

소규모 준평탄지 분지에서의 지하수 인공함양에 따른 주입률 대비 채수량 효과 평가

김병준 · 이영동[‡] · 원경식 · 신동민
지오택컨설턴트(주)

Evaluation of the efficiency of water collection on the injection rate by groundwater artificial recharge in a small quasi-flat basin

Byeong-Jun Kim · Yeoung-Dong Lee[‡] · Kyoung-Sik Won · Dong-Min Shin
Geotech Consultant Co., Ltd., Gunpo 15850, Republic of Korea

요 약

연구지역은 충청남도 홍성군 갈산면 운곡마을 지역으로 농번기인 5월~6월에 농업용수가 부족하여 이를 해결하고자 분지 상류지역에 지중방식의 인공함양으로 대수층에 물을 주입시켜 주변 지하수위를 상승시킴으로써 부족량을 증대시키고 분지 하류지역에 수평집수정을 설치하여 대수층 내 지하수를 취수, 공급하기 위한 Hybrid형 인공함양 순환 시스템을 설치하였다. 본 연구는 Hybrid형 인공함양 순환 시스템에서 인공함양 주입에 의한 주입효과를 분석하고 그에 따른 채수량 변화를 평가하였다. 연구 평가방법은 인공함양 주입 전 채수량을 파악하고, 연구지역 하류에 투수성 저감벽체 설치 전 후의 인공함양 주입에 의한 주입효과와 주입효과에 의한 채수량 효과 평가를 실시하였다. 인공함양 주입 전 steady-state condition의 대수층 적정채수량은 415 m³/day로 평가되었다. 투수성 저감벽체 설치 전 인공함양에 의한 지하수위 상승은 9.8 cm~107.7 cm 발생하였으며 그로 인하여 대수층의 적정채수량은 440 m³/day가 취수되는 것으로 나타났다. 투수성 저감벽체를 설치 후 주입에 의한 함양 분지 내 지하수위 상승은 10.4 cm~128.3 cm의 지하수위 상승이 발생하였으며, 주입 후 515 m³/day 적정채수량이 취수되는 것으로 나타났다. 투수성 저감벽체 설치에 의한 인공함양 효과는 설치 전보다 약 20% 정도 높게 나타났으며, 투수성 저감벽체 설치에 의한 대수층의 채수량 증가율은 24.3% 증가하는 것으로 평가되었다. 연구지역과 같은 소규모 준평탄지 상습 가뭄 지역에 투수성 저감벽체를 연계한 Hybrid형 인공함양 순환 시스템을 적용하면 용수확보가 가능하여 물 부족 문제 해결에 매우 효과적일 것이다.

주요어: 인공함양, Hybrid형 인공함양 순환 시스템

ABSTRACT: The Hybrid-type artificial recharge and circulation system have been studied to solve the problem of shortage of agricultural water during the busy farming season in Ungok village, Galsan-myeon, Hongseong-gun, Chungcheonnam-do. Water was injected into the aquifer through the Hybrid-type artificial recharge and circulation system in the upstream basin area to raise the surrounding groundwater level with increasing the amount of groundwater. This study analyzed the change of the groundwater level and the optimal water collection by installing a water collection system with an underground barrier in the downstream area of the basin. After installing an underground barrier, the groundwater level rise in the recharge basin caused a rise of 10.4 cm~128.3 cm from 9.8 cm~107.7 cm by about 20% higher than before installation. Also the optimal water collection caused a increase of 515 m³/day from 415 m³/day by 24.3% more than before installation. Therefore it was found that applying the Hybrid-type artificial recharge and circulation system will be very effective way in settling the water shortage in conjunction with an underground barrier to a small scale quasi-flat land habitual drought area such as the study area.

Key words: artificial recharge, Hybrid-type artificial recharge and circulation system

[‡]Corresponding author: +82-31-436-0836, E-mail: ydllec@geoinfo.co.kr

1. 서 언

우리나라는 약 2~3년 주기의 중·소규모의 가뭄, 약 7년 주기의 극한 가뭄이 발생하며 기후 변화의 영향 및 지형·기상학적 특성에 따라 불규칙한 가뭄 발생이 늘어나는 추세이다. 최근 기후 변화로 인해 증가한 가뭄에 대해 가뭄상황을 미리 예측하여 피해를 경감하는 선제적 가뭄대응이 필요하다.

전 세계적으로 지하수는 생활용수 및 농업용수의 주요 공급원으로 역할을 담당하고 있다. 최근 증가하는 물 수요에 따라 지하수 취수량이 늘어나고 있으며, 과거에 비하여 극심한 가뭄 조건으로 인하여 지하수 개발의 지속성에 대한 우려가 높아지고 있다.

인공함양은 지하대수층의 지하수 부존량을 증가시키기 위해 자연적인 함양 패턴이 의도적으로 수정될 때 발생하는 함양(재충전)으로 정의되며 넓은 의미에서 인공함양은 “투수층에 물을 도입하는 모든 절차”로 정의할 수 있다. 인위적인 간섭으로 인해

지표수를 지하대수층으로 이동시켜 물을 자연적인 보충 조건에서 보다 더 빠른 속도로 증가하게 하는 것이다. 인공함양의 가장 큰 장점은 풍수기의 여유 수자원을 지하로 침투시켜 갈수기에 이를 회수할 수 있다는 것이며, 일반 자연 상태에서의 취수보다 대량의 수자원을 확보할 수 있으며 일정기간의 대수층 저류를 통한 자연 정화능력을 이용할 수 있는 장점이 있다.

인공함양은 지표수, 강우, 재이용수, 타수원 등을 지하로 인공적으로 주입하여 대수층을 함양시키는 방법으로 인공 함양분지 및 습지, 수로, 지하댐, 우수 침투시설 등 인위적인 시설이나 지반조건을 변경하여 인공주입을 통해 지하에 침투시켜 수자원을 확보하는 기술로 대수층을 활용한 수자원의 안정적 공급과 관리를 위한 방안으로 세계 여러 곳에서 시행되고 있다(Bower et al., 2008; Zaidi et al., 2015; Ghazavi et al., 2018; Rajasekhar et al., 2019).

본 연구의 목적은 대수층 지하수 부존이 미약하며

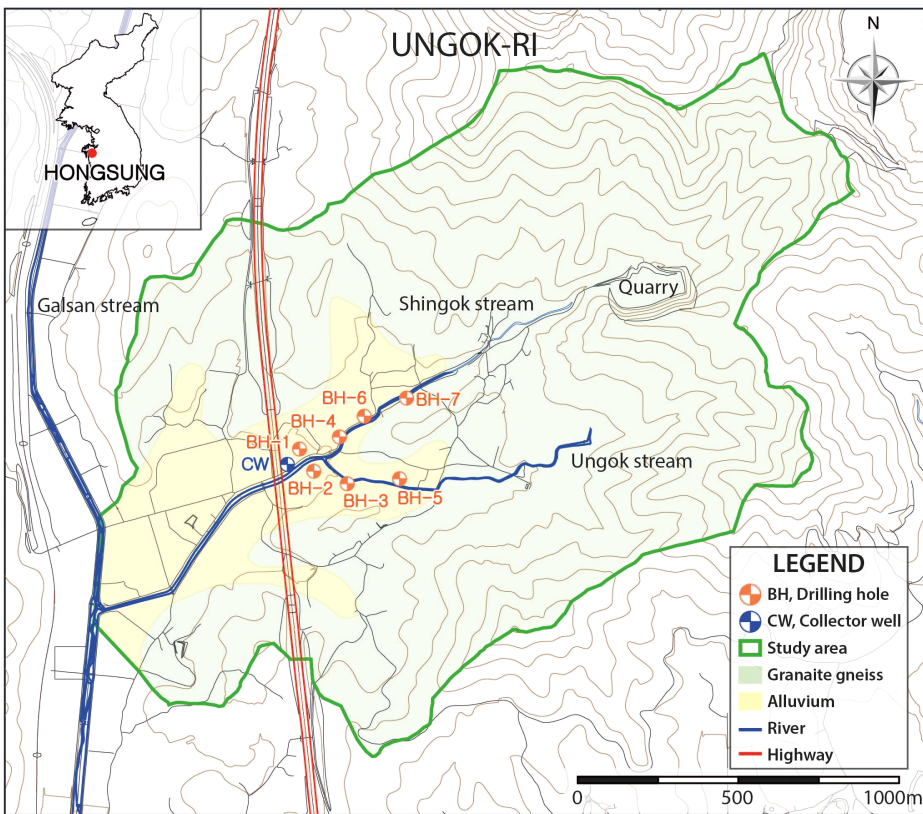


Fig. 1. Location of the study area.

대규모 하천이나 수원이 발달하지 않을 뿐 아니라 광역상수도 연계에도 한계를 가지고 있어 가뭄 시 용수 확보 수단이 제한적으로서 상시 물 부족을 겪는 중상류 준평탄지 유역지역을 대상으로 기존 수자원인 지표수 및 암반 지하수를 지하 대수층으로 인공 함양시켜 주변 지하수위를 상승시킴으로써 안정적인 용수를 확보하고, 확보된 지하수원을 수평취수정을 통해 취수하고 연구지역 상류로 도수하여 농경지로 공급하는 인공함양 시스템에서 인공함양 주입효과를 분석하고 그에 따른 채수량 변화를 평가하는데 목적을 두었다.

2. 연구지역의 대수층 분포 및 인공함양 순환 시스템

2.1 연구지역 대수층 분포

연구지역은 행정구역상 충청남도 홍성군 갈산면 운곡리 신곡마을에 위치하고 있으며(그림 1) 경기육괴 서남부에 해당되는 지역으로, 전반적인 지질은 선캄브리아기 편암류 및 편마암류와 중생대 관입화성암류, 시대미상의 변성암 또는 퇴적암으로 구성되어

있으며 최상부에는 제4기 충적층이 분포하고 있다(Lee and Kim, 1963).

연구지역 서쪽에는 갈산천이 북에서 남으로 흐르고 있으며, 연구지역을 가로질러 동측에서 서측으로 폭 5~10 m 정도의 신곡천이 흐르고 있다. 연구지역 동측 경계에는 105~110 masl의 표고를 갖는 산지 지형이 분포하여 분지형태의 지형을 구성하며, 산지를 제외한 전답의 지형 경사는 3.7°로서 완만한 특성을 보이고 있다.

연구지역의 시추조사 결과에 의하면, 매립층이 지표 하 0.8~1.5 m, 기반암 상부 토사층이 지표 하 3.5~9.5 m에 나타나는 것으로 분석되었다(표 1; 그림 2). 상류지역에서 하류지역으로 갈수록 연구지역 내 중부지역인 BH-3, BH-4공에서 토사층이 두껍게 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 상류지역 BH-6, BH-7공은 상대적으로 기반암이 양호한 상태를 보이는 반면, 하천 상류지역에서 하류지역으로 이동할수록 기반암인 화강편마암이 풍화와 파쇄가 발달하는 것으로 나타났다(그림 2). 하류지역은 풍화대 분포와 기반암의 암질조건을 고려했을 때 인공함양의 대상 지층으로 고려할 수 있다. 이와 같은 특성은 신곡마을

Table 1. Specification of borehole and contents of property test.

Borehole	BH-1	BH-2	BH-3	BH-4	BH-5	BH-6	BH-7	
Coordinate	X	160114.3	160137.4	160225.0	160236.6	160430.2	160316.0	160415.7
	Y	447255.2	447202.4	447166.5	447279.3	447212.0	447354.3	447397.3
Depth (GL.-m)	21.0	20.5	31.6	20.8	21.0	20.5	31.5	
Field permeability test (cases)	5	3	5	6	4	3	3	
Soil size analysis (cases)	2	3	3	2	1	2	2	

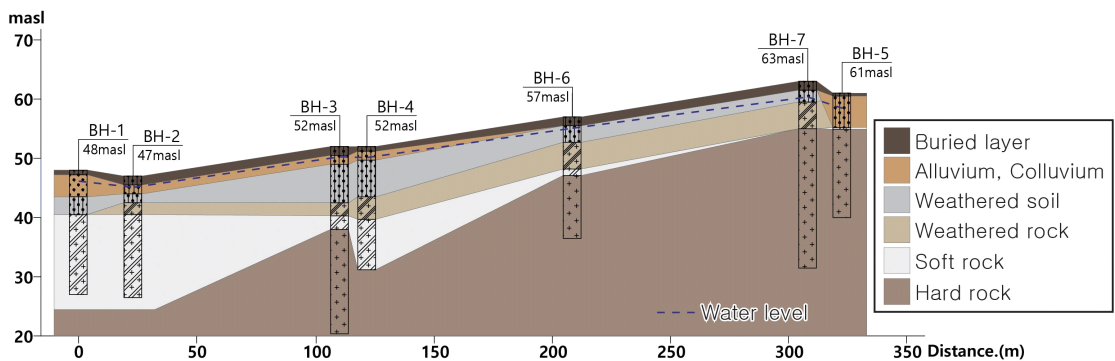


Fig. 2. Cross section of geologic strata in the study area by using the drilling data (Lee et al., 2019).

Table 2. Vertical distribution of permeability in the study area estimated based on field test results.

Depth (GL.-m)	In-situ K (cm/sec)	Average	Laboratory K (cm/sec)	Average	Geology
1.5 ~ 3.0	4.05×10^{-5} ~ 1.43×10^{-3}	6.46×10^{-4}	9.96×10^{-6} ~ 4.09×10^{-4}	1.27×10^{-4}	Alluvium, Colluvium
3.0 ~ 4.5	5.65×10^{-5} ~ 4.10×10^{-3}	7.54×10^{-4}	3.19×10^{-6} ~ 1.67×10^{-4}	6.06×10^{-5}	Alluvium, Colluvium
4.5 ~ 6.0	5.82×10^{-5} ~ 8.79×10^{-4}	4.58×10^{-4}	2.79×10^{-6}	2.79×10^{-6}	Colluvium
6.0 ~ 7.5	2.58×10^{-4} ~ 4.10×10^{-4}	3.37×10^{-4}	6.03×10^{-5} ~ 1.11×10^{-4}	8.57×10^{-5}	Weathered soil
7.5 ~ 9.0	3.10×10^{-4}	-	-	-	Weathered rock
10.0 ~ 20.0	3.67×10^{-5} ~ 2.31×10^{-4}	9.21×10^{-5}	-	-	Soft rock and hard rock
20.0 ~ 35.0	1.40×10^{-6} ~ 1.90×10^{-5}	5.16×10^{-6}	-	-	Hard rock

상류지역보다는 하류지역에서 대수층의 함양 공간이 크음을 보여주고 있다.

인공함양의 중요한 요소 중 하나인 연구지역의 수리특성 파악을 위해 시추조사와 병행하여 토사층과 암반층에 대해 수리시험을 수행하여 수리전도도를 산출하였다(표 2).

연구지역의 전반적인 토사층의 수리전도도는 $4.05 \times 10^{-5} \sim 4.10 \times 10^{-3}$ cm/sec, 평균 5.86×10^{-4} cm/sec, 기하평균은 2.97×10^{-4} cm/sec의 값을 나타냈으며, 암반층의 수리전도도는 $1.40 \times 10^{-6} \sim 2.31 \times 10^{-4}$ cm/sec, 평균 7.20×10^{-5} cm/sec, 기하평균 2.18×10^{-5} cm/sec로 나타났다. 분석 결과, 연구지역 하류부(고속도로 동측)는 기반암 내 파쇄구간이 발달하며 풍화가 심하여 투수성이 상대적으로 양호한 반면, 상류지역은 파쇄구간이 기반암 상부에만 부분적으로 발달하고 신선한 암반이 우세하여 투수성이 상대적으로 불량한 것으로 평가하였다(Lee *et al.*, 2019).

2.2 인공함양 순환시스템

본 연구는 상습 가뭄지역인 유역 상류 소분지의 특성상 인공함양에 필요한 원수인 하천수의 유량 확보가 제한적이므로 하천수와 암반 심부지하수를 인공함양 원수로 사용하여 인공함양시설로 주입, 하류 수평집수정 취수시설에서 취수하여 상류로 공급하고, 이를 하류로 분배하는 Hybrid형 인공함양 순환시스템이 적용되었다(그림 3).

소하천의 규모가 매우 작아 갈수기에 하천수가 고갈되어 인공함양 원수를 하천수로부터 확보하는 것이 쉽지 않을 수 있으므로, 하천수 뿐 아니라 기저 유출수 및 심부의 암반지하수도 함양원수로 고려되었다. 순환 시스템의 의미는 인공함양 이후 하류에서 취수된 지하수가 농경지에 공급된 후 자연적인 침투가 발생하고 하류 취수정에서 다시 취수되는 과정을 의미한다. 이와 같이 본 시스템은 소분지내의 수자원 총량이 가능한 한 분지 외부로 배출되지 않고 장기간 저류될 수 있도록 함으로써 용수원으로 이용될 수 있도록 하는 개념이다.

주입 원수의 수질 확보를 위하여 하천 구간 내에 2개소의 하천수질 전처리 장치를 설치하였는데, 상류로부터 자갈산화구간, 식생 수처리 구간, 자갈 구간, 하류의 돌망태 구간 등으로 구성된다(그림 4).

전 처리된 함양원수를 주입하는 최적의 인공함양 시설을 구축하기 위해 시험부지를 설정하고 지층의 수직적 분포, 시험지역에서의 다양한 형태의 주입 시험 등의 결과를 분석하여, 연구지역 인공함양 시설의 주입 지층 범위, 수직 주입정의 규격, ditch의 여재 규격 등의 설계인자를 제시하였다(Won *et al.*, 2020). 지층별 주입시험 분석결과를 토대로 층적+상부 암반대수층이 주 함양 대상구간으로 선정되었고, 주입정의 규격은 다양한 공경별 주입시험 분석 결과 4 inch 규격이 효과적인 것으로 분석 제시되었다. 또한 ditch의 여재 규격은 현장시험과 모델링 분석을 통하여 30

~75 mm 내외의 여재가 가장 효과적인 것으로 분석되었다. 간격별 주입에 의한 수직정 주입시험 결과 9~12 m 간격이 적정 주입정 간격으로 평가되어 10 m 간격이 제시되었다. 이와 같이 확보된 지하수 인공함양 시스템의 설계인자를 토대로 함양원수의 주입 효과를 높이기 위하여 ditch와 well을 융합한 인공함양 기술이 적용되었다. 연구지역 내 북측과 남측에 총 4개의 함양 line을 설치하였다. 북측에는 9개

수직 주입정을 포함하는 길이 100 m의 ditch 2개 line을 설치하였으며, 남측에는 7개 수직 주입정을 포함하는 길이 70 m의 ditch 2개 line을 설치하였다(그림 5). ditch의 폭과 깊이는 각각 3 m, 3.5 m 정도이며, 자갈의 크기는 30~75 mm로서 ditch 바닥으로 갈수록 작은 크기를 사용하였다. 수직 주입정의 깊이와 직경은 각각 10 m, 100 mm로 설치하였다. 인공함양 구간의 하류 지점에서는 2개의 수평정

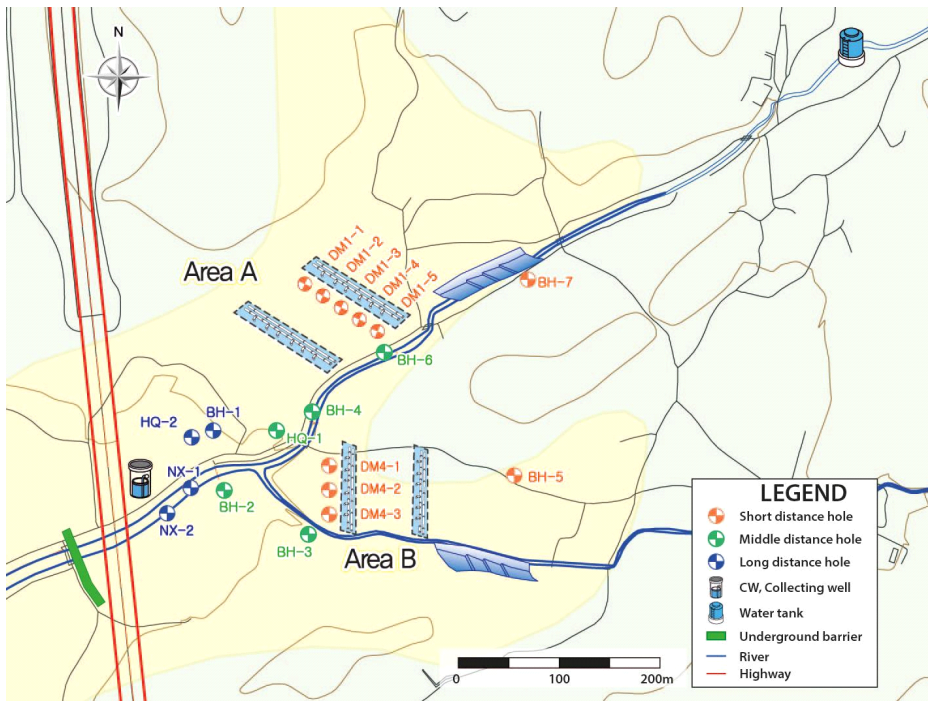


Fig. 3. Location of Hybrid-type artificial recharge and circulation system in the study area.

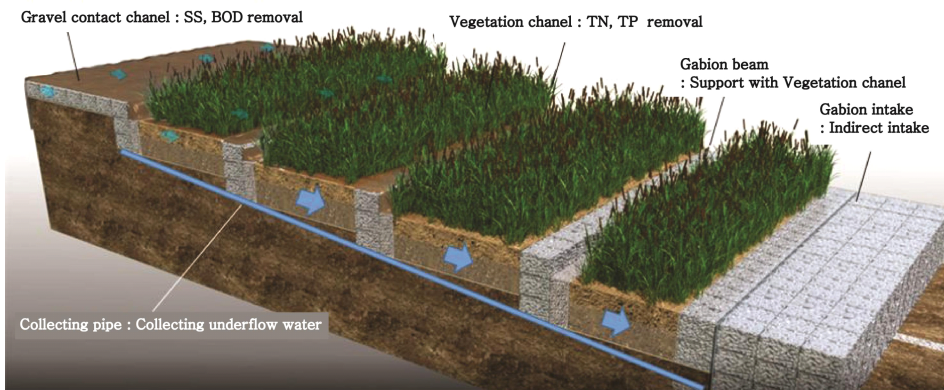


Fig. 4. Pretreatment system of stream water.

(horizontal pipe)을 갖는 집수정(collector well)을 설치하여 용수를 확보, 공급할 수 있도록 하였다. 연구지역 시추조사 결과와 전기방위비저항탐사 결과 및 집수정 굴착 결과를 종합 분석하여 최적 수평집수정 설치를 위한 수평정의 굴진방향 및 굴진심도를 결정하였다. 전기방위비저항탐사 결과 지하수 흐름이 양호한 방향은 N60E, EW 방향으로 분석되었으며, 수평정 굴진심도는 지표하 9.0 m에서 다량의 지하수 용출이 양호하다고 분석되었다. 계획 채수량인 500 m³/day를 만족하기 위한 수평정 수량 및 길이를 결정하기 위하여 연구지역에서 분석된 지질 및 수리지질과 지하수위를 이용하여 수평정의 적정길이와 수량을 아래 식에 의하여 산출하였다(Han, 2000).

$$Q = \frac{L \times m \times k \times H \sqrt{A - B \times h / H - 1}}{C} \quad (1)$$

여기에서, Q 는 채수량(m³/day), k 는 대수층 수리전도도(m/day), H, h 는 대수층 두께(m), L 은 수평취수관의 본당 길이(m), m 은 수평정의 수(개)를 의미한다.

본 지역의 대수층 조건에서 인공함양이 없는 상태에서 2.5 m 수위강하 시 수평집수정의 채수량은 560 m³/day로 산정되었다(표 3). 이 채수량은 하천 수위가 감소하지 않는다는 조건이 반영된 것이므로 갈수기에 현장의 하천수위 감소가 발생한다는 점을 고려할 때 장기적인 안정적 취수량으로 평가하는 것은

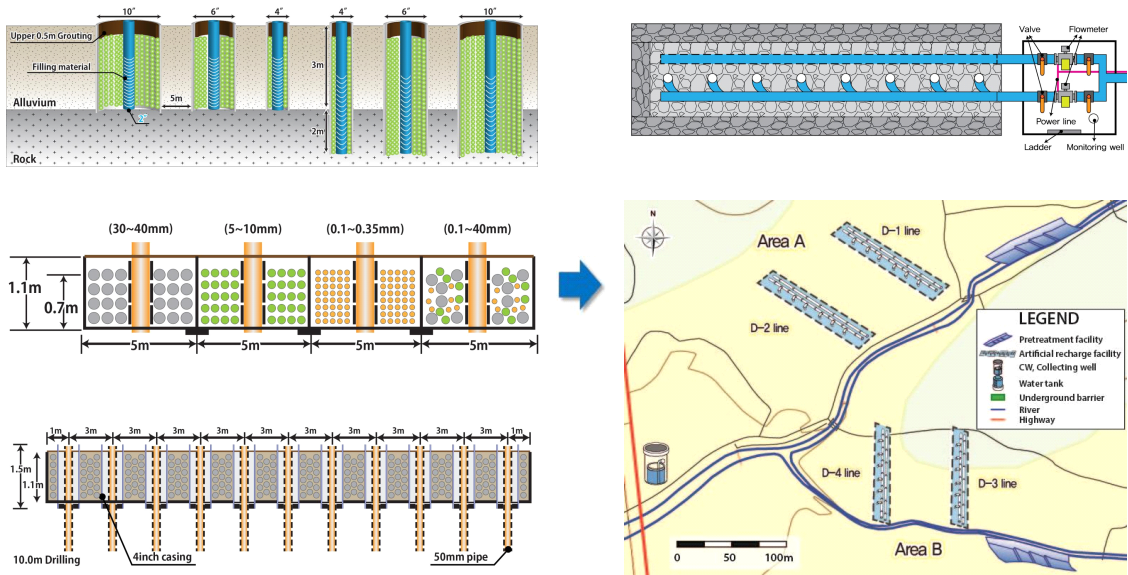


Fig. 5. Schematic diagram of the combined artificial recharge structure design and construction.

Table 3. Result of pumping rate calculation according to the length and number of horizontal wells.

Content	Applied value	Remark
Length of horizontal well (m)	50	
Number of horizontal well	2	
Hydraulic conductivity (m/day)	0.864	
Aquifer thickness at collector well groundwater table (m)	12.0	Groundwater table: G1.-2.0 m
Aquifer thickness at collector well stable water level (m)	4.5	
Pumping rate in collector well (m ³ /day)	560	

한계가 있다.

이와 같이 확보된 수평집수정의 설계를 토대로 수평정은 길이 50 m, 직경 150 mm로 설치되었고, 집수정은 직경 2.1 m, 깊이 9.5 m의 Caisson으로서 하

천으로부터 20 m 이격하여 설치하였다(그림 6). 집수정에서 취수된 물은 100 mm 파이프를 통하여 유역 상류의 물탱크로 이송된 후 자연유하 방식에 의하여 농경지로 공급되는 방식으로 설치하였다.

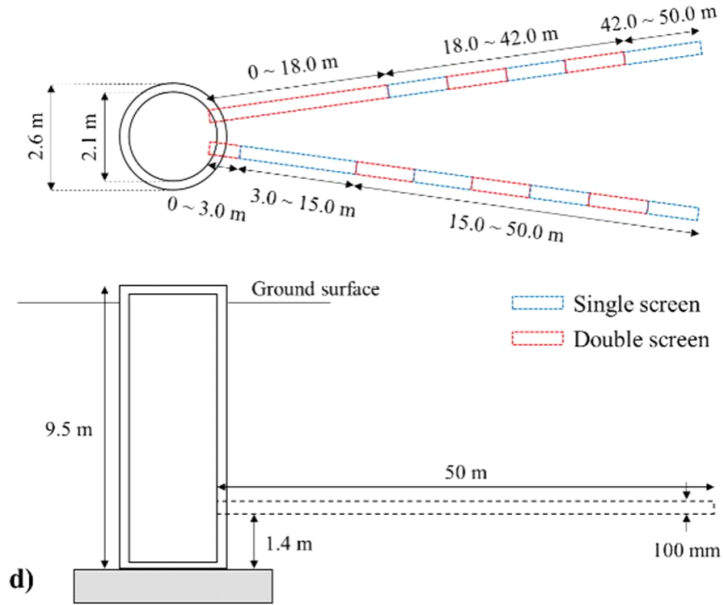


Fig. 6. Collector well: a caisson with two horizontal wells.



Fig. 7. Landscape of Hybrid-type artificial recharge and circulation system in the study area.

3. 연구 시험방법

인공함양에 의한 효과와 함양으로 지하수위 상승에 의한 지하수 부존량 증가에 따른 채수량 효과를 평가하기 위하여 단계별 현장 주입시험 및 양수시험을 실시하였다. 양수시험에 의한 각 단계별 채수량 효과 평가는 단계대수성시험 결과 분석에 의해 적정 채수량을 산정하였고, 최대채수량은 각 단계별 장기 양수시험 결과를 이용하여 지하수위 강하 대비 채수량 상관관계 분석을 통하여 산출하였다(Driscoll, 1986). 현장시험은 1단계로 인공함양 주입 전 수평집수정에서 양수시험을 실시하여 연구지역 대수층의 적정 채수량 및 최대채수량을 평가하였다. 수평집수정에서 양수시험을 종료 후 강하된 지하수위가 완전히 회복된 후에 인공함양시설에서 주입에 의한 함양 효과와 인공함양에 의한 수평집수정에서의 채수량 효과를 파악하기 위하여 2단계 현장시험을 실시하였다. 본 연구지역은 유역 상류지역으로 완만한 지형 경사에 의한 지하수 배출이 발생하는 지역이기 때문에 인공함양 시 주입수가 대수층에 장기간 저류되기 어려운 조건을 갖고 있다(Choi and Kim, 2022). 함양된 물의 지하 대수층 내 저류 기간을 증가시키고 수평집수정의 채수량을 유지하기 위하여 2단계 시험 완료 후 연구지역 하류에 투수성 저감벽체를 설치하였다. 투수성 저감벽체 설치 후 2단계 시험에

의한 지하수위가 완전히 회복된 후에 3단계 주입시험 및 채수량 평가를 실시하였다. 각 단계별 시험은 아래 절차에 따라 실시되었다(그림 8).

이와 같은 시험 절차에 따라 1단계로 인공함양 주입 전 7단계의 단계대수성시험을 실시하여 수평집수정의 적정채수량을 산정하였으며, 2022년 1월 3일부터 2022년 1월 7일까지 4일간의 장기양수시험 결과를 이용하여 최대채수량을 산정하였다. 2단계 시험은 현장 주입 시험을 2022년 1월 10일부터 2022년 2월 21일까지 42일간 실시하였고, 2022년 2월 22일부터 2022년 2월 28일까지 단계대수성 시험과 장기 양수시험을 실시하여 적정채수량과 최대채수량을 산정하였다. 2단계 시험 후 투수성 저감벽체의 필요성이 대두되어 집수정 하류부에 저감벽체 설치 후 2022년 3월 24일부터 2022년 5월 7일까지 44일간 현장 주입 시험을 수행하고, 2022년 5월 3일부터 2022년 5월 10일까지 3단계로 단계대수성 시험과 장기 양수시험을 실시하여 적정채수량과 최대채수량을 산정하였다.

4. 연구 결과

4.1 단계별 연구 시험결과

각 단계별 현장시험 결과를 분석하여 인공함양 효과 대비 채수량 효과 평가를 실시하였다. 첫 번째 단

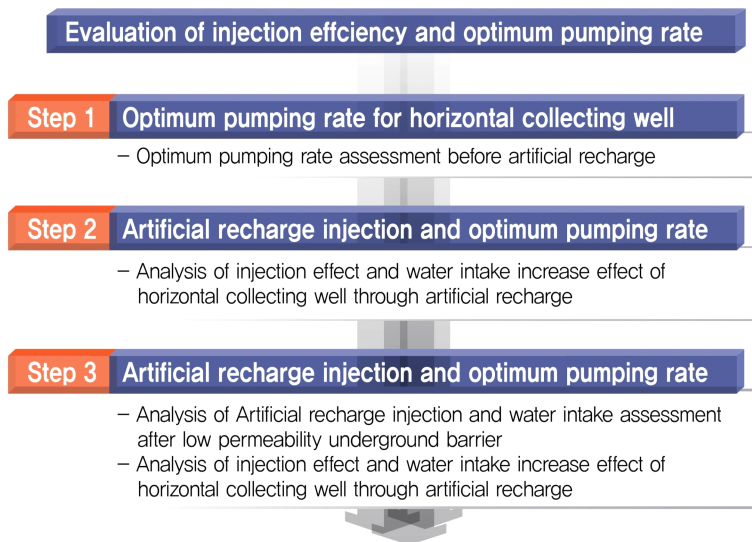


Fig. 8. Procedures for evaluating of injection efficiency and optimum pumping rate at each stage.

계는 인공함양을 하지 않은 상태인 steady-state condition에서 수평집수정에서의 적정채수량 및 최대채수량을 평가하였다. 적정채수량 평가를 위하여 1단계 214 m³/day에서 마지막 7단계 460 m³/day로 양수량을 늘리며 실시한 단계대수성 시험을 분석한 결과, steady-state condition에서 수평집수정에서의 적정채수량은 415 m³/day로 평가되었다(그림 9). 단계대수성 시험으로 강하된 지하수위가 완전히 회복된 후에 장기양수시험을 실시하여 파악된 안정수위를 토대로 가채수량 곡선을 이용하여 지하수위 강하와 채수량 상관관계 분석을 통해 최대채수량을 산정하였다(그림 10). 장기대수성 시험은 대수층의 안정성을 고려하여 290 m³/day로 실시하였으며, 시험 결과 1.7 m 강하된 상태에서 안정수위에 도달하였다(그림 11). 최대채수량은 수위강하에 따른 채수량과

수위강하에 따른 비양수량 상관관계를 가채수량 곡선을 이용하여 추가 수위강하에 따른 최대채수량을 분석한 결과 약 450 m³/day로 평가되었다.

2단계로 투수성 저감벽체 설치 전 인공함양의 효과를 분석하기 위하여 실시한 1차 주입시험과 주입 시험 후 주입에 의한 수평집수정에서의 채수량 변화를 평가하기 위해 2차 양수시험을 실시하였다. 1차 주입시험에 의한 거리별 지하수위 변화를 보면, 인공함양 주입지역에 인공함양시설과 평행하게 구축한 A 지역의 근거리 관측공(DM1-1~5)에서 65.1~107.7 cm, 평균 79.9 cm 수위상승이 발생하였다. 중거리 관측공(BH-6, BH-4)은 15.4~16.9 cm, 평균 16.1 cm 수위상승이 발생하였으며, 원거리 관측공(BH-1)은 32.3 cm 수위상승이 발생하였다. B 지역의 근거리 관측공(DM4-1~3)에서 44.8~99.4 cm, 평균 80.1 cm 수위

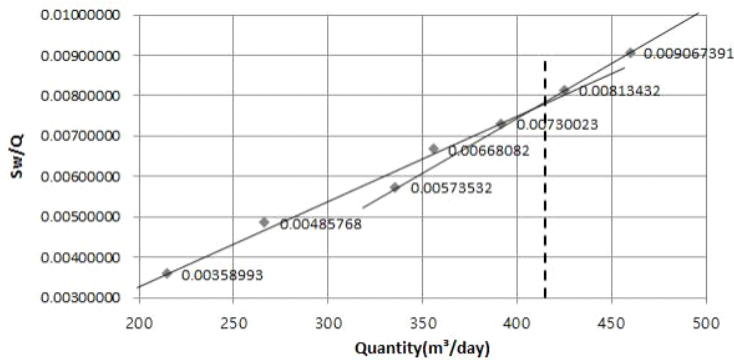


Fig. 9. Optimum pumping rate in a horizontal collecting well under steady-state conditions.

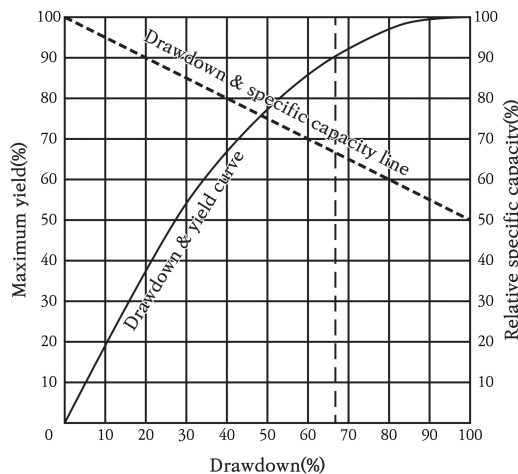


Fig. 10. Comparison of yield with groundwater level drawdown in aquifer (Driscoll, 1986).

상승이 발생하였다. 중거리 관측공(BH-3, BH-2)은 9.8~15.0 cm, 평균 12.4 cm 수위상승이 발생하였다

(그림 12). A 지역 원거리에 위치한 BH-1 지점이 중거리 관측공에 비해 높은 지하수위 상승을 보인 것

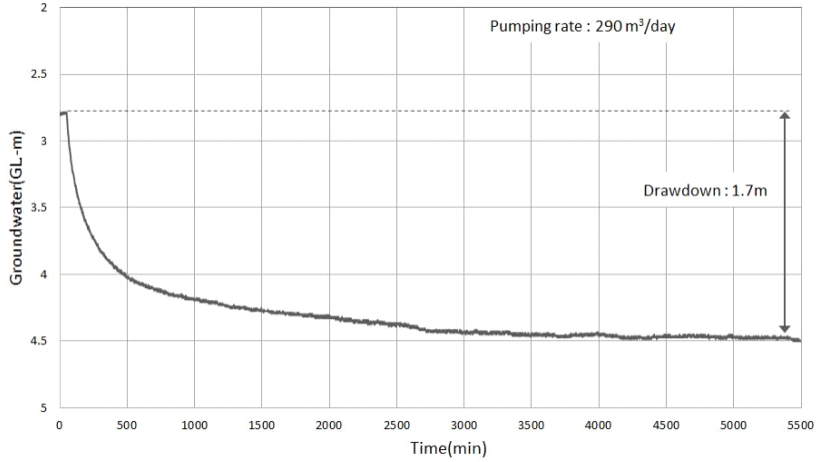


Fig. 11. Result of long-term pumping test in a horizontal collecting well under steady-state conditions.

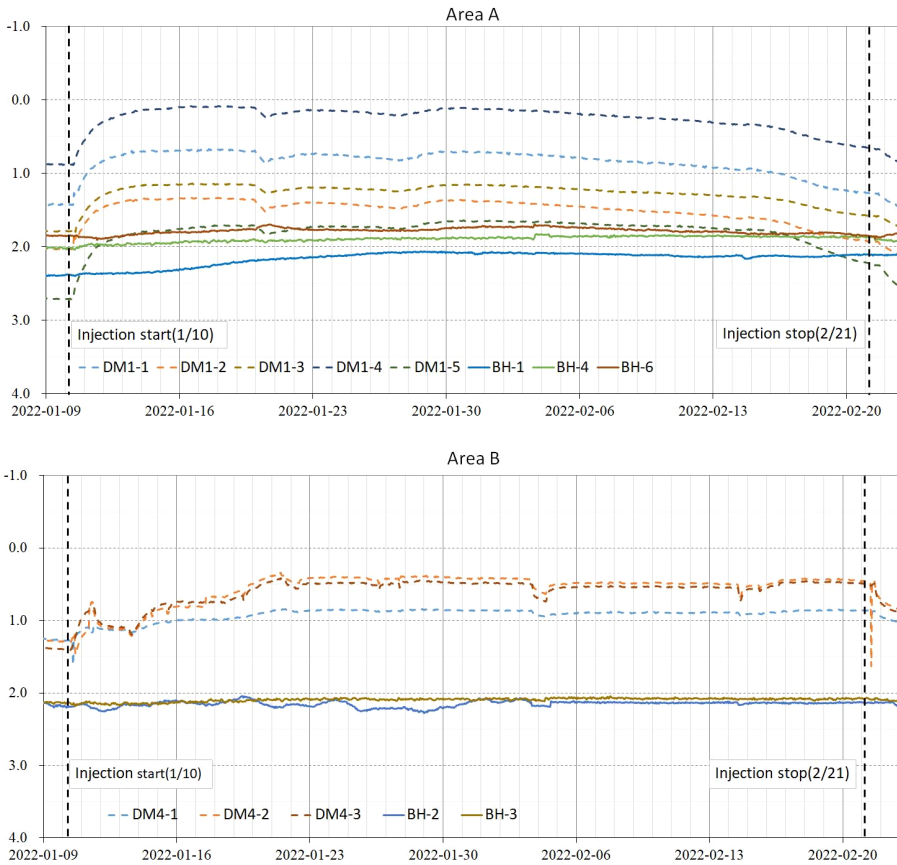


Fig. 12. Fluctuation of groundwater levels during 1st artificial recharge.

은 국지적인 지층의 이방성 때문으로 보인다. 토양의 입도분석에 의한 수리전도도 분석 결과, BH-1 지점은 1.03^{-4} cm/sec로서 주변에 비하여 5~10배 정도 작으며, 이로 인하여 주입에 의한 수위 상승량에 차이가 나타난 것으로 보인다. 주입 line에 가까울수록 주입 후 수위 상승 반응이 뚜렷하여 지하수위 반응이 빠른 시일내에 나타났으며 증거리 관측공은 모두 하천 인근에 위치하며 유사한 상승량을 보였다. 이와 같은 현상은 주입 기간에는 지하수위가 급격하게 상승되지 않고 비교적 일정하게 유지됨을 보여준다. 주입이 계속됨에도 불구하고 지하수위 상승이 더 이상 발생되지 않고 일정하게 유지되는 것은 함양과 유사한 수준의 하류로의 배출이 발생되고 있음을 의미한다. 한편 모든 line에서의 주입을 중단한

경우, 지하수위는 약 15일에 걸쳐 하강하여 원래의 자연수위로 회복되었다.

저감벽체 설치 전 1차 인공함양에 의한 적정채수량 평가를 위하여 6단계 단계대수성 시험($233 \text{ m}^3/\text{day} \sim 547 \text{ m}^3/\text{day}$)을 분석한 결과, 적정채수량은 $440 \text{ m}^3/\text{day}$ 으로 평가되었다(그림 13). 장기대수성 시험은 적정채수량보다 적은 $380 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 실시하였으며, 시험 결과 2.2 m 수위 강하 후 안정수위에 도달되었다(그림 14). 안정수위를 토대로 가채수량 곡선을 이용하여 추가 수위강하에 따른 최대채수량을 분석한 결과 약 $490 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 평가되었다(그림 10).

저감벽체 설치 후 2차 인공함양 주입시험과 3차 양수시험을 실시하여 인공함양 효과 분석 및 함양에 따른 채수량 효과를 평가하였다. 1차 주입시험 이후

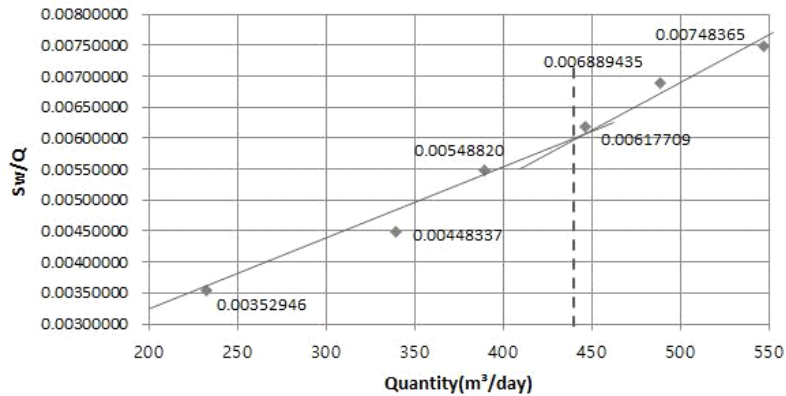


Fig. 13. Optimum pumping rate in a horizontal collecting well after 1st artificial recharge.

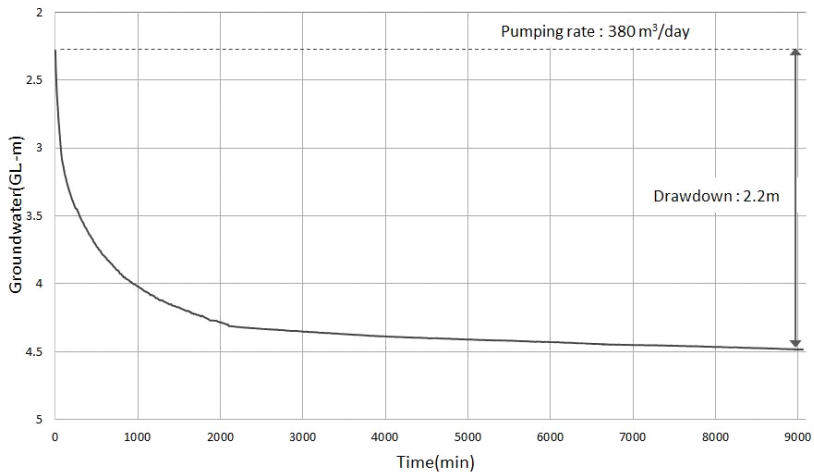


Fig. 14. Result of long-term pumping test in a horizontal collecting well after 1st artificial recharge.

2차 주입시험 전 하천에 2공(NX-1, NX-2), 농경지 인근 2공(HQ-1, HQ-2) 추가 관측공을 설치하였다. 2차 주입시험에 의한 지하수위 변화를 보면, A지역의 근거리 관측공(DM1-1~5)에서 99.8~128.3 cm, 평균 111.3 cm 수위상승이 발생하였다. 중거리 관측공(BH-6, BH-4, HQ-1)은 19.4~80.2 cm, 평균 52.7 cm 수위상승이 발생하였으며, 원거리 관측공(BH-1, HQ-2, NX-1, NX-2)은 24.9~71.5 cm, 평균 52.0 cm 수위상승이 발생하였다. B지역의 근거리 관측공(DM4-1~3)에서 36.0~59.7 cm, 평균 51.5 cm 수위상승이 발생하였다. 중거리 관측공(BH-3, BH-2)은 10.4~26.1 cm, 평균 18.3 cm 수위상승이 발생하였다(그림 15). 하천에 위치한 BH-6공은 주입 경과 4일차에 58 cm의 수위상승 후 점진적으로 감소하다 주입 22일 경과한 시점에 약 20 cm의 수위상승 발생 후 점진적으로 다시 감소하는 경향을 보였다. 이는 관측공의 위

치가 하천 인근에 있어 인공함양 주입효과와 함께 주입 2일차 및 13일차 발생한 강우에 의한 영향이 중첩되어 일어난 효과로 보인다. HQ-1공은 주입 경과 2일 후 약 30 cm의 수위상승 발생한 후 그대로 유지되었으며, 주입 경과 28일 후 약 35 cm 수위상승이 발생한 후 지속되었다. 원거리 관측공(BH-1, HQ-2, NX-1, NX-2)은 24.9~71.5 cm 수위상승이 발생하였다. BH-1 공의 경우 주입 경과 2일 이후 약 50 cm 수위 상승이 발생 후 주입기간 동안 점진적으로 약 20 cm의 수위상승이 발생한 후 지속되었다. 주입 경과 33일 후 NX-2 공에서 약 50 cm의 수위상승이 발생하였다. 1차 주입시험과 달리 각 관측공에서 지하수위 상승 후 상승한 지하수위가 장기간 유지되는 것은 하류지역에 설치한 저감벽체에 의한 저류 효과에 의한 것으로 보인다. 저감벽체 설치 후 인공함양 효과 분석 및 함양에

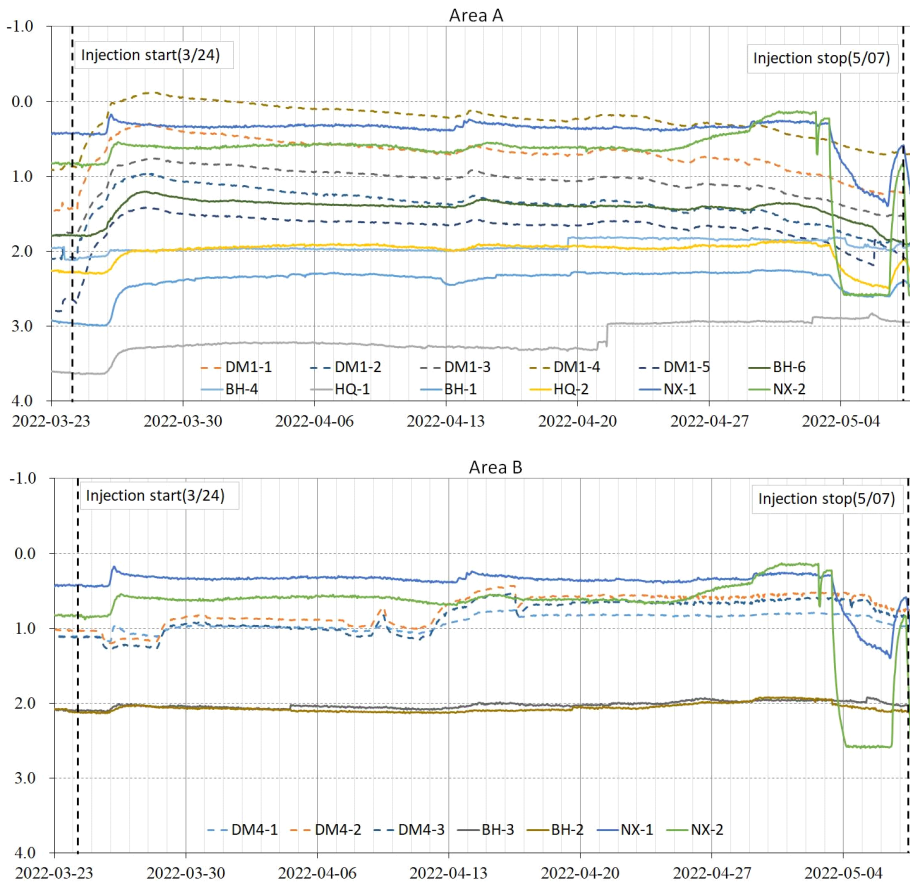


Fig. 15. Fluctuation of groundwater levels during 2nd artificial recharge.

따른 채수량 변화 효과를 평가를 위하여 실시한 3차 단계대수성시험(1단계 246 m³/day ~ 7단계 571 m³/day) 분석 결과, 적정채수량은 515 m³/day로 평가되었다(그림 16). 장기대수성시험은 450 m³/day로 실시하여 2.35 m 강하 후 안정수위에 도달되었으며(그림 17), 안정수위 결과를 근거로 가채수량 곡선을 이용하여 추가 수위강하에 따른 최대채수량을 분석한 결과 약 550 m³/day로 평가되었다(그림 10).

4.2 투수성 저감벽체 설치 전, 후 주입 효과 대비 채수량 효과 평가

인공함양에 의한 주입수가 대수층 내 장기간 유지 및 그에 따른 수평집수정의 채수 지속성을 확보하기 위하여 설치한 투수성 저감벽체 설치 전, 후의

지하수위 상승 변화 및 채수량 변화 효과를 분석하였다. 지하수위 상승량은 저감벽체 설치 전, A 지역은 13.3 ~ 107.7 cm, B 지역은 9.8 ~ 99.4 cm로 나타났으며, 저감벽체 설치 후에는 A 지역은 19.4 ~ 128.3 cm, B 지역은 10.4 ~ 71.5 cm로서 설치 전보다 약 20% 지하수위 상승 효과를 보였다(그림 18). 특히, 주입시설로부터 원거리에 위치한 관측공에서 중거리에 위치한 관측공보다 수위 상승이 상대적으로 크게 발생하였다. 이와 같은 현상은 인공함양으로 함양 분지 내에 저류된 물이 소하천으로 배출됨으로 인하여 실제 현장 주입량에 비하여 지하수위 상승이 충분하지 못한 것을 설명해 준다.

투수성 저감벽체 설치 전, 후의 인공함양에 의한 지하수위 상승에 따른 채수량 변화 효과를 분석하였

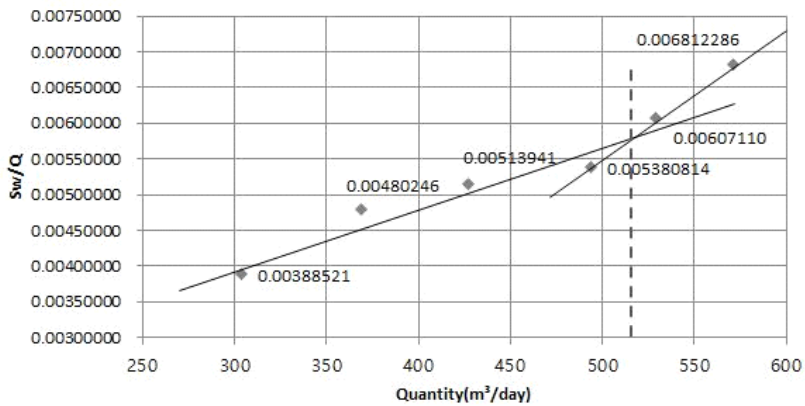


Fig. 16. Optimum pumping rate in a horizontal collecting well after 2nd artificial recharge.

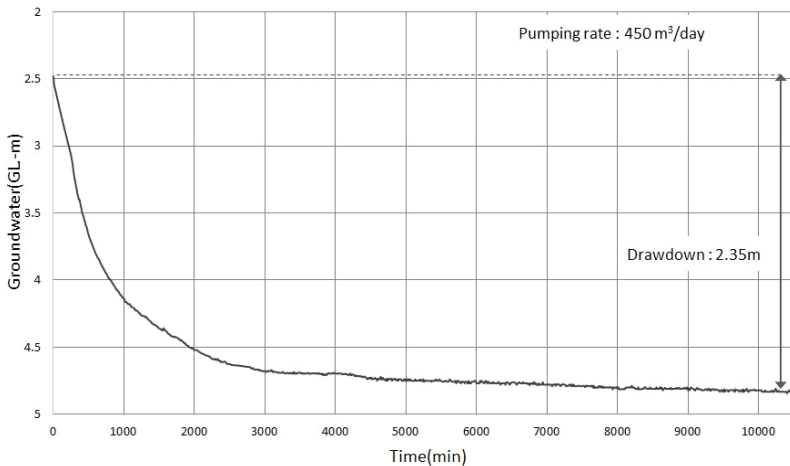


Fig. 17. Result of long-term pumping test in a horizontal collecting well after 2nd artificial recharge.

다. 저감벽체 설치 전 인공함양 효과에 의한 적정채수량은 인공함양을 하지 않은 steady-state condition 하의 적정채수량(415 m³/day)보다 25 m³/day가 증가하는 것으로 평가되었다. 또한 저감벽체 설치 후 인공함양 효과에 의한 채수량은 steady-state condition 하의 채수량 대비 100 m³/day, 저감벽체 설치 전 대비 75 m³/day가 증가하는 것으로 평가되었다(그림 19). 본 연구지역 인공함양시스템의 투수성 저감벽체 설치에 의한 인공함양 효과는 저감벽체가 없을 경우보다 20% 정도 함양 효과가 높게 나타났으며, 인공함양 및 투수성 저감벽체 설치에 의한 채수량 증가율은 24.3%로 평가되었다. 이와 같은 주입에

의한 증가율은 강우에 의한 자연함양과 복합적인 작용에 의해 지하수위 상승 효과를 보였으며, 투수성 저감벽체 설치에 의한 중첩효과에 의해 지하수위가 장기간 유지됨에 따라 채수량이 증가하는 효과가 나타난 것으로 평가되었다.

5. 결론 및 토의

본 연구에서 농업용수가 부족하여 이를 해결하고 자 분지 상류지역에 지중방식의 인공함양으로 대수층에 물을 주입시켜 주변 지하수위를 상승시킴으로써 부족량을 증대시키고 분지 하류지역에 수평집수

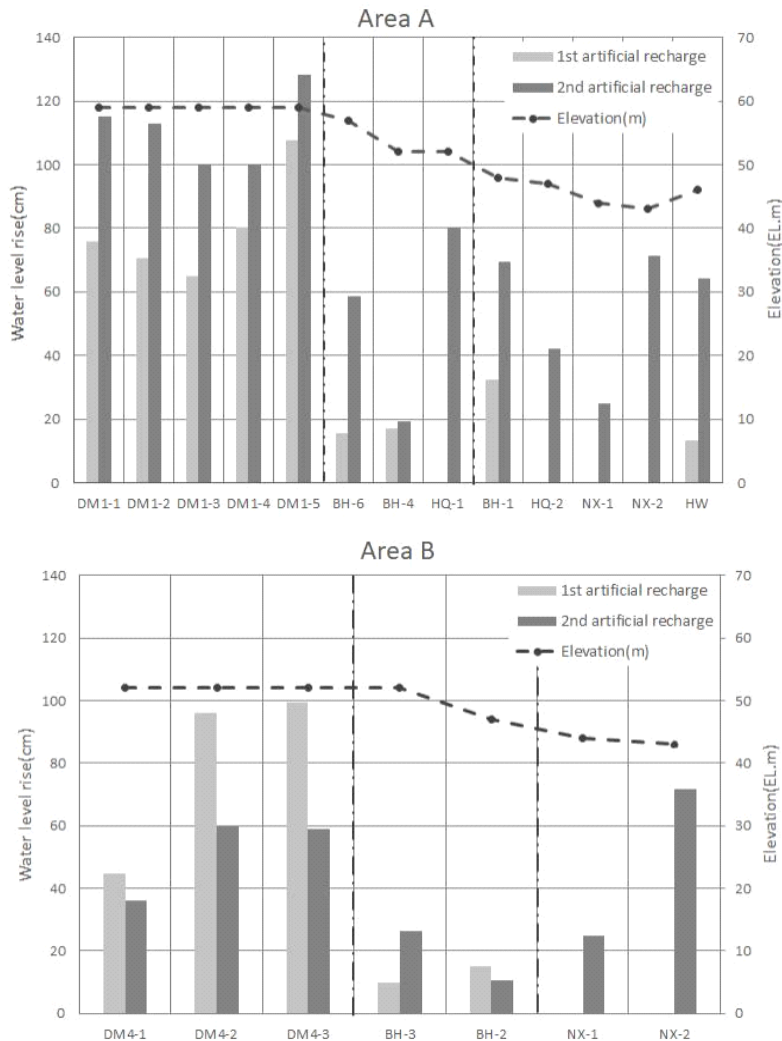


Fig. 18. Graph for groundwater level rise and elevation before and after underground barrier by artificial recharge.

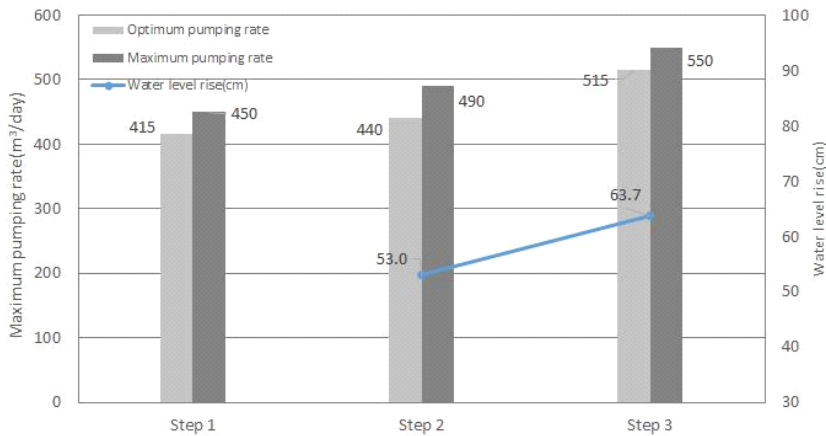


Fig. 19. Result of groundwater yield effect evaluation compared to injection effect at each stage.

정을 설치하여 대수층 내 지하수를 취수, 공급하는 인공함양 순환 시스템에서 인공함양에 의한 주입효과를 분석하고 그에 따른 채수량을 변화를 평가하였다. 또한, 인공함양에 의한 주입수를 대수층 내 장기간 유지시키고 그에 따른 수평집수정의 채수 지속성을 확보하기 위한 투수성 저감벽체 설치 전·후의 수위 변화 및 채수량 변화 효과를 분석하였다. 인공함양하지 않은 상태에서 수평집수정에서의 적정채수량은 415 m³/day로 평가되었으며, 투수성 저감벽체 설치 전 인공함양에 의한 적정채수량은 지하수위 상승에 따른 저류 효과에 의해 35 m³/day가 증가한 440 m³/day로 산정되었다. 저감벽체 설치 후 인공함양에 의한 지하수위 상승은 저감벽체 설치 전보다 20%가 증가하는 것으로 나타났으며, 그로 인한 채수량은 515 m³/day로 24.3% 증가하는 것으로 평가되었다. 이 양은 본 연구지역의 농번기인 5월의 기존 시설 대비 일 수요 부족량 208 m³/day를 완전히 해소할 수 있을 것으로 보인다. 연구지역과 같이 보편적인 용수 확보 기술의 적용이 어려운 분지특성을 갖는 지역은 유역 내에서 물 부족을 자체적으로 해결할 수 있도록 투수성 저감벽체를 연계한 Hybrid형 인공함양 시스템을 적용할 시 수자원 공급시설로서 매우 효과적인 것으로 평가되었다.

가뭄이 발생하게 되면 비교적 안정적인 수자원 공급시설이 구축된 도시 지역보다 경제적, 환경적 여건으로 수자원 공급시설이 부족하여 하천, 계곡수, 지하수 등을 수자원 공급 시설로 이용하는 중상류 산간지역에서 주로 가뭄에 대한 피해가 발생하게 된

다. 따라서 이들 지역에 빈번한 가뭄으로 인한 피해를 대비하고 방지하기 위해서는 중상류 산간지역에 가뭄 시 지속적이고 안정적인 수자원 공급 시설이 필요하므로 가뭄시 물 부족에 대응하고자 인공함양 기술이 개발되었다. 이와 같은 Hybrid형 인공함양 순환 시스템의 운영·관리 최적화 기술을 금회 연구에서 완성함으로써 조사, 설계, 시공 및 운영관리 등의 제반 기술을 안정화하고 물 부족을 겪는 지역에 대한 용수공급 시스템으로서의 기능을 자리 잡게 할 수 있다. 향후, 물 부족 문제 및 상습 가뭄을 겪는 지역에 대하여 Hybrid형 인공함양 순환 시스템과 같은 분지 내 자체적인 용수 확보 체계를 도입하는 것이 효과적일 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부(한국환경산업기술원)의 수요대응형 물공급 서비스사업 과제(상시 가뭄지역의 지하수 최적공급 관리를 위한 IoT 기반 인공함양 및 Well network 기술 개발, #146518)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Bower, H., Pyne, R.D.G., Brown, J., St Germain, D., Morris, T.M., Brwon, C.J., Dillon, P. and Rycus, M.J., 2008, Designing, operation, and maintenance for sustainable underground storage facilities. AWWA Research Foundation, 235 p.

- Choi, M.R. and Kim, G.B., 2022, Effects of Hybrid-Type Artificial Groundwater Recharge and Underground Barrier in a Small Basin. *Water*, 14, 1849.
- Driscoll, F.G., 1986, *Groundwater and Wells*. Johnson Division, 217 p.
- Ghazavi, R., Babaei, S. and Erfanian, M., 2018, Recharge wells site selection for artificial groundwater recharge in an urban area using fuzzy logic technique. *Water Resources Management*, 32, 3821-3834.
- Han, J.S., 2000, *Groundwater Environment and Pollution*. Parkyoungsa, 389 p.
- Lee, C.H. and Kim, S.S., 1963, 1:50,000 explanatory text of the geological map of Hongsong sheet. Geological Survey of Korea (in Korean).
- Lee, Y.D., Shin, D.M., Kim, B.J. and Kim, G.B., 2019, Selecting Aquifer Artificial Recharge Methods Based on Characteristics of the Target Aquifer. *The Journal of Engineering Geology*, 29, 483-494 (in Korean with English abstract).
- Rajasekhar, M., Sudarsana Raju, G., Imran Basha, U., Siddi Raju, R., Pradeep Kumar, B. and Ramachandra, M., 2019, Identification of suitable sites for artificial groundwater recharge structures in semi-arid region of Anantapur district: AHP approach. *Hydrospatial Analysis*, 3, 1-11.
- Won, K.S., Lee, Y.D., Shin, D.M., Kim, B.J. and Kim, G.B., 2020, A Study on Optical design factors by artificial recharge performance. *The Journal of Engineering Geology*, 30, 603-615 (in Korean with English abstract).
- Zaidi, F.K., Nazzal, Y., Ahmed, I., Naeem, M. and Jafri, M.K., 2015, Identification of potential artificial groundwater recharge zones in Northwestern Saudi Arabia using GIS and Boolean logic. *Journal of African Earth Sciences*, 111, 156-169.

Received : January 6, 2023

Revised : February 1, 2023

Accepted : February 1, 2023