

대수층 계간 축열시스템 적용을 위한 지하수의 화학적 특성 변화

최한나* · 이홍진 · 심병완

한국지질자원연구원

The Influences of Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) System on Geochemical Properties of Groundwater

Hanna Choi* · Hong-Jin Lee · Byoung Ohan Shim

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Korea

ABSTRACT

Aquifer thermal energy storage (ATES) system uses groundwater thermal energy for cooling and heating of buildings, and it is also often utilized to provide warm water to crops and plants for the purpose of enhancing agricultural yields. This study investigated the potential influences of a ATES system on the geochemical properties of groundwater by simulating the variation of hydrochemistry and saturation index of groundwater during ATES operation. The test bed was installed at an agricultural field, which is mainly composed of an groundwater-rich alluvial plain. The simulation results showed no significant precipitation of mineral phases such as manganese-iron oxide, carbonate and sulfate around the ATES test bed, as well as no debasement of other important water quality parameters. The implementation of ATES system in the study area was appropriate and effective for utilizing the thermal energy of groundwater for agricultural use.

Key words : Aquifer thermal energy storage (ATES), Agricultural usage, Saturation index, Temperature fluctuation, Water quality degradation

1. 서 론

기후변화 억제를 위한 국내외의 이산화탄소 배출저감 노력이 이어지는 가운데 화석연료를 대체할 자원으로서 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있다(Mohanty, 2012; Owusu and Asumadu-Sarkodie, 2016). 신재생에너지의 하나로 주목받고 있는 대수층 계간 축열(ATES, Aquifer Thermal Energy Storage)시스템은 층적대수층의 축열 에너지를 활용하여 하절기에 냉방운전을 하고, 동절기에 난방을 수행하는 냉난방 시스템이다(Bloemendal et al., 2015; Nielsen and Sørensen, 2016; Bloemendal and Olsthoorn, 2018). 층적대수층 계간 축열시스템은 냉수정과

온수정의 온도 차이를 이용하여 열교환을 통한 냉난방을 조절하는 방식으로, 시스템의 가동에 따른 지하수온 범위는 5-30°C 사이에서 변화하는 것으로 보고된다(Kalaiselvam and Parameshwaran, 2014). 이 시스템은 재순환(Recirculation), 더블렛(Doublet), 단일열원(Mono-source) 공법이 있으며 대수층의 깊이와 밀폐도, 유속 등의 조건에 따라 적합한 공법을 적용한다(Li, 2014; Bloemendal and Olsthoorn, 2018). 탄소배출저감 요구도가 높은 유럽에서 ATES시스템이 중점적으로 연구되어 왔으며, 2017년 기준 전 세계적으로 3,000개소 이상의 시설이 설치되어 있다(Todorov et al., 2020).

한국에서도 대체에너지로서 신재생에너지 설비의 보급 및 활용에 적극적인 관심을 기울이고 있다(Jo and Kim, 2020; Shin et al., 2020). 2008년 녹색성장추진전략에서 총 건축투자비의 5%를 신재생설비에 투자하도록 하였으며, 2012년부터는 건축물 에너지사용 부하량의 5%를 신재생에너지로 충당하도록 한다는 정책을 발표하였다(Jeong, 2009). 한국에너지공단의 신재생에너지 보급률 통계에 따르면, 2018년 신재생에너지 생산량 178억toe 가운데 지열

주저자: 최한나, 선임연구원

공저자: 이홍진, 책임연구원, 심병완, 책임연구원

*교신저자: 최한나, 선임연구원

Email: pythagoras84@kigam.re.kr

Received : 2021. 05. 12 Reviewed : 2021. 05. 15

Accepted : 2021. 05. 31 Discussion until : 2021. 8. 31

에너지는 2억toe로 전체 생산량의 1.2%에 해당한다. 지열 에너지는 발전비용이 비교적 저렴하며 이산화탄소 등의 가스상 오염물 배출이 없으며 높은 가동률과 잉여열의 재활용이 가능한 장점이 있다(Jeong, 2020). 지하수는 광범위하게 존재하고 있으며 지열에 의해 연중 안정적인 온도를 유지하고 있으므로 ATES의 개발 및 적용을 통한 냉난방시스템의 활용은 기후변화를 억제하기 위한 전 세계적 노력에 동참하는 것이다. ATES 시스템 가동 시, 산화환원조건에 따른 (수)산화 광물의 침전과 용해, 수온변동에 따른 광물포화도 및 규산염광물의 형성속도의 변화, 유기물질의 이동과 관련한 이온성분의 흡착 및 탈착에 따른 수질변화 등이 관찰될 수 있다(Possemiers et al., 2014). 한국에서도 밀폐형 및 개방형 지열 냉난방 시스템을 장기적으로 가동하는 동안 지하수의 pH 및 수온의 변화가 관찰되었다고 보고된바 있다(Park et al., 2013; Park et al., 2015). 이런 이유로 ATES시스템을 설치 및 가동하였을 때 대수층의 수리화학적 특성이 어떻게 변화할지에 대한 예비조사 및 장기관측은 매우 중요하다.

전라북도 완주군은 농업활동이 집약적으로 이루어지는 충적평야로서, 화훼벤처농업육성 시범사업을 수행하는 등의 적극적인 지원을 받고 있으며 장미, 백합, 프리지아 등의 화훼와 철쭉, 국화, 진달래 등의 분화를 주력 상품으로 생산한다. 이 지역의 시설재배 농가들은 화훼의 생육을 위해 비닐하우스 또는 유리온실을 많이 사용하고 있으며, 시설 내부의 온도를 유지하기 위해 주로 전기와 유류 에너

지를 소비하고 있다(Kim and Kim, 2019). 대수층 계간 축열(ATES)시스템을 이곳에 설치한다면 여름 및 겨울의 소비전력을 감소시켜 에너지 사용량 부하를 줄이는 영농-에너지 융합 시스템 모델을 보급할 수 있을 것으로 기대된다. 이 연구에서는 ATES 시스템을 가동하기 전 연구지역의 배경수질을 이해하고, 용도별 물 사용이 적합한지 평가하였다. 또한 시스템의 가동으로 인해 수온이 변화한다면 이로 인한 광물의 포화도가 시스템의 장기적 가동에 영향을 미칠 수 있는지 평가하였다.

2. 연구지역

2.1. 연구지역 지하수량 특성

개발 편의성과 양호한 수질특성으로 충적층 지하수의 이용량이 크게 증가함에 따라, 체계적인 지하수 개발 및 관리의 필요성이 요구되고 있다. 국내에서는 1996년 수립된 지하수법에 따라 지하수의 개발, 이용 및 보전을 위해 지하수 관리계획을 10년 단위로 수립하고, 5년 단위로 검토하여 수정 및 보완하고 있다(MOLIT, 2017). 국가 지하수관리기본계획 수정계획(2017-2026)에서 전라북도 지역의 2017년 지하수 함양량은 152천만 m³/년, 지하수 개발가능량은 101천만 m³/년으로 보고되었으며, 완주군의 지하수 함양량은 17.1천만 m³/년, 지하수 개발가능량은 11.6천만 m³/년으로 전라북도에서 가장 높은 함양률(16.6%)을 가진다. 이론적인 지하수 개발가능량은 연구지역 면적과

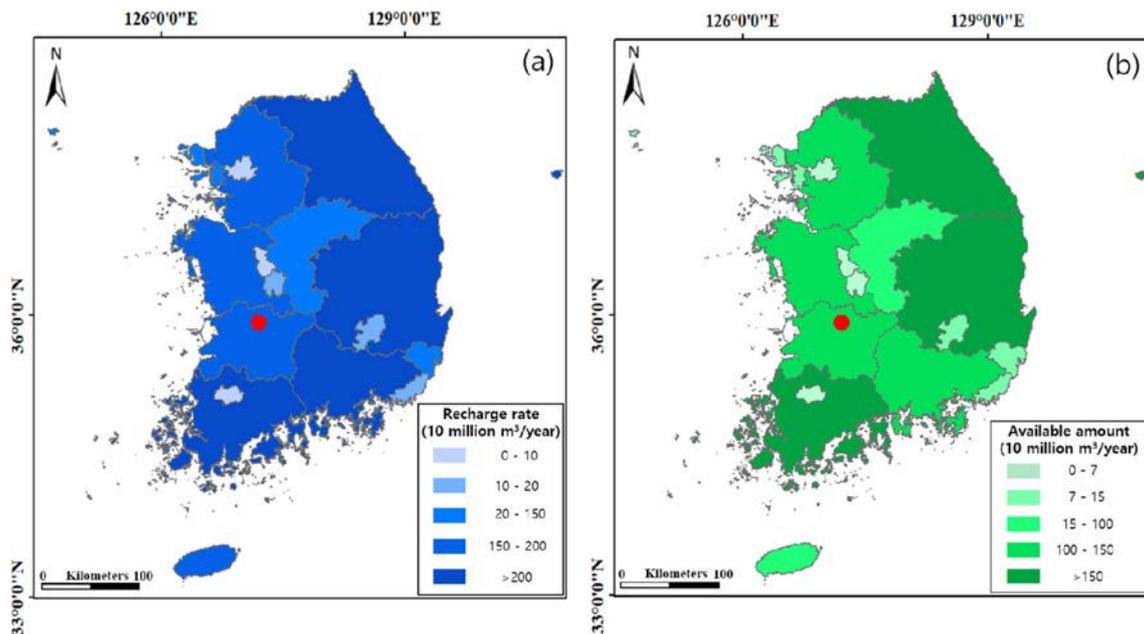


Fig. 1. Recharge rate and available amount of groundwater in South Korea. The location of study site is marked with a red point.

강수량, 함양률을 사용하여 계산되며, Fig. 1은 전국적인 지하수 함양량(Fig. 1(a)) 및 지하수 개발가능량(Fig. 1(b))의 분포도이다(GIMS, 2021). 대수층 계간 축열(ATES)시스템은 지하수열을 이용하는 기법으로, 냉난방을 할 수 있는 능력(capacity)을 일정 수준 이상으로 유지하기 위해서는 지하수량이 풍부하여 안정적인 온도 유지가 가능해야 한다. 이러한 이유로 ATES시스템의 장기적 가동 및 농업 생산효율 향상을 위해 지하수량이 풍부한 지역을 연구지역으로 선정하였다.

2.2. 연구지역의 지질 및 수리적 특성

연구지역은 전라북도 완주군 봉동읍 일대의 화훼재배

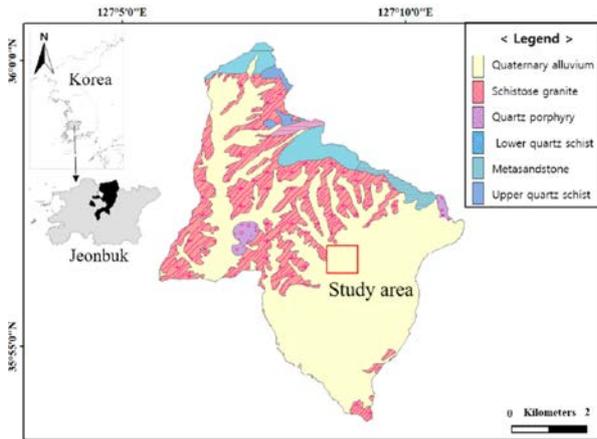


Fig. 2. Geological map of Wanju-Gun, Jeonbuk in Korea. (modified from Hong and Kim, 1969).

단지로서, 10년 평균기온은 13.8°C, 10년 평균강수량은 103.42 mm의 온난다습한 기후를 가진다(KMA, 2021). 연구지역의 북쪽에는 봉실산(372 m), 남서쪽에는 서방산(617 m)이 위치하고, 이 두 산을 제외하면 대부분 낮은 구릉성 산지와 충적평야가 분포한다(Hwang et al., 2009). 연구지역 인근에는 우산천이 충적평야를 가로지르며 북동쪽에서 남서쪽으로 흐르고, 동쪽에서 서쪽방향으로 흐르는 만경강과 남서쪽에서 합류한다. 연구지역의 지질은 고생대 옥천층군에 속하는 변성암류가 북쪽의 봉실산 주변으로 분포하며, 쥐라기 화강암이 연구지역 서편에 분포한다(Hong and Kim, 1969; Hwang et al., 2009). 연구지역의 동쪽과 남쪽은 제4기 충적층이 넓게 분포한다(Fig. 2). 이는 선상지성 충적평야로 분류되며, 하안단구 자갈층 위에 실트층이 퇴적되어 투수성이 좋은 천부 대수층의 발달 조건을 갖추고 있다(Jo, 1987). 노두에서 확인된 퇴적층은 약 5 m의 두께를 가지며, 퇴적층의 하부는 하안단구역층 위에 퇴스-고토양 연속층이 퇴적되어 나타난다(Hong and Kim, 1969).

연구대상부지는 온실을 설치하여 흑한기 및 흑서기를 제외한 연중 작물의 재배 및 출하가 이루어지고 있으므로, ATES 시스템이 향온 유지에 도움이 될 것으로 사료된다. Fig. 3과 같이 후보부지의 전면과 후면에 5개의 시추공을 착정하여 퇴적층의 물성과 대수층의 두께를 관찰하였다. 해당 부지 주변의 충적대수층은 두께가 5 m부터 10 m 사이로 관찰되며, 이는 ATES 기법 가운데 중소규모의 재순환공법을 적용하기에 적합한 부지로 판단된다.

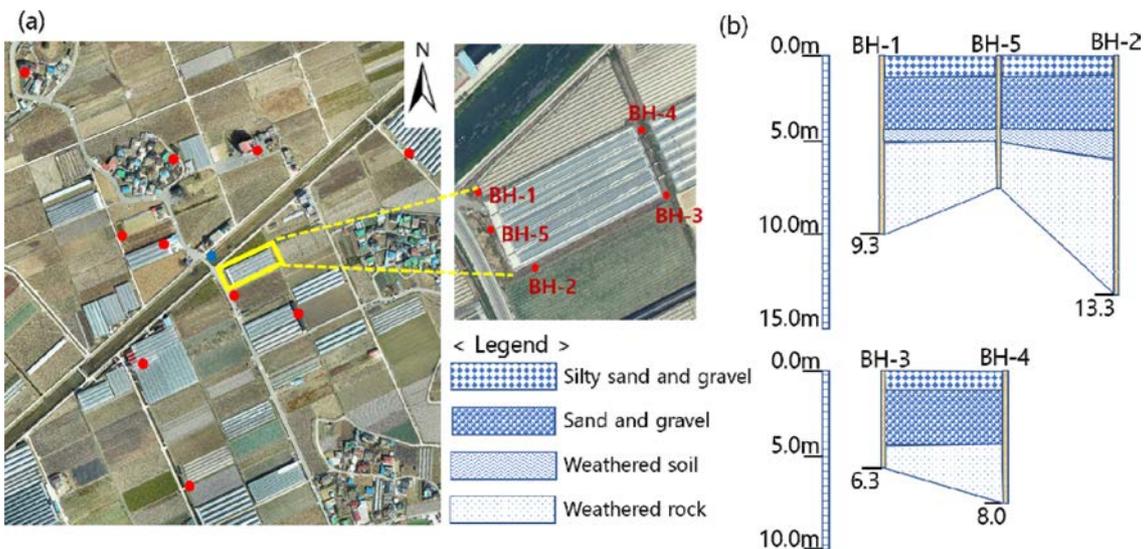


Fig. 3. Location of the ATES (Aquifer Thermal Energy Storage) test bed and water sampling points (a), and Cross section images for borehole from BH-1 to BH-5 drilled around the test bed.



Fig. 4. Red dots and blue dot represent sampling points of groundwater and surface water, respectively. The surface water flows to the southwest direction (Blue arrow).

3. 연구방법

연구대상지역은 약 260,000 m²의 평지로서, 고도는 해발 25 m 내외로 완만한 분지형태에 해당하며, 모니터링 관정은 18-100 m 사이의 심도를 가진다. 2021년 3월 갈수기 시기에 연구지역의 지하수 시료(10개)와 지표수 시료(1개)을 각각 채취하여 연구지역의 기초적인 수질특성을 파악하고자 하였다(Fig. 4). 현장측정항목인 수온, pH, 전기전도도(Electrical conductivity, EC), DO(Dissolved oxygen, 용존산소)는 WTW Multi 3620 IDS set C를 이용하여 측정하였다. 채수 즉시 0.45 μm 필터지에 걸러 알칼리도 측정시료와 음이온, 안정동위원소(산소 및 수소) 시료를 밀폐하여 냉암소에 보관하고, 양이온 시료는 농질산으로 전처리하여 보관하였다. 양이온 분석은 유도결합 플라즈마 분광광도계(ICP, Optima 7300 DV, Perkin Elmer), 음이온분석은 이온교환 크로마토그래피(ICS-1500, Dionex), 안정동위원소 분석은 WS-CRDS분석기(L2120-i, Picarro)를 사용하였다. 시료의 양이온과 음이온 총합에 대한 전하균형은 ±3% 이내로 분포하였다. 물 시료의 화학적 산

소요수량(KMnO₄ 소비량)과 탁도(Turbidity, NTU unit)는 먹는물 수질공정에 따라 공인기관에서 측정하였다. 관정의 심도와 지하수 시료의 현장 측정값(수온, pH, EC, DO, ORP), 양이온 및 음이온 분석값, 용존 실리카의 값은 Table 1과 같다.

4. 결과 및 토의

4.1. 수질유형과 공간적 수질분포

연구지역 지하수 시료의 수온은 평균 15.1°C로 10년 연평균 기온(13.8°C)에 비해 조금 높게 나타났으며, 천부 대수층의 지하수가 기온의 영향을 받아 수온 상승이 이루어진 것으로 판단된다(Table 1). JB-4와 5지점은 지표수(JB-11)보다 높은 수온을 가지는 것으로 측정되었다. 이는 지표수와 지하수의 시료채취 시간이 정오(11시경부터 2시경)와 늦은 오후(5시경)였기 때문에 지표수가 주변 대기 온도와 평형을 이루었기 때문으로 여겨진다. 또한 해당 지점은 비닐하우스 안에 설치된 관정에서 천부지하수를 채수하였기 때문에, 충분한 시간을 양수하였음에도 비닐하

Table 1. Measured field parameters including Temperature, pH, EC, DO, and ORP and analyzed cations (Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, and Sr), anions (F, Cl, Br, NO₃, PO₄, and SO₄), and dissolved silica (SiO₂). Sampling campaign was conducted in March 2021

ID	Depth	T	pH	EC	ORP	DO	Ca	Mg	Na	K	Fe	Mn	SiO ₂	Sr	HCO ₃	F	Cl	Br	NO ₃	PO ₄	SO ₄
	m	°C		μS/cm	mV		mg/L														
JB-1	18	14.8	6.68	187	244	9.78	13.7	3.27	6.58	3.21	BDL*	BDL	18.3	0.07	20.9	<0.1	9.88	BDL	17.6	BDL	16.3
JB-2	18	16.9	6.34	189	280	8.74	19.2	4.24	8.36	3.38	BDL	BDL	24.0	0.11	30.3	<0.1	10.2	BDL	22.7	BDL	24.2
JB-3	25	14.3	6.11	206	265	5.65	19.7	5.37	9.45	4.56	BDL	BDL	26.3	0.15	45.0	<0.1	12.6	BDL	19.7	BDL	20.6
JB-4	18	17.2	7.23	201	454	7.83	29.6	6.78	19.7	2.47	BDL	BDL	43.2	0.46	129	0.87	9.13	BDL	8.74	BDL	12.7
JB-5	18	17.3	6.28	179	280	7.43	17.9	4.19	8.11	2.70	BDL	BDL	18.4	0.10	27.2	<0.1	9.37	BDL	27.5	BDL	19.7
JB-6	100	14.4	8.05	270	229	2.06	22.9	2.35	32.7	1.49	BDL	0.05	33.8	0.64	101	3.32	5.65	0.05	<0.1	0.05	39.0
JB-7	18	14.1	6.15	377	203	2.37	38.7	12.9	16.8	3.60	BDL	BDL	52.6	0.41	104	0.14	17.9	BDL	40.9	BDL	35.0
JB-8	27	13.2	7.64	319	203	6.40	34.2	4.91	13.4	1.81	BDL	BDL	53.7	0.48	90.6	0.48	16.5	BDL	29.6	BDL	7.29
JB-9	18	14.1	6.00	238	247	9.85	24.7	5.52	8.36	3.91	BDL	BDL	23.3	0.13	24.2	<0.1	11.1	BDL	42.7	BDL	30.1
JB-10	18	13.1	6.39	214	266	5.94	20.3	4.89	13.2	3.88	BDL	BDL	46.2	0.21	63.8	0.14	16.7	BDL	9.73	BDL	14.1
JB-11	0	16.4	9.43	137	174	11.5	14.6	2.81	6.71	2.82	BDL	BDL	7.15	0.07	37.5	<0.1	9.74	BDL	8.37	BDL	10.7

* BDL means below detection limit and the minimum value of each ion as follow: Fe 0.03 mg/L, Mn 0.01 mg/L, Br and PO₄ 0.1 mg/L

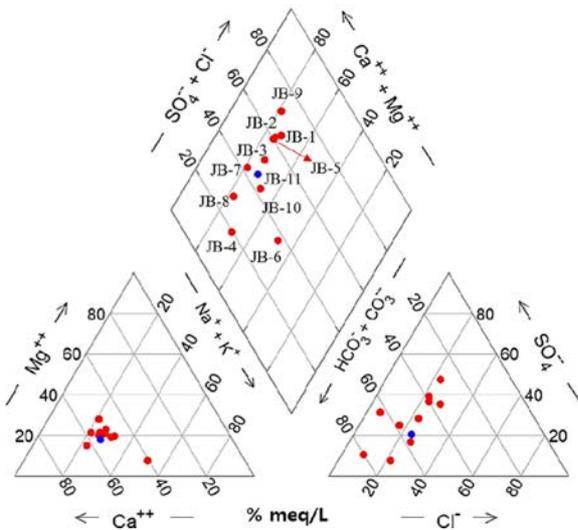


Fig. 5. Piper diagram using major cation and anion composition of water samples in this study site. The red dots and the blue dot represent the mean of groundwaters and the surface water, respectively.

우스 내부의 복사열이 천부지하수의 수온상승에 일부 영향을 미쳤을 수 있다고 여겨진다. 연구 지역의 물 시료는 Ca-HCO₃ 유형부터 Ca-Mg-Cl-SO₄ 유형 사이에 분포하며 음이온의 조성이 연구지역 수질유형을 결정하는데 중요한 역할을 하고 있다(Fig. 5). 지표수가 천부지하수와 유사한 이온조성을 가진다는 점에서 연구지역 지표수와 지하수의 상관성이 높을 것으로 생각되며, 특히 Ca-Mg-Cl-SO₄ 유형의 시료는 강수의 영향을 받은 지하수 혹은 새롭게 함양된 지하수(fresh recharged water) 성분이 반영된 증거로 해석된다(Nazzal et al., 2014). 이에 비해 JB-6은 연

구대상지에서 가장 깊은 심부지하수로서(굴착심도 100 m) 양이온 가운데 Na와 HCO₃의 비율이 상대적으로 높게 나타나는 것이 관찰된다.

Fig. 6에 도시된 것과 같이, 파이차트는 주이온성분(Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄, HCO₃)의 상대적인 함량과 총용존고형물(Total dissolved solids, TDS) 값을 비교하는데 유용하게 사용된다(Abu-alnaeem et al., 2018). 연구지역에서 가장 높은 총용존고형물 농도를 보이는 지점은 JB-7로, 마을에 위치한 17 m 심도의 천부지하수이다. 심부지하수 관정인 JB-6은 Na와 HCO₃성분이 파이에서 상대적으로 높은 비율을 차지하나, 총용존고형물 함량은 240 mg/L로 마을의 지하수(JB-7)에 비해 낮게 나타난다(Table 2). 이에 비해 지표수는 가장 낮은 총용존고형물 농도를 보이며, 이는 주변의 생활하수 및 농업용지로부터 액비 등이 하천으로 유입되지 않도록 잘 관리되고 있는 것으로 여겨진다.

4.2. 지하수의 수질결정 기작과 함양특성

김스다이어그램은 지하수의 수리화학특성을 결정하는 주된 인자가 어떤 기작인지 보여주는 간단한 그림으로, 양이온과 음이온에 대한 두 개의 세미로그 다이어그램(TDS와 Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺), TDS와 Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻))위에 시료를 도시한다(Gibbs, 1970). 김스다이어그램을 통해 판단할 수 있는 주된 수질결정인자는 증발영향, 물-암석반응, 강수에 의한 희석이 있다. 연구지역의 수리화학은 주로 기반암과의 반응에 의해 결정되는 것으로 보이며, 강수 구간에 일부 시료가 도시되는 것을 통해 광물로부터 용출된 이온성분들이 강수에 의해 희석되었을 것으로 판단된다(Fig. 7).

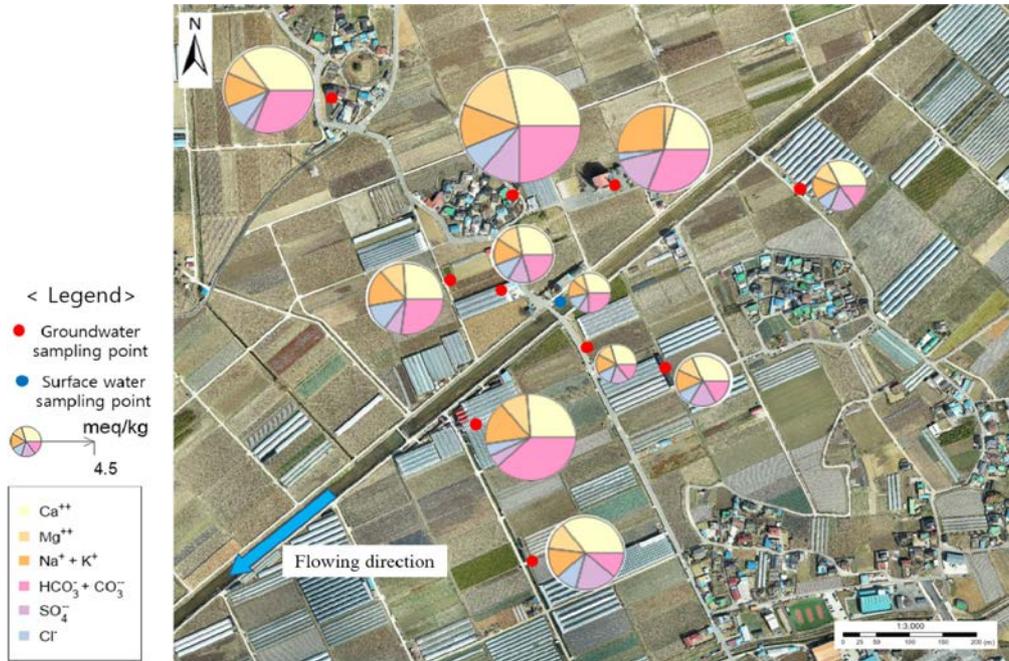


Fig. 6. Distribution map of Pie chart on the major ions and TDS in the study site.

Table 2. Measured values of DO (Dissolved oxygen), turbidity, and KMnO₄ oxidation and calculated values of TDS (Total dissolved solids), TH (Total hardness), Na% (sodium percentage), SAR (Sodium absorption ratio), and Kelly ratio for each sample

ID	Suitability factors for drinking water				Suitability factors for agricultural water			
	DO mg/L	Turbidity NTU	KMnO ₄ oxidation mg/L	TDS mg/L	TH mg/L	Na%	SAR	KR
JB-1	9.78	2.26	0.6	110	47.7	36.6	0.415	0.301
JB-2	8.74	0.07	1.9	147	65.4	33.4	0.450	0.279
JB-3	5.65	0.02	1.4	163	71.3	35.8	0.488	0.289
JB-4	7.83	0.02	0.6	262	102	37.9	0.851	0.422
JB-5	7.43	0.16	2.3	135	61.9	32.9	0.449	0.286
JB-6	2.06	0.39	1.9	240	66.9	57.5	1.74	1.07
JB-7	2.37	0.02	7.4	323	149	28.3	0.598	0.245
JB-8	6.4	0.02	0.4	252	106	28.0	0.568	0.277
JB-9	9.85	0.02	0.9	174	84.4	28.9	0.396	0.216
JB-10	5.94	1.68	7.5	193	70.8	40.4	0.683	0.407
JB-11	11.51	0.46	2.9	100	48.0	35.4	0.422	0.305

연구지역의 지하수와 지표수는 순환수선(Global Meteoric Water Line, GMWL)상에 도시되어 순환수의 특성을 보여준다(Craig, 1961). 한국의 지역순환수선(Local Meteoric Water Line, LMWL)을 함께 도시하였을 때(Lee and Lee, 1999), 연구 지역의 지하수는 주로 여름의 강수에 의해 함양되는 것으로 보인다. Fig. 8에 도시한 각 순환수선 식은 다음과 같다.

$$GMWL \delta^2H = 8 \cdot \delta^{18}O + 10 \quad (1)$$

$$LMWL (Summer) \delta^2H = 7.93 \cdot \delta^{18}O + 8.11 \quad (2)$$

$$LMWL (Winter) \delta^2H = 7.79 \cdot \delta^{18}O + 18.39 \quad (3)$$

천부대수층의 지하수는 함양원이 가깝고, 흑한기와 혹서기를 제외하고 농업용수로서 지하수의 소비가 활발하여 빠른 순환특성을 가지는 것으로 생각된다. 연구지역 지표수의 증발산은 산소-수소 동위원소 조성에서 크게 보이지 않으며, 이는 시료채취 시기(3월)의 기온이 상대적으로 낮아 증발산이 약하거나 거의 일어나지 않기 때문으로 생각

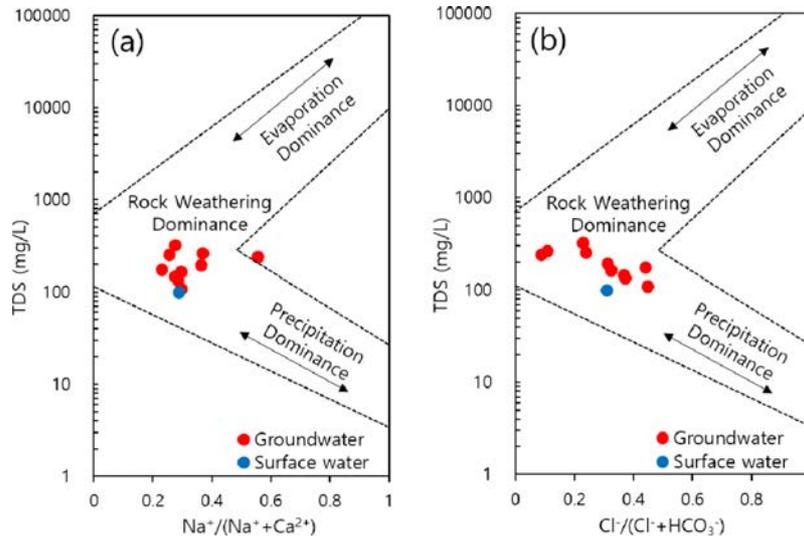


Fig. 7. Gibbs diagrams present controlling processes among the hydrochemistry of rock, precipitation, and evaporation (Gibbs, 1970).

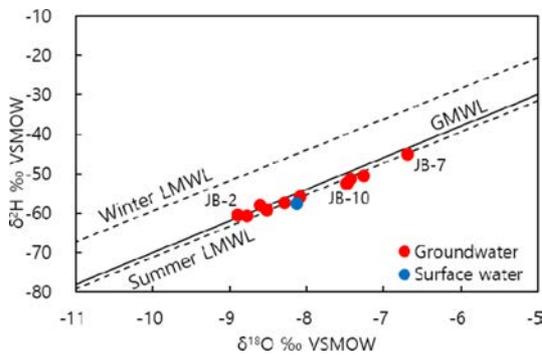


Fig. 8. The oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) and hydrogen ($\delta^2\text{H}$) isotope pairs of water samples in the study site as compared to the global meteoric water line (GMWL) and local meteoric water line (LMWL). The GMWL and LMWL data refer to Craig (1961) and Lee and Lee (1999), respectively.

된다. 지표수와 양안의 지하수는 이온성분 조성 및 동위원소 조성이 비슷함을 통해, 시료채취가 이루어진 갈수기 기간 동안 지표수의 많은 부분이 기저유출을 통해 유지되고 있는 것(이득하천)으로 판단된다.

4.3. 연구지역 물 시료의 용도별 적합성 파악

앞서 언급한 것처럼, 연구지역의 지하수는 대부분 생활용수 및 농업용수로 활용되고 있으므로 지하수 및 지표수의 수질인자가 활용목적에 부합하는지 판단하고자 하였다. 지하수 수질특성 평가를 위해 한국의 먹는물 수질기준 가운데 일부 항목인 건강상 유해영향 무기물질(불소 및 질산성질소)과 심미적 수질기준(과망간산칼륨소비량, 염소이온, 탁도)과 농업용수 적합도 평가인자(경도 및 치환성양

이온 조성)를 활용하였다(Table 2).

천부대수층의 지하수는 전반적으로 저농도 F^- 성분을 함유하지만(Chae et al., 2007), 심부관정 지하수(JB-6)에서 먹는물 기준치인 1.5 mg/L를 넘어서는 고농도 F가 관측되었다. 이 관정의 외부적인 오염인자에 관하여는 추가적인 심부관정 조사를 통해 자연적 용출여부에 대한 판단이 필요할 것으로 여겨진다. 연구지역 11개 지점에서 질산성질소의 먹는물 수질기준치(10 mg/L의 $\text{NO}_3\text{-N}$, 약 44.3 mg/L의 NO_3^-)를 넘어서는 시료는 없었으나, JB-7과 9지점에서 각각 40.9 mg/L 42.7 mg/L로 상당히 높은 농도로 관측되었다(Table 1). 특히 JB-9지점은 발작물 재배지 인근에서 채수한 지하수로, 농번기에 살포한 비료의 영향으로 연구지역에서 가장 높은 NO_3^- 값이 관측된 것으로 판단된다.

심미적 수질기준에서 과망간산칼륨(KMnO_4)소비량은 지하수에 용존하는 유기물 및 Fe^{2+} , SO_3^{2-} , NO_2^- 등의 무기물이 과망간산칼륨을 소비하는 양으로서, 토양 중의 휴믹물질(낙엽 혹은 동식물의 사체에서 발생)을 다량 함유한 물과 하수, 그리고 공장배수 등이 유입된 경우 소비량이 증가한다(Krupińska, 2020). 먹는물 수질기준에서는 과망간산칼륨소비량이 10 ppm 이내로 나타나야 하는데, 연구지역에서는 JB-7과 10지점이 기준치를 벗어나는 것으로 측정되었다(Fig. 9). JB-7지점은 NO_3^- 농도도 높게 나타나 인근 생활하수의 혼입을 의심해야 할 것으로 여겨진다. JB-10지점은 토끼와 닭 등의 가축을 키우고 있어 가축분뇨 등이 유기물질 오염원으로 작용하였을 것으로 여겨진다. 탁도에서도 JB-10 지점은 기준치를 넘어서는 것

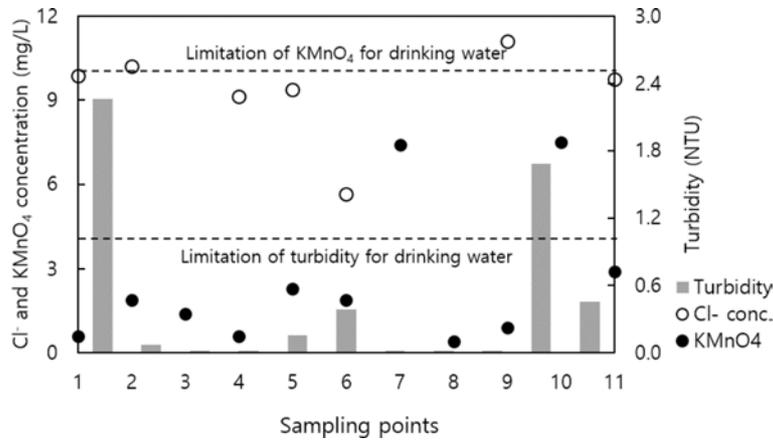


Fig. 9. Potential health risks due to aesthetic influential material (turbidity, Cl⁻ concentration, and KMnO₄ oxidation) through drinking water.

(1 NTU 이내)으로 관측되었다. 추가적으로 JB-1지점에서도 높은 탁도가 관찰되었는데 이는 테스트베드 지점으로, 모니터링 3일 전 시추한 영향 때문에 일시적으로 탁도가 높아진 것으로 생각된다. 음용수로 사용할 경우 물맛에 영향을 미치는 Cl⁻의 농도는 기준치 250 mg/L에 비해 매우 낮게 나타나 순환수의 특성이 반영된 담수임을 알 수 있다(Fig. 9).

연구지역 물 시료가 농업용수 용도로서 적합한지를 판단하기 위해 이 논문에서는 총경도(Total Hardness as CaCO₃, TH; Todd and Mays, 2004), 나트륨 백분율(Sodium percentage, Na%; Todd and Mays, 2004), 나트륨 흡착비(Sodium Adsorption Ratio, SAR; Allison et al., 1954), 켈리비율(Kelly Ratio, KR; Kelley, 1963)을 사용하여 계산하였고 각각의 식은 아래와 같다. 계산에 사용된 이온농도는 meq/L 단위로 환산하였으며, 총경도만 mg/L단위를 사용하였다.

$$TH = 2.5Ca^{2+} + 4.1Mg^{2+} \tag{4}$$

$$Na\% = 100 \cdot [(Na^+ + K^+) / (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+)] \tag{5}$$

$$SAR = Na^+ / \left(\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}} \right) \tag{6}$$

$$KR = Na^+ / (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \tag{7}$$

위의 식에서 계산된 결과는 Table 2에 정리하였다. 총경도값은 150 mg/L 이내로 나타나 연수 및 약한 경수 범위를 가진다고 판단되며, 지하수의 활용으로 인한 급수시설 내 탄산염 포화도 역시 상대적으로 낮은 편으로 해석된다. 나트륨 흡착비도 국내에서는 SAR기준 26 이내의

경우 농업용수로 활용 가능한데, 연구지역의 물 시료는 10보다 낮은 값을 가져 모든 물 시료는 매우 우수(excellent)하다고 판단된다(Tolera et al., 2020). 켈리비율은 대부분의 관정에서 1 이내의 값을 가져 농업용수로 활용하기에 적절한 수준으로 해석되나, JB-6의 심부관정에서 1 이상의 값을 가져 제한된 활용이 권장된다. 이는 나트륨 백분율에서도 JB-6관정이 50% 이상의 값을 가짐을 통해 토양과의 양이온치환에 의한 토양생산성감소와 농작물 생장저해요소로 작용할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 연구지역의 지표수 및 천부지하수는 농업용수로서 우수한 특성을 지닌 것으로 판단된다.

4.4. 대수층 계간 축열시스템 가동에 따른 광물포화도 변화

지열지하수는 온도-압력-용존탄소의 증감에 의한 광물의 침전-용해기작이 민감하게 이뤄지며 수체의 부식성 여부는 지열지하수 시스템의 수명에도 영향을 미친다. 따라서 이 파트에서는 ATEs 시스템의 가동에 의해 지하수의 수온이 변화한다면, 용존무기물질에 의하여 시스템에 형성될 수 있는 스케일링(Scaling)의 종류와 가능성에 관하여 토의하고자 한다. 이 연구에서는 PHREEQC를 사용하여 형성 가능한 미네랄들의 포화도(Saturation index, SI)를 아래식과 같이 계산하였고(Parkhurst and Appelo, 1999), 결과는 Fig. 10에 나타냈다.

$$SI = \text{Log} (IAP / K_{sp}) \tag{8}$$

위 식의 IAP는 수용액에서 이온화가 가능한 화학종에 대한 이온활동도곱(Ion activity product)이며, K_{sp} 값은 주어진 온도에서 각 광물의 평형 용해도곱 값을 의미한다. 포화도가 0 이상인 경우 미네랄의 침전이 일어날 수 있으

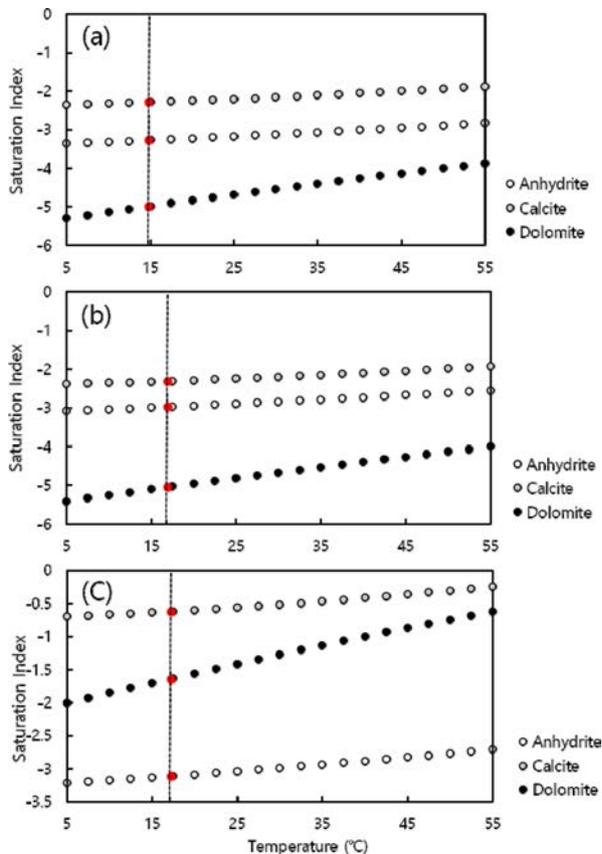


Fig. 10. Saturation index (SI) of JB-1 (a), JB-2 (b), and JB-4 (c) sites with respect to anhydrite, calcite, and dolomite. The dotted line and red dot show an initial sampling temperature and saturation index for initial water at each sampling site, respectively.

나, 0인 경우 평형을 이루며, 0보다 낮은 경우 미네랄의 용해가 일어난다.

예측 관정은 테스트 베드에서 가까운 지점의 지하수(JB-1, 2, 4)를 대상으로 모델링 하였으며, 온도상승 범위는 동계와 하계조건 및 시스템의 가동으로 대수층에 장기간 축열될 가능성을 고려하여 5°C부터 55°C 사이로 모사하였다. 하천 맞은편의 시료채취 지점은 하천이 배리어 역할을 하여 온도 변화가 크게 반영되지 않을 것으로 여겨져 이 모델에 넣지 않았다. 온도의 상승에 따른 주요 양음이온의 구성은 큰 차이를 보이지 않았으며, Fig. 10에서 침전가능한 탄산염 및 황산염 광물의 포화도는 모두 온도상승과 비례하게 상승하는 것을 관찰할 수 있다. 또한 천부 대수층의 지하수는 철과 망간 이온성분이 계층한계(Below Detection Limit, BDL) 이내의 미량으로 존재하여 망간-철산화물이 침전될 가능성이 낮은 것으로 계산되었다.

다만, Fig. 10(c)에 나타난 것처럼 JB-4 지점의 지하수가 ATES 시스템의 가동 및 온실에 의한 지온상승이 반

영되어 매우 낮은 가능성이지만 지하수온이 55°C 이상으로 올라간다면, 탄산염 광물이 침전될 수도 있을 것으로 보인다. 한편, 겨울에 난방을 하는 경우에는, 지하수의 온도가 현재(Fig. 10의 점선)보다 더 낮아지며 탄산염 및 황산염 광물의 포화도는 현재(Fig. 10의 빨간 점)보다 더욱 낮아질 것으로 여겨진다. 그림에는 나타내지 않았으나, 증발잔류물인 암염(Halite)의 포화도는 매우 낮고(SI가 -8.74에서 -8.70 사이) 온도의 변동에도 일정하게 유지되는 것으로 계산되어, ATES 시스템 연구를 진행하여도 연구지역 지하수 염 농도의 상승과 같은 수질악화현상은 거의 일어나지 않을 것으로 판단된다.

5. 결 론

연구지역은 구릉 및 평지지형을 가지는 충적평야로서 연중 활발한 농작물 생산이 이뤄져 농업 및 생활용수로서 지하수 의존도가 높다. 원주군의 주요 소득 작물인 화훼류는 안정적인 온도유지가 필수적으로 요구되기 때문에, 테스트 베드에 대수층 계간 축열(ATES)시스템을 설치하여 지열지하수를 활용하고자 한다. 이 연구에서는 ATES 시스템을 설치하기 전 연구지역의 지하수 수질특성과 활용용도로서의 적합성, 그리고 시스템 가동에 따른 대수층 수온변화에 따른 광물포화도 변화를 알아보하고자 하였다. 연구지역의 지하수는 대부분 강수에 의해 함양되었으며 물-암석 반응이 주된 수리화학 결정인자로서 작용하였다. 또한 천부지하수의 경우 음용으로는 일부 항목에서 적합성이 떨어지지만, 농업용수로 사용하기에는 적합하다. ATES 시스템 영향반경 내의 관정에서 수온변화로 인해 망간-철 산화물, 탄산염과 황산염 침전물이 생성되거나 수질저하가 나타날 가능성은 매우 낮은 것으로 여겨진다. 따라서 연구지역의 지하수는 농업생산성 증진을 위해 ATES 시스템을 적용하기에 적합한 부지로 판단된다.

사 사

이 연구는 농업축산식품부의 농업기술평가원 농업에너지 자립형 산업모델 기술개발사업의 하나인 융복합 에너지 생산저장관리 및 실증모델 구축 과제(대수층 계간 축열을 위한 최적지 지질조사 및 대수층 평가, 과제번호: IPET120097032HD020)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. 연구지역 지질특성에 조언을 나눠 주신 한국지질자원연구원 국토지질연구본부 이호일 박사님과, 시료채취를 도와주신 지질환경연구본부 김성균 박사님, 지하수 함

양량 계산을 함께 고민하여 준 안효원 학생에게 감사드립니다.

References

- Abu-Alnaeem, M.F., Yusoff, I., Ng, T.F., Alias, Y., and Raksmeay, M., 2018, Assessment of groundwater salinity and quality in Gaza coastal aquifer, Gaza Strip, Palestine: An integrated statistical, geostatistical and hydrogeochemical approaches study, *Sci. Total Environ.*, **615**, 972-989.
- Allison, L.E., Bernstein, L., Bower, C.A., Brown, J.W., Fireman, M., Hatcher, J.T., Hayward, H.E., Pearson, G.A., Reeve, R.C., Richards, L.A., and Wilcox, L.V., 1954, *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.* (Ed. L. A. Richards.), US Government Printing Office, Washington D.C., USA.
- Bloemendal, M. and Olsthoorn, T., 2018, ATEs systems in aquifers with high ambient groundwater flow velocity, *Geothermics*, **75**, 81-92.
- Bloemendal, M., Olsthoorn, T., and van de Ven, F., 2015, Combining climatic and geo-hydrological preconditions as a method to determine world potential for aquifer thermal energy storage, *Sci. Total Environ.*, **538**, 621-633.
- Chae, G.T., Yun, S.T., Mayer, B., Kim, K.H., Kim, S.Y., Kwon, J.S., Kim, K., and Koh, Y.K., 2007, Fluorine geochemistry in bedrock groundwater of South Korea, *Sci. Total Environ.*, **385**(1-3), 272-283.
- Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric waters, *Science*, **133**(3465), 1702-1703.
- Gibbs, R.J., 1970, Mechanisms controlling world water chemistry, *Science*, **170**(3962), 1088-1090.
- GIMS (National Groundwater Information Management and Service Center), Daejeon, Korea. 2021, Statistics in Groundwater in Korea, Available online: http://www.gims.go.kr/en/gims_start.do (Cited 3 May 2021).
- Hong, M.S., Yun, S., and Gil, Y.J., 1969, *Geological Report of the Samye Sheet (1:50,000)*, Geological Survey of Korea, 32p.
- Hwang, S.I., Park, C.S., and Yoon, S.O., 2009, Weathering properties and provenance of loess-paleosol sequence deposited on river terrace in the bongdong area, Wanju-gun, Jeonbuk province, *J. Geol. Soc.*, **44**(4), 463-480.
- Jeong, S.N., 2009, Installation trend of new and renewable energy geothermal facilities introduced in public obligatory system, *Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng.*, **38**(1), 13-17.
- Jeong, S.Y., 2020, An Experimental Study on the Performance of Heat Pump Unit Using Geothermal Heat for New Renewable Energy, *Trans. Korean Hydrog. New Energy Soc.*, **31**(6), 630-636.
- Jo, H.R., 1987, *Alluvial plain in Korea*, Gyohakyeonkusa, Seoul, Korea.
- Jo, S. and Kim, H.J., 2020, Study on the new renewable energy output of geothermal cooling and heating system for collective residential facilities, *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.*, **57**(6), 593-599.
- Kalaiselvam, S. and Parameshwaran, R., 2014, *Thermal energy storage technologies for sustainability: systems design, assessment and applications*, Elsevier, San Diego, USA.
- Kelley, W.P., 1963, Use of Saline Irrigation Water, *Soil Sci.*, **95**(6), 385-391.
- Kim, W. and Kim, Y.K., 2019, Optimal operation methods of the seasonal solar borehole thermal energy storage system for heating of a greenhouse, *J. Korea Acad. Industr. Coop. Soc.*, **20**(1), 28-34.
- KMA (Korea Meteorological Administration), Seoul, Korea. Available online: https://www.weather.go.kr/weather/climate/past_cal.jsp (Cited 3 May 2021).
- Krupińska, I., 2020, Impact of the oxidant type on the efficiency of the oxidation and removal of iron compounds from groundwater containing humic substances, *Molecules*, **25**(15), 3380.
- Lee, K.S. and Lee, C.B., 1999, Oxygen and hydrogen isotope composition of precipitation and river waters South Korea, *J. Geol. Soc. Korea*, **35**(1), 73-84.
- Li, Q., 2014, *Optimal use of the subsurface for ATEs systems in busy areas*, PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
- Ministry of EnvironmentSejong, Korea. Drinking Water Management Act; Ministry of Environment: Sejong, Korea, 2021, Available online: <http://law.go.kr/engLsSc.do?menuId=0&subMenu=5&query=#AJAX> (Cited 3 May 2021).
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), 2017, *National Groundwater Management Plan in Korea (2017~2026)*, Sejong, Korea.
- Mohanty, M., 2012, New renewable energy sources, green energy development and climate change: Implications to Pacific Island countries, *Manag. Environ. Qual.*, **23**(3), 264-274.
- Nazzal, Y., Ahmed, I., Al-Arifi, N.S., Ghrefat, H., Zaidi, F.K., El-Waheidi, M.M., Batayneh, A., and Zumlot, T., 2014, A pragmatic approach to study the groundwater quality suitability for domestic and agricultural usage, Saq aquifer, northwest of Saudi Arabia, *Environ. Monit. Assess.*, **186**(8), 4655-4667.
- Nielsen, J.E. and Sørensen, P.A., 2016, Renewable district heating and cooling technologies with and without seasonal storage, *Renewable Heating and Cooling*, Woodhead Publishing, Cambridge, UK.
- Owusu, P.A. and Asumadu-Sarkodie, S., 2016, A review of

- renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation, *Cogent. Eng.*, **3**(1), 1167990.
- Park, Y., Kwon, K.S., Kim, N., Lee, J.Y., and Yoon, J.G., 2013, Change of geochemical properties of groundwater by use of open loop geothermal cooling and heating system. *J. Geol. Soc. Korea*, **49**(2), 289-296.
- Park, Y., Mok, J.K., Jang, B.J., Lee, J.Y., and Park, Y.C., 2015, Influence of closed loop ground source heat pumps on groundwater: a case study. *J. Geol. Soc. Korea*, **51**(2), 243-251.
- Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J., 1999, *User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*, Water-Resour. Invest. Rep., **99**(4259), 312p.
- Possemiers, M., Huysmans, M., and Batelaan, O., 2014, Influence of aquifer thermal energy storage on groundwater quality: A review illustrated by seven case studies from Belgium. *J. Hydrol. Reg. Stud.*, **2**, 20-34.
- Shin, J.S., Park, J.W., and Kim, S.H., 2020, Measurement and verification of integrated ground source heat pumps on a shared ground loop, *Energies*, **13**(7), 1752.
- Todd, D.K. and Mays, L.W., 2004, *Groundwater Hydrology (3rd edition)*, John Wiley & Sons., Massachusetts, USA.
- Todorov, O., Alanne, K., Virtanen, M., and Kosonen, R., 2020, A method and analysis of aquifer thermal energy storage (ATES) system for district heating and cooling: A case study in Finland, *Sustain. Cities. Soc.*, **53**, 101977.
- Tolera, M.B., Choi, H., Chang, S.W., and Chung, I.M., 2020, Groundwater quality evaluation for different uses in the lower Ketar Watershed, Ethiopia, *Environ. Geochem. Health*, **42**(10), 3059-3078.