

경남 창녕군 증산리 일대 방사집수정을 활용한 강변 여과수 개발량 평가

이은희¹ · 현윤정¹ · 이강근^{1*} · 김형수² · 정재훈³

¹서울대학교 지구환경과학부, ²중원대학교 에너지자원공학부

³팬아시아워터

Evaluation of Well Production by a Riverbank Filtration Facility with Radial Collector Well System in Jeungsan-ri, Changnyeong-gun, Korea

Eunhee Lee¹ · Yunjung Hyun¹ · Kang-Kun Lee^{1*} · Hyoung-Soo Kim² · Jae-Hoon Jeong³

¹School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

²Department of Alternative Energy Development, Jungwon University

³Pan Asia Water Co.

ABSTRACT

Well production by a riverbank filtration facility with multi-radial collector well systems in Jeungsan-ri, Changnyeong-gun, Korea was evaluated. In this study, the drawdown at collector wells due to pumping and groundwater inflow rates along the horizontal arms of the collector wells were computed through numerical simulations. Sensitivities of the well production to hydraulic conductivity and well flow coefficient, which represents the resistance to the flow from the aquifer to the horizontal arms, were analyzed. Simulation results showed that, with given proposed pumping rate conditions, the drawdown in the caisson exceeded maximum drawdown constraints in the study site and the adjustment of the pumping rate at each well is needed. The drawdown is affected by the hydraulic conductivity of the main aquifer and the well flow coefficient, which means the profound field investigation of the study site is needed to accurately estimate the efficiency of riverbank filtration through radial collector wells.

Key words : Riverbank filtration, Radial collector well, Numerical method

1. 서 론

강변 여과수(Riverbank filtration) 방식은 하천 인접에서 정호의 양수를 통해 자연 지층을 통과한 하천수와 배후의 지하수를 간접적으로 취수하는 지하수 인공함양 방식이다(김형수 등, 1999). 강변 여과수 취수 시 일반적 정수과정으로 처리되기 힘든 오염물질을 제거할 수 있는데, 특히 지아디아(Giardia), 크립토스포리디움(Cryptosporidium) 등 지표수에서 발견되는 병원성 원생동물도 강변 여과 방식으로 확보된 원수에서 효과적으로 제거되는 것으로 알려져 있다. 이 밖에 하천수의 유기 미량 오염인자(Organic Micropollutants), 트리할로메탄 발생량(Trihalomethane Formation Potential, THMFP), 소독 부산물 발생

량(Disinfection By-Product Formation Potential, DBPFP) 또한 강변 여과를 통해 현저하게 제거되는 것으로 보고되었다(Sacher and Brauch, 2002; Weiss et al., 2003). 강변 여과 취수는 독일, 미국 등 국외에서 이미 100여 년 전 부터 수자원의 효과적인 확보를 위해 활용되어 왔으며 이에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다(Ludwig et al., 1997; Schubert, 2002; Verstraeten et al., 2002; Weiss et al., 2005; Abdel-Fattah et al., 2008). 현재 우리나라에서는 창원시 대산면과 북면의 낙동강 본류 하안 지역에 강변 여과 취수 시설을 설치하여 운영 중이며, 경상남도 함안군 칠서면 근처에도 취수정을 설치하여 여과된 지표수를 주변 법수면, 대산면, 군북면 지역에 공급하고 있다. 또한 김해시는 생림면 판섬에 180,000 m³/day 규모

*Corresponding author : kkleee@snu.ac.kr

원고접수일 : 2009. 6. 25 심사일 : 2009. 6. 29 게재승인일 : 2009. 12. 16

질의 및 토의 : 2010. 10. 31 까지

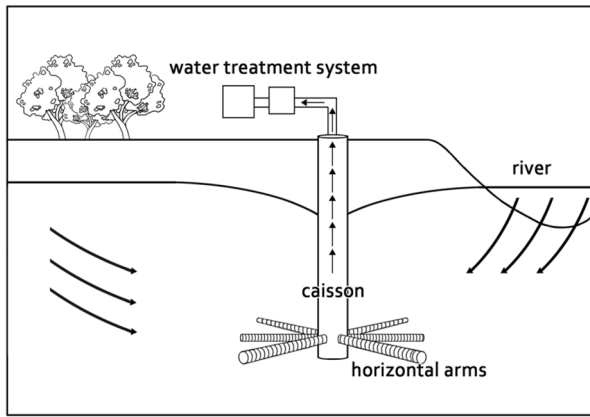


Fig. 1. Conceptual diagram of riverbank filtrations and structure of a radial collector well.

의 강변여과수 취수장 공사를 실시하고 있으며, 본 논문의 연구 지역인 경남 창원군 증산리에도 방사집수정을 활용한 100,000 m³/day 규모의 강변여과수 취수장 개발을 진행 중이다.

방사집수정에는 일반적으로 수직 원통형 케이슨에 여러 개의 수평 정호가 부착되어 있으며, 수평 정호의 스크린관을 통해 지하수가 유입된다. 방사집수정은 수직정에 비해 대수층과의 접촉 면적이 넓어서 취수의 영향이 고루 분산되어 대수층의 수위 강하가 적게 일어나며, 수평 정호를 통한 지하수의 유입 속도가 느려 스크린에 이물질이 상대적으로 적게 부착되므로 우물 청소 주기가 길어지고 좀 더 간편해 지는 장점이 있다(Bakker et al., 2005). 특히 하천 인접에 위치한 방사집수정은 수평 정호를 통해 많은 양의 하천수가 유입되므로 최근 우리나라에서 상수원수로서의 강물을 간접적으로 취수하는 방법으로 많은 주목을 받고 있다(Fig. 1). 최근 창원시 대산면에 위치한 강변 여과수 취수장에서 한 개의 방사집수정이 운영 중이며 방사집수정을 이용한 강변 여과수 개발은 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 현재 김해시와 창원시 대산면, 경남 창원군 증산리에서도 추가적으로 운용할 방사집수정을 설치 중에 있다.

그러나 방사집수정은 설계 및 시공이 어려우며 초기 비용이 많이 드는 단점이 있다. 일반적으로 방사집수정의 중앙 케이슨은 지름 5 m, 길이 30 m 이상의 대형 구조물이다. 수평 정호의 설치에는 보통 중앙 케이슨을 설치한 후, 주변의 지층을 수평으로 굴착하면서 이를 따라 수평정호를 설치하는데, 일반적으로 설치되는 수평정호의 길이 역시 20 m 이상의 대형 구조물이므로 이 또한 설치가 어렵고 비용도 많이 든다. 따라서 방사집수정의 설계 및 시공 이전에, 개발 지역이 강변 여과수 개발과 방사집수정 설

치에 적합한 장소인지를 파악해야 비용 절감적인 수자원 확보가 가능하며 따라서 연구 지역의 초기 현장 조사 및 효율 평가는 매우 중요하다.

그러나 방사집수정의 효율 평가는 방사정의 구조 특성상 그 계산 과정이 복잡하여 잘 실행되지 않고 있으며 이에 따라 방사집수정을 활용한 강변 여과 개발 가능성 평가도 제대로 이루어지지 못하고 있다. 실제 수평정호로 유입되는 지하수의 분포는 대수층과 파이프 내 지하수 수두차에 의해 달라지며, 이 때 수평정호 내 지하수의 수두 변화는 흐름 영역에 따라 다르게 변화한다. 그러나 이러한 수평 정호로의 지하수의 유입과 흐름 양상은 기존의 상용 프로그램으로 모사가 어렵다. 최근 수평 정호 내 지하수의 흐름을 모사하기 위한 모델들이 개발되고 있지만 이들은 대부분 고정 플렉스 경계를 사용하여 수평정을 통해 지하수가 고르게 유입된다고 가정하거나 파이프 내 흐름 영역에 따른 마찰 계수의 변화를 고려하지 못하고 또 대수층에서 수평정호로 지하수 유입 시 발생하는 스크린과 충전 물질에 의한 정호 수두 손실을 반영하지 못하는 등 수평정과 대수층간의 상호 작용을 모사하는 데 한계가 있다(Chen et al., 2003; Bakker et al., 2005).

따라서 본 연구에서는 수평 정호 내 다양한 지하수 흐름 영역을 반영한 3차원 수치 모델을 개발하고 이를 방사집수정을 활용한 강변 여과수 개발 가능성을 평가에 적용하고자 하였다. 본 연구에서 개발되어 사용된 모델은 대수층과 수평 정호간의 상호 작용을 모사하여 수평 정호로 유입되는 지하수의 공간적 분포 양상을 나타낼 수 있다. 또한 이 모델에서는 방사집수정의 수평 정호 내에서 유체의 속도에 따라 층류(laminar flow)에서 난류(turbulent flow)에 이르는 모든 흐름 영역이 반영될 수 있으며, 이 밖에 스크린과 충전 물질에 의한 유체의 정호 수두 손실, 표면 거칠기(pipe roughness)에 의한 정호 내 수압의 변화도 고려될 수 있다. 개발된 모델은 경남 창원군 증산리 일대 방사집수정을 활용한 강변 여과수 개발량을 계산하고 개발 가능성을 평가하는데 사용되었다. 개발된 모델을 활용한 강변 여과수 효율성 평가는 부지 적합성, 집수정의 구조와 위치 선택 등을 결정하는데 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구 지역 개황

연구 지역은 경상남도 창원군 길곡면 증산리 일원으로 창원시 북쪽에 위치하고 있다. 연구 지역의 북쪽으로는 화왕산, 영취산, 관룡산 등이 험준한 산악 지형을 형성하고

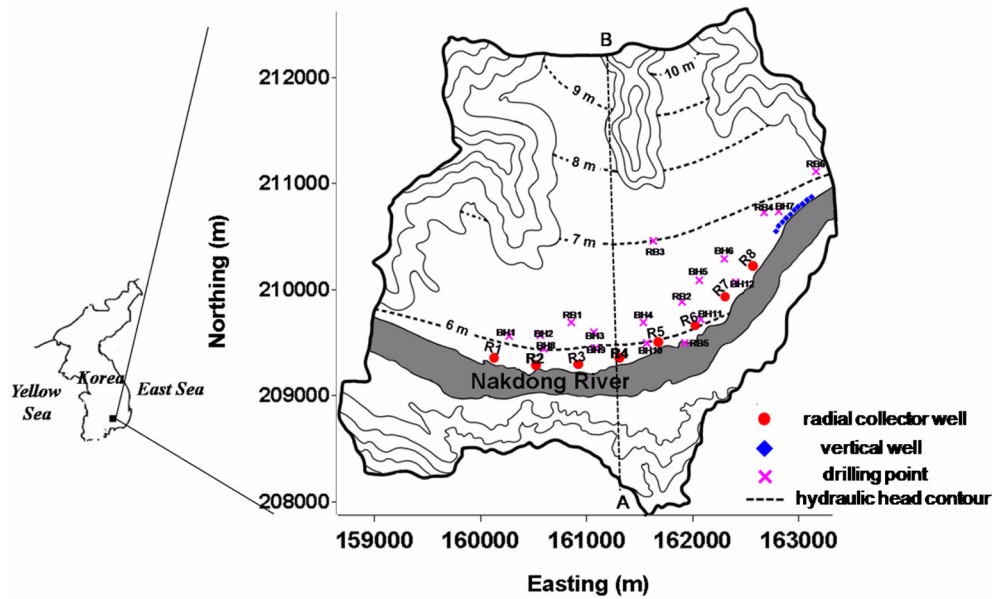


Fig. 2. Location of the study site and pumping wells. Nakdong River flows through the southern part of study site.

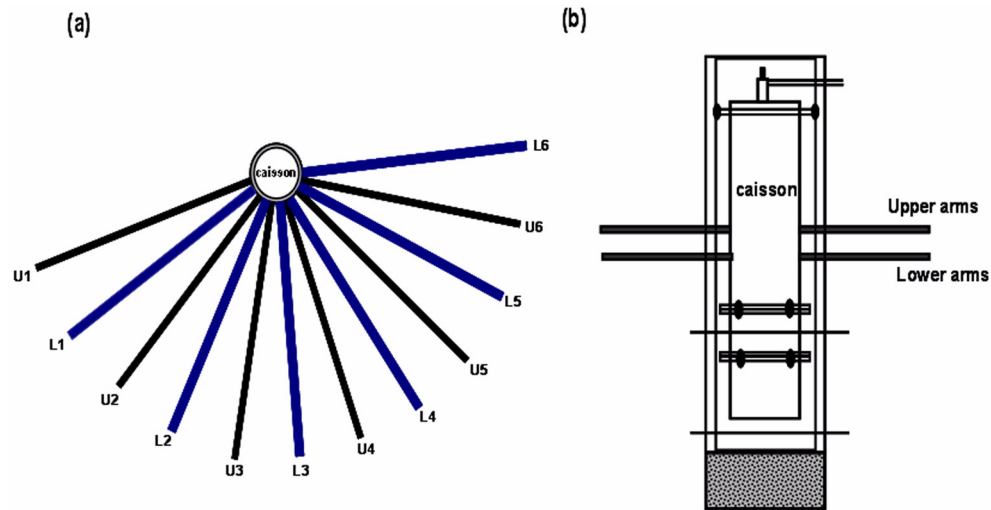


Fig. 3. The structure of a radial collector well. (a) Horizontal section of the well. (b) Cross section of the well: The well consists of two layers of horizontal arms, upper arms (U1-U6) and lower arms (L1-L6).

있고 남쪽으로는 낙동강을 따라 하안 평야가 발달하고 있다(Fig. 2). 연구 지역에는 현재 방사집수정을 활용한 강변여과수 개발을 위해 낙동강 변을 따라 8개의 방사집수정과 10개의 수직정이 계획 중에 있으며 후보 위치는 Fig. 2와 같다. 방사집수정에서의 예상 취수량은 관정당 하루 최대 10,000 m³이며 연구지역 동쪽에 위치한 수직정에서의 예상 취수량은 관정당 하루 최대 1,000 m³이다. Fig. 3은 연구지역에 설치될 방사집수정의 구조를 보여준다. 총 12개의 수평정호가 중앙 케이슨에 연결되어 있으

며 이 중 6개는 지표로부터 22 m 깊이에(U1-U6), 나머지 6개는 23 m 깊이(L1-L6)에 설치될 예정이다. 12개의 수평정호는 모두 낙동강 변을 향하도록 하여 보다 많은 양의 지표수를 채수할 수 있도록 설계 되었다. 설치될 수평정호의 길이는 실제 설계값을 적용, 각 30 m, 직경은 20 cm이며, 중앙 케이슨의 직경은 5 m를 사용하였다.

조사 지역의 지질학적 특성을 파악하기 위한 시추 조사가 수행되었으며 대수층의 수리전도도를 파악하기 위한 심도별 현장 투수 시험이 실행되었다. Fig. 2는 연구 지

역에 지층 분포를 파악하기 위해 설치된 시추공의 위치를 보여주고 있다. Fig. 4는 연구지역 지반 조사 시추공을 통해 얻은 지층 주상도를 보여준다. 시추 결과, 해당 지역은 크게 기반암, 풍화암, 자갈 모래층, 실트층, 모래층으로 구성되어 있으며 이 중 실트층은 모의 영역의 동쪽 일부 시추공에서만 나타났다. 연구 지역 일대, 시추공의 심도별 현장 투수 시험 결과는 Table 1과 같다.

Fig. 5는 시추 결과를 사용하여 구성한 연구 지역 지층 구조의 일부를 나타낸다. 이 중 실트층은 연구 지역의 동쪽 일대에만 산재하는 것으로 판단하여 연구 지역의 대수층 구성 시 제외하였다.

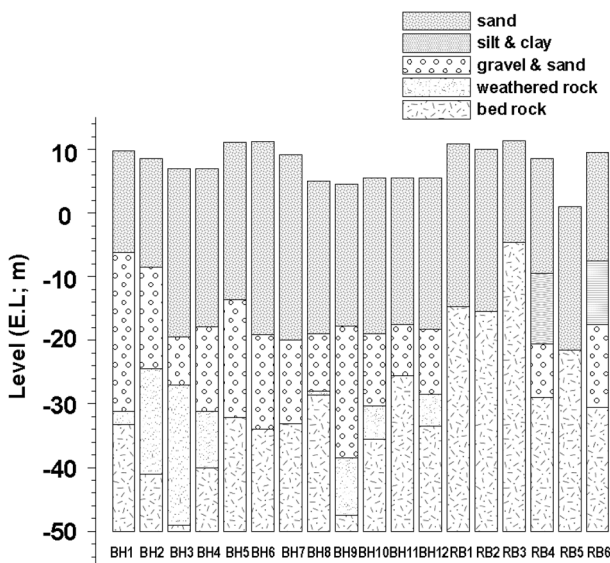


Fig. 4. Geologic columnar section of the drilling borehole.

3. 수치 모델의 개발

본 연구에서는 방사정과 대수층간의 상호 작용을 모사하기 위해 새로운 수치 모델을 개발하고 이를 적용하였다. 개발된 수치 모델은 방사집수정의 수평 정호 내에서 유체의 속도에 따라 층류(laminar flow)에서 난류(turbulent flow)에 이르는 모든 흐름 영역이 반영되도록 하였으며, 스크린과 충전 물질에 의한 유체의 정호 수두 손실, 표면 거칠기(pipe roughness)에 의한 정호 내 수압의 변화까지 고려할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 개발된 수치 모델은 광역적 지하수의 흐름을 모사하기 위하여 상용 프로그램인 HydroGeoSphere(Therrien et al., 2005)와 연동시켜 다양한 수리지질학적 환경에 쉽게 적용 가능하도록 하였다.

개발된 모델에서는 전체 영역을 크게 1) 광역적 지하수 흐름 2) 대수층에서 수평정호로의 지하수 유입 3) 수평정호 내 지하수의 흐름으로 구분한 후 이들을 서로 연계시켜서 계산을 수행한다. 모델은 광역적 지하수 흐름과 수평정호 내 지하수의 흐름을 따로 계산하므로 모델링 도메인에 수평정호를 공동으로 둘 필요가 없다. 다만 도메인에서 수평정호가 위치하는 노드(node)를 따라 계산된 양수량을 대입하여 방사집수정의 구조적 특징을 반영하게 한다. 이러한 방식을 통하면, 모델링 도메인에 공동을 나타낼 필요가 없으므로 도메인 구성이 간단해지고 계산 효율이 증가하는 장점이 있다. 수평 정호를 따라 방사정호로 유입되는 지하수의 양은 두 모델의 상호 연계과정에서 계산하여 HydroGeoSphere에 양수량으로 대입한다. 본 논문에서는 각 영역에 대한 지배 방정식만 언급하기로 한다.

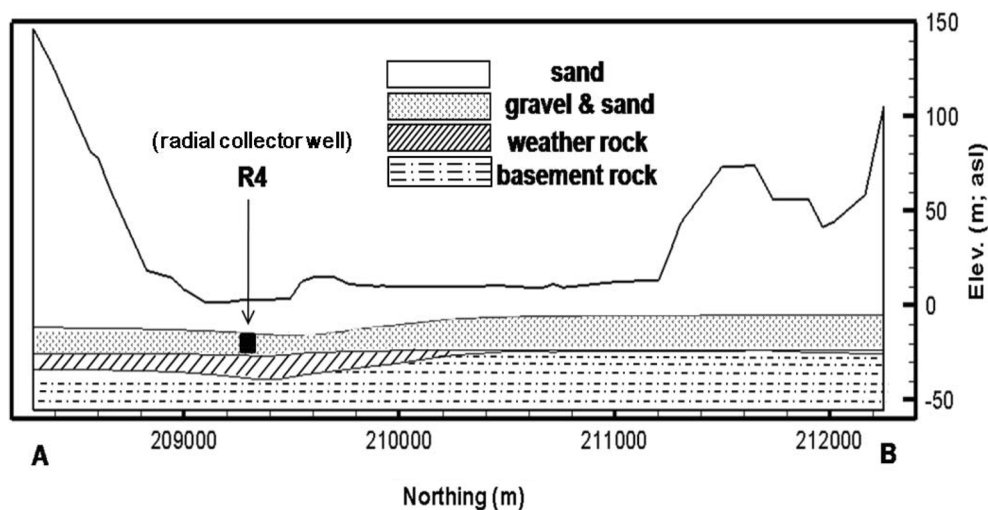


Fig. 5. Hydrogeologic profile of the study site along the AB section (Fig. 2). The location of radial collector well (R4) is also illustrated.

Table 1. Measured hydraulic conductivity of study site at the boreholes[unit: 1×10^{-4} cm/sec]

	X	Y	Sand		Gravel & Sand	
			Kx-Ky	Kz	Kx-Ky	Kz
BHA-1	160269.55	209525.03	4.360	0.436	103.000	10.300
BHA-2	160560.34	209518.46	3.250	0.325	151.000	15.100
BHA-3	161060.86	209516.09	2.190	0.219	188.000	18.800
BHA-4	161503.99	209651.34	9.590	0.959	116.000	11.600
BHA-5	162025.78	210011.75	3.390	0.339	55.800	5.580
BHA-6	162262.68	210247.88	2.430	0.243	64.500	6.450
BHA-7	162764.06	210706.20	36.600	3.660	59.000	5.900
BHA-8	160559.95	209368.76	27.600	2.760	141.000	14.100
BHA-9	161045.47	209347.54	31.800	3.180	213.000	21.300
BHA-10	161536.21	209464.94	57.900	5.790	229.000	22.900
BHA-11	161964.66	209670.15	54.800	5.480	65.500	6.550
BHA-12	162318.38	209981.99	11.100	1.110	57.800	5.780

3.1. 광역적 지하수 흐름 모사

광역적 지하수의 흐름을 모사하기 위해 상용 프로그램인 HydroGeoSphere를 사용하였으며 그 지배 방정식은 아래와 같다(Therrien et al., 2005).

$$\nabla \cdot (K(\theta) \nabla h) \pm \Gamma = \frac{\partial}{\partial t} (\theta_s S_w) \quad (1)$$

$K(\theta)$: 대수층의 수리전도도, [LT^{-1}]

h : 대수층 내 지하수위, [L]

Γ : 함양, 배출원, [$L^3 L^{-3} T^{-1}$]

θ_s : 포화 함수량, [1]

S_w : 포화도, [1]

3.2. 대수층에서 수평정호로의 지하수 유입

대수층에서 방사정 내 수평정으로 향하는 지하수 유입량은 대수층과 수평정 사이 유체의 압력차와 수평정호의 직경, 스크린 넓이, 대수층-관정 흐름 계수를 사용하여 나타낼 수 있다(Mohamed and Rushton, 2006).

$$q = 2\pi R d C (h - H) \quad (2)$$

q : 수평정호로의 지하수 유입량, [$L^3 T^{-1}$]

R : 수평정호의 반지름, [L]

d : 수평정호의 스크린 너비, [L]

C : 대수층-관정 흐름 계수, [T^{-1}]

h : 대수층의 수위, [L]

H : 수평정호 내 수위, [L]

3.3. 수평정호 내 지하수의 흐름

수평정호 내 지하수의 흐름은 Darcy-Weisbach 방정식을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다(Munson et al., 1998).

$$\Delta H = f \frac{L u^2}{D 2g} \quad (3)$$

ΔH : 파이프 내 수두 감소, [L]

f : 마찰 저항 계수, [1]

L : 수평정호의 길이, [L]

D : 수평정호의 직경, [L]

u : 수평정호 내 유체의 속도, [LT^{-1}]

g : 중력 가속도, [LT^{-2}]

이 때 마찰 저항 계수 f 는 파이프 내 유체의 레이놀즈수에 따라 다르게 나타난다. 본 연구에서 마찰 저항 계수를 나타내기 위해 사용한 식은 아래와 같다.

i) $Re \leq 2000$ (층류 영역)

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64\mu}{u D \rho} \quad (\text{Hagen-Poiseuille law}) \quad (4)$$

Re : 레이놀즈수, [1]

μ : 유체 점성도, [$ML^{-1} T^{-1}$]

ρ : 유체 밀도, [ML^{-3}]

ii) $2000 \leq Re \leq 3250$ (층류-난류 중간 영역)

$$f = \frac{f_{Re=3250} - f_{Re=2000}}{3250 - 2000} \times (Re - 2000) + f_{Re=2000}$$

(Schroeder, 2001) (5)

iii) $Re \geq 3250$ (난류 영역)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{e/D}{3.7065} - \frac{5.0272}{Re} \log \left(\frac{e/D}{3.827} - \frac{4.567}{Re} \log \left(\left(\frac{e/D}{7.7918} \right)^{0.9924} + \left(\frac{5.3326}{208.5 + Re} \right)^{0.9345} \right) \right) \right)$$

(Romeo et al., 2002) (6)

e : 파이프 거칠기, [L]

4. 수치 모의

본 연구에서는 방사집수정 운용에 의한 대수층 반응을 평가하기 위하여 3차원 수치 모의를 수행하였다. Fig. 6(a)는 모의에 사용한 도메인의 평면도와 경계조건을 나타낸다. 전체 영역의 크기는 14.54 km^2 이며 평균 두께는 60.0 m 이다. 모의에는 삼각 요소를 사용하였으며, 집수정 근처에서는 요소의 크기를 작게, 집수정에서 멀어질수록 요소를 크게 하여 계산 효율을 높였다. 또한 방사정의 수평 정확도가 위치하는 구간을 따라 요소의 간격을 일정하게 유지함으로써 집수정의 설계 구조를 반영하도록 하였다 (Fig. 6(b)). 도메인은 총 10개의 층으로 구성되었으며, 최상부 층의 지표 고도는 연구 지역의 고도 자료를 입력값으로 정규 크리깅 방법을 사용하여 구성하였다. 모의에 사용된 총 요소의 개수는 24,330 노드의 개수는 47,900개이다. 모의에 사용한 경계 조건은 다음과 같다. 우선 낙동강 표면을 따라서 고정 수두 경계를 주었으며 이 때 수위 값은 연구 지역 상류에 위치한 진동 수위 관측소와 하류에 위치한 임해진 수위 관측소에서 얻은 강 수위의 최빈값(5.5 m)을 사용하였다. 연구 지역 북쪽 일대 평지 지역을 따라서는 고정수두 경계로 주었는데 이는 이 지역이 연구지역 북쪽에 위치한 상길 저수지와 북마 저수지 하류와 연결되어 있으며 연중 내내 일정한 수위를 보여주기 때문이다. 이를 제외한 나머지 영역은 모두 무흐를 경계로 주었는데 이는 모의 지역 주변 지역이 화왕산, 영취

산, 관룡산 등으로 둘러 싸여 작은 분계를 형성하기 때문이다. 모의 영역의 바닥은 무흐를 경계로 처리하였으며 지하수 함양률은 연구지역의 2002년부터 2005년까지 평균 강우량의(1350 mm/year)의 약 15%를 가정하여 200 mm/year 를 대입하였다.

Table 2는 본 연구에서 사용한 수리전도도와 비저류계수를 보여준다. 연구지역의 주 대수층인 자갈층과 모래층에는 현장 조사를 통해 얻은 수리전도도 값의 조화 평균 값을 사용하였으며 풍화암과 기반암층에는 문헌조사를 통해 찾은 수리 특성값(수자원 공사, 2007)을 사용하였다.

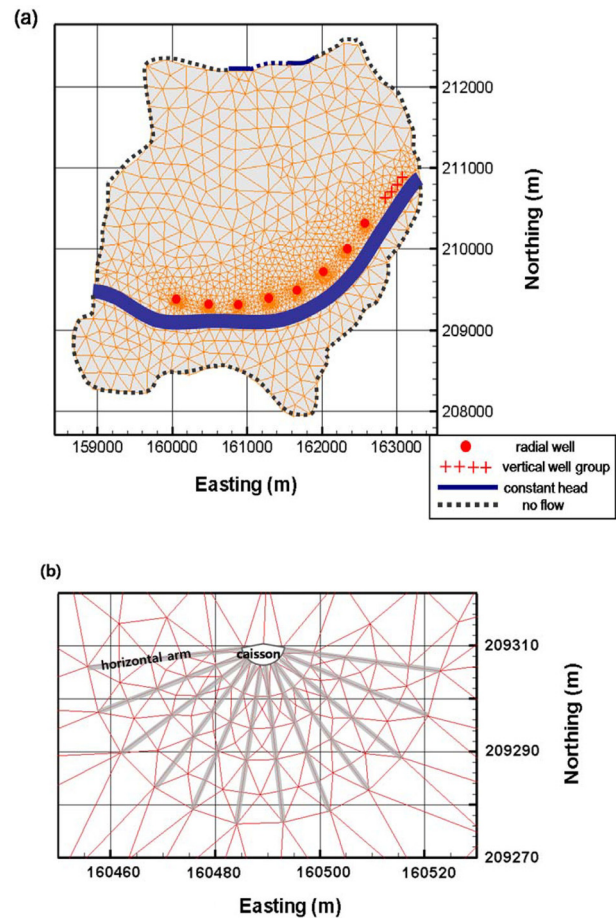


Fig. 6. (a) Numerical domain and boundary conditions. (b) Enlarged partial section of domain in xy direction.

Table 2. Hydraulic parameters for simulation

	$K_{xx} (=K_{yy})$ [cm/sec]	K_{zz} [cm/sec]	S_s [1/m]
Basement Rock	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-8}	5.0×10^{-7}
Weathered Rock	1.6×10^{-7}	1.6×10^{-8}	5.0×10^{-7}
Sand & gravel	1.2×10^{-2}	1.2×10^{-3}	7.5×10^{-6}
Sand	1.1×10^{-3}	1.1×10^{-4}	6.5×10^{-5}

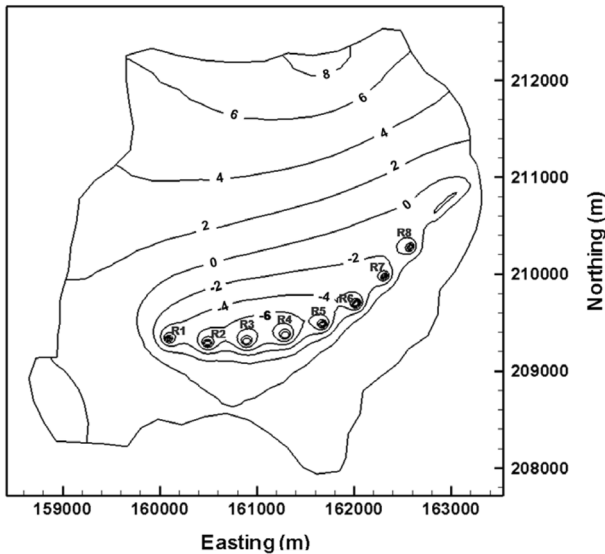


Fig. 7. The contour map of hydraulic head in the study area.

5. 모의 결과

5.1. 방사집수정 운용과 이에 따른 대수층 반향 평가

방사집수정과 수직정의 운용이 주변 대수층에 미치는 영향을 평가하기 위하여 정류상태 수치 모의를 수행하였다. 모의에 사용한 지하수 취수량은 방사집수정과 수직정에서 각각 $5,000 \text{ m}^3/\text{day}$, $1,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 이며 대수층-관정 흐름 계수 (C)는 0.002로 주어졌다. Fig. 7은 정상류 상태 모의를 통해 구한 연구지역 지하수두의 분포를 보여준다. 모의 결과, 방사집수정과 수직정 주변을 따라 수두가 많이 하강한 것을 확인할 수 있다. 특히 R2 집수정에서부터 R5 집수정에 이르는 영역에 수두가 낮게 나타나는데 이는 각 집수정들의 지하수 취수에 인한 영향 반경이 서로 중첩되기 때문인 것으로 보인다. 또한 집수정 R3,4 주변으로 수두가 가장 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있는데 이는 이들 집수정 주변으로 주 대수층인 자갈 모래층의 두께가 얇아, 주변 집수정과 동일한 양수량에도 지하수두의 하강이 크게 나타나는 것으로 판단된다(Fig. 5).

Fig. 8은 12개의 수평정호를 통해 들어오는 지하수 유입량의 분포를 나타낸다. 본 논문에서는 지하수두의 하강이 가장 크게 나타나는 R3 집수정의 경우를 대표적인 예로 설명하고자 한다. Fig. 6에서, R3 집수정의 수평 정호가 케이슨에서 멀어질수록 많은 양의 지하수가 유입되는 것을 확인할 수 있다. 특히 방사정호의 가장 바깥에 위치하고 있는 U1정호와 L6정호를 통해 가장 많은 양의 지하수가 유입되며 안쪽에 위치한 U3,4(L3,4) 정호에는 상

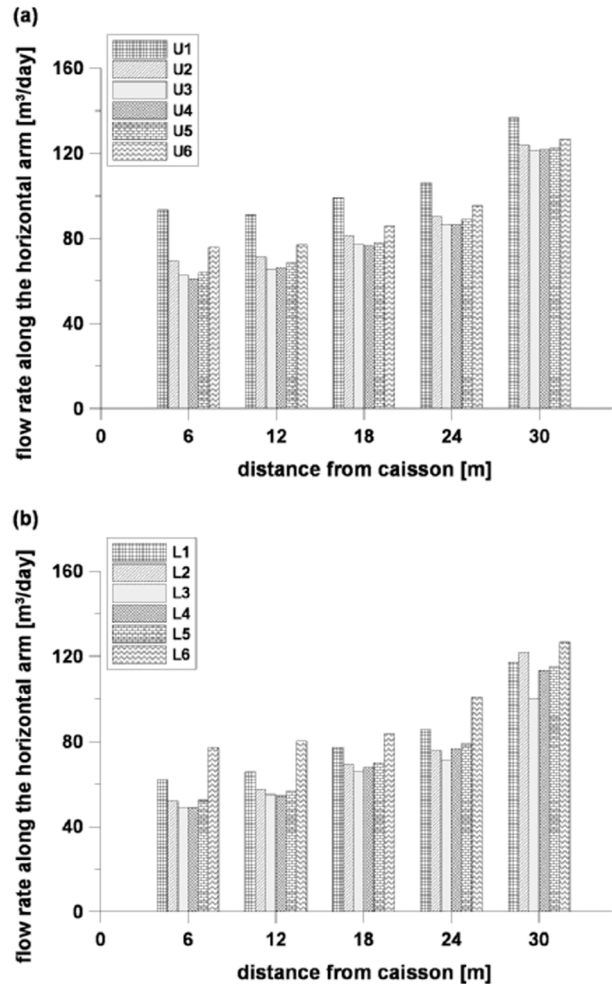


Fig. 8. The calculated groundwater inflow from the aquifer to the horizontal arms of the collector well (R6) at 6 m intervals: (a) flow rate along the upper arms. (b) flow rate along the lower arms.

대적으로 적은 양의 지하수가 유입됨을 볼 수 있는데, 이는 대수층과의 유효 접촉 면적이 넓은 U1, L6 정호 주변으로 대수층의 수두 하강이 적게 나타나기 때문이다. R3을 제외한 다른 집수정에서도 이와 유사한 지하수 유입량의 분포를 보여주었다.

본 연구에서는 방사집수정으로 유입되는 지하수의 기원을 파악하기 위해 입자역추적 방법을 사용하여 그 경로를 분석하였다. Fig. 9는 입자역추적 방법을 통해 얻은 지하수의 유선 분포이다. 본 연구에서는 각 집수정의 수평팔을 통해 5개씩, 총 480개의 입자의 경로를 역추적하여 그 기원을 조사하였다. 계산 결과, 방사정으로 유입되는 지하수는 크게 주변 낙동강에서 유입된 하천수와 지표면으로부터 함양된 지표수, 모의 영역 북쪽 저수지 하류와 연결된 평야 지역 대수층에서 유입된 지하수로 구분된다. 또

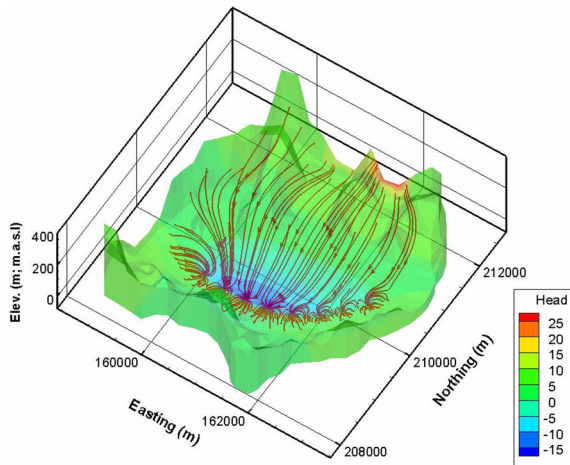


Fig. 9. Results of backward particle tracking analysis at each radial collector well.

한 480개의 입자중 약 327개가 낙동강에서 유입되는데 이를 통해 8개의 집수정으로 유입되는 총 지하수 중 68% 정도가 낙동강변을 통해 유입된 하천수인 것임을 알 수 있다. 이러한 추정은 하천 바닥의 수리적 연결성과 같은 영향이 정확히 반영되지 않았기 때문에 모델 계산에 의한 추정값이며, 하상, 하천변 수리적 연결성에 관한 조사자료가 보충된다면 이러한 추정값은 크게 달라질 수도 있을 것이다.

5.2. 집수정의 수평정호에서의 지하수 흐름 분석

개발된 모델은 집수정 내 수평 정호 내외의 지하수의 흐름 양상과 이에 따른 에너지 손실 및 수위 분포를 상세히 묘사할 수 있는 장점이 있다. Fig. 10은 R3집수정의 12개 수평정호를 흐르는 유체의 레이놀즈수와 이에 따른 마찰계수, 수평정호 외측을 따라 분포하는 대수층의 수위를 나타낸다. 일반적으로, 수평정호 내 지하수의 흐름영역은, 양수량의 범위에 따라서 층류에서 난류까지 다양하게 나타날 수 있다. 그러나 본 연구에서는 집수정에서 높은 양수량($5,000 \text{ m}^3/\text{day}$)과 관련, 파이프 내 지하수 흐름 영역은 모두 난류영역에 속해있었다(Fig. 10(a), (b)). 또한 레이놀즈수는 수평정호를 따라 유입되는 지하수의 양이 많을수록 증가하며, 따라서 대수층과 유효 접촉면적이 가장 넓은 U1(L6), U6(L1) 정호에서 가장 높은 레이놀즈수가 나타났다.

레이놀즈수에 따른 마찰 계수는 Fig. 10(c), (d)에 나와 있다. 식 (6)에 따르면 난류 영역에서 파이프를 흐르는 유체의 마찰 계수는 레이놀즈가 수가 증가함에 따라 감소한다. 그러나 유체 흐름 영역이 모두 난류에 속하는 경우,

마찰계수의 변화는 크게 나타나지 않았으며, 따라서 양수량이 높은 경우 마찰계수를 적절한 상수를 사용하여 나타내도 무방한 것으로 판단된다. 다른 집수정에서도 이와 유사한 결과를 보여주었다.

Fig. 10(e), (f)는 12개의 수평정호 외측을 따라 분포하는 대수층의 수위를 나타낸다. 모의 결과, 가장 바깥쪽의 수평 정호와 안쪽의 수평 정호는 대략 6 m 정도의 수두 차이를 보였으며 바깥쪽에 위치하는 정호에서 수두가 가장 높고 안쪽으로 갈수록 수두 강하가 커져서 수두가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 방사집수정의 구조적인 특징 상, 중앙 케이슨에 가까워질수록 수평정호 사이의 거리도 좁아지는데, 이는 상대적으로 좁은 면적에서 지하수가 취수됨을 의미한다. 즉, 집수정의 수평 정호와 대수층의 유효 접촉 면적의 감소가 케이슨부근에서 두드러진 수두 하강을 유도한 것으로 보이며 이는 집수정의 구조 설계 시 수평 정호의 배열이 중요함을 시사한다. 많은 양의 지표수를 함양시키기 위해 수평정호를 모두 하천 방향으로 설치할지, 아니면 모든 수평 정호에서 고르게 수두 강하가 나타나도록 방사형으로 수평정호를 설치할지를 개발 예정 지역의 수리적인 특성에 맞추어 신중하게 결정해야 할 것이다.

기존의 연구들은 대부분 수평정호를 나타낼 때, 수평정호를 따라 고정 플럭스 경계(Neumann type)나 고정 수두 경계(Dirichlet type)를 사용하는 경우가 많았다(Cunningham et al., 1995; Steward and Jin, 2001; Ray et al., 2002; Zhan and Zlotnik, 2002). Fig. 8과 Fig. 10(e-f)는 파이프를 통한 지하수 유입과 수두 분포가 균일하지 않음을 시사한다. 따라서 집수정 운용 의한 대수층의 반향과 수평 정호 내 지하수 흐름 특성을 명확히 이해하고 해석하기 위해서는, 방사정과 대수층 사이의 상호작용을 묘사할 수 있는 모델을 사용해야 할 것이다.

5.3. 민감도 분석을 통한 지하수 개발량 산정

연구 지역의 최대 지하수 산출량에 대한 평가와 이에 대한 민감도 분석이 실행되었다. 이를 위해 8개의 집수정에서 양수량 증가에 따른 중앙 케이슨에서의 수두 강하변화를 계산하였다. 연구 지역 대수층의 수리전도도가 가질 수 있는 불균질성과 불확실성을 고려하여, 주 대수층의 수리전도도를 증감시키는 경우 수두 강하에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 모의에 사용되는 물성 중, 대수층-관정 흐름 계수(C)는 그 값을 정확하게 파악하는데 어려움이 있으므로 일반적으로 실측 자료와의 보정작업을 통해 구한다. 본 연구에서는 실측 자료가 없는 관계로 문헌

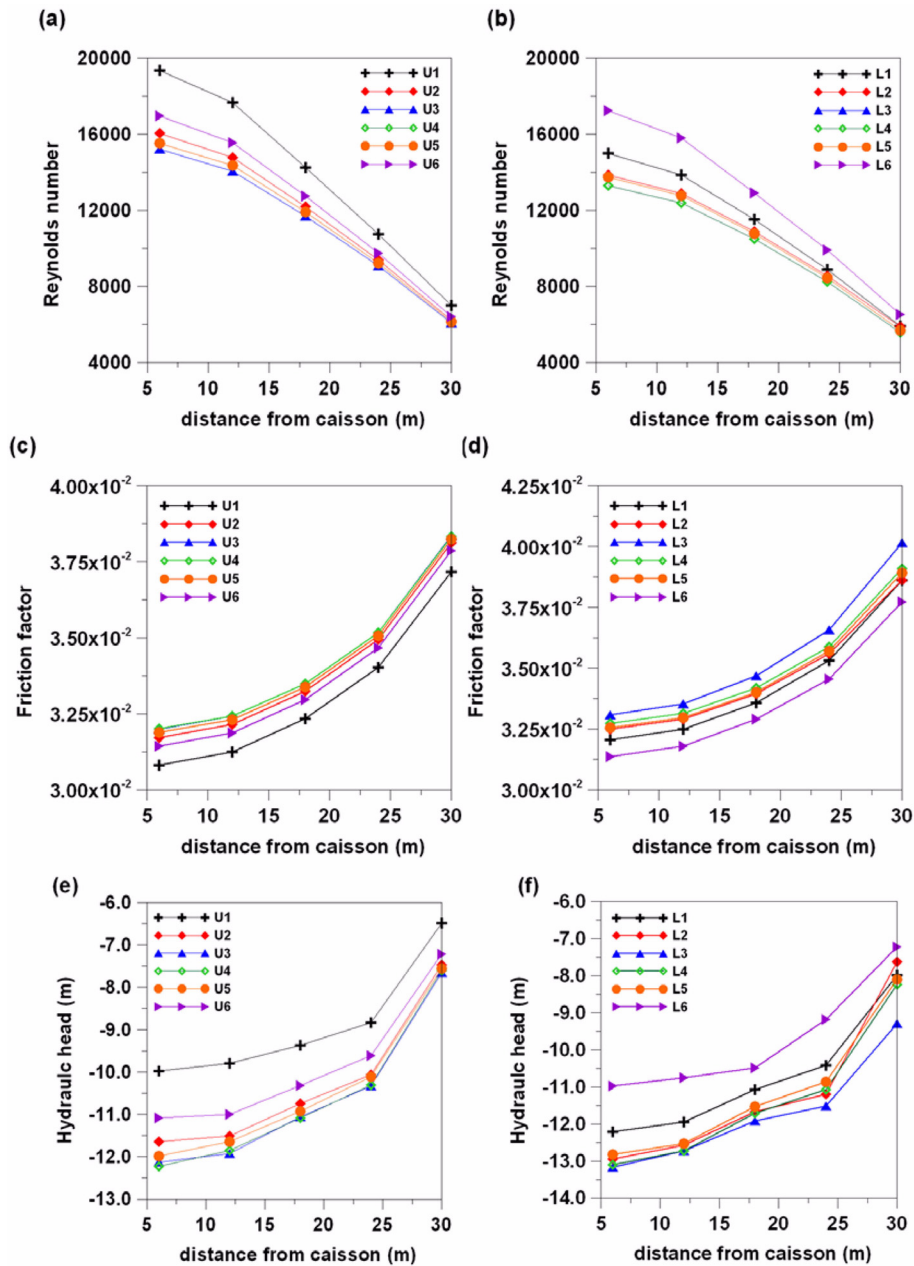


Fig. 10. Distribution of Reynolds number, friction factor, and hydraulic head along the horizontal arms of the collector well (R6). (a) Distribution of Reynolds number along the upper arm group. (b) Distribution of Reynolds number along the lower arm group. (c) Distribution of friction factor along the upper arm group. (d) Distribution of friction factor along the lower arm group. (e) Distribution of hydraulic head of the aquifer along the upper arm group. (f) Distribution of hydraulic head of the aquifer along the lower arm group.

값(Mohamed and Rushton, 2006)과 연구 지역 대수층의 수리전도도를 참고하여 세 가지 경우에 대한 민감도 분석을 실행 하였다. 이 때 양수에 의한 최대 수두 하강 범위는 30 m로 설정하였는데 이는 중앙 케이슨에서의 수위가 방사집수정의 수평 정호가 설치된 깊이보다 높게 유지 되도록 하기 위함이다.

Fig. 11, 12는 각각의 집수정에서 지하수 산출량 증가에 따른 케이슨에서의 수두 하강을 나타낸 그래프이다. Fig. 11(a)는 현장에서 측정한 자갈 모래층의 수리전도도를 그대로 사용한 경우, (b)는 주 대수층(자갈 모래층)의 수리전도도를 5배 증가 시킨 경우, (c)는 수리전도도를 0.5배 증가 시킨 경우의 산출량에 따른 수두 하강값을 보여준다.

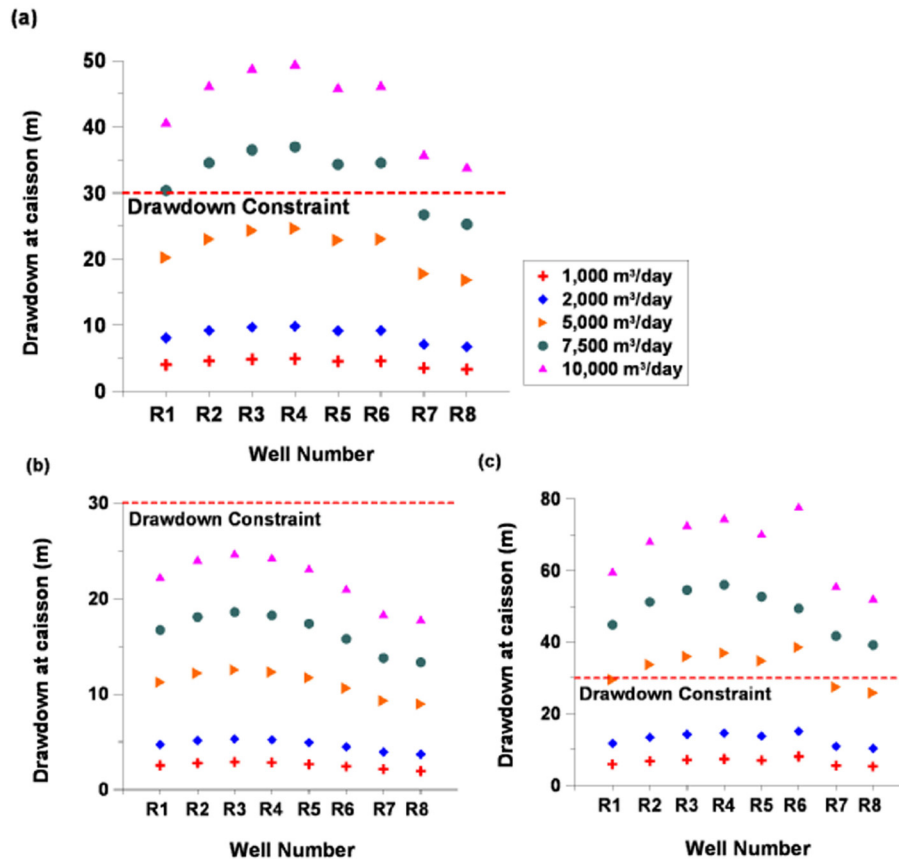


Fig. 11. Pumping rate versus drawdowns in the caissons with different hydraulic conductivity. The well flow coefficient is given as 0.0002. (a) Drawdowns at central caissons of collector well when using the measured hydraulic conductivity (b) Drawdowns at central caissons of collector well when increasing hydraulic conductivity by 5 times. (c) Drawdowns at central caissons of collector well when decreasing hydraulic conductivity by 0.5 times.

계산 결과, 대수층의 수리전도도를 5배 증가시킨 경우, 하루 10,000 m³/day 취수 시 최대 수위 하강값은 약 25 m 정도 감소하였고(Fig. 11(a), (b)), 0.5배 증가시킨 경우는 최대 수위 하강값이 30 m 정도 증가하였다(Fig. 11(a), (c)).

Fig. 12(a)는 각각 대수층-관정 흐름 계수(C)가 0.0002 인 경우, (b)는 대수층-관정 흐름 계수(C)가 0.0005인 경우, (c)는 0.0001인 경우의 지하수 산출량에 따른 수두 하강값을 보여준다. 모의 결과, 하루 10,000 m³/day 취수 시 대수층-관정 흐름 계수를 2.5배 증가시킨 경우, 케이슨의 수위 하강값은 10 m 내외로 감소하였고, 0.5배 증가시킨 경우에는 10 m 내외로 증가하였다. 본 연구에서 사용한 대수층-관정 흐름 계수는 문헌을 참조, 대수층의 수리전도도를 반영하여 사용한 값이므로, 소폭의 차이는 있으나 연구 지역 집수정의 수평정호를 나타내기에는 타당한 범위로 판단된다. 대수층-관정 흐름 계수는 수평정호의 스크린을 통해 지하수가 유입될 때 나타나는 에너지 손실을 나타내며 계수의 증가는 수평정호로의 지하수 유입에 대

한 저항이 감소함을 의미한다. 따라서 동일한 비율로 지하수 취수가 있는 경우, 대수층-관정 흐름 계수가 작은 Fig. 12(c)에서 케이슨의 수두 손실이 가장 큰 것을 볼 수 있다. 그러나 수두 강하에 미치는 대수층-관정 흐름 계수의 영향은 주 대수층의 수리전도도의 증감에 의한 것보다는 적은 것으로 나타났다. 또한 수리전도도와 대수층-관정 흐름 계수 변화에 따른 수두 강하의 폭은 취수량이 증가할수록 크게 나타났으며 특히 집수정 관정 당 10,000 m³/day의 지하수 취수 시, 수리전도도를 5배 증가시킨 경우(Fig. 11(b))를 제외하고는 모두 연구지역의 최대 수두 하강 허용 범위를 초과하였다. 따라서 지속개발 가능한 지하수 개발을 위해 목표 취수량을 관정 당, 5,000~7,500 m³/day로 낮추어야 할 것으로 판단된다. 또한 케이슨에서의 수두 하강 폭은 주 대수층의 수리전도도와 주 대수층의 대수층-관정 흐름 계수에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, 방사집수정을 이용한 강변 여과수 개발량 산정에 수리전도도와 대수층-관정 흐름 계수가 중요한 인자

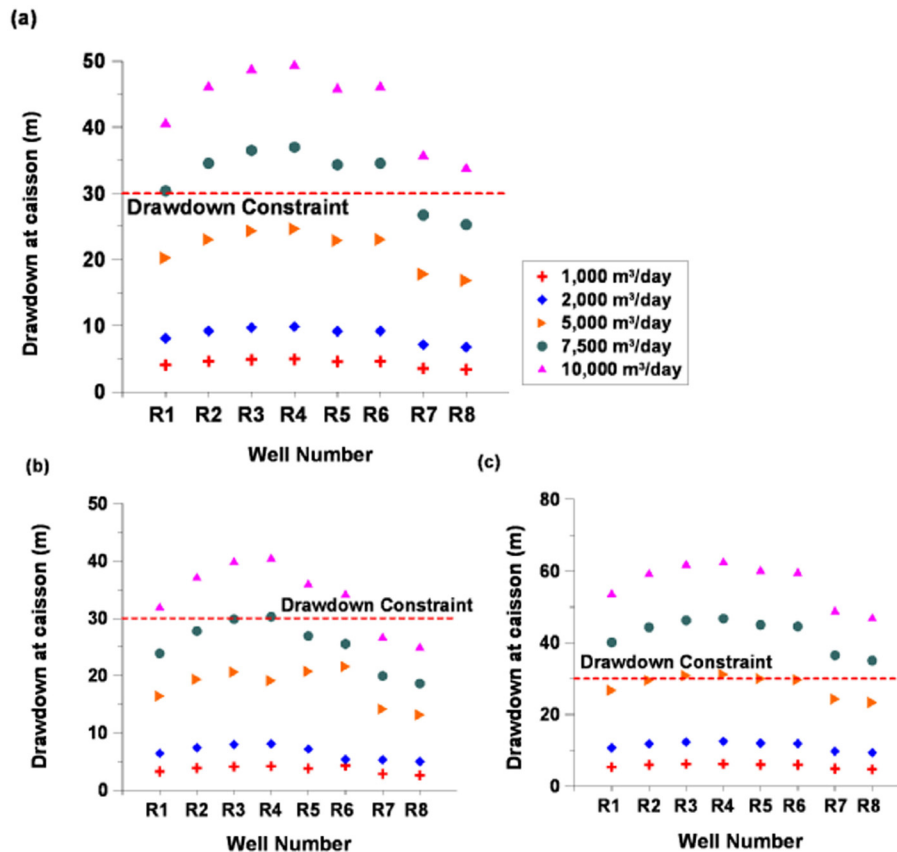


Fig. 12. Pumping rate versus drawdowns in the caissons with different well flow coefficient. (a) Well flow coefficient is given as 0.0002. (b) Well flow coefficient is given as 0.0005. (c) Well flow coefficient is given as 0.0001.

로 작용하며 개발 계획 시, 후보 지역의 철저한 기초 조사가 중요함을 시사한다.

6. 결 론

경남 창원군 증산리 일대 방사집수정을 활용한 강변 여과수 개발량 산정과 강변 여과수 개발 가능성 평가를 위한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 수치 모의를 통해 연구 지역의 방사집수정에서 취수에 의해 나타나는 수두 강하와 수평정호를 통해 들어오는 지하수 유입량의 분포를 계산하였다. 연구에 사용된 수치 모델은 방사집수정의 수평 정호 내에서 유체의 속도에 따라 층류(laminar flow)에서 난류(turbulent flow)에 이르는 모든 흐름 영역이 반영되도록 하였으며 이 밖에 스크린과 충전 물질에 의한 유체의 정호 수두 손실, 표면 거칠기(pipe roughness)에 의한 정호 내 수압의 변화까지 고려하였다. 계산 결과, 집수정 운용으로 인한 수두 강하가 연구 영역에 걸쳐 광역적으로 나타나며, 주 대수층의 두께가 상대적으로 얇은

R3,4 방사집수정 주변으로 수두 하강이 가장 큰 것으로 평가되었다. 입자 역추적 방법을 통해 집수정으로 유입되는 낙동강 기원 하천수의 비율을 추정해 보았다.

연구 지역의 주요 대수층의 수리전도도와 대수층-관정 흐름 계수에 대한 민감도 분석을 실행하여 그 결과를 비교하였다. 모의 결과, 중앙 케이슨에서 나타나는 수두 하강은 대수층의 수리전도도와 대수층-관정 흐름 계수에 의해 변화하며 이 중 대수층의 수리전도도가 케이슨의 수두 강하에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 주 대수층의 수리전도도가 방사집수정을 이용한 강변 여과수 개발량 산정에 중요한 인자로 작용하며 따라서 방사집수정 개발 계획 시, 후보 지역의 철저한 기초 조사가 중요함을 시사한다.

연구 지역에 개발 중인 강변 여과수 시설의 예상 취수량은 방사집수정 관정 당 10,000 m³/day이다. 민감도 분석 결과, 산정된 양수량 조건 하에서 케이슨의 수두 강하는 대수층의 수리전도도와 대수층-관정 흐름 계수에 따라 다르게 나타난다. 그러나 대수층의 수리전도도를 5배 증

가시킨 경우를 제외하고는(Fig. 11(b)) 집수정 관정 당 10,000 m³/day의 지하수 양수는 연구지역의 최대 수두 하강 허용 범위를 초과한다(Fig. 11, 12). 따라서 지속개발 가능한 지하수 개발을 위해 목표 취수량을 관정 당, 5,000~7,500 m³/day로 낮추어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 BK21 SEES, 교육인적자원부 한국학술진흥재단(MOEHRD, KRF-2006-532-C00014), 21세기 프론티어 연구개발사업단인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(과제번호: 3-4-3)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김형수, 한찬, 유정아, 1999, 지하수 함양 및 활용 증대방안 연구, WRR-99-1, 한국수자원공사 연구보고서, 한국수자원공사, p. 198.
- 한국수자원공사, 2007, 창원공업용수도 취수여건 개선 사업 타당성조사 및 기본 계획 수립 지반조사 보고서, 한국수자원공사, p. 105.
- Abdel-Fatthah, A., Richard Langford, R., and Schulze-Makuch, D., 2008, Applications of particle-tracking techniques to bank infiltration: a case study from El Paso, Texas, USA, *Environ Geol*, **55**, 505-515.
- Bakker, M., Kelson, V.A., and Luther, K.H., 2005, Multilayer Analytic Element Modeling of Radial Collector Wells, *Ground Water*, **43**, 926-934.
- Chen, C., Wan, J., and Zhan, H., 2003, Theoretical and experimental studies of coupled seepage-pipe flow to a horizontal well, *J. Hydrol*, **281**, 159-171.
- Cunningham, W.L., Bair, E.S., and Yost, W.P., 1995, Hydrogeology and simulation of ground-water flow at the South Well Field, Columbus, Ohio, USGSWRI-95-4279.
- Ludwig, U., Grischek, T., Nestler, W., and Neumann, V., 1997, Behaviour of different molecular-weight fractions of DOC of Elbe River water during river bank infiltration, *Acta Hydroch. Hydrob.*, **25**, 145-150.
- Mohamed, A. and Rushton, K., 2006, Horizontal wells in shallow aquifers: Field experiment and numerical model, *J. Hydrol*, **329**, 98-109.
- Munson, B.R., Young, D.F., and Okiishi, T.H., 1998, Fundamentals of Fluid Mechanics, 3rd ed. New York: Wiley. p. 912.
- 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, *J. Hydrol*, **266**, 235-285.
- Romeo, E., Royo, C., and Monzón, A., 2002, Improved explicit equations for estimation of the friction factor in rough and smooth pipes, *Chem. Eng. J.*, **86**, 369-374.
- Sacher, F. and Brauch, H.J., 2002, Experiences on the fate of organic micropollutants during riverbank filtration, *Riverbank filtration: Understanding contaminant biogeochemistry and pathogen removal*, Kluwer Academic Publishers, 135-151.
- Schroeder D.W. Jr., 2001, A tutorial on pipe flow equations, Unpublished. <http://www.psig.org/papers/2000/0112.pdf>, p. 18.
- Schubert, J., 2002, Hydraulic aspects of riverbank filtration-field studies, *J. Hydrol*, **266**, 145-161.
- Steward, D.R. and Jin, W., 2001, Gaining and losing sections of horizontal wells, *Water Resour. Res.*, **37**, 2677-2685.
- 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 Inc. Herndon, VA., p. 322.
- Verstraeten, I.M., Thurman, E.M., Lindsey, M.E., Lee, E.C., and Smith, R.D., 2002, Changes in concentration of trizine and acetamide herbicides by bank filtration, ozonation, and chlorination in a public water supply, *J. Hydrol*, **266**, 145-150.
- Weiss, W.J., Bouwer, E.J., Ball, W.P., O'Melia, C.R., Leachevalier, M.W., Arora, H., and Speth, T.F., 2003, Riverbank filtration-fate of DBP precursors and selected microorganisms, *J. AWWA*, **95**(10), 68-81.
- Weiss, W.J., Bouwer, E.J., Aboytes, R., LeChevallier, M.W., O'Melia, C.R., Le, B.T., and Schwab, K.J., 2005, Riverbank filtration for control of microorganisms: Results from field monitoring, *Water Res.*, **39**, 1990-2001.
- Zhan, H. and Zlotnik, V.A., 2002, Groundwater flow to a horizontal or slanted well in an unconfined aquifer, *Water Resour. Res.*, **38**, 1108-1118.