

3D 정밀 수치 모델링을 활용한 인공함양 시스템에서의 저투수성 벽체의 설치효과 분석

이재영[‡] · 우태영

(주)신우엔지니어링 융합기술연구소

Evaluation of the effects of low permeable barrier in artificial recharge system using 3D Numerical Modeling

Jae-Young Lee[‡] · Tae-Young Woo

Fusion Research Institute, Sinwoo Engineering Co., Ltd., Seoul 06184, Republic of Korea

요 약

충남 홍성군 운곡리 일대는 상시가뭄지역으로서 농번기에 물부족 현상을 겪고 있으며 이를 해결하고자 지하수 인공함양 시스템이 구축되어 있다. 본 연구에서는 인공함양에 따른 유역의 저류 능력을 강화시키고 함양 효과를 극대화할 수 있는 방안으로 하류부 인근에 저투수성 벽체를 연계하고자 하였으며, 수치모델링을 활용하여 정량적인 효과를 평가하고자 하였다. 이를 위해 대상지역 및 인공함양 시설을 3D 불규칙 유한요소격자로 정밀하게 구현한 개념모델을 구축하였으며, 주요 세 가지 영향인자를 고려하여 인공주입에 따른 지하수위 및 저류량 변화를 확인하였다. 최적 설계요소를 도출하기 위해 고려된 세 가지 주요 영향인자는 벽체 설치 전후 효과, 벽체 길이(40/70/100 m) 및 벽체 위치(취수시설 인근/유역 최하단 출구부/중간 지점)등을 반영하였으며 인공주입에 따른 지하수위 및 저류량의 변동 폭을 모사하였다. 본 연구결과를 통해, 인공함양 시스템 적용 지역에서 저투수성 벽체를 연계하였을 때 주입원수가 유역 외로 손실되는 것을 억제하여 저류능력 강화 및 함양 효과를 극대화하여 보다 안정적인 취수가 가능해질 것으로 판단되었다.

주요어: 인공함양, 저투수성벽체, 지하수위, 저류량, 수치모델

ABSTRACT: The area around Ungokri, Hongseong-gun, Chungcheongnam-do has been experiencing a water shortage during the busy farming season as a recurrent drought area. Therefore an artificial recharge system is installed to solve this problem. In this paper, as a way to enhance the storage capacity of the watershed according to the artificial recharge and optimize the recharge effect, the low permeable barrier was connected near the downstream, and the quantitative evaluation of the effects was performed using numerical modeling. To this end, a conceptual model was configured by precisely realizing the target area and artificial injection facilities with 3D irregular finite element grids, and changes in the groundwater level and storage volume due to artificial injection were confirmed by considering three main factors, such as the presence or absence of installation, length and location of the barrier. In conclusion, when the low permeable barrier is connected in the area where the artificial recharge system is applied, it will restrain the loss of injected water according to the outflow from the basin and optimize the storage capacity and recharge effect, and consequently more stable water intake would be possible.

Key words: artificial recharge, low permeable barrier, groundwater level, storage, numerical model

[‡]Corresponding author: +82-2-6959-3038, E-mail: vennard386@gmail.com

1. 서론

기후변화에 따른 이상기후는 다양한 자연재해의 발생을 초래하며 가뭄에도 큰 영향을 미치고 있다. 우리나라 대부분의 가뭄은 주로 계곡수나 지하수를 수원으로 사용하는 산간 지역에서 생활용수 및 농업용수의 물부족 현상을 초래하였다. 정부에서는 가뭄 때마다 비상조치로 지하수를 이용하기 위해 신규 지하수 관정을 설치하고 있으나, 중상류 지역의 경우에는 하류부의 기저유출로 인한 지하수위 하강으로 지하수 공급 또한 어려움을 겪게 되어 중상류 지역에 대한 근본적인 대책으로는 미흡한 실정이다. 본 연구지역인 충청남도 홍성군 갈산면 운곡리 신곡마을에서는 가뭄에 따른 중상류 지역의 물부족 현상을 근본적으로 해결하고자 강우가 상대적으로 풍부한 기간에 하천으로 유출되는 물을 지층 내로 주입해 필요한 시기에 사용하는 인공함양 기술을 적용하였다. 우리나라의 중상류 지역은 일정 두께의 충적층과 풍화대가 발달해 있어 이를 물의 저류공간으로 활용하여 충분한 양의 물을 저장하고 필요시에 취수할 수 있으므로 인공함양 기술은 중상류 지역의 특성을 고려한 적합한 기술이라 할 수 있다.

향후 지구온난화 및 기후변화로 인해 가뭄의 발생빈도가 증가할 것으로 전망됨에 따라 인공함양 기술이 대두되고 있으며 국내·외적으로 다양한 연구들이 이루어지고 있다. Ghasemizade *et al.* (2019)은 물 수지 분석을 포함한 통합 물 흐름 모델을 통해 지역 규모에서의 농업용 지하수 산출성의 지속성을 확보하기 위하여 대수층 함양 기법의 적용성을 연구하였으며, 하천과 대수층의 상호작용이 지하수 함양 이후 저장량을 증가시키는 능력을 결정하는 데 영향을 미친다는 것을 밝힌 바 있다. Lee *et al.* (2019)은 내륙 소분지에서 지하수 인공함양 가능성 및 대상 지층의 효용성을 평가하여 함양 우물에 의한 방법과 ditch에 의한 방법을 조합하는 방안을 제시한 바 있다. Pendke *et al.* (2017)은 인도 마라스와다 지역에서 지하수량 증가 및 함양을 위한 시추공 함양기술 설계 기법을 통하여 효율을 제시하였다.

한편, Mohammadzadeh-Habili and Khalili (2020)는 댐 구조를 변경하여 인공 함양 효과를 높일 수 있는 방법을 연구했으며, 댐 저수지 내부의 수직 측벽 구덩이 굴착이 인공 지하수 함양을 향상시킬 수 있

음을 수치 모델링을 활용하여 제안하였다. Sashikkumar *et al.* (2017)은 Kodaganar 강 유역, Tamil Nadu의 유역에 대해 MODFLOW 소프트웨어를 사용하여 지리 정보 시스템과 수치적 지하수 모델링 기술의 통합 접근을 통해 인공 재충전의 효과를 연구했으며, 지하수량은 주로 침수지와 체크댐 등 여러 종류의 인공충전 방식을 사용하여 인공충전으로 인해 15~38%의 지하수량 증가가 있음을 밝힌 바 있다. 또한 Karim and Ali (2017)는 갈수기의 지하수 재이용을 위해 주입정을 통한 인공함양 방식을 적용하여 주입정의 운영조건을 도출하기 위해 수치모델링을 활용한 바 있으며, Choi and Kang (2019)은 시설농업단지의 인공함양 설계를 위해 수리지질 특성과 주입정 및 양수정 사이의 이격거리 등을 고려한 시나리오별 수치모사를 HydroGeoSphere (HGS) 모델을 적용하여 수행한 바 있다.

이처럼 인공함양에 대한 연구가 국내·외적으로 다양하게 수행되고 있으며 본 연구에서는 인공함양에 따른 함양 효과를 극대화하기 위해 저류 능력을 강화시킬 수 있는 방안으로 유역 하류부에 저투수성 벽체를 설치하고 이에 대하여 수치해석 기반으로 정량적인 효과를 평가하고자 하였다.

2. 연구지역

본 연구지역은 충청남도 홍성군 갈산면 운곡리 신곡마을 일대로 한반도의 중서부에 위치하고 있다. 연구지역의 북동쪽은 산악지형, 남서쪽은 저지대로 이루어진 분지 형태이며, 토지 이용은 대부분 밭농사와 논농사의 농경지로 이루어져 있다. 연구지역 내 신곡천과 운곡천이 흐르고 있으며 하천폭 15 m 내외, 유로폭 2 m 내외, 평상시 수심 0.1 m 내외인 소하천이다(그림 1).

해당 하천은 강우에 따라 하천 유량의 변동폭이 크게 나타나고 농번기 기간인 4~6월에는 비교적 강우량이 적어 하천의 유량이 매우 적다. 이로 인하여 지속적인 지하수 채수(mining of ground water)에 따른 지하수 고갈 현상이 빠르게 발생되고 있는 실정이며, 이를 해결하고자 지하수 인공함양 시스템이 적용되었다.

연구지역 내 상류 분지의 북측과 남측에 총 4개의 함양시설이 구축되었으며, 북측에는 9개의 수직정

을 포함하는 100 m 길이의 Ditch가 2개 line으로 설치되었고, 남측에는 7개의 수직정을 포함하는 75 m 길이의 Ditch가 2개 line으로 설치되었다. 수직정의 깊이와 구경은 각각 10 m, 100 mm이고, Ditch의 폭은 3 m, 깊이는 3.5 m이며, Ditch 내 여재의 크기는

20 ~ 75 mm로서 Ditch 바닥으로 갈수록 작은 크기로 채워져 있다(그림 2, 3).

하류 분지에는 취수시설인 우물통 형태의 집수정(collector well) 1개가 대수층에 수직으로 설치되어 있으며, 집수정 측벽에 2개의 수평정(horizontal pipe)

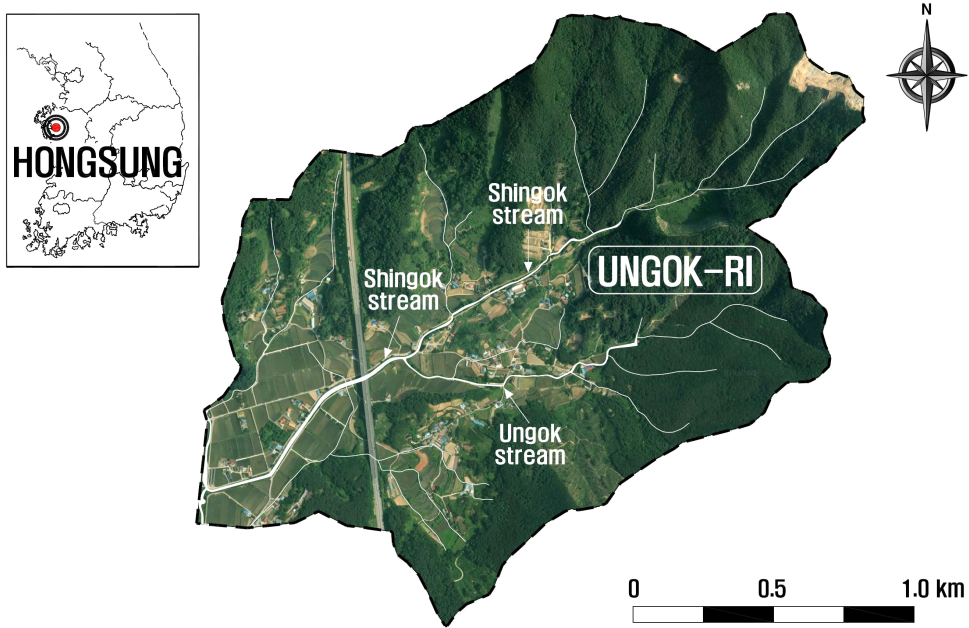


Fig. 1. Location maps of the study area.

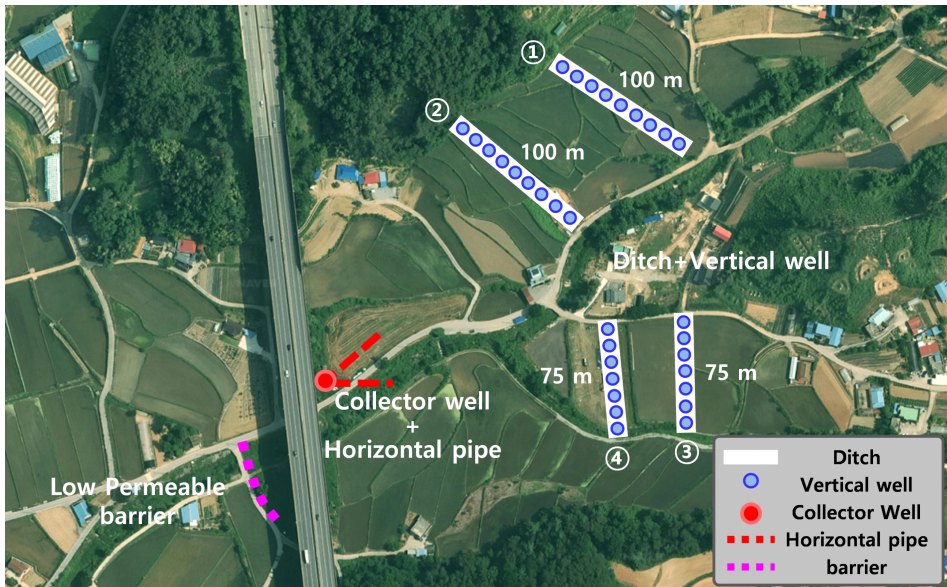


Fig. 2. Location of artificial recharge system.

이 연결되어 있다. 집수정의 구경과 깊이는 각각 2.1 m, 9.5 m이고, 수평정의 길이와 구경은 각각 50 m,

100 mm로 설치되었다(그림 4). 또한 하루 분지 출구부 인근에는 본 연구결과를 토대로 길이 70.0 m

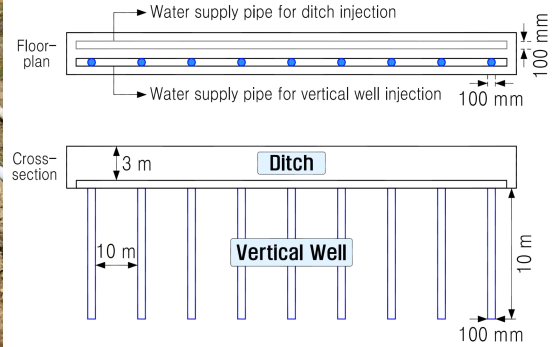


Fig. 3. Combined artificial recharge structure of ditches and vertical wells.

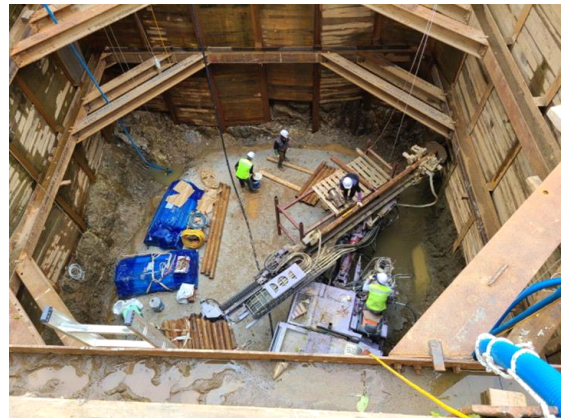
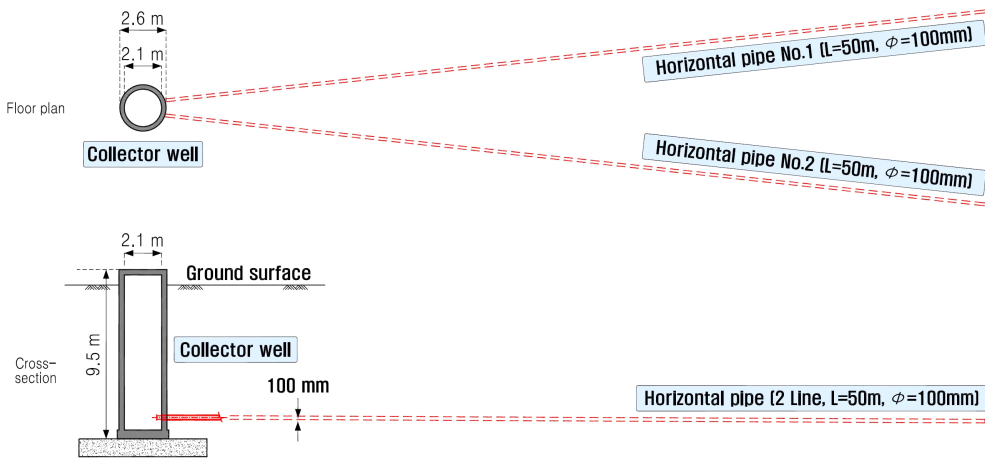


Fig. 4. Combined intake facilities structure of collector well and horizontal pipes.

의 저투수성 벽체가 취수시설에서 하류 방향으로 70 m 이격되어 지표하 1.5 m ~ 기반암 상부까지의 깊이로 설치되어 있다.

연구지역을 구성하는 지질은 선캠브리아기의 편암류, 이를 관입한 시대미상의 편상화강암, 백악기에 재관입한 화성암류, 신생대 제4기 충적층이 부정합으로 피복하고 있다(그림 5; Cha *et al.*, 2021).

3. 연구방법

지하수 인공함양 시스템은 중상류 분지에서 인공함양 시설(Ditch+수직정)을 통해 소하천으로부터 확보한 원수를 대수층으로 주입 함으로써 지하수위를 높이고, 하류 분지에서 취수정(수평집수정)을 통

해 비교적 대용량의 물을 취수하여 연구지역의 농업용수로 공급하는 것을 의미한다(그림 6).

인공함양 시설을 통하여 주입된 원수는 지형 경사 및 수리 구배를 따라 상류에서 하류로 이동되는데, 이때 하류로 이동되는 주입원수 일부는 취수정으로부터 취수되지만 취수정의 영향 범위에 해당하지 않는 주입원수는 유역 외로 손실된다. 본 연구에서는 주입원수가 유역 외로 손실되는 것을 억제하기 위해 유역 하류의 출구부에 지하 저투수성 벽체를 적용하고 이에 대한 효과를 검토하고자 하였다. 이를 위해 3D FEM 기반의 SEEFLOW3D (Cha *et al.*, 2017) 모델을 채택하여 정밀 수치모델링을 수행하였으며, 다음과 같이 3가지 주요 검토항목을 설정하여 평가를 수행하였다.



Fig. 5. Geologic map of the study area.

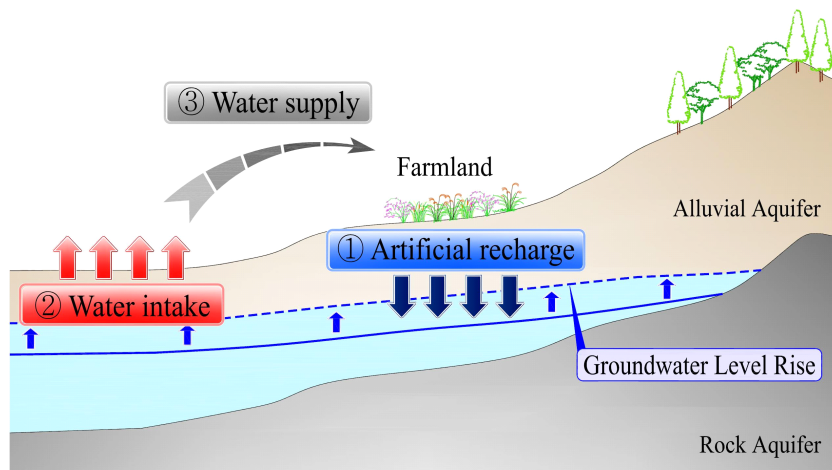


Fig. 6. Principles of artificial recharge.

· 벽체 설치에 따른 지하수위 및 저류량 변화
 · 벽체 길이에 따른 지하수위 및 저류량 변화
 · 벽체 위치에 따른 지하수위 및 저류량 변화
 정밀 수치모델링을 수행하기 위해 수치지형도의 DEM 자료를 활용하여 분수령인 산의 능선을 경계로 2,450 m × 2,350 m 크기의 모델링 범위를 설정하고 연구지역에 설치된 지하수 인공함양시설(Ditch

+수직정)과 주요 검토항목 3개를 모두 반영한 저투수성 벽체를 불규칙 유한요소격자로 정밀하게 구현하여 총 22,730 Node와 40,248 Element로 구성된 개념모델을 구축하였다(그림 7a, 7c).

현장 시추조사 자료를 통해 획득한 시추주상도의 지층정보를 활용하여 충적층, 풍화토, 기반암으로 구성된 3개의 수치 Layer를 구성하고 불포화대 영

Table 1. Distribution of geological layers and hydraulic conductivities.

Media	Layer	Depth (GL.-m)		Hydraulic Conductivity (cm/sec)	
		Range	Average	Range	Average
Alluvium	1	1.5 ~ 5.8	3.1	$4.05 \times 10^{-5} \sim 1.14 \times 10^{-3}$	4.11×10^{-4}
Weathered soil	2	1.5 ~ 6.5	3.7	$5.82 \times 10^{-5} \sim 4.10 \times 10^{-3}$	7.00×10^{-4}
Bedrock	3	5.8 ~ 12.3	8.7	$1.40 \times 10^{-6} \sim 2.13 \times 10^{-4}$	7.20×10^{-5}

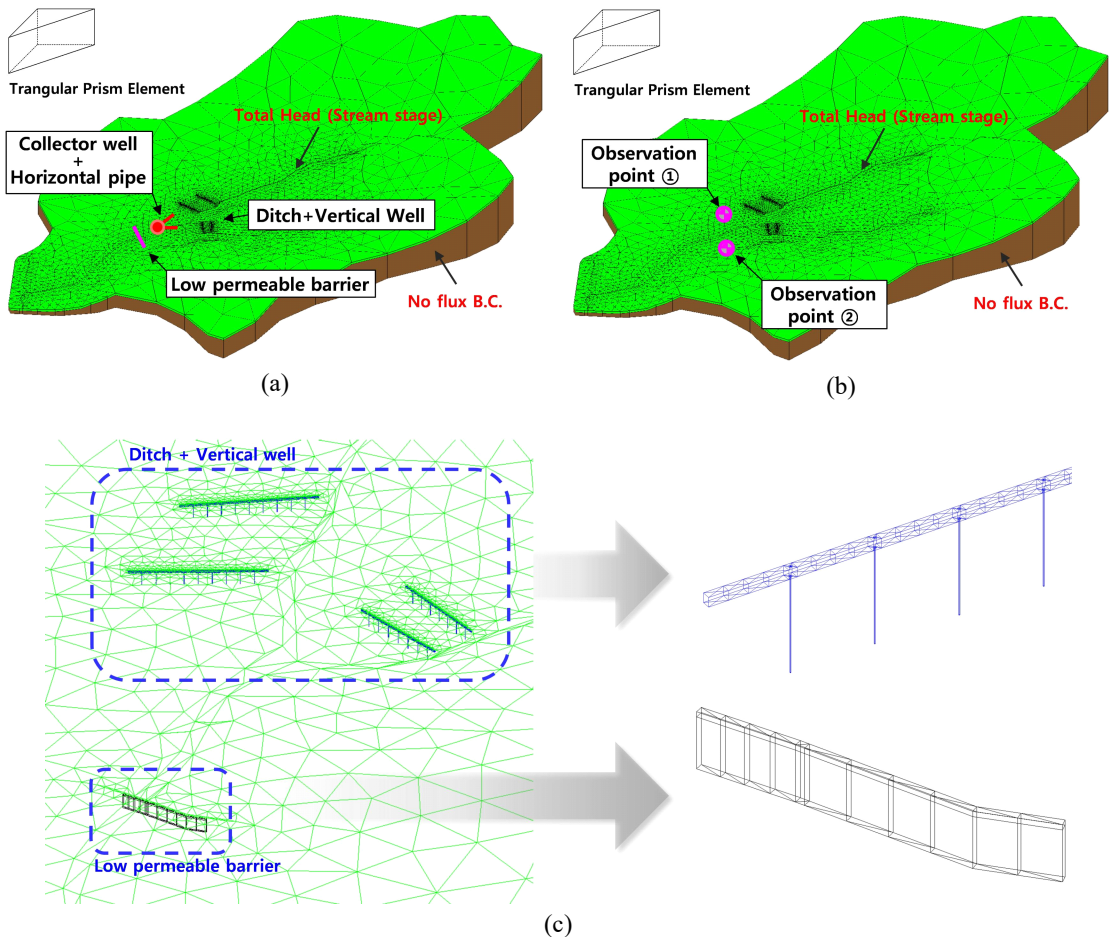


Fig. 7. (a) Configuration of 3D conceptual model reflecting the recharge facilities and intake well in the target area, (b) Location of observation wells, (c) Mesh generation reflecting the recharge facilities and low permeable barrier.

역의 현장 수리시험 및 입도분석의 결과를 활용하여 수치모델의 지층특성에 대한 입력자료를 구성하였으며(표 1), 불포화 매질의 물성을 고려하여 실제 포화-불포화 대수층의 지하수 유동 특성을 정교하게 반영하였다.

지하수위 변동을 확인하기 위해 연구지역 내 인공함양시설 하류부 인근의 2개 지점을 관측지점으로 설정하였으며, 실제 현장에 설치된 관측공과 동일한 위치로 설정하여 모델검증 단계에서도 현장 주입시험과 수치모델링 결과에 대한 지하수위 변화를 비교할 수 있도록 하였다(그림 7b).

모델링 영역 내 지하수위의 공간적 분포를 예측하고자 정류 해석을 수행하였다. 경계조건으로 대상 영역 외부는 비유동 경계(No-Flux boundary)로, 대상영역 내 하천은 측정된 하천수위를 고려하여 일정수두(Dirichlet boundary)로, 대상영역 상부는 서산기상대의 2022년 강수량 자료를 활용하여 변동경계(Variable boundary)로, 초기수위는 실제 연구지역에 설치된 31개 지점의 지하수위 관측자료를 활용하여 일정수두(Dirichlet boundary)로 설정하였다. 주요지점 6개를 지정하여 실제 관측된 시계열 지하수위와 계산된 지하수위와의 비교를 통해 지층의 수리상수를 모델 보정 변수로 설정하여 모델 보정을 수행하였다(그림 8). 표 2는 모델보정 후 실제 지하수위와 계산된 지하수위를 비교한 것으로 정규화된

RMSE가 9.357%로 나타나 보정된 모델이 실제 지하수위의 공간적 분포를 잘 모의하는 것으로 판단하였다.

정류해석 결과를 토대로 검토항목별 인공주입에 따른 하류부 지하수위 및 저류량 변화를 모사하여 저투수성 벽체의 효과를 검토하고자 하였다. 계산간격 1시간으로 총 120일간 모의수행 하였으며 인공주입 조건은 4개 Line의 인공함양시설(Ditch+수직정)을 통해 60일간 총 12,000 m³이며(표 3), Ditch 및 수직정 상단 Element에 Inflow 경계조건(Neumann boundary)을 적용하였다.

4. 연구결과

4.1 벽체 설치에 따른 지하수위 및 저류량 변화

인공주입에 따른 함양시설 하류부의 지하수위 및 저류량 변화를 벽체 설치 전후에 대하여 비교하였다. 벽체의 위치는 집수정으로부터 하류 방향으로 약 70 m 이격되어 있으며 길이는 70 m로 설정하였다(그림 9).

2개의 관측지점을 통해 지하수위 변동을 모사한 결과 1번 관측지점의 인공주입에 따른 지하수위 최대 상승고는 벽체 설치 전후 각각 0.63 m, 0.78 m로 모사되었으며, 2번 관측지점의 인공주입에 따른 지하수위 최대 상승고는 벽체 설치 전후 각각 0.47 m, 0.58 m로 모사되었다(그림 10a, 10b). 인공주입 중

Table 2. Actual and estimated initial groundwater level.

Division	1	2	3	4	5	6
Actual initial groundwater level (EL.m)	41.35	44.96	44.40	48.16	47.73	53.42
Estimated initial groundwater level by the numerical model (EL.m)	40.15	43.71	43.34	48.72	46.21	52.47

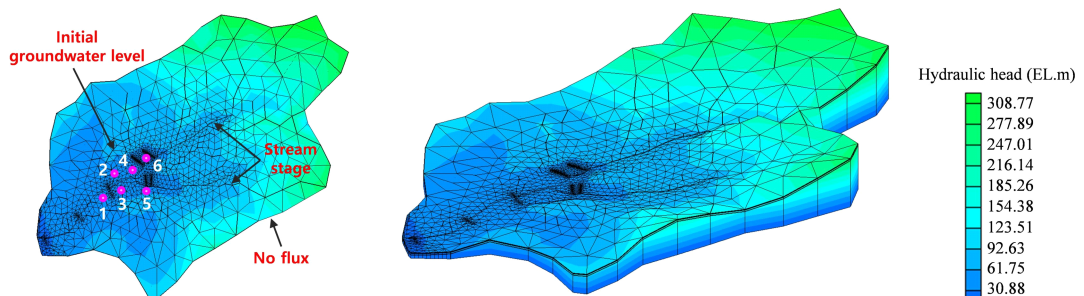


Fig. 8. Steady-state simulation result of study domain.

료 후 지하수위의 지속 시간을 보면, 벽체를 설치하였을 경우 지하수위의 하강 속도가 매우 낮아 장기간 유지되는 특성을 나타낸다. 또한 벽체 설치에 따른 지하수 저류량은 319,600 m³로 벽체 설치 전 258,138 m³ 보다 약 23% 증가되는 것으로 조사되었다(그림 10c).

4.2 벽체 길이에 따른 지하수위 및 저류량 변화

그림 11과 같이 벽체의 위치를 집수정으로부터 하류 방향으로 약 70 m 이격시킨 후 벽체의 길이를 40, 70, 100 m로 구분하여 인공주입에 따른 함양시설 하류부의 지하수위 및 저류량 변화를 비교하였다.

2개의 관측지점을 통해 벽체의 길이별 지하수위를 조사한 결과 1번 관측지점의 지하수위 최대 상승

고는 40 m에서 0.67 m, 70 m에서 0.78 m, 100 m에서 0.81 m로 조사되었으며, 2번 관측지점의 지하수위 최대 상승고는 40 m에서 0.49 m, 70 m에서 0.58 m, 100 m에서 0.60 m로 조사되었다(그림 12a, 12b). 또한 벽체의 길이별 지하수 저류량은 40 m에서 273,291 m³, 70 m에서 319,600 m³(40 m 대비 약 16% 증가), 100 m에서 330,728 m³(70 m 대비 약 3% 증가)로 조사되었다(그림 12c). 이와 같이 벽체의 길이가 70 m 이상일 때 지하수위 상승고와 저류량의 변화가 크지 않음으로 경제성을 고려하여 벽체의 최적 길이는 70 m로 판단되었다.

4.3 벽체 위치에 따른 지하수위 및 저류량 변화

벽체는 지형 경사 및 수리 구배를 따라 상류에서

Table 3. Modeling input data.

Division	Total simulation time (day)	Calculation interval (hour)	Injection rate of Ditch (m ³ /day)	Injection rate of Vertical well (m ³ /day)	Injection Period (day)	Total Injection rate (m ³)
Artificial recharge system ①	120	1	25	25	60	3,000
Artificial recharge system ②			25	25		3,000
Artificial recharge system ③			25	25		3,000
Artificial recharge system ④			25	25		3,000
Total						12,000

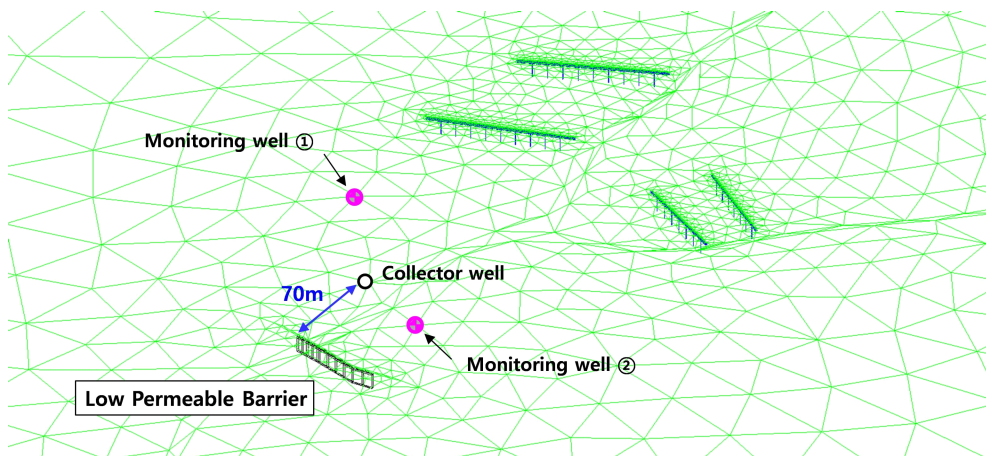


Fig. 9. Locations of the low permeable barrier.

하류로 이동되는 주입원수의 흐름을 억제하여 저류 능력 강화에 효과적이며 취수시설의 취수 안정성을 높여준다. 그림 13에서 보는 바와 같이 벽체의 후면과 가까울수록 저류 효과는 더 극대화되는 것을 알 수 있으므로 벽체와 취수시설 간의 거리는 밀접한 관계가 있다고 볼 수 있다.

따라서 벽체의 위치를 본 연구지역에 설치된 취수시설로부터 현장여건(고속도로 교각 부지)을 고려하여 가장 가까이에 설치할 수 있는 거리인 70 m와 유역의 최하단 출구부 지점인 700 m, 중간지점인 400 m로 설정하여 인공주입에 따른 하류부 지하

수위 및 저류량 변화를 비교하였다(그림 14).

2개의 관측지점을 통해 벽체의 길이별 지하수위 변동을 모사한 결과 1번 관측지점의 지하수위 최대 상승고는 70 m 지점에서 0.78 m, 400 m 지점에서 0.68 m, 700 m 지점에서 0.63 m로 모사되었으며, 2번 관측지점의 지하수위 최대 상승고는 70 m 지점에서 0.58 m, 400 m 지점에서 0.50 m, 700 m 지점에서 0.47 m로 모사되었다(그림 15a, 15b). 또한 벽체의 위치별 지하수 저류량은 70 m 지점에서 319,600 m³, 400 m 지점에서 278,380 m³(70 m 대비 약 15% 감소), 700 m 지점에서 258,893 m³(400 m 대비 약

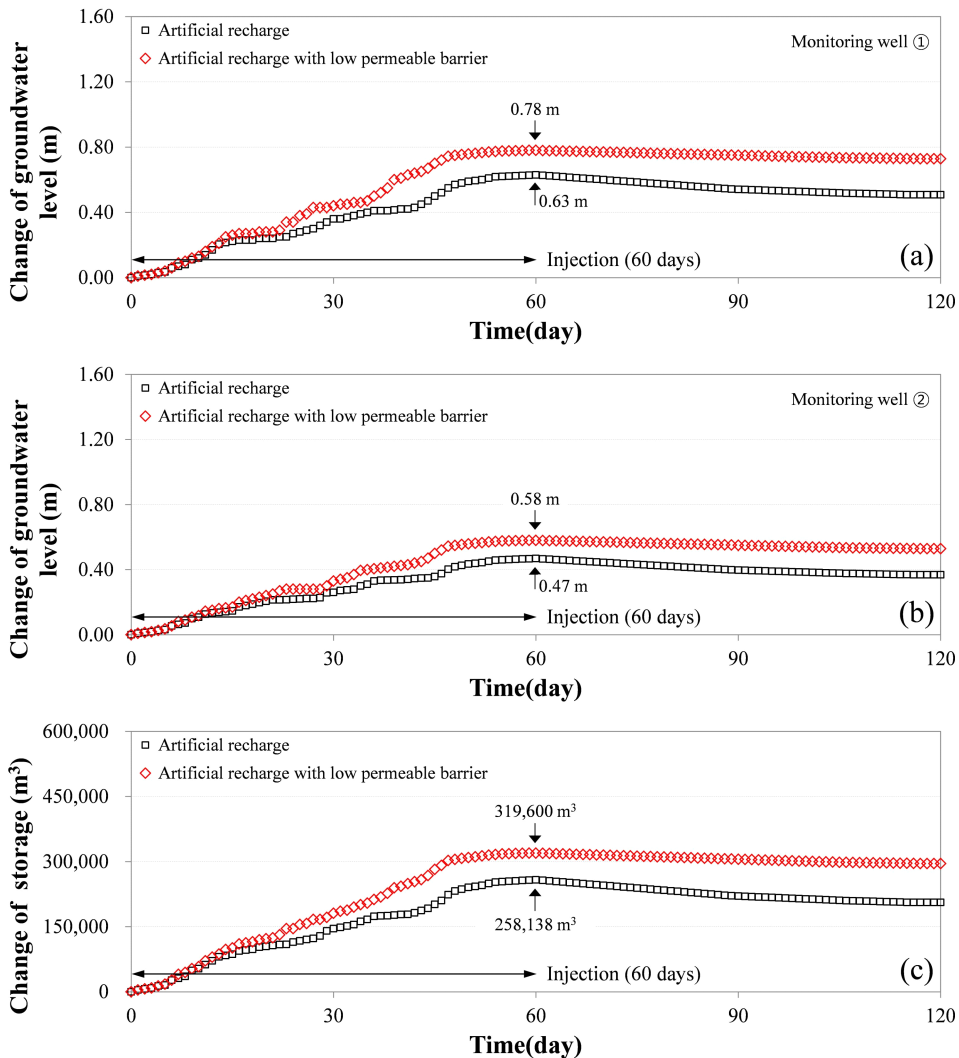


Fig. 10. (a & b) Temporal changes of groundwater level according to installation of low permeable barrier(observation well ①, ②). (c) Temporal changes of storage according to installation of low permeable barrier.

7% 감소)로 모사되었다(그림 15c). 이와 같이 벽체의 위치는 현장여건을 고려하여 취수시설과 가장 가까울수록 효과가 좋은 것으로 판단되었다.

4.4 수치모델 검증

수치모델 검증을 위해 현장 주입 시험 결과와 수치모델링 결과를 비교검증 하였다. 현장 주입 시험은 2022년 3월 24일부터 2022년 5월 7일까지 실시되었으며, 현장에는 본 연구결과를 토대로 길이 70 m의 저투수성 벽체가 취수시설에서 하류 방향으로 70 m 이격되어 인공함양 시스템과 함께 설치되어 있다. 인공주입 조건은 4개 Line의 인공함양시설(Ditch+수직정)을 통해 44일간 총 9,475.84 m³(평균 주입율 215.36 m³/day)이 주입되었다. 수치모델링을 위한 개념모델은 연구지역의 지층 및 지질정보와 인공함양시설(Ditch+수직정), 저투수성 벽체를 불규칙 유한요소격자로 정밀하게 구현하였다. 경계조건으로 대상영역 외부는 비유동 경계(No-Flux boundary)로, 대상영역 내 하천은 측정된 하천수위를 고려하여 일정수두(Dirichlet boundary)로, 대상영역 상부는 서산 기상대의 강수량 자료(2022년 3월 23일~2022년 5월

22일)를 활용하여 시계열 변동경계(Variable boundary)로 설정하였다. 또한 정류해석으로 계산된 지하수 공간분포를 초기수위로 설정하여 현장 주입 시험 당시의 현장 상태를 유사하게 구현하였다. 구축된 개념모델을 활용하여 계산간격 1시간으로 3월 23일부터 5월 22일간 모의수행 하였으며 인공주입 조건은 현장 주입 시험과 동일한 조건으로 4개 Line의 인공함양시설(Ditch+수직정)을 통해 44일간 총 9,475.84 m³(평균 주입율 215.36 m³/day)이 주입되었으며, Ditch 및 수직정 상단 Element에 Inflow 경계조건(Neumann boundary)을 적용하였다. 한편, 인공주입에 따른 포화-불포화 영역에서의 함양량은 모델의 입력조건으로 사용된 지층 layer별 토양함수곡선을 반영한 Van Genuchten 방정식(Van Genuchten, 1980)을 통해 산정됨으로써 포화-불포화 변동특성 흐름이 모사되었다.

수치모델링을 수행하여 연구지역에 설치된 2개의 관측공을 통해 획득한 실제 지하수 측정자료와 수치모델링 결과를 비교한 결과, 1번 관측지점의 지하수위 최대 상승고는 현장주입시험과 모델링 결과 각각 0.67 m, 0.63 m로 나타났으며, 2번 관측지점의

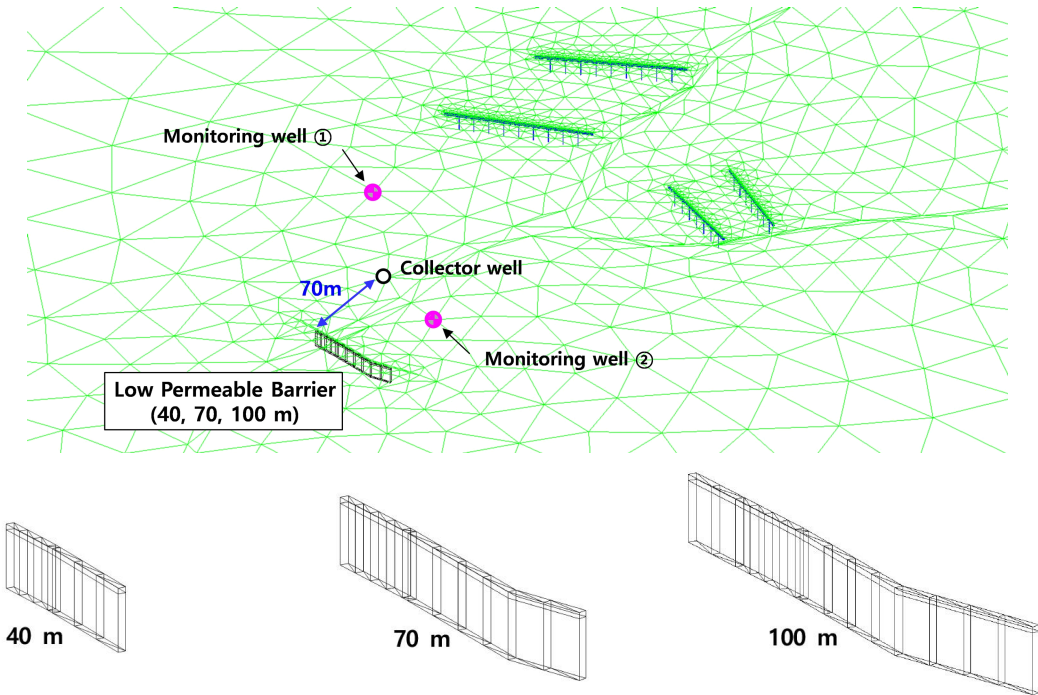


Fig. 11. Mesh generation according to length of low permeable barrier.

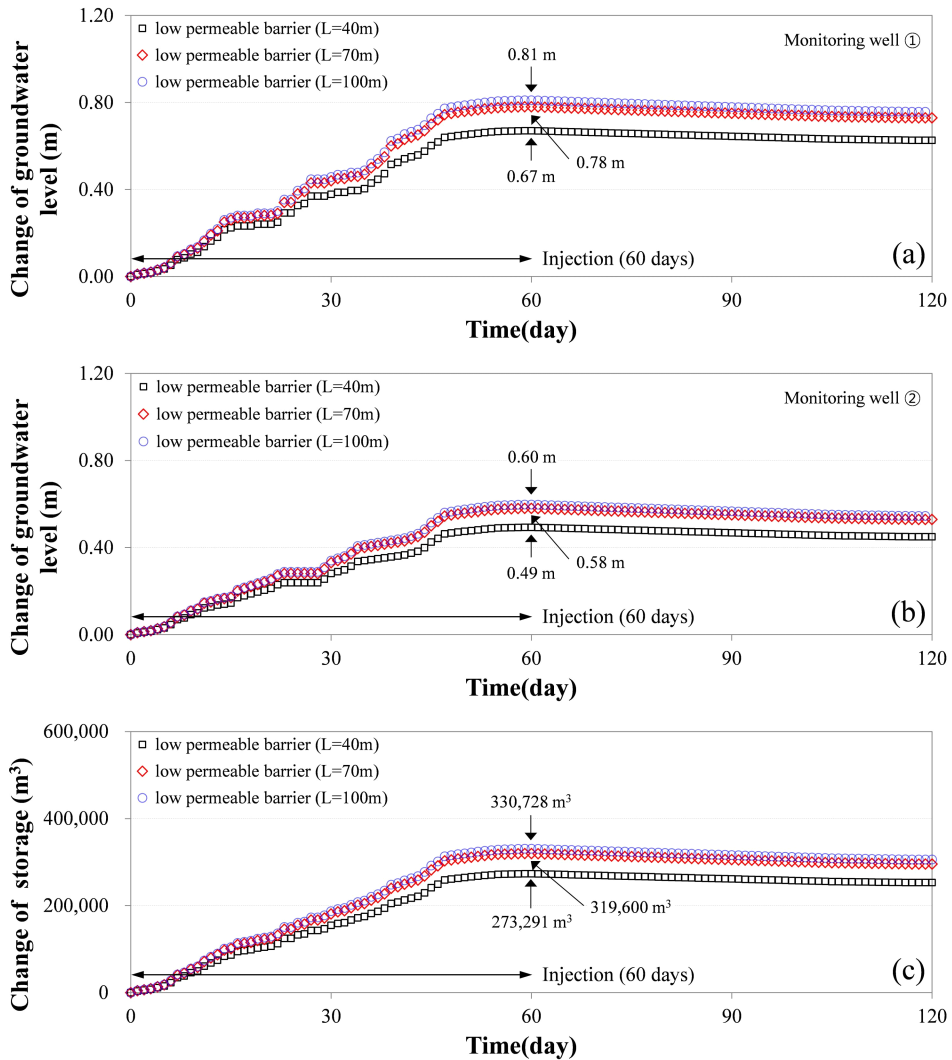


Fig. 12. (a & b) Temporal changes of groundwater level according to length of low permeable barrier (observation well ①, ②). (c) Temporal changes of storage according to length of low permeable barrier.

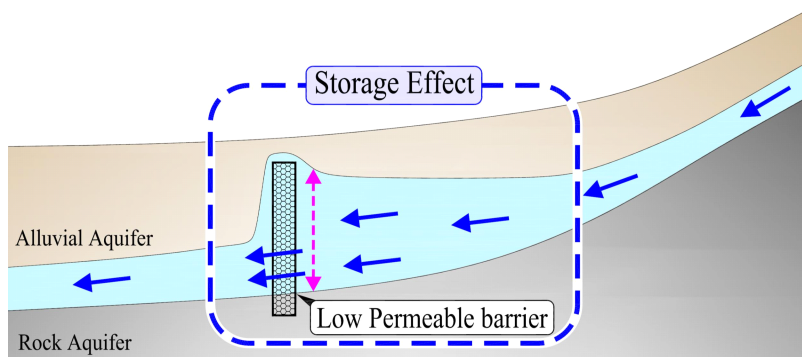


Fig. 13. Storage effect of low permeable barrier.

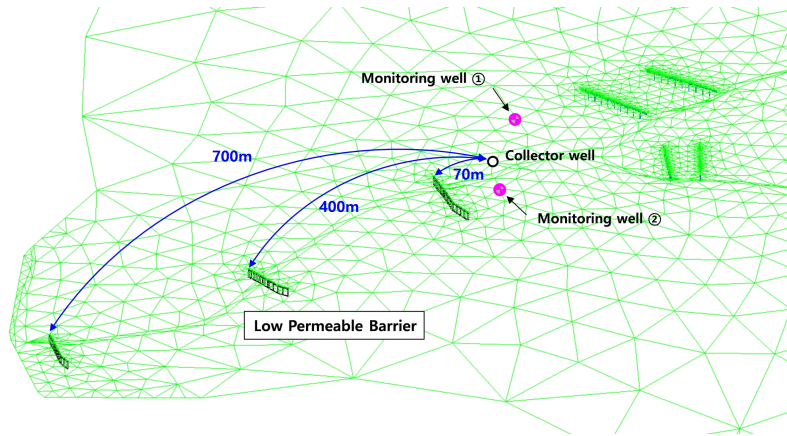


Fig. 14. Locations of the low permeable barrier.

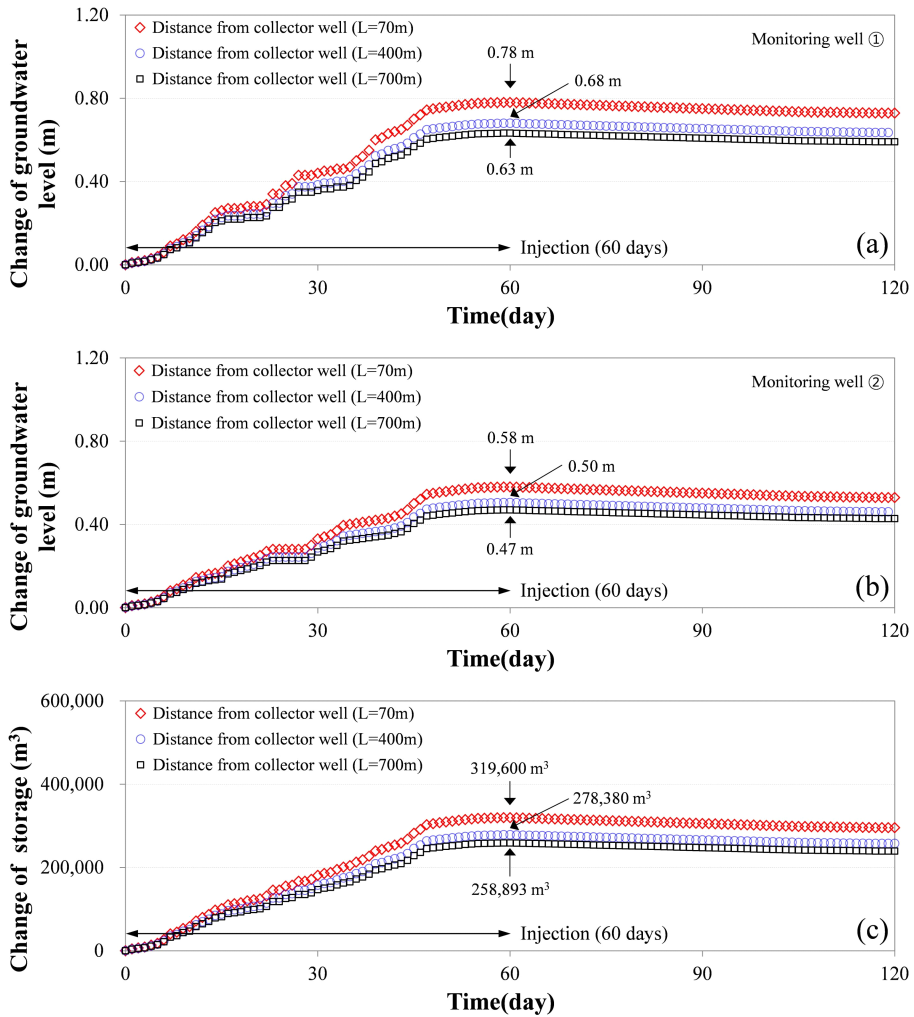


Fig. 15. (a & b) Temporal changes of groundwater level according to location of low permeable barrier (observation well ①, ②). (c) Temporal changes of storage according to location of low permeable barrier.

지하수위 최대 상승고는 현장주입시험과 모델링 결과 각각 0.46 m, 0.41 m로 나타났다(그림 16). 이와 같이, 총 주입량에 따른 지하수위 최대 상승고를 비교했을 때 수치모사의 예측정확도는 90% 이상으로 매우 정확한 것으로 나타났다.

한편, 실제 지하수위 측정결과를 보면 주입 이후 지하수위가 급격하게 상승하거나 하강하는 패턴이 수차례 나타나는데 이는 지층 및 층후의 비균질적 특성으로 인한 지하수위의 불규칙한 흐름과 인공함양 펌프의 장시간 작동에 따른 과부하 현상으로 인하여 불규칙적으로 주입되는 현상이 원인으로 예상된다.

5. 결론

본 연구에서는 3D 정밀 수치 모델링을 활용하여 실제 인공함양-취수시스템이 적용된 지역에서의 저투수성 벽체 효과를 검토하였으며 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 벽체의 효과를 검토하기 위해 벽체 설치 전후

에 대하여 인공주입에 따른 함양시설 하류부의 지하수위 및 저류량 변화를 모사한 결과 벽체 설치에 따른 지하수위는 약 0.13 m, 지하수 저류량은 약 23% 증가되며, 인공주입 종료 후에는 지하수위의 하강속도가 매우 느리며 장기간 유지되는 특성을 보였다.

2) 벽체의 길이를 40, 70, 100 m로 구분하여 인공주입에 따른 하류부 지하수위 및 저류량 변화를 모사한 결과 지하수위 및 저류량이 벽체의 길이가 70 m 일 때 40 m 대비 약 16% 증가하고, 100 m 일 때 70 m 대비 약 3% 증가하는 것으로 모사되었다. 이를 토대로 벽체의 길이가 70 m 이상일 때 지하수위 상승고 및 저류량의 변동폭이 작게 나타나 경제성을 고려하였을 때 벽체의 최적 길이는 70 m로 판단되었다.

3) 벽체의 위치를 본 연구지역에 설치된 취수시설로부터 현장여건(고속도로 교각 부지)을 고려하여 가장 가까이에 설치할 수 있는 거리인 70 m와 유역의 최하단 출구부 지점인 700 m, 이 둘의 중간지점인 400 m로 설정하여 인공주입에 따른 하류부 지하수위 및 저류량 변화를 비교하였다. 비교 결과, 벽

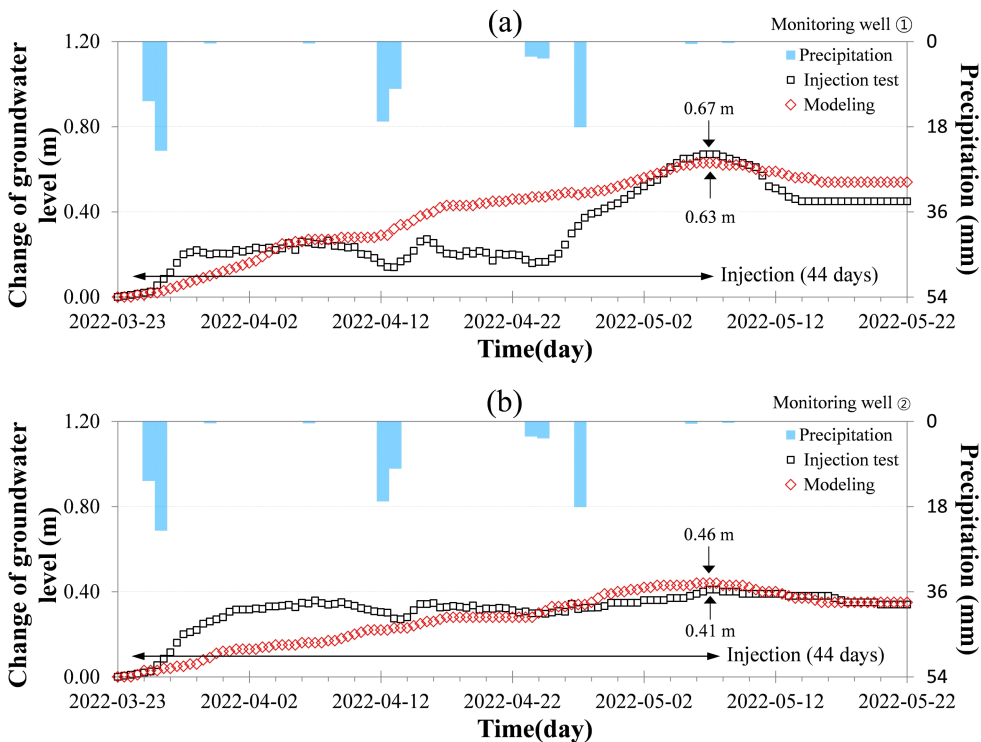


Fig. 16. (a & b) Comparison of groundwater level rise by injection test and modeling(observation well ①, ②).

체의 위치가 70 m일 때 지하수위 상승고가 가장 높고 저류량이 가장 많은 것으로 조사되었다. 따라서, 벽체의 위치는 취수시설과 가까울수록 저류 능력 강화에 효과적이며 취수시설의 취수 안정성을 높여주는 것으로 판단되었다.

이와 같이, 인공함양 시스템이 적용된 지역에서 저투수성 벽체를 연계한다면 주입원수가 유역 외로 손실되는 것을 억제하여 저류 능력 강화 및 함양 효과를 극대화할 수 있을 것이며 보다 안정적인 취수가 가능해질 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 환경부(한국환경산업기술원)의 수요대응형 물공급 서비스사업 과제(상시 가뭄지역의 지하수 최적공급 관리를 위한 IoT 기반 인공함양 및 Well network 기술 개발, #146523)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Cha, J.H., Kim, G.B. and Lee, J.Y., 2021, Preliminary Evaluation of the Optimal Injection Rate and Injection Efficiency of Groundwater Artificial Recharge Site Using Numerical Model. *The Journal of Engineering Geology*, 31, 19-30 (in Korean with English abstract).
- Cha, J.H., Lee, J.Y. and Kim, W.S., 2017, Development of 3-D Flow Model for Porous Media with Scenario-based Ground Excavation. *Journal of Korean Society of Disaster and Security*, 10, 19-27 (in Korean with English abstract).
- Choi, J.C. and Kang, D.H., 2019, Sensitivity Analysis of Artificial Recharge in Consideration of Hydrologic Characteristics of Facility Agricultural Complex in Korea : Hydraulic Conductivity and Separation Distance from Injection Well to Pumping Well. *Journal of Environmental Science International*, 28, 737-749 (in Korean with English abstract).
- Ghasemizade, M., Asante, K.O., Petersen, C., Kocis, T., Dahlke, H.E. and Harter, T., 2019, An integrated approach toward sustainability viagroundwater banking in the southern Central Valley, California. *Water Resources Research*, 55, 2742-2759.
- Karim, I.R. and Ali, M.A., 2017, Artificial Recharge of Groundwaer by Injection Wells (Case Study). *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 6, 6193-6196.
- 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. *Journal of Engineering Geology*, 29, 483-494 (in Korean with English abstract).
- Mohammadzadeh-Habili, J. and Khalili, D., 2020, Assessment of Artificial Recharge Dams and Improvement of Their Groundwater-Recharge Capacity. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25, 04020011, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001909](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001909).
- Pendke, M.S., Asewar, B.V., Waskar, D.P., Samindre, M.S., Gore, A.K., Chary, G.R. and Narsimlu, B., 2017, Design and assessment of borewell recharge technique for groundwater enhancement and recharge in assured rainfall zone of Marathwada Region. *Indian Journal of Dryland Agricultural Research and Development*, 32, 56-60.
- Sashikkumar, M.C., Selvam, S., Kalyanasundaram, V.L. and Johnny, J.C., 2017, GIS based groundwater modeling study to assess the effect of artificial recharge: A case study from Kodaganar river basin, Dindigul district, Tamil Nadu. *Journal of the Geological Society of India*, 89, 57-64.
- 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.

Received : November 22, 2022

Revised : December 19, 2022

Accepted : December 22, 2022