Research Paper

A Study on Analysis of Freshwater-saltwater Interface in the Aquifer around Hwajinpo Lagoon on the Eastern Coast of Korea

Minji Kim¹, Dongjin Kim², Seong-Chun Jun^{3,*}, Jeonghoon Lee^{1,*}

¹Dept. of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 03760, Korea

²Environmental Research Institute, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

³GeoGreen21 Co., Ltd., Seoul 08376, Korea

*Corresponding author : jeonghoon.d.lee@gmail.com, sc-jun@daum.net

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 11 September 2021
Received in revised form 29 October 2021
Manuscript accepted 31 October 2021
Available online 28 December 2021

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2021.54.6.699>

Research Highlights

- Groundwater level and flow analysis indicates the existence of freshwater-saltwater interface in the aquifer.
- The cation-exchange and precipitation reactions occurred in the aquifer due to seawater intrusion.
- During dry seasons, the possibility of seawater inflow through groundwater increases.

ABSTRACT

Hwajinpo Lagoon, located on the eastern coast of Korea, is a unique environment where freshwater and saltwater are mixed. Systematic management of the lagoon is required because it is a biodiversity-rich and area of high conservation value. The existing environment of the lagoon was evaluated by identifying the distribution of the groundwater level and groundwater flow characteristics. In addition, hydrogeochemical fluctuations were analyzed to determine the effect of seawater intrusion into the aquifer. The results demonstrate that the freshwater-saltwater interface is distributed throughout the aquifer and rises when water of the lagoon evaporates due to prolonged periods of low rainfall and high temperature, thereby increasing the possibility of seawater inflow through groundwater. As for the ionic delta properties (difference between the measured and theoretical concentration of mixed waters), it was estimated that the cation-exchange and precipitation reactions occurred in the aquifer due to seawater intrusion. The ratio of seawater mixed at each point was calculated, using oxygen isotopes and chloride as tracers, resulting in an average of 0.3 and a maximum of 0.87. The overall seawater mixing ratio appears to be distributed according to the distance from the coast. However, some of the results were deviated from the theoretical expectations and reflected the characteristics of the nearby aquifers. Further research on seasonal changes and simulation of seawater intrusion mechanisms is required for specific analysis.

Keywords : Lagoon, seawater intrusion, freshwater-saltwater interface

Citation: Kim, M., Kim, D., Jun, S.-C., Lee, J. (2021) A Study on Analysis of Freshwater-saltwater Interface in the Aquifer around Hwajinpo Lagoon on the Eastern Coast of Korea. Korea Economic and Environmental Geology, v.54, p.699-707, doi:10.9719/EEG2021.54.6.699.

✉ Journal homepage: <http://www.kseeg.org/main.html>

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.
pISSN 1225-7281; eISSN 2288-7962/©2021 The KSEEG. Printed by Hanrimwon Publishing Company. All rights reserved.

연구논문

동해안 화진포 석호 주변 대수층 내 담수-염수 경계면 분석에 관한 연구

김민지¹ · 김동진² · 전성천^{3,*} · 이정훈^{1,*}

¹이화여자대학교 과학교육과

²강원대학교 환경연구소

³(주)지오그린21

*책임저자 : jeonghoon.d.lee@gmail.com, sc-jun@daum.net

요 약

동해안에 위치한 화진포 석호는 담수와 염수가 혼합되는 환경으로 생물 다양성이 풍부하여 높은 보존 가치를 지니고 있어 체계적인 관리가 필요하다. 석호의 현재 환경에 대한 분석을 위해 호소수에 영향을 큰 주변 대수층의 지하수 수위 분포와 지하수 흐름의 특성을 파악하였다. 또한 호소수의 염분도가 유지되는 기작으로 추정되는 대수층으로의 해수침투의 영향을 파악하기 위해 수리지구 화학적 변동을 분석하였다. 연구 결과 사주지역의 대수층에 썰기형태의 담수-염수 경계면이 분포하며, 강우가 적은 기간이 지속되고 온도가 높아 석호의 증발이 일어날 경우 담수-염수 경계면이 상승하여 지하수를 통한 해수의 유입 가능성이 높은 것으로 판단된다. 수리지구 화학적 특성으로는 이온델타(혼합된 지하수의 이론적인 화학조성과 실제 시료가 가지는 값과의 차이) 값을 산출하여 해수 침투에 따른 대수층 내에서 양이온 교환반응 및 침전 반응이 일어난 것으로 추정하였다. 각 지점별로 해수가 혼합된 비율을 계산하기 위해서 산소동위원소와 염소이온을 추적자로 사용하였으며 혼합비의 평균값은 0.3, 최대값은 0.87을 나타내었다. 전체적인 혼합비 결과는 해안에서의 거리에 따라 분포하는 것으로 판단되나, 이론적인 예상과는 상이한 결과가 일부 존재하는데 그 부근의 대수층 특성이 반영된 것으로 판단된다. 더욱 구체적인 분석을 위해서는 계절적인 변화와 해수침투 기작을 모사하는 등 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

주요어 : 석호, 해수 침투, 담수-염수 경계면

1. 서 론

석호는 사주, 사취의 발달로 바다와 분리된 호수를 말하며, 전 세계 해안에서 흔하게 관찰되는 연안의 지형이다. 화진포는 우리나라에서 가장 큰 규모의 석호로서 홀로세의 해수면 변동으로 인해 사주가 발달하여 약 5,500년 전부터 기수 환경이었을 것으로 추정된다(Yum *et al.*, 2004). 화진포는 담수호와 달리 해수와 담수가 혼합되어 기수호의 특성이 있으므로 내륙의 담수호보다 생태학적으로 독특한 특징을 지니고 있으며, 동해안의 다른 석호에 비해 원형을 잘 보존하고 있으므로 중요도가 높은 호수이다. 무자치, 유혈목이 등 양서·파충류와 검독수리, 흑고니, 가시고기 등 멸종위기 동물이나 천연기념물로 지정된 법정 보호종이 서식하여 이 주변 0.374km²는 1985년부터 야생 동·식물 보호구역으로 지정되었고, 2014년에는 강원평화지역 국가지질공원의 16개소 중 한 곳으로 지정되어 관리되고 있다(Cho and Woo, 2018). 그러나 농경지 개간, 관광지 개발 등 석호 생태계를 고려하지 않은 인근지역 난개발로 수생생물 서식지 교란이 심하게 일어나고 있다. 화진포에 대한 체계적인 관리를 위해서

는 현재 석호 환경에 대한 분석이 필요하며, 수리지질학적 관점에서는 호소수에 영향을 큰 주변 대수층의 지하수 수위 분포를 통해 호소수와 관계를 파악하는 것이 중요하다(Rodellas *et al.*, 2018).

해수침투는 해안선 부근에서 해수가 대수층을 따라 담수 지하수계로 침입하는 현상으로, 특히 생태계와 긴밀한 관계가 있어 종합적인 연구가 필요한 분야이다(Werner *et al.*, 2013). 해수침투와 관련하여 기존의 국내 연구는 지형적 특성으로 인해 제주도과 서해안 및 남해안 지역에서 주로 이루어졌다(Shin *et al.*, 2020; Jeon *et al.*, 2021). 제주도의 경우 지하수를 주요 식수원으로 활용하기 때문에 그 중요도가 높고, 빠른 지역발전으로 인해 사용량이 높아지면서 해수침투를 유발하였다(Kim *et al.*, 2006; Chang *et al.*, 2019; Chang *et al.*, 2020). 서해안과 남해안 지역의 경우에는 해안선이 복잡하고 조석간만의 차가 최대 6m에 달하기 때문에 해수침투가 일어날 가능성이 크며, 지하저장시설의 개발 등으로 인해 다양한 연구가 진행되었다(Lee *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2007; Lim *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2018; Kwon *et al.*, 2020). 그러나 동해안에서의 해수침투 연구는 상대적으로 드물

게 이루어졌고, 특히 생태학적으로 가치가 높은 석호에 대한 연구 또한 그동안 간과되었다. 그러므로 화진포 주변 대수층에 대한 해수침투 영향을 파악하는 것은 더욱 중요하다고 볼 수 있다.

화진포의 경우 7번 국도와 해안도로로 인해 바다와의 연결부분이 좁혀져 있어 하구를 통한 자연적인 해수 유입이 어려운 조건이다. 따라서 호소수의 염분도가 유지되는 기작으로 호수 저면을 통한 해수 유입이 가능할 것으로 추측되며, 이는 이탈리아와 스페인에서 수행된 연구(Colombani and Mastrocicco, 2017; Menció *et al.*, 2017)에서와같이 석호와 대수층간의 연결성이 높게 나타난 결과와 동일한 맥락으로 접근할 수 있을 것이다. 이러한 현상은 생태학적 중요도가 높은 석호 주변의 식물에 영향을 미칠 수 있고(Kim *et al.*, 2017), 또한 기수어종이 70% 이상(Park *et al.*, 2007) 차지하는 화진포의 특성상 해수침투의 영향이 어류 생태계에 상당할 것으로 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 화진포 주변 대수층의 해수침투 영향과 수리지구 화학적 변동을 파악하고자 한다. 이를 위해서 대수층의 지하수 수위 분포 조사와 수질검층을 진행하였고 석호 주변 지하수 흐름을 파악하여 해수침투 영향을 분석하였다. 또한 시료채취 및 분석을 진행하여 지하수와 지질매체간에 일어난 수리지구 화학적 작용과 수질유형을 파악하였으며 각 지점의 해수 혼합비를 구해 대수층 내에 해수의 영향을 공간적으로 분석하였다.

2. 연구지역

화진포(38°27'N, 128°28'E)는 강원도 고성군 거진읍에 있는 동해 연안의 석호로 유역 면적은 20.527km², 호소 면적은 2.031km², 수변 길이는 12.299km, 연평균 수위는 2.17m, 최대 수심은 4.62m이며 가지형 형태의 호소이다(Fig. 1). 화진포는 좁고 얇은 수로에 의해 내호와 외호가 연결되어 있고, 이러한 지형상의 특징으로 인해 두 호수는 서로 다른 깊이에서 염분약층을 형성한다(내호 수심 200cm, 외호 수심 80cm; Yum *et al.*, 2002). 화진포 하구는 약 200m 길이로 평상시에는 석호 하구를 통한 해수 유입(갯터짐)이 발생하지 않아 복원사업의 일환으로 장비 등을 이용해 모래사장을 파내어 인위적으로 갯터짐을 조성하고 있으며, 이 때문에 석호 하구를 통한 해수 유입은 제한적일 것으로 판단된다.

화진포의 퇴적층 구조, 지층 특성, 대수층의 수리특성 평가 및 지하수 유동 분석을 위하여 지하수 관측정을 설치하였다. 관측정은 수리·수문학적 상호관계(지표수, 해수, 지하수)를 파악하는데 필요한 지역에 설치되었는데,

Fig. 1. Map showing the location of the Hwajinpo Lagoon on the eastern coast of Korea, including the observation wells.

Table 1. Details of observation wells at Hwajinpo lagoon

Well No.	TMX	TMY	Elevation (m)	K (cm/s)
BH-1	325,572.87	654,027.59	2.17	3.8×10^{-2}
BH-2	325,422.96	654,003.36	0.97	2.2×10^{-2}
BH-3	324,838.83	653,931.24	1.13	1.6×10^{-3}

화진포 외호의 하류의 사주지역 2개소(BH-1~2)와 상류 1개소(BH-3)이다(Fig. 1, Table 1). 설치된 관측정의 제원은 심도 15m, 굴착구경 100mm, 내부자재 직경 50mm이며, 상부 1~2m 구간을 제외한 전 구간에 스크린(유공관)이 설치되어 있으며, 지하수의 수직적인 현장 수질측정 및 수질분석 시료 채취 등에 활용되었다. 연구지역의 수위 분포 및 지하수 흐름 특성을 알아보기 위해 지하수 관측정 3개소와 석호에서 수위를 측정하였으며, 수위 측정값을 이용하여 시기에 따른 지하수 흐름 특성을 파악하였다. 지하수 관측정에서는 기준점(지표)에서 지하수 심도를 측정하는데, 측정 기준점의 고도를 고려하여 해수면 기준 수위로 환산하여 이용하였다.

화진포 지역의 기반암은 경기 편마암복합체이며 지역적으로 쥐라기 대보화강암의 관입을 받았다. 호수 주변 지역에서는 제4기 동안의 해안모래층이나 하천기원 충적층이 같은 기반암 위에 나타난다(Yum *et al.*, 2004). 대수층 수리지질특성이 지하수위 분포·흐름에 미치는 영향을

Fig. 2. Bar chart showing daily precipitation and air temperature data from automatic weather station (Daejin, ~1.7km distance to study area).

파악하기 위하여 현장수리시험(단기양수시험)을 수행하였다. 양수시험은 BH-1~3 관측정에서 각각 $391\text{cm}^3/\text{s}$, $278\text{cm}^3/\text{s}$, $40.8\text{cm}^3/\text{s}$ 로 양수하면서 수행하였으며, 수동수위계와 자동수위계측기(levellogger, solinst사)를 이용하여 수위를 측정 및 기록하였다. 시험결과는 수리시험 해석 프로그램인 AQTESOLV pro(ver 4.5)를 이용하여 곡선맞춤법으로 해석하였다. 수리전도도(hydraulic conductivity, K)는 BH-1에서 $3.8 \times 10^{-2}\text{cm/s}$, BH-2에서 $2.2 \times 10^{-2}\text{cm/s}$, BH-3에서 $1.6 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ 로 나타났다. 사주지역 두 관측정의 수리전도도는 유사하게 나타났으며 상류(BH-3)에 비하여 10배 정도 크게 나타났다. 사주지역의 강수에 민감한 수위 변동은 모래질로 이루어진 대수층의 특성상 높은 투수성과 관련된 것으로 판단된다.

연구지역과 인접한 기상관측지점 자료에 따르면(지점명: 대진, 강원도 고성군 현내면 초도리, 화진포에서 약 1.7km 거리) 화진포 주변 지역의 2020년 연 강수량은 2392.5mm이며, 연평균 기온은 13.28°C 이다. 이 지역의 강수는 여름에 집중되어 있으므로(Fig. 2) 분석 결과에 계절성 영향을 최소화하기 위해 수위조사의 경우 3월과 10월, 시료채취 및 분석은 3월과 11월에 시행하였다.

3. 연구방법

3.1. 지하수 수위조사 및 수질검층

지하수 수질의 수직적 분포 특성을 파악하기 위해 화진포 석호 주변에 설치된 지하수 관측정에서 공내 수질검층을 수행하였다. 공내 수질검층은 다항목 수질측정기

(YSI-ProDSS, YSI사)를 이용하여 관정 상단에서 바닥까지 총 15m를 1m 간격으로 수행하였다. 지하수 샘플의 현장 수질검층 항목은 온도, 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 염도(Salinity), 용존산소(DO), 산화환원전위(ORP)이며, 해수 영향을 고려하여 전기전도도(EC)는 $50,000\mu\text{S}/\text{cm}$ 보정용액을 이용하여 보정 후 측정하였다.

3.2. 시료채취 및 분석

지하수, 석호, 해수의 수질현황을 파악하기 위하여 시료채취 및 수질분석을 수행하였다. 지하수의 시료채취 방법은 정량이송펌프(Solinst사 Peristaltic pump, model 410)를 이용하여 상부심도에서 하부심도로 시료채취를 진행하여 수질 교란을 최소화하였으며, 실내 분석시료 채취 전에 현장수질을 측정하였다. 주요 양·음이온은 50ml Conical tube, HCO_3^- 는 100ml PE시료병 그리고 TOC 및 기타분석용은 1L 멸균채수병에 현장 여과를 진행한 뒤 채취하였다. 채취된 시료는 수질분석기관인 상지대학교 자연과학연구지원센터에 의뢰하여 분석하였으며, 주요 양이온(Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+)은 유도 결합 플라즈마 광학 방출 분광법(ICP-OES; Thermo, iCAP 6500Dou)을 사용하였고 음이온(Cl^- , SO_4^{2-} , Br^-)은 이온 크로마토그래피(IC; Metrohm, Eco IC)를 사용하여 측정되었습니다. 불안정동위원소는 Beta Analytic Inc.에 의뢰하여 분석하였고 공동 광자 감쇠 분광법(CRDS; Picarro, L2140-i)을 사용하여 $\delta^{18}\text{O}$ 와 $\delta^2\text{H}$ 를 측정하였으며 정밀도는 각각 0.01~0.23‰, 0.05~0.57‰이다.

4. 결과 및 토의

4.1. 수위를 이용한 담수-염수 경계면 분석 결과

수위는 해발고도(Elevation, above mean sea level)로 표시하였고, 측정 결과 전반적인 지하수위는 EL. 0m(해수면)~EL. 0.8m 부근에 분포하는 것으로 나타났다. 석호 상류의 BH-3 관측정 지하수위가 EL. 0.54~0.8m, 사주 지역 BH-1 및 BH-2 관측정 지하수위는 EL. -0.05~0.18m로 나타나 상대적으로 사주 지역이 낮은 경향을 보인다. 시기별 측정 수위를 이용하면 지하수위 분포단면도를 작성할 수 있으며, 이를 이용하여 지하수 분포를 파악할 수 있다(Fig. 3). 석호 상류지역에서는 석호 및 바다 쪽으로 흐름이 항시적으로 유지되는 반면, 사주 지역의 지하수위는 사주에서 석호 및 바다쪽으로 양방향 흐름이 나타나기도 하지만 바다쪽에서 사주 및 석호 쪽으로 흐름이 형성되기도 하였다.

해수침투는 담수에 비하여 상대적으로 밀도가 높은 해수가 대수층 내부로 유입되는 현상이기 때문에 두 유체

Fig. 3. Water table and Schematic flow of groundwater; (a) Mar. 2020, (b) Oct. 2020.

Fig. 4. Analysis of freshwater-saltwater interface using water table; (a) Mar. 2020, (b) Oct. 2020.

사이의 경계면은 해안에서 내륙으로 갈수록 깊어지는 형태를 가진다. Ghyben-Herzberg가 제안한 식(Verruijt, 1968)을 이용하여 화진포호 주변 대수층의 담수-염수 경계면을 분석한 결과, 담수-염수 경계면은 해안에서 BH-3 관측정 방향으로 깊어지는 경향을 보인다(Fig. 4).

2020년 10월에 측정된 수위는 내륙 관측정(BH-3)에서는 높게 나타나나, 사주지역의 BH-1, BH-2 관측정은 해수면 부근이며, 석호 수위는 해수면보다 낮다(Fig. 4b). 이 시기는 상대적으로 3월에 비해 온도는 높고, 일정 규모 이상의 강우가 지속되지 않은 기간이 긴 상황이 이어졌기 때문에 석호 수위가 해수면보다 낮아진 것으로 판단된다. 이러한 수위에 만일 Ghyben-Herzberg 식을 그대로 적용하면 전체가 염수일 수밖에 없는데, 이는 현장의 상황은 정류상태를 가정한 Ghyben-Herzberg 식과 달리

Fig. 5. Spatial Distribution of Electrical Conductivity (EC); (a) Mar. 2020, (b) Oct. 2020.

평형이 이루어지지 않은 부정류 상태이기 때문이다. 따라서, 이 시기의 담수-염수경계면은 평형에 가까운 3월의 형태에서 어떤 방향으로 이동했을 것인가를 추정하는 수준에서 가능하다. 석호와 사주 지하수의 수위가 하강하였으므로 경계면은 상부로 상승하였을 것으로 추정되며, 특히 석호 하부에서는 경계면이 석호 바닥보다 높게 상승하였을 가능성이 존재한다. 또한 염분의 확산 작용에 의해 담수-염수 경계면은 점이대를 형성하기 때문에 석호 바닥으로 염수(해수)의 유입이 발생할 수 있을 것으로 추정된다.

4.2. 전기전도도(EC)를 이용한 담수-염수 경계면 분석

전기전도도(Electrical Conductivity, EC)는 석호 주변의 염수 영향을 확인할 수 있는 지표 중 하나이므로 석호를 포함한 EC 수직단면 분포도를 분석하면, 석호 하부의 담수-염수 경계면의 위치를 추정할 수 있다(Fig. 5). 담수-염수 경계면은 EC 값이 해수의 절반 수준인 약 25,000 μ S/cm의 부근에서 분포할 수 있는데, EC 분포에 의하면 바다에서 석호 하부로 쐐기형태의 담수-염수 경계면이 위치하는 것으로 생각된다. 또한 뚜렷한 경계면(sharp interface)보다는 점이대(transition zone)의 모습을 나타내었다. 전기전도도 변동 구간은 BH-1 관측정의 4~6m 심도와 BH-2 관측정의 5~10m 심도에서 전기전도도의 변화가 크게 일어났는데, 이것은 이론적으로 계산한 담수-염수 경계면과 잘 일치한다고 할 수 있다.

4.3. 수리지구 화학적 특성

대수층에서 지하수와 해수가 혼합되면 지질매체와 다양한 지구화학적 반응이 일어나며 특히 양이온 교환반응(cation exchange)이 중요한 반응 중 하나이다. 이온델타(ionic delta)는 이 양이온 교환반응을 나타내는 지표로 할

Fig. 6. Plots of (a) ΔMg^{2+} and (b) ΔCa^{2+} vs. $\Delta\text{Na}^+ + \Delta\text{K}^+$, saturation index of (c) Dolomite and (d) Calcite vs. pH.

용할 수 있는데(Liu *et al.*, 2017), 해수의 혼합비에 따라 혼합된 지하수의 이론적인 화학조성을 계산할 수 있으며 실제 시료가 가지는 값과의 차이(이온텔타)를 구할 수 있다. 연구지역 시료에서 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 의 이온텔타 값과 Mg^{2+} , Ca^{2+} 의 이온텔타 값의 관계를 보았을 때, 이론적인 값보다 Mg^{2+} 과 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 모두 적으므로 침전 반응이 일어난 것으로 추정되며(Fig. 6a), Ca^{2+} 의 경우 양이온 교환 반응이 일어난 것으로 추정할 수 있다(Fig. 6b).

포화지수(Saturation index, SI)는 광물의 침전 여부를 확인하는 지표로 활용할 수 있으며 PHREEQC(Parkhurst and Appelo, 1999)를 사용해 계산하였다. 연구지역의 시료분석 결과를 포화지수로 나타내 보면(Fig. 6c, 6d), 마그네슘을 함유하는 광물인 돌로마이트(Dolomite)의 경우 평형상태인 0보다 큰 값을 주로 보여 침전된 상태임을 알 수 있으며, 칼슘을 함유하는 광물인 방해석(Calcite)의 경우 0과 가깝거나 낮은 값을 보이는 경우가 많아 용해된 상태를 의미한다. 또한 해수 혼합비와 각 이온텔타 값

Fig. 7. Plots of ΔCa^{2+} , ΔMg^{2+} , and ΔNa^+ vs. the percentage of seawater equal to the mixing ratio using $\delta^{18}\text{O}$.

을 비교해 보았을 때(Fig. 7), 혼합비가 증가함에 따라 Ca^{2+} 은 증가하였고, Mg^{2+} 과 Na^+ 은 감소하는 추세를 보여

앞에서 분석한 수리지구 화학적 특성이 해수 혼합비와 관계에서 비례적으로 나타난다고 볼 수 있다. 이러한 결과는 지질매체가 가지고 있던 Ca^{2+} 이 해수 기원인 Mg^{2+} 과 Na^+ 으로 서서히 대체되는 과정을 보여주는 것으로 이해할 수 있다(Andersen *et al.*, 2005).

파이버 다이어그램(Piper diagram)으로 연구지역의 지하수의 수질유형을 살펴보면(Fig. 8) 수질분석 결과 대부분 Na-Cl 수질유형이며, 다수의 지하수가 해수와 동일한 유형으로 나타나고 있다. 반면에, BH-3 관측점의 수질 분석결과는 주요 양이온은 해수에서 우세한 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 이 높지만, 음이온은 담수의 특성이 HCO_3^- 의 농도가 가장 높게 나타났다. 이는 담수와 해수의 혼합수 중 해수인 지하수에서 담수가 유입되었을 경우에 발생하는 형태이며, BH-3 관측점의 경우 해수 혹은 호소수로 이루어진 지하수에 배후지로부터 담수가 유입되고 있음을 지시하고 있다.

Fig. 8. Piper diagram of groundwater, lagoon water and seawater; (a) Mar. 2020, (b) Nov. 2020.

4.4. 물안정동위원소 및 해수 혼합비 분석

물의 산소, 수소 안정동위원소는 지표수 또는 지하수 수체의 기원과 혼합을 추적할 때 유용하게 이용할 수 있다. 특히 지하수는 강수 기원이기 때문에 동위원소 분별 작용에 의해 상대적으로 가벼운 동위원소 조성(음의 값)을 보이는 특성이 있다. 그리고 해수는 기준값(0‰) 부근의 값을 가지므로 해수의 침투 및 혼합을 평가할 때 유용하다. 또한 상온에서는 암석 또는 광물 속의 물과 반응하지 않는 특성이 있어 물안정동위원소 값이 변하지 않기 때문에 추적자로서 효과적으로 활용할 수 있다(Lee, 2018).

이번 연구의 수질시료 채취 및 분석과정에서도 산소, 수소 안정동위원소 분석을 수행하였다(Fig. 9). 산소·수소 동위원소 조성은 해수와 담수 성분 사이의 혼합된 직선(seawater mixing line)이 형성되어 해수침투에 따른 영향을 받은 것으로 판단된다. 이번 연구에서 대수층에 해수가 얼마나 침투하였는지 파악하기 위해 혼합비를 계산하였고, 추적자로는 염소이온과 산소동위원소를 활용하였다. Fig. 10은 염소이온과 산소동위원소 분석 결과를 활용하여 추정한 혼합비를 나타낸 것으로, 혼합비의 평균값은 염소이온의 경우 0.28, 산소동위원소의 경우 0.32이고

Fig. 9. Isotopic composition of the studied samples; (a) Mar. 2020, (b) Nov. 2020. Legend: GMWL, global meteoric water line.

전체적으로는 0.3의 평균값을 가진다(Table 2). 각 결과값은 1:1의 관계를 이루어 추적자로 활용한 두 방법 사이에 유사한 경향을 가지는 것으로 이해할 수 있다. 해안에서 가장 멀리 떨어진 BH-3 관측정의 경우 혼합비가 매우 낮아 담수와 가까운 성분을 보이며, 사주 지역의 두 관측정은 낮은 심도에서는 0.2 이하의 낮은 값을 보이나 깊은 심도에서는 0.4~0.6 정도의 혼합비를 보인다. 특히 이론적으로는 바다에 가까운 BH-1 관측정에서 더 높은

Fig. 10. Plot showing the mixing ratio of $\delta^{18}\text{O}$ vs. the mixing ratio of Cl ion.

Table 2. Seawater mixing ratio based on Cl concentrations and $\delta^{18}\text{O}$

	Sample	Cl	$\delta^{18}\text{O}$
Mar. 2020	BH-1 (5m)	0.09	0.13
	BH-1 (10m)	0.35	0.41
	BH-1 (15m)	0.44	0.52
	BH-2 (3m)	0.17	0.18
	BH-2 (8m)	0.35	0.41
	BH-2 (15m)	0.66	0.73
	BH-3 (7m)	0.00	0.00
	BH-3 (15m)	0.00	0.00
	Lagoon	0.29	0.45
Nov. 2020	BH-1 (5m)	0.09	0.01
	BH-1 (10m)	0.60	0.61
	BH-1 (15m)	0.57	0.61
	BH-2 (3m)	0.03	0.00
	BH-2 (8m)	0.36	0.37
	BH-2 (15m)	0.87	0.87
	BH-3 (7m)	0.00	0.00
	BH-3 (15m)	0.00	0.00
	Lagoon	0.24	0.40
Mean		0.28	0.32
		0.30	

혼합비가 나타나야 하는데, BH-2 관측정의 깊은 심도에서 혼합비가 0.6 이상으로 매우 높은 값을 보이고 있다. 이를 이해하기 위해서는 추가적인 연구를 수행하여 BH-2 관측정의 15m 부근의 대수층 특성을 파악할 필요가 있다.

5. 결 론

이번 연구에 의하면 연구 대상지역인 화진포의 사주는 두께 15m 이상의 모래층이 분포하고 있다. 이 모래층은 투수성이 매우 양호한 대수층으로 바다에서 석호 방향으로 켜기형태의 담수-염수 경계면(점이대)이 분포하며, 위치는 석호 및 지하수 수위 변화에 영향을 받는 것으로 확인된다. 강수량이 적은 기간이 지속되면, 석호 및 사주 지역에 대수층에서 증발산에 의하여 수위가 해수면 부근 또는 그보다 낮게 분포하는 시기가 존재하는데, 이러한 수위 하강은 담수-염수 경계면이 내륙방향으로 이동(진출)하게 하며, 석호 하부에서는 경계면의 상승을 유발할 수 있다. 특히 석호 수위가 해수면보다 낮은 기간이 지속되면, 담수-염수 경계면이 상승하여 석호 바닥으로 염수(해수)의 유입이 발생할 수 있다.

수리지구 화학적 특징으로는 해수침투가 발생함에 따라 대수층의 지질매체가 가지고 있던 칼슘 이온이 해수 기원인 마그네슘과 나트륨 이온으로 대체되는 현상이 나타났다. 이온델타와 포화지수를 통해 분석한 결과 해수 침투로 인한 수리지구 화학적 변화가 일어나 칼슘을 함유하는 방해석은 용해되고 마그네슘을 함유하는 돌로마이트는 침전이 일어났음을 알 수 있다. 또한 파이퍼 다이어그램으로 수질 특성을 분석한 결과 대부분의 지하수와 호소수가 해수와 동일한 유형으로 나타나 해수의 영향을 크게 받았음을 확인하였다. 물안정동위원소 분석 결과 해수 침투에 따른 영향을 받은 것 판단된다. 또한 산소동위원소를 추적자로 활용하여 계산한 해수의 혼합비는 염소이온을 추적자로 활용한 결과와 유사한 경향을 보였다. 해수 혼합비는 해안과의 거리가 가까울수록, 심도가 깊을수록 높은 값을 보이는 경향이 있으나 일부 결과는 그 부근의 대수층 특성으로 인해 예상한 바와 상이하였다.

이번 연구의 결과는 주로 정성적인 측면에서 대수층을 통한 해수침투 기작과 그 영향을 검토하였기 때문에 결과의 타당성 및 보편성을 확보하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 특히 지속적인 수위 및 수질 모니터링을 수행하여 계절적인 변화를 분석한다면 다양한 조건에서의 해수침투 영향을 파악할 수 있을 것이다. 또한 담수-염수 경계면 계산식은 평형상태를 가정한 것으로, 실제 현상은 부정류 상태이므로 수위변화를 고려한 부정류 수치모사를 통하여 현재의 시나리오를 구현할 필요가 있다.

사 사

본 연구는 환경부 “지중환경오염·위해관리기술개발사업; 2020 SEM (Subsurface Environment Management) projects-2020002470001”으로 지원받은 과제임

References

- Andersen, M.S., Nyvang, V., Jakobsen, R. and Postma, D. (2005) Geochemical processes and solute transport at the seawater/freshwater interface of a sandy aquifer. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.69, p.3979-3994. doi: 10.1016/j.gca.2005.03.017
- Chang, S.W., Chung, I.M., Kim, M.G., Tolera, M. and Koh, G.W. (2019) Application of GALDIT in assessing the seawater intrusion vulnerability of Jeju Island, South Korea. *Water*, v.11, p.1824. doi: 10.3390/w11091824
- Chang, S.W., Chung, I.M., Kim, M.G. and Yifru, B.A. (2020) Vulnerability assessment considering impact of future groundwater exploitation on coastal groundwater resources in northeastern Jeju Island, South Korea. *Environ. Earth Sci.*, v.79, p.498. doi: 10.1007/s12665-020-09254-2
- Cho, J.N. and Woo, K.S. (2018) Proposal for legal protection of the geosites in National Geoparks in Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v.54, p.237-256 (in Korean with English abstract)
- Colombani, N. and Mastrocicco, M. (2017) Modelling the salinization of a coastal lagoon-aquifer system. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, v.82, 012003. doi: 10.1088/1755-1315/82/1/012003
- Jeen, S.W., Kang, J., Jung, H. and Lee, J. (2021) Review of Seawater Intrusion in Western Coastal Regions of South Korea. *Water*, v.13 p.761. doi: 10.3390/w13060761
- Kim, J.H., Kim, S.Y., Hong, J.K., Nam, G.H., An, J.H., Lee, B.Y. and Kim, J.S. (2017). Floristic study of lagoon areas on the eastern coast in Korean peninsula. *Korean J. Pl. Taxon.*, v.47, p.51-93. doi: 10.11110/kjpt.2017.47.1.51
- Kim, K.Y., Seong, H., Kim, T., Park, K.H., Woo, N.C., Park, Y.S., Koh, G.W. and Park, W.B. (2006) Tidal effects on variations of fresh-saltwater interface and groundwater flow in a multilayered coastal aquifer on a volcanic island (Jeju Island, Korea). *J. Hydrol.*, v.330, p.525-542. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.04.022
- Kim, Y.T., Hyun, S.G., Cheong, J.Y., Woo, N.C. and Lee, S. (2018) Hydrogeochemistry in the coastal area during construction of geological repository. *J. Hydrol.*, v.562, p.40-49. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.04.071
- Kwon, E., Park, J., Lee, J.M., Kim, Y.-T. and Woo, N.C. (2020) Spatiotemporal changes in hydrogeochemistry of coastal groundwater through the construction of underground disposal facility for low and intermediate level radioactive wastes in Korea. *J. Hydrol.*, v.584, 124750. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124750
- Lee, E., Lim, J.W., Moon, H.S. and Lee, K.K. (2015) Assessment of seawater intrusion into underground oil storage cavern and prediction of its sustainability. *Environ. Earth Sci.*, v.73, p.1179-1190. doi: 10.1007/s12665-014-3473-5
- Lee, J. (2018) A study on propagation of uncertainties for a mixing ratio calculation by seawater intrusion. *J. Geo. Soc. Korea*, v.54, p.579-584. (in Korean with English abstract)
- Lee, J., Kim, J.H., Kim, H.M. and Chang, H.W. (2007) Statistical approach to determine the salinized ground water flow path and hydrogeochemical features around the underground LPG cavern, Korea. *Hydrol. Process.*, v.21, p.3615-3626. doi: 10.1002/hyp.6589
- Lee, J., Kim, R.H. and Chang, H.W. (2003) Interaction between groundwater quality and hydraulic head in an area around an underground LPG storage cavern, Korea. *Environ. Geol.*, v.43, p.901-912. doi: 10.1007/s00254-002-0720-y
- Lim, J.W., Lee, E., Moon, H.S. and Lee, K.K. (2013) Integrated investigation of seawater intrusion around oil storage caverns in a coastal fractured aquifer using hydrogeochemical and isotopic data. *J. Hydrol.*, v.486, p.202-210. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.01.023
- Liu, Y., Jiao, J.J., Liang, W. and Kuang, X. (2017) Hydrogeochemical characteristics in coastal groundwater mixing zone. *Applied Geochemistry*, v.85, p.49-60. doi: 10.1016/j.apgeochem.2017.09.002
- Menció, A., Casamitjana, X., Mas-Pla, J., Coll, N., Compte, J., Martinoy, M., Pascual, J. and Quintana, X.D. (2017) Groundwater dependence of coastal lagoons: The case of La Pleta salt marshes (NE Catalonia). *J. Hydrol.*, v.552, p.793-806. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.07.034
- Parkhurst D.L. and Appelo C.A.J. (1999) User's guide to PHREEQC (Version 2)—A computer program for speciation, reaction-path, 1D-transport, and inverse geochemical calculations. *U.S. Geol. Surv. Water Resour. Inv. Rep.*, 99-4259. doi: 10.3133/wri994259
- Park, S.C., Choi J.S., Choi E.Y., Jang Y.S., Lee K.Y. and Choi, J.K. (2007) The Characteristics of Fish Community in the Lagoon Hwajinpo, Korea. *Korean J. Limnol.*, v.40, p.449-458. (in Korean with English abstract)
- Rodellas, V., Stieglitz, T.C., Andrisoa, A., Cook, P.G., Raimbault, P., Tamborski, J.J., Beek, P. and Radakovitch, O. (2018) Groundwater-driven nutrient inputs to coastal lagoons: The relevance of lagoon water recirculation as a conveyor of dissolved nutrients. *Sci. Total Environ.*, v.642, p.764-780. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.095
- Shin, K., Koh, D.C., Jung, H. and Lee, J. (2020) The Hydrogeochemical Characteristics of Groundwater Subjected to Seawater Intrusion in the Archipelago, Korea. *Water*, v.12, p.1542. doi: 10.3390/w12061542
- Verruijt, A. (1968) A note on the Ghyben-Herzberg formula. *Hydrolog. Sci. J.*, v.13, p.43-46. doi: 10.1080/02626666809493624
- Yum, J., Yu, K., Takemura, K., Naruse, T., Kitamura, A., Kitagawa, H. and Kim, J. (2004) Holocene Evolution of the Outer Lake of Hwajinpo Lagoon On the Eastern Coast of Korea; Environmental Changes with Holocene Sea-Level Fluctuation of the East Sea (Sea of Japan). *Radiocarbon*, v.46, p.797-808. doi: 10.1017/S0033822200035839
- Yum, J., Yu, K., Yoshikazu, S., Takao, T. and Tadashi, N. (2002) Depositional environmental change during the last 400 years in the Hwajinpo lagoon on the eastern coast of Korea. *J. Geo. Soc. Korea*, v.38, p.21-32. (in Korean with English abstract)