

수리화학적 환경 추적자를 이용한 강원도 석호지역에서의 지하수-지표수 상호작용에 대한 연구

김동훈¹ · 이정윤¹ · 조수영¹ · 문희선¹ · 정윤영² · 박예진³ · 오용화^{3*}

¹한국지질자원연구원 기후변화대응연구본부 지하수환경연구센터

²한국기초과학지원연구원 환경분석연구부

³한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 해양과학기술융합학과

Determining Groundwater-surface Water Interaction at Coastal Lagoons using Hydrogeochemical Tracers

Dong-Hun Kim¹ · Jung-Yun Lee¹ · Soo Young Cho¹ · Hee Sun Moon¹ · Youn-Young Jung²
Yejin Park³ · Yong Hwa Oh^{3*}

¹Groundwater Environment Research Center, Climate Change Response Division,
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

²Korea Basic Science Institute, Chungbuk 28119, Republic of Korea

³Department of Convergence Study on the Ocean Science and Technology, Korea Maritime and Ocean University,
Busan 49112, Republic of Korea

ABSTRACT

Groundwater-surface water interaction was evaluated using water quality parameters (temperature and electrical conductivity), distributions of stable water isotopes ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$), and Rn-222 in lagoon water, groundwater, and seawater at three coastal lagoons (Songji (SJ), Youngrang (YR), and Sunpo (SP) Lagoon) in South Korea. From the results of composition and distributions of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$, it was found that groundwater fraction of lagoon water in YR Lagoon (76%) was slightly higher than those of SJ (42%), and SP (63%) Lagoon. Based on Rn-222 mass balance model, groundwater discharge into SJ Lagoon in summer 2020 was estimated to be $(3.2 \pm 1.1) \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$, which showed a similar or an order of magnitude higher than the results of previous studies conducted in coastal lagoons. This study can provide advanced techniques to evaluate groundwater-surface water interaction in coastal lagoons, wetlands, and lakes, and help to determine the effects of groundwater on coastal ecosystems.

Key words : Groundwater-surface water interaction, Rn-222 mass balance, Groundwater inflow, Water stable isotope, Coastal lagoon

1. 서 론

지하수는 물의 순환(hydrological water cycle)에서 담수를 저장하는 중요한 저장소이며, 연안 지역 주민들에게

는 생활용수, 농업/산업용수 등을 공급하는 중요한 수자원 역할을 하고 있다. 지하수는 자원학적으로 중요할 뿐만 아니라, 생태학적 관점에서도 중요성이 부각되고 있다. 자연적 또는 인위적으로 발생한 육상 기원 용존 물질들(탄소, 영양염, 중금속 등)이 지하수를 통해 해양으로 유입되는 거동 및 해양에서의 지하수 유출의 영향에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Ganguli et al., 2012; Jeffrey et al., 2016; Santos et al., 2021). 연안환경에서 강물, 해수, 석호수 등의 지표수에 비해 지하수 중에 상대적으로 높은 농도의 용존무기영양염(용존무기 질소, 용존무기 인, 용존무기 규소)이 포함되어 있기 때문에 적은 양의 지하수가

주저자: 김동훈, 책임연구원

공저자: 이정윤, 박사과정 연구생; 조수영, 책임기술원; 문희선, 책임연구원; 정윤영, 박사 후 연구원; 박예진, 석사과정 연구생

*교신저자: 오용화, 조교수

Email: yhoh@kmou.ac.kr

Received : 2023. 03. 10 Reviewed : 2023. 03. 30

Accepted : 2023. 04. 10 Discussion until : 2023. 06. 30

해양으로 유입되더라도 연안환경의 극적인 생지화학적 변화를 초래할 수도 있다(Schmidt et al., 2011).

지난 수십 년 동안, 지하수의존 생태계(Groundwater-Dependent Ecosystems; GDEs)에 대한 다양한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 지하수의존 생태계(또는 지하수종속 생태계)란, 생태계의 구성, 구조, 기능이 지하수의 공급에 의존하는 생태계 또는 식물과 동물 군집이 현재 구성과 기능을 유지하기 위해 부분적으로 또는 전적으로 지하수에 의존하는 생태계를 의미한다(Erostate et al., 2020; Kløve et al., 2014). 이러한 GDEs는 대수층, 동굴 생태계, 그리고 지하수에 의존하는 육상 식물, 수생, 강기슭 생태계를 포함하는 하천, 강, 호소, 샘(spring), 습지, 석호 등 지하수-지표수 상호작용의 중요성이 강조되는 시스템으로 알려져 있다(Eamus et al., 2006). 이 중 연안환경에 위치해 있는 습지나 석호의 경우, 특히 강수량이 적은 시기(건기)에 수체 내부로의 지하수의 유입은 지표수 유입의 부족분을 보상하거나 지원하여 지하수의존 생태계가 유지될 수 있도록 하고 있다(Erostate et al., 2020).

석호는 사주나 사취의 발달로 바다와 격리된 호수로, 전 세계적으로 해안선의 약 13%를 차지하고 있으며(Kjerfve, 1994), 육상과 해양을 연결하는 전이지대(transitional zone)이기 때문에 석호 내부로 유입되는 육상기원의 지하수와 지표수(하천, 강) 뿐만 아니라, 해수의 유입에 의해서도 크게 영향을 받는다. 연안 석호는 다양한 담수형/해양형 철새, 어류, 식물이 공존하고 있는 매우 독특한 생태계를 유지하는 곳이며, 상업적 가치가 큰 어류의 산란처와 피란처로서의 가치를 지닐 뿐만 아니라, 관광객과 주민에게 심미적 공간을 제공하며, 석호 퇴적물의 경우 고생물학적이거나 고고학적으로 중요한 자료로 이용될 수 있다(Kwak et al., 2005; Song et al., 2019). 우리나라 석호는 홀로세 해면 변동과 관련되어 형성되었으며, 사주가 잘 발달되어 있으며 좁은 입구 수로나 지하를 통해 해양과 연결되는 특성을 보여 기수역, 하구, 만 등과 차이점을 보인다.

그러나, 석호 중 일부는 육화/해양화 등으로 현재는 대부분 형태를 잃어버렸으며, 난개발로 인해 석호의 자연환경이 심각하게 훼손되거나 인구 증가로 인한 생활하수의 유입, 하구에서의 담수-염수 교환의 차단, 준설로 인한 수심 증가 등으로 인해 수질이 악화될 수 있는 가능성이 있어 향후 체계적인 관리 보전이 요구되어 있는 실정이다. 석호의 문제점과 관련하여, 경포호를 비롯한 강원도 석호 6곳의 수질 평가 결과, 모든 석호에서 부영양화가 매우 심한 것으로 조사된 바 있다(Heo et al., 1999). 영랑호의

경우, 2008년 여름철 태풍으로 인한 저층 황화물 확산에 따른 어류 폐사가 일어나기도 하였고, 2014년부터 2016년까지 영랑호 석호수의 수질 조사를 실시한 결과, 특정 시기에 석호수 저층에서 용존산소 농도 1 mg L^{-1} 이하의 무산소층이 형성되었다고 보고된 바 있다(Huh et al., 2017). 또한, 경포호를 포함한 동해안 석호 10곳의 미량금속 분석 결과, 낮은 유입 수량으로 인해 수체 교환율이 낮아 퇴적물과 공극수 중 Cu, Cd, Pb 등의 유해 중금속들이 높은 농도로 축적되어 있다고 보고된 바 있다(Kim et al., 2008). 최근, 2022년 12월 송지호에서는 급격한 수온 저하가 원인으로 추정되는 전어 집단 폐사가 발생하여, 석호의 체계적인 물리/화학/생태학적 연구의 중요성을 시사한 바 있다.

미국, 호주, 유럽 국가에서는 이러한 지하수의존 생태계에서의 지하수의 중요성을 인식하고 습지, 호수, 석호, 만(bay) 등의 수 환경에서 지하수-지표수 상호작용을 이해하기 위해 물 안정동위원소(^2H 와 ^{18}O), Rn, Ra, Na, Cl, Ca 등의 수리화학적 환경 추적자(environmental tracer)를 이용하여 수계 내로 유입되는 지하수를 정량적으로 평가하는 연구가 수행된 바 있다(Corbett et al., 1997; FeroneDevito, 2004; Hayashi et al., 1998; Heagle et al., 2007; Kizuka et al., 2011; Krabbenhoft et al., 1990; Schmidt et al., 2009). 국내에는 기저 유출, 해저지하수 유출 등과 관련되어 지하수의 영향, 질적/양적 중요성을 평가하는 연구가 조금씩 진행되어 가고 있으나(Hwang et al., 2010; Kim et al., 2011; Oh et al., 2020a), 습지, 석호 등에서 지하수 유입량을 정량 평가하는 연구는 아직 미흡한 상황이다. 이러한 연구는 석호의 수질개선을 통해 생태계의 복원과 안정성을 확보하는데 기반이 되는 연구이며, 가장 선행되어야 할 사안이라 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 강원도 석호 중 송지호, 영랑호, 순포호를 대상으로 석호수, 주변 지하수, 해수의 주요 이온 농도 분포, ^2H 와 ^{18}O 농도 분석을 통한 해수-담지하수 혼합 비율 및 Rn-222의 물질 수지를 이용한 지하수 유입량 산정 등 다양한 수리화학적 자료의 분석을 통해 석호 내 지하수-지표수 상호작용에 대한 연구를 수행하였다.

2. 연구 지역 및 방법

2.1. 강원도 동해안의 석호: 송지호, 영랑호, 순포호

연구 지역인 송지호, 영랑호, 순포호(순포습지)는 강원도 동해안에 존재하는 자연 석호이다. 이 석호들이 위치한 지역의 연평균 강수량과 온도는 각각 1,200 - 1,300

mm과 $-4 - 26^{\circ}\text{C}$ 의 범위를 보이며, 조석차는 약 50 cm 정도이다(Yum et al., 2015). 강원도 동해안 일대의 기저암은 중생대 류라기의 대보화강암으로 되어 있다(WREA, 2019).

강원도 고성에 위치한 송지호는 한반도에서 5번째로 큰 자연 호수로, 면적 약 0.6 km^2 , 둘레 5.56 km, 유역 면적 5.4 km^2 , 최대 수심 2.6 m로 보고된 바 있다(Yum et al., 2015). 송지호 주변은 대부분 얇은 산지, 농지, 산, 바다로 이루어져 있으며, 송지호 내부는 모양상 북쪽과 남쪽으로 구분되지만 서로 이어져 있어 쉽게 이동할 수 있는 수체로 되어있다. 석호 내부로 해수가 유입될 수 있는 유입통로가 송호교 부근에 있으나, 평상시는 사구에 의해 해안과는 격리되어 있고, 여름철 강우가 집중되는 시기에 석호수의 수위가 높아져 갯터짐이 발생하여 담수가 연안으로 유입된다(Jeon et al., 2021). 영랑호는 강원도 속초에 위치해 있으며 유역 면적 약 9 km^2 , 표면적 약 1 km^2 , 둘레 7.4 km, 그리고 약 4 m의 평균 수심(최대 수심: 8 m)을 유지하고 있다(WREA, 2015). 영랑호의 동쪽은 대부분 시가지이며, 북/서쪽은 논과 밭으로 이용되고 있으며, 남쪽에 골프장 등 위락시설이 위치해 있다. 영랑호의 경우, 송지호와 달리 연중 해수와 담수의 교환이 일어나고 있는 특징을 갖는다. 강원도 강릉에 위치한 순포호는 석호의 일부가 육상화(수면적 변화: 1920년도 $89,000 \text{ m}^2$;

2000년대 $26,000 \text{ m}^2$) 되었다가, 생태 하천 복원 사업으로 현재의 수면적 $79,000 \text{ m}^2$ 로 복원되었다(WREA, 2015). 순포호는 송지호와 유사하게 해안가의 사구로 인해 바다와의 연결이 차단되어 있으며, 수심이 낮아 대형수초와 다양한 생물의 서식지가 되고 있어 생태학적으로 중요성을 가지고 있다(BaeKang, 2018).

2.2. 시료 채취

2020년 6월 말과 7월 초에 걸쳐 현장 수질(수온, 전기 전도도, pH), 주요 용존 양/음이온, 물 동위원소($\delta^2\text{H}$ 와 $\delta^{18}\text{O}$) 농도 분석을 위해 송지호, 영랑호, 순포호에서 지하수, 석호수, 해수 시료를 채취하였다(Fig. 1). 지하수의 경우, 현장 수질이 안정된 후 시료를 채취하였다. 현장 수질은 휴대용 수질측정장비(Multi 3620 IDS, WTW, Germany)를 이용하여 측정하였다. 주요 용존 양이온(Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+), 용존 음이온(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), 물 동위원소 분석을 위해 시료를 $0.45 \mu\text{m}$ membrane filter(Advantec, Japan)를 이용하여 필터 하였다. 양이온 시료는 용기 벽면 흡착과 침전을 방지하기 위해, 현장에서 질산(HNO_3)을 첨가하여 시료의 pH를 2 이하로 유지하였고(Oh et al., 2020a), 음이온 시료와 물 동위원소 분석 시료와 함께 4°C 내외로 보관하여 운반하였다(Jeon et al., 2021). 석호 내로 유입되는 지하수 유입량을 산정하기

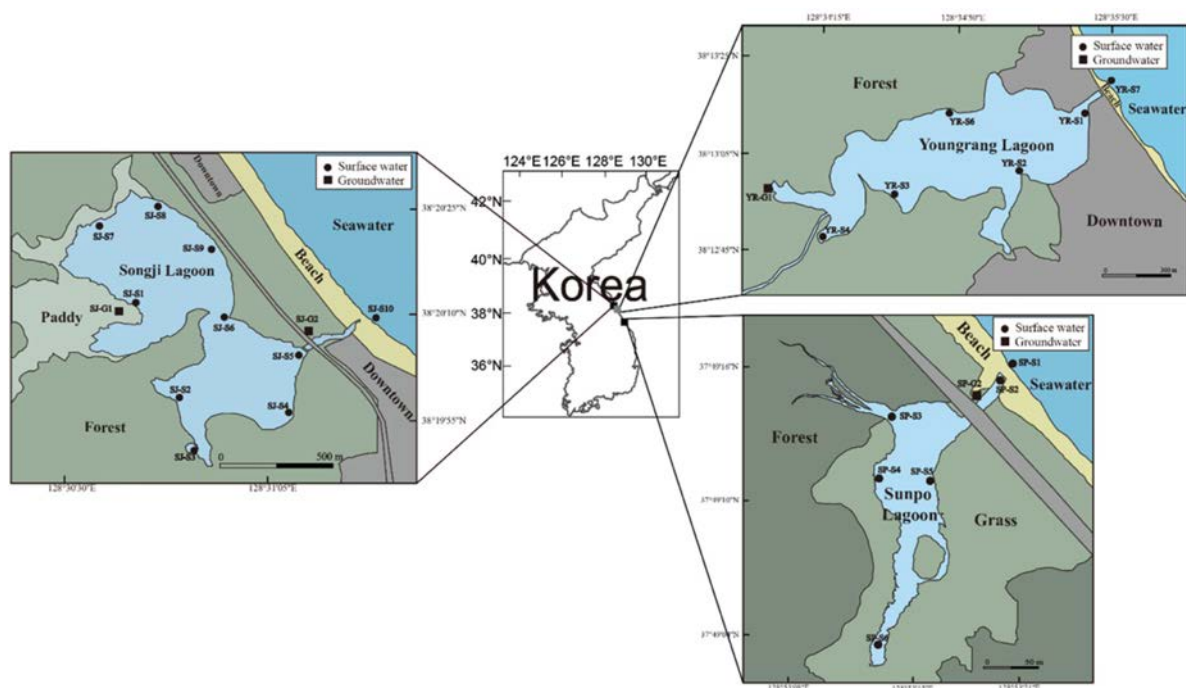


Fig. 1. Sampling locations for groundwater and surface water (lagoon water and seawater) in the Songji, Youngrang, and Sunpo Lagoon.

위하여 2020년 8월 송지호 부근 지하수와 석호수를 채취하여 Rn-222 농도를 측정하였다.

2.3. 주요 용존 이온, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, Rn-222 농도 분석

지하수, 석호수, 해수 시료의 주요 용존 양이온, 음이온, HCO_3^- (total alkalinity) 농도는 각각 유도결합 플라즈마 분광광도계(ICP-OES; Optima 7300 DV; Perkin Elmer, USA), 이온크로마토그래피(IC; ICS-1500; Dionex, USA), 자동적정기(T50 Titrator; Mettler-Toledo, USA)를 이용하여 측정하였다. Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- 농도의 검출 한계는 각각 0.02, 0.1, 0.1, 0.01, 0.01, 0.05, 0.04 mg/L로 측정되었다. $\delta^2\text{H}$ 와 $\delta^{18}\text{O}$ 농도 분석은 한국기초과학지원연구원에 의뢰하여 안정동위원소 질량분석기(Stable Isotope Ratio Mass Spectrometer)로 분석하였다. 각각의 분석 정밀도는 각각 $\pm 0.1\%$, $\pm 1.0\%$ 였으며, 동위원소 조성은 VSMOW(Vienna Standard Mean Ocean Water)에 표준화(‰)하여 나타내었다. 시료 중 Rn-222의 농도 측정은 한국지질자원연구원의 극저준위의 알파, 베타핵종의 측정에 효과적인 것으로 알려진 액체섬광계수기(Liquid Scintillation Counter; LSC; Perkin Elmer, Wallac 1220 Quantulus)를 이용하여 수행하였다(Oh et al., 2020b).

2.4. Rn-222 물질 수지

지표수와 지하수 중 Rn-222 농도를 바탕으로, 석호, 호수 등 다양한 환경에서 지하수 유입량 산정을 위해 이용되는 Rn-222 물질 수지(식 1)를 사용하여 석호 내로 유입되는 지하수 유입량을 산정하였다(BurnettDulaiova, 2003; Sadat-Noori et al., 2015; Santos et al., 2014).

$$F_{in} + F_{gw} + F_{dif} + F_{ing} = F_{out} + F_{dec} + F_{atm} \quad (1)$$

이 때, 석호가 단순 박스이며 정상상태(steady state)라 가정, 즉 Rn-222의 공급원과 제거원이 같다는 전제 하에 지하수 유출량을 산정하였다. F_{in} , F_{gw} , F_{dif} , F_{ing} 는 Rn-222의 공급원으로 각각 석호로 유입되는 하천에 의한 공급, 지하수를 통한 공급, 바닥 퇴적물로부터의 확산에 의한 공급, 어미핵종(Ra-226)으로부터 Rn-222의 생성에 의한 공급을 나타낸다(unit: Bq day^{-1}). Rn-222의 제거원인 F_{out} , F_{dec} , F_{atm} 는 각각 석호수가 해안으로 방출되는 과정에서의 Rn-222의 제거, Rn-222의 방사성붕괴에 의한 제거, 대기로의 확산에 의한 Rn-222의 제거를 나타낸다(unit: Bq day^{-1}). 이 때, F_{in} 과 바닥 퇴적물로부터의 확산에 의한 Rn-222의 공급(F_{dif})은 퇴적물의 Ra-226의 농도

측정을 통해 산정되거나(Burnett et al., 2003; Cockenpot et al., 2015), 퇴적물을 이용한 실내 실험을 통해 산정된다(Corbett et al., 1998). 본 연구에서는 현장 퇴적물 시료를 채취하지 못하여, 기존 연구에서 측정된 퇴적물의 Ra-226 농도의 평균값과 식 2를 이용하여 F_{dif} 값을 추정하였다(Cockenpot et al., 2015; Oh et al., 2020a; Oh et al., 2021). 여기서, A는 송지호 면적, $^{226}\text{Ra}_{sed}$ 는 퇴적물의 Ra-226 농도의 평균값(약 35 Bq kg^{-1})을 의미한다.

$$F_{dif} = A(0.495 \times ^{226}\text{Ra}_{sed} + 0.303) \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 현장 수질

송지호, 영랑호, 순포호의 지하수(GW), 석호수(LW), 그리고 해수(SW)의 수온, 전기전도도, pH는 시료 채취 시 현장에서 측정하였다(Table 1). 송지호, 영랑호, 순포호 3 지역 석호수(LW)의 수온, 전기전도도, pH는 각각 $22.5\text{--}29.8^\circ\text{C}$, $0.1\text{--}24.6 \text{ mS cm}^{-1}$, $7.2\text{--}8.8$ 의 범위를 보였다. 대체적으로 석호수 수온의 경우 대기 기온이 크게 반영되어 측정되었으며, pH는 전체적으로 약알칼리성을 보이며 송지호가 가장 높은 특징을 보였다. 영랑호와 순포호 석호수 시료 채취 지점 중 육상과 가까운 지점(YR-S4, SP-S6)의 경우, 다른 석호수 지점에 비해 상대적으로 낮은 전기전도도를 나타냈는데, 이는 지하수 또는 석호 내로 유입되는 작은 하천의 영향 때문이라 판단된다. 송지호의 석호수는 전체적으로 해수에 가까운 특성(높은 전기전도도)을 보였으며, 순포호의 경우 상대적으로 담수에 가까운 특성(낮은 전기전도도)을 나타냈다. 이는 지하수나 하천수 등 담수의 영향이 우세한 것으로 예상되는 순포호에 비해, 송지호의 경우 대수층이나 지표층을 통한 해수와의 교환 때문이라 추정되지만, 추가적인 연구가 필요하다 판단된다. 영랑호 석호수의 전기전도도의 경우, 상류(내륙)에서 해안으로 갈수록 상승하는 경향(즉, 기수역과 같은)이 뚜렷이 나타났으며, 이는 송지호나 순포호와 달리 해양과 석호가 직접적으로 연결되어 있고, 영랑호로 유입되는 하천의 영향이 잘 반영된 것이라 판단된다.

연구지역인 3곳 석호의 지하수(GW)의 수온, 전기전도도, pH는 각각 $15.1\text{--}20.5^\circ\text{C}$, $0.1\text{--}13.2 \text{ mS cm}^{-1}$, $6.3\text{--}7.1$ 의 범위를 보였다. 온도의 경우 석호수에 비해 낮게 측정되었으나 시료가 얇은 층적층 지하수로 지표의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. pH는 석호수나 해수에 비해 낮게 측정되었으며, 전기전도도는 석호수에 비해 매우 낮

Table 1. Field parameters and water stable isotopes of lagoon water, groundwater, and seawater at three coastal lagoons on June and July 2020

| Lagoon ^a | Water type ^b | Sample No. | Temp. (°C) ^c | EC (mS cm ⁻¹) ^d | pH | $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ | $\delta^2\text{H}_{\text{VSMOW}}$ |
|---------------------|-------------------------|------------|-------------------------|---|-----|--------------------------------------|-----------------------------------|
| SJ | GW | SJ-G1 | 18.1 | 0.9 | 6.9 | -5.8 | -38 |
| | | SJ-G2 | 15.1 | 13.2 | 6.6 | -4.7 | -31 |
| | LW | SJ-S1 | 28.1 | 19.2 | 8.4 | -2.0 | -18 |
| | | SJ-S2 | 27.7 | 19.0 | 8.4 | -2.1 | -19 |
| | | SJ-S3 | 27.6 | 19.1 | 8.6 | -2.0 | -18 |
| | | SJ-S4 | 27.9 | 19.2 | 8.7 | -1.8 | -19 |
| | | SJ-S5 | 24.9 | 20.0 | 8.6 | -2.4 | -19 |
| | | SJ-S6 | 27.1 | 18.8 | 8.7 | -2.0 | -18 |
| | | SJ-S7 | 26.7 | 18.3 | 8.6 | -2.2 | -19 |
| | | SJ-S8 | 26.4 | 18.3 | 8.7 | -2.2 | -19 |
| | | SJ-S9 | 27.4 | 18.7 | 8.8 | -2.0 | -19 |
| YR | SW | SJ-S10 | 21.2 | 35.2 | 8.4 | 0.2 | -1 |
| | GW | YR-G1 | 17.3 | 0.3 | 6.3 | -8.0 | -51 |
| | | YR-S1 | 23.8 | 24.6 | 7.4 | -4.1 | -30 |
| | LW | YR-S2 | 25.5 | 16.9 | 7.7 | -5.9 | -40 |
| | | YR-S3 | 25.5 | 12.9 | 7.8 | -6.7 | -46 |
| | | YR-S4 | 25.0 | 2.9 | 8.0 | -7.7 | -51 |
| | | YR-S6 | 26.1 | 15.1 | 7.4 | -6.4 | -44 |
| | | YR-S7 | 21.4 | 38.9 | 7.8 | -0.4 | -4 |
| | SW | YR-S7 | 21.4 | 38.9 | 7.8 | -0.4 | -4 |
| SP | GW | SP-G2 | 20.5 | 2.5 | 7.1 | -3.8 | -28 |
| | | SP-S1 | 19.5 | 34.5 | 7.8 | 0.2 | -1 |
| | LW | SP-S2 | 26.7 | 1.3 | 8.7 | -2.6 | -25 |
| | | SP-S3 | 27.0 | 1.1 | 8.3 | -2.5 | -25 |
| | | SP-S4 | 28.4 | 1.2 | 8.2 | -2.2 | -24 |
| | | SP-S5 | 29.8 | 1.2 | 8.8 | -1.9 | -22 |
| | | SP-S6 | 22.5 | 0.1 | 7.2 | -6.1 | -41 |

^aSJ: Songji Lagoon, YR: Youngrang Lagoon, SP: Sunpo Lagoon^bGW: groundwater, LW: lagoon water, SW: seawater^cTemperature^dElectrical conductivity

게 측정되었으나 일반적인 지하수에 비해 높은 것으로 보아 석호수의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. 송지호 지하수의 경우, 해안가에 위치한 관정(SJ-G2)의 전기전도도가 내륙에 위치한 지하수 관정(SJ-G1)보다 상대적으로 10배 이상 높게 관측되었는데, 이는 SJ-G2 관정이 해안가에 설치되어 해수의 영향을 받았기 때문이라 판단된다. 해수(SW) 시료의 경우, 3곳의 석호 간 차이점이 크게 나타나지 않았다. 현장 수질 측정 결과, 3곳의 석호는 지형학적 특성(석호의 위치 및 하천의 영향)에 영향을 받으며, 이에 따라 지하수-석호수-해수 상호작용이 다르게 나타나 현장 수질에 영향을 미친 것이라 사료된다.

3.2. 주요 용존 이온 분포 특성

석호 환경에서의 수질 유형을 파악하기 위하여, 연구지역에서 채취된 석호수, 지하수, 해수 중 주요 용존 양이온과 용존 음이온 농도 분석 결과를 Piper diagram에 도시하였다(Fig. 2). 분석된 석호수, 지하수, 해수 시료의 모든 시료의 전하균형오류(charge balance error; CBE)는 $4 \pm 2\%$ (평균 \pm 표준편차)로 분석의 신뢰성이 높은 것으로 판단된다. 시료의 대부분이 Na-Cl type에 도시되었는데, 이는 현장 수질 결과와 유사하게, 석호수와 지하수 시료가 염수(saline water) 또는 해수(seawater)의 영향을 받고 있음을 지시한다. 반면, 영랑호의 지하수 시료의 경우 Ca-Mg-HCO₃ type에 도시되었다. 일반적으로, 강우에 빠르

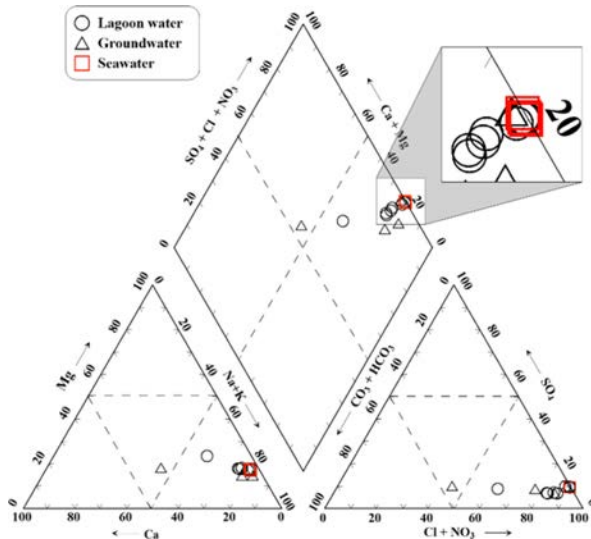


Fig. 2. Piper diagram for the lagoon water (open circle), groundwater (open triangle), and seawater (open red square) samples collected from the Songji, Youngrang, and Sunpo Lagoon.

게 반응하는 천부지하수의 경우 Ca-HCO_3 type이 우세한 반면, 체류시간이 긴 심부지하수의 경우 Na-HCO_3 type이 우세하다(Ahn, 2012; Lee and Lee, 2000). 따라서, 영랑호 지하수는 염수나 해수의 영향보다는 방해석이나 돌로마이트와의 물-암석 반응이 지배적인 것으로 판단된다.

3.3. $\delta^2\text{H}$ 와 $\delta^{18}\text{O}$ 농도 분포와 지하수-해수 혼합 비율

2020년 6월과 7월 송지호, 영랑호, 순포호의 석호수, 지하수, 해수 중 $\delta^2\text{H}$ 와 $\delta^{18}\text{O}$ 값 측정 결과는 각각 Fig. 3과 4에 도시되어져 있다. 송지호의 경우 석호수 간의 동위원소 조성의 차이가 없었으며, 영랑호와 순포호의 경우 내륙으로 갈수록 동위원소 조성이 결핍되는 분포특성을 보였다. 이는 내륙으로 갈수록 해수(부화된 $\delta^2\text{H}$ 와 $\delta^{18}\text{O}$ 값)보다는 지하수/하천수(결핍된 $\delta^2\text{H}$ 와 $\delta^{18}\text{O}$ 값) 등의 영향을 더 많이 받았기 때문이라 판단된다. 또한, 영랑호의 석호수 시료가 다른 두 석호에 비해 상대적으로 결핍된 $\delta^2\text{H}$ 와 $\delta^{18}\text{O}$ 값을 나타냈으며, 기존에 보고된 해당 구역

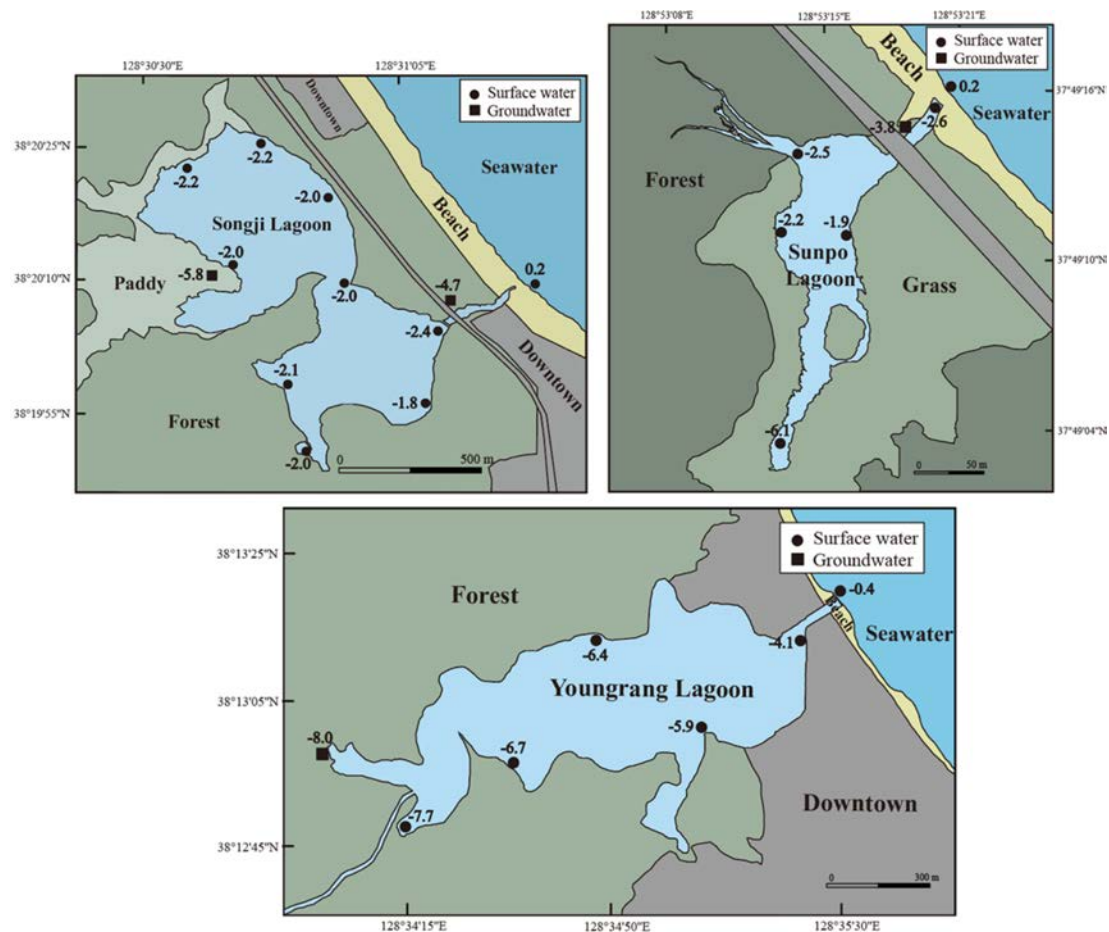


Fig. 3. Spatial distributions of $\delta^{18}\text{O}$ of surface water (lagoon water and seawater) and groundwater at Songji, Youngrang, and Sunpo Lagoon.

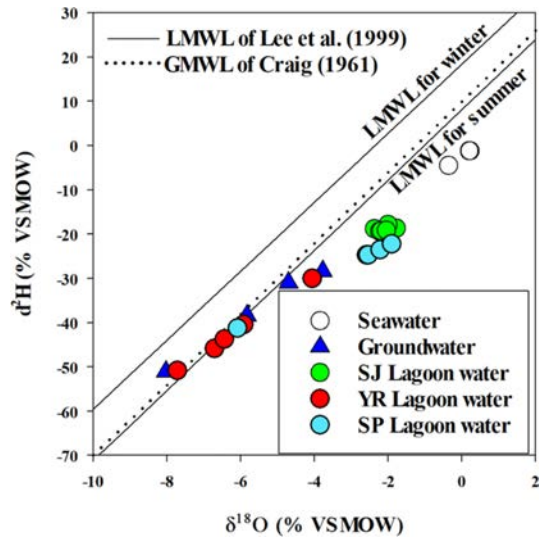


Fig. 5. Stable isotopic compositions of lagoon water (green, blue, and red circles), groundwater (blue triangle), and seawater (open circle) sampled in June and July 2020 at in the Songji (SJ), Youngrang (YR), and Sunpo (SP) Lagoon. The solid and dashed lines represent local meteoric water lines (LMWL; Lee and Lee 1999) and global meteoric water line (GMWL; Craig 1961), respectively.

GW, SW는 각각 석호수, 지하수, 해수를 의미한다. 앞서 언급한 바와 같이, 송지호와 순포호의 경우 증발에 의해 석호수 중 $\delta^{18}\text{O}$ 값의 변화를 가져올 수 있으나, 본 연구에서는 해당 지역 강우의 연평균 $\delta^{18}\text{O}$ 값을 확보하지 못하여, 단순 혼합을 가정하고 지하수가 차지하는 비율을 추정하였다. 식 3을 통해 추정된 석호수 중 지하수가 차지하는 비율의 평균값은 송지호($42 \pm 3\%$), 영랑호($76 \pm 17\%$), 순포호($63 \pm 8\%$)로, 영랑호가 상대적으로 지하수의 영향을 크게 받고 있는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 앞서 $\delta^2\text{H}$ 와 $\delta^{18}\text{O}$ 값의 상관관계 결과와 일치하는 것으로, 물안정 동위원소의 분포도 조사가 석호를 구성하는 주된 기원 및

기여도를 파악하는데 유용한 도구임을 보여준다.

3.4. Rn-222 물질 수지를 이용한 지하수 유입량 산정

Rn-222 물질 수지를 이용하여 연안 석호로 유입되는 지하수 유입량 산정을 위해 송지호, 영랑호, 순포호의 석호수 중 Rn-222 농도를 사전 조사한 결과, 순포호의 경우 석호수 중 Rn-222 농도가 측정한계(0.2 Bq L^{-1}) 미만으로 측정되었고, 영랑호의 경우 Rn-222 물질 수지에 필요한 석호수가 해양으로 유출되는 양을 측정하기 어려웠던 두 석호에서의 지하수 유입량을 산정하지 못하였다. 반면, 송지호의 경우, 석호수와 지하수 중 Rn-222 농도를 이용 가능하고, 석호가 단순 박스이며 정상상태(steady state)라 가정 하에, 식 1의 Rn-222의 공급원(F_{in} , F_{gw} , F_{dif} , F_{ing})과 제거원(F_{out} , F_{dec} , F_{atm})을 고려하여 지하수 유입량을 산정하였다(Fig. 6). 2020년 8월 송지호 부근 지하수와 석호수 중 Rn-222 농도 분포(Table 2)를 이용하였을 때, 송지호 내부로 유입되는 지하수 유입량은 $(3.2 \pm 1.1) \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 로 산정되었다. 이 추정값은 송지호 면적(약 $550,000 \text{ m}^2$)을 고려했을 때, $(5.9 \pm 2.0) \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 환산된다. 이러한 송지호에서의 지하수 유입량을 국외 석호에서 조사된 지하수 유입량과 비교해보면, 뉴질랜드에 위치한 Te Waihora/Lake Ellesmere Lagoon의 경우, $4.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 송지호 지하수 유입량보다 10배 정도 작은 값을 나타내었다(Coluccio et al., 2021). 중국 Laoye Lagoon과 Xiaohai Lagoon의 경우, 석호 내로의 지하수 유입량이 각각 $3.5 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 과 $4.1 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 송지호와 유사한 값을 나타냈다(WangDu, 2016). 국내에서는 석호에서의 지하수 유입량 산정과 관련된 연구가 전무하기 때문에, 본 연구는 국내에 존재하는 석호로 유입되는 지하수 유입량을 최초로 정량화 하였다는데 의미가 있다.

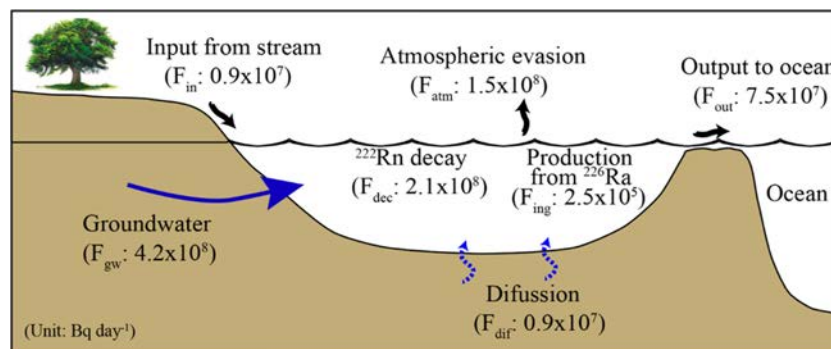


Fig. 6. Conceptual model of Rn-222 mass balance approach for quantifying groundwater discharge into Songji Lagoon, showing Rn-222 sources (F_{in} , F_{gw} , F_{dif} , and F_{ing}) and sink (F_{out} , F_{dec} , and F_{atm}) terms and their Rn-222 fluxes (Bq day^{-1}).

Table 2. Field parameters and Rn-222 concentrations of lagoon water and groundwater at Songji Lagoon on August 2020

| Water type ^a | Sample No. | Temp. (°C) ^b | EC (mS cm ⁻¹) ^c | pH | DO (mg L ⁻¹) ^d | Rn-222 (Bq L ⁻¹) |
|-------------------------|------------|-------------------------|--|-----|---------------------------------------|------------------------------|
| GW | SJ-G1 | 18.3 | 6 | 6.9 | 0.5 | 11.0±0.6 |
| | SJ-G2 | 16.7 | 28 | 6.8 | 0.1 | 15.2±0.7 |
| LW | SJ-S1 | 26.9 | 24 | 7.1 | 4.3 | 0.6±0.1 |
| | SJ-S2 | 26.2 | 25 | 7.7 | 5.4 | 0.9±0.2 |
| | SJ-S3 | 26.0 | 24 | 7.5 | 4.4 | 1.5±0.2 |
| | SJ-S4 | 26.6 | 17 | 7.3 | 3.4 | 4.0±0.4 |
| | SJ-S5 | 27.5 | 27 | 7.9 | 5.9 | 0.3±0.1 |
| | SJ-S6 | 30.8 | 22 | 8.9 | 11.3 | 0.7±0.2 |
| | SJ-S7 | 27.8 | 26 | 8.2 | 5.6 | 1.0±0.2 |
| | SJ-S8 | 25.8 | 9 | 9.4 | 12.3 | 2.2±0.3 |
| | SJ-S9 | 29.5 | 6 | 7.4 | 4.0 | 0.9±0.2 |

^aGW: groundwater, LW: lagoon water^bTemperature^cElectrical conductivity^dDissolved oxygen

4. 결 론

본 연구에서는 수리화학적 환경 추적자를 이용하여, 강원도 동해안에 위치한 송지호, 영랑호, 순포호에서 지하수-지표수 상호작용에 대해 연구하였다. 연구 지역의 석호수, 지하수, 해수의 현장수질, 주요이온 농도, $\delta^2\text{H}$ 와 $\delta^{18}\text{O}$ 값 및 지하수-해수 혼합비를 조사를 통해, 영랑호가 다른 석호에 비해 상대적으로 지하수 또는 하천수의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다. 또한, 송지호에서는 Rn-222 물질 수지를 이용하여, 석호 내부로 유입되는 지하수 유입량을 정량적으로 산정한 결과, 여름철 송지호 내부로 유입되는 지하수 유입량은 $(3.2\pm 1.1)\times 10^3 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 로 산정되었다. 본 연구는 정지상태(steady state)라는 가정하에 지하수 유입량을 산정하였고, 시료 수가 다소 부족하여 측정 오차가 커서 정확한 경향 파악에 어려움이 있으며 연구 기간이 여름철에 한정되어 지하수 유입량의 계절적 변동을 파악하지 못하였다는 한계점이 있으나, 향후 석호, 연안 습지 등에서 지하수 유입이 석호 생태계에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 최근 수십 년 간 관개용수, 물 사업, 그리고 인간에 의한 지하수 사용의 증가등으로 인해 세계 대부분 지역에서 수자원으로써의 지하수 양이 감소하고 있는 상황에서 지하수-지표수 상호작용에 대한 연구는 연안 습지, 석호 등 GDEs 보호와 관리에 있어 중요한 연구 분야로 앞으로 더욱 강조되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부에서 지원한 기본사업(기후변화 대응 대응량 지하수 확보 및 최적활용 기술 개발, GP2020-012)의 도움으로 수행되었으며, 2021학년도 한국해양대학교 신진교수 정착연구지원사업 연구비의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝힙니다. 또한, 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2021R1G1A1095400)입니다.

References

- Ahn, J.S., 2012, Geochemical occurrences of arsenic and fluoride in bedrock groundwater: a case study in Geumsan County, Korea, *Environ. Geochem. Health*, **34**, 43-54.
- Bae, K.S. and Kang, M.H., 2018, Water quality environments and benthic macroinvertebrates at the Gyeongpo Provincial Park (Gyeongpo Reservoir and Soonpo Wetland) in Korea, *Korean J. Nat. Conserv.*, **17**(1), 1-32.
- Burnett, W.C., Cable, J.E., and Corbett, D.R., 2003, Radon tracing of submarine groundwater discharge in coastal environments, *Elsevier Publications*, 25-43.
- Burnett, W.C. and Dulaiova, H., 2003, Estimating the dynamics of groundwater input into the coastal zone via continuous radon-222 measurements, *J. Environ. Radioact.*, **69**(1-2), 21-35.
- Cockenpot, S., Claude, C., and Radakovitch, O., 2015, Estimation of air-water gas exchange coefficient in a shallow lagoon based on ^{222}Rn mass balance, *J. Environ. Radioact.*, **143**, 58-69.

- Coluccio, K.M., Santos, I.R., Jeffrey, L.C., and Morgan, L.K., 2021, Groundwater discharge rates and uncertainties in a coastal lagoon using a radon mass balance, *J. Hydrol.*, **598**, 126436.
- Corbett, D., Burnett, W., Cable, P., and Clark, S., 1998, A multiple approach to the determination of radon fluxes from sediments, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **236**(1-2), 247-253.
- Corbett, D.R., Burnett, W.C., Cable, P.H., and Clark, S.B., 1997, Radon tracing of groundwater input into Par Pond, Savannah River Site, *J. Hydrol.*, **203**(1-4), 209-227.
- Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric waters, *Science*, **133**(3465), 1702-1703.
- Eamus, D., Froend, R., Loomes, R., Hose, G., and Murray, B., 2006, A functional methodology for determining the groundwater regime needed to maintain the health of groundwater-dependent vegetation, *Aust. J. Bot.*, **54**(2), 97-114.
- Erostate, M., Huneau, F., Garel, E., Ghiotti, S., Vystavna, Y., Garrido, M., and Pasqualini, V., 2020, Groundwater dependent ecosystems in coastal Mediterranean regions: Characterization, challenges and management for their protection, *Water Res.*, **172**, 115461.
- Ferone, J.M. and Devito, K.J., 2004, Shallow groundwater-surface water interactions in pond-peatland complexes along a Boreal Plains topographic gradient, *J. Hydrol.*, **292**(1-4), 75-95.
- Ganguli, P.M., Conaway, C.H., Swarzenski, P.W., Izbicki, J.A., and Flegal, A.R., 2012, Mercury speciation and transport via submarine groundwater discharge at a southern California coastal lagoon system, *Environ. Sci. Technol.*, **46**(3), 1480-1488.
- Hayashi, M., van der Kamp, G., and Rudolph, D.L., 1998, Water and solute transfer between a prairie wetland and adjacent uplands, 2. Chloride cycle, *J. Hydrol.*, **207**(1-2), 56-67.
- Heagle, D.J., Hayashi, M., and Kamp, G.v.d., 2007, Use of solute mass balance to quantify geochemical processes in a prairie recharge wetland, *Wetlands*, **27**, 806-818.
- Heo, W.-M., Kim, B., and Jun, M.-S., 1999, Evaluation of eutrophication of lagoons in the eastern coast of Korea, *Korean J. Ecol. Environ.*, **16**, 274-284.
- Huh, I.-R., Yi, G.-H., Jeong, W.-G., and Kwon, J.-H., 2017, Spatial distribution and improvement of water quality in the Youngsang Lake, *J. Korean Soc. Water Environ.*, **33**(3), 341-347.
- Hwang, D.W., Kim, G., Lee, W.C., and Oh, H.T., 2010, The role of submarine groundwater discharge (SGD) in nutrient budgets of Gamak Bay, a shellfish farming bay, in Korea, *J. Sea Res.*, **64**(3), 224-230.
- Jeffrey, L.C., Maher, D.T., Santos, I.R., McMahon, A., and Tait, D.R., 2016, Groundwater, acid and carbon dioxide dynamics along a coastal wetland, lake and estuary continuum, *Estuaries Coast.*, **39**, 1325-1344.
- Jeon, W.H., Kim, D.H., Lee, S.H., Hwang, S., Moon, H.S., Kim, Y., and Hwang, S., 2021, Hydrogeological characterization of groundwater and surface water interactions in fresh-saline water mixed zone of the east coast lagoon area, Korea, *J. Soil Groundwater Environ.*, **26**, 144-156.
- Jung, Y.Y., Shin, W.J., Seo, K.H., Koh, D.C., Ko, K.S., and Lee, K.S., 2022, Spatial distributions of oxygen and hydrogen isotopes in multi-level groundwater across South Korea: A case study of mountainous regions, *Sci. Total Environ.*, **812**, 151428.
- Kim, D., Kim, M., Yoo, J., Kwon, S., Seo, Y., Yang, J.E., Oh, S.-Y., and Ok, Y.S., 2008, Metal speciation in the lagoon sediment interstitial water from the northeast coast, Korea, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **30**(7), 712-720.
- Kim, G., Kim, J.S., and Hwang, D.W., 2011, Submarine groundwater discharge from oceanic islands standing in oligotrophic oceans: Implications for global biological production and organic carbon fluxes, *Limnol. Oceanogr.*, **56**(2), 673-682.
- Kizuka, T., Yamada, H., and Hirano, T., 2011, Hydrological and chemical budgets of a mire pool formed on alluvial lowland of Hokkaido, northern Japan, *J. Hydrol.*, **401**(1-2), 106-116.
- Kjerfve, B., 1994, Coastal lagoons, Elsevier oceanography series. Elsevier, pp. 1-8.
- Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J.J., Kupfersberger, H., Kværner, J., Muotka, T., Mykrä, H., Preda, E., Rossi, P., Uvo, C.B., Velasco, E., and Pulido-Velazquez, M., 2014, Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems, *J. Hydrol.*, **518**, 250-266.
- Krabbenhof, D.P., Bowser, C.J., Anderson, M.P., and Valley, J.W., 1990, Estimating groundwater exchange with Lakes. 1. The stable isotope mass balance method, *Water Resour. Res.*, **26**(10), 2445-2453.
- Kwak, S.-J., Yoo, S.-H., and Chang, J.-I., 2005, Measuring the conservation value of lagoons: the case of Songji Lagoon, *Ocean Polar Res.*, **27**, 161-169.
- Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2000, Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system, *J. Hydrol.*, **229**(3-4), 190-201.
- Lee, K.-S. and Chang, B.-U., 1994, Oxygen and hydrogen isotopic composition of precipitation in Taejeon and Seoul, Korea, *J. Geol. Soc. Korea*, **30**, 475-481.
- Lee, K.S. and Lee, C.B., 1999, Oxygen and hydrogen isotopic composition of precipitation and river waters in South Korea, *J. Geol. Soc. Korea*, **35**(1), 73-84.
- Oh, Y.H., Kim, D.-H., Hwang, S., Lee, H., Moon, S.-H., Cho, S.Y., Oh, S., Han, J.Y., Lee, J.-Y., Lee, K.Y., Lee, S.-H., Kim, Y., and Moon, H.S., 2020a, Determining groundwater inflow and Si behavior in a wetland using ²²²Rn mass balance and multidisciplinary approach, *J. Hydrol.*, **591**, 125575.

- Oh, Y.H., Kim, D.-H., Lee, S.-H., Moon, H.S., and Cho, S.Y., 2020b, Determining characteristics of groundwater Inflow to the stream in an urban area using hydrogeochemical tracers (^{222}Rn and major dissolved ions) and microbial community analysis, *J. Soil Groundwater Environ.*, **25**, 16-23.
- Oh, Y.H., Koh, D.-C., Kwon, H.-I., Jung, Y.-Y., Lee, K.Y., Yoon, Y.-Y., Kim, D.-H., Moon, H.S., and Ha, K., 2021, Identifying and quantifying groundwater inflow to a stream using ^{220}Rn and ^{222}Rn as natural tracers, *J. Hydrol. Reg. Stud.*, **33**, 100773.
- Sadat-Noori, M., Santos, I.R., Sanders, C.J., Sanders, L.M., and Maher, D.T., 2015, Groundwater discharge into an estuary using spatially distributed radon time series and radium isotopes, *J. Hydrol.*, **528**, 703-719.
- Santos, I.R., Bryan, K.R., Pilditch, C.A., and Tait, D.R., 2014, Influence of porewater exchange on nutrient dynamics in two New Zealand estuarine intertidal flats, *Mar. Chem.*, **167**, 57-70.
- Santos, I.R., Chen, X.G., Lecher, A.L., Sawyer, A.H., Moosdorf, N., Rodellas, V., Tamborski, J., Cho, H.M., Dimova, N., Sugimoto, R., Bonaglia, S., Li, H.L., Hajati, M.C., and Li, L., 2021, Submarine groundwater discharge impacts on coastal nutrient biogeochemistry, *Nat. Rev. Earth Environ.*, **2**, 307-323.
- Schmidt, A., Santos, I.R., Burnett, W.C., Niencheski, F., and Knöller, K., 2011, Groundwater sources in a permeable coastal barrier: Evidence from stable isotopes, *J. Hydrol.*, **406**(1-2), 66-72.
- Schmidt, A., Stringer, C.E., Haferkorn, U., and Schubert, M., 2009, Quantification of groundwater discharge into lakes using radon-222 as naturally occurring tracer, *Environ. Geol.*, **56**, 855-863.
- Song, B., Yi, S., Nahm, W.-H., Lee, J.-Y., Yang, Z., and Yang, X., 2019, Holocene environmental changes of the Songji lagoon, South Korea, and its linkage to sea level and ENSO changes, *Quat. Int.*, **503**, 32-40.
- Wang, X. and Du, J., 2016, Submarine groundwater discharge into typical tropical lagoons: A case study in eastern Hainan Island, China, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **17**(11), 4366-4382.
- Wonju Regional Environmental Administration (WREA), 2015, A study on east coast lagoon restoration and management.
- Wonju Regional Environmental Administration (WREA), 2019, A study on the development of the brackish water area in the lagoon of the east coast.
- Yum, J.-G., Takemura, K., Yu, K.-M., Nahm, W.-H., Hong, S.-S., Yang, D.-Y., Katsuki, K., and Kim, J.Y., 2015, Late Quaternary environmental changes of the Hwajinpo and Songjiho Lagoons on the eastern coast of Korea, *Earth Surface Processes and Environmental Changes in East Asia*. Springer, 163-199.