형 집수정 성능을 도시한 그림이다. 가장 높은 방사형 집수정 성능은 수평정 2, 수평정 3 및 수평정 4로 이루어진 경우 2-T (Case 2-T)에서의 $1,509 \text{ m}^3/\text{day}$ 이다. 그리고 가장 낮은 방사형 집수정 성능은 수평정 6, 수평정 7 및 수평정 8로 이루어진 경우 2-AE (Case 2-AE)에서의 $265 \text{ m}^3/\text{day}$ 이다. 즉 하천 방향의 수평정들로 구성된 방사형 집수정 성능이 하천 반대 방향의 수평정들로 구성된 방사형 집수정 성능보다 현저하게 높다. 한편 경우 2-T (Case 2-T)에서는 수평정 3에서의 개별 수평정 성능 ($555 \text{ m}^3/\text{day}$)이 가장 높으며, 수평정 2와 수평정 4에서의 개별 수평정 성능($477 \text{ m}^3/\text{day}$)이 상대적으로 낮다(그림 5a). 그리고 경우 2-AE (Case 2-AE)에서는 수평정 7에서의 개별 수평정 성능($47 \text{ m}^3/\text{day}$)이 가장 낮으며, 수평정 6과 수평정 8에서의 개별 수평정 성능($109 \text{ m}^3/\text{day}$)이 상대적으로 높다(그림 5b).

Table 2. Combinations of radial arms for Case 2.

Case	Radial arm number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Case 2-A	○	○	○					
Case 2-B	○	○		○				
Case 2-C	○	○			○			
Case 2-D	○	○				○		
Case 2-E	○	○					○	
Case 2-F	○	○						○
Case 2-G	○		○	○				
Case 2-H	○		○		○			
Case 2-I	○		○			○		
Case 2-J	○		○				○	
Case 2-K	○		○					○
Case 2-L	○			○		○		
Case 2-M	○			○			○	
Case 2-N	○			○				○
Case 2-O	○				○	○		
Case 2-P	○				○		○	
Case 2-Q	○					○	○	
Case 2-R	○					○		○
Case 2-S	○						○	○
Case 2-T		○	○	○				
Case 2-U		○	○			○		
Case 2-V		○	○				○	
Case 2-W		○	○					○
Case 2-X		○		○		○		
Case 2-Y		○		○			○	
Case 2-Z		○				○	○	
Case 2-AA		○				○		○
Case 2-AB		○					○	○
Case 2-AC			○			○	○	
Case 2-AD			○			○		○
Case 2-AE						○	○	○

**Fig. 4.** Performance of radial collector well for Case 2.

이와 같이 360도 수평정 8개 중 3개를 운영하는 경우에 대한 수치 모델링 결과는 하천 방향으로 수직한 수평정 5를 포함하여 하천 방향의 수평정들이 방사형 집수정 성능을 높이는 데에 매우 유리함을 보여준다. 따라서 개별 수평정 성능 및 방사형 집수정 성능에 대한 하천 방향의 수평정 개수의 영향을 보다 더 다양한 경우에 대하여 정량적으로 평가할 필요가 있다.

4.3 경우 3: 180도 수평정 9개 중 홀수 개 운영

개별 수평정 성능 및 방사형 집수정 성능에 대한 하천 방향의 수평정 개수의 영향을 보다 더 정량적

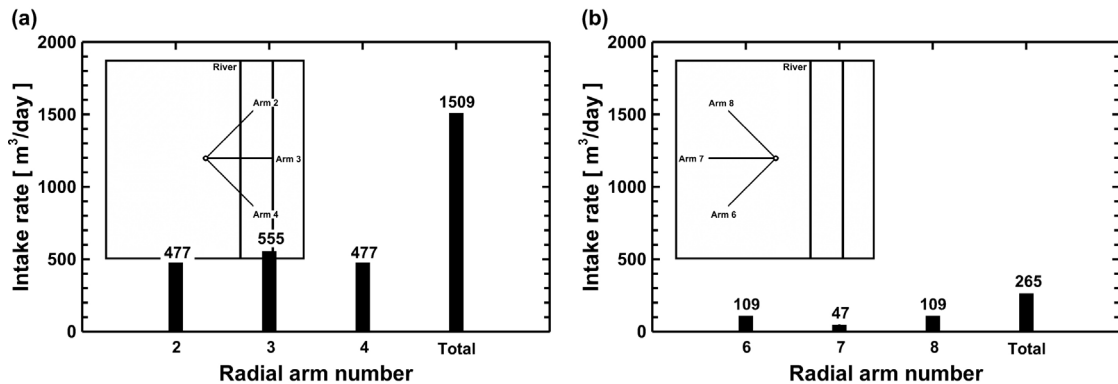


Fig. 5. Performance of individual radial arms and total radial collector well for (a) Case 2-T and (b) Case 2-AE.

으로 평가하기 위하여 180도 수평정 9개 중 흡수 개 (1개, 3개, 5개, 7개, 9개)를 운영하는 경우 3 (Case 3)에 대하여 수치 모델링을 수행하였다. 경우 3의 수평정 배열은 그림 2b와 같다. 180도 수평정 9개 중 임의의 흡수 개를 운영하는 수학적 경우의 총수는 256개이다. 하지만 본 연구에서의 하천은 동수 구배가 없기 때문에 하천 수직 방향의 대칭을 고려하면 중복을 제외한 실제 경우의 총수는 5개가 되며, 항상 수평정 5를 포함한다. 이와 같은 총 5개 실제 경우의 수평정 번호 조합은 표 3에 정리되어 있다.

그림 6은 경우 3에 대한 개별 수평정 성능과 방사형 집수정 성능 및 효율을 도시한 그림이다. 그림에서 보듯이 수평정 개수가 1개에서 9개로 증가할수록 방사형 집수정 성능은 점점 둔하게 증가하지만 수평정 5를 포함한 개별 수평정 성능은 계속적으로 감소한다. 즉 1개 수평정으로 이루어진 경우 3-A (Case 3-A)에서 방사형 집수정 성능($660 \text{ m}^3/\text{day}$)은 가장 낮지만 개별 수평정 성능($660 \text{ m}^3/\text{day}$)은 가장 높다(그림 6a). 반면에 9개 수평정으로 이루어진 경우 3-E (Case 3-E)에서 방사형 집수정 성능($2,333 \text{ m}^3/\text{day}$)은 가장 높지만 개별 수평정 성능($77\sim 449 \text{ m}^3/\text{day}$)은 가장 낮다(그림 6e). 이는 수평정 개수가 1개에서 9개로 증가함에 따라 수평정들 간에 수리학적 경쟁 및 간섭이 증가하기 때문이다. 그 결과 수평정 개수가 1개에서 9개로 증가할수록 방사형 집수정 성능은 증가하지만 방사형 집수정 효율은 감소한다(그림 6f). 따라서 수평정 흡수 개를 운영하는 경우에 방사형 집수정 성능 및 효율 측면에서 최적의 수평정 개수는 하천 방향으로 수직한 수평정 5를 포함하

여 3개 또는 5개이다. 하지만 방사형 집수정 설치 및 운영 비용을 고려하면 최적의 수평정 개수는 수평정 5를 포함하여 3개이다.

이와 같이 180도 수평정 9개 중 흡수 개를 운영하는 경우에 대한 수치 모델링 결과는 방사형 집수정 설치 및 운영 비용을 고려하면 수평정 개수가 하천 방향으로 수직한 수평정 5를 포함하여 3개일 때에 방사형 집수정 성능 및 효율이 최적임을 보여준다. 따라서 수평정 개수가 3개인 경우에 개별 수평정 성능 및 방사형 집수정 성능에 대한 수평정 간 거리 즉 사잇각의 영향을 보다 더 다양한 경우에 대하여 정량적으로 평가할 필요가 있다.

4.4 경우 4: 180도 수평정 9개 중 3개 운영

개별 수평정 성능 및 방사형 집수정 성능에 대한 하천 방향의 수평정 간 거리 즉 사잇각의 영향을 보다 더 정량적으로 평가하기 위하여 180도 수평정 9개 중 임의의 사잇각을 가지는 3개를 운영하는 경우 4 (Case 4)에 대하여 수치 모델링을 수행하였다. 경우 4의 수평정 배열은 그림 2b와 같다. 180도 수평정 9개 중 임의의 3개를 운영하는 수학적 경우의 총수는 84개이다. 하지만 본 연구에서의 하천은 동수 구배가 없기 때문에 하천 수직 방향의 대칭을 고려하면 중복을 제외한 실제 경우의 총수는 4개가 되며, 항상 수평정 5를 포함한다. 그리고 수평정 사잇각은 각각 22.5° , 45.0° , 67.5° , 90.0° 이다. 이와 같은 총 4개 실제 경우의 수평정 번호 조합은 표 4에 정리되어 있다.

그림 7은 경우 4에 대한 개별 수평정 성능과 방사형 집수정 성능 및 효율을 도시한 그림이다. 그림에

서 보다시피 수평정 사잇각이 22.5° 에서 90.0° 로 증가할수록 방사형 집수정 성능 및 수평정 5 양쪽 개별

수평정 성능은 증가하다가 감소하지만 수평정 5 성능은 계속해서 증가한다. 즉 수평정 사잇각이 45.0° 인 경우

Table 3. Combinations of radial arms for Case 3.

Case	Radial arm number								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Case 3-A					○				
Case 3-B				○	○	○			
Case 3-C			○	○	○	○	○		
Case 3-D		○	○	○	○	○	○	○	
Case 3-E	○	○	○	○	○	○	○	○	○

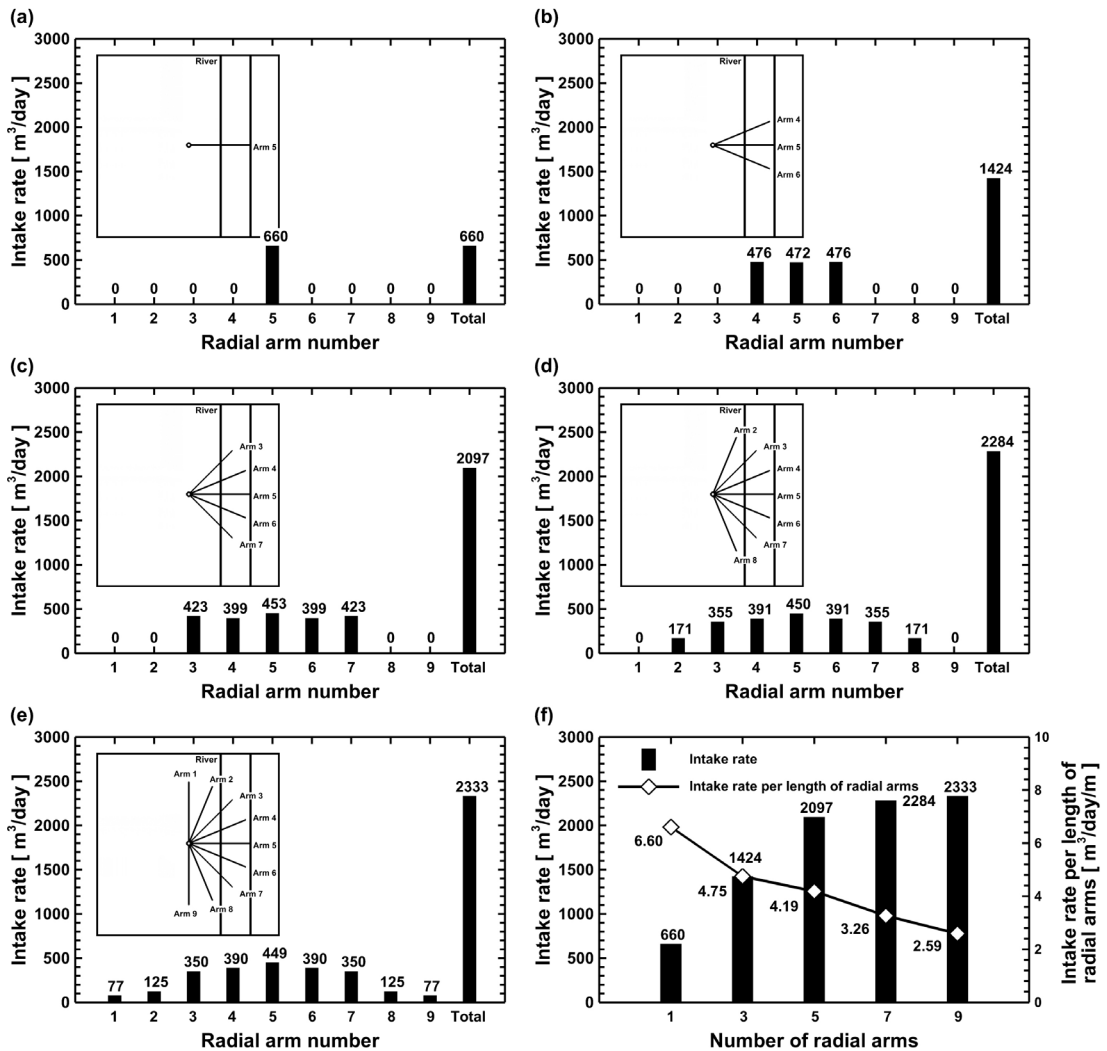


Fig. 6. Performance of individual radial arms and total radial collector well for (a) Case 3-A, (b) Case 3-B, (c) Case 3-C, (d) Case 3-D, and (e) Case 3-E and (f) performance and efficiency of total radial collector well for Case 3.

4-B (Case 4-B)에서 방사형 집수정 성능($1,509 \text{ m}^3/\text{day}$) 및 수평정 5 양쪽 개별 수평정 성능($477 \text{ m}^3/\text{day}$)은 가

장 높지만 수평정 5 성능($555 \text{ m}^3/\text{day}$)은 두 번째로 낮다(그림 7b). 반면에 수평정 사잇각이 90.0° 인 경우

Table 4. Combinations of radial arms for Case 4.

Case	Radial arm number								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Case 4-A				○	○	○			
Case 4-B			○		○		○		
Case 4-C		○			○			○	
Case 4-D	○				○				○

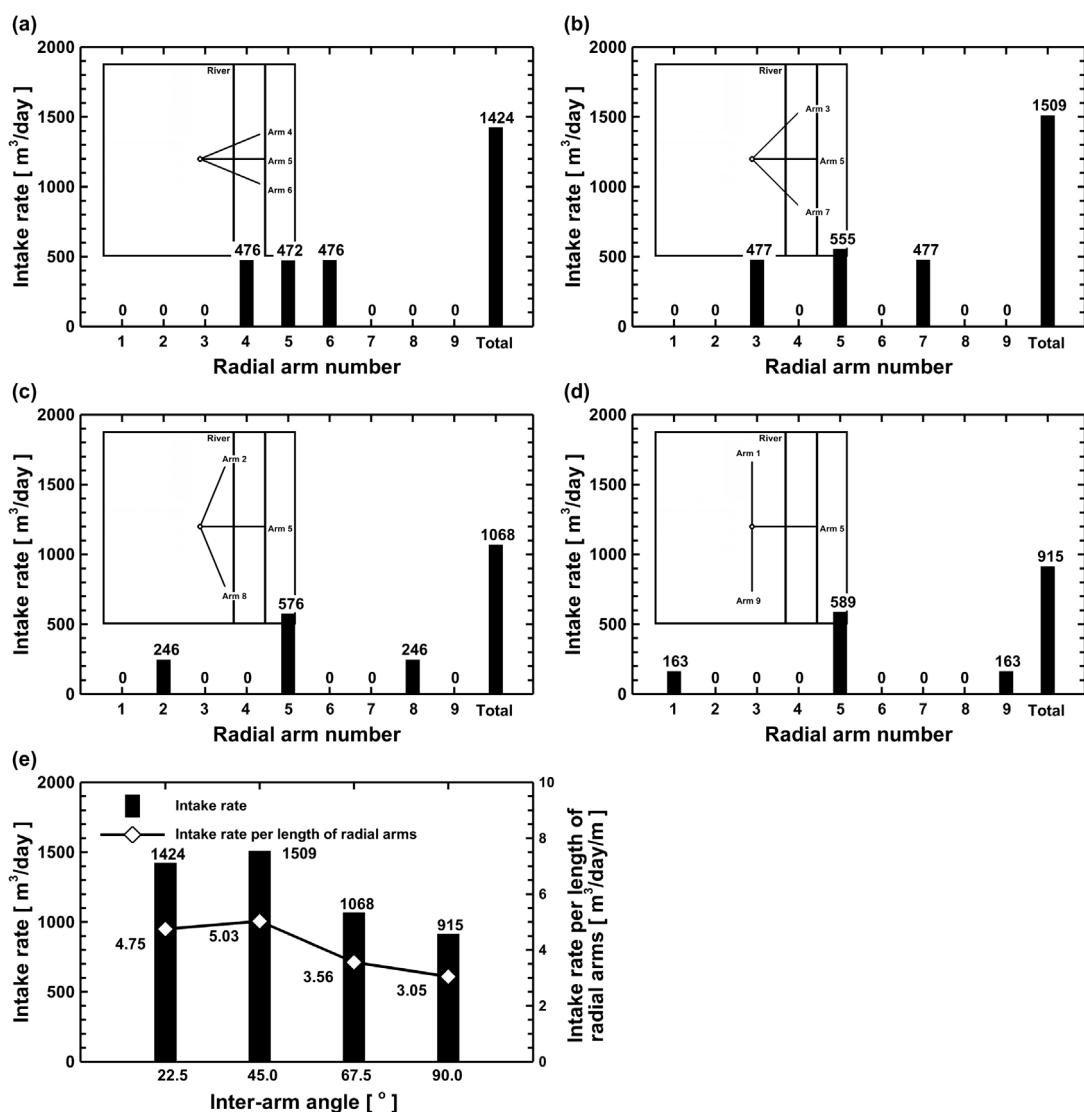


Fig. 7. Performance of individual radial arms and total radial collector well for (a) Case 4-A, (b) Case 4-B, (c) Case 4-C, and (d) Case 4-D and (e) performance of individual radial arms and efficiency of total radial collector well for Case 4.

4-D (Case 4-D)에서 방사형 집수정 성능($915 \text{ m}^3/\text{day}$) 및 수평정 5 양쪽 개별 수평정 성능($163 \text{ m}^3/\text{day}$)은 가장 낮지만 수평정 5 성능($589 \text{ m}^3/\text{day}$)은 가장 높다 (그림 7d). 이는 수평정 사잇각이 22.5° 에서 90.0° 로 증가함에 따라 수평정들 간에 수리학적 경쟁 및 간섭이 감소함과 동시에 하천으로부터 거리가 멀어져 보다 적은 물을 공급받기 때문이다. 그 결과 수평정 사잇각이 22.5° 에서 90.0° 로 증가할수록 방사형 집수정 성능 및 효율은 증가하다가 감소한다(그림 7e). 따라서 수평정 개수가 하천 방향으로 수직인 수평정 5를 포함하여 3개인 경우에 방사형 집수정 성능 및 효율 측면에서 최적의 수평정 사잇각은 45.0° 이다.

이와 같이 180도 수평정 9개 중 3개를 운영하는 경우에 대한 수치 모델링 결과는 수평정 사잇각이 하천 방향으로 수직인 수평정 5를 포함하여 45.0° 일 때에 방사형 집수정 성능 및 효율이 최적임을 보여준다.

5. 결 론

수변 지하수 취수를 위한 방사형 집수정 성능(정상 상태 취수율) 및 효율(수평정 길이 당 정상 상태 취수율)에 대한 수평정 배열(방향, 개수, 사잇각)의 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 정밀 수치 모델링 기술을 이용한 일련의 수치 모델링을 크게 네 가지 경우에 대해서 수행하였다. 정밀 수치 모델링 기술은 방사형 집수정 형태의 정밀 이산화, 방사형 집수정 취수 방식의 정확 구현 및 포화-불포화 지하수 유동 특성의 정확 고려와 같은 세 가지 요소로 구성되어 있다. 그리고 실제 수변 지역에서의 방사형 집수정 취수를 고려하여 대수층-하천 연계 방사형 집수정 모델을 구축하여 사용하였다. 첫 번째 경우(360도 수평정 8개 중 8개 모두 운영)에 대한 수치 모델링 결과는 하천이 존재하는 경우에 수평정 방향이 개별 수평정 성능 및 방사형 집수정 성능에 크게 영향을 미침을 보여준다. 두 번째 경우(360도 수평정 8개 중 3개 운영)에 대한 수치 모델링 결과는 하천 방향으로 수직인 수평정을 포함하여 하천 방향의 수평정들이 방사형 집수정 성능을 높이는 데에 매우 유리함을 보여준다. 세 번째 경우(180도 수평정 9개 중 흡수 개 운영)에 대한 수치 모델링 결과는 방사형 집수정 설치 및 운영 비용을 고려하면 수평정 개수가 하천 방향으로 수직인 수평정을 포함하여 3개일 때

에 방사형 집수정 성능 및 효율이 최적임을 보여준다. 네 번째 경우(180도 수평정 9개 중 3개 운영)에 대한 수치 모델링 결과는 수평정 사잇각이 하천 방향으로 수직인 수평정을 포함하여 45.0° 일 때에 방사형 집수정 성능 및 효율이 최적임을 보여준다. 결론적으로 본 연구에서 사용된 대수층-하천 연계 방사형 집수정 모델에서는 하천 방향으로 수직인 수평정을 포함하여 수평정 3개가 서로 45.0° 의 사잇각을 가지면서 배열할 때에 방사형 집수정 성능 및 효율이 최적임을 보여준다. 이는 수평정 배열에 따른 수평정과 하천 간 거리 및 수평정들 간 수리학적 경쟁 및 간섭이 방사형 집수정 성능 및 효율을 결정하는데에 중요한 역할을 함을 의미한다. 이와 같이 본 연구에서 이용된 정밀 수치 모델링 기술과 수치 모델링 결과들은 향후 방사형 집수정을 이용한 수변 지하수 대용량 간접 취수 시 방사형 집수정 성능 및 효율을 정량적으로 평가하고 최적화하는 데에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 이를 위해서는 보다 많고 다양한 실제 방사형 집수정 현장 시험 또는 운영 결과에 대한 수치 모델링 수행, 비교, 보정 및 검증이 필요하다. 한편 본 연구에서는 대수층 구성 입자에 의한 수평정의 막힘 현상 및 그에 따른 수리지질학적 물성 변화는 고려하지 않았다.

사 사

본 연구는 국토교통부 산하 국토교통과학기술진흥원의 물관리연구사업 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 본 연구는 또한 부분적으로 미래창조과학부 산하 한국연구재단의 Brain Korea 21 사업 지원에 의해 수행되었습니다. 아울러 본 논문의 심사 과정에서 발전적인 조언과 비판을 해주신 정교철 교수님과 익명의 심사자님께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Carsel, R.F. and Parrish, R.S., 1988, Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24, 755-769.
- Chung, J.H., Park, J.H., Park, C.K., Yang, J.S., Kim, D.K., Jeong, K.C., Choi, Y.S. and Bu, S.A., 2004, Calculation of the yield of bank filtration by using the horizontal collector wells. *Journal of Engineering Geology*, 14,

- 417-427 (in Korean with English abstract).
- DHI-WASY GmbH, 2009, DHI-WASY software FEFLOW: Finite element subsurface flow and transport simulation system, White Papers. DHI-WASY GmbH, Berlin, Germany, various pages.
- Diersch, H.J.G., 2009, Discrete feature modeling of flow, mass and heat transport processes by using FEFLOW. In: DHI-WASY software FEFLOW: Finite element subsurface flow and transport simulation system, White Papers, Volume 1. DHI-WASY GmbH, Berlin, Germany, 151-198.
- Hunt, H., 2003, American experience in installing horizontal collector wells. *Water Science and Technology Library*, 43, 29-34.
- Hunt, H., Schubert, J. and Ray, C., 2003, Conceptual design of riverbank filtration systems. *Water Science and Technology Library*, 43, 19-27.
- Ismail, W.M.Z.W., Yusoff, I. and Rahim, B.E.E.A., 2013, Simulation of horizontal well performance using Visual MODFLOW. *Environmental Earth Sciences*, 68, 1119-1126.
- Kim, H.S., 2008, Characterization of groundwater flow to horizontal or slanted well using numerical modeling. *Journal of the Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 13, 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 Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 14, 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., Hyun, Y., 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, Chagyeong-gun, Korea. *Journal of the Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 15, 1-12 (in Korean with English abstract).
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1988, MODFLOW: A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1. Technical Report TWI 6-A1, United States Geological Survey, Reston, Virginia, USA, 576 p.
- McWhorter, D.B. and Sunada, D.K., 1977, Ground-Water Hydrology and Hydraulics. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA, 290 p.
- Moore, R., Kelson, V., Wittman, J. and Rash, V., 2012, A modeling framework for the design of collector wells. *Groundwater*, 50, 355-366.
- Munson, B.R., Young, D.F. and Okiishi, T.H., 1998, Fundamentals of Fluid Mechanics, third edition. Wiley, New York, USA, 877 p.
- Pruess, K., 2004, The TOUGH codes - A family of simulation tools for multiphase flow and transport processes in permeable media. *Vadose Zone Journal*, 3, 738-746.
- Pruess, K., Oldenburg, C. and Moridis, G., 1999, TOUGH2 user's guide, version 2.0. Technical Report LBNL-43134, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, California, USA, 198 p.
- Ray, C., Soong, T.W., Lian, Y.Q. and Roadcap, G.S., 2002, Effect of flood-induced chemical load on filtrate quality at bank filtration sites. *Journal of Hydrology*, 266, 235-258.
- Schafer, D.C., 2006, Use of aquifer testing and groundwater modeling to evaluate aquifer/river hydraulics at Louisville Water Company, Louisville, Kentucky, USA. In: Hubbs, S.A. (ed.), *Riverbank Filtration Hydrology: Impacts on System Capacity and Water Quality*, Nato Science Series IV, Earth and Environmental Sciences, Volume 60. Springer, Dordrecht, Netherlands, 179-198.
- Su, G.W., Jasperse, J., Seymour, D., Constantz, J. and Zhou, Q., 2007, Analysis of pumping-induced unsaturated regions beneath a perennial river. *Water Resources Research*, 43, W08421, doi:10.1029/2006WR005389.
- 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).
- van Genuchten, M.Th., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- Yeh, G.T., Cheng, J.R. and Cheng, H.P., 1994, 3DFEMFAT: A 3-dimensional finite element model of density-dependent flow and transport through saturated-unsaturated media, version 2.0. Technical Report, Department of Civil and Environmental Engineering, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, USA, 200 p.

Received : November 4, 2014

Revised : January 30, 2015

Accepted : January 30, 2015