

수직 라인 관측시스템을 이용한 제주 동부 해안대수층에서 해수침투 모니터링 평가

장호준¹ · 하규철^{2,3*} · 황인욱¹ · 김기표⁴ · 박원배⁵

¹씨앤에치아엔씨

²한국지질자원연구원 지질환경연구본부

³과학기술연합대학원대학교,

⁴제주특별자치도

⁵제주연구원 지하수연구센터

Saltwater Intrusion Monitoring Evaluation through Automatic Vertical Line Method in a Costal Aquifer of the Eastern Part of Jeju Island

Hojune Jang¹ · Kyoochul Ha^{2,3*} · Inuk Hwang¹ · Gee-Pyo Kim⁴ · Won-Bae Park⁵

¹C&H Inc.

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Geologic Environment Division

³University of Science and Technology

⁴Jeju Special-Governing Province

⁵Jeju Research Institute Groundwater Research Center

ABSTRACT

Groundwater monitoring is commonly practiced with real-time sensors placed in several depth spots in aquifer. However, this method only provides monitoring data at the point where the sensors are installed. In this study, we developed a vertical line monitoring system (VLMS) that can provide continuous data of groundwater parameters along the vertical depth. The device was installed in a well located on the coast of the eastern part of Jeju island to monitor electrical conductivity, temperature, salinity, pH, dissolved oxygen, and oxidation-reduction potential over approximately 3 months from September 11 to December 3, 2020. The results indicated that the groundwater levels fluctuated with the tidal change of seawater level, and the upper and lower boundaries of the freshwater and saltwater zone in the groundwater were located at below 16 m and 36 m of mean sea level, respectively. There was a large variation in EC values during the high tide and temperature change was the greatest during flow tide. Although further investigation is needed for improvement of the device to obtain more accurate and reliable data, the device has a potential utility to provide fundamental data to understand the seawater intrusion and transport mechanisms in coastal aquifers.

Key words : Saltwater intrusion, Monitoring, Vertical line method, Jeju island, Coastal aquifer

1. 서 론

제주도는 연평균 강수량이 1,526.4 mm(제주기상관측소, 1998~2017년)로 우리나라 30년 평균 강수량 1,305.5 mm

주저자: 장호준, 과장

공저자: 황인욱, 대리; 김기표, 주무관; 박원배, 센터장

*교신저자: 하규철, 책임연구원

E-mail: hasife@kigam.re.kr

Received : 2021. 04. 23 Reviewed : 2021. 05. 07

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

(NIMS, 2018)에 비하여 220.9 mm나 많은 정도로 우리나라 최대 다우(多雨) 지역에 해당된다. 그러나, 강수량 변동이 매우 심하며, 풍부한 강수량에도 불구하고 투수성이 높은 화산암류로 이루어져있어, 일 강수량 50 mm 이상일 때를 제외하면 대부분의 하천이 건천상태를 유지하고 있다(Chang, 2014). 또한 도서지역의 특성상 수자원을 지하수에 대부분 의존할 수밖에 없고, 지하수의 과다 사용에 따른 지하수위 하강에 의해 해수침투의 위험성도 크다.

제주도 동부 해안지역은 지하수에 다량의 염분이 함유되어 있어 지하수 이용에 제한을 받고 있는 지역이다(ME

and K-water, 2018; Park et al., 2002; Park et al., 2013). 그러나, 이 지역의 고염분 지하수는 지하수 양수에 의해 서라기보다는 투수성 지층이 바다로 이어져 염수 유입이 용이한 지질특성때문으로 나타나고 있다(Lee et al., 2006). 또한, 지하수 염수화는 지구 온난화에 의해 해수면 상승이 진행되면서 더욱 심해질 가능성이 크다(Kim et al., 2009).

제주도는 해안지역에서 자연수위 변화 및 담염수 경계면의 변동을 파악하고, 해수침투를 감시하고자 수십 년 전부터 해안지역에 관측정을 개발하고, 지하수의 수온, 수위, 전기전도도(EC)를 관측해 오고 있다(Park et al., 2002). 그 이후로 이들 관측정을 늘려 왔으며, 현재는 약 80개소가 운영되고 있다. 이들 관측정에서 생산된 자료들은 제주지하수정보관리시스템(water.jeu.go.kr)으로 자동으로 수집되어, 관리·운영되고 있으며, 인터넷으로 일반인에게 공개되고 있다.

국내에 제주도 이외 지역은 한국농어촌공사에서 해수침투관측망을 설치·운영하고 있으며, 매년 관측연보를 발간해 오고 있다(MAFRA and KRC, 2019). 한국농어촌공사의 해수침투관측망은 농어촌 지하수 관리를 위해 해수침투가 우려되는 지역에 설치되어 원격으로 실시간 지하수위 및 수질 관측이 이루어지고 있다. 2019년 기준으로 이들 해수침투관측망은 190개소가 운영되고 있으며, 여기에서 지하수위, 수온, 전기전도도가 관측(24회/일)되고 있다. 해수침투관측망 자료는 농작물 염해 피해예방 및 합리적인 지하수 개발·이용, 관리 방안을 수립하는데 활용되고 있다.

해안지역에 있는 지하수는 주변의 지하수 양수에 의한 영향 등 인위적인 요인뿐만 아니라, 강수량 및 조석 등 자연적인 요인에 의해서도 수위와 수질 변동이 발생할 수 있다. 특히, 지하수 관정이 해안으로부터 거리가 가까운 곳에 위치하는 경우에는 해양조석에 의한 간조와 만조, 조금과 사리 등 해수면 변동이 그대로 지하수에도 나타나게 된다. 이에 따라 해수와 담수의 밀도차에 의해 형성된 담염수 경계면과 혼합대도 변동하게 되고, 이를 관측하기 위해서는 수직적인 수질분포를 연속적으로 측정할 필요가 있다. 그러나, 우리나라의 해수침투 관측망은 대부분 관측정내 특정 심도에 설치된 하나의 센서를 이용한 측정하는 방식으로 지하수위, 수질을 관측하고 있으므로, 담염수 경계면의 변동과 분포를 파악하는 것은 거의 불가능하다고 할 수 있다.

지하수의 수직적 수질분포를 관측하기 위해서는 심도별로 여러 개의 센서를 설치하는 방식이나 광섬유를 이용한

방식 등도 연구되고 있으나, 현재까지는 가장 신뢰할 수 방법은 관측공내에서 손데(Sonde)를 상하로 이동하면서 측정하는 물리검층이라고 할 수 있다. 이러한 물리검층이 해수침투 모니터링에 적용된 것은 2000년대 초 부터이며, 여기에서는 주로 EC와 온도검층 자료를 이용하였다. 제주도 동부지역 해수침투 관측망에서 물리검층 적용 사례를 보면, 이곳의 지하수는 해양조석에 의한 영향으로 하루에 2회 EC와 온도변화가 관측된 바 있다(Hwang et al., 2007).

그러나, 이러한 물리검층 방법이 장기간 현장에서 운영하기 위해서는 손데를 연속적으로 구동하고, 실시간적으로 관측 자료를 송수신하여 장기간 동안 운영할 수 있는 시스템 개발이 필요하다. 본 연구에서는 지하수의 수직적 수질분포를 연속적으로 관측하기 위해 범용 수질센서를 자동으로 상하 운동할 수 있도록 수직 라인(line) 관측시스템을 개발하고, 이를 제주 동부 해안대수층에 적용하였다. 그리고, 지하수의 수직적 수질 관측을 통해 해안지역 지하수위와 수질변동, 해수면 변동과의 연관성, 그리고, 담염수 경계면 또는 혼합대가 시기별로 어떻게 달라지는지를 규명해보고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 라인 모니터링 방법(Line monitoring method)

현재 우리나라의 지하수 관측망에서는 일정한 심도에 센서를 고정해서 지하수위와 수질(EC, 온도) 측정이 이루어지는데, 해수침투 관측망에서도 이러한 식으로 모니터링이 이루어지고 있다. 고정 심도에서 측정된 자료는 설치된 지점에서의 측정값만을 제시하여 주고 있다. 따라서, 해안지역에서 담염수 경계면 관측과 같이 깊이별로 수질 분포를 파악할 필요가 있다면 물리검층을 실시할 수밖에 없다. 이러한 물리검층을 실시하기 위해서는 장비를 운영하는 인력이 현장에서 직접 상주하여 주기적으로 관측을 실시해야만 한다(Hwang et al., 2007). 따라서, 본 연구에서는 이러한 물리검층의 자동 모니터링을 위해 관측정내 깊이별로 수질을 측정할 수 있는 손데를 자동으로 수직 왕복할 수 있는 원치를 개발하고, 수직적인 수질분포를 연속적으로 측정할 수 있는 수직 라인 관측시스템(Vertical Line Monitoring System; VLMS)을 개발하였다.

본 시스템은 심도에 따라 지하수질을 자동으로 측정할 수 있기 때문에, 조석과 계절적 변화 등 장기적인 수직적 수질분포를 파악할 수 있다. 설치장소는 제주시 구좌읍 행원리에 위치하고 있는 HW3 관측정이며, 이 시스템은 3

시간 간격(8회/일)으로 상하 운동하면서 깊이별 지하수질(온도, EC, 용존산소 등)을 모니터링 할 수 있도록 하였다(Fig. 1).

수직 라인 관측시스템은 Fig. 1에서와 같이 ① 전원부, ② 구동부, ③ 통신부, ④ 측정부로 이루어져 있다. ① 전원부는 관측정이 대부분 전력 공급이 원활하지 않은 오지(奥地)에 위치하는 점을 감안하여 태양광 패널과 축전지를 공급전원으로 사용하였다. ② 구동부는 케이블로 연결된 손대의 상하 운동을 할 수 있도록 윈치를 포함하는 부분으로, 이 시스템의 핵심을 이루고 있는 부분이다. 케이블 하단에는 지하수질을 측정할 수 있는 손대가 연결되어 일정한 속도로 상하 운동할 수 있도록 하였다. 손대의 이동속도가 빠르다면, 측정횟수가 증가하지만, 관측정내 수질교란이 발생할 수 있다. 수질교란에 영향을 미치는 인자로는 관정의 내부 직경, 손대의 직경과 이동속도 등이 있다. 이전 연구에서 물리검층에 의한 수질을 파악할 때에는 이러한 교란을 줄이도록 수직 검층시 손대는 3 m/분으로 수직이동 시켰는데, (Hwang et al., 2007), 본 연구에

서는 이보다 느린 1 m/분 이하의 속도로 유지하도록 하였다. 측정은 3시간 간격으로 이루어지며, 손대 하강 시 측정되도록 하였다. ③ 통신부는 3시간 마다 측정된 데이터를 서버로 전송되도록 하였다. ④ 측정부는 지하수질을 측정하기 위한 센서 부분인데, 본 연구에서는 Hydrolab사의 다항목 수질측정장비(Multi parameter Sonde)인 MS5를 사용하였다. 이 MS5를 통해 온도, EC, 염도(Salinity), pH, 용존산소(DO), 산화환원전위(ORP) 항목을 깊이별로 측정하였으며, 담염수 경계면에 중점을 두고 EC와 온도 위주로 관측 자료를 분석하였다. 이 외에도 MS5는 탁도, NH_4^+ 농도 등을 추가하여 측정할 수 있지만, 금번 모니터링에서는 제외하였다.

2.2. 관측정 및 시추주상도

시스템이 설치된 HW3 관측정의 제원과 관측방법을 Table 1에 정리하였다. HW3 관측정은 북위 33°33'12", 동경 126°49'19"에 위치하며, 표고는 해발고도 11.8 m이고, 굴착심도는 122 m, 관정 구경(내부 케이싱)은 200 mm이다. 수직 라인 관측시스템의 손대는 지표하 12~62 m 사이의 50 m 구간에서 측정이 이루어지도록 하였다. 관측기간은 2020년 9월 11일부터 12월 3일까지로 총 84일간이다.

Fig. 2는 관측정과 기상 및 조위관측소의 위치를 나타낸 그림이다. 지하수위 변동은 강수량과 함께 비교할 필요가 있는데, 본 연구에서 사용된 강수량 자료는 제주시 구좌읍 월정리에 위치한 자동기상관측시스템(WJ AWS)에서 측정된 것이다. 이 자료는 기상청 기상자료개방포털(data.kma.go.kr)을 통해 제공받았으며, 1시간 단위의 강수량이다. 또한, 해안지역에서의 지하수위는 조석의 영향을 받기 때문에 지하수위 변동을 분석하기 위해서는 반드시 조위를 분석할 필요가 있는데(Kim et al., 2005), 국립해양조사원 바다누리 해양정보 서비스(khoa.go.kr)에서 제공하는 제주와 성산포 조위관측소의 조위자료를 받아서 지하수위와 비교하였다. HW3에서 해안선까지의 최소거리는 335 m이다(Fig. 2(b)).

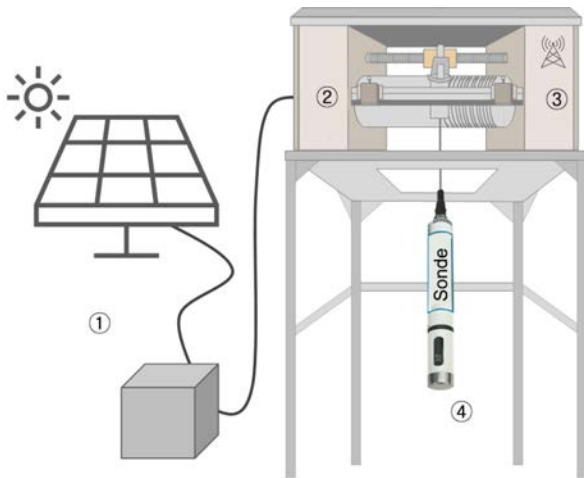



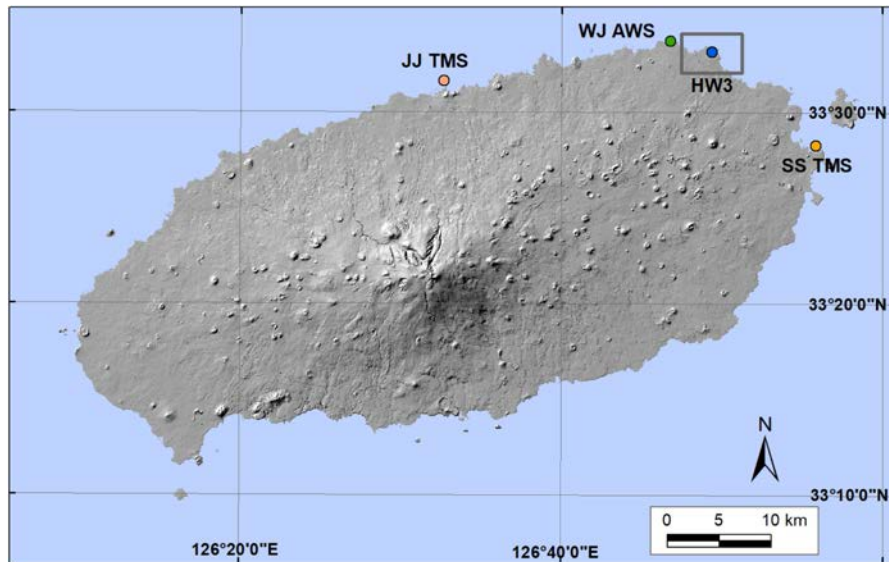
Fig. 1. Compartments of the Vertical Line Monitoring System (VLMS).

Table 1. Monitoring well

Well name		HW3	
Location		33°33'12"N 126°49'19"E	
Elevation		EL. 11.8 m	
Well depth		122 m	
Well diameter		200 mm	
Line monitoring	50 m		
	Monitoring range		(12~62 m below land surface)
	Monitoring period		2020.9.11.~12.3.







(a)



(b)

Fig. 2. (a) Location of the monitoring well (HW3) and tidal and meteorological station, and (b) the minimum distance between the monitoring well (HW3) and the coastline. WJ AWS: Weoljeong-ri Automatic Weather Station, JJ TMS: Jeju Tidal Monitoring System, SS TMS: Seongsanpo Tidal Monitoring System.

HW3의 시추주상도는 Fig. 3에 정리하였으며, 이 자료는 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원에서 실시한 ‘제주 동부지역 담염수경계특성 예측 분석기술 개발’ 최종보고서의 결과를 발췌하여 정리한 것이다(MCT and KAIA, 2020). HW3 관측공의 시추코어 암상은 크게 화산암, 퇴적암, 고토양으로 구분되고, 화산암은 기공의 함량 및 발달양상, 광물조성, 색상, 산출된 형태에 따라 현무암질 용암류와 유리질각력암으로 세분된다. 시추코어 회수율은 현

무암질 용암류는 80% 이상으로 시추 과정에서 손실이 크지 않지만, 퇴적층은 10% 이하로 매우 낮다. 이들 시추 코어로부터 HW3 관측공이 있는 지점에서 과거 최소 5회 용암이 흘렀음을 알 수 있다. 현무암질 용암류를 이루고 있는 화산암은 침상장석감람석현무암으로 치밀질이며, 기공과 절리가 불규칙적으로 발달되어 있다. 고토양은 코어 회수가 안되기 때문에 광학텔레뷰어(Optical Televiwer, OTV)로만 관찰되며, 해발고도 -22.2 ~ -23.2 m(1 m 두께)

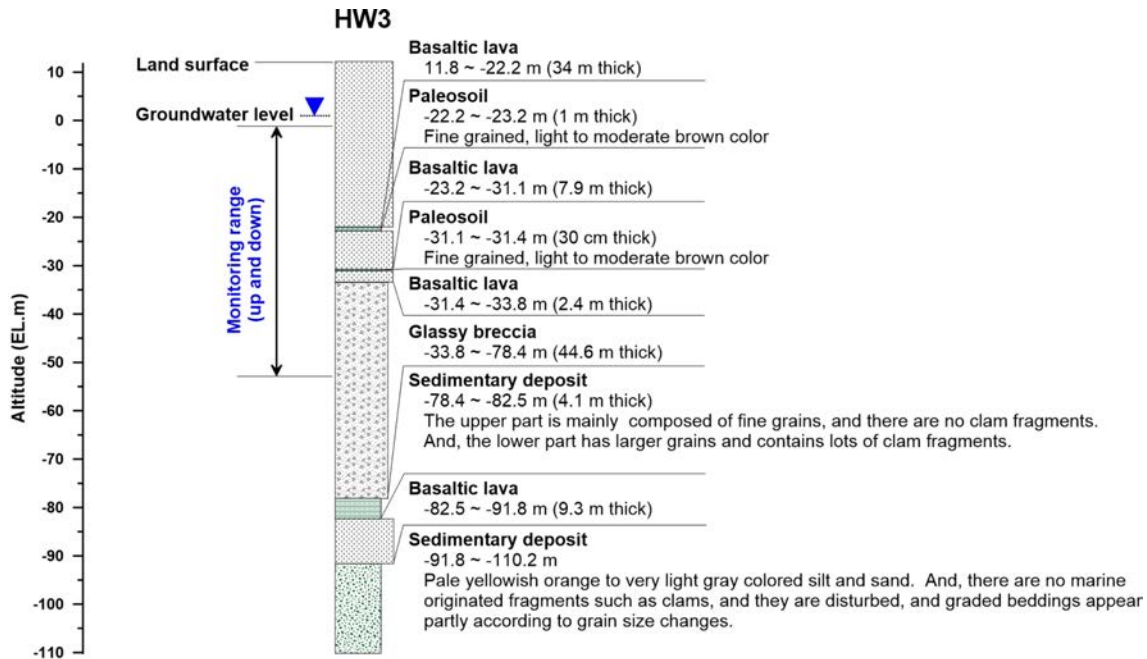


Fig. 3. Core logging and monitoring range of the line monitoring system. The elevations are described as mean seawater level in meters (EL.m). Logging data are modified from MCT and KAIA (2020).

와 -31.1 ~ -31.4 m (30 cm 두께)로 현무암질 용암류 사이에 분포하고 있다. 육안으로 구분되는 조립질 입자 없이 세립질 입자들만으로 구성된 것으로 보이며, 색상은 주로 옅은 갈색 내지 갈색을 띤다(MCT and KAIA, 2020).

유리질각력암 층은 해발고도 -33.8 ~ -78.4 m에서 44.6 m 정도의 두께를 가지고 있고, 모든 구간에서 분리된 각력들의 형태로 나타나는데, 유리질 조직이 우세하여 검정색과 같은 어두운 계열의 암색을 보이는 침상장석의 화산암으로 분류된다. Koh et al.(2020)는 제주 동북부 월정리-행원리 해안저지대에 위치한 7개의 시추공에서 얻은 시추코어에서 유리질각력암 층을 확인하였으며, 각력은 다양한 크기로 분리되어 있으며 기공이 결핍된 치밀한 조직을 보이는 것을 확인하였다. 유리질각력암 층은 용암류가 물속에서 흘러나와 급격하게 식어 깨어져 생성되기 때문에, 각력들의 형태를 띠며, 공극도 크게 발달하여 지하수와 물의 유출입이 잘 이루어지는 구간으로 판단된다.

퇴적층은 해발고도 -82.5 ~ -91.8 m (9.3 m 두께)에 위치하는 현무암질 용암류의 상부와 하부에 각각 해발고도 -78.4 ~ -82.5 m (4.1 m 두께)와 -91.8 ~ -110.2 m (두께는 확인 못함)에 분포한다. 하부 퇴적층은 교란 정도가 심하여 세부적인 조직특성과 퇴적구조의 관찰이 어려우며 전반적으로 실트-세립모래 크기의 쇄설성 퇴적물로 구성되었으며, 패각편과 같은 해양기원 입자는 확인되지 않았다.

색상은 대체로 옅은 황주황색 내지 밝은 회색빛을 띠고, 교란된 시추코어의 일부 단면에서는 입도변화에 따른 염층리가 나타나기도 한다. 상부 퇴적층은 상부와 하부의 특징이 서로 다르게 나타나는데, 상부에서는 주로 세립질 입자들로 구성되어 있으며, 패각편은 포함되어 있지 않지만, 하부로 갈수록 구성입자의 입도가 증가함과 더불어 패각편이 다량으로 포함되어 있는 것이 관찰된다. 유리질각력암 층과 접하고 있는 상부 구간의 색은 갈색으로 마치 고토양과 유사한 색상으로 보이지만 하부로 갈수록 점진적으로 밝아져 옅은 황갈색으로 바뀐다(MCT and KAIA, 2020).

HW3 관측정에서의 지하수위는 평균 해수면보다 약간 높은 위치에 있어서, 라인 모니터링 시스템의 손대의 이동범위는 이보다 약 5 m 낮은 위치에서 시작하여 그 아래까지 약 50 m 구간을 관측하도록 하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 지하수위 변동

Fig. 4(a)는 HW3 관측공에서 2020년 9월 11일부터 12월 3일까지 지하수위 변동을 나타낸 그림이다. 지하수위는 약 15일 주기인 장주기와 약 12시간의 단주기를 보여주고 있는데, 이와 같은 수위변동 양상은 해안대수층에

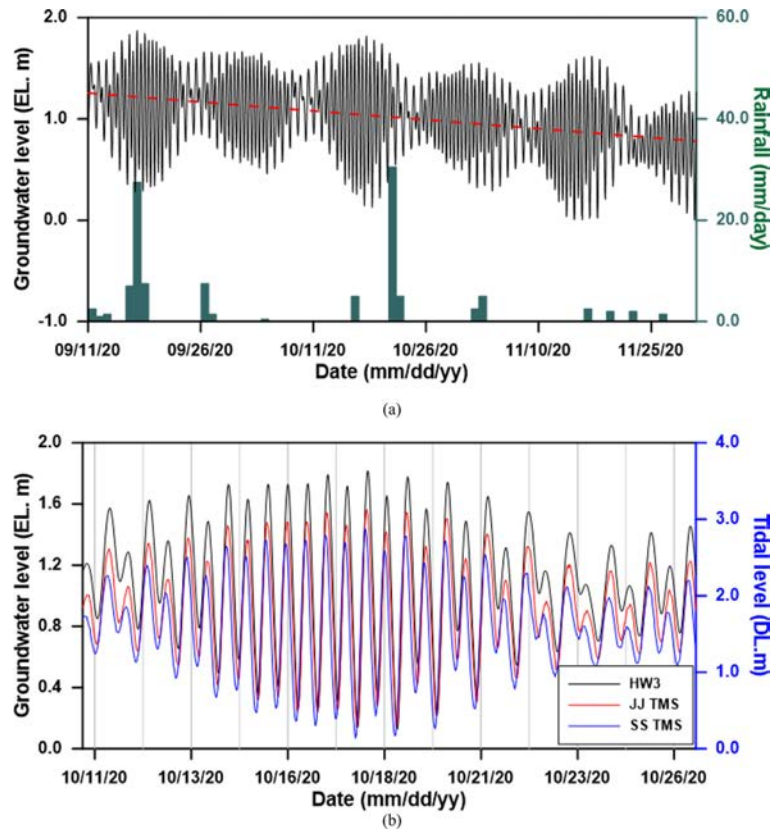


Fig. 4. Groundwater level fluctuations at HW3 well during the total monitoring period from September 11 to December 3, 2020 (a), and fluctuations of the groundwater levels at HW3 well and tidal water levels at Jeju and Seongsanpo Tidal Monitoring Stations (JJ TMS, SS TMS) during the selected period from October 11 to October 26, 2020 (b). DL is the Datum level for tidal level measurement baseline of each tidal monitoring station.

서 만조와 간조, 조금과 사리의 조석 변화를 그대로 반영하고 있는 것이다. 관측기간 중 일 강수량은 9월 17일에 27.5 mm, 10월 21일에 30.5 mm가 내렸는데, 이 강수량은 지하수위에 거의 영향을 미치지 않았다. 지하수위는 지표하 10 m 아래에 형성되어 있어 강수량이 지하수위 상승에 영향을 미치기에는 시간이 필요하고, 해양조석에 의한 영향력이 매우 크기 때문에 강수량 효과가 거의 나타나지 않는 것으로 판단된다.

지하수위의 장기적인 경향은 조위의 영향을 그대로 간직하면서 감소하는 양상을 보인다. 선형 추세분석을 통해 지하수위는 하루에 0.6 cm, 한 달에 17.6 cm 정도씩 하강하고 있는 것으로 나타났다. 지하수위가 하강하는 것은 강수량이 많은 여름철에서 가을, 겨울로 접어들면서 계절적으로 강수량이 줄어들었고, 그에 따라 지하수 유동체계상 상류에서 해안 쪽으로 지하수 유출이 줄어들고 있기 때문으로 해석할 수 있다. 관측 기간 동안 지하수위의 하강 추세는 계절적인 영향을 반영하는 일부 구간이라고 생각된다. 그 외에도 주변의 지하수 양수에 의해서도 수위변

동이 일어날 수 있는데, 이에 의한 효과는 관측결과에서는 나타나지 않았다.

HW3의 지하수위는 해안선으로부터 가장 가까운 조위의 영향을 받아 어느 정도 시간지연을 가지고 변동할 것으로 예상이 된다. HW3에서 가장 가까운 해안가에 조위 관측 자료가 없기 때문에 조위와 지하수위의 시간지연을 직접 비교하는 것은 어렵다. Fig. 4(b)는 HW3의 지하수위를 제주 조위관측소(JJ TMS)와 성산포 조위관측소(SS TMS)에서 관측한 조위자료를 같이 비교하여 나타낸 것이다. 이 그림은 2020년 10월 11일부터 10월 26일까지 15일의 한주기 동안의 시계열 자료를 추출한 그래프이다. HW3은 제주, 성산포 조위관측소와 각각 26.0 km, 13.5 km 떨어져 있는데, 성산포 조위가 제주의 조위보다 1시간 30분 정도 빠르다. 그런데, HW3에서의 지하수위는 제주 조위관측소 조위자료와는 시간적 지연이 거의 나타나지 않았다. 즉, HW3에서의 지하수위는 성산포 조위관측소 조위자료와는 1시간 30분 정도의 시간지연을 가지고 변동하고 있는 것을 알 수 있다.

3.2. 깊이에 따른 수질 관측

Fig. 5는 수직 라인 관측시스템으로 전체 관측기간 동안 EC에 대한 깊이별 분포를 시계열로 나타낸 그림이다. 손테의 이동 범위가 지표하 12~62 m 구간이기 때문에 심도별 관측값을 y축에 해발고도로 환산하여 0 m에서 -50 m 범위에서 나타내었고, x축은 시간단위로 표시하였다. EC가 급격히 변동하는 구간은 해발고도 약 -16~17 m에서부터 -32~-37 m 구간이다. 해발고도 약 -16~-17 m를 경계로 EC가 4,500~7,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이고, 이후의 심도에서는 약 -32~-37 m까지 급격한 변동성을 보인다. 해발고도 약 -37 m 아래의 깊이에서는 EC가 40,000~48,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상의 높은 값을 유지하고 있다.

이와 같은 EC의 수직 분포 양상은 Ghyben-Herzberg 관계로부터 설명될 수 있다(Freeze and Cherry, 1979). 즉, EC가 높고 밀도가 높은 염수가 담염수 경계면을 두고 아래에 분포하고, 상부에는 EC가 낮은 담수가 떠 있는 형태이다. 담염수 경계면은 밀물 때에는 염수가 내륙으로 밀고 들어오는데 밀도 때문에 아래쪽으로부터 침투한다. 반대로 썰물 때에는 염수가 바다 쪽으로 밀려나가게 된다. 밀물과 썰물은 약 12시간을 두고 하루에 2회 일어나기 때문에, 염수 유출입에 의한 담염수 혼합대에서의 EC도 이에 따라 변화한다.

Fig. 5는 HW3에서 담염수 혼합대 상부와 하부의 EC가 4,500~7,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 40,000~48,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 일 경우, 이들의 심도 변화를 시간에 따라 보여주고 있다. 여기에서도 역시 조위의 영향을 지시하는 약 12시간, 15일 주기의

변동성이 잘 나타나고 있다. 그리고, EC가 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 을 나타내는 심도는 조금씩 올라가고 있고, 48,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 을 나타내는 심도는 시간이 갈수록 더 낮아지고 있는 양상도 관측된다. 이는 담염수 혼합대가 확장되는 것을 지시하는 것인데, 이러한 현상이 나타나는 이유에 대해서는 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

Fig. 6는 HW3에서 심도별 지하수의 EC와 온도를 시계열로 나타낸 그래프이다. Fig. 5(a)에서 담염수 혼합대 내에 있는 해발고도 -11 m, -26 m와 혼합대로부터 벗어난 담수 구역인 -1 m와 염수구역 -36 m의 EC는 뚜렷한 차이를 나타내고 있다. 관측기간 동안 해발고도 -1 m에서의 EC는 1,751~3,338 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 2,306 $\mu\text{S}/\text{cm}$)으로 변동하고 있고, 해발고도 -11 m에서는 1,908~12,004 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 4,488 $\mu\text{S}/\text{cm}$), -26 m에서는 3,130~48,930 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 16,315 $\mu\text{S}/\text{cm}$), -36 m에서는 46,929~50,661 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 48,613 $\mu\text{S}/\text{cm}$)로 관측되고 있다. 심도별로 모두 조위의 영향을 받고 있지만, 담염수 혼합대 구간에 속해 있는 해발고도 -11 m와 -26 m에서는 더 큰 폭으로 변동하고 있음을 알 수 있다. 특히 혼합대 아래쪽에 위치한 해발고도 -26 m에서의 EC는 그 변동폭이 가장 큰데, 이와 같은 현상은 밀도차에 의해 염수가 아래로부터 침투해 들어오기 때문으로 판단된다.

Fig. 6(b)는 심도별 온도 변화를 나타낸 그래프이다. EC와 마찬가지로 해발고도 -1 m, -11 m, -26 m, -36 m에서 모두 조위의 영향을 보이고 있으며, 역시 혼합대 구간에 속해 있는 -26 m에서 가장 큰 폭의 온도 변동을 나

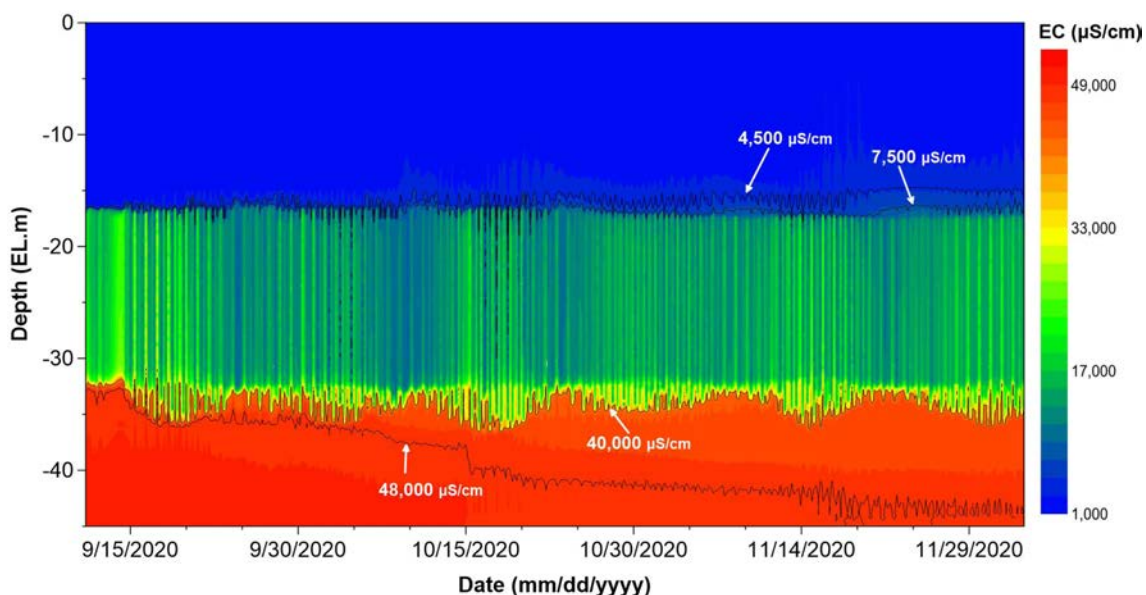


Fig. 5. EC variation with depth and time from September 11 to December 3, 2020.

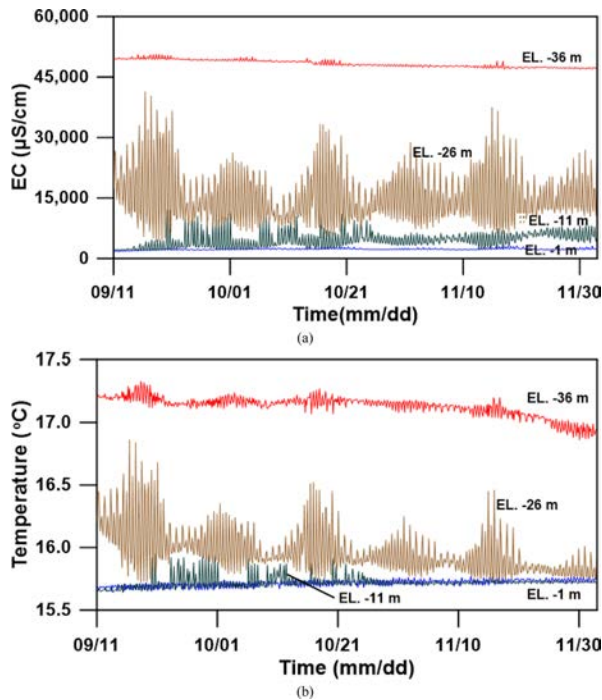


Fig. 6. (a) EC and (b) temperature at various depths of the HW3 well from September 11 to December 3, 2020.

타내었고, 해발고도 -36 m에서는 온도가 점차 낮아지는 양상도 나타나고 있다. 심도가 깊은 곳에서 온도가 낮아 있는 것은 겨울철로 접어들면서 해수의 온도가 낮아지고, 온도가 낮아진 해수가 대수층으로 유입되기 때문으로 생각된다.

Fig. 7은 EC와 온도에 대한 수직 분포를 3시간 간격으로 1일간 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 7(a)와 (b)는 2020년 10월 1일 조위변동이 가장 큰 사리에 측정된 결과이다. EC와 온도 변화는 해발고도 약 -16 m와 약 -36 m에서 급격한 증가가 일어나고, 이 범위에서 하루 2회 줄어들었다가 다시 증가하는 양상을 잘 보여준다. 그림에서 오전 1시를 시작으로 ①~⑦까지 순서대로 왼쪽에서 오른쪽으로, 그리고 오른쪽에서 왼쪽으로 EC와 온도 라인이 이동하는 것을 알 수 있다. EC와 온도의 수직적 분포는 해발고도 약 -16 m와 약 -36 m 구간에서 변화양상이 비슷하게 나타나고 있으나, 해발고도 약 -36 m 아래에서는 EC보다 변화가 약화되고 기온기도 낮아지는 것이 특징이다.

Fig. 7(c)와 (d)는 2020년 10월 8일 측정된 자료이며, 이때는 조위변동이 작은 조금 때에 측정된 자료이다. 변

Table 2. Vertical EC logging results during the high and low tide

Depth (EL. m)		High tide on October 1, 2020 (unit : $\mu\text{S}/\text{cm}$)								Average
		01:00	04:00	07:00	10:00	13:00	16:00	19:00	22:00	
Fresh layer	-12.0	2,541	2,202	2,305	2,460	2,682	2,221	2,190	2,530	2,391
	-14.0	2,655	2,197	2,631	2,700	2,872	2,232	2,203	2,730	2,528
Mixing zone	-16.0	11,057	2,198	2,670	3,422	9,699	2,276	2,521	3,242	4,636
	-18.0	11,287	7,819	8,343	22,645	12,956	7,160	7,815	20,557	12,323
	-30.0	10,476	9,272	10,451	24,998	12,773	9,949	8,450	22,909	13,660
	-32.0	11,070	9,229	11,309	32,881	14,861	9,900	8,584	29,751	15,948
Saline layer	-34.0	43,687	9,184	36,404	48,596	44,059	9,875	16,583	48,398	32,098
	-36.0	47,807	43,131	47,703	48,625	47,855	14,370	47,829	48,534	43,232
	-40.0	48,881	48,785	48,846	49,108	48,857	48,859	48,752	48,965	48,882

Depth (EL. m)		Low tide on October 8, 2020 (unit : $\mu\text{S}/\text{cm}$)								Average
		01:00	04:00	07:00	10:00	13:00	16:00	19:00	22:00	
Fresh layer	-12.0	2,461	2,748	2,775	2,714	2,712	2,693	2,656	2,446	2,651
	-14.0	2,888	2,941	2,857	2,865	2,963	3,017	2,749	2,846	2,891
Mixing zone	-16.0	3,532	8,330	3,462	2,979	3,363	4,129	3,192	3,072	4,007
	-18.0	14,081	11,043	10,464	9,100	11,440	9,416	9,126	8,046	10,340
	-30.0	16,827	11,177	11,369	10,429	12,128	8,818	9,938	10,584	11,409
	-32.0	20,267	12,815	11,319	10,354	12,139	9,683	9,818	10,363	12,095
Saline layer	-34.0	47,125	44,165	11,311	10,334	16,039	35,570	9,713	10,138	23,049
	-36.0	47,455	47,079	43,203	46,764	46,585	46,709	45,359	46,380	46,192
	-40.0	48,655	48,575	48,650	48,582	48,535	48,591	48,509	48,655	48,594

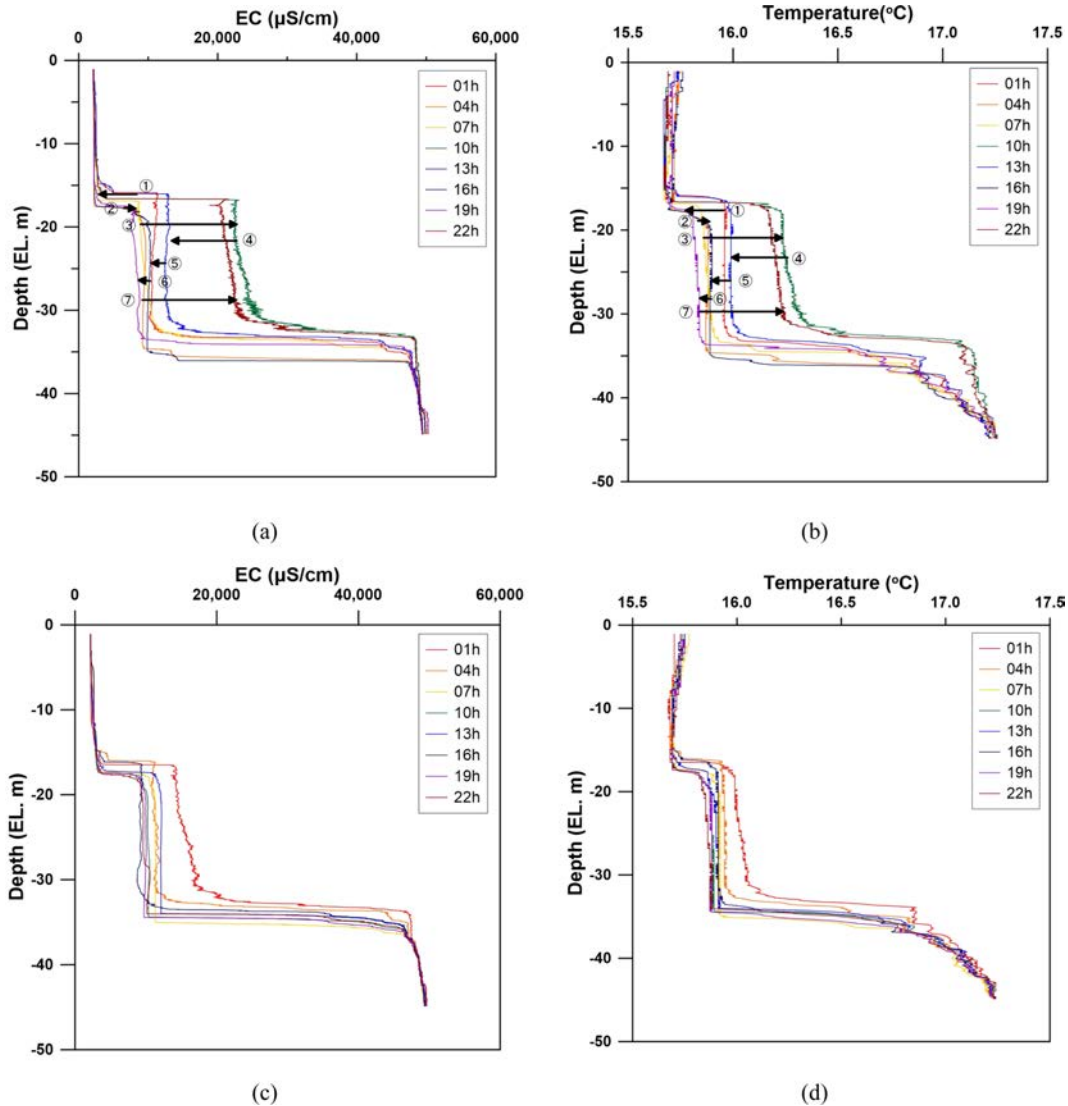


Fig. 7. Vertical logging for water temperature and EC at the HW3 well, (a) EC and (b) temperature on October 1, 2020, and (c) EC and (d) temperature on October 8, 2020.

화 양상은 사리 때와 비슷하지만, 혼합대에서의 변동폭이 현저하게 줄어든 것을 알 수 있다. 이는 조위 차에 의한 효과가 EC와 온도 변동폭에도 그대로 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Table 2는 사리와 조금 때에 각 심도별 EC를 비교한 표이다. 담수층으로 구분되는 해발고도 -12 m, -14 m에서 EC는 3,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 미만으로 분포한다. 10월 1일 사리일 때, 담염수 혼합대인 해발고도 -16 m에서 -34 m에서 EC는 평균 4,636~32,098 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 분포를 보이며, 이 구간에서 10월 8일 조금일 때는 평균 4,007~23,049 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 사리 때보다 낮았다. 염수층에 속해 있는 해발고도 -40 m에서는 사리와 조금 때 평균 48,594~48,882 $\mu\text{S}/\text{cm}$

로 일정하게 유지되었다.

심도별로는 혼합대 상부인 해발고도 -16 m에서 10월 1일 사리일 때 평균 4,636 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이고, 10월 8일 조금일 때는 평균 4,007 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 629 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 높았다. 그리고, 혼합대 하부인 해발고도 -34 m에서 측정된 EC는 10월 1일에는 평균 32,098 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 10월 8일에는 평균 23,049 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 9,049 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 높았다. 대체로 사리 때가 조금 때보다 혼합대에서의 EC가 높은 것을 알 수 있다.

하루 시간대별 EC 변화를 살펴보면, 10월 1일 만조 때인 10시와 22시에는 담수층에서 2,460~2,730 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 혼합대에서 3,242~48,596 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 염수층에서 48,534~49,108 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 분포를 보였으며, 간조 때인 4시와 16시에는 담

Table 3. Vertical temperature logging results during the high and low tide

Depth (EL. m)		High tide on October 1, 2020 (unit : °C)								
		01:00	04:00	07:00	10:00	13:00	16:00	19:00	22:00	Average
Fresh layer	-12.0	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7
	-14.0	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7
Interface	-16.0	15.9	15.7	15.7	15.7	15.8	15.7	15.7	15.7	15.7
	-18.0	16.0	15.8	15.9	16.2	16.0	15.8	15.8	16.2	16.0
	-30.0	16.0	15.9	15.9	16.3	16.0	15.9	15.8	16.2	16.0
	-32.0	16.0	15.9	15.9	16.5	16.0	15.9	15.8	16.4	16.1
	-34.0	16.5	15.9	16.1	17.1	16.6	15.9	16.2	17.1	16.4
Saline layer	-36.0	16.9	16.6	16.8	17.2	16.9	16.2	16.7	17.1	16.8
	-40.0	17.1	17.1	17.1	17.2	17.1	17.0	17.1	17.2	17.1

Depth (EL. m)		Low tide on October 8, 2020 (unit : °C)								
		01:00	04:00	07:00	10:00	13:00	16:00	19:00	22:00	Average
Fresh layer	-12.0	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7
	-14.0	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7
Interface	-16.0	15.7	15.8	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7
	-18.0	16.0	15.9	15.9	15.8	15.9	15.9	15.8	15.8	15.9
	-30.0	16.1	15.9	15.9	15.9	15.9	15.9	15.9	15.9	15.9
	-32.0	16.1	16.0	15.9	15.9	15.9	15.9	15.9	15.9	15.9
	-34.0	16.8	16.5	15.9	15.9	15.9	16.1	15.9	15.9	16.1
Saline layer	-36.0	16.9	16.8	16.5	16.8	16.8	16.8	16.7	16.8	16.8
	-40.0	17.1	17.1	17.0	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1

수층에서 2,197~2,232 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 혼합대에서 2,198~9,875 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 염수층에서 14,370~48,859 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 분포를 나타내었다. 10월 8일에는 만조 때 4시와 16시에 담수층에서 2,693~3,017 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 혼합대에서 4,129~44,165 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 염수층에서 46,709~48,591 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 분포를 보였으며, 간조 때 10시에 담수층에서 2,714~2,865 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 혼합대에서 2,979~10,334 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 염수층에서 46,764~48,582 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 분포를 나타내었다. 대체적으로 만조 때의 EC가 간조 때보다 높은 것을 알 수 있으며, 이는 만조시 염수가 간조시 보다 많이 유입되고 있는 것을 시사해 주고 있다.

Table 3은 사리 때와 조금 때의 심도별 온도를 비교한 표이다. 담수층으로 구분되는 해발고도 -12 m, -14 m에서 온도는 10월 1일(사리 때)와 10월 8일(조금 때) 모두 15.7°C에서 유지되고 있었다. 담염수 혼합대에서는 10월 1일 평균 15.7~16.4°C이고, 10월 8일에는 평균 15.7~16.1°C의 분포를 나타내어 사리 때가 조금 때보다 최대 0.3°C 정도 높았다. 염수층에서는 사리와 조금 때 모두 17.1°C 정도로 일정하게 유지되었다. 또한, 10월 1일 만조시에 해당하는 10시와 22시에 해발고도 -34 m 아래 층에서 온도가 평균 17.1~17.2°C로서, 이 온도는 다른 시간에 측정된 온도보다 0.6~1.2°C 높았다. 이는 만조 때에 상대

적으로 온도가 높은 해수가 아래쪽에서 유입되는 효과가 반영된 것으로 보인다.

본 연구에서 사용된 Hydrolab사의 MS5는 EC, 온도 이외에도 Salinity, pH, DO, ORP 항목을 측정할 수 있다. Fig. 8은 이들 수질 항목들에 대하여 2020년 10월 11일부터 10월 26일까지 15일 동안의 심도별 수질분포를 나타내 것이다. 앞에서 언급하였듯이 해발고도 -1 m와 -36 m는 담염수 혼합대의 상부와 하부에 위치하고 있고, -11 m와 -26 m는 담염수 혼합대 내에 존재하고 있다. 온도와 EC, 그리고 Salinity는 담염수 혼합대 구간에 속해 있는 -26 m 지점에서 변동폭이 조위의 영향으로 가장 크고, 다음으로 해발고도 -11 m에서 변동이 많이 나타나고 있다. 담염수 혼합대에서 벗어나 있는 해발고도 -1 m와 -36 m에서는 변동폭이 그리 크지 않고 거의 일정한 양상을 보였다. 다만, 해발고도 -36 m에서 온도는 사리 때라고 생각되는 10월 16일부터 10월 21일까지 주기적인 변동이 잘 나타났다. Fig. 8에서 DO, pH, ORP는 10월 15일 센서 보정을 실시하였는데, 이 시기를 기준으로 전과 후가 수치가 크게 달라졌다. 이는 MS5에서 DO, pH, ORP 센서는 온도와 EC, Salinity 센서보다 민감하기 때문에 지속적인 보정이 이루어져야 한다는 것을 지시하여 준다.

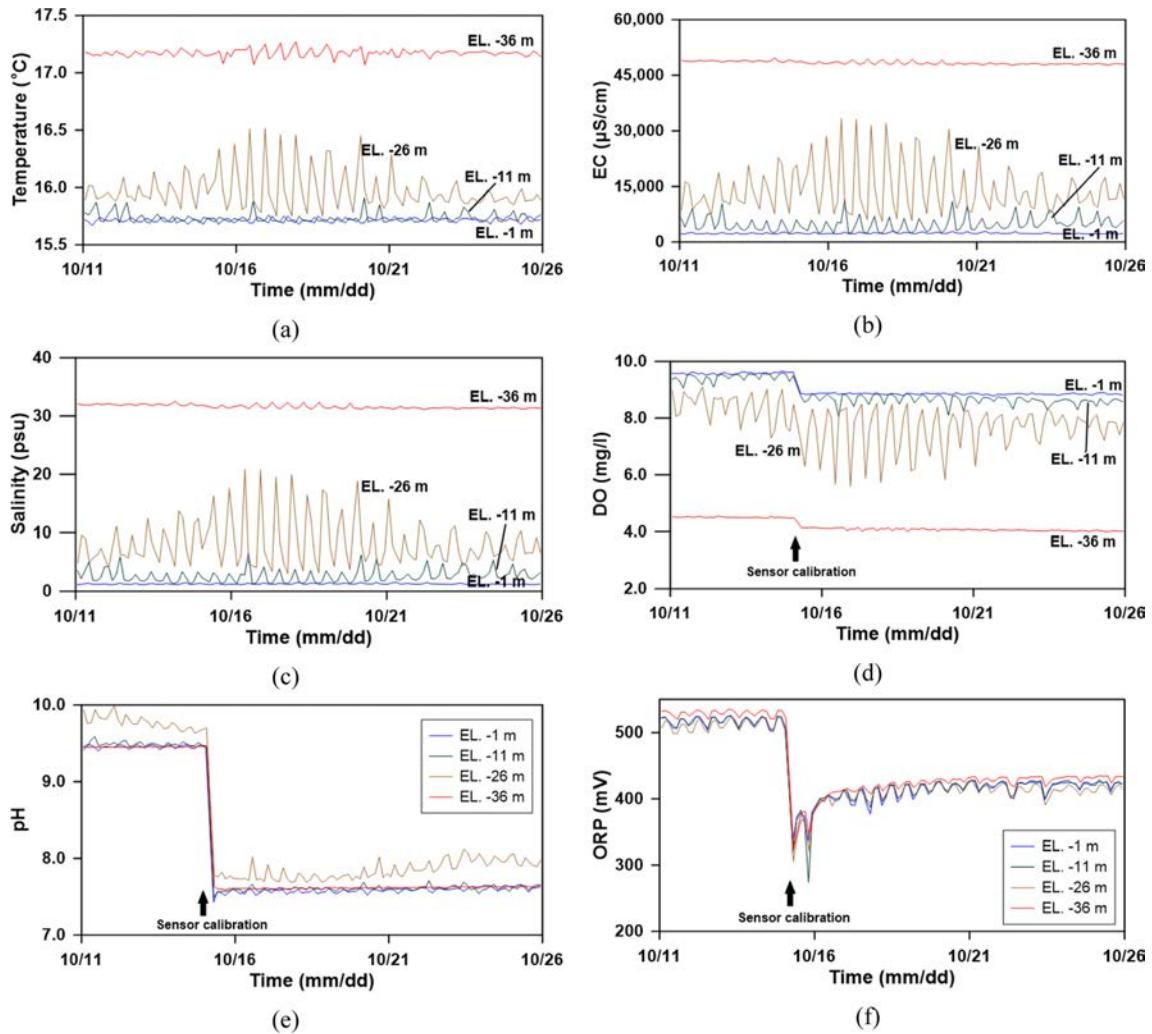


Fig. 8. Fluctuation of groundwater levels and tide during (a) temperature, (b) EC, (c) salinity, (d) DO, (e) pH and (f) ORP at various depths of the HW3 well during the selected period (2020.10.11.~10.26.).

해발고도 -1 m에서 온도는 15.7~15.8°C(평균 15.7°C), -11 m에서 온도는 15.7~15.9°C(평균 15.7°C), -26 m에서는 15.8~16.5°C(평균 16.0°C), -36 m에서는 17.1~17.3°C(평균 17.2°C) 분포를 나타내었다. EC는 해발고도 -1 m에서 2,183~2,942 $\mu\text{S/cm}$ (평균 2375 $\mu\text{S/cm}$), -11 m에서 온도는 2,298~11,480 $\mu\text{S/cm}$ (평균 4843 $\mu\text{S/cm}$), -26 m에서는 5,548~33,334 $\mu\text{S/cm}$ (평균 14036 $\mu\text{S/cm}$), -36 m에서는 47,666~49,644 $\mu\text{S/cm}$ (평균 48,368 $\mu\text{S/cm}$) 분포를 나타내었다. Salinity는 해발고도 -1 m에서 1.2~1.6 psu(평균 1.3 psu), -11 m에서는 1.2~6.6 psu(평균 2.7 psu), -26 m에서는 3.1~20.9 psu(평균 8.2 psu), -36 m에서는 31.1~32.6 psu(평균 31.6 psu) 분포를 나타내었다.

온도와 EC, Salinity는 10월 15일 센서 보정 후에도 자료의 연속성이 유지되었으나, DO, pH, ORP는 센서 보

정 후에 계단형으로 자료가 내려앉았다. 이러한 자료의 불연속성은 앞서 언급했듯이, 향후 개선할 부분이라고 생각된다. DO, pH, ORP 분포는 보정 후에 얻어진 자료가 보다 정확할 것으로 판단되고, 이들 수질 항목들도 온도, EC, Salinity와 마찬가지로 담염수 혼합대에 속해 있는 부분과 속해 있지 않은 부분에서 뚜렷한 차이가 나타났다. 담염수 혼합대 내에 속해 있는 해발고도 -11 m, 특히 혼합대 하부에 있는 -26 m에서 변동이 컸다.

센서 보정후의 10월 16일부터 10월 26일까지의 기간 동안, DO는 해발고도 -1 m에서 8.8~8.9 mg/L, -11 m에서 8.1~8.9 mg/L, -26 m에서 5.6~8.5 mg/L, -36 m에서 5.6~8.5 mg/L의 분포를 나타내었다. pH는 해발고도 -1 m에서 7.5~7.7, -11 m에서 7.5~7.7, -26 m에서 7.7~8.1, -36 m에서는 7.6 정도로 일정한 분포를 나타내었다. ORP

는 해발고도 -1 m에서 336~428 mV, -11 m에서 274~429 mV, -26 m에서 321~428 mV, -36 m에서는 345~436 mV의 분포를 나타내었다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서 개발한 수직 라인 관측 시스템은 기존 물리검층 방법을 자동화 하여 장기간 무인 관측할 수 있는 시스템이다. 관측정 내에서 수질을 측정할 수 있는 손테를 상하 운동하면서 측정할 수 있기 때문에 센서 종류에 따라 모든 심도에서 수질을 모니터링 할 수 있는 장점이 있다. 이 시스템을 제주 동부지역 해안에 위치한 HW3 관측공에 설치하여 2020년 9월 11일부터 12월 3일까지 3시간 간격으로 EC와 온도를 포함하여 Salinity, pH, DO, ORP를 측정하였다.

HW3 관측정에서 지하수위는 약 12시간과 15일 주기의 조위 영향을 직접적으로 받는 것으로 나타났으며, 심도별 EC와 온도 분포도 조수 간만과 조금과 사리 때의 조위의 강약에 따라 변화 양상이 달라지는 것을 확인하였다. 또한, HW3의 심도별 수질 관측결과 이곳의 담수구간 경계는 해발고도 약 -16 m이며, 염수 구간 경계는 약 -36 m로 확인되었다. EC에 의한 담염수 혼합대는 조금과 사리 때, 그 변동폭이 다르며, 만조와 간조 때에도 양상이 다르게 나타났다. 대체적으로 해수가 많이 유입될 수 있는 만조와 사리 때에 EC의 변동이 크며, 온도에서도 유사한 양상이 나타났다. EC와 온도 이외에도 Salinity, DO, pH, ORP 등도 관측하였는데, 일부 수질항목의 경우 보정 전과 후의 수치가 달라져서 이들 관측 자료의 신뢰성을 지속적으로 유지할 수 있도록 기술적인 개선도 필요하다.

본 연구를 통해 수직 라인 관측시스템이 해수침투를 효과적으로 모니터링할 수 있음을 확인하였으며, 향후 해안 대수층에서 염수의 이동과 확산을 보다 정확한 관측 및 해수침투 현상을 규명할 수 있을 것으로 기대한다. 또한, 관측정 주변에 지하수 양수가 있을 때, 지하수위 하강에 따른 실질적인 해수침투 감지도 가능할 것이다. 그리고, 이 시스템은 해수침투가 아닌 관측정내 수직적인 지하수질의 변화를 감시하고자 할 경우에도 다양한 수질항목에 대하여 심도별로 연속적인 모니터링이 가능하기 때문에 활용도는 매우 높을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부의 2021년 수요대응형 물공급 서비스

사업의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Chang, S.W., 2014, A review of recent research into coastal groundwater problems and associated case studies, *J. Eng. Geol.*, **24**(4), 597-608.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979, Groundwater, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 604p.
- Hwang, S., Shin, J., Park, I.H., and Park, G.-H., 2007, Assessment of seawater intrusion using geophysical well logging in eastern coasts, Jeju, *Proceedings of the 6th Jeju-KIGAM Joint Workshop*, Jeju Special Self-Governing Province-Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Jeju City, 3-33.
- Lee, B.J., Park, K., Koo, M.-H., Koh, G.W., and Park, Y.S., 2006, Hydraulic diffusivity and possibility of conduit-flow of groundwater in eastern part of Jeju island, *J. Geol. Soc. Korea*, **42**(3), 439-454.
- Kim, K.-H., Shin, J.-Y., Koh, E.-H., Koh, G.-W., and Lee, K.-K., 2009, Sea level rise around Jeju island due to global warming and movement of groundwater/seawater interface in the eastern part of Jeju island, *J. Soil Groundw. Environ.*, **14**(3), 68-79.
- Kim, K.-Y., Shim, B.-O., Park, K.-H., Kim, T.-H., Seong, H.-J., Park, Y.-S., Koh, G.-W., and Woo, N.-C., 2005, Analysis of hydraulic gradient at coastal aquifers in eastern part of Jeju island, *Econ. Environ. Geol.*, **38**(1), p.79-89.
- Koh, C.-S., Yoon, S.-H., Hwang, S., and Shin, J., 2020, Origin and characteristics of glassy breccias from the boreholes in the Woljeong-Haengwon area of northeastern Jeju Island, Korea, *J. Geol. Soc. Korea*, **56**(1), 17-29.
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs), KRC (Korea Rural Community Corporation), 2019, Annual report on the Seawater Intrusion Monitoring Network in Korea (2019), 724p.
- MCT (Ministry of Construction and Transportation), KAIA (Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement), 2020, Prediction technique development of fresh/salt water interface of Eastern Jeju Island, Korea, Final Report of Land, Transport, and Infrastructure Technology for Regional Specialization, 201p.
- ME (Ministry of Environment), K-water, 2018, Complementary Basic Groundwater Survey of Jeju Island, 220p.
- NIMS (National Institute of Meteorological Sciences), 2018, Climate change of 100 years in Korean Peninsula, 31p.
- Park, N., Koh, B.-R., and Lim, Y., 2013, Impacts of fresh and saline groundwater development in Sungsan watershed, Jeju Island, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **46**(7), 783-794.

Park, Y.S., Koh, G.W., Kang, B.-R., and Park, W.B., 2002, Jeju saltwater intrusion monitoring network establishment in 2001 - Songdang-ri, Gujwa-eup, Northern Jeju County, *Proceedings of the Academic Seminar on the 10th Jeju World Water Forum*,

“Jeju Water; the property of the people of the Province”, Jeju Special Self-Governing Province-Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Jeju City, 73-113.