

농업가뭄대응을 위한 인공함양 시스템의 함양능력 평가

이재영^{1*} · 김규범²

¹(주)신우엔지니어링 융합기술연구소 소장, ²대전대학교 건설안전방재공학과 교수

Recharge Potential Assessment of Artificial Recharge System for Agricultural Drought Adaptation

Jae Young Lee^{1*} and Gyo Bum Kim²

¹Research Director, Fusion Research Institute, Sinwoo Engineering CO., LTD.

²Professor, Department of Construction Safety and Disaster Prevention, Daejeon University

요약

최근 기후변화로 인한 가뭄발생으로 국지적인 물부족 문제 해결을 위해 안정적인 지하수를 활용한 물공급 방안의 필요성이 증가하고 있으며 이에 대한 대안으로 지하수 인공함양 기술이 대두되고 있다. 본 연구에서는 기상조건 및 목표취수량, 함양정의 주입량, 주입기간 등을 고려한 함양 시나리오를 반영하여 수치모델링을 통해 인공함양-취수 시스템의 함양능력 평가와 최적 운영조건을 도출하여 가뭄발생에 대비한 농업용수의 효율적인 공급과 안정적인 용수확보를 위한 정량적인 평가기법을 도출하고자 하였다. 이에 함양정의 함양능력을 평가하기 위해 물수지 분석으로부터 도출된 목표취수량을 고려한 총 주입량 10,000 ton의 조건하에서 주입 시나리오별 (Case 1~4)로 주입정 및 관측정별 지하수위 변화를 모사한 결과 주입 후 유역 내 지하수위는 약 25~42일간 유지되는 것으로 나타났다. 이 중 Case 3의 경우 지표하 1 m 미만으로 지하수위가 상승하여 적정 주입량은 50 m³/day가 적절한 것으로 모사되었으며 함양수 주입에 의한 지하수위 상승에 따른 영향범위는 113.5 m로 예측되었다. 또한 함양 시나리오에 따른 하류부 저투수성 벽체(LPB) 설치 전후의 유역내 함양능력 변화는 설치 전 대비 지하수 저류량은 약 6배가량 증가하였고 지하수 체류시간은 약 4배 정도 증가하는 것으로 모사되었다. 본 연구결과는 향후 가뭄대응을 위한 안정적인 농업용수 공급 및 지속적인 수자원 확보에 크게 기여할 것으로 기대된다.

핵심용어: 인공함양, 주입량, 수치모델링, 용수공급

ABSTRACT

There is an increasing need for water supply plan using sustainable groundwater to resolve water shortage problem caused by drought due to climate change and artificial aquifer recharge has recently emerged as an alternative. This study deals with recharge potential assessment for artificial recharge system and quantitative assessment for securing stable water and efficient agricultural water supply adapt to drought finding optimal operating condition by numerical modeling to reflect recharge scenarios considering climate condition, target water intake, injection rate, and injection duration. In order to assess recharge potential of injection well, numerical simulation was performed to predict groundwater level changes in injection and observation well respect to injection scenarios (Case 1~4) for a given total injection rate (10,000 m³). The results indicate that groundwater levels for each case are maintained for 25~42 days and optimal injection rate is 50 m³/day for Case 3 resulted in groundwater level rise less than 1 m below surface. The results also show that influential area of groundwater level rise due to injection was estimated at 113.5 m and groundwater storage and elapsed time were respectively increased by 6 times and 4 times after installation of low permeable barrier. The proposed assessment method can be contributed to sustainable agricultural water supply and stable water security for drought adaptation.

Keywords: Artificial recharge, Injection rate, Numerical modeling, Water supply

*Corresponding author: Jae Young Lee, vennard386@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5067-8758>

Received: 20 November 2020, Revised: 28 December 2020, Accepted: March 18 2021



1. 서론

대수층의 인공함양(artificial recharge)은 유역으로부터의 유출을 지체시키고 지하수자원을 직접 보충함으로써 가뭄의 영향을 줄이기 위해 고려할 수 있는 대안 중의 하나이다. 이러한 인공함양은 잉여 지표유출수를 지하로 직접 주입하는 과정으로써 함양정을 이용하거나 유역의 자연 침투능을 강화함으로써 대수층의 지하수를 함양하고 가뭄시 단수기의 물 수요량을 충족하기 위해 지표수가 여유가 있는 시기에 지하대수층으로 물을 저장하는 방식이라 할 수 있다(National Research Council, 1994). 우리나라의 경우 강수량이 여름철에 집중되어 인공함양 기술을 적용하기 적합하다고 할 수 있으며 이를 통해 기후변화로 인한 물 부족 문제를 해결하고 시공간적으로 차별화된 수자원의 지속적인 확보와 안정적인 공급이 가능하다.

이와 같은 인공함양에 대한 연구는 국외의 경우 불포화 및 포화 대수층에 설치된 주입정에서 상이한 지하수 함양기법에 대한 수리학적 지반공학적 매개변수의 영향을 분석하여 함양가능량을 평가한 바 있으며(Mohamed and Ahmed, 2013) 대수층 인공함양에서 수리전도도의 시간에 따른 감쇄가 양수에 의한 수리전도도보다 적게 나타나고 시간당 함양량이 더 적을 때 수리전도도의 감쇄가 보다 완만하게 나타난다는 사실을 제시하였다(Dong et al., 2011). 또한 갈수기의 지하수 재이용을 위해 주입정을 통한 인공함양 방식을 적용하여 주입정의 운영조건을 도출하기 위해 수치모델링을 활용한 바 있으며(Karim and Ali, 2017) 홍수확산 시스템에 적용된 향상된 용수저장 기술에 대한 성능 및 수문학적 기능에 대한 연구를 위해 물수지 분석 및 지하수 모델링 기법이 활용된 바 있다(Hashemi et al., 2015).

한편, 국내의 경우 시설농업단지의 수막재배로 인한 지하수 고갈 문제해결을 위한 인공함양 관련 연구가 활발하게 진행되어 오고 있다. 이러한 시설농업단지의 인공함양 설계를 위해 수리지질 특성과 주입정 및 양수정 사이의 이격거리 등을 고려한 시나리오별 수치모사를 HydroGeoSphere(HGS) 모델을 적용하여 수행한 바 있으며(Choi and Kang, 2019) 하천변 층적 대수층에서 대수층 저류/이동/회수 방식의 인공함양 기법을 적용하였을 때 하천수의 반복주입에 따른 대수층 함양능력에 대한 영향분석에 대한 연구를 수행한 바 있다(Moon et al., 2014). 또한 지하수 모델링 기법을 이용하여 계절양수 시 최적의 인공함양 시기 및 위치를 평가하고 하천고갈인자에 따른 효율적인 인공함양 전략을 제시한 바 있으며(Park et al., 2016) 시설재배지역에서 인공함양기법을 이용하여 수자원 확보 시 최적의 주입정 위치를 평가하기 위해 주입정 위치에 따른 기존 양수정의 양수량 변화를 수치모델링을 활용하여 비교 분석한 바 있다(Lee et al., 2014).

그러나 농업용수 공급을 위한 인공함양 시스템에서 목표취수량을 고려한 기상조건에 따른 유역의 함양능력을 평가하고 함양-취수 시스템의 최적 운영조건을 도출하기 위해 주입량 및 취수량, 지하수 저류량, 함양정 운영조건 등을 다양하게 고려한 가뭄대응에 필요한 수치해석 기반의 정량적인 평가기법에 대한 연구는 미미한 상황이다. 이에 본 연구에서는 기상조건 및 인공함양을 위한 주입정의 주입량 및 주입 기간 등의 변동성을 고려한 함양 시나리오를 구성하고 수치모델링을 활용하여 유역의 농업용수 수요량을 반영한 함양-취수 시스템의 함양능력 평가를 통해 최적 조건을 도출한 후 함양수 주입에 따른 유역 내 저류효과를 검토함으로써 가뭄발생에 대비한 농업용수 공급의 효율성과 안정성을 확보하고자 하였다.

2. 연구대상 유역

본 연구 수행을 위한 대상지역은 충청남도 홍성군 갈산면 운곡리 일대로 지형은 한반도 서해안 지역의 일반적인 특징인 저산성 산지와 구릉성 산지로 형성된 노년기 지형의 양상을 나타내고 있으며, 연결성이 없는 소규모의 구릉성 산지가 거의 불규칙하게 산재하고 있다. 갈산면 운곡리구는 동북부의 삼준산(490 EL.m)을 비롯한 산지가 발달해 있고 서부에는 평가가 펼쳐져 있다. 또한 수계는 삼준산을 분수령으로 가곡천, 상촌천, 운곡천이 합류하여 와룡천을 형성하며 지형은 완만하고 밭과 논 등 경작지로 구성되어 있다. 대상지역의 지질은 선캠브리아기의 편암류(월현통 및 명호리통)와 덕정리 편마암, 이들을 관입한 시대미상의 편마암류 혹은 편상화강암, 그리고 백악기에 재관입한 화성암류 등으로 구성되어 있고, 신생대 제4기 층적

층이 골짜기 지역을 부정함으로 피복되어 있다(Fig. 1).

본 연구대상 지역의 3D 지하수 수치모델링 수행을 위해 수문지질 및 지형 등 기초자료를 통해 구축된 DB를 활용하여 인공함양-취수시스템 평가를 위한 개념모델을 구축하고자 하였으며 이때 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 시추조사 자료를 통해 획득한 시추주상도와 지층정보를 활용한 수치 Layer를 구성하였고 불포화대 영역의 현장 수리시험 및 입도분석 결과를 활용하여 수치모델의 지층특성에 대한 입력자료를 구성하였다. 또한 해당 지역의 3D 수치모델링을 위한 개념모델을 구축하고자 지형적인 분수령인 산의 능선을 경계로 설정하였으며 수치지형도의 DEM(Digital Elevation Model) 자료를 활용하여 Fig. 1(b)와 같이 모의 대상영역을 구축하였다. 본 연구에서 3차원 지하수 유동 모델링을 위해 범용수치 모델인 MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988)를 이용하였다.

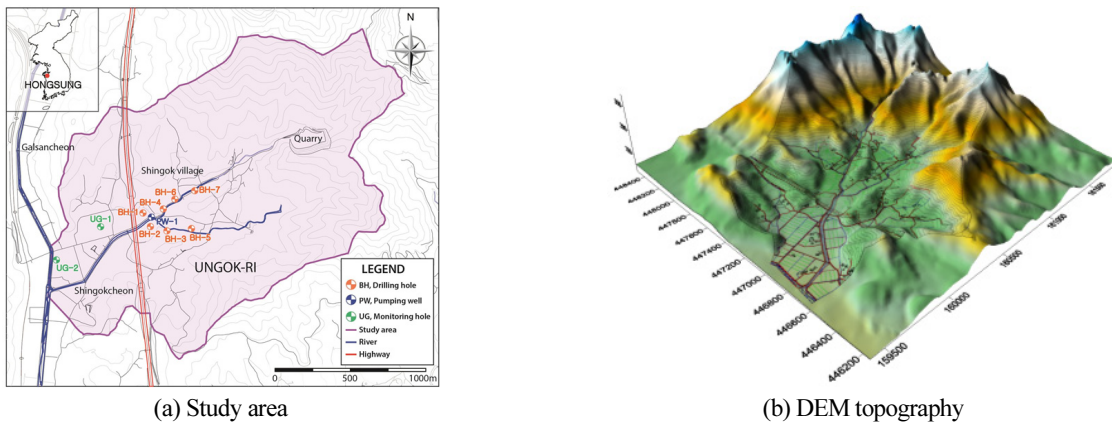


Fig. 1. Location of the Study Area and the DEM of the Studied Watershed

3. 인공함양-취수 시스템을 고려한 함양능력 평가

3.1 인공함양-취수 시스템의 지하수 정류 모사

인공함양-취수 시스템을 고려한 함양능력을 평가하기 위해 대상유역에 설치된 주입정 및 취수정, Ditch, 저투수성 벽체(LPB)를 Fig. 2와 같이 모델링 영역에 반영하였다. 또한 대상유역에서 광역 지하수 모델링을 위한 집수영역을 외부유출 경계면을 따라 설정하였다. 이러한 집수영역 내에서 지층경사가 비교적 완만하고 유역저류의 효과가 상대적으로 큰 갈산면 운곡리 소하천 하류부 지역을 저류량 평가영역으로 설정하여 지하수 광역모델링을 통한 국지적인 유역의 저류효과를 평가하고자 하였다.

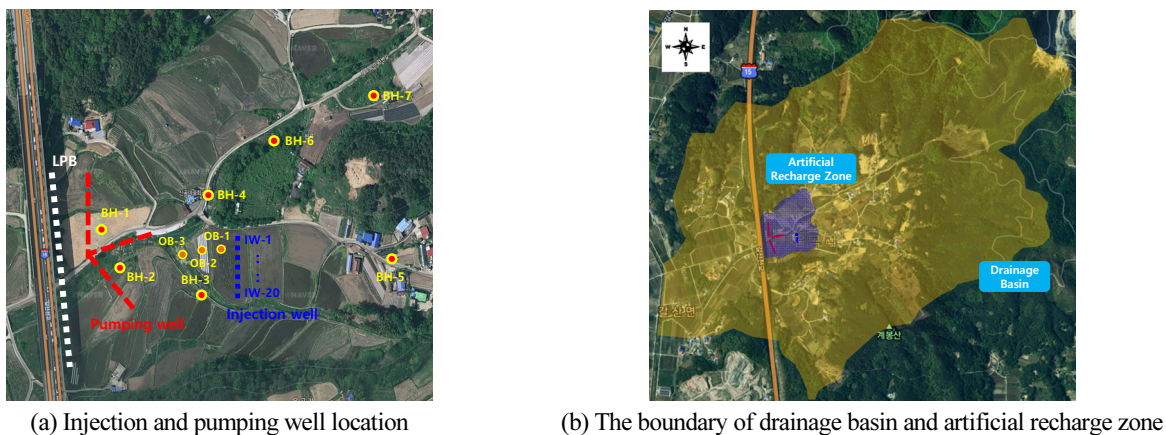


Fig. 2. The Conceptual Model Area

모델영역은 가로 2,450 m×세로 2,350 m이며 격자망은 490열 및 470행으로 지층조건은 충적층 및 암반층인 2개층의 Layer로 구성하였으며 대상지역의 지층분포 및 수리전도도는 Table 1과 같이 설정하였다. 모델의 경계조건은 대상영역 외 부경계를 무흐름 경계(No-flux boundary)로 하천 수계는 하천이 위치한 셀에서 하천수위를 이용한 일정수두 경계조건을 적용한 하천경계(RIV)로 설정하였는데 이러한 하천경계는 하천구간을 따라 하천수위, 하상두께 및 수리전도도를 입력조건으로 이용하였다. 또한 수리상수, 지하수위 및 하천수위와 같은 모델 입력변수는 현장계측 및 현장시험 결과자료를 적용하였다. Fig. 2(a)와 같이 인공함양을 위한 주입정은 총 20공이며 Ditch의 길이는 총 15 m(1 m×5 m×0.8 m 3set)로 설정되었으며 관측정은 주입정 상류와 10 m, 20 m, 50 m 하류지점에 위치하는 것으로 설정하였다.

Table 1. Distribution of Geological Layer and Hydraulic Conductivity

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

정류모사 결과 대상구역에서의 지하수위 분포는 EL. 28.0 m~EL. 301.1 m로 나타났으며 Fig. 3과 같이 개념모델 북측 및 동측의 고지대 방행에서 모델 중앙을 흐르는 하천인 저지대로의 지하수 유동이 모사되었다. 또한 정류모사 결과를 이용한 모델 보정을 위해 불확실성이 큰 것으로 판단되는 함양량 자료를 연평균 강수량 자료로부터 추정하여 이를 상수로 활용하여 민감도가 가장 큰 투수계수의 보정과정을 거쳐 관측수위와 계산수위의 결과를 비교함으로써 최적 변수값 추정을 통해 정류모델을 구축하였으며 대상지역의 지하수 함양율은 연평균 강수량(1,238.1 mm/yr, 서산기상대)의 14.0%를 적용하였다 (Chungcheongnam-do, 2013). Fig. 4는 정류모사에 대한 관측치에 대한 보정 결과를 나타내며 그림에서와 같이 모델 보정 결과 상관계수 0.995, 정규화된 RMS는 4.55%로 나타나 모델의 예측정확도는 5% 이내로 적합한 것으로 판단되었다.

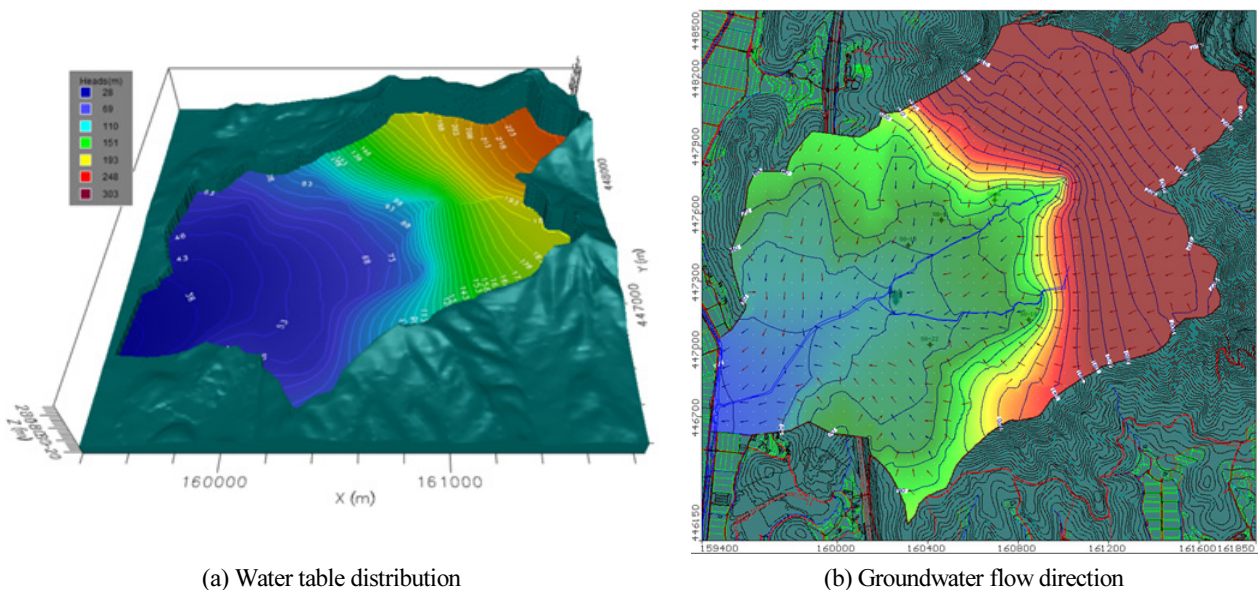


Fig. 3. Steady State Simulation Result

과 10년 평균 1~3월 기준 월강수량 누적량은 101.3 mm이며 1~4월 기준 누적량은 184.1 mm로 산정되었다. 본 연구에서는 1~4월 누적 평균강우량을 적용하여 갈수기의 기상조건을 반영하고자 하였으며 수치모델링에서 입력데이터로 강우조건에 따른 월별 함양량을 적용하여 지하수위 변동을 모사하고자 하였다.

통상적으로 충분하지 않은 하천수는 농번기에 일시적인 하천수 사용증가로 인한 하천수 고갈로 이어지며 이러한 하천의 건천화로 인해 지하수의 지속적인 채수가 발생하여 얇은 우물의 지하수 고갈이 빠르게 발생하게 된다. 즉, 예년보다 강수량이 적거나 이로 인한 하천수량 감소로 가뭄강도가 증가하면 우물의 고갈도 빠르게 진행되며 이에 따른 지하수위도 낮아지게 되므로 각 기상조건별로 지하수의 인공함양의 강도를 증가시켜 농번기에 물 부족에 대비하여야 한다. 이와 같은 상황을 고려하여 강우조건을 고려한 기상시나리오는 ①10년 평균 월강수량, ②10년 평균 월강수량의 75%, ③10년 평균 월강수량의 50%의 강우조건을 고려해 볼 수 있으나 이 중 기 발생 사상인 ①번 시나리오로 단일화하여 기상시나리오를 적용하였다. 또한 유역의 함양가능량을 평가하기 위해서는 물 부족량을 고려한 목표 취수량을 산정하여 이를 토대로 인공함양을 위한 주입량을 평가하여 대상유역의 지속가능한 수자원 확보와 물 공급의 안정성을 확보하고자 하였으며 이러한 물 부족량은 식 (1)과 같이 산정할 수 있다.

$$[\text{물부족량}] = [\text{안전율을고려한최대수요량}] - [\text{기존관정평균이용량}] \tag{1}$$

본 연구의 대상지역인 운곡리 유역의 농번기 시작 전인 5월의 물 부족량은 월별 평균강우량을 이용한 유역의 물수지 분석 결과 총 6,446 m³으로 나타났으며 여기서 최대수요량 산정을 위해 고려된 안전율(safety factor)은 용수수요추정의 불확실성 및 안정적인 용수확보를 고려하여 110%를 반영하여 최대수요량을 산정하였다(Table 3). 따라서 목표취수량은 5월의 물 부족량과 농번기 시작인 6월 초 용수확보를 고려하여 6월 물 부족량의 약 10%를 반영한 총 10,000 m³으로 설정하였다.

Table 3. Water Budget Analysis Result

Period	Main demand period and dry season (m ³ /month)						Low-demand period and wet season (m ³ /month)						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Demand analysis	Maximum water Demand	527	476	527	2,010	14,427	51,110	30,127	49,327	17,710	1,277	760	527
	Maximum demand with safety factor	580	524	580	2,211	15,870	56,221	33,140	54,260	19,481	1,405	836	580
Supply analysis	Present water supply capability of wells	572	445	428	5,184	9,423	8,842	7,257	6,375	6,511	5,858	5,939	578
	Shortage analysis	-7	-79	-152	2,973	-6,446	-47,379	-25,883	-47,885	-12,970	4,453	5,103	-2
Recharge source analysis	Natural groundwater Recharge	5,062	8,671	9,988	18,765	21,440	26,607	68,814	57,817	25,217	14,705	13,071	10,498
	Recharge - Present usage	4,490	8,226	9,560	13,581	12,017	17,765	61,558	51,443	18,706	8,847	7,132	9,920
	Stream discharge	25,888	26,396	38,917	86,970	84,940	102,537	343,313	354,142	186,462	64,805	44,670	28,426
	Available total water amount	30,378	34,621	48,477	100,551	96,957	120,302	404,870	405,585	205,167	73,652	51,802	38,346
	Recharge potential of target layer (m ³)	27,527	28,353	29,885	31,223	29,725	22,832	29,893	21,005	19,384	22,308	24,431	23,307

수치모형을 활용한 시나리오 기반의 함양량 평가를 위해서는 주입정의 단위 주입량 즉, 공당 주입량 및 주입 공수가 동일해야 하며 설정한 목표 취수량 하에서 함양정의 주입총량 및 주입 기간의 조건을 각각 고려한 합성 시나리오를 반영하고 대상유역 하류부에 LPB를 설치하여 유역의 자연 저류능력을 최대한 활용하고자 하였다. 따라서 이와 같은 사항을 종합적으로 반영하였을 때 대상유역의 인공함양-취수시스템을 고려한 수치모사를 위해서 현재 설치되어 있는 주입정 6공과 향후 설치될 주입공 14공을 추가적으로 반영하여 총 주입량을 10,000 m³으로 일정하게 하고 총 20개 주입공의 공당 개별 주입량과 주입시간에 대한 조건을 변화하여 5가지 함양 시나리오를 설정하였으며 이 중 Case 5인 경우 정류모사 시 overflow가 발생하는 것으로 나타나 이후 함양량 평가에서 제외하였다(Table 4).

Table 4. Artificial Injection Scenarios for Numerical Simulations

Scenario	Injection Rate Per Well (m ³ /day)	Total Number of Injection wells	Duration (day)	Total Injection Rate (m ³)	Remarks
Case 1	20.0	20	25	10,000	
Case 2	33.3	20	15	10,000	
Case 3	50.0	20	10	10,000	
Case 4	62.5	20	8	10,000	
Case 5	100.0	20	5	10,000	Overflow

3.3 함양정의 주입 시나리오를 고려한 함양가능량 평가

본 절에서는 최적의 인공함양 시나리오를 도출하고자 대상유역에 설치된 함양정의 함양능력을 평가하기 위해 인공함양 시스템의 함양능력을 평가하기 위해 총 주입량 10,000 m³ 조건하에서 지하수위 상승고의 변화를 분석하고자 하였으며 이를 위해 경사(지표면 및 암반층 경사)와 대수층 두께를 고려하고 작물성장 심도를 고려하여 지표면 하부 1.0 m 이하로 지하수위 상승 범위를 설정한 후 전술한 주입 시나리오별(Case 1~4)로 수치모사를 수행하였다. 수치모사로 도출된 함양정의 주입량

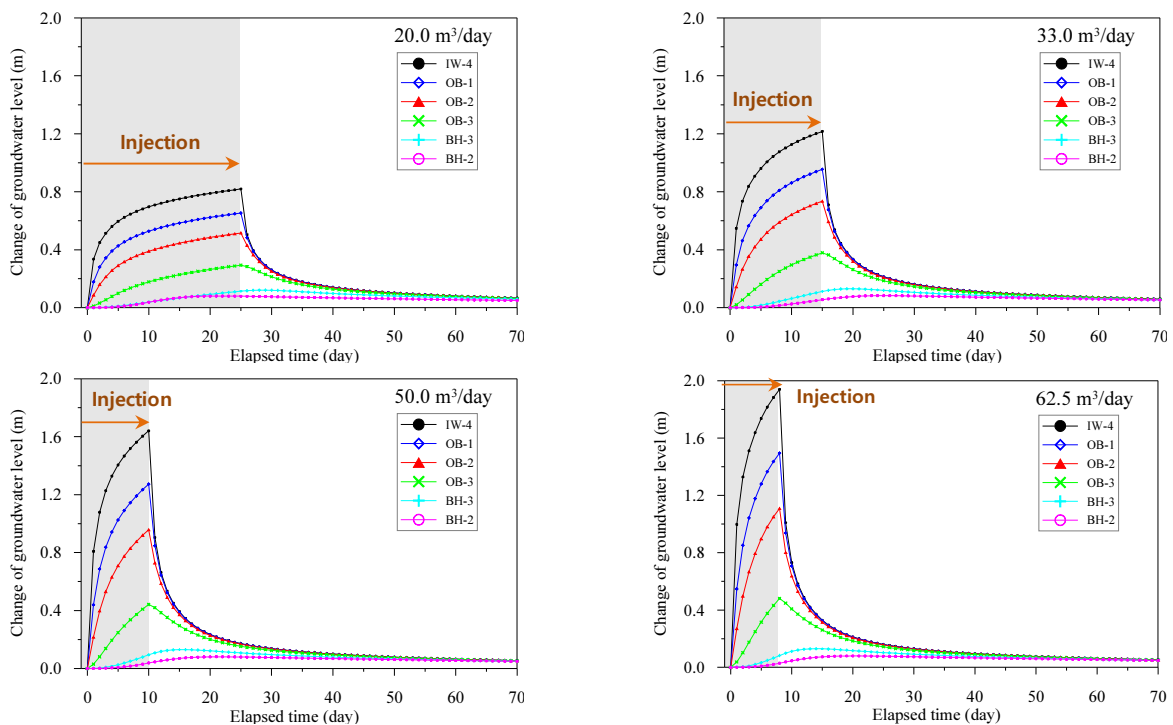


Fig. 5. Change of Groundwater Levels in Injection and Observation Wells by Injection Scenarios

시나리오(20, 33, 50, 62.5 m³/day)에 따른 대상유역내 주입정 및 하류로 10, 20, 50 m 이격된 관측정에서의 개별 지하수위 변동은 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 인공함양수 주입 후 유역 내 지하수위 유지시간은 약 25~42일간 유지되는 것으로 모사되었다. 또한 주입량이 많을수록 주입에 따른 지하수위 상승 및 하강 시간이 빨라지며 주입정에서 멀어질수록 지하수위 상승 효과가 떨어지는 반면 지하수 저류효과는 비슷하게 나타남을 알 수 있었다. 단 강수량, 가뭄발생 지속시간 등 추후 상세한 검토가 필요한 것으로 판단되었다.

한편, 주입정 및 주요 관측공에서의 주입량 시나리오별 지하수위 변동은 Fig. 6과 같이 나타내었으며 그림에서 보는 바와 같이 주입정(IW-4)에서의 주입량 시나리오별 지하수위는 0.82~1.94 m 상승하는 것으로 나타났으며 하류로 이격된 관측공인 OB-1, OB-2, OB-3에서 주입 시나리오별 지하수위는 0.65~1.49 m, 0.52~1.11 m, 0.29~0.48 m 각각 상승하는 것으로 모사되었고 관측공 BH-2와 BH-3는 0.07~0.08 m, 0.12~0.13 m의 수위상승이 각각 나타나는 것으로 모사되었다. 이와 같이 주입정으로부터 하류방향으로 갈수록 유역내 지하수위 감소량은 적어지고 완만한 수위강하 양상을 보여주고 있으며 향후 안정적인 취수가 가능한 지하수위 안정화 상태까지 주입량과 주입시기 및 주입위치가 결정되어야 함을 알 수 있었다.

주입량 시나리오에 따른 유역내 지하수 유출량 변화 및 주입완료 후 지하수 저류량 변화를 모사한 결과는 Fig. 7에 나타나 있으며 분석 결과, 주입량이 적은 Case 1(20 m³/day)의 경우 약 25일간 인공함양 영역에서 저류량이 감소하고 Case 2(33.3 m³/day)의 경우 주입 후 약 34일간 저류량이 감소되며 Case 3(50.0 m³/day)의 경우 약 39일간 Case 4(62.5 m³/day)의 경우 약 42일 동안 저류량이 각각 감소되는 것으로 모사되었다.

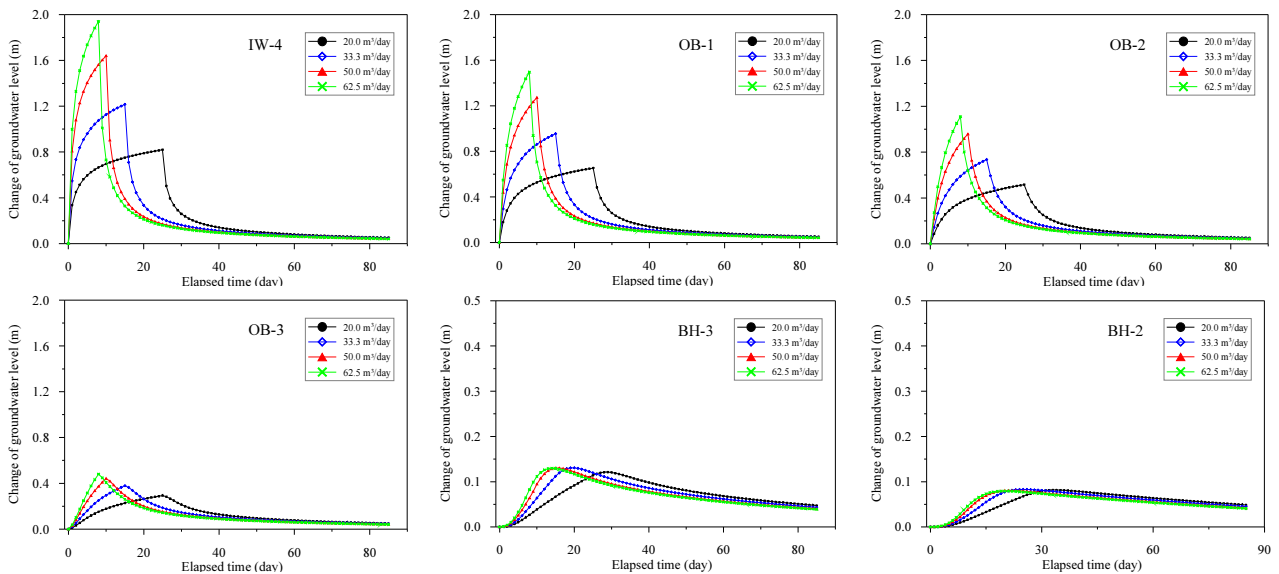


Fig. 6. Change of Groundwater Levels by Injection Scenarios for Each Well

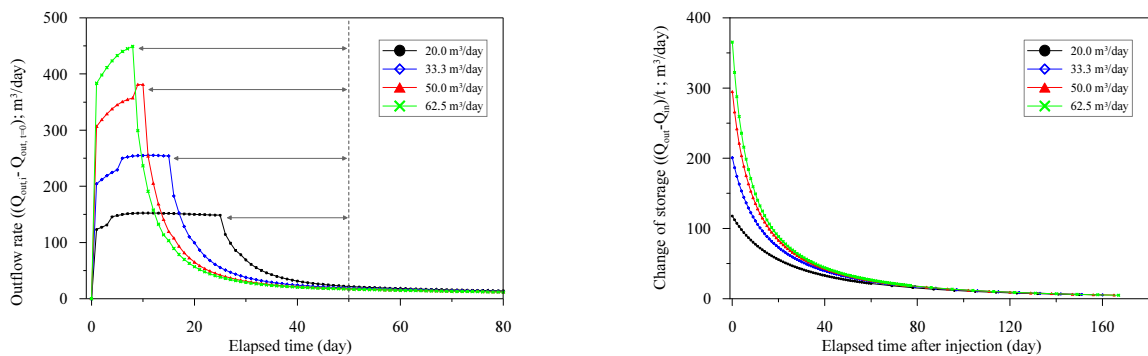


Fig. 7. Change of Groundwater Flow (left) and Storage (right) by Injection Scenarios

이와 같이 대상유역에 설치된 주입정 및 하류로 10 m, 20 m, 50 m 각각 이격된 관측정별 지하수위 변동은 Table 5와 Fig. 8과 같이 요약할 수 있다.

Table 5. Groundwater Level Rise by Injection Scenarios

Scenario	Groundwater level rise[m]			
	Injection well (IW-4)	10 m downstream (OB-1)	20 m downstream (OB-2)	50 m downstream (OB-3)
Case 1	0.82	0.65	0.52	0.29
Case 2	1.22	0.96	0.74	0.38
Case 3	1.64	1.27	0.96	0.44
Case 4	1.94	1.49	1.11	0.48

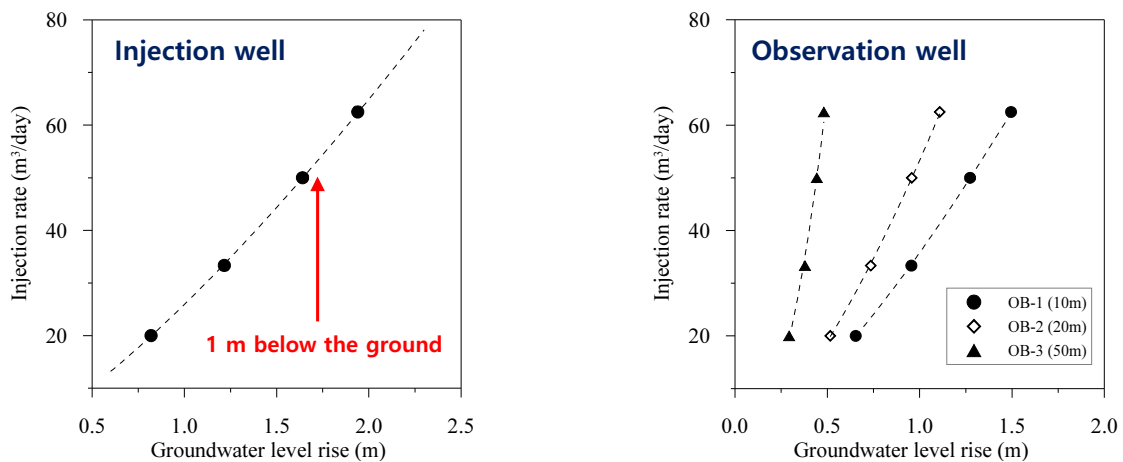


Fig. 8. Groundwater Level Rise in Injection and Observation Wells for Case 3

Table 5에서 보는 바와 같이 주입정의 지표면 표고가 기준면으로부터 2.75 m이므로 대수층 두께 및 작물성장 심도를 고려하여 지표면 하부 1.0 m인 1.75 m 이하로 지하수위 상승범위를 설정하였으므로 Case 3(50 m³/day)의 경우 주입정 및 관측정 모두 지표하 1.0 m 미만의 지하수위 상승범위를 최대한 만족하므로 주입정의 개별 주입량은 50 m³/day가 적절한 것으로 모사되었다. 본 시나리오 경우 10일간 주입으로 총 주입량 10,000 m³을 주입하였으며 지하수위 상승량은 주입정에서 최대 1.64 m를 유지하였다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 주입정으로부터 하류로 10, 20, 50 m 이격된 관측정에서의 수위상승은 0.29~1.49 m로 유지되었으며 이때 주입수는 약 50~60일간 유지되는 것으로 모사되었다. 또한 주입 시나리오(Case 3)에 의한 대상유역내 지하수위 상승에 따른 영향범위는 수위 상승량 0.1 m를 기준으로 하였을 때 약 113.5 m로 예측되었다.

3.4 저투수성 벽체 설치에 따른 유역의 저류능력 평가

본 연구대상 지역인 운곡리 유역에 대한 함양능력 평가를 위해 시추조사를 통해 획득한 지질 및 지층 특성자료를 분석하였다. 그 결과 매립층은 0.8~1.5 m 심도에 분포하며 전석을 포함한 모래로 구성되어 있으며 충적층과 봉적층을 포함한 토사층은 산악지역(BH-6, BH-7)을 제외하고 1.5~5.3 m 심도에 분포하고 있고 풍화토는 실트질 모래로 구성되어 있으며 1.5~6.5 m 심도에 분포하고 있다는 것을 기 연구결과(Lee et al., 2019)를 통해 파악하였다. 또한 대수층의 수리지질학적 특성의 하나인 수리상수값은 기 연구결과에서 시추조사 및 현장시험 결과를 통해 얻은 충적층, 풍화토 및 기반암의 수리전도

도는 4.53×10^{-6} , 1.90×10^{-7} , 1.90×10^{-7} m/s의 값을 각각 적용하였다.

본 연구에서는 총적대수층의 특성을 고려한 대상구역의 저류능력을 평가하기 위해 Fig. 2(a)와 같이 구역내 설치된 수평 취수정으로부터 하류로 약 50 m 위치에 수직으로 길이 12 m, 수리전도계수 10^{-5} cm/sec의 저투수성 벽체(LPB)를 설치하여 함양정의 인공주입 시나리오에 따른 구역내 지하수 저류효과를 검토하고자 하였다. 함양정의 주입입량 시나리오에 따른 구역 하류부 저투수성 벽체 설치 전후의 구역내 지하수 저류량 변동을 수치모사한 결과는 Fig. 9에 나타내었고 함양정 주입 종료 후 저투수성 벽체 설치 전후의 구역내 지하수 저류량 변동을 모사한 결과는 Fig. 10에 나타내었다.

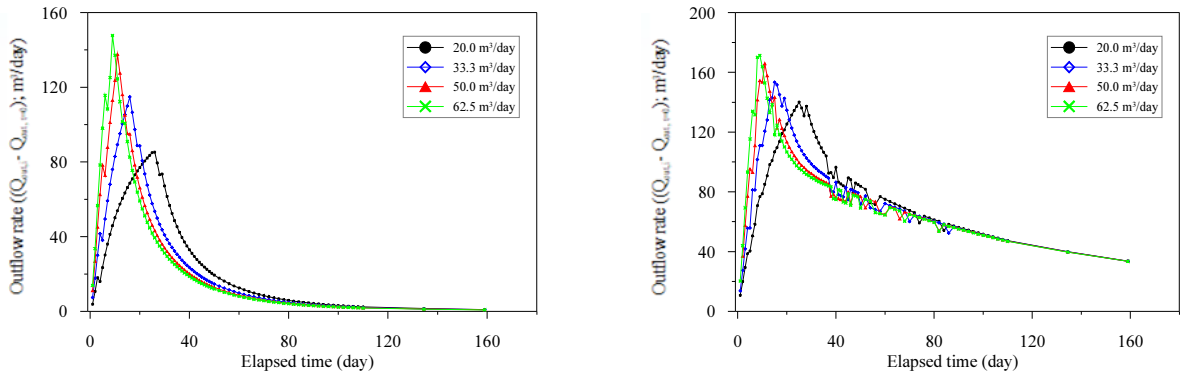


Fig. 9. Changes of Groundwater Flow before (left)-and after (right) Installation of LPB

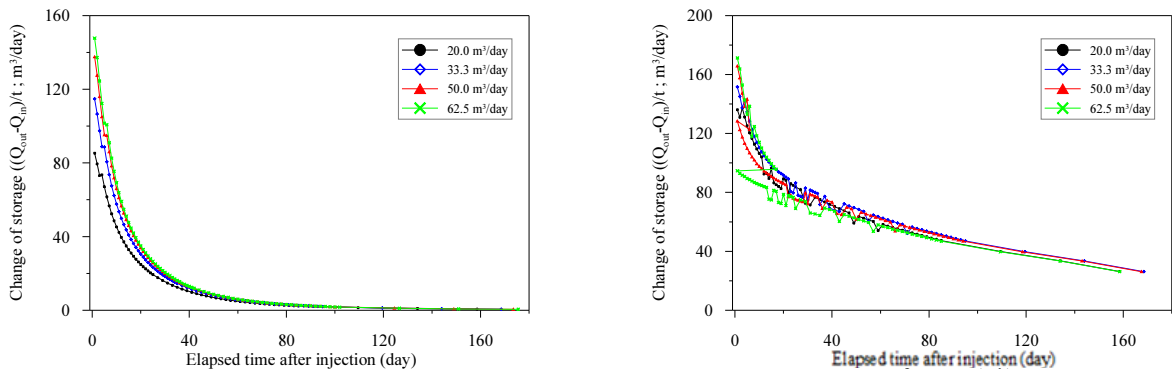


Fig. 10. Changes of Groundwater Storage before (left)-and after (right) Installation of LPB

Figs. 9, 10에서 보는 바와 같이 인공함양 시나리오에 따른 구역내 지하수 저류효과는 하류부에 저투수성 벽체를 설치하였을 경우, 대상구역의 지하수 총 저류량은 벽체 설치 전 대비 약 6배 가량 증가하였으며 지하수 체류시간은 약 4배 정도 증가하는 것으로 모사결과 나타났다. 이러한 결과를 토대로 구역 하류부의 저투수성 벽체의 설치가 구역의 함양능력 증대에 기여하며 인공주입에 따른 함양효과를 극대화하기 위해 구역의 자연저류 능력을 강화하는 것이 효율적이라는 사실을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 인공함양-취수 시스템의 함양능력 평가를 위해 인공주입 시나리오에 따른 주입정 및 관측정에서의 지하수 위 변동을 수치모사를 통해 예측함으로써 구역의 저류효과를 분석하여 가뭄발생에 대비한 농업용수의 안정적 확보를 위한 정량적인 평가기법을 도출하고자 하였으며 주요 연구내용 및 결과는 다음과 같다.

- (1) 유역의 함양능력을 평가하기 위한 주요 항목은 주입량과 취수량, 지하수위, 함양 및 취수 시기와 운영시간 등을 고려할 수 있으며 이와 같은 항목의 변동성을 고려하여 기상조건을 반영한 다양한 함양 시나리오를 구성하였다. 본 연구의 대상지역인 운곡리 유역의 농번기 시작 전인 5월의 물 부족량은 물수지 분석 결과 총 6,446 m³로 나타났으며 농번기 시작인 6월 초 용수확보를 목표로 물 부족량을 고려한 목표 취수량은 10,000 m³으로 산정되었다. 이를 토대로 대상유역에 현재 설치되어 있는 주입정 6공과 향후 설치될 주입공 14공을 추가적으로 반영하여 총 주입량을 10,000 m³로 일정하게 하고 총 20개 주입공의 공당 개별 주입량과 주입시간에 대한 조건을 변화하여 4가지 함양 시나리오를 설정하였다.
- (2) 인공함양-취수 시스템의 함양능력을 평가하기 위해 총 주입량 10,000 m³ 조건하에서 주입수에 의한 지하수위 상승범위를 대수층 두께 및 작물성장 심도를 고려하여 지표면 하부 1 m 이하로 설정한 후 주입 시나리오별(Case 1~4)로 수치모의를 수행하여 비교분석한 결과, Case 3의 경우 지표하 1 m 미만으로 지하수위가 상승하여 주입정의 개별 주입량은 50.0 m³/day가 적절한 것으로 모사되었으며 본 시나리오의 경우 10일 간 주입으로 지하수위 상승량은 주입정에서 최대 1.64 m를 유지하였으며 주입정에서 하류로 10, 20, 50 m 이격된 관측공에서의 지하수위 상승량은 최대 0.22~1.44 m를 유지하는 것으로 예측되었다. 또한 함양수 주입에 의한 대상유역내 지하수위 상승에 따른 영향범위는 수위 상승고 0.1 m를 기준으로 고려하였을 때 약 113.5 m로 예측되었으며 유역내 지하수 유출량 변화는 약 39일간 저류량이 감소되는 것으로 모사되었다.
- (3) 대상지역인 운곡리 유역에 대한 총적대수층 특성을 고려한 유역의 함양능력을 평가하기 위해 유역내 설치된 수평취수 정으로부터 하류로 약 50 m 위치에 수직으로 길이 12 m, 수리전도계수 10⁻⁵ cm/sec의 저투수성 벽체(LPB)를 설치하여 함양정의 인공주입 시나리오에 따른 지하수 저류효과를 검토하였다. 그 결과 인공함양 시나리오에 따른 유역내 지하수 저류효과는 저투수성 벽체를 설치하였을 경우, 지하수 총 저류량이 설치 전 대비 약 6배 가량 증가하였으며 지하수 체류시간은 약 4배 정도 증가하는 것으로 모사결과 나타났다. 이러한 결과를 토대로 유역 하류부의 저투수성 벽체 설치가 유역의 함양능력 증대에 기여하며 인공주입에 따른 함양효과를 극대화하기 위해 유역의 자연저류 능력을 강화하는 것이 효율적이라는 사실을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 제시된 인공함양-취수 시스템의 함양능력 평가기법은 기상조건을 고려한 대상유역의 함양가능량 평가를 통해 향후 취수가능량을 평가하여 유역의 함양-취수 시스템의 최적 운영조건을 도출하여 가뭄발생에 대비한 농업용수의 효율적인 공급과 안정적인 용수확보에 크게 기여할 것으로 판단된다.

Acknowledgment

본 연구는 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

- 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(9): 737-749.
- Chungcheongnam-do (2013). 2013 Groundwater Management Plan Report. Hongseong: Chungcheongnam-do.
- Dong, Y., Zhao, P., Zhou, W. (2011). Effect of Artificial Recharge on Hydraulic Conductivity Using Single Injection Well. *ISWREP 2011 : Proceedings of 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental*

Protection. 3: 2115-2117.

- Hashemi, H., Berndtsson, R., and Persson, M. (2015). Artificial Recharge by Floodwater Spreading Estimated by Water Balances and Groundwater Modelling in Arid Iran. *Hydrological Sciences Journal*. 60(2): 336-350.
- 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(31): 6193-6196.
- Lee, H., Koo, M. H., and Kim, Y. (2014). Determining Optimal Location of an Artificial Recharge Well using an Optimization-coupled Groundwater Flow Model. *Journal of Soil and Groundwater Environment*. 19(3): 66-81.
- 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(4): 483-494.
- McDonald, M. G. and Harbaugh, A. W. (1988). A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. U.S. Geological Survey. Open-File Report 83-875. Book 6. Chapter A1. U.S. Geological Survey.
- Mohamed, H. I. and Ahmed, S. S. (2013). Assessmnet of Hydraulic Performance of Groundwater Recharge Techniques. *International Journal of Water Resources and Arid Environments*. 2(3): 120-124.
- Moon, S. H., Ha, K., Kim, Y., Koh, D. C., and Yoon, H. (2014). Examination for Efficiency of Groundwater Artificial Recharge in Alluvial Aquifer Near Nakdong River of Changweon Area, Korea. *Economic and Environmental Geology*. 47(6): 611-623.
- National Research Council (1994). *Groundwater Recharge Using Waters of Impaired Quality*. Washington DC: National Academy Press.
- Park, G., Lee, H., Koo, M. H., and Kim, Y. (2016). Strategies for an Effective Artificial Recharge in Alluvial Stream-Aquifer Systems Undergoing Heavy Seasonal Pumping. *Journal of the Geological Society of Korea*. 52(3): 211-219.

Korean References Translated from the English

- 문상호, 하규철, 김용철, 고동찬, 윤희성 (2014). 창원지역 낙동강 하천수와 주변 충적층을 이용한 지하수 인공함양의 효율성 평가. *자원환경지질*. 47(6): 611-623.
- 박경미, 이현주, 구민호, 김용철 (2016). 과도한 계절양수로 지하수가 고갈되는 충적대수층에서의 효율적인 지하수 인공함양 전략. *지질학회지*. 52(3): 211-219.
- 이영동, 신동민, 김병준, 김규범 (2019). 주입대상 대수층의 특성을 고려한 인공함양 방법 선정 연구. *지질공학회지*. 29(4): 483-494.
- 이현주, 구민호, 김용철 (2014). 지하수 모델링 기법을 이용한 인공함양정 최적 위치 평가. *한국지하수토양환경학회지*. 19(3): 66-81.
- 충청남도 (2013). *지하수관리계획보고서*. 홍성: 충청남도.
- 최정찬, 강동환 (2019). 국내 시설농업단지의 수리지질 특성을 고려한 인공함양 민감도 분석: 수리전도도 및 주입정과 양수정의 이격거리. *한국환경과학회지*. 28(9): 737-749.