

만경-동진강 유역 지하수의 화학적 특성에 대한 농업용수 측면의 예비적 평가

최한나 · 권홍일 · 윤윤열 · 김용철 · 고동찬*

한국지질자원연구원

A Preliminary Assessment of Groundwater Chemistry for Agricultural Water Supply in the Mangyeong-Dongjin Watershed

Hanna Choi · Hong-Il Kwon · Yoon-Yeol Yoon · Yongcheol Kim · Dong-Chan Koh*

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

ABSTRACT

We investigated hydrochemical and stable isotope characteristics of groundwater in a large agricultural plain, the Honam plain, to evaluate the adequacy of agricultural water supply. For preliminary assessment for the area, we collected 23 groundwater samples from domestic wells and conducted hydrochemical and water stable isotope analysis. Groundwater in the study area is mainly Ca-HCO₃ type resulting from water-rock interactions. Stable oxygen and hydrogen isotopic compositions indicated that recharge water is derived from precipitation while some sampling sites had evaporation signatures. Irrigation water quality using sodium absorption ratio and salinity hazard showed most of the groundwater samples were found to be suitable for irrigation. The groundwater in the southwestern part of the study area was affected by both seawater intrusion and agricultural activities, indicating a higher possibility of groundwater contamination near the coastal areas. Elevated concentrations of nitrate and phosphate ions in the groundwater are considered to be influenced by anthropogenic activities such as fertilizer application. It is expected that this study would be able to provide preliminary information on groundwater quality for agricultural water supply in the Mangyeong-Dongjin watershed.

Key words : Agricultural water supply, Water-rock interaction, Evaporation signature, Seawater intrusion

1. 서 론

기후변화로 인한 홍수 및 가뭄발생 빈도의 증가는 사용 가능한 수자원의 감소로 이어져 체계적인 수자원 활용계획과 관리의 필요성이 높아지고 있다(Woodward et al., 2014; Wheater and Gober, 2015). 강수에 직접적으로 영향을 받는 지표수와 비교하여, 지하수는 수량이 안정적으로 유지되며 공간적으로 광범위하게 부존하므로 중-장기적 수자원의 공급계획에서 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 있다(Alley et al., 1999; Bates et al., 2008). 지

하수는 지표수에 비해 개발에 드는 시간이 짧고 저렴한 비용으로 안전하고 안정적인 수질의 용수를 얻을 수 있다는 장점이 있어, 특히 농업지역을 중심으로 이용 및 개발이 활발히 이어지는 추세이다(Kim, 2019). 2018년 한국의 전체지하수 이용량(2,914백만 m³/년) 가운데, 생활용과(1,229백만 m³/년) 농업용(1,485백만 m³/년)으로 활용된 지하수량은 전체의 약 94%에 해당한다(ME and K-water, 2019). 특히, 2011년부터 2018년 사이의 지하수 사용량 통계에 의하면 전북지역 농업용수의 사용량이 전국에서 가장 높으며(GIMS, 2021), 이 지역에는 국내 주요 곡창지대로 알려진 호남평야가 위치하고 있다.

호남평야는 만경강과 동진강 유역에 위치한 국내 최대의 평야지대로서, 면적이 약 3,500 km²에 달하며 한국 전체 면적의 30% 정도를 차지한다(Hwang et al., 2012). 호남평야는 지리적으로 독립수계인 만경강, 동진강 권역과 서해로 직접 유입되는 기타권역(주진천, 직소천)으로 중권역 수계가 나누어진다. 금강, 만경강, 동진강 등의

주저자: 최한나, 선임연구원
 공저자: 권홍일, 박사과정연구원; 윤윤열, 책임연구원; 김용철, 책임연구원
 *교신저자: 고동찬, 책임연구원
 Email: chankoh@kigam.re.kr

Received : 2021. 02. 05 Reviewed : 2021. 02. 06
 Accepted : 2020. 02. 19 Discussion until : 2021. 04. 30

하천이 흘러 지표수가 풍부하지만, 농업활동이 많은 시기에는 관개용수 공급량을 충족하기에 부족하여 삼국시대부터 농업용 저수지를 축조하여 활용하였다고 전해진다. 벽골제(김제)와 황등제(황등), 눌제(정읍) 등의 저수지는 오래전부터 이 지역에서 활발한 농업활동이 이어졌음을 보여준다(Min and Kim, 1997).

호남평야를 이루는 서해안의 조석평야(潮汐平野)는 갯벌이 넓게 발달되어 있으며, 군산-부안에 이르는 지역을 33.9 km의 방조제로 연결하는 새만금간척사업으로 개발하여 간척지의 약 32%가 농생명 용지로 활용될 예정이다(Hwang et al., 2012; Choi et al., 2013; SDIA 2021). 그러나 방조제가 설치되었어도 해안의 지하수는 해수와 연결되어 있으며, 호남평야 지역의 조석에 따른 지하수 수위 및 전기전도도의 변화는 여러 연구자들에 의해 보고되고 있다(Song et al., 2007; Yang et al., 2011; Ju and Yeo, 2017). 특히 봄과 여름 사이에 걸쳐 활발한 농업활동이 이루어지면, 해수면 상승 혹은 강수와 관계없이 해수침투가 발생하여 지하수 수질을 저하시킨다. 호남평야 지역은 관개용수로서 지표수 뿐 아니라 지하수 의존도도 높아, 지하수 수질이 농작물 생산량과 직접적으로 연관되기 때문에 연구지역 지하수의 수화학적 특성을 파악하는 것은 중요하다. 농업시설이 밀집하여 매년 대량의 비료를 살포하고 있어 지하수 내 질소, 인, 칼륨의 오염가능성이 높으며 해안과 맞닿아 있어 나트륨의 오염 가능성 역시 존재한다. 따라서 이 연구에서는 농업용으로 사용되고 있는 관정들을 활용하여 분석을 실시하였고, 연구지역의 수

질특성을 공간적으로 평가하였다. 이를 통해 연구지역의 주된 용도인 농업용수로서 지하수의 수질적합성을 선행적으로 판단하고자 한다.

2. 연구지역 현황 및 연구 내용

연구지역은 한국 남서부의 호남평야 일대이며 해안과 맞닿아 있는 군산, 김제, 부안과 내륙에 위치한 익산, 전주, 완주, 정읍의 7개 시군을 아울러(35.495~36.126°N, 126.625~127.250°E) 약 3,595 km²의 면적을 가진다(Fig. 1). 연구지역의 동쪽으로는 노령산맥이 위치하여 덕유산과 마이산이 지형경계를 이루고, 서쪽경계로는 서해가 위치하여 동고서저의 지형을 이룬다. 북쪽으로 금강이 흘러 유역경계를 나누고, 남쪽으로는 노령산맥을 따라 전남과 전북이 구분되어 수계유역이 명확하게 구분되는 특성을 가진다. 연구대상 관정의 위치, 심도, 토지이용 현황 및 관정반경 500 m 이내 거리에 위치한 잠재적 오염원을 Table 1에 정리하였다.

연구지역의 일반지질은 Fig. 2와 같이 나타나며 이 연구에서는 9개의 수문지질 단위(결정질 편마암류, 백악기 화강암, 트라이아스기와 쥐라기 화강암, 미고결 쇄설성 퇴적층, 퇴적구조가 보존된 변성퇴적암, 퇴적구조가 보존되지 않은 변성퇴적암, 비다공질 화산암, 쇄설성퇴적암, 탄산염암)로 구분하여 제시하였다(KIGAM, 2020). 군산시와 익산시는 원생대 편마암과 이를 편입한 중생대 화강암류 저반이 발달해 있으며, 부안군과 완주군은 변성암과 화강

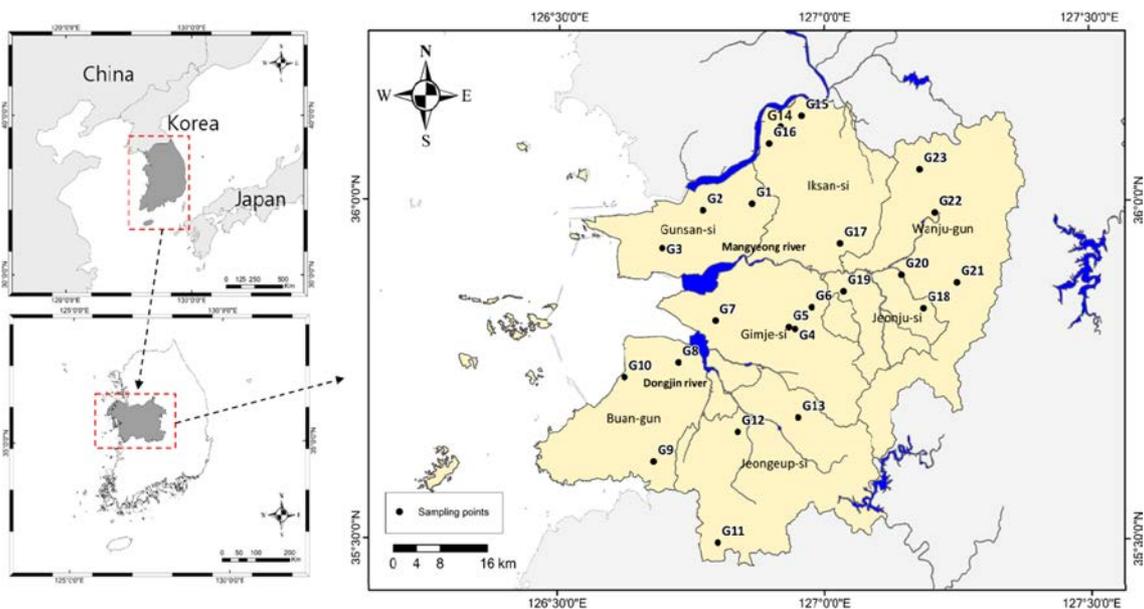


Fig. 1. Location map of the study area and sampling points.

Table 1. Well location, land use, and potential contamination source within 500 m radius of the sampling spots in the study area

ID	Well		Location (decimal degree)		Address	Major land use	Potential contamination source
	Altitude m, amsl	Depth m, bgl	Latitude	Longitude			
G1	17	92	35.99575	126.86408	Maryong-ri, Seosu-myeon, Gunsan-si	Rice paddy	Cultivation, Poultry farm
G2	7	82	35.98598	126.77220	Gobong-ri, Seongsan-myeon, Gunsan-si	Rice paddy	Cultivation
G3	5	100	35.92992	126.69542	Okjeong-ri, Okgu-eup, Gunsan-si	Rice paddy	Cultivation
G4	19	100	35.81094	126.94558	Baekhak-dong, Gimje-si	Dry farmland	Cultivation
G5	23	100	35.81369	126.93367	Sun-dong, Gimje-si	Undeveloped	Cultivation
G6	17	100	35.84306	126.97672	Sinjeong-ri, Yongji-myeon, Gimje-si	Dry farmland	Cultivation
G7	9	30	35.82312	126.79585	Seongdeok-ri, Seongdeok-myeon, Gimje-si	Dry farmland	Cultivation
G8	5	120	35.76119	126.72631	Jeungsan-ri, Dongjin-myeon, Buan-gun	Rice paddy	Cultivation
G9	27	150	35.61487	126.68023	Yeongjeon-ri, Boan-myeon, Buan-gun	Dry farmland	Cultivation
G10	10	100	35.73932	126.62525	Jangsin-ri, Haseo-myeon, Buan-gun	Residential area	Domestic waste
G11	71	150	35.49530	126.80118	Habu-ri, Ibam-myeon, Jeongeup-si	Dry farmland	Cultivation
G12	13	80	35.65892	126.83808	Duji-ri, Ipyeong-myeon, Jeongeup-si	Rice paddy	Cultivation
G13	37	120	35.68027	126.95143	Jeungsan-ri, Taerin-myeon, Jeongeup-si	Dry farmland	Cultivation
G14	17	100	36.10964	126.91839	Dudong-ri, Seongdang-myeon, Iksan-si	Dry farmland	Cultivation
G15	13	105	36.12568	126.95763	Jungsin-ri, Yongan-myeon, Iksan-si	Rice paddy	Cultivation
G16	10	100	36.08459	126.89634	Songcheon-ri, Ungpo-myeon, Iksan-si	Rice paddy	Cultivation
G17	17	110	35.93726	127.03013	Osan-ri, Chunpo-myeon, Iksan-si	Dry farmland	Cultivation
G18	56	100	35.84147	127.18666	Geumsang-dong, Deokjin-gu, Jeonju-si	Residential area	Domestic waste
G19	22	170	35.86653	127.03655	Won-dong, Deokjin-gu, Jeonju-si	Dry farmland	Cultivation
G20	21	150	35.89090	127.14542	Hyosung-dong, Deokjin-gu, Jeonju-si	Rice paddy	Cultivation
G21	137	83	35.87961	127.25001	Daeheung-ri, Soyang-myeon, Wanju-gun	Residential area	Cultivation
G22	55	51	35.98272	127.20867	Seobong-ri, Gosan-myeon, Wanju-gun	Dry farmland	Cultivation
G23	112	65	36.04660	127.18009	Uwol-ri, Hwasan-myeon, Wanju-gun	Dry farmland	Cultivation

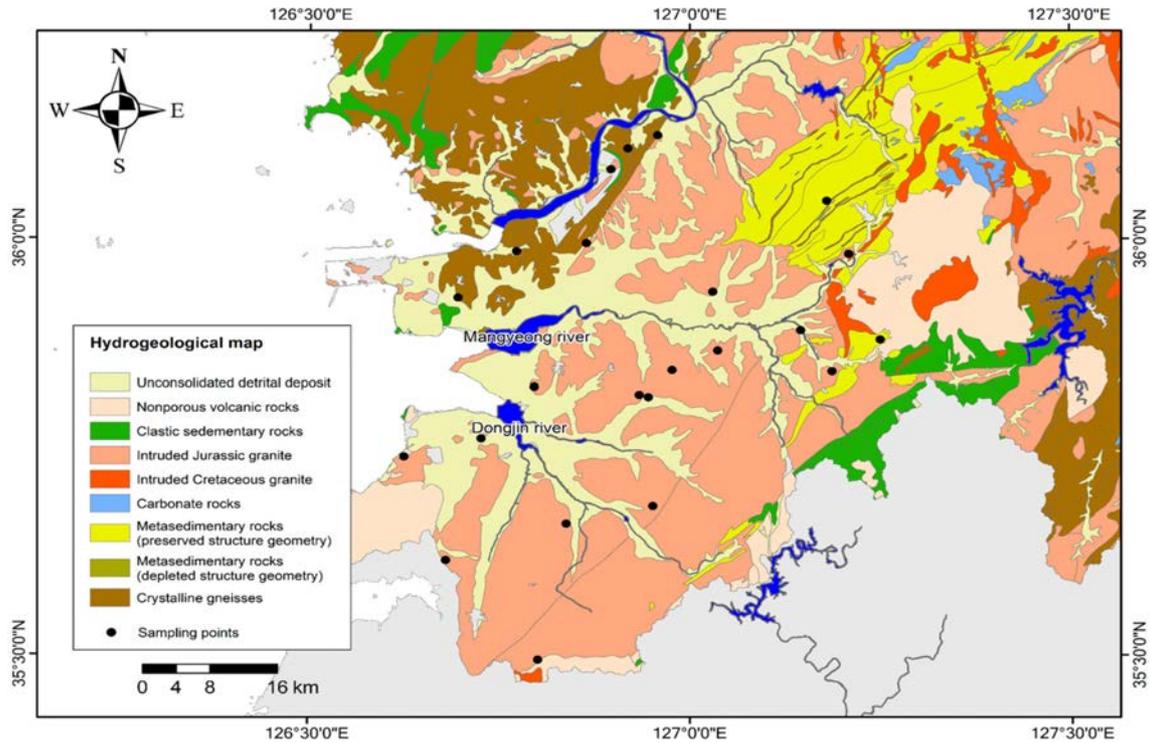


Fig. 2. Hydrogeological map of study area and the unit classified nine categories in this map. The black dots mean sampling points of groundwater.

암 기반 위에 백악기 퇴적암과 화산암이 이를 관입 혹은 분출하는 복잡한 양상을 보인다. 전주시, 김제시, 정읍시는 길게 화강암 기반암이 위치하고 있으며 풍화된 화강암이 노년기 지형을 이루고 있다(Hong et al., 1969; Kim et al., 2012a; Kim et al., 2012b; Choi and Hwang, 2013; Song et al., 2013). 지평선이 존재하는 호남평야의 평탄한 지형특성은 화강암 기반암이 해수면 높이까지 침식이 이뤄진 후 신생대 4기 퇴적층이 넓게 축적되어 있기 때문에 밝혀진 바 있다(Kim et al., 2012b; Song et al., 2013). 만경강과 동진강 하류의 축적평야를 제외한 대부분 지역은 준평원 지형을 이루고 있으며, 군산시와 부안군 일대는 토탄과 식물화석이 부존하는 것으로 보고되어 과거 산림이나 잡초로 덮여 있었던 것으로 추정된다(Choi and Hwang, 2013).

연구지역에서 지하수 관정이 위치한 고도는 해발 5-150 m 사이로 해안평야와 구릉지에 해당하며, 연구대상 관정은 30-170 m 사이의 심도를 가진다. 2019년 10월 갈수기시기에 연구지역의 각 시군별로 3-4개의 지하수 샘플을 채취하여 총 23개 관정을 활용하여 기초적인 지하수 수질특성을 확인하고자 하였다. 현장에서의 수온, pH, EC(Electrical conductivity, 전기전도도)는 WTW Multi

3620 IDS set C를 이용하여 측정하였으며, 이온분석 및 알칼리도 측정을 위해 채수 즉시 0.45 μm 필터지에 걸러 농질산으로 전처리(양이온 샘플)하여 냉암소에 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. 지하수 샘플의 현장 측정값, 이온 분석값, 산소-수소 안정 동위원소 분석값은 Table 2과 같다.

3. 연구결과 및 토의

3.1. 지하수의 공간적 분포특성

지하수의 현장측정 값에서 수온은 14.6-17.2°C(평균 15.8°C, 표준편차 0.65°C), pH는 6.26-7.95(평균 6.83, 표준편차 0.47), EC가 203-1295 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 336 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 표준편차 231 $\mu\text{S}/\text{cm}$)로 분포한다. 이는 연구지역 지하수의 수온과 pH가 일정하게 유지되고 있으나 EC값은 샘플 채취 지역별로 큰 차이를 가지는 것을 보인다. 이는 연구지역이 해안에 위치한 농업지역으로 심부관정 지하수와 해수의 혼합이 일부 있기 때문으로 해석할 수 있으며, 천부

Table 2. Measured concentrations of major dissolved constituents and water stable isotopes

ID	T	pH	EC	Ca	Mg	Na	K	Sr	HCO ₃	F	Cl	NO ₃	SO ₄	SiO ₂	δ ¹⁸ O	δD	
	°C	-	μS/cm	mg/L													‰
G1	15.3	6.26	203	11.0	3.41	10.1	1.88	0.141	37.6	*ND	19.3	14.2	3.29	22.3	-7.64	-51.4	
G2	15.2	7.53	321	20.5	9.16	13.8	2.44	0.301	104	0.550	26.0	7.94	2.87	22.1	-7.73	-51.4	
G3	15.3	7.66	192	13.5	4.62	10.2	0.73	0.126	67.6	ND	12.5	ND	8.17	21.6	-8.09	-53.8	
G4	16.1	6.46	498	35.1	8.94	31.8	3.12	0.765	33.2	1.06	62.1	122	1.78	44.7	-7.59	-51.6	
G5	15.9	6.88	154	12.7	2.44	11.0	1.06	0.144	52.5	ND	14.2	10.7	0.49	36.1	-7.45	-50.9	
G6	15.2	6.88	206	14.0	2.86	12.6	1.48	0.187	49.8	0.782	14.8	29.4	1.92	33.2	-7.66	-52.3	
G7	16.0	6.85	268	16.7	4.80	21.2	0.86	0.716	79.0	0.250	41.9	3.26	5.36	26.6	-7.54	-50.4	
G8	15.2	6.82	556	3.56	1.80	101	1.28	ND	83.2	1.42	113	9.05	24.8	35.8	-7.54	-50.9	
G9	16.5	6.90	227	13.2	2.43	13.6	1.63	0.186	44.5	1.02	16.1	26.1	2.26	22.5	-7.54	-50.0	
G10	15.4	6.70	1295	98.4	20.0	110	5.35	0.827	240	1.79	245	25.7	71.5	33.9	-6.93	-45.9	
G11	15.7	6.35	248	19.9	4.80	17.0	5.52	0.333	58.5	0.193	18.6	39.4	5.72	36.1	-7.21	-47.6	
G12	14.6	6.59	332	25.0	4.82	18.1	1.80	0.423	58.3	0.561	24.3	85.3	1.26	38.8	-7.61	-50.9	
G13	15.6	6.89	214	20.1	4.53	12.8	1.57	0.229	98.9	0.172	13.1	15.3	4.29	36.8	-7.73	-51.8	
G14	15.7	7.95	292	27.5	11.1	9.01	2.74	1.854	152	ND	5.33	0.51	7.98	14.9	-7.82	-52.4	
G15	16.2	6.37	488	30.5	8.54	38.6	7.28	0.255	51.0	0.767	39.6	99.9	39.5	30.8	-7.68	-51.2	
G16	16.6	7.80	281	23.7	9.99	15.1	5.18	1.004	131	0.475	10.4	11.7	7.85	17.9	-8.02	-53.9	
G17	16.0	6.55	289	29.4	4.38	18.6	5.37	0.345	70.8	ND	17.7	49.8	11.1	38.8	-7.39	-51.4	
G18	15.9	6.68	345	35.2	5.78	14.9	1.01	0.209	10.0	0.567	25.7	23.7	25.6	30.1	-7.59	-52.5	
G19	16.7	7.13	227	19.7	5.44	11.0	1.46	0.227	63.6	0.537	17.0	34.9	1.31	29.4	-7.61	-52.2	
G20	17.2	6.55	373	38.8	7.98	19.6	3.44	0.336	108	1.036	29.8	24.6	36.4	19.9	-7.00	-48.9	
G21	16.7	6.37	383	25.4	2.34	11.0	1.91	ND	85.3	0.609	12.5	21.8	5.80	38.0	-7.89	-52.8	
G22	14.6	6.40	226	40.9	9.81	18.0	2.77	0.481	113	0.681	43.0	18.7	22.9	34.2	-6.76	-46.5	
G23	15.8	6.54	115	3.50	0.66	1.86	0.63	ND	54.4	0.348	7.21	6.85	11.5	2.04	-8.19	-55.4	

Acronym of *ND meaning not detected from the sample.

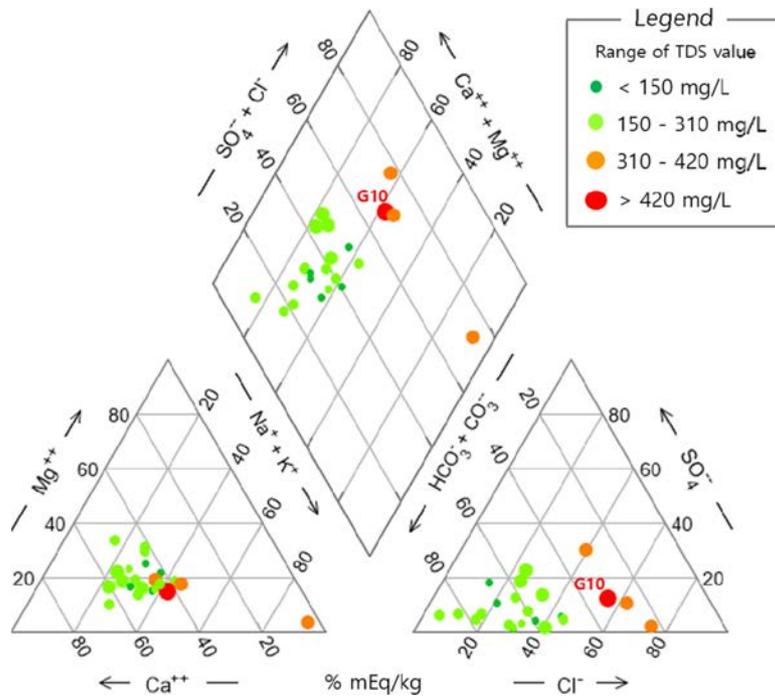


Fig. 3. Water facies of groundwater samples in the study area.

지하수의 경우 농업활동에 의해 용존 성분이 상승하였을 가능성이 있다. 지하수의 수질화학특성을 상세히 살펴보고자 샘플들의 주요이온 성분을 사용하여 파이퍼 다이어그램에 도시하였다(Fig. 3). EC에 대응하여 TDS(Total dissolve solids, 총용존고형물) 역시 이 지역의 지하수에서 큰 편차를 보였다(평균 251 mg/L, 표준편차 148 mg/L). 지하수 수질에 영향을 미치는 유입인자와 수질변동 특성을 해석하고자, TDS값을 기준으로 4단계로 나누어 색깔 및 크기로 구분하여 파이퍼 다이어그램에 도시하였다.

연구지역의 지하수 수질특성은 전반적으로 Ca-HCO₃ 유형을 가지며, 이는 국내 천부지하수의 일반적인 수질특성으로 알려져 있다(Chae et al., 2006). 음이온 삼각 다이어그램은 Cl이온 농도가 상승하면서 TDS도 비례하여 증가하는 경향을 보이며, TDS상승과 함께 전체 수질유형이 Ca-Na-HCO₃-Cl로 변화하는 경향을 보여준다. 수질유형 중 60% mEq/kg 이상의 Cl이온 비율과 310 mg/L 이상의 TDS값을 가지는 샘플을 구분하면, 전체 샘플 가운데 약 17%(4개소)에 해당한다. TDS값이 310 mg/L 이내인 샘플은 Ca-HCO₃유형으로 일치하여, 연구지역의 지하수는

대부분 자연적인 물-암석 반응에 기반한 수화학적 특성을 가지는 것으로 여겨진다.

지하수의 공간적인 수화학 특성을 판단하고자 스티프 다이어그램을 채수지점별로 표시하였으며 다이어그램의 색은 Fig. 3과 같이 TDS값을 기준으로 나누어 도시하였다(Fig. 4). 연구지역 왼쪽의 관정(G10)은 가장 높은 TDS값을 가지며(852 mg/L) Na-Ca-Cl유형을 가지는 것으로 보인다. 이곳은 해수욕장과 다수의 관광시설이 밀집되어 위치하고 있어, 해수의 영향 외에도 생활하수 혹은 상류에서 일부 유출된 농업용수가 영향을 미치는 것으로 생각된다. 동진강 인근의 G8 관정은 해안으로부터 직선거리로 약 3.5 km 떨어져 있으며, 주요 이온성분 가운데 Na-Cl 비율이 가장 높아 전형적인 해수침투의 영향을 받은 지하수 특성을 보인다. 연구지역 중앙의 G4 관정 지하수는 주변의 지하수와 다른 수질유형 및 높은 TDS값을 가지며(344 mg/L), 가장 높은 질산성질소(약 27.5 mg/L)의 농도를 보인다. 약 1 km 옆에 위치한 G5 관정의 지하수와 동일한 심도에서 채수하였으나 Na-Cl 이온의 비율이 높게 나타나는 것을 통해 좀 더 세밀하게 이 주변에 점

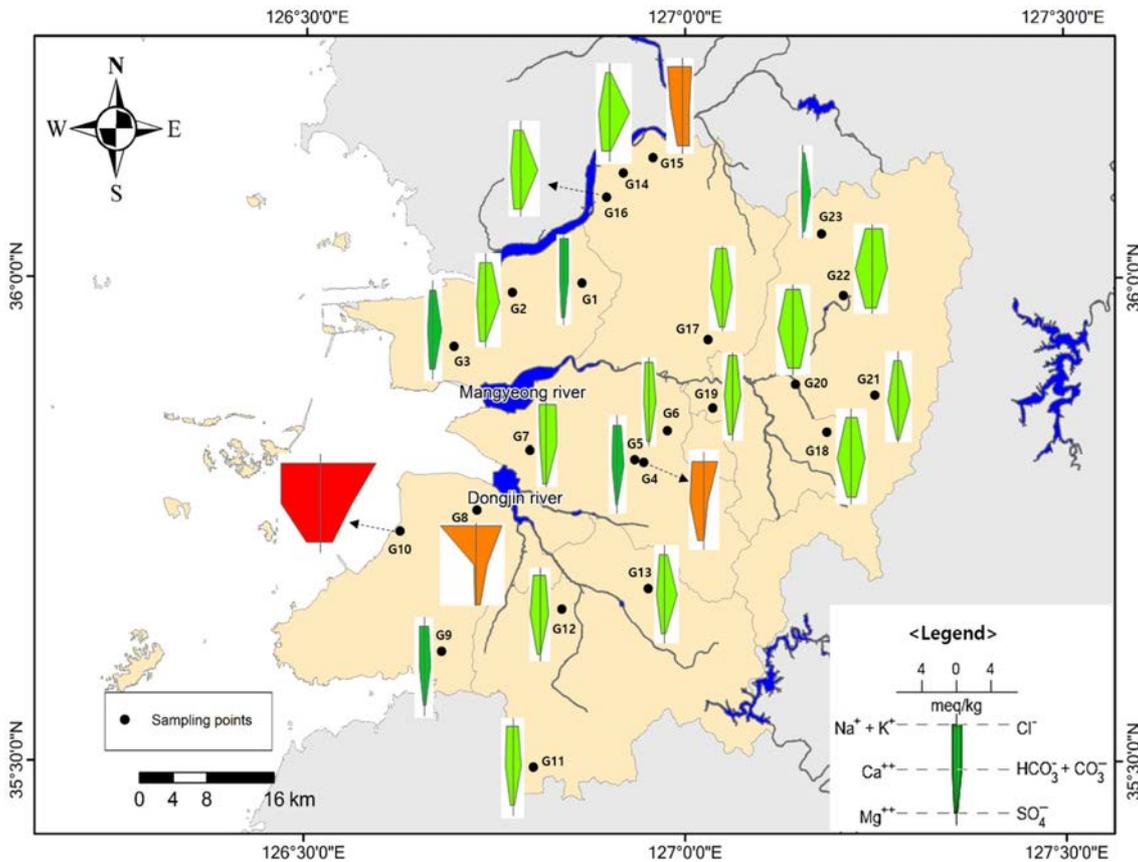


Fig. 4. Spatial distribution of hydrochemical composition of groundwater in the study area.

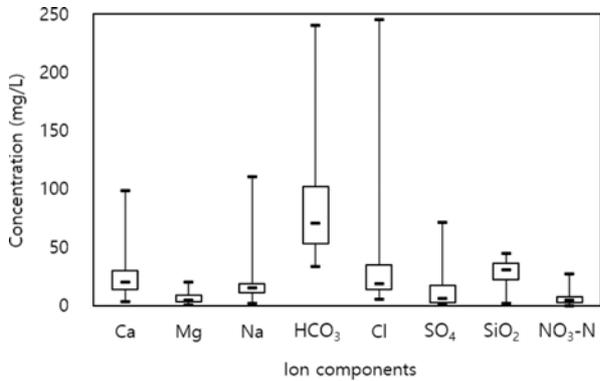


Fig. 5. Box-whisker plot of major chemical components of groundwater in this area.

오염원이 있는지 추가적인 조사가 필요한 것으로 여겨진다. 연구지역 상부의 G15 관정도 Na이온 농도가 높게 나타나며 질산성질소 역시 먹는물 수질기준을 초과하는 높은 값을 가지는 것으로 나타나(22.6 mg/L NO₃-N), 상당히 높은 수준의 농업활동 영향이 반영된 것으로 판단된다(Yun et al., 2017).

상자 수염 그림(Box-whisker plot)을 이용하여 주요이온 성분들의 최소값, 최대값, 25백분위수(Q₁)와 75백분위수(Q₃), 중앙값을 도시한 그림은 Fig. 5와 같다. 연구지역 지하수 주요성분 가운데 Na-Cl 그리고 Ca-HCO₃ 이온 성분이 특히 넓은 농도범위에 분포하고 있는 것이 보인다. Na이온과 Cl이온, SO₄이온의 중앙값은 낮은 농도에 위치하고 있으며 2사분위와 4사분위 역시 낮고 좁은 범위에 위치하고 있어, 일부 고농도 샘플이 전체 농도분포에 영향을 미치는 것으로 판단된다. Ca이온은 2사분위와 4사분위가 상대적으로 높게 위치하여 상대적으로 고른 농도분포를 가지는 것으로 보인다. 먹는물 기준의 질산성질소 농도를(10 mg/L 이내) 초과하는 지하수 샘플은 전체 샘플의 17%에 해당하며, 나머지 19개 샘플의 중앙값은 3.46 mg/L NO₃-N으로 일부 해수침투 관정을 제외하면 생활용수 및 농업용수로 활용하는 사용목적에 부합할 것으로 여겨진다(ME, 2021).

연구지역은 해안 바로 옆에 위치한 평야지대로서 대기 오염 배출원이 존재하지 않고, 대기오염이 심하지 않아서 해안 지역 강수의 영향이 반영되어 있다고 볼 수 있다. 지하수의 산소-수소 안정 동위원소($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$) 값은 -8.19‰부터 -6.76‰의 범위와 -55.4‰부터 -45.9‰의 범위를 보인다(Table 2). 이번 연구에서 얻은 지하수 동위원소 값의 기원을 강수와 비교하여 보고자 순환수선(GMWL, Global Meteoric Water Line) 및 지역순환수선(LMWL,

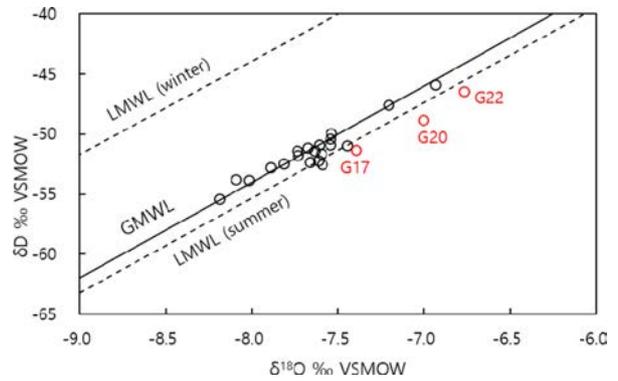


Fig. 6. Distribution of stable oxygen and hydrogen isotope pairs of groundwater samples in this site (A), and sampling points of groundwater undergone evaporation (red color).

Local Meteoric Water Line)을 함께 도시하였다(Fig. 6). 지역순환수선은 Lee and Lee(1999)가 남한의 강수(1995-1997년 사이에 100회 채수) 및 하천수(1991-1995년 사이에 146회 채수)를 분석하여 제시한 계절별 순환수선을 적용하였다. 각 순환수선 식은 아래와 같다.

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

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

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

연구지역 대부분의 지하수는 순환수선과 지역순환수선 사이에 분포하여 강수기원임을 보이며, 일부 시료는 증발의 영향을 받아 동위원소 값이 부화된 것으로 여겨진다(Fig. 6의 빨간 표식).

해당 지점들은 만경강 상류에 위치하고 있으며, 활발한 농업활동이 이뤄지는 연구지역의 강수가 지하침투 전 다양한 증발작용을 겪어 함양된 지하수의 산소-수소 동위원소 기온기가 낮아졌음을 의미하는 것으로 여겨진다. 특히 눈에 담수된 관개용수의 함양이 지하수면으로 이뤄지는 동안, 지하수의 동위원소 조성에 영향을 미치는 것은 여러 연구자들을 통해 보고되어 왔다(Koh et al., 2010; Yun et al., 2017). 농업지대에서 심도별 지하수의 동위원소 변동은 관개용수 공급시점, 계절별 강수 동위원소 조성, 증발의 정도 등에 따라 나타나는 차이로 해석할 수 있으며(Yun et al., 2017), 연구지역의 지하수 역시 이와 같은 특성이 반영되어 나타나는 것으로 여겨진다.

3.2. 수화학특성 영향인자 및 오염가능성 판단

호남평야는 해안에 인접하여 위치하며, 이 지역에는 해수침투 영향을 받은 지하수가 존재함이 잘 알려져 있다

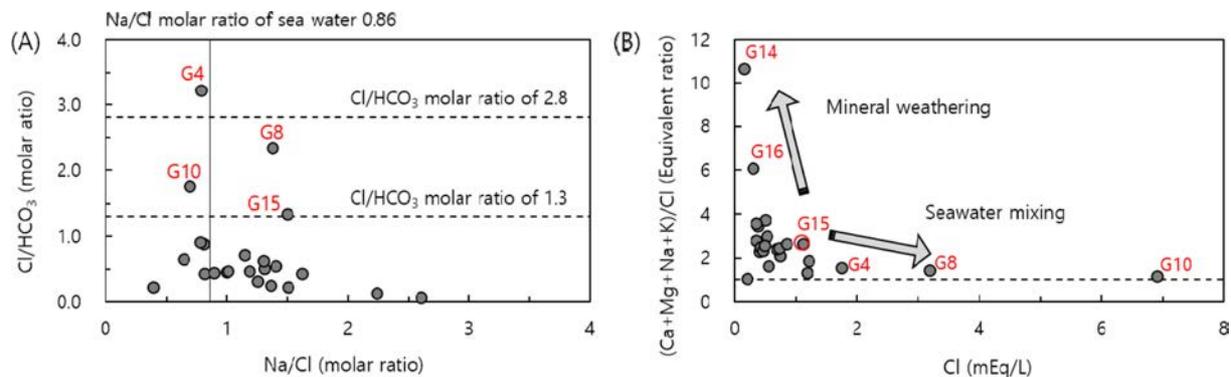


Fig. 7. Degree of mixing seawater and groundwater (A), and correlation of influencing factors on groundwater hydrochemistry (B).

(Park et al., 2005; Song et al., 2007; Lee and Moon, 2008; Yang et al., 2011; Ju and Yeo, 2017). 따라서 지하수와 해수의 혼합이 연구지역에서 어느 정도로 이뤄지고 있는지 판단하고자 Revelle(1941)의 기준에 따라 Cl/HCO₃몰비(molar ratio) 값을 사용하여 지하수 샘플을 도시하였다. 이 기준은 Cl/HCO₃ 몰비가 1.3 이내인 경우 해수영향을 거의 받지 않았으며, 1.3-2.8 사이의 경우 중간 수준의 해수 혼합이 있음을 의미하고, 2.8 이상의 값을 가지는 경우 심각한 수준의 해수 혼합을 지시한다. 이와 함께 Na/Cl몰비가 해수의 조성비(0.86)에 가까울수록 심화된 해수 혼합의 영향을 받은 것으로 분류할 수 있다 (Fig. 7(A)). 이 지역의 지하수 수질특성은 앞서 살펴본 것과 같이, 대부분 해안과 가까이 위치하고 있으나 해수의 영향을 적게 받고 있음을 보여준다. Na/Cl몰비는 해수 오염을 받지 않은 시료들의 경우 넓게 분포하는 특성을 보이며 이는 Fig. 7(A)에서 확인할 수 있다(Revelle, 1941).

Cl/HCO₃ 몰비를 기준으로 하여, 2.8 이상의 값을 가져 심각한 수준의 해수오염의 영향을 고려해야 하는 G4 관정은 해수의 Na/Cl 몰비에 가깝게 나타난다. 1.3 이상의 Cl/HCO₃ 몰비를 가지는 3개 관정은(G8, G10, G15) 해안 혹은 하구와 인접한 장소에 위치하고 있어 해수 혼합과 농업활동의 영향이 어느 정도 혼합되어 나타나는 것으로 여겨진다.

이와 같이 해수영향이 반영된 지하수에서 물-암석 반응과 해수 혼합 기여도는 어느 정도인지 살펴보고자, Fig. 7(B)와 같이 총양이온(Total cation) 당량농도와 Cl이온의 몰농도에 관해 도시해 보았다(Lee and Moon, 2008). 앞서 가장 높은 TDS값을 보여주는 상위 2개 관정은(G8, G10) 총양이온합/Cl 당량농도 값이 1로 수렴하여 해수의 영향을 받은 지하수임을 뒷받침하였다. 오염 가능성이 있다고 보인 G4와 G15 관정은 농업활동 등의 요인에 의해

높은 염성분이 나타나는 것으로 여겨지며, 이는 이 두 지점의 질산성질소가 연구지역 관정에서 가장 높게 나타났다는 것을 통해 뒷받침할 수 있다(Table 2). 질산성질소의 지하수 수질기준농도를 초과하는 관정은 G4, G12, G15, G17의 4개소이다. G12와 G17 관정은 각각 동진강과 만경강 상류에 위치한 관정으로, 수질유형(Ca-HCO₃)과 TDS값에서 연구지역 지하수의 대표적인 수질특성과 부합하는 것으로 나타났으나, 10-20 mg/L 사이의 높은 질산성질소 농도를 보여 질소비료의 시비에 의한 일시적인 농도 상승이 반영된 것으로 생각된다. 한편, G10 관정은 먹는 물 수질기준 항목의 F 이온 기준(1.5 mg/L 이내)을 넘어서는 것으로 나타나 이 지점의 지하수 오염을 해석하기 위해서는 지질 특성 및 하천 상류의 오염원 파악과 토지 이용에 관한 복합적인 접근이 필요하다고 여겨진다.

연구지역 지하수는 G8 관정에서 인산염이온이 관측되었으며(3.01 mg/L), 자연수계에서 나타나는 농도에 비해 상당히 높게 나타난다. 인은 화성암과 퇴적암에서 상당히 풍부하게 존재하고 있으나, 자연수에서는 수십 분의 일 mg/L 이내 농도로 존재하는 것으로 알려지고 있다(Hem, 1992). 농업활동에서도 인산염 성분의 비료가 많이 활용되고 있으나, 일반적으로 화학비료 중의 인산은 Al, Ca, Fe과 화학적으로 결합하여 토양에 고정되어 불용성을 가져 작토층(식물의 뿌리가 분포하는 표층토양, 약 20 cm 내외심도)에 집적되는 특성을 가진다. 퇴비에 함유된 인을 제외하고, 수계의 인산염인은 외부에서 유입되며(allochthonous) 도시하수 및 산업폐수, 축산폐수 등 오염물질의 유입이 직접적으로 일어나는 곳에서 주로 높은 함량을 보이는 형태이나 이런 형태의 인은 광물에 가까워 상대적 용출이 어렵다(Lee et al., 2010). 또한, 퇴적물 내 인의 용출은 토양과 지하수의 산화-환원 환경 및 미생물의 활동에 따라 이동성에 변화가 나타나는 것으로 보고

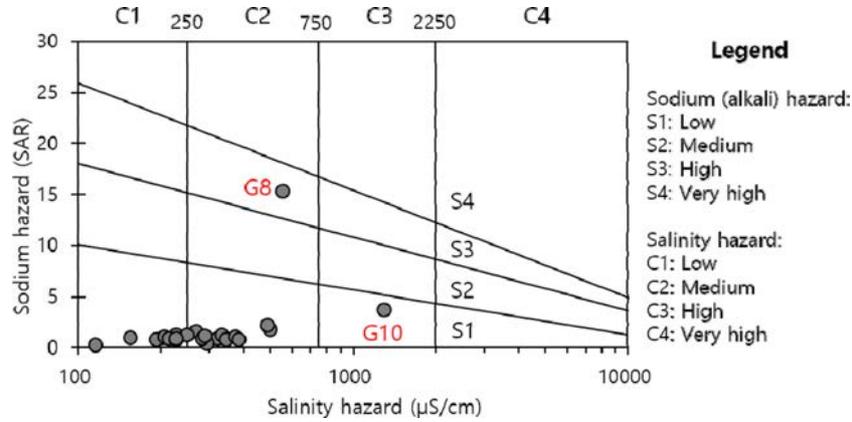


Fig. 8. SAR (sodium hazard) and electrical conductivity (salinity hazard) of groundwater are plotted on USSS (US salinity) diagram.

되고 있다(Joo et al., 2017). 이 지역(G8 관정)의 지하수는 높은 EC값(556 µS/cm)과 Na-Cl-SO₄ 유형의 수질특성을 가지나 담지하수의 범위에 속한다. 그러나 SiO₂의 농도 및 산소-수소 동위원소 값은 다른 지하수 성분의 중앙값과 일치하게 나오는 것에 근거하여, 염류토의 생산성을 높이고자 과도한 퇴비시비가 이루어진 것으로 여겨진다. 따라서 이 연구에서 선행적으로 수행한 먹는물 수질기준 항목을 만족하는 지하수는 약 75%에 이르며 이들 샘플은 대체적으로 양호한 수질을 가진다고 판단된다.

3.3. 농업용수로서의 활용 적합성 평가

연구지역 지하수의 나트륨 흡착비(SAR, Sodium adsorption ratio)와 EC값을 활용하여 양이온 교환가능성과 관개수의 염분장해를 판단하고자 USSS(US salinity) 다이어그램에 샘플을 도시하였다(Fig. 8). 이는 포화대에서 관개용수에 용존된 Na이온이 토양 점토에 흡착되어 있는 Ca이온 및 Mg이온과 양이온교환이 이뤄지는 척도로 사용되고 있다(Hem, 1992). SAR계산에 사용하는 이온농도는 mEq/L 단위로 환산하여 사용하며, 계산식은 다음과 같다(Wilcox, 1955).

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (4)$$

C2-S3 영역의 지하수가 산출되는 관정은 (G8샘플) 중간 수준의 염도를 가졌으나, 나트륨 집적도가 높은 편으로 대부분의 토양에서 나트륨 교환능이 높아 관개지역의 배수가 불량한 경우 농업용수로 사용하기 어려운 것으로 판단된다. 이는 앞서 언급한 것처럼 연구지역이 간척을 반복하여 형성된 토양이며 지하수 관정의 심도가 120 m로

깊어 해수의 영향이 반영되었기 때문에 여겨진다(Park et al., 2002; Park et al., 2008).

C3-S1 영역의 지하수가 산출되는 관정은 (G10샘플) 나트륨 집적도가 낮아 양이온 교환은 거의 일어나지 않을 것으로 여겨지나, 염도가 brackish water의 범위로 높아, 배수가 잘되는 토양에서 내염성 작물(salt tolerance crop)을 재배하는 것을 권장한다(Gupta et al., 2009). 이에 근거하여 USSS다이어그램에 도시한 연구지역의 지하수는 대부분이(약91%) S1-C1과 S1-C2 클래스에 분포하여 낮은 알칼리도와 중간 이하의 염류집적도를 가지는 것을 보인다.

따라서 이 지역의 지하수는 농업용수로 사용하기에 적합하며 토양환경과 식생 역시 염류에 의한 장해(salt stress)가 거의 없을 것으로 판단된다(Gupta et al., 2009).

4. 결 론

서해안에 위치한 호남평야는 과거부터 농업활동이 가장 활발한 지역 중 하나로, 관개용수로서 지하수의 중요성이 높은 지역이다. 이 지역은 농업용수로 활용되는 지하수량이 전국에서 가장 높은 곳으로 보고되고 있으며, 농번기에는 지하수의 활발한 양수로 인해 해수침투의 가능성 역시 존재하고 있다. 이에 이 연구에서는 호남평야지역의 지하수 수질특성을 공간적으로 파악하고, 생활용수 및 농업용수로 활용하기에 적합한지를 다각적으로 평가하였다.

지하수의 Na-Cl이온은 높은 농도에 치우친 로그정규분포를 보여 일부 고농도 샘플이 전체 값에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 연구지역 지하수는 대부분 Ca-HCO₃ 유형을 보여 천부 지하환경에서의 물-암석 반응이 주로 영향을 미친 것으로 여겨지며, 해안 지역에서 해수 침투에 의한 영향으로 지하수는 Ca-Na-HCO₃-Cl 유형으로 변화

하였다. 일부 지점은 먹는물 수질기준을 초과하는 높은 질산성질소 농도값을 가지고, 동진강 하구 지역에서는 높은 인산염 농도를 보여 이 지역에서 농업활동이 지하수 수화학 조성에 상당히 큰 영향을 준 것으로 파악된다.

산소-수소 안정동위원소 분포는 연구지역 지하수가 주로 강수에 의해 함양되었음을 지시하며, 일부 관정은 강수의 지하수면 침투 전 증발과정을 겪은 것으로 보인다. 또한, 연구지역 지하수의 수화학 특성은 물-암석 반응, 농업활동, 해수 영향 등 다양한 요인에 의해 수화학 특성이 결정됨을 보여주었다.

이 지역에서는 해안지역에 위치하며 활발한 지하수 사용이 이뤄지고 있으나 연구지역 지하수는 해수 혼합이 거의 일어나지 않는 것으로 판단되며, 오히려 시비와 같은 농업활동에 의해 염분 및 질산성질소 농도 상승이 이뤄지는 것으로 생각된다. 연구지역 남서부의 지하수는 해수 영향과 농업활동의 영향이 복합적으로 보이며, 해당 지역에 해양관광 및 농업활동 시설이 밀집해 위치하여 해안경계를 따라 지하수 오염도가 높게 나타나는 것으로 판단된다. 나트륨 흡착비와 EC지표는 연구지역의 지하수 가운데 해안에 위치한 두 관정을 제외한 대부분이 관개용수로 활용하기에 적합한 것으로 평가되었다. 연구지역 지하수는 건전한 수문특성과 수질적합성을 보이고 있으며, 지속 가능한 개발 측면에서 해안 인접지역의 지하수의 장기적인 모니터링과 용도에 적합한 수질기준을 충족하는지에 관해 주기적 연구수행이 이뤄지기를 권장한다.

사 사

이 논문은 한국지질자원연구원 기본사업인 “기후변화대응 대응량지하수 확보 및 최적활용 기술개발(21-3411)” 과제의 일환으로 수행되었습니다. 금강권역 시료채취와 분석을 도와주신 지하수센터 관계자분들과 익명의 심사위원분들께 마음 깊이 감사드립니다.

References

Alley, W.M., Reilly, T.E., and Franke, O.L., 1999, *Sustainability of Ground-Water Resources*. Denver. 86p.

Bates, B., Kundzewicz, Z., and Wu, S., 2008, *Climate Change and Water*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Secretariat. Geneva. 214p.

Chae, G.T., Yun, S.T., Kim, K., and Mayer, B., 2006, Hydrogeochemistry of sodium-bicarbonate type bedrock groundwater in

the Pocheon spa area, South Korea: water-rock interaction and hydrologic mixing, *Journal of Hydrology*, **321**(1-4), 326-343.

Choi, J.H., Oh, C.S., Cho, Y.K., and Ahn, C.H., 2013, Consideration on the Operation of water level management and Environmental Change Associated with Inner Dike Constructions in Saemangeum Reservoir, *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, **16**(4), 290-298.

Choi, P. and Hwang, J.H., 2013, *Geological report of the Gunsan, Buan, Banchukdo, Jangjado sheets (1:50,000)*, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. Daejeon. 76p.

Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric waters, *Science*, **133**(3465), 1702-1703.

GIMS (National Groundwater Information Management and Service Center), 2021, Statistics in Groundwater in Korea, Available online: http://www.gims.go.kr/en/gims_start.do (Cited 5 February 2021)

Gupta, S., Dandele, P.S., Verma, M.B., and Maithani, P.B., 2009, Geochemical assessment of groundwater around Macherla-Karempudi Area, Guntur District, Andhra Pradesh, *J Geol Soc India*, **73**(2), 202-212.

Hem, J.D., 1992, *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (Third Edition)*. Department of the Interior, US Geological Survey. Washington D.C., 264p.

Hong, M.S., Yoon, S., and Gil, Y.J., 1969, *Explanatory text of the geologic map of Samye sheets (1:50,000)*, Geological Survey of Korea. Seoul. 32p.

Hwang, S.W., Kang, J.G., Lee, K.D., Lee, K.B., Park, K.H., and Chung, D.Y., 2012, Division of soil properties in reclaimed land of the Mangyeong and Dongjin river basin and their agricultural engineering management, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, **45**(3), 444-450.

Joo, J.C., Choi, S., Heo, N., Liu, Z., Jeon, J.Y., and Hur, J.W., 2017, Analysis of the benthic nutrient fluxes from sediments in agricultural reservoirs used as fishing spots, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **39**(11), 613-625.

Ju, J.W. and Yeo, I.W., 2017, Time series analysis and forecasting of electrical conductivity in coastal aquifers. *Economic and Environmental Geology*, **50**(4), 267-276.

KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2020, *Interim Report for Technology development for securing large-scale groundwater resources and optimum utilization in response to climate change*, Daejeon, 138p.

Kim, H., Kihm, Y.H., and Kee, W., 2012a, *Geological report of the Iri sheet (1:50,000)*, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. Daejeon. 61p.

Kim, J., 2019, *Sustainable usage and management plan of groundwater*. Legislative and Policy Report, National Assem-

- bly Research Service, Seoul, 100p.
- Kim, Y.B., Choi, S.J., Chwae, U., and Kim, Y.J., 2012b, *Geological report of the Gimje sheet (1:50,000)*, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 49p.
- Koh, D.C., Mayer, B., Lee, K.S., and Ko, K.S., 2010, Land-use controls on sources and fate of nitrate in shallow groundwater of an agricultural area revealed by multiple environmental tracers, *Journal of Contaminant Hydrology*, **118**(1-2), 62-78.
- 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.
- Lee, B.J. and Moon, S.H., 2008, Integrated approach for evaluating the characteristics of seawater intrusion using factor analysis and time series analysis: Seocheon-Gunsan area, *J. Geol. Soc. Korea*, **44**(2), 219-232.
- Lee, J.K., Ahn, T.W., and Oh, J.M., 2010, A study on the influence of water quality on the phosphorus fraction properties from reservoir sediments, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **32**(9), 840-850.
- Ministry of Environment. 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 5 February 2021).
- ME (Ministry of Environment) and K-water, 2019, *Groundwater annual report 2019*. Daejeon. 395p.
- Min, B.M. and Kim, J.H., 1997, Soil texture and desalination after land reclamation on the west coast of Korea. *Korean J. Ecol.* **20**(2), 133-143.
- Park, J.H., Kihm, J.H., Kim, H.T., and Kim, J.M., 2008, Three-Dimensional numerical simulation of impacts of fault existence on groundwater flow and salt transport in a coastal aquifer, Buan, Korea, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, **13**(5), 33-46.
- Park, S.C., Yun, S.T., Chae, G.T., and Lee, S.K., 2002, Hydrogeochemistry of shallow groundwaters in western coastal area of Korea: a study on seawater mixing in coastal aquifers, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, **7**(1), 63-77.
- Park, S.C., Yun, S.T., Chae, G.T., Yoo, I.S., Shin, K.S., Heo, C.H., and Lee, S.K., 2005, Regional hydrochemical study on salinization of coastal aquifers, western coastal area of South Korea, *Journal of Hydrology*, **313**(3-4), 182-194.
- Revelle, R., 1941, Criteria for recognition of the sea water in ground-waters, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **22**(3), 593-597.
- SDIA (Saemangeum Development and Investment Agency), 2021, Saemangeum Spatial Information, Available online: <https://www.saemangeum.go.kr/sda/main.do> (Cited 15 February 2021).
- Song, K., Kim, S.W., Ko, K., and Kim, B.C., 2013, *Geological report of the Jeongeup sheets (1:50,000)*, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 78p.
- Song, S.H., Lee, J.Y., and Yi, M.J., 2007, Evaluation of long-term data obtained from seawater intrusion monitoring network using variation type analysis, *Journal of the Korean Earth Science Society*, **28**(4), 478-490.
- Wheater, H.S. and Gober, P., 2015, Water security and the science agenda, *Water Resources Research*, **51**(7), 5406-5424.
- Wilcox L.V., 1955, *Classification and use of irrigation waters*, U.S. Department of Agriculture, Washington D.C. 21p.
- Woodward, A., Smith, K.R., Campbell-Lendrum, D., Chadee, D.D., Honda, Y., Liu, Q. Olwoch, J., Revich, B., Sauerborn, R., Chafe, Z., Confalonieri, U., and Haines, A., 2014, Climate change and health: on the latest IPCC report, *The Lancet*. **383**(9924), 1185-1189.
- Yang, J.S., Nam, J.J., Park, I.B., and Kim, S., 2011, Analysis of saltwater intrusion effects into coastal aquifers in Korea considering climate change effects, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, **31**(1B), 71-85.
- Yun, S.W., Jeon, W.H., and Lee, J.Y., 2017, Evaluation of hydrochemical characteristics of groundwater and stream water in a heavy agricultural region of the Haean basin, Korea, *J. Geol. Soc. Korea*, **53**(5), 727-742.