

# 방사형 집수정 취수시 대수층 특성에 따른 지하수위의 변화

최명락<sup>1</sup> · 이호정<sup>1</sup> · 김규범<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>대전대학교 건설안전방재공학과 석사과정, <sup>2</sup>대전대학교 건설안전방재공학과 부교수

## Relationship between Groundwater Level Changes and Aquifer Characteristics during Pumping at a Radial Collector Well

Myoung-Rak Choi<sup>1</sup> · Ho-Jeong Lee<sup>1</sup> · Gyoo-Bum Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Master Student, Department of Construction Safety and Disaster Prevention, Daejeon University

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Construction Safety and Disaster Prevention, Daejeon University

### Abstract

The groundwater drawdown at each monitoring well near a radial collector well along Anseong Stream, Korea, was measured and compared with the calculated drawdown using the mirror well concept. The drawdown calculation is performed by treating the collector well as a large vertical well in a homogeneous isotropic aquifer. The measured drawdown at each monitoring well is slightly different from the calculated value due to anisotropy in the hydraulic conductivity and aquifer thickness. The difference between the measured and calculated values at Well OW-7 is large, reaching approximately 48 cm, because a horizontal well is not installed along this direction. Sensitivity analysis of the hydraulic conductivity and aquifer thickness indicates that the hydraulic conductivity is more sensitive to groundwater level changes. Groundwater level changes become a concern when a radial collector well with a large pumping rate capacity is installed, which highlights the need to thoroughly investigate the aquifer characteristics in the surrounding area.

**Keywords:** radial collector well, groundwater level, hydraulic conductivity

### 초 록

본 연구는 안성천에 설치된 방사형집수정에서 약 4,000 m<sup>3</sup>/d의 취수시 주변지역에서의 지하수위 강하량을 측정하였으며, mirror well 개념을 적용하여 계산된 지하수위 강하량과 비교 분석하였다. 지하수위 강하량의 계산은 방사형집수정을 균질 등방성 매질내의 대형 수직정으로 고려하여 실시하였다. 양수시 각 관측정에서 측정된 지하수위 강하량은 계산된 값과 약간의 오차가 발생하는데, 이는 수리전도도 및 대수층 두께 등의 이방성 때문으로 보인다. 또한, OW-7 지점은 실측 및 계산 지하수위 강하량의 차이가 약 48 cm로 크게 나타났는데, 이는 이 방향으로의 수평집수관이 설치되지 않았기 때문이다. 연구지역내에서 출현 가능한 수리전도도와 대수층 두께를 고려한 지하수위 변화의 민감도를 분석한 결과, 대수층의 두께보다는 수리전도도가 지하수위 변화에 민감하게 작용하는 것으로 나타났다. 대용량 취수 시설인 방사형 집수정의 개발시에는 배후지 수위 강하에 대한 우려가 존재하게 되므로 주변지역에 대한 대수층 특성을 정밀하게 파악하여 지하수위 변화를 예측, 평가할 필요가 있다.

**주요어:** 방사형집수정, 지하수위, 수리전도도

### OPEN ACCESS

\*Corresponding author: Gyoo-Bum Kim  
E-mail: geowater@dju.kr

Received: 27 August, 2019

Accepted: 9 September, 2019

© 2019 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서론

강변여과수 개발은 인공함양(Artificial recharge)의 한 방법으로서 국내의 경우 1990년대 말부터 생활용수 및 하천 유지용수 확보 등을 위하여 추진되어 왔다(Kim et al., 2014). 강변여과수는 퇴적층의 분포가 양호한 하천부지 지역에서 원수를 대수층에 채류시켜 대수층(모래 자갈층)의 공극을 따라 하천수와 지하수가 수직, 수평적으로 이동하여 물리적 여과 및 흡착 등 자연적인 자정작용을 거치도록 함으로써 원수의 오염물질이 제거되도록 하는 방법이다. 유럽과 미국 등에서는 수 십 년 전부터 충전퇴적층의 자정 능력을 이용하여 강변여과수 취수원 개발을 추진해 왔으며, 호주, 일본, 중국, 이스라엘 등 전 세계 여러 나라에서도 취수원 확보 수단으로 이용되고 있다. 그러나 장기간 운영시 광물질의 침전, 클로킹, 시설 노후화 등의 영향으로 취수량 변화가 나타날 수 있고, 대용량 취수시에는 주변지역의 지하수위가 과다하게 하강하는 등의 환경적 변화가 나타날 수도 있다(Schubert, 2002).

우리나라의 경우에도 방사형 집수정을 통한 강변여과수 취수시 주변지역의 지하수위 강하와 취수량의 관계에 대한 연구가 다수 수행된 바 있다. 지하수위 및 하천수의 변동과 하천-대수층간의 상호작용을 이용한 취수정의 적정 양수량 평가 연구(Cheong et al., 2003), 창원시 북면 낙동강 본류 하안에서의 강변여과수 취수에 따른 지하수위 하강과 취수정에서의 유입량 평가에 대한 지하수 유동 모델 기반 연구(Hamm, 2004), 수학적 모델을 이용한 방사형집수정 취수시의 주변지역 지하수위 분포에 대한 연구(Huang et al., 2012), 수치모사를 활용한 방사형 집수정의 취수가능량 및 취수시 지하수 영향에 대한 연구(Cha et al., 2016), 강변여과수 개발에 따른 배후지의 수위강하에 대한 수치모델 기반의 예측 연구(Kim and Oh, 2018) 등이 수행된 바 있다.

본 연구에서는 방사형 집수정 취수 직후 주변지역에서의 시간에 따른 지하수위 변화를 평가하고 대수층의 수리적 특성과 지하수위 변화와의 관계를 파악하는데 목적을 두었다.

## 연구 지역

본 연구지역은 경기도 안성시 공도읍 증북리 안성천 지역으로 서쪽으로 경기도 평택시 유천동과 남쪽으로 천안시 서북구 성환읍 안궁리 사이에 위치한다(Fig. 1). 기반암은 선캠브리아기 흑운모 편마암으로서 류라기 흑운모 화강암이 관입하고

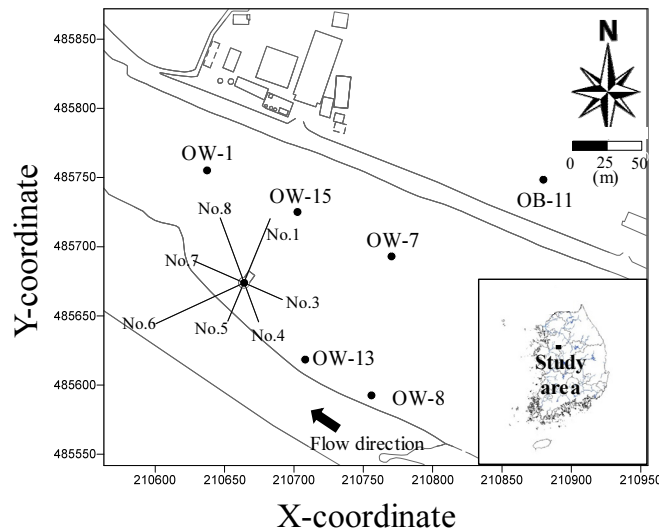


Fig. 1. Location of the study area and distribution of a radial collector well and monitoring wells.

있고 상부에 신생대 제 4기 충적층이 분포하고 있다. 상부 충적층의 두께는 약 6.0~9.9 m 정도로 하부로부터 풍화토, 자갈질 모래, 실트질 모래, 점토질 실트로 구성되어 있다(Kim et al., 2016). 연구지역을 동쪽에서 서쪽으로 흐르는 안성천은 길이 76 km, 유역면적 1,722 km<sup>2</sup>로서 40~190 m 폭을 갖고 있다.

수평집수관 7개를 갖는 방사형 집수정 1기가 2015년에 설치되었으며, 지표로부터 6.5 m 하부의 모래-자갈층에 위치한 수평집수관은 30~70 m의 길이로 굴착되어 있다(Fig. 1, Table 1). 방사형 집수정 주변에는 지하수위 측정 및 시료 채취를 위하여 10~18 m 깊이의 6개 지하수 관측공(제외지: OW-1, OW-7, OW-8, OW-13, OW-15, 제내지: OB-11)을 설치하였다(Fig. 1, Table 2).

**Table 1.** Composition of the unconsolidated layer at the monitoring sites and collector well

Horizontal well	Length of horizontal well (m)	Length of screen (m)	Thickness of aquifer (m)	Diameter of horizontal well (mm)	Depth of horizontal well (m)	Height of horizontal well from bottom (m)
1	50	44	6	200	6.77	1.4
2			Not installed			
3	30	22	6	200	6.4	0.5
4	30	26	6	200	7.8	0
5	30	22	6	200	7.67	1.5
6	70	66	6	200	6.5	0.5
7	40	36	6	200	7.66	1.5
8	50	48	6	200	7.94	0.5

**Table 2.** Specifications of the horizontal wells

Well	Depth	Sediment composition	Well	Depth	Sediment composition
OW-1	0~4.0 m	Coarse sand	OW-13	0~3.0 m	Medium sand
	4.0~6.0 m	Silty sand		3.0~4.0 m	Silty clay
	6.0~7.5 m	Silty gravel		4.0~8.0 m	Silty sand
	7.5~14.0 m	Silty sand		8.0~15.0 m	Silty sand
OW-7	0~1.0 m	Silty sand	OW-15	0~6.0 m	Silty sand
	1.0~2.0 m	Silty clay		6.0~20.0 m	Silty sand
	2.0~4.0 m	Medium sand	OB-11	0~4.0 m	Silty sand
	4.0~5.0 m	Silty sand		4.0~5.5 m	Silty sand
	5.0~8.0 m	Gravel with coarse sand		5.5~9.7 m	Silty sand
8.0~16.0 m	Silty sand	9.7~12.0 m	Silty sand		
OW-8	0~3.0 m	Medium coarse sand	Collector well	0~4.8 m	Silty sand
	3.0~4.0 m	Silty clay		4.8~7.9 m	Gravel sand
	4.0~7.0 m	Medium coarse sand		7.9~15.0 m	Silty sand
	7.0~8.0 m	Silty sand			
	8.0~15.0 m	Silty sand			

## 연구 방법

방사형 집수정에서의 취수 개시 이후 주변 지역의 지하수위 변화 특성 파악을 위하여 자동 및 수동 지하수위 측정 방식으로 집수정 및 관측정에서 지하수위를 측정하였다. 본 연구 수행을 위하여 2018년 11월 5일부터 11월 13일까지 방사형 집수정의 취수를 중단시켜 지하수위의 사전 안정화 과정을 거친 후, 약 4,000 m<sup>3</sup>/d의 취수량으로 방사형 집수정의 양수를 실시하였다. 양수 이후 수동 지하수위 측정은 2018년 11월 14일 14시부터 2018년 11월 16일 까지 2 일 동안 9 차례에 걸쳐 수행되었다(Fig. 2). Diver를 이용한 자동 지하수위 측정은 OW-7, OW-8, OB-11 관측공에서 5 분 간격으로 이루어졌다.

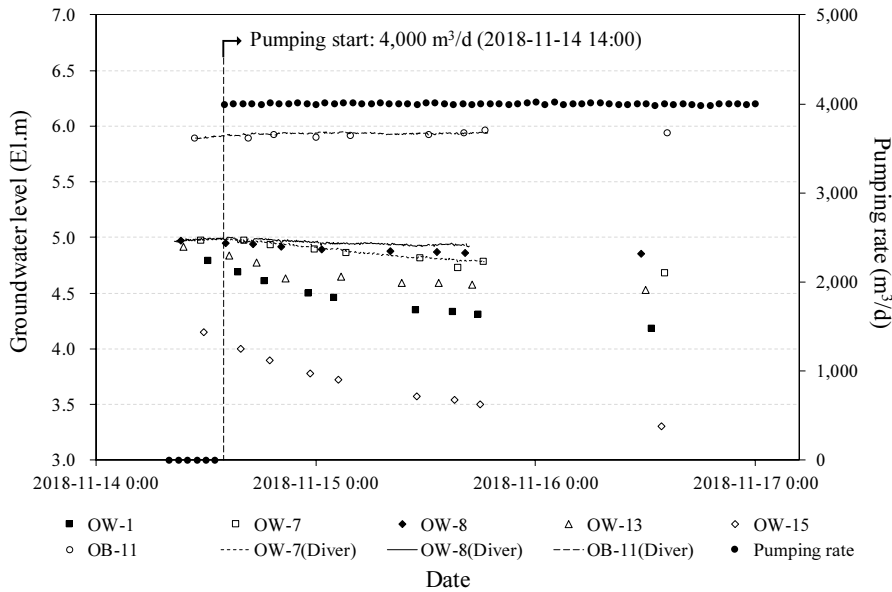


Fig. 2. Groundwater levels at each monitoring well, and pumping rate of the collector well.

한편, 방향별 수위 강하 특성과 대수층의 물리적 특성과의 관계를 파악하기 위하여 14개소의 양수시험과 96개의 입도 분석(수직정 8 개 및 수평정 88 개 시료 이용)에서 각각 도출된 수리전도도를 이용하여 양수시 각 관측지점에서의 지하수위를 추정하였다. 본 연구에서는 추정된 지하수위와 실제 지하수위의 차이에 대하여 대수층의 특성 및 수문학적 상호작용의 관점에서 접근해 보았다.

## 지하수위 변화 특성

방사형집수정의 취수 개시 후 1시간 30분 경과 후부터 47시간 02분 까지 지하수위 측정이 이루어졌는데, 각 관측공의 방향별로 시간에 따른 지하수위 변화 차이를 보면 다음과 같다.

측정 종료 시점에서의 지하수위를 보면, OW-15 관측공에서 약 0.85 m의 가장 큰 지하수위 하강을 보였으며, OW-1 관측공에서 약 0.61 m, OW-13 관측공에서 약 0.39 m, OW-7 관측공에서 0.29 m, OW-8 관측공에서 약 0.12 m의 순으로 나타났으며, 제내지에 위치한 OB-11 관측공에서는 변화가 거의 없는 것으로 나타났다(Fig. 2). 이와 같은 현상은 집수정으로부터의 거리가 멀수록 지하수위 강하가 작게 나타나는 기본적인 특성을 의미한다. 동북동 방향에 위치한 OW-7 관측공에서 약 1일 경과 후 지하수위 변화가 거의 없어지고 강하량도 상대적으로 작은 것은 해당 방향으로 수평집수관이 설치되어 있지 않은 것이 기여하는 것으로 보인다. 반면에, OW-1 및 OW-15 관측공에서는 취수 이후 약 47시간 경과 시에도

지하수위 하강이 계속되는데, 이는 OW-1 관측공과 OW-15 관측공 방향으로 인접된 수평집수정의 영향으로 보인다.

OW-8 관측공과 OW-13 관측공의 경우, 관측공이 하천에 인접한 위치에 있어 취수 시 하천수의 유입으로 인하여 제방 방향의 OW-1, OW-7, OW-15 관측공보다 지하수위 강하량이 적은 것으로 나타났다. OW-8 관측공의 자동 지하수위 측정 자료를 보면, 양수 초기 수 시간 동안 지하수위가 상하수 cm 간격으로 2회 정도 변동하는 특성이 나타났는데 이는 하천과 접하는 지역으로서 이방성 대수층 특성에 의한 지표수와 지하수의 유출입 및 안정화 과정으로 보이며, 이후 약 10시간 경과 시점에는 수위 변화가 거의 발생되지 않고 안정화되었음을 알 수 있다. 한편, 가장 원거리에 위치한 OB-11 관측공의 경우는 방사형 집수정 취수에도 지하수위가 하강하지 않는 것으로 나타났다.

### 지하수위 예측

Wegenstein(1954)과 Babac(1965)은 방사형 집수정을 수직정으로 고려한 취수량 평가식을 아래와 같이 제시한 바 있으며, mirror well 개념을 이용하여 방사형집수정 취수시 각 관측 지점에서의 지하수위를 추정해 보았으며 실제 현장에서 측정된 지하수위와의 차이점 및 그 원인에 대하여 검토하였다(Fig. 3).

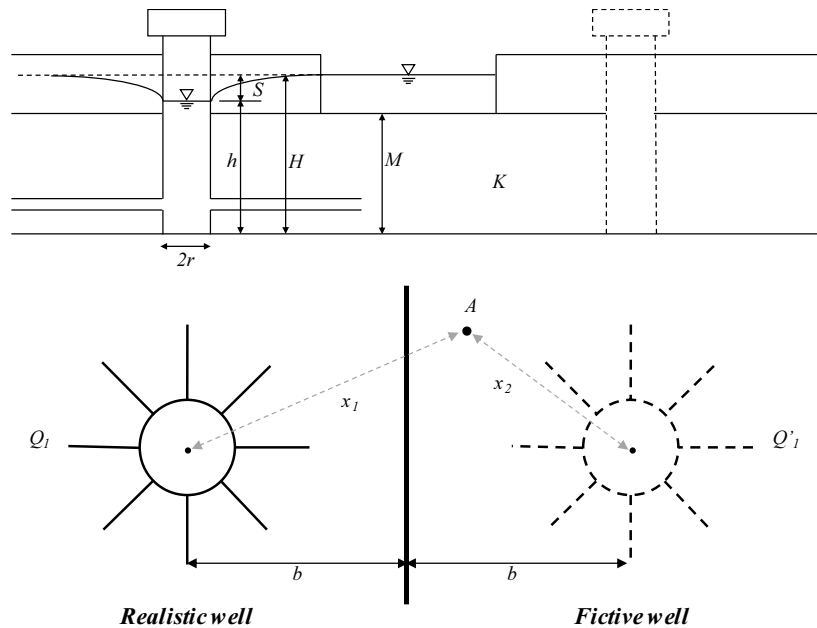


Fig. 3. Mirror well concept for groundwater level estimation at the monitoring site around a collector well.

$$Q = \frac{2\pi KHS}{\ln \frac{R}{r}} \tag{1}$$

여기서,  $S = H - z = (H - y_1) + (H - y_2)$ 이며, 실제 및 가상의 방사형 집수정에서의 취수량( $Q_1$  및  $-Q_1$ )은,

$$Q = \frac{2\pi KM(H - y_1)}{\ln \frac{R}{x_1}} \tag{2}$$

$$-Q_1' = \frac{2\pi KM(H - y_2)}{\ln \frac{R}{x_2}} \tag{3}$$

이며, 이 때 지하수위 강하량은

$$S = H - z = \frac{Q}{2\pi KM} \left( \ln \frac{R}{x_1} - \ln \frac{R}{x_2} \right) = \frac{Q}{2\pi KM} \ln \frac{x_2}{x_1} \tag{4}$$

이다. 여기서,  $Q$ 는 취수량( $L^3 T^{-1}$ ),  $K$ 는 수리전도도( $LT^{-1}$ ),  $l$ 은 수평정의 평균 길이( $L$ ),  $M$ 은 대수층의 두께( $L$ ),  $H$ 는 초기수위( $L$ ),  $z$ 는 취수 후 관측정 지하수위( $L$ ),  $S$ 는 수위 변화량( $L$ ),  $y_1$ 은 실제 방사형 집수정의 수위강하량( $L$ ),  $y_2$ 는 가상의 방사형 집수정의 수위강하량( $L$ ),  $b$ 는 하천중심선으로부터의 거리( $L$ ),  $A$ 는 임의의 지점,  $x_1$ 은 실제 관정과의 거리( $L$ ),  $x_2$ 는 가상의 관정과의 거리( $L$ )를 말한다. 우물의 영향반경인  $R$ 은 경험식으로서  $R = 3000s_w K^{0.5}$  및  $R = 575s_w (MK)^{0.5}$ 의 방법의 평균값을 적용하였는데,  $s_w$ 는 수위강하량( $L$ )을 말한다(Chertousov, 1949, 1962).

상기 식에서 수리전도도는 14개 양수시험자료의 평균값인 41.6 m/d, 96개 입도분석 자료로부터 추정된 42.5 m/d, 대수층의 두께는 시추자료로부터 5.91 m, 우물의 영향반경은 241.5 m를 적용하여 각 관측 지점의 지하수위를 예측해 보았다 (Fig. 4, Table 3). 지하수 관측정의 위치, 방향에 따라서 계산된 지하수위와 실측된 지하수위의 편차가 다양하게 나타났는데, 2가지 방법으로 산정된 수리전도도의 값에 따른 지하수위 강하량의 차이는 크지 않은 것으로 계산되었으며, 수리전도도가 작은 경우의 지하수위 강하량이 약간 더 큰 것으로 분석되었다. 방사형집수정을 중심으로 각 관측정의 방향별로 계산된 지하수위 강하량과 실제 지하수위 강하량의 차이는 다양한 원인에 의하여 나타날 수 있다. OW-7, OW-15 및 OB-11은 계산된 지하수위 강하량이 실측값보다 비교적 큰 반면에, OW-13 지점은 계산된 지하수위 강하량이 약간 작은 것으로 나타났다. OB-7 방향으로는 수평집수관이 설치되어 있지 않아 해당 방향에 위치하거나 인접한 3개 관측공(OW-7, OW-15 및 OB-11)의 지하수위 강하가 작게 발생된 것으로 보이며, OW-13은 하천과 직접 인접하고 있기 때문에 방사형 집수정에서의 양수와 동시에 하천에서의 유입이 발생하여 실제 지하수위가 계산값 보다 높은 것으로 보인다(Fig. 4).

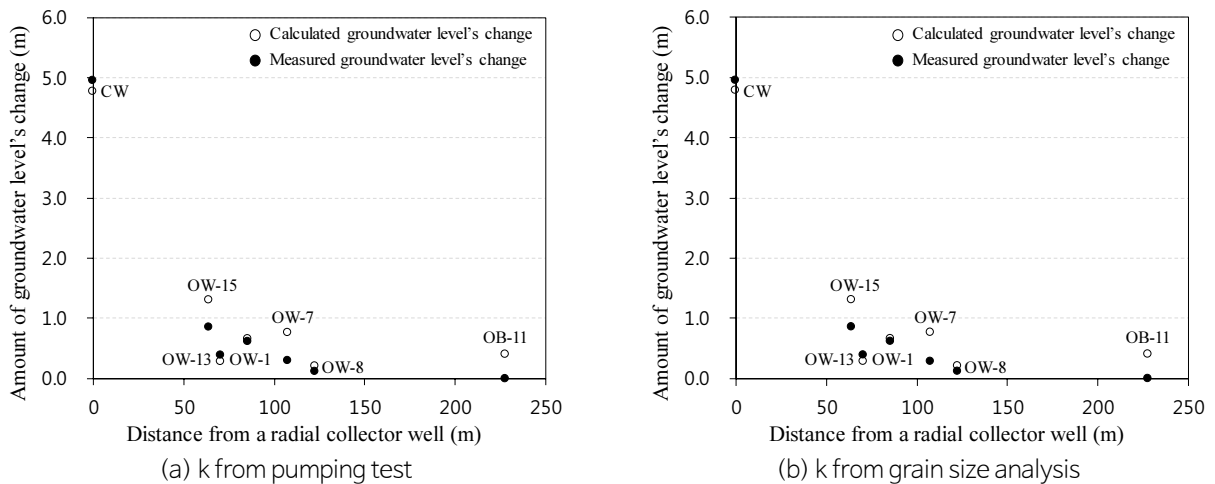
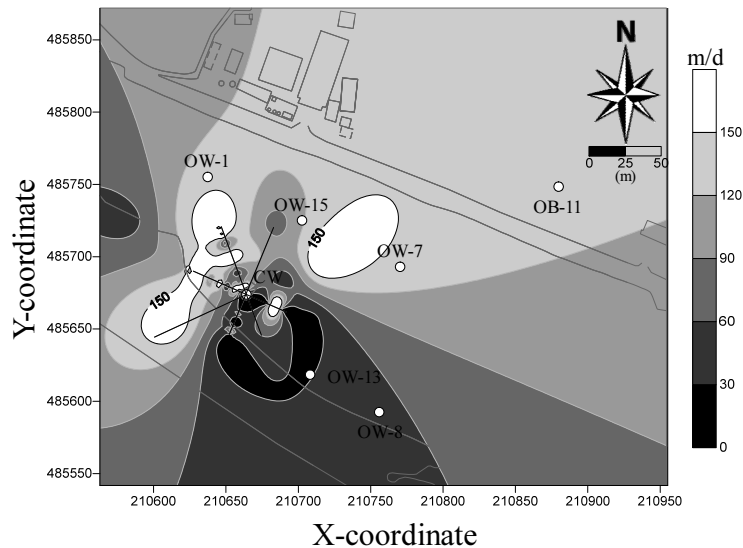


Fig. 4. Comparison of the measured and calculated groundwater level changes at each well.

**Table 3.** Measured and calculated groundwater level changes at each monitoring well

Contents		Collector well	OW-1	OW-7	OW-8	OB-11	OW-13	OW-15
Distance	$x_1$	-	85.8	107.9	122.6	228.2	70.6	64.2
	$x_2$	42.3	110.8	145.1	132.8	267.1	78.9	106.1
Measured groundwater level change (m)		4.95	0.61	0.29	0.12	0.00	0.39	0.85
Calculated groundwater level change (m)	k from pumping test (41.6 m/d)	4.78	0.66	0.77	0.21	0.41	0.29	1.30
	k from grain size analysis (42.5 m/d)	4.70	0.65	0.75	0.20	0.40	0.28	1.27

방사형집수정의 양수시 지하수 관측정까지의 방사상의 물의 흐름이 존재한다고 가정하고, 방사형집수정에서부터 지하수 관측정 사이의 평균 수리전도도와 대수층의 평균 두께를 산정하였다. 수평집수관의 굴착시 평균 2 m 간격으로 채취된 토양입자에 대한 입도분석 자료로부터 추정된 수리전도도를 이용하여 연구지역내 수리전도도의 분포도를 작성하였으며(Fig. 5), 이로부터 관측정 방향에 대한 로그 변환된 수리전도도로부터 평균 값으로 산정하였다. 또한, 관측정 지점과 방사형집수정 지점의 대수층의 두께로부터 평균 대수층의 두께를 산정하였다(Table 4).



**Fig. 5.** Distribution of hydraulic conductivity estimated from a particle size analysis.

**Table 4.** Distribution of average aquifer thickness and hydraulic conductivity along each monitoring well direction

Direction	Average aquifer thickness (m)	Estimated average hydraulic conductivity (m/d)
OW-1	5.96	117.89
OW-7	6.00	91.58
OW-8	5.97	35.45
OW-13	6.00	32.49
OW-15	5.68	84.68



대수층의 수리전도도와 두께의 곱으로 나타내는 투수량계수는 수리전도도 및 대수층의 두께와 비례하며, 투수량계수가 클수록 대수층을 통해 유동하는 유체의 양은 많아지므로 양수시 지하수위 강하가 작게 나타나는 특성이 있다(Hahn, 2015). OW-13 관측공 방향은 수리전도도가 작아 수위강하가 크게 나타나야 하지만 하천과 접하는 지역으로서 양수시 하천수의 유입에 의하여 수위 강하가 적은 것으로 보인다. 한편, OW-7 및 OW-15 관측공 방향은 수리전도도가 큰 편으로서 지하수위 강하가 작은 특성을 갖고 있을 뿐 아니라, OW-7 방향으로의 수평집수관이 설치되어 있지 않기 때문에 지하수위 강하량이 계산값과 가장 큰 차이를 나타내는 요인으로 작용한다. 한편, OB-11 관측공의 실제 지하수위 강하량이 계산된 강하량보다 작은 것으로 나타났는데, 이는 OB-11 인근에 위치한 농업용 양배수장 및 배수로에서의 인위적인 수위 조절에 의한 영향으로 판단된다.

대수층의 비균질성이 존재하는 지역에서 수리전도도와 대수층 두께의 이방성이 지하수위 강하에 어느 정도의 영향을 미치는지 검토하기 위하여, 본 연구지역에서 출현 가능한 방향별 수리전도도의 범위(32.49~117.89 m/d) 및 대수층 두께의 범위(5.68~6.00 m) 값을 이용하여 수위 강하량의 민감도를 검토해 보았다(Fig. 6). 수리전도도가 낮아짐에 따라서 각 방향에서의 지하수위 강하량이 급격히 증가하는 경향을 보이나, 대수층의 두께의 변화에 대해서는 지하수위 강하량이 상대적으로 민감하지 않은 것으로 나타났다. OW-1, OW-7 및 OW-13 관측정 방향에서의 수리전도도 값에 따른 수위강하량을 계산한 결과 약 0.27~0.71 m 변화가 나타났고, 방향별 대수층의 두께에 따른 수위강하량을 계산한 결과 약 0.02~0.04 m 변화가 있는 것으로 계산되었다. 즉, 본 연구지역에서 출현 가능한 수리전도도의 범위 및 대수층의 두께 분포 특성을 고려해 볼 때, 양수시 지하수위 강하에 영향을 미치는 민감 요인은 모래자갈층 두께의 공간적인 급변 현상보다는 수리전도도의 차이임을 보여준다. 이와 같은 수리전도도의 민감성은 현장 조사시 수리전도도의 분포에 대한 정확한 파악이 취수량 결정 및 배후지의 지하수위 예측에 중요함을 보여주고 있다.

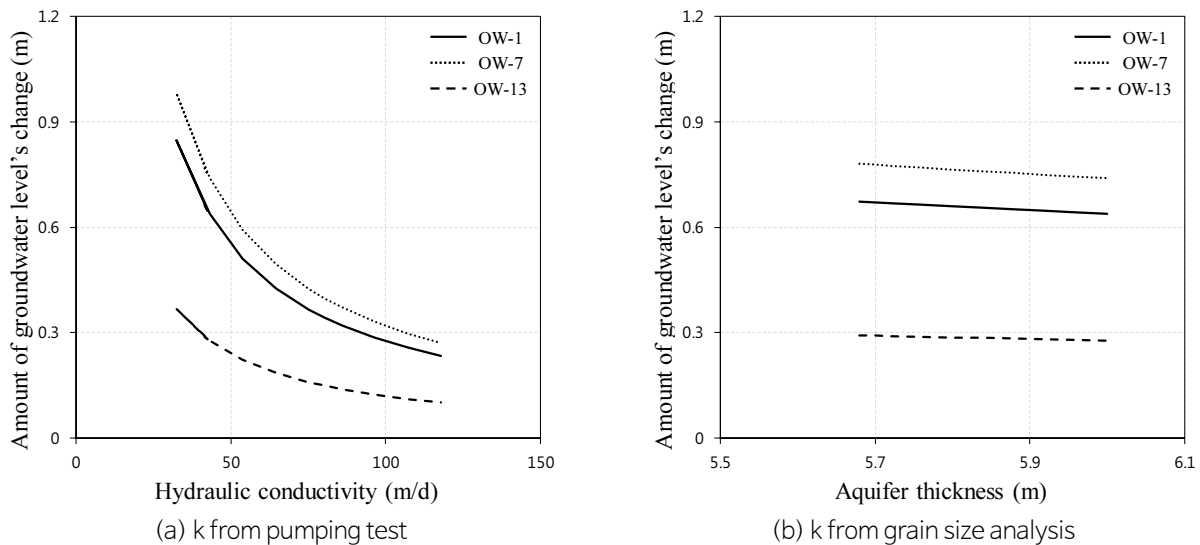


Fig. 6. Calculated groundwater level changes based on the hydraulic conductivity and aquifer thickness.

### 토의 및 결론

연구지역에서 실시한 방사형 집수정의 양수시 배후지의 지하수위는 방향별도 동일하게 강하되지 않고 차이를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 수 십 m 길이의 수평집수관이 방사상으로 설치되는 집수정의 경우에, 방향별 수평집수관의 설치



여부가 그 방향으로의 지하수위 강하에 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 또한, 방사형집수정에서 원거리에 위치한 관측 정에서의 수위 변화는 집수정에서의 취수에 의한 영향 뿐 아니라 관측정 주변에 존재하는 수로, 배수구와 같은 수리적인 특성 변화에 의해서 지배를 받는 것으로 나타났다. 방사형집수정에서의 취수는 주변지역의 지하수위에 영향을 미치게 되는데, 대수층이 균질 등방성이라는 가정 하에 적용된 mirror well 개념을 이용한 지하수위 예측은 실제 지하수위와 미세한 차이를 보이는 것으로 나타났으나, 대수층의 균질성 여부에 따라서 그 적용성이 평가될 수 있는 것으로 보인다. 방사형집수정을 큰 규모의 수직정으로 고려하여 추정된 배후지의 지하수위는 물의 흐름 구간상에 존재하는 수리전도도 및 대수층의 두께에 의하여 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히, 본 연구지역에서 출현 가능한 수리전도도의 범위와 대수층 두께의 범위를 적용하여 배후지 지하수위 강하량을 평가해 보면, 배후지에서의 지하수위의 변화는 해당 측정 지점 주변의 대수층의 두께 보다는 수리전도도의 이방성에 의한 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

방사형집수정에 의한 강변여과수 개발은 일반 관정과 달리 대용량 취수로 이루어지게 되므로 배후 지역에서의 지하수위 변화가 크게 나타날 수 있다. 배후지역에서의 지하수위 변화는 수리전도도 및 대수층의 두께 등에 의하여 영향을 받므로 방사형집수정 굴착 주변 뿐 아니라 물의 흐름상에 위치하는 구간 전반에 대한 수리전도도 및 대수층의 분포에 대한 정밀한 사전 조사가 필요함을 보여준다. 방사형집수정의 조사 및 설계 단계에서 충분한 물량의 시추조사 및 대수층 실험 등을 통하여 수리전도도 및 대수층의 분포에 대한 평가가 선행된다면 배후지역에서의 지하수 고갈 등 민원 문제에 대해서도 보다 능동적으로 대처가 가능할 것이다.

## 사사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁 시행한 2019 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(과제번호 19CTAP-C130215-03)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Babac, D., 1965, Zakonitosti opadanja izdašnosti Ranney bunara na Beogradskom izvorištu, Izgradnja.
- Cha, J.H., Lee, J.Y., Lee, C.H., Kim, G.B., 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*, 52(4), 465-474 (in Korean with English abstract).
- Cheong, J.Y., Hamm, S.Y., Kim, H.S., Son, K.T., Cha, Y.H., Jang, S., Baek, K.H., 2003, Characteristics of waterlevel fluctuation in riverside alluvium of Daesan-myeon, Changwon city, *The Journal of Engineering Geology*, 13(4), 457-473 (in Korean with English abstract).
- Chertousov, M.D., 1949, A specialized hydraulics course (in Russian), Moscow, Gosenergoizdat, Referenced in Bear, 1979.
- Chertousov, M.D., 1962, Hydraulics, special course (in Russian), Moscow, Gosenergoizdat, Referenced in Bear, 1979.
- Hahn, J.S., 2015, Hydrogeological and groundwater modeling, Seoul, NAEHA Press, 722p.
- Hamm, S.Y., Cheong, J.Y., Kim, H.S., Hahn, J.S., Ryu, S.H., 2004, A study on groundwater flow modeling in the fluvial aquifer adjacent to the Nakdong river, Book-Myeon area, Changwon city, *Journal of Economic and Environmental Geology*, 37(5), 499-508 (in Korean with English abstract).
- Huang, C.S., Tsou, P.R., Yeh, H.D., 2012, An analytical solution for a radial collector well near a stream with a low-permeability streambed, *Journal of Hydrology*, 446-447, 48-58.

- Kim, G.B., Jeong, J.H., 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., Oh, D.H., 2018, Determination of the Groundwater Yield of horizontal wells using an artificial neural network model incorporating riverside groundwater level data, *The Journal of Engineering Geology*, 28(4), 583-592 (in Korean with English abstract).
- Kim, T.H., Lee, C.H., Lee, J.H., Oh, D.H., Kim, G.B., 2016, Estimation of groundwater yield at a horizontal well using soil characteristics at riverbank filtration site, *Journal of the Geological Society of Korea*, 52(3), 291-301 (in Korean with English abstract).
- Schubert, J., 2002, Hydraulic aspects of riverbank filtration-field studies, *Journal of Hydrology*, 266(3-4), 145-161.
- Wegenstein, M., 1954, La recharge de nappes souterraines au moyen de puits centraux et galeries d'alimentation horizontales [Recharge of aquifers by means of horizontal collector wells] [in French with English summ.] : *Internat. Assoc. Sci. Hydrology Pub.* 37, 232-237.