

동해안 석호 담염수 혼합대에서 지하수와 지표수 상호작용의 수리지질학적 특성 평가

전우현 · 김동훈 · 이수형 · 황세호 · 문희선* · 김용철

한국지질자원연구원 지질환경연구본부 지하수연구센터

Hydrogeological Characterization of Groundwater and Surface Water Interactions in Fresh-Saline Water Mixed Zone of the East Coast Lagoon Area, Korea

Woo-Hyun Jeon · Dong-Hun Kim · Soo-Hyoung Lee · Seho Hwang
Hee Sun Moon* · Yongcheol Kim

Groundwater Research Center, Geological Environment Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

ABSTRACT

This study examined hydrogeological characteristics of groundwater and surface water interaction in the fresh-saline water mixed zone of East Coast lagoon area, Korea, using several technical approaches including hydrological, lithological, and isotopic methods. In addition, the fresh-saline water interface was evaluated using vertical electrical conductivity (EC) data. For this purpose, three monitoring wells (SJ-P1, SJ-P2, and SJ-P3) were installed across the Songji lagoon at depths of 7.4 to 9.0 m, and water level, EC, and temperature at the wells and in the lagoon (SJ-L1) were monitored using automatic transducers from August 1 to October 21, 2021. Isotopic composition of the groundwater, lagoon water, and sea water were also monitored in the mid-September, 2013. The mixing ratios calculated from oxygen and hydrogen isotopic composition decreased with increasing depth in the monitoring wells, indicating saline water intrusion. In the study area, the interaction of groundwater-surface water-sea water was evident, and residual salinity in the sedimentary layers created in the past marine environment showed disorderly characteristics. Moreover, the horizontal flow at the lagoon's edge was more dominant than the vertical flow.

Key words : Groundwater and surface interaction, Electrical conductivity, Stable isotopes, Songji lagoon, Seawater intrusion, Groundwater-dependent ecosystems

1. 서 론

최근 전지구적으로 온난화, 해수면 상승, 기후변화(강수 분포 및 패턴의 변화), 및 생태계 변화 등에 따른 수문환경의 변화로 수자원으로써 지속가능한 지하수의 확보 및 관리에 대한 중요성이 점차 부각되고 있다(Easterling et al., 2000; Herrera-Pantoja and Hiscock, 2008; Kundzewicz, 2008; Bormann et al., 2012; Iglesias and Garrote,

2015). 또한, 기후변화는 안정적인 물 확보를 위한 수자원 계획 수립에 불확실성을 증대시킬 뿐만 아니라 대수층, 호소, 연안, 늪, 습지, 하천 등과 같은 지하수의존생태계(Groundwater-dependent ecosystems; GDEs)의 환경 변화도 초래할 수 있다(Eamus and Froend, 2006; Allen et al., 2010; Kløve et al., 2014; Gorelick and Zheng, 2015; Dwire et al., 2018). 지하수의존생태계는 지하수종속생태계 혹은 지하수의존형수생태계라 일컬어지기도 하며, 생태계를 유지하는데 필요한 수자원 공급의 일부 혹은 대부분을 지하수에 의존하는 생태계 또는 지하수와 연결되어 있거나 지하수에 영향을 받는 지질환경을 의미한다(Kløve et al., 2011; Bertrand et al., 2012).

한편, 기후변화는 단방향으로 지하수의존생태계에 영향을 주는 것이 아니라 지하수의존생태계 주변 이용 양상과 변화에 따라 구성 요소 간 양방향 변화를 유발하는 순환

주저자: 전우현, 박사후연구원

공저자: 김동훈, 책임연구원; 이수형, 책임연구원; 황세호, 책임연구원; 김용철, 책임연구원

*교신저자: 문희선, 책임연구원

E-mail: hmoon@kigam.re.kr

Received : 2021.12.03 Reviewed : 2021.12.06

Accepted : 2021.12.14 Discussion until : 2022.02.28

적 영향을 주고받는 관계를 갖는다(Kløve et al., 2014). 예를 들면 기후변화와 같은 자연적 요인뿐만 아니라 토지 이용, 과도한 지하수 사용, 지반 변화, 인공 구조물 등과 같은 인위적인 요인으로 지하수의존생태계는 영향을 받기도 하지만 반대로 이렇게 변화된 지하수의존생태계는 기후변화에 다시 영향을 주기도 한다. 따라서 기후변화에 따른 지하수의존생태계의 변화에 대한 이해와 미래예측은 동시다발적인 다학제적 융복합의 연구와 해석이 필요하다. 또한, 지하수의존생태계 내 지하수와 지표수 연계 지대에서 일어나는 물-물질 순환 및 오염물질 거동 평가는 시·공간적으로 연결하여 이해할 필요성이 있다.

과거에는 두 수체가 분리되어 있다고 생각했지만 최근에는 지하수-지표수 상호작용의 복잡성으로 수리지질학적, 수리화학적, 미생물생태학적, 수치적 및 열적 등 다학제적이고 융복합적인 접근 방법을 통해 연구되고 있다(Winter et al., 1998; Woessner, 2000; Sophocleous, 2002; Boano et al., 2014; Conant et al., 2019; Kwon et al., 2020). 최근에는 자연 추적자 중 하나인 ^{222}Rn 방사성 기체를 이용하여 지하수 유·출입 특성을 파악 하는 등 기존의 방법들과 연계하여 지하수-지표수 상호작용을 평가하기도 한다(Kim et al., 2020; Oh et al., 2021). 이와 같은 지하수-지표수 상호작용은 직·간접적으로 지하수와 연계된 지하수의존생태계에 영향을 미친다.

우리나라 동해 석호 지역은 하천-호소-해수가 서로 상호작용하여 담수와 염수가 섞여 혼합대를 형성하고 있는 기수호 환경 지역으로 크고 작은 18개의 석호가 해안을 따라 연속적으로 분포해 있다. 석호는 하천과 바다가 만나는 지점에 시주가 형성되어 기수호적 특성으로 지난 수 천년 동안의 해수면 변화, 기후변화, 지형 변화를 반영하고 있으며, 생물다양성이 풍부하고 멸종 위기 종 등 많은 희귀 생물이 서식하는 곳으로 알려져 있다(Kwak et al., 2005; Kwon et al., 2005; Lee and Yu, 2011). 이러한 이유로 생태학적 및 사회경제학적뿐만 아니라 지질학적으로도 매우 중요한 지형이며, 고기후 또는 고환경을 중심으로 연구가 수행되어 왔다(Yum et al., 2002; Kwon et al., 2005; Cheong and Kim, 2008; Lee and Yu, 2011; Bak et al., 2013; Song et al., 2019). 또한, 해수침투에 의한 지하수 염수화 및 기조력에 의한 담염수 경계면 변화 등 기수호적 특성에 대해 연구되어 왔으며(Park et al., 2005; Park et al., 2012; Han et al., 2015), 석호에서의 물 순환 및 유·출입 특성을 평가하기도 하였다(Chikita et al., 2012).

동해안에 위치한 석호 중 하나인 송지호는 다른 석호들

보다 인위적 영향을 적게 받아 자연적인 원형을 그대로 보존하고 있는데 송지호의 지형은 후빙기 해진(transgression) 극상기에 최대 규모를 보인 후 축소율(0.56 km^2 , 92%를 보존)이 현재까지 가장 낮아 석호의 원형 보존 능력이 가장 우수하며, 생태학적 보호 가치가 높다(Yoon et al., 2008). 송지호는 해안도로(7번 국도)를 기준으로 바다와 약 350 m 내외로 이격되어 직접적인 해수 유입이 어려우며, 현재까지 기수 환경이 유지되는 원인을 명확하게 파악하지 못하고 있다.

본 연구에서는 송지호(석호)의 수리지질학적 현장 모니터링 및 산소·수소 동위원소 분석을 통하여 지하수-지표수 상호작용으로 인한 혼합대의 담/염수 경계면의 특성을 평가하고 염수 유입 원인 및 거동 특성을 파악하여 송지호의 기수 환경이 유지되는 원인을 규명하고자 하였다.

2. 연구지역 및 방법

2.1. 연구지역

연구지역인 송지호는 강원도 고성군 죽왕면에 위치하며, 면적 0.56 km^2 , 유역면적 3.826 km^2 , 둘레 5.56 km 이고 석호와 유역면적의 비율이 약 0.15로 지질·지형학적 의미가 적거나 규모가 작아 석호의 형태를 보존하지 못하는 11개 석호를 제외한 7개 석호(북쪽에서부터 화진포, 송지호, 팽포호, 영랑호, 매호, 향호, 경포호) 중에 가장 크다(Yoon et al., 2008; Fig. 1a). 송지호의 중앙부는 서쪽으로부터 저산성구릉지가 발달하였으며, 이를 기준으로 북호와 남호 또는 내호와 외호로 구분된다. 지체구조상으로 경기육괴의 북동부에 위치하며, 백악기에 속초화강암과 신제3기 알칼리현무암이 이를 관입하고 제4기 충적층이 피복하고 있다(Song et al., 2011; Fig. 1b).

송지호 서쪽의 오음산(282 m)에서 발원한 하천이 퇴적물과 함께 석호로 유입되는 수계와 왕곡마을로부터 유입되는 수계가 합류하여 석호로 유입되는 형태를 보이며, 남동쪽의 속초-고성간 국도인 송지호교 부근에서 해수와 연결되는 통로가 나타난다(Fig. 1c). 사빈에 의해 해안과는 250 m 내외로 격리되어 있으며, 강우가 집중되는 여름철 송지호 수위 조절에 따른 갯터짐이 이곳에서 발생한다. 송지호 주변은 논, 밭, 임야 등으로 이용되고 있으며, 50개 내외의 농업용 관정이 사용되고 있다. 또한, 송지호 주변부 수심은 1 m 이내이고 내부 수심은 약 3-4 m로 깊이 변화가 크지 않으며, 최대 수심은 중앙부에서 약 4.2 m이다.

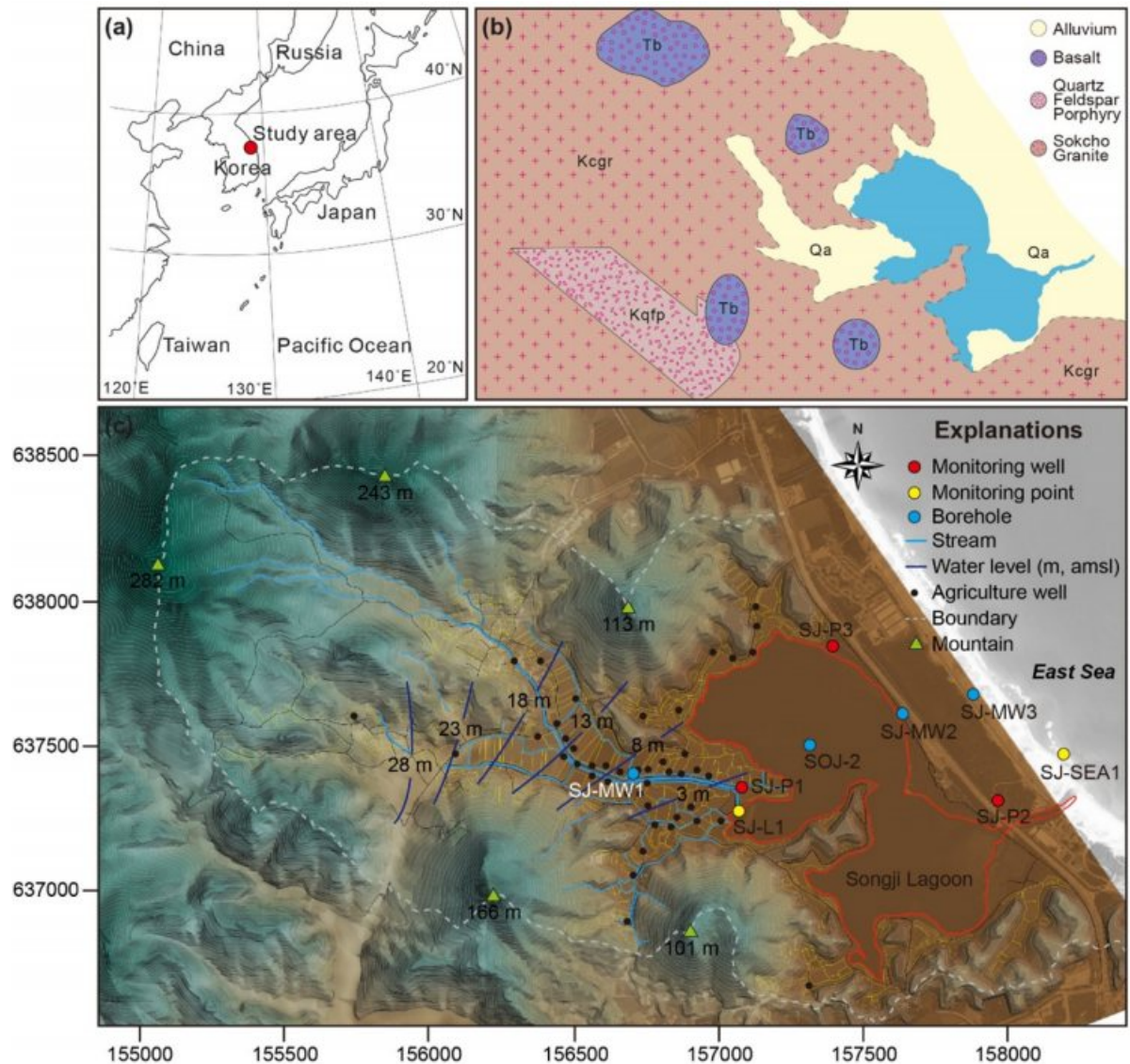


Fig. 1. Location of the (a) study area and (b) the geological map. (c) The digital elevation map of the Songji lagoon with the monitoring sites (SJ-P1, SJ-P2, SJ-P3, and SJ-L1). Distribution of water levels (m, amsl) measured in May 2021.

2.2. 모니터링 관정 및 시추주상도

연구를 위해 모니터링 관정은 송지호를 가로지르며 상류부에 SJ-P1, 건너편에 SJ-P3, 해안가 인근 사주에 SJ-P2를 설치하였다(Fig. 1c). 설치 심도는 10 m 이내이며, SJ-P1은 7.4 m 전구간 스크린, SJ-P2와 SJ-P3는 상부 1.0 m를 제외한 8.0 m 전구간 스크린이다(Fig. 2). 담염수 경계 구간으로 추정되는 심도(SJ-P1: 4.8 m, SJ-P2: 3.9 m, SJ-P3: 6.8 m)에 수위(water level), 전기전도도(electrical conductivity, EC), 온도(temperature)를 자동 연속 모니터링 할 수 있는 데이터 로거(CTD-Diver, Schlumberger, Netherlands)를 설치하였으며, 1시간 간격으로 측정하였다.

또한, 측정된 수위 자료는 언벤티드 압력 변환기(Un-vented pressure transducer) 유형이며, 관정 내 물기둥 높이 변화에 따른 압력과 대기압 변화도 함께 측정됨으로 대기압 요소를 제거해야 한다. 이에 따라 대기압을 측정할 수 있는 데이터 로거(Baro-Diver, Schlumberger, Netherlands)를 별도로 설치하였다.

해수침투에 의한 담염수 경계면(fresh-saline water interface) 또는 혼합대(mixed zone)의 변동 특성을 평가하기 위해 관정 내 EC와 온도의 수직 프로파일은 2021년 8월부터 10월까지 4차례 수행하였다. EC의 수직 분포를 통해 담수구간(<1 mS/cm), 혼합구간, 염수구간(about

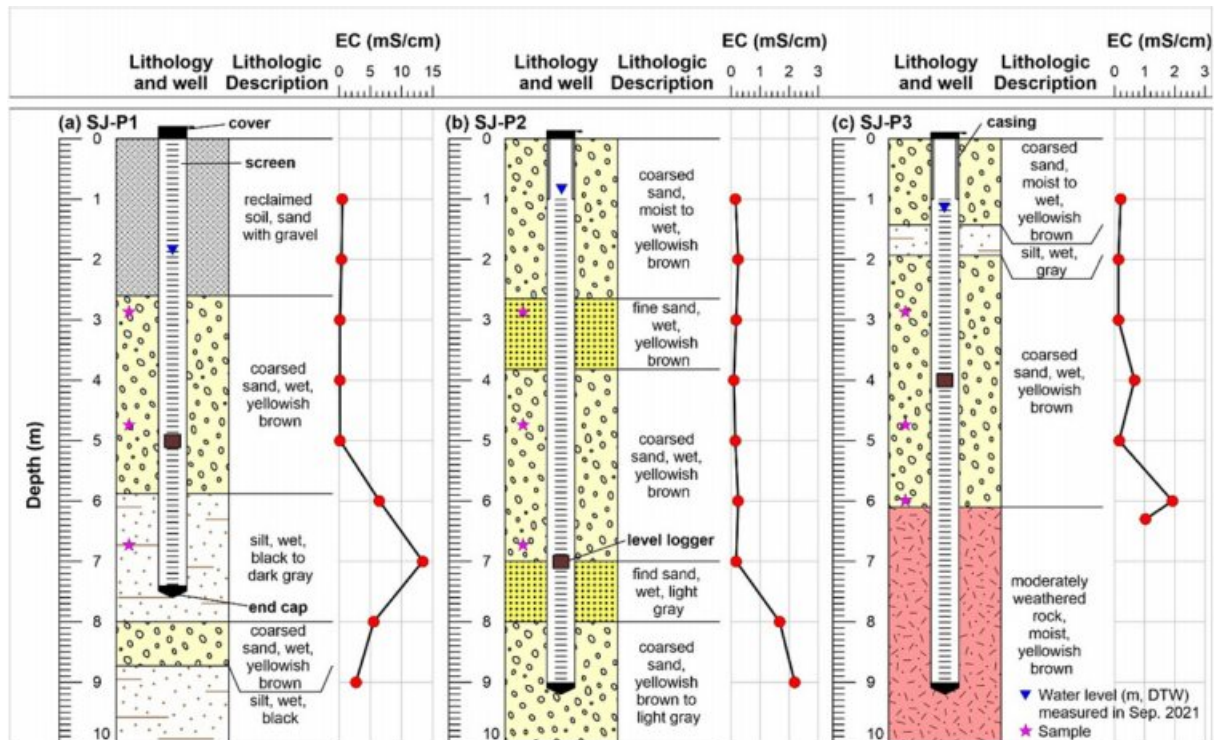


Fig. 2. Lithology logs with vertical profiles of electrical conductivity (soil) in monitoring wells SJ-P1, SJ-P2, and SJ-P3.

50 mS/cm)을 정성적으로 판단할 수 있다(Park et al., 2012; Lee et al., 2018). 모니터링 관정(SJ-P1, SJ-P2, SJ-P3)과 호소(SJ-L1)에서 데이터 로거(CTD-Diver, Schlumberger, Netherlands)를 1초 간격으로 측정하도록 설정하여 EC와 온도의 수직적인 분포를 파악하였다.

각 관정의 시추코어를 회수하여 분석한 결과, 시추코어 길이는 SJ-P1 9.0 m, SJ-P2 9.0 m, SJ-P3 6.3 m였다. SJ-P1은 하부 2.6 m까지 복토층(reclaimed soil)으로 이루어져 있으며, 갈색의 습윤한 실트질 모래로 구성되어 있다. 하부 5.9 m까지 황갈색의 조립질 모래이며, 그 아래 8 m까지 세립질 실트가 나타나다가 이후 9.0 m까지 조립질 모래와 세립질 실트가 교대로 나타난다(Fig. 2). 이는 홀로세 동안의 육성환경 또는 해수면 상승에 따라 해수의 영향을 받은 해성환경, 그리고 현재의 기수성환경 등 퇴적환경의 변화가 있었음을 유추할 수 있다(Park et al., 2013). SJ-P2는 해안가와 가장 가까운 관정으로 투수성이 좋은 조립질 모래와 세립질 모래가 교대로 나타난다. SJ-P3는 1.4 m까지 조립질 모래이며, 그 아래 1.9 m까지 세립질 실트가 약 0.5 m 두께로 나타나다가 이후 6.1 m까지 조립질 모래가 다시 나타난다. 그리고 6.1 m 이후부터 균열 및 절리가 발달한 회색의 기반암 상부층이 나타난다.

회수된 시추코어의 토양 내 EC 프로파일을 확인하면

SJ-P1의 세립질 실트가 나타나는 5.9-8.0 m 깊이에서 EC 값이 약 15 mS/cm 가까이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 과거 해수면 상승에 따른 해수의 영향을 받은 퇴적환경과 잔류염분이 기인한 것으로 유추할 수 있다. 또한, SJ-P2와 SJ-P3은 깊이가 증가함에 따라 EC 값도 증가하는 경향을 보여 염수의 유입 혹은 담염수 경계부분으로 추정된다.

2.3. 시추코어 입도 분석 및 수리전도도 계산

토양입도분석(grain size analysis)을 위해 회수된 시추코어를 이용하였으며, 각 관정마다 깊이별 3지점에서 토양시료를 채취하였다(Fig. 2). 시료채취 시 육안으로 확인되는 자갈, 나뭇잎 등은 제거하였으며, 한국지질자원연구원 지질자원분석센터에 분석 의뢰하였다. 맡겨진 토양시료는 건조, 과산화수소를 이용한 유기물 제거, 드라이 시빙(dry sieving), 비중계 분석 등의 KSF 2302 시험방법이 적용되었다. 토양입도분석 결과를 이용하여 왜도(skewness), 첨도(kurtosis), 분급 등의 통계적 입도상수를 구할 수 있으며, 입도 크기는 해당 지역의 환경 및 기후 등을 유추할 수 있다. 예를 들어 입도가 크면 퇴적물을 운반하는 매체의 유속이 빠른 환경이고 반대로 입도가 작으면 퇴적물을 운반하는 매체의 유속이 느린 환경이다. 또

한, 왜도는 입자의 크기 분포곡선에서 양끝 부분의 모양에 따라 입자분포의 상태를 나타낼 수 있다. 왼쪽의 경사가 급하고 오른쪽이 완만하면 양성왜도(positive skewness)이며, 해변환경에서 나타난다. 반면, 왼쪽의 경사가 완만하고 오른쪽이 급하면 음성왜도(negative skewness)이며, 하상환경에서 나타난다. 한편, 입자 크기를 이용한 다양한 경험식을 바탕으로 수리전도도를 추정하였다.

2.4. 산소-수소 동위원소 시료채취 및 분석

본 연구에서는 동위원소 분석을 위해 2021년 9월 13일부터 15일까지 모니터링 관정 3지점(SJ-P1, SJ-P2, SJ-P3), 호소수 1지점(SJ-L1), 해수 1지점(SJ-SEA1)에서 시료채취 하였으며, 모니터링 관정의 경우 지점당 3군데 깊이(SJ-P1: 2, 4, 6 m, SJ-P2 and SJ-P3: 2, 5, 8 m)에서 시료채취 하였다. 시료채취 시 연동펌프(Peristaltic pump)를 이용하여 교란을 최소화하기 위해 저속 양수하였으며, 0.2 μm 이하로 여과한 후 30 mL 폴리에틸렌 용기에 담았다. 시료 운반 시 아이스박스에 4°C 내외로 보관하였으며, 대전시에 위치한 한국지질자원연구원 지질자원분석센터에 분석 의뢰하였다. 산소-수소 동위원소 조성은 VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water)에 표준화한 천분률(‰)로 나타내었다.

2.5. 산소-수소 동위원소 단성분 혼합비율 해석

해수침투가 발생할 때 혼합비율(mixing ratio)을 정량적으로 계산하는 것은 담염수 경계구간(transition zone) 또는 혼합구간(mixed zone) 평가에 매우 중요한 사항이며, 동위원소를 이용한 단성분 혼합분석방법(end member mixing analysis, EMMA)이 주로 사용된다(Lee, 2018). 해수침투는 계절적 강우특성과 같은 자연적 또는 과도한 양수로 인한 인위적인 영향에 의해 담수와 해수가 섞이는 과정이며, 자연추적자(natural tracer)이자 물의 두 안정동위원소인 산소-수소 동위원소를 이용하여 지하수와 해수가 얼마만큼의 비율로 혼합되었는지 정량적으로 계산할 수 있다.

해수침투가 발생할 때 지하수와 해수의 혼합비율은 비반응추적자(conservative tracer)의 질량보존(mass conservation) 방정식이 사용된다. 담수와 해수의 혼합비율을 계산하기 위해 연구지역 지하수의 산소-수소 동위원소 조성 과 해수의 산소-수소 동위원소 조성을 각 단성분(end member)으로 사용하였으며, 질량보존 법칙을 이용한 식 (1)으로 나타낼 수 있다(Lee et al., 2014; Kim et al., 2017).

$$C_{a.gr} = xC_{sea} + (1-x)C_{p.gr} \quad (1)$$

여기서, x 는 담수와 해수의 혼합비율을 나타내며, $C_{a.gr}$ 는 해수의 영향을 받은 지하수 $C_{p.gr}$ 와 C_{sea} 는 지하수 및

Table 1. Results of grain size analysis and hydraulic conductivity (K) calculated from grain size analysis using the various empirical methods

Sampling site		SJ-P1			SJ-P2			SJ-P3			
Depth (m)		2.7-3.0	4.5-5.0	6.7-7.0	2.7-3.0	4.5-5.0	6.7-7.0	2.7-3.0	4.5-5.0	6.0-6.3	
d_e^a	d_{10}	0.06	0.06	0.01	0.12	0.28	0.11	0.12	0.04	0.05	
	d_{60}	1.80	1.66	0.22	0.42	1.70	0.37	0.91	0.47	0.73	
n^b		0.26	0.26	0.27	0.39	0.34	0.39	0.32	0.28	0.28	
C_u^c		28.33	25.74	15.24	3.55	6.08	3.30	7.60	12.40	13.34	
Composition (wt %) ^d	Gravel	24.45	19.34	3.19	19.79	6.12	3.36	0	0	1.83	
	Sand	63.85	69.59	53.79	75.22	92.24	89.55	92.00	81.30	84.65	
	Silt	11.05	10.48	40.23	4.69	1.53	6.16	7.67	18.06	13.13	
	Clay	0.65	0.59	2.79	0.30	0.11	0.63	0.33	0.64	0.39	
Sorting ^e		P-S	P-S	P-S	W-S	P-S	W-S	P-S	P-S	P-S	Remark
Hydraulic conductivity (cm/s)	Hazen	2.31E-03	2.42E-03	1.39E-04	1.91E-02	8.24E-02	1.17E-02	1.35E-02	1.04E-03	2.09E-03	$C_u<5, 0.1<d_{10}<3.0$
	Kozeny-Carman	2.27E-03	2.60E-03	1.97E-04	2.93E-02	7.66E-02	1.33E-02	9.99E-03	1.79E-03	3.75E-03	coarse sand
	Beyer	2.59E-03	2.78E-03	1.62E-04	1.57E-02	7.72E-02	1.39E-02	1.36E-02	1.20E-03	2.45E-03	$1<C_u<20, 0.06<d_{10}<0.6$
	Terzaghi	6.48E-04	6.83E-04	4.63E-05	1.08E-02	3.67E-02	9.88E-03	5.42E-03	3.47E-04	6.71E-04	coarse sand
	Slichter	4.51E-04	4.75E-04	2.31E-05	6.17E-03	2.17E-02	5.66E-03	3.28E-03	2.20E-04	4.40E-04	$0.01<d_{10}<5.0$
	USBR	8.92E-03	1.46E-02	1.27E-04	1.06E-02	4.47E-02	1.16E-02	3.01E-02	1.69E-03	5.09E-03	$C_u<5$, medium sand

^a Effective grain diameter (mm), ^b Porosity, ^c Coefficient of grain uniformity, ^d Weight percentage (%): gravel (2-64 mm), sand (0.063-2 mm), silt (0.002-0.063 mm), and clay (<0.002 mm), ^e Sorting: W-S: Well-Sorted, M-S: Moderately-Sorted, P-S: Poorly-Sorted

해수의 산소·수소 동위원소 조성 단성분이다. 이를 다시 정리하면 혼합비율(x)은 식 (2)와 같으며, 정량적으로 계산할 수 있다.

$$x = \frac{C_{a.gr} - C_{p.gr}}{C_{sea} - C_{p.gr}} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 대수층의 수리특성

토양입도분석 결과와 다양한 경험식을 이용해 계산된 수리전도도(K)를 Table 1에 나타내었다. SJ-P1은 2.7-3.0 및 4.5-5.0 m 깊이의 시료에서 모래 함량비율이 각각 63.85 및 69.59%로 나타났으며, 자갈 함량비율은 각각 24.45 및 19.34%로 나타났다. 6.7-7.0 m 깊이의 시료는 모래 53.79, 실트 40.23%로 모래가 더 우세하게 나타나는 실트층으로 확인되었다(Fig. 3). 해안가와 가장 가까운

(250 m 이내) 사주에 설치된 SJ-P2는 모든 깊이의 시료에서 모래와 자갈 함량비율이 90% 이상 높게 나타났다. 토양 입자 크기에 따른 분류에 의하면 2 mm 보다 크면 자갈(gravel), 작으면 모래(sand)로 구분되는데 자갈로 분류된 토양 입자의 경우 대부분 4 mm 이내이다. SJ-P3도 대부분의 시료에서 80% 이상 모래 함량비율을 보였으며, 10% 내외의 실트가 포함되었다.

Fig. 3a의 결과값을 보았을 때 음성왜도를 보이며, 주로 조립질 입자들이 분포하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 균등계수를 이용하여 분류의 정도를 나타낼 수 있으며, 일반적으로 균등계수가 4이하이면 우수(well-sorted), 6이상이면 불량(poorly-sorted)하다고 판단한다. 본 연구지역에서는 SJ-P2 균등계수가 3.30-6.08 범위를 보여 우수하였고 SJ-P1과 SJ-P3는 7.60-28.33 범위를 보여 불량하였다.

토양입도를 이용한 수리전도도는 Hazen, Kozeny-Carman, Beyer, Terzaghi, Slichter, USBR의 경험식을

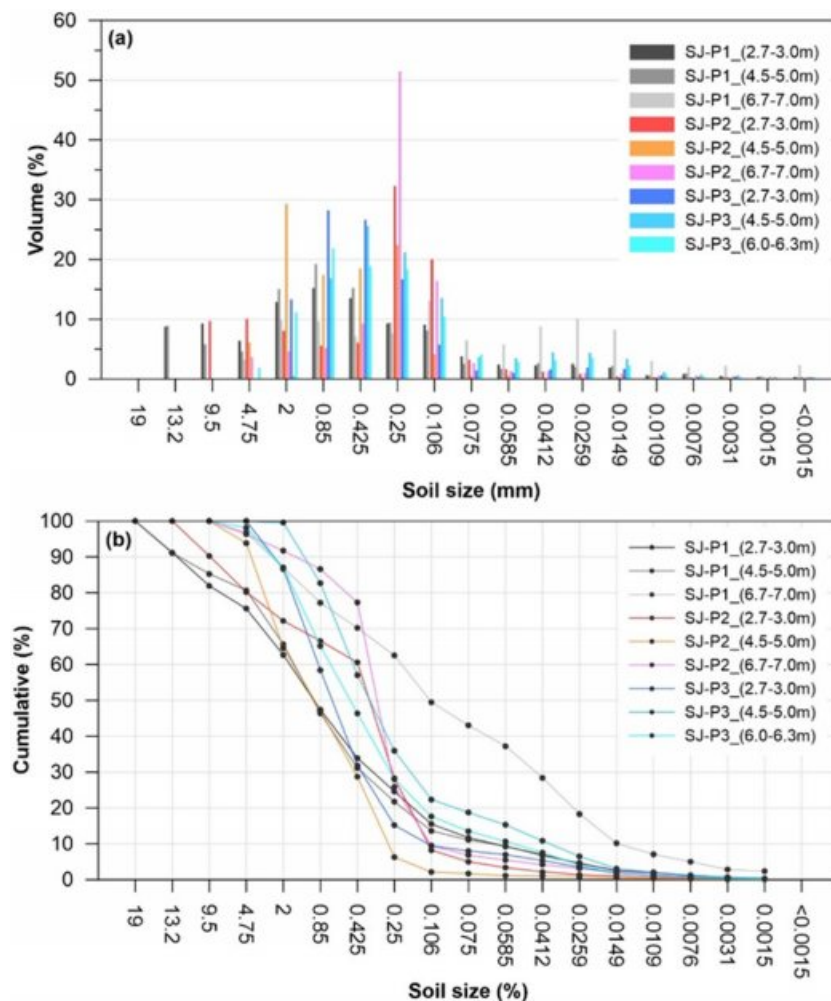


Fig. 3. Results of grain size analysis for the different depth soils ((a) volume of the soil size, (b) distributions of cumulative particle size).

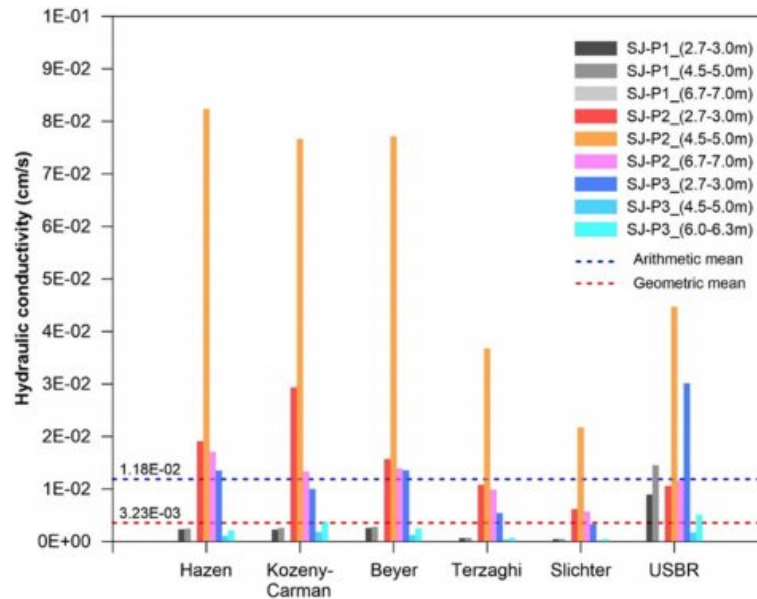


Fig. 4. The hydraulic conductivity (K) was estimated using the various empirical methods.

이용하여 산출하여 비교하였다(Fig. 4). 경험식에 따라 적용 조건이 다르며, 유효입경크기(effective grain size, d_e) 및 균등계수(uniformity coefficient, C_u) 등을 고려하였다(Table 1). 그 결과 SJ-P1, SJ-P2, SJ-P3에서 깊이에 따른 수리전도도는 산술평균 1.18×10^{-2} , 기하평균 3.23×10^{-3} cm/s으로 계산되었다. SJ-P2의 4.5-5.0 m에서 8.24×10^{-2} cm/s으로 자갈과 모래의 함량비율이 98% 이상인 층에서 수리전도도 값이 가장 크게 나타났으며, 반대로 SJ-P1의 6.7-7.0 m에서 2.31×10^{-5} cm/s으로 실트층에서 가장 작게 나타났다. 또한, 송지호 주변의 SJ-P1과 SJ-P3 보다 해안가와 가까운 SJ-P2의 투수성이 매우 좋은 것으로 판단된다.

3.2. 모니터링 및 담염수 경계면 변동 특성

모니터링 관정(SJ-P1, SJ-P2, SJ-P3)과 호소(SJ-L1)에서 수위, EC, 온도 항목에 대해 2021년 8월 1일부터 2021년 10월 21일까지 수집하였으며, 시계열 자료로 나타내었다(Fig. 5). 동일한 기간 강수 자료도 함께 나타내었으며, 연구지역에서 직선거리로 약 5.8 km 떨어진 간성 무인기상관측소(517)에서 획득한 자료를 이용하였다(KMA, 2021). 모니터링 관정 수위는 호소 수위 변화와 유사하였으며, 강우 발생시 즉각적인 수위 상승을 보였다. 송지호에서는 여름철 강우가 집중되는 시기에 인위적 수위 조절로 갯터짐을 하고 이에 따라 급격한 수위 하강을 보인다. 갯터짐은 송지호에서 유일한 배출구인 남동쪽 송지호교

주변의 해안과 맞닿는 모래사장에 생성된 독을 중장비로 제거함에 따라 발생하며, 호소수가 유출(배출)되지만 해수의 직접적인 유입 가능성은 낮을 것으로 판단된다. 또한, 모니터링 기간 동안 관정의 수위보다 호소 수위가 항상 높았으며, 수리적으로 다운웰링(down welling) 상태일 것으로 판단된다. 하지만, 송지호 퇴적층 연구에 사용된 SJ99과 SOJ-2의 시추코어 자료를 확인하면 송지호 저면으로부터 최대 5.3 m까지 불투수층 또는 투수성이 매우 낮은 실트층인 것을 확인할 수 있다(Lee and Yu, 2011; Park et al., 2013). 따라서, 다운웰링이 발생하더라도 매우 적은 유동(flux)일 것으로 판단된다.

EC는 송지호 상류부의 SJ-P1 보다 건너편의 SJ-P3와 해안가 사주에 위치한 SJ-P2로 갈수록 높아졌다. 모니터링 기간 동안 SJ-P1과 SJ-P3의 EC는 점차 낮아지는 경향을 보였고 SJ-L1의 EC는 강우 또는 주변환경(담수 유입으로 인한 희석)의 영향 등으로 큰 변동폭을 보였지만 대체로 10-15 mS/cm 범위를 보였다. 송지호 주변에 위치하지만 SJ-P1과 SJ-P3의 EC는 SJ-L1의 EC 변동과 일치하지 않거나 낮은 상관성인 것으로 나타났다. 한편, SJ-P2는 30 mS/cm 이상의 높은 EC를 보였다.

모니터링 관정과 호소에서 EC 및 온도를 이용한 수직 프로파일을 2021년 8월부터 10월까지 4차례 수행하였다. EC와 온도의 수직 분포는 담염수 경계면 또는 혼합대가 뚜렷이 나타났으며, SJ-P2의 경우 전형적인 해수침투에 의한 담염수 경계 변화를 보여준다(Fig. 6b; Park et al.,

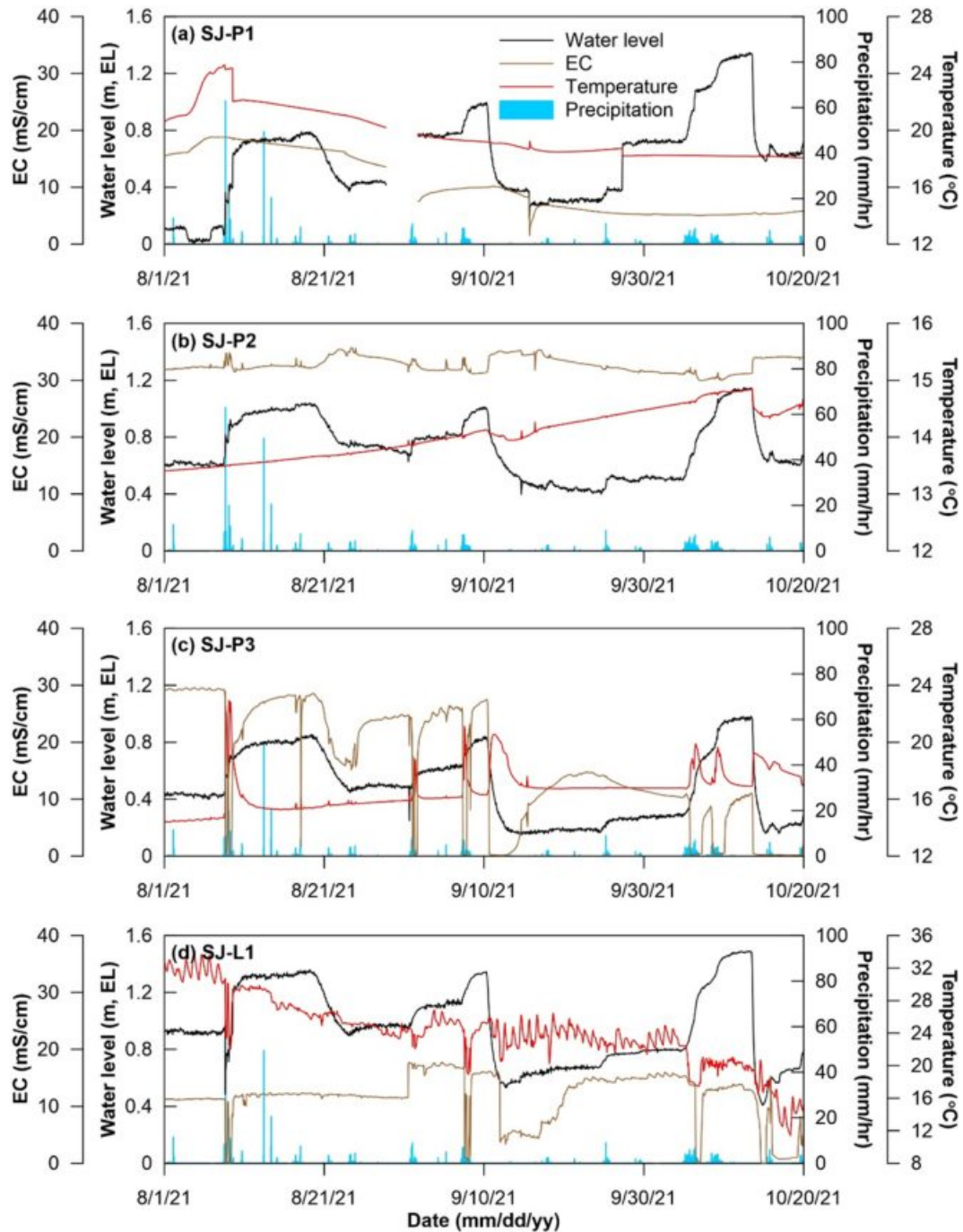


Fig. 5. Observed water level, electrical conductivity, temperature, and precipitation at monitoring wells (SJ-P1, SJ-P2, and SJ-P3) and lagoon water (SJ-L1) from August 1 to October 20, 2021.

2012). 지표면으로부터 4.0 m 부근까지는 담수(지하수)의 영향으로 1 mS/cm 미만의 EC를 보이지만 4.0-6.5 m에서는 깊이에 따라 EC도 증가하여 담염수 혼합구간으로 나타난다. 6.5 m 이후부터는 염수(해수)의 영향으로 EC는 최대 35 mS/cm를 보인다.

SJ-P3의 담염수 경계면 변화는 세 차례 나타난다. 지표면으로부터 3.5 m 부근까지 1 mS/cm 미만의 첫번째 담염수 경계면, 이후 3.5-4.5 m에서 16 mS/cm까지 EC가 증가하는 두번째 담염수 경계면, 마지막으로 6.1 m 부근에서 29 mS/cm까지 EC가 증가하는 세번째 담염수 경계면

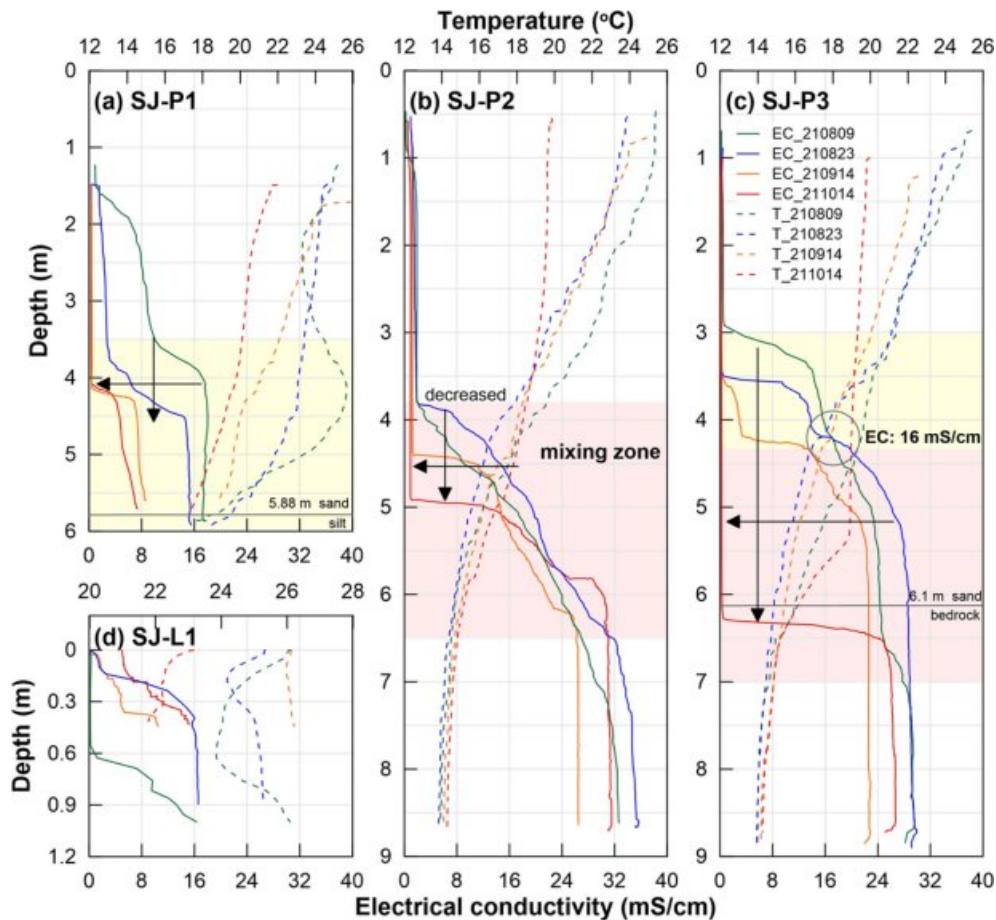


Fig. 6. Vertical electrical conductivity and temperature profiles at the SJ-P1, SJ-P2, SJ-P3, and SJ-L1 for various dates.

이 나타난다(Fig. 6c). 만약, 두번째 담염수 경계면이 나타나지 않으면 SJ-P2와 마찬가지로 전형적인 해수침투에 의한 담염수 경계 변화를 보일 것이다. 또한, SJ-P3는 송지호와 가장 인접해 있으며, 두번째 담염수 경계면에서의 EC가 16 mS/cm인 것으로 보았을 때 해수보다는 송지호 염수(16 mS/cm)의 영향을 받은 것으로 판단된다(Fig. 6d).

SJ-P1도 가장 깊은 심도에서 EC가 16 mS/cm로 송지호 염수에 의한 영향과 5.9 m 이후부터 나타나는 실트층 내 잔류염분(회수된 시추코어의 토양 내 EC는 15 mS/cm)의 영향이 큰 것으로 보인다. SJ-P1은 7.4 m 깊이까지 스크린이 설치되어 있지만 EC 프로파일 수행 시 최대 깊이가 5.9 m까지인 것으로 나타났다(Fig. 6a). 이는 시추주상도에서 5.9 m 깊이부터 실트층이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 실트의 입자 크기가 0.05 mm 이하인 것을 고려하였을 때 관정 막힘이 발생한 것으로 추정된다(Fig. 2a).

시간에 따라 모든 관정에서 담염수 경계면의 심도는 깊어졌으며, 계절적 강우특성 또는 수문조건 변화로 담염수

경계구간의 변동이 발생하였다. 특히, SJ-P3는 4번째(2021년 10월) 수행된 EC 프로파일에서 담염수 경계면의 심도가 6.2 m로 급격히 깊어졌으며, 6.1 m에서부터 기반암이 나타나는 것을 보았을 때 송지호 염수보다 해수의 영향을 우세하게 받은 것으로 판단된다. 추후 모니터링 관정에서 양수시험 수행 시 수위 하강과 수위 회복에 따른 EC 변화를 통해 지하수에 의한 영향인지 또는 해수에 의한 영향인지 명확하게 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

3.3. 산소-수소 동위원소 분석을 통한 지하수 혼합비율의 공간적 분포 특성

산소-수소 동위원소를 이용하여 지하수 혼합비율 계산하였으며, 공간적 분포로 나타내었다(Fig. 7). 지하수, 호소수 및 해수는 세계순환수선의 기온기와 일치하거나 아래쪽에 결과값이 분포하였다. 또한, 지하수와 해수의 단성분이 명확하여(동위원소 비율 차이가 큼) 지하수가 호소에 주는 영향 또는 해수가 호소에 주는 영향을 정량적으

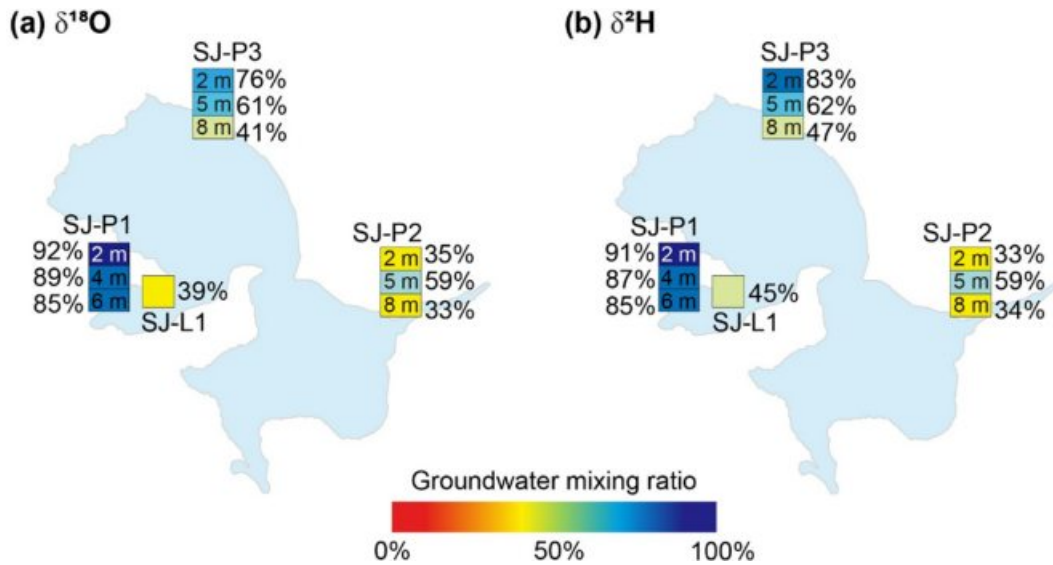
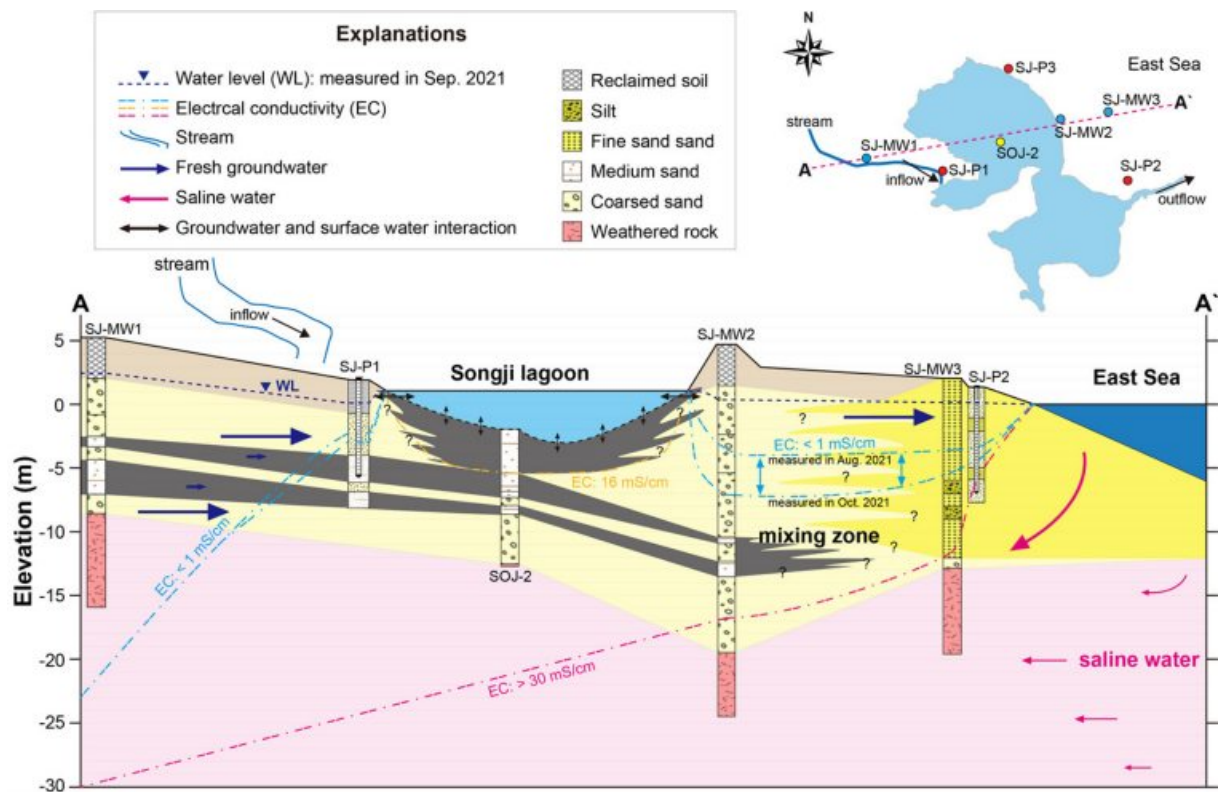


Fig. 7. Spatial distributions of the relative contributions of mixing ratios of end members to groundwater (SJ-P1, SJ-P2, and SJ-P3) and lagoon water (SJ-L1) in September 2021.



로 평가하였다. 모든 모니터링 관정에서 깊이가 증가함에 따라 지하수 혼합비율이 낮아지는 것을 볼 수 있으며,

SJ-P1은 85% 이상의 지하수 혼합비율을 보였다. 해안가와 가까운 SJ-P2는 모든 깊이에서 지하수보다 해수의 혼

함비율이 높았으며, SJ-P3의 경우 깊이에 따라 지하수에서 해수의 혼합비율이 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, SJ-L1은 40% 내외의 지하수 혼합비율을 보여 해수의 영향을 더 받거나 주변 하천 또는 지하수를 통해 유입된 물이 석호 내에 체류하면서 증발되어 부화된 동위원소 조성일 것으로 판단된다. 따라서, 송지호 지역은 해수와 호소의 영향이 복합적으로 영향을 미칠 수 있는 지역이다. 추후 산소-수소 동위원소 추적자뿐만 아니라 염소이온(Cl⁻), 브롬화이온(Br⁻), 자연 방사성 라돈(222Rn), 주요 양-음이온, 현장수질(pH, DO, ORP, EC, T) 등의 방법을 이용하면 정성·정량적 해석 및 지화학적 메커니즘 규명이 가능할 것이다.

3.4. 송지호의 수리지질학적 특성 및 담염수 경계 모식도

시추주상도 및 문헌자료(SJ99, SOJ-2), EC 수직 프로파일, 지하수위 자료 등을 종합하여 송지호의 수리지질학적 특성 및 담염수 경계 모식도를 나타내었다(Fig. 8). 송지호 저면은 불투수층 또는 투수성이 매우 작은 실트층으로 구성되어 있어 수직적인 수리적 연결성 또는 유동량이 적을 것으로 예상되고 오히려 송지호 바깥쪽인 주변부에서 불투수층의 두께 변화, 하천의 유입 경로, 식생 등을 고려하였을 때 수평적 연결성이 우세할 것으로 예상된다. 또한, 과거 해성환경 때 생성된 퇴적층 내 잔류염분의 영향으로 높은 EC를 보이는 실트층이 있다. 이 실트층으로 인해 상부와 하부의 지하수 유동이 다를 수 있으며, 피압대수층 환경도 배제할 수 없다. SJ-P2와 SJ-P3 사이는 투수성이 좋은 모래층으로 이루어져 있으며, 해수침투로 인한 기수호 환경이 유지될 수 있는 가능성을 제시할 수 있다. 또한, 여름철과 같은 계절적 강우 특성 및 수문조건의 변화 등으로 담염수 경계면의 변동이 발생할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 강원도 동해안에 위치한 송지호의 담염수 혼합대에서 지하수-지표수 상호작용의 수리지질학적 및 산소-수소 동위원소 분석을 통해 담염수 경계면 변동에 대해 평가 한 후 이를 토대로 기수호 환경이 형성/유지되는 환경에 대한 개념모델을 수립하였다. EC 프로파일 결과, 모니터링 관정에서 깊이에 따라 EC가 증가하였으며, 특히, SJ-P3의 경우 송지호 염수의 영향을 우세하게 받는 첫번째 혼합구간과 해수의 영향을 우세하게 받는 두번째 혼합구간으로 분리되었다. 연구지역은 지하수-지표수(호소수)-해수의 상호작용이 복합적으로 발생하며, 과거 해성환

경 때 생성된 퇴적층 내 잔류염분의 영향도 배제할 수 없다. 송지호 바닥은 최대 5.3 m 깊이의 실트층으로 피복되어 있고 수직적인 흐름이 거의 없어 호소 수위와 기수호 환경이 유지될 수 있다. 즉, 송지호 내 담수 유입은 강수 또는 호소 주변부를 통한 지하수와 하천수가 대부분이고 염수 유입은 파랑 및 태풍에 의한 해수의 월류 또는 SJ-P2와 SJ-P3 사이의 투수성 좋은 모래층을 통해 발생할 것으로 추정된다. 또한, 유출은 1년에 1-2회 있는 갯터짐이 유일하다. 향후 연구에서는 수리지질학적인 접근뿐만 아니라 수리수문학적, 수리화학적, 미생물생태학적, 수치적 해석 방법 등 다양한 융복합 접근 방법과 중장기적인 시간 규모의 모니터링을 통해 석호의 지하수-지표수-해수 상호작용에 대한 연구와 해석이 수행되어야 할 것이다.

사 사

이 연구는 2021년도 과학기술정보통신부에서 지원한 주요사업(기후변화 대응 대응량 지하수 확보 및 최적활용 기술 개발, 과제 번호: GP2020-012)의 도움으로 수행되었습니다.

References

- Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Venetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., Hogg, E.H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.H., Allard, G., Running S.W., Semerci, A., and Cobb, N., 2010, A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests, *Forest Ecol. Manag.*, **259**, 660-684.
- Bak, Y.S., Nahm, W.H., and Lee, S.J., 2013, Holocene paleoenvironmental changes from diatom analysis of sediments from the Songjiho Lagoon on the eastern coast of Korea, *J. Geol. Soc. Korea*, **49**, 297-303 (in Korean with English abstract).
- Bertrand, G., Goldscheider, N., Gobat, J.M., and Hunkeler, D., 2012, Review: From multi-scale conceptualization to a classification system for inland groundwater-dependent ecosystems, *Hydrogeol. J.*, **20**, 5-25.
- Boano, F., Harvey, J.W., Marion, A., Packman, A.I., Revelli, R., Ridolfi, L., and Woerman, A., 2014, Hyporheic flow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications, *Rev. Geophys.*, **52**, 603-679.
- Bormann, H., Ahlhorn, F., and Klenke, T., 2012, Adaptation of

water management to regional climate change in a coastal region-Hydrological change vs. community perception and strategies, *J. Hydrol.*, **454-455**, 64-75.

Conant, B., Robinson, C.E., Hinton, M.J., and Russell, H.A.J., 2019, A framework for conceptualizing groundwater-surface water interactions and identifying potential impacts on water quality, water quantity, and ecosystems, *J. Hydrol.*, **574**, 609-627.

Cheong, D. and Kim, B., 2008, Domestic and oversea research activities and future studies of paleoclimatology from lake and wetland sediments, *J. Geol. Soc. Korea*, **44**, 81-92 (in Korean with English abstract).

Chikita, K.A., Iwasaka, W., Mamun, A.A., Ohmori, K., and Itoh, Y., 2012, The role of groundwater outflow in the water cycle of a coastal lagoon sporadically opening to the ocean, *J. Hydrol.*, **464-465**, 423-430.

Dwire, K.A., Mellmann-Brown, S., and Gurrieri, J.T., 2018, Potential effects of climate change on riparian areas, wetlands, and groundwater-dependent ecosystems in the Blue Mountains, Oregon, USA, *Clim. Serv.*, **10**, 44-52.

Eamus, D. and Froend, R., 2006, Groundwater-dependent ecosystems: the where, what and why of GDEs, *Aust. J. Bot.*, **54**, 91-96.

Easterling, D.R., Meehl, G.A., Parmesan, C., Changnon, S.A., Karl, T.R., and Mearns, L.O., 2000, Climate extremes: Observations, modeling, and impacts, *Science*, **289**, 2068-2074.

Gorelick, S.M. and Zheng, C., 2015, Global change and the groundwater management challenge, *Water Resour. Res.*, **51**, 3031-3051.

Han, D., Post, V.E.A., and Song, X., 2015, Groundwater salinization processes and reversibility of seawater intrusion in coastal carbonate aquifers, *J. Hydrol.*, **531**, 1067-1080.

Herrera-Pantoja, M. and Hiscock, K.M., 2008, The effects of climate change on potential groundwater recharge in Great Britain, *Hydrol. Process.*, **22**, 73-86.

Iglesias, A. and Garrote, L., 2015, Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe, *Agr. Water Manage.*, **155**, 113-124.

Kim, H., Cho, S.H., Lee, D., Jung, Y.Y., Kim, Y.H., Koh, D.C., and Lee, J., 2017, Influence of pre-event water on streamflow in a granitic watershed using hydrograph separation, *Environ. Earth Sci.*, **76**, 82.

Kim, J., Kim, H., and Lee, K.K., 2020, Application of ^{222}Rn and microbial diversity to characterize groundwater/surface-water interactions in a riverside area (South Korea), *Hydrogeol. J.*, **28**, 1173-1189.

Kløve, B., Ala-aho, P., Bertrand, G., Boukalova, Z., Ertürk, A., Goldscheider, N., Ilmonen, J., Karakaya, N., Kupfersberger, H.,

Kvoerner, J., Lundberg, A., Mileusnic, M., Moszczynska, A., Muotka, T., Preda, E., Rossi, P., Siergieiev, D., Šimek, J., Wachniew, P., Angheluta, V., and Widerlund, A., 2011, Groundwater dependent ecosystems: Part I: Hydroecological status and trends, *Environ. Sci. Policy*, **14**, 770-781.

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.

KMA (Korean Meteorological Administration), 2021, <http://kma.go.kr> [accessed 21.11.15]

Kundzewicz, Z.W., 2008, Climate change impacts on the hydrological cycle, *Ecohydrol. Hydrobiol.*, **8**, 195-203.

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 (in Korean with English abstract).

Kwon, H.I., Koh, D.C., Jung, Y.Y., Kim, D.H., and Ha, K., 2020, Evaluating the impacts of intense seasonal groundwater pumping on stream-aquifer interactions in agricultural riparian zones using a multi-parameter approach, *J. Hydrol.*, **584**, 124683.

Kwon, S.Y., Heo, W.M., Lee, S., Kim, D., and Kim, B., 2005, The limnological survey of a coastal lagoon in Korea (4); Lake Songji, *Korean J. Limnol.*, **38**, 461-474.

Lee, J., Koh, D.C., and Choo, M.K., 2014, Influences of fractionation of stable isotopic composition of rain and snowmelt on isotopic hydrograph separation, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **35**, 97-103 (in Korean with English abstract).

Lee, J., 2018, A study on propagation of uncertainties for a mixing ratio calculation by seawater intrusion, *J. Geol. Soc. Korea*, **54**, 579-584 (in Korean with English abstract).

Lee, S.H. and Yu, K.M., 2011, Depositional environments of Holocene laminated layers in the core SJ99 collected from the Songjiho Lagoon on the eastern coast of Korea, *J. Geol. Soc. Korea*, **47**, 123-137 (in Korean with English abstract).

Lee, S.H., Hamm, S.Y., Ha, K., Kim, Y., Koh, D.C., Yoon, H., and Kim, S.W., 2018, Hydrogeologic and Paleo-geographic characteristics of river side alluvium at an artificial recharge site in Korea, *Water*, **10**, 835.

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.

Park, H.Y., Jang, K., Ju, J.W., and Yeo, I.K., 2012, Hydrogeological characterization of seawater intrusion in tidally-forced coastal fractured bedrock aquifer, *J. Hydrol.*, **446-447**, 77-89.

- 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, *J. Hydrol.*, **313**, 182-194.
- Park, Y.S., Nahm, W.H., and Lee, S.J., 2013, Holocene paleoenvironmental changes from diatom analysis of sediments from the Songjiho Lagoon on the eastern coast of Korea, *J. Geol. Soc. Korea*, **49**, 297-303 (in Korean with English abstract).
- 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, *Quatern. Int.*, **503**, 32-40.
- Song, K.Y., Park, S.I., and Cho, D.L., 2011, Geological report of Sokcho-Yangyang Sheet 1:50,000, Korean Institute of Geoscience and Mineral Resources (in Korean with English abstract).
- Sophocleous, M., 2002, Interactions between groundwater and surface water: the state of the science, *Hydrogeol. J.*, **10**, 52-67.
- Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L., and Alley, W.M., 1998, Ground water and surface water a single resource, *U.S. Geol. Surv. Circ.*, 1139.
- Woessner, W.W., 2000, Stream and fluvial plain groundwater interactions: rescaling hydrogeologic thought, *Groundwater*, **38**, 423-429.
- Yoon, S.O., Hwang, S., Park, C.S., Kim, H.S., and Moon, Y.R., 2008, Landscape changes of coastal lagoons during the 20th century in the Middle East coast, South Korea, *J. Korean Geogr. Soc.*, **43**, 449-465 (in Korean with English abstract).
- Yum, J.G., Yu, K.M., Sampei, Y., Tokuoka, T., and Nakamura, T., 2002, Depositional environmental change during the last 400 years in the Hwajinpo lagoon on the eastern coast of Korea, *J. Geol. Soc. Korea*, **38**, 21-32 (in Korean with English abstract).