The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169

Vol. 33, No. 1, March, 2023, pp. 105-119
https://doi.org/10.9720/kseg.2023.1.105

RESEARCH ARTICLE

연안 대수층의 해저 담지하수 유출량 산정을 위한 유량 평균 유출량 방정식의 적용

김일환[1] · 김민규[2] · 정일문[3] · 정교철[4] · 장선우[5*]

[1]한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 박사후연구원, [2]한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 전임연구원,
[3]한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 선임연구위원, [4]안동대학교 지구환경과학과 교수,
[5]한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 연구위원

Application of Flux Average Discharge Equation to Assess the Submarine Fresh Groundwater Discharge in a Coastal Aquifer

Il Hwan Kim[1] · Min-Gyu Kim[2] · Il-Moon Chung[3] · Gyo-Cheol Jeong[4] · Sunwoo Chang[5*]

[1]Postdoctoral Researcher, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology
[2]Research Specialist, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology
[3]Senior Research Fellow, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology
[4]Professor, Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University
[5]Senior Researcher, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

Abstract

Water supply is decreasing due to climate change, and coastal and island regions are highly dependent on groundwater, reducing the amount of available water. For sustainable water supply in coastal and island regions, it is necessary to accurately diagnose the current condition and efficiently distribute and manage water. For a precise analysis of the groundwater flow in the coastal island region, submarine fresh groundwater discharge was calculated for the Seongsan basin in the eastern part of Jeju Island. Two methods were used to estimate the thickness of the fresh groundwater. One method employed vertical interpolation of measured electrical conductivity in a multi depth monitoring well; the other used theoretical Ghyben-Herzberg ratio. The value using the Ghyben-Herzberg ratio makes it impossible to accurately estimate the changing salt-saltwater interface, and the value analyzed by electrical conductivity can represent the current state of the freshwater-saltwater interface. Observed parameter was distributed on a virtual grid. The average of submarine fresh groundwater discharge fluxes for the virtual grid was determined as the watershed's representative flux. The submarine fresh groundwater discharge and flux distribution by year were also calculated at the basin scale. The method using electrical conductivity estimated the submarine fresh groundwater discharge from 2018 to 2020 to be 6.27×10^6 m^3/year; the method using the Ghyben-Herzberg ratio estimated a discharge of 10.87×10^6 m^3/year. The results presented in this study can be used as basis data for policies that determine sustainable water supply by using precise water budget analysis in coastal and island areas.

Keywords: coastal aquifer, submarine fresh groundwater discharge, flux average discharge equation, Jeju Seongsan

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Sunwoo Chang
E-mail: chang@kict.re.kr

Received: 3 March, 2023
Revised: 27 March, 2023
Accepted: 28 March, 2023

Ⓒ 2023 The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

기후 변화에 따라 용수 공급량은 줄어들고 있으며, 해안 및 도서지역은 지하수의 의존도가 높아 활용 가능한 용수의 양이 줄어들고 있다. 지속 가능한 해안 도서 지역의 물 공급을 위해 현재의 상태를 정확히 진단하고 효율적인 용수의 배분 및 관리가 필요하다. 해안 도서 지역의 지하수 흐름의 정밀한 분석을 위해 제주 동부의 성산유역을 대상으로 해안 담지하수 유출량을 산정하였다. 중요 매개변수인 담수층의 두께의 산정은 다심도 관측공에서 측정되는 전기전도도를 이용하여 수직적인 보간을 통해 추정하는 방법과 Ghyben-Herzberg의 이론적인 비율을 이용하여 추정하는 방법을 사용하였다. Ghyben-Herzberg의 비율을 사용한 값은 변화하는 담-염수 경계면의 정밀한 추정이 불가능하며, 전기전도도로 분석한 값은 담-염수 경계면의 현재 상태를 나타낼 수 있다. 매개변수는 가상의 격자에 분포시키고, 각각의 격자에 대한 해안 담지하수 유출 유량의 평균을 유역 대표 유량으로 결정하였다. 유역 규모의 연도별 해안 담지하수 유출량 산정과 유량 분포를 나타냈으며, 2018년에서 2020년까지의 해안 담지하수 유출량은 전기전도도로 추정한 담수층의 두께를 적용한 방법은 6.27×10^6 m^3/year, Ghyben-Herzberg의 비율을 적용한 방법은 10.87×10^6 m^3/year로 나타났다. 본 연구에서 나타낸 결과는 해안 도서지역의 정밀한 물수지 분석 등을 이용하여 지속가능한 용수의 공급을 결정하는 정책의 근거 자료로 활용할 수 있다.

주요어: 연안 대수층, 담해저 지하수 유출량, 유량 평균 유출량 방정식, 제주 성산

서 론

해안 도시는 용수공급원으로 담수 지하수자원을 적극적으로 활용하고 있으며, 기후 변화로 인해 해수면의 상승, 인구의 증가 및 관광 산업 및 복지의 실현으로 담수 지하수의 사용량이 증가하여 담수 지하수가 하강하여 해수 침투에 대한 피해가 발생하고 있다. 해안에서의 해수 침투는 대수층에서 변화하는 담지하수와 염지하수의 밀도와 수두 차이 등에 의해 담-염수 경계면이 내륙으로 이동하여 발생한다. 담지하수의 사용과 해수면이 상승으로 기존의 담-염수의 경계면은 점차 내륙으로 이동하고 있으며, 해안에서의 지하수 흐름에 대한 정량적인 분석으로 추가적인 피해 및 예방이 필요하다. 해안 지하수 유출(Submarine Groundwater Discharge, SGD)는 해안에서 발생하는 모든 지하수의 흐름으로 정의되며, 크게 해안 담지하수 유출(Submarine fresh groundwater discharge, SFGD)와 담염수 경계면 근처의 순환 염지하수 유출(Recirculated saline groundwater discharge, RSGD)로 구분된다(Moore, 1999). SGD는 해안 도시의 용수 공급원으로 물 부족 문제를 해결할 수 있는 대안이 될 수 있다(Karageorgis et al., 2012; Burnett et al., 2017; Manivannan and Elango, 2019; Bhandary and Sabarathinam, 2020). 또한, 담지하수의 해양으로 의 유출은 해양에서 영양소 및 화학물질의 공급으로 해안 생물의 생산성에 많은 영향을 미치고 있는 반면에(Slomp and Van Cappellen, 2004; Waska and Kim, 2011; Santos et al., 2014; Urquidi-Gaume et al., 2016; Knapp et al., 2020; Kumar et al., 2021), 염지하수의 내륙의 대수층으로의 유출은 염수가 오염원으로 작용하여 재배하는 작물 등에 피해를 주고 있으며, 생활용으로 사용하는 담지하수의 이용을 제한하고, 지하 구조물의 부식을 가속화하고 있다(Dulaiova et al., 2010; Wilson and Rocha, 2012; Dadhich et al., 2017; Chen et al., 2018; Szymczycha et al., 2020; Yu et al., 2022). 해안 대수층에서 SGD의 정량적인 평가는 해수 침투가 진행됨에 따라 해수와 담수의 상호작용의 역학적인 측면에서의 분석이 가능하며(Moore, 2010; Charette et al., 2012; Wang et al., 2021), SGD의 역학적인 특성을 이용하여 적정 담지하수의 유지 및 회복 등으로 염지하수의 유입을 막을 수 있는 대안으로 활용할 수 있다(Kuan et al., 2012; Yu et al., 2017; Liu et al., 2018; Manivannan and Elango, 2019).

최근 SGD를 적극적으로 활용하기 위해 SFGD에 대한 정량적 분석을 위한 시도가 이루어지고 있다(Taniguchi et al., 2019; Selvam et al., 2021). 대부분의 SGD의 속도는 0.57~35 m/year의 범위를 나타나고 있으며(Taniguchi et al., 2002), 유역에서 발생하는 SFGD는 지하수계로 함양되는 양보다 적게 나타난다(Freeze and Witherspoon, 1967). Chang and Clement(2013)은 실내 실험과 현장 연구를 통해 해안 대수층에서 대수층 두께와 수리전도도에 따라 SFGD와 RSGD의

정량적 비율을 평가하였다. 모든 경우에서 RSGD의 비율은 SFGD에 비해 낮은 값을 나타냈다.

SGD를 측정하는 방법은 직접 측정, 동위원소를 이용한 추적, 경계면 모델을 통한 접근, 온도 분포를 이용한 추정 등의 방법이 있다. 직접 측정 방법은 해안에 시피지미터(Seepage meter)를 설치하여 유량을 측정하는 것인데, 바다의 조석, 파랑 등의 영향으로 측정값의 교란이 발생하여 정밀한 측정이 어렵기 때문에 양질의 자료를 획득하기 어렵다(Rosenberry, 2008). 동위원소는 추적자로 사용하여 유량 혹은 유선 등을 측정하여 SGD를 추정하는 방법이다(Burnett et al., 2017; Goodridge and Melack, 2014; Chanyotha et al., 2018). 경계면 모델을 이용하는 방법은 수치 해석학적 수학식을 이용하여 해안에서의 지하수가 배출되는 속도를 평가하여 SGD를 추정하였다(Chesnaux and Allen, 2007). 온도를 이용한 추정 방법은 위성 및 항공 사진을 이용하여 온도 분포를 측정하고, SGD가 일어나는 담-염수 경계면에서 지하수와 해수의 온도 차이를 분석하는 것이다(Varma et al., 2010; Xing et al., 2016). 국내의 SGD에 대한 연구는 대부분 온도차이를 이용한 분석을 진행하였으며, 대상 지역은 제주도를 중심으로 진행되었다. 항공 원격탐사를 통해 온도를 측정하고, 온도 차이에 의해 SGD를 추정하여 제주도의 공천포 해변에 대해서 $7.19 \pm 0.49\ m^3/year$로 분석하였으며(Lee et al., 2016a, 2016b), SGD에 대한 정확도를 높이기 위해 조석의 효과를 분석하여 2개의 서로 다른 높이에서 온도를 이용한 SGD의 정밀도를 높여 공천포 해변에 대해서 $7.66 \pm 0.13\ m^3/year$로 분석하였다(Kang et al., 2019). 기존 국내의 연구는 대부분 항공사진을 활용하였으며, 지점 규모의 특정 지역에서 발생하는 SGD를 추정하였다. 또한, 항공 사진의 특성상 촬영 당시에 대해서 분석을 진행하였다.

본 연구에서는 국내의 제주도 유역 중 성산유역을 대상으로 경계면 모델에 대한 수치 해석학적으로 접근하여 SFGD에 대한 정량적인 분석을 진행하였다. 자료의 취득이 용이한 지하수위 관측망의 자료를 활용하였으며, 수집된 관측 자료는 유역 규모의 SFGD를 추정하기 위해 Geological Information System(GIS)를 이용하여 대상 유역에 대한 가상의 격자를 구성하고, 각 격자에 관측 자료 값을 부여하고, 경계면 모델의 수치 해석학적 수식을 적용하여 대상 유역에 대한 SFGD를 산정하였다.

연구 방법

SFGD는 담지하수의 수두, 대수층의 투수계수, 담수 대수층의 두께 등이 주요 영향 인자이다. 기존 해석해를 이용한 SFGD의 추정은 관측의 신뢰도가 높은 담수 지하수의 높이, 대수층의 투수계수를 이용하였다. 관측되고 있는 지하수위 관측소를 기준으로 염수와 만나는 연안까지를 기준 단면으로 설정한다. 해수면보다 높은 담수 지하수위를 이용하여 담수 대수층의 두께를 추정하고, 기준 단면의 담수 지하수 유출량을 연안 길이로 확장하여 산정하였다. 하지만, 본 연구에서는 지하수위 관측소에서 다심도에서 측정하고 있는 EC를 이용하여 담수 대수층의 두께를 추정하고, 기준 단면 외에 주변 관측소를 이용하여 연구지역을 대상으로 각각의 매개변수를 보간하여 해안 담수 지하수 유출량을 산정하였다.

연안 대수층의 담수 두께 추정

Ghyben-Herzberg(G-H)의 이론(Ghyben, 1889; Herzberg, 1901)에 따르면 연안의 자유면 대수층에서 담지하수의 내륙에서 해양으로 유출과 염지하수의 해양에서 육지로의 유출은 담수와 염수의 밀도에 따라 담지하수는 염지하수 상부에 떠 있는 렌즈형태의 담수체를 형성하게 되고, 혼합되지 않는 담지하수와 염지하수는 담-염수 경계면에서 밀도에 따라 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_{(x)} = \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} h_{(x)} \tag{1}$$

여기서, $z_{(x)}$는 기준 단면에서 x 위치에서의 해수면을 기준으로 담수 지하수위의 깊이[L]를 나타내고, $h_{(x)}$는 x 위치에서 해수면으로부터 담수 지하수의 높이[L]를 나타내며, Fig. 1에서와 같이 연안 대수층에서 담수 지하수부분 중 해수면을 기준으로 상부는 $h_{(x)}$, 하부는 $z_{(x)}$를 나타낸다. ρ_w, ρ_s는 각각 담수와 염수의 밀도[M/L^3]를 나타내며, 일반적으로 담수와 염수의 밀도는 1,000 kg/m^3, 1,025 kg/m^{3}이라고 가정하게 되면, 약 2.5%의 밀도차이에 의해 해수면을 기준으로 담지하수의 깊이는 담지하수 높이에 따라 약 40배 차이가 나는 것으로 추정할 수 있다. 하지만, G-H의 이론은 해수위와 지하수위가 정적 평형을 이루고 해안선이 단순한 지역 혹은 단면에 대해서 적용이 가능하다. 대수층에 따라 지층의 구성, 투수계수의 차이가 발생하고, 지하수의 함양, 양수 등을 통해 담지하수의 변동이 발생하여 담지하수의 깊이는 변동할 수 있다. 또한, 담수와 염수의 경계가 명확하고 농도에 따른 확산 현상이 없다는 것과 담지하수 유출이 단일 지점에서 발생한다는 가정하에 성립된다. 따라서, 본 연구에서는 심도에 따라 다수의 센서를 설치하는 다심도 관측공을 대상으로 측정되는 EC를 이용하여 담수체의 두께를 산정하였다. EC를 기준으로 작물 생육은 EC 2,000 μs/cm 미만에서는 모든 작물이 자랄 수 있지만, 2,000 μs/cm 이상에서는 염분농도에 민감한 작물은 자라지 못한다(Hem, 1985). 따라서, 담수의 경계는 혼합대를 제외한 담수구간을 나타낸다고 가정하여, 염수 영향의 기준이 되는 2,000 μs/cm인 높이를 산정하였다. EC 값에 의한 추정은 지하수층에서 염수의 영향을 바로 파악할 수 잇는 수치이며, 다양한 심도에 관측 센서가 설치되어 있는 기존의 관정을 활용하여 쉽게 자료를 수집할 수 있다. Fig. 1과 같이 심도에 따라 존재하는 센서를 이용하여 심도에 따른 EC 값을 선형 보간하여 2,000 μs/cm인 깊이를 산정하였다.

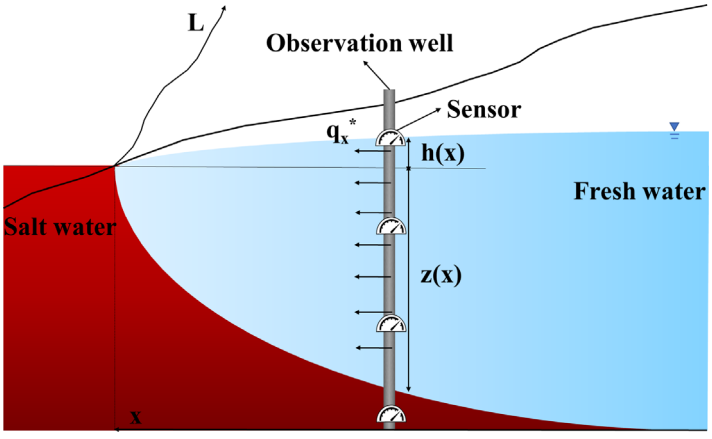


Fig. 1. Submarine fresh groundwater discharge in coastal area and their parameter.

매개변수의 보간

매개변수에 대한 보간 방법은 Inverse Distance Weight(IDW) 방법을 이용하였다. IDW는 공간 보간을 진행함에 있어 가장 보편적이며 간단한 방법이다(Lu and Wong, 2008). IDW의 가장 기본적인 전제는 관측되고 있는 값의 유사성은 두 위치 사의 거리에 반비례한다는 것이다(Fotheringham and O'Kelly, 1989). IDW 방법의 적용은 특정 위치에서의 알려지지 않은 속성 값을 예측할 때 사용한다. 따라서, 본 연구에서는 다심도 관측공에서의 관측되는 투수계수 k, 담수의 지하수위 h, 담수의 깊이 z에 대해서 GIS(Geological Information System)을 이용하여 분포형 자료를 대상 유역의 가상 격자를

생성하여 보간하였다. 각각 보간한 매개변수는 해석해에 대입하여 해안 유출량을 산정하였다. IDW는 각 관측 위치의 거리에 따라 가중치를 부여하며, 가까울수록 더 영향을 준다는 가정하에 주위 자료를 가중 선형을 조합하는 기법으로 식 (2)와 같다.

$$v_0^* = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i v_i, \quad \lambda_i = \frac{(1/d_i)^\alpha}{\sum_{j=1}^{n} (1/d_j)^\alpha}, \quad d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} + \delta \tag{2}$$

여기서, v_0^*는 예측하는 특성값, v_i는 관측되거나 혹은 알고 있는 특성값, λ_i는 가중치를 나타내며, d_i는 예측 지점(P_0)과 자료가 있는 지점(P_i) 사이의 거리를 나타내며, δ는 완화 거리이다. 각각의 매개변수는 보간된 격자에 따라 특성 값이 존재하고 이를 해석해에 대입하여 격자에 대한 특성 값을 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 대상 유역에 가상의 격자를 생성하고 매개변수를 보간하여 특성값을 가지고 있는 격자들을 SFGD 산정 방정식에 적용하였다. 가상의 격자에서 x는 해안선을 기준으로 해안선으로부터의 거리를 나타낸다. 각각의 매개변수를 보간하기 위해 해안선에서 해수면은 0, 해수면에서 지하수위 h와 담수 지하수위의 깊이 z는 0이라고 가정하고 보간을 진행하였다.

유량 평균 유출량 산정 방정식

기존의 해석해는 Kim and Chang(2022)를 참고하였으며, SFGD 산정은 기준 단면에서의 Darcy 법칙의 일차원 흐름의 곱으로 표현되며, 기준 단면은 해안선으로부터의 거리 x 위치에서 q_x는 해저 지하수 유출 유량[L^2/T]로 나타내며 식 (3)과 같다.

$$q_x = -k(h(x) + z(x))\frac{dh}{dx} \tag{3}$$

여기서, k는 투수계수[L/T]이고, $h(x)$, $z(x)$는 각각 해수면을 기준으로 담수지하수의 높이와 깊이를 나타내며, $\frac{dh}{dx}$는 수리구배로서 무차원의 값이다.

각 격자에서 발생하는 SFGD Q[L^3/T]는 해안선의 길이 L을 이용하여 계산될 수 있으며,

$$Q = -k\int_0^L (h+z)\frac{dh}{dx}dl \tag{4}$$

해안선을 따라 단일한 darcy 흐름을 가정할 경우 식 (4)는 아래와 같이 변형할 수 있다.

$$Q = -kL(h+z)\frac{dh}{dx} \tag{5}$$

본 연구에서는 GIS를 이용하여 특성값을 가지는 가상의 격자를 생성하였으며, 각 가상의 격자는 해안으로 흐르는 유선

에 대해서 독립된 기준단면을 나타내고 있다고 가정하였다. 따라서, 각 격자에 따라 $q_x(i,j)$를 산정하였다. 여기서, i는 수평 방향으로의 격자의 순서를 나타내며, j는 수직 방향으로의 격자 순서를 나타낸다.

유량 평균 유출 산정식은 GIS를 이용한 격자에서는 Fig. 2와 같이 각각 해안까지 독립적인 기준 단면에 대해서 담해저 유출량을 계산한다. 각 격자에 따라 해안까지의 개별적인 기준 단면에 대한 해저 지하수 유출 유량 $q_x(i,j)$를 산정하여 연구지역의 평균 SFGD 유량의 $\bar{q}$를 산정하였다. 해안선의 길이를 곱하여 유역의 해안 유출량을 산정하였다. 평균 SFGD 유량 값인 $\bar{q}$는 다음과 같이 계산하였다.

$$\bar{q} = \frac{\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m} q_x(i,j)}{m \times n} \tag{6}$$

여기서, m은 수평 방향 격자의 개수이고, n은 수직 방향 격자의 개수이다. 여기서, 계산되는 평균 해안 SFGD 유량 값인 $\bar{q}$에 해안선의 길이 L을 곱하여 SFGD의 Q를 산정하였다.

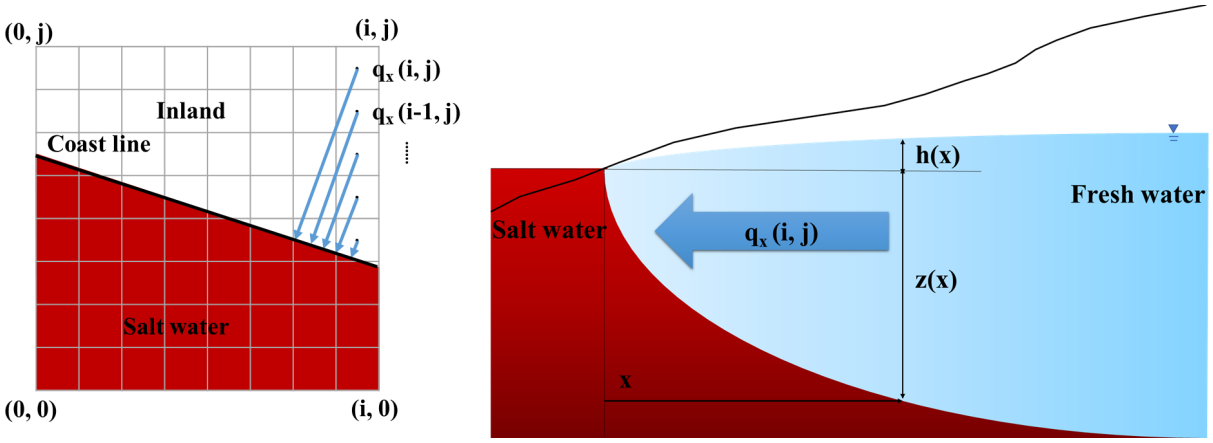


Fig. 2. Submarine groundwater discharge each grid.

연구지역

연구지역인 제주도는 지하수 부존형태에 따라 상위지하수(High level groundwater), 준기저지하수(Parabasal groundwater), 기저지하수(Basal groundwater)로 나눌 수 있다. 해안의 담수 지하수 유출량을 산정하기 위해서는 G-H의 원리가 적용되는 영역을 대상으로 진행해야 한다. 부존 형태에 따라 상위지하수는 강수가 대수층으로 함양되어 투수성이 낮은 암층 혹은 점토층까지 침투되어 수위 차이에 의해 이동하는 지하수층을 나타낸다. 상위지하수는 강수에 의한 지하수위 상승, 인위적인 양수에 따라 지하수위의 하강 등 변동폭이 크게 나타난다. 준기저지하수는 담수 지하수체의 하부가 투수성이 낮은 퇴적층이 존재하며, 해수와 직접적인 접촉이 차단되어 담-염수 경계면의 생성이 G-H의 원리가 적용되지 않는 지하수를 나타낸다. 기저지하수는 G-H의 원리에 따라 담-염수의 경계면이 렌즈 형태로 존재하는 지하수를 나타낸다. 기저지하수와 준기저지하수를 구분하는 경계는 지하수의 수리경사와 G-H의 원리에 따라 담-염수 경계면을 기준으로 하였다 (Jeju, 2013).

본 연구에서는 제주도의 16개 표준 유역 중 성산 유역을 대상으로 유량 평균 유출량 방정식을 적용하였다. 성산 유역은 제주도의 동쪽에 위치하고 있으며, G-H의 원리가 적용되는 기저지하수를 대상으로 하였다. 성산유역은 기저지하수가 넓게 분포하고 있으며, 상대적으로 상위지하수, 준기저지하수의 영향을 적게 받는 지역이다. Fig. 3은 제주의 부존 형태에 따른 지하수 구역과 연구지역, 다심도 관측공의 위치를 나타내고 있다.

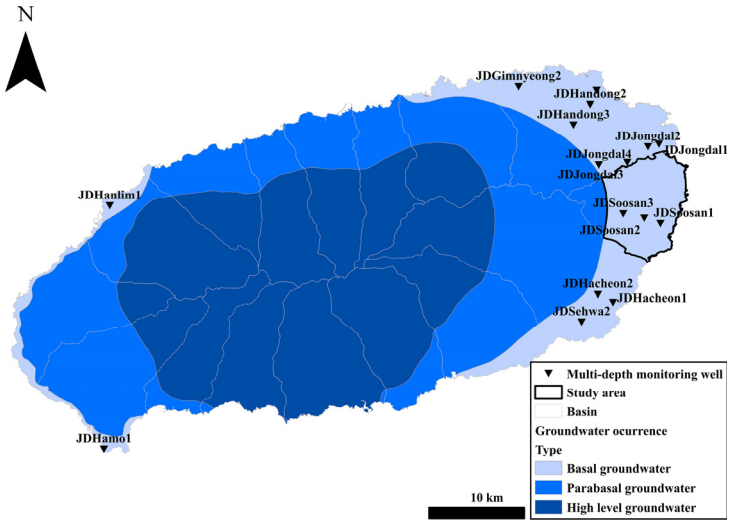


Fig. 3. Study area of groundwater occurrence type and location of multi stage groundwater monitoring well.

연구 결과

담수 대수층 두께 산정

유량 평균 유출량 방정식을 이용하여 담수 해안 지하수 유출량을 산정하기 위해서는 담수 대수층의 두께가 중요한 요소이다. G-H 이론에 따르면 담수와 염수의 밀도차에 의해 담수 지하수위의 약 40배 가량의 담수 대수층을 이루고 있다. 하지만 이는 이론적인 추정으로 본 연구에서는 다심도에서 관측되는 EC를 이용하여 담수 대수층의 깊이에 대해서 추정하였다. 대상 유역 내 혹은 주변의 7개 다심도 관측공을 선정하였으며, 관측공의 관측값에 대해서 수직 방향에 대해서 선형 보간하여 EC의 관측값이 2,000 μs/cm의 깊이를 추정하여 담수 대수층의 두께를 결정하였다. 대상 유역 주변의 JDJongdal 계열의 관측공은 해저 담지하수 유출량을 산정하는 유역인 성산유역의 바로 상부에 위치하고 있으며, 성산유역의 매개변수를 보간함에 있어 더욱 정밀한 값을 적용하기 위해 사용하였다. 표준유역의 경계는 지표수의 유로에 따라 배수경계를 기준으로 나누어져 있으며, 대수층은 지표수와는 다른 흐름을 나타낼 수 있으며 불확실성을 최대한 줄이기 위해 주변의 영향을 미칠 것으로 보이는 관측공도 포함하여 매개변수를 보정하였다. 관측공 이름의 숫자가 낮아질수록 연안과 가까워지고 있으며, JDSoosan 계열의 다심도 관측공 군에서는 담지하수 깊이가 연안쪽으로 가까워질수록 높아지고 있는 양상을 보이고 있으며, JDJongdal 계열의 관측공 군에서는 1~3번까지는 내륙으로 갈수록 담지하수 깊이가 낮아지고 있으나, 4번에서 다시 상승하는 경향을 나타내고 있다. 연도별로는 4개(JDSoosan1, JDJongdal1, 2, 4)의 관측공에서 2019년에 담지하수 깊이가 가장 낮게 나타나고 있고, JDSoosan3, JDJongdal3은 2018년에서부터 2020년까지 담지하수 깊이가 시간이 지남에 따라 점차 낮아지는 양상을 보이고 있다. Table 1은 각 다심도 관측공의 심도에 따른 EC 센서의 위치와 관측 EC 값에 따라 추정한 담지하수의 깊이를 나타내고 있다.

Table 1. Observed EC and estimated fresh groundwater depth in each multi depth monitoring well

Name	EC No.	EC sensor level (El. m)	2018 (μs/cm)	2019 (μs/cm)	2020 (μs/cm)	Average (μs/cm)
JDSoosan1	EC1	-11.70	915.00	1,096.92	1,201.33	1,071.08
	EC2	-26.70	9,393.83	6,168.67	6,587.33	7,383.28
	EC3	-31.70	23,980.50	16,058.00	20,076.92	20,038.47
	Fresh Groundwater Depth (El. m)		-13.62	-14.37	-13.92	-13.97
JDSoosan2	EC1	-9.38	1,144.67	1,707.58	1,889.00	1,580.42
	EC2	-24.38	1,326.67	1,979.33	2,238.42	1,848.14
	EC3	-34.38	3,832.67	6,339.08	9,080.50	6,417.42
	Fresh Groundwater Depth (El. m)		-27.07	-24.43	-14.15	-21.88
JDSoosan3	EC1	-9.84	117.33	137.45	138.67	131.15
	EC2	-39.84	586.83	550.36	373.25	503.48
	EC3	-54.84	28,822.50	16,772.64	4,849.42	16,814.85
	Fresh Groundwater Depth (El. m)		-40.59	-41.18	-45.29	-42.35
JDJongdal1	EC1	-10.83	873.33	929.58	1,122.75	975.22
	EC2	-20.83	6,939.75	6,075.50	5,885.75	6,300.33
	EC3	-30.83	20,748.17	17,426.83	14,624.50	17,599.83
	Fresh Groundwater Depth (El. m)		-12.68	-12.91	-12.67	-12.75
JDJongdal2	EC1	-10.51	533.33	586.25	687.25	602.28
	EC2	-25.51	2,377.83	1,997.92	3,285.83	2,553.86
	EC3	-35.51	16,738.75	15,534.50	15,623.58	15,965.61
	Fresh Groundwater Depth (El. m)		-22.44	-25.51	-18.09	-22.01
JDJongdal3	EC1	-9.83	309.00	418.67	411.58	379.75
	EC2	-49.83	936.08	842.50	564.83	781.14
	EC3	-59.83	31,868.92	22,153.08	2,561.25	18,861.08
	Fresh Groundwater Depth (El. m)		-50.17	-50.37	-57.02	-52.52
JDJongdal4	EC1	-7.75	134.36	155.00	193.25	160.87
	EC2	-27.75	141.45	427.92	250.17	273.18
	EC3	-37.75	3,027.27	2,456.58	2,541.17	2,675.01
	Fresh Groundwater Depth (El. m)		-34.19	-35.50	-35.39	-35.03

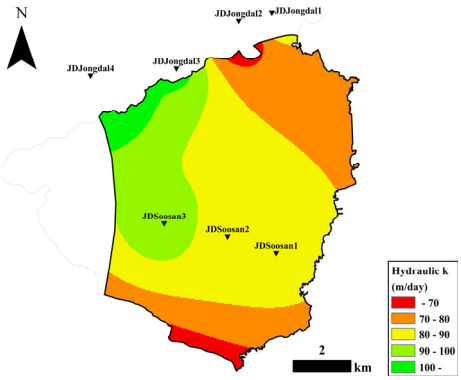
매개변수 분포

성산유역의 매개변수를 보간하기 위해서 7개의 관측공을 이용하였으며, 각 관측공에서 사용된 자료는 Kim and Chang (2022)의 자료를 참고하여 Table 2에 나타냈다. 유량 평균 유출량 방정식에 사용되는 투수계수 k, 지점에서의 해안과의 거리 dx, 해수면 대비 지하수위 h, 지점에서의 지하수의 수두차이 dh는 해수면이 0이라고 가정하고 적용하였다. 담 지하수의 깊이 z는 EC를 이용하여 추정한 깊이와 G-H 비율에 의해 추정한 깊이를 사용하였다. G-H 비율에 의한 담수체 두께는 담수의 밀도는 1,000 kg/m^3, 염수의 밀도는 성산 조위 관측소의 염분농도를 참고하여 연도별로 2018에서 2020년까지 각각 1,023.3, 1,024.3, 1,024.2 kg/m^{3}로 설정하여 깊이를 산정하였다. JDSoosan 계열의 관측공은 해안에서 내륙으로 갈수록 투수계수가 커지는 것으로 나타났다. 지하수위는 2019년이 가장 높게 나타났으며, 지하수위에 따라 변하는 G-H 비율에

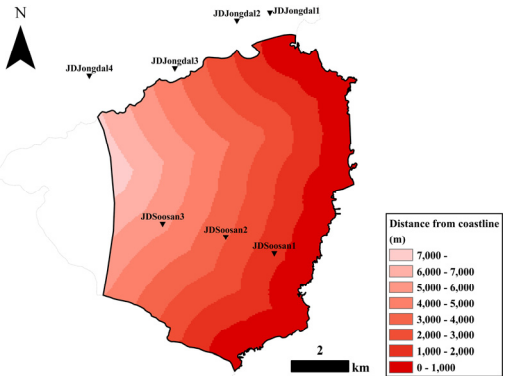
따른 담 지하수의 깊이도 2019년이 가장 하강하는 것으로 나타났다. 관측 EC에 의한 담지하수 깊이는 JDSoosan 1은 지하수위와 음의 경향으로 유사하게 나타났으나, JDSoosan2는 시간 경과에 따라 담지하수 깊이가 상승하고, JDSoosan3은 하강하는 것으로 나타났다. JDJongdal 계열의 관측공에서는 JDJongdal2를 제외하면 내륙으로 갈수록 투수계수가 커지는 것으로 나타났으며, JDJongdal2에서 투수계수는 주변과 비교하여 매우 작은 35.10 m/day로 나타났다. 지하수위는 JDSoosan 계열과 유사하게 2019년 가장 높게 나타났으며, G-H 비율에 의해 추정된 담지하수 깊이도 2019년이 가장 낮게 나타났다. EC에 의해 산정된 담지하수 깊이는 JDJongdal3을 제외하고는 2019년이 가장 낮게 나타났으나, JDJongdal2는 2020년에 매우 상승하는 것으로 나타났다. JDJongdal3에서는 시간이 지남에 따라 담지하수 깊이가 점차 하강하는 것으로 나타났다. Fig. 4는 각각의 관측공의 매개변수로 IDW로 보간하여 성산유역을 나타냈다. 투수계수 k는 59.80~127.12 m/day의 범위를 가지며, 유역의 평균은 84.18 m/day로 나타났다. 해안으로부터의 거리 dx는 0~7,610.59 m의 범위를 나타내고 있으며, 평균은 2,867.94 m이다. 지하수위 h, 해수면 대비 지하수위 dh, 담수체 두께 z는 해안에서 0이라고 가정하고 분석하였다. h, dh의 유역의 평균 분포는 2018, 2019, 2020년에 각각 해수면 대비 0.80, 1.06, 0.93 m로 나타났으며, G-H 비율에 의한 담지하수 깊이의 평균 분포는 2018, 2019, 2020년에 각각 -32.13, -42.49, -37.06 m로 나타났다. EC에 의한 담지하수의 평균 깊이는 2018년 -22.60 m, 2019년 -22.52 m, 2020년에 -22.53 m로 시간이 지남에 따라 상승하는 것으로 나타났다.

Table 2. Input parameter for calculate submarine groundwater discharge each monitoring well (Kim and Chang, 2022)

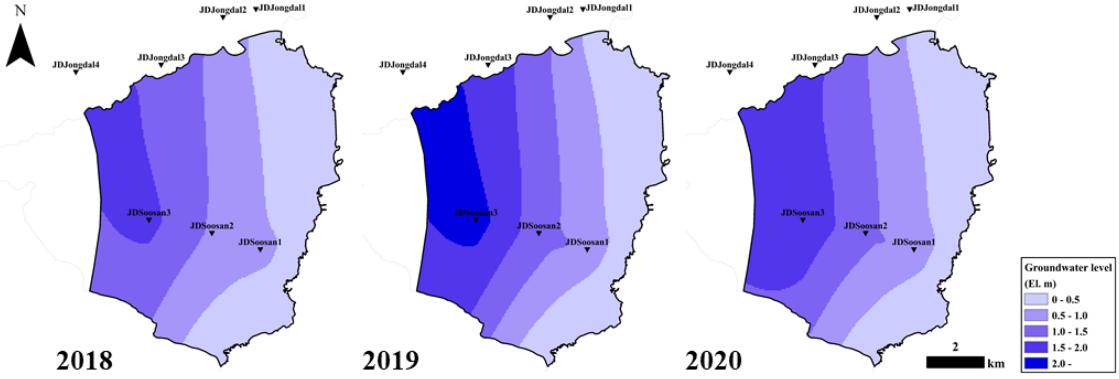
Name	k (m/day)	dx (m)	Year	h and dh (El.m)	z using EC (El.m)	z using G-H ratio (El.m)
JDSoosan1	84.50	821.44	2018	0.78	-13.62	-33.48
			2019	0.91	-14.37	-37.45
			2020	0.89	-13.92	-36.78
JDSoosan2	86.90	2,103.90	2018	0.92	-27.07	-39.48
			2019	1.20	-24.43	-49.38
			2020	1.11	-14.15	-45.87
JDSoosan3	97.40	4,764.33	2018	1.64	-40.59	-70.39
			2019	2.25	-41.18	-92.59
			2020	1.92	-45.29	-79.34
JDJongdal1	97.90	1,102.07	2018	0.83	-12.68	-35.62
			2019	0.97	-12.91	-39.92
			2020	0.95	-12.67	-39.26
JDJongdal2	35.10	2,078.09	2018	0.99	-22.44	-42.49
			2019	1.22	-25.51	-50.21
			2020	1.13	-18.09	-46.69
JDJongdal3	103.60	4,223.81	2018	1.42	-50.17	-60.94
			2019	1.84	-50.37	-75.72
			2020	1.60	-57.02	-66.12
JDJongdal4	158.40	6,833.24	2018	1.61	-34.19	-69.10
			2019	2.21	-35.50	-90.95
			2020	1.79	-35.39	-73.97



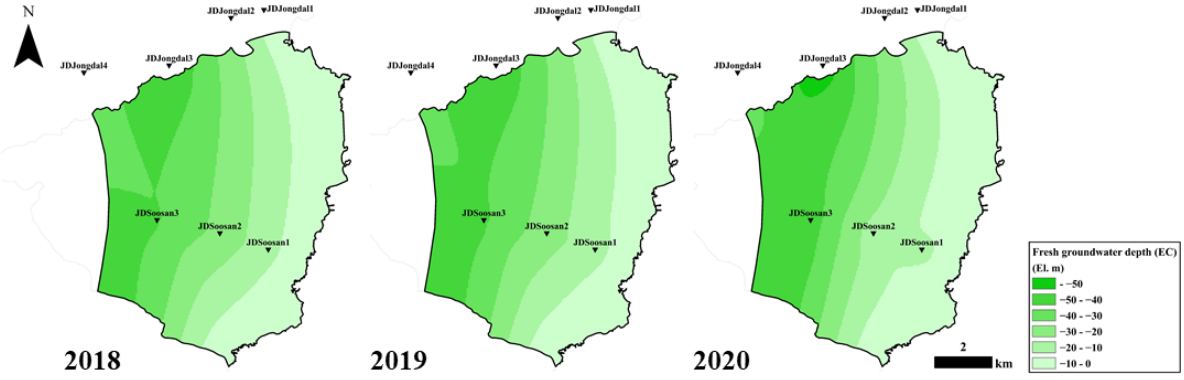
(a) Hydraulic k (k)



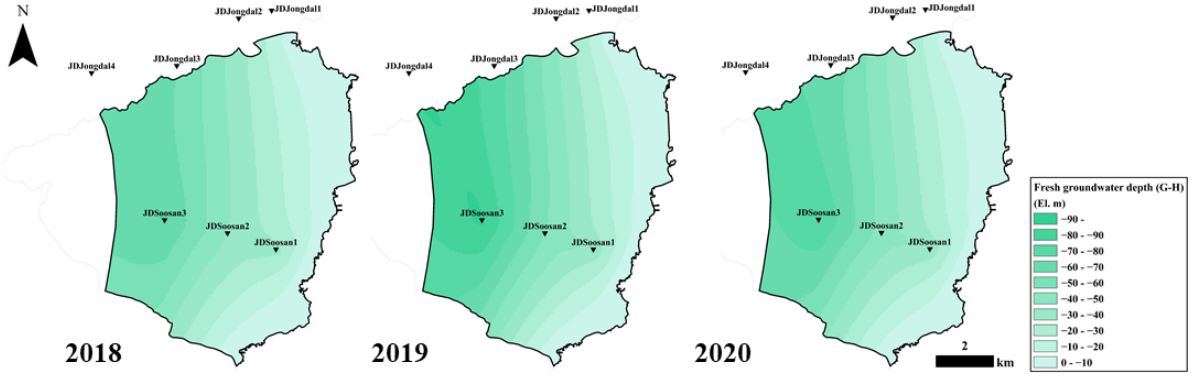
(b) Distance from coastline (dx)



(c) Groundwater level (h, dh)



(d) Freshwater depth using EC sensor (z)



(e) Freshwater depth using G-H ratio (z)

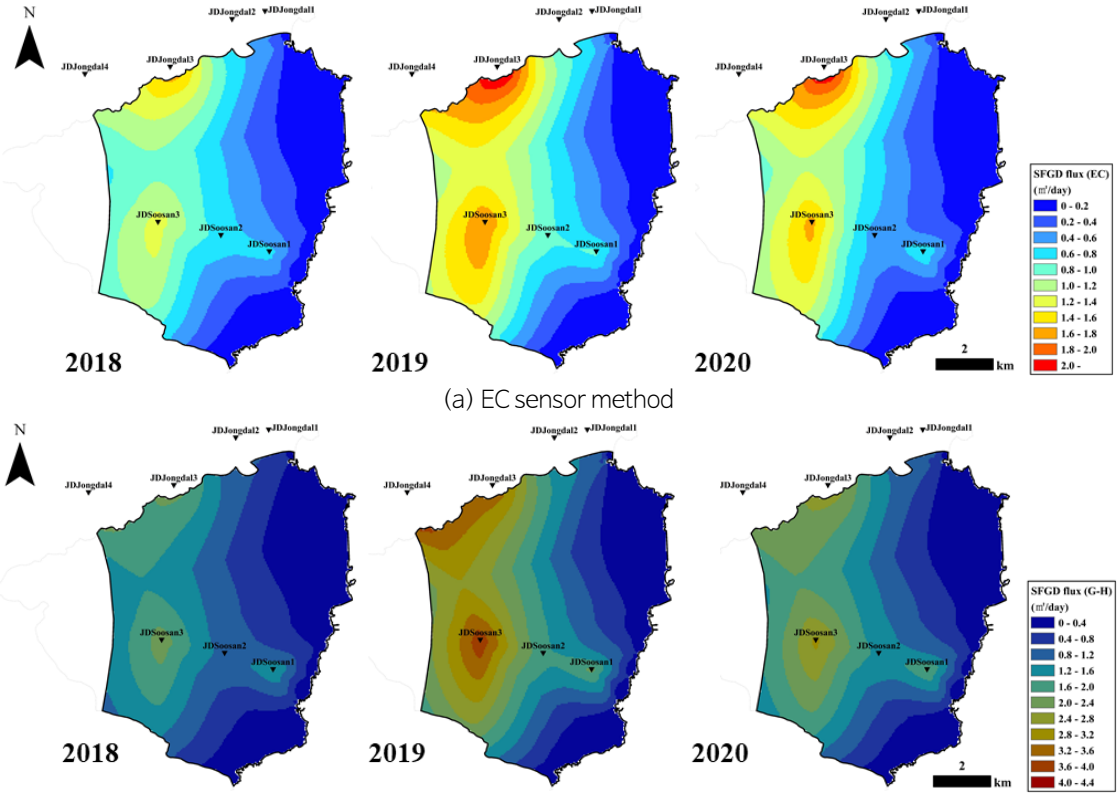
Fig. 4. Parameter distribution of study area.

GIS를 이용한 유량 평균 유출산정식의 적용

GIS를 이용하여 격자로 나타낸 k, dx, h, dh, z를 식 (3)인 유량 평균 유출 방정식에 적용하여 SFGD량을 산정하였다. 격자에 따라 산정된 유출 유량을 유역에 대해서 식 (6)을 이용하여 평균하고, 연안 길이인 24,993.57 m를 곱하여 유출량을 산정하였다. Table 3은 2018~2020년의 SFGD를 EC 추정방법과 G-H 비율을 이용한 산정 결과와 기존에 산정된 SCS-CN 방법과 SWAT-K 모형을 이용하여 산정된 함양량과 비교한 결과이다. Table 3의 SFGD에 Average flux는 격자에 따라 산정된 유출 유량을 유역에 대해서 식 (6)을 이용하여 평균한 값이고, Discharge의 값은 시간단위를 연으로 변경하고, 연안 길이 l인 24,993.57 m를 곱한 값이다. Table 3의 함양량은 기존의 연구 중 "제주형 물순환 해석 및 수자원 관리 기반 구축 (MLIT, 2015)"에서 산정된 유역별 함양률을 이용하여 2018~2020년의 강우량을 대입하였다(Kim and Chang, 2022).

Table 3. Comparison of estimated SFGDs and recharge in study area

Year	Submarine Fresh Groundwater Discharge				Recharge ($\times 10^6$ m^3/year)	
	EC method		G-H ratio method		SCS-CN (Kim and Chang, 2022)	SWAT-K (Kim and Chang, 2022)
	Average flux (m^2/day)	Discharge ($\times 10^6$ m^3/year)	Average flux (m^2/day)	Discharge ($\times 10^6$ m^3/year)		
2018	0.59	5.39	1.16	10.57	173.87	122.98
2019	0.79	7.19	1.51	13.78	177.39	142.72
2020	0.68	6.24	0.90	8.24	171.68	122.21
Average	0.69	6.27	1.19	10.87	174.31	129.30



(a) EC sensor method

(b) G-H ratio method

Fig. 5. Submarine fresh groundwater discharge flux $(q_x(i,j)$ distribution of study area.

SFGD 산정 결과 EC에 의한 담수체 두께보다 G-H 비율에 의한 담수체 두께가 더 두꺼워 평균 지하수 유출량은 1.73배 크게 산정되었다. 연도별로는 EC 추정 방법과 G-H 비율 추정 방법 모두 2019년에 가장 큰 지하수 유출량을 나타냈으며, 2020, 2018년 순으로 크게 나타났다. 함양량에서는 2019년이 가장 크게 나타났으며, 2018, 2020년 순으로 지하수 유출량과는 다른 경향을 나타냈다. EC 추정 방법을 이용한 3년간의 평균 지하수 유출량은 SCS-CN 방법을 이용한 함양량의 3.60%, SWAT-K 모형을 이용한 함양량의 4.85%를 나타냈으며, G-H 비율 추정 방법은 각각 6.23, 8.40%의 비율로 나타났다. Fig. 5는 연도별 EC 추정 방법과 G-H 비율 추정 방법을 이용한 SFGD 유량의 분포를 나타낸 그림이다. 국지적으로는 JDSoosan3과 JDJongdal3의 부근에서 큰 해안 유출 유량이 나타나고 있으며, 2019년의 빨간색으로 크게 나타나는 유량이 크게 분포하고 있다.

결 론

본 연구에서는 담지하수를 대상으로 SGD를 평가하였으며, SFGD의 분포를 분석하기 위해 GIS를 이용하였다. 연구 대상지역은 제주도의 성산 유역 중 지하수의 부존 형태가 기저 지하수인 지역을 대상으로 진행하였으며, 사용된 자료는 다심도 관측정에서 측정되는 지하수위, EC, 투수계수 등이 있다. 담수층의 두께를 산정하기 위해 EC의 수직적인 분포를 보간하여 담지하수의 깊이를 추정하는 방법과 기존의 G-H 이론에 따른 비율을 적용한 값을 이용하여 SFGD를 산정하였다. G-H 이론에 따른 담지하수의 깊이 추정은 해수위와 지하수위가 정적 평형을 이룬다는 가정하에 성립이 된다. 또한, 담수와 염수의 경계가 명확하고 농도에 다른 확산 현상이 없고, 담지하수의 유출이 상류부의 단일 지점에서 발생한다는 가정이 필요하다. 하지만, 해수위는 파랑 혹은 조석에 의해 시간에 따라 변화하며, 지하수위는 주변의 양수, 상류부 혹은 주변 지형에서의 함양에 따라 변화한다. 대수층은 균질하지 않고 불확실성을 내포하고 있으며, 지하수의 함양, 양수 등을 통해 담지하수의 변동이 발생할 수 있다. 관측 EC를 이용한 담지하수의 깊이 추정은 명확한 담수와 염수의 경계를 나눌 수 있으며, 실시간으로 변화하는 담-염수 경계를 파악하여 담수의 깊이를 보다 정밀하게 산정이 가능하다. SFGD의 산정은 유량 평균 유출 방정식을 이용하였으며, 각 매개변수는 IDW 방법을 이용하여 가상의 격자에 대해서 분포시켰다. 각 격자에서 해안까지의 유선은 독립적이라고 가정하였으며, 각 격자에서 산정된 유량을 평균하여 유역의 대표 유량으로 결정하였다. 유역의 대표 유량은 해안 길이로 곱하여 SFGD를 산정하였다. 담지하수 깊이에 대해서 EC로 추정한 방법과 G-H 비율로 추정한 방법을 SCS-CN, SWAT-K로 추정한 함양량과 비교하였다. EC 추정 방법의 SFGD는 추정된 함양량의 약 3.10~5.10%의 비율을 나타냈으며, G-H 비율 추정 방법은 4.80~9.66%의 비율을 나타났다. G-H 비율은 담지하수 높이에 기반하여 SFGD를 산정한 결과로 자유면 대수층에서의 지하수 흐름에 큰 영향을 많이 받는 것으로 보인다. 상부의 담지하수가 담-염수경계면 생성에 영향을 미치는 시간은 구성하고 있는 지층의 투수계수 등의 영향으로 많은 차이가 발생하여 많은 오차가 발생한다. 이에 반해 관측 EC에 의한 추정 방법은 수직적인 보간을 이용하여상부의 담지하수와는 독립적으로 담지하수 깊이에 대해서 분석을 진행하고 수치에 따라 담지하수의 깊이를 정밀하게 산정하였다.

본 연구는 기존의 Kim and Chang(2022)이 산정한 SFGD와 비교하여 유량 평균 유출 방정식을 이용하는 것은 동일하지만, GIS를 이용하여 각 관측자료를 보간하였다. 담지하수의 깊이를 추정하는 방법은 기존의 G-H 이론에 따른 값은 다소 과다하게 산정이 되는 것으로 보여지며, 정밀한 SFGD를 산정하기 위해서는 EC를 추정하는 방법이 주변의 지하수의 흐름 및 지층의 특성을 반영할 수 있다. 유역의 대표 유량을 산정하는데 있어 기존에는 관측공에 대해서 유량을 산정하고 이를 평균하였지만, 본 연구에서는 유역의 대표 유량에 대해서 가상의 격자에 보간된 자료를 입력하여 보다 정밀한 대표 유량을 산정할 수 있었다. 또한, GIS를 이용하여 유역의 SFGD의 분포도를 도출할 수 있었다.

기후 변화에 따라 가뭄, 홍수 등 극한 기후가 발생하여 활용할 수 있는 지표수의 공급량이 줄어들고 있다. 더욱이, 도서 및 해안의 도시는 지하수자원에 의존해야 하는 경우가 많으며, 해수면상승으로 해안 대수층으로의 해수 침투로 활용할 수 있는 용수의 양이 더욱 줄어들고 있다. 지속 가능한 해안 도서 지역의 물 공급을 위해 현재의 상태를 정확히 진단하고 효율적인 용수의 배분 및 관리가 필요하다. 해안 생태계의 구성, 용수의 공급, 해수 침투의 관리 방안 등으로 활용할 수 있는 SGD는 정밀한 분석이 필요하며, 해안 도서 지역의 지속 가능한 물 공급을 위해 반드시 선행되어야 한다. 본 연구에서 나타낸 결과는 최근 SGD를 관측 혹은 추정하는 방법과 비교하는 값으로 사용할 수 있으며, SFGD의 분포도를 활용하여 해안지역의 정밀한 물수지 분석 등을 이용하여 지속가능한 용수의 공급을 결정하는 정책의 근거 자료로 활용할 수 있다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 20220275-002, 신기준수위 기반 해안지역 지하수 관리 솔루션 개발).

References

Bhandary, H., Sabarathinam, C., 2020, Estimation of submarine groundwater discharge and nutrient loading using radium isotopes quartet in Kuwait, Arabian Journal of Geosciences, 13, 1-21.

Burnett, K., Wada, C., Endo, A., Taniguchi, M., 2017, The economic value of groundwater in Obama, Journal of Hydrology: Regional Studies, 11, 44-52.

Chang, S.W., Clement, T.P., 2013, Laboratory and numerical investigation of transport processes occurring above and within a saltwater wedge, Journal of Contaminant Hydrology, 147, 14-24.

Chanyotha, S., Sola, P., Kritsananuwat, R., Lane-Smith, D., Burnett, W.C., 2018, Improved measurements of thoron (^{220}Rn) in natural waters, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 318(1), 777-784.

Charette, M.A., Dulaiova, H., Gonneea, M.E., Henderson, P.B., Moore, W.S., Scholten, J.C., Pham, M.K., 2012, GEOTRACES radium isotopes interlaboratory comparison experiment, Limnology and Oceanography: Methods, 10(6), 451-463.

Chen, C.T.A., Zhang, J., Peng, T.R., Kandasamy, S., Wang, D., Lin, Y.J., 2018, Submarine groundwater discharge around taiwan, Acta Oceanologica Sinica, 37(6), 18-22.

Chesnaux, R., Allen, D.M., 2007, Groundwater travel times for unconfined island aquifers bounded by freshwater or seawater, Hydrogeology Journal, 16(3), 437-445.

Dadhich, A.P., Nadaoka, K., Motomura, Y., Watanabe, A., 2017, Potential impacts of land use change dynamics and submarine groundwater discharge on fringing reefs of Kuroshima Island, Japan, Journal of Coastal Conservation, 21(1), 245-254.

Dulaiova, H., Camilli, R., Henderson, P.B., Charette, M.A., 2010, Coupled radon, methane and nitrate sensors for large-scale assessment of groundwater discharge and non-point source pollution to coastal waters, Journal of Environmental Radioactivity, 101(7), 553-563.

Fotheringham, A.S., O'Kelly, M.E., 1989, Spatial interaction models: formulations and applications, Kluwer Academic Publishers Dordrecht, 224p.

Freeze, R.A., Witherspoon, P.A., 1967, Theoretical analysis of regional groundwater flow: 2. Effect of water-table configuration and subsurface permeability variation, Water Resources Research, 3(2), 623-634.

Ghyben, W., 1889, Note concerning the intended well drilling near Amsterdam, Tijdschrift van het Koninklijk Instituut van

Ingenieurs, The Hague, 27, 1888-1889.

Goodridge, B.M., Melack, J.M., 2014, Temporal evolution and variability of dissolved inorganic nitrogen in beach pore water revealed using radon residence times, Environmental Science & Technology, 48(24), 14211-14218.

Hem, J.D., 1985, Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (Vol. 2254), Department of the Interior, US Geological Survey.

Herzberg, A., 1901, The water supply of some North Sea spas, Journal Gasbeleuchtung and Wasserversorgung, 44, 842-844.

Jeju, 2013, Water resources management plan in Jeju Province 2013-2022, 59p (in Korean).

Kang, K.M., Kim, D.J., Kim, Y., Lee, E., Kim, B.G., Kim, S.H., Ha, K., Koh, D.C., Cho, Y.K., Kim, G., 2019, Quantitative estimation of submarine groundwater discharge using airborne thermal infrared data acquired at two different tidal heights, Hydrological Processes, 33(7), 1089-1100.

Karageorgis, A.P., Papadopoulos, V.P., Georgopoulos, D., Kanellopoulos, T.D., Papathanassiou, E., 2012, Monitoring physical properties of a submarine groundwater discharge source at Kalogria Bay, SW Peloponnissos, Greece, EPJ Web of Conferences, 24, 04003.

Kim, I.H., Chang, S., 2022, Assessment of a fresh submarine groundwater discharge in eastern Jeju Island using analytic seawater intrusion models, Journal of Korea Water Resources Association, 55(12), 1011-1020 (in Korean with English abstract).

Knapp, M.A., Geeraert, N., Kim, K., Knee, K.L., 2020, Submarine groundwater discharge (SGD) to coastal waters of Saipan (commonwealth of the Northern Mariana Islands, USA): Implications for Nitrogen Sources, Transport and Ecological Effects, Water, 12(11), 3029.

Kuan, W.K., Jin, G., Xin, P., Robinson, C., Gibbes, B., Li, L., 2012, Tidal influence on seawater intrusion in unconfined coastal aquifers, Water Resources Research, 48(2), W02502.

Kumar, B.S.K., Viswanadham, R., Kumari, V.R., Rao, D.B., Prasad, M.H.K., Srinivas, N., Sarma, V., 2021, Spatial variations in dissolved inorganic nutrients in the groundwaters along the Indian coast and their export to adjacent coastal waters, Environmental Science and Pollution Research, 28(8), 9173-9191.

Lee, E., Kang, K.M., Hyun, S.P., Lee, K.Y., Yoon, H., Kim, S.H., Kim, Y., Xu, Z., Kim, D.J., Koh, D.C., Ha, K., 2016a, Submarine groundwater discharge revealed by aerial thermal infrared imagery: A case study on Jeju Island, Korea, Hydrological Processes, 30(19), 3494-3506.

Lee, E., Yoon, H., Hyun, S.P., Burnett, W.C., Koh, D.C., Ha, K., Kim, D.J., Kim, Y., Kang, K.M., 2016b, Unmanned aerial vehicles (UAVs)-based thermal infrared (TIR) mapping, a novel approach to assess groundwater discharge into the coastal zone, Limnology and Oceanography: Methods, 14(11), 725-735.

Liu, J., Du, J., Wu, Y., Liu, S., 2018, Nutrient input through submarine groundwater discharge in two major Chinese estuaries: The Pearl River Estuary and the Changjiang River Estuary, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 203, 17-28.

Lu, G.Y., Wong, D.W., 2008, An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique, Computers & Geosciences, 34(9), 1044-1055.

Manivannan, V., Elango, L., 2019, Seawater intrusion and submarine groundwater discharge along the Indian coast, Environmental Science and Pollution Research, 26(31), 31592-31608.

MLIT, 2015, Water cycle analysis and establishment of water resources infrastructure in Jeju Island, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

Moore, W.S., 1999, The subterranean estuary: A reaction zone of ground water and sea water, Marine Chemistry, 65(1), 111-125.

Moore, W.S., 2010, The effect of submarine groundwater discharge on the ocean, Annual Review of Marine Science, 2(1), 59-88.

Rosenberry, D.O., 2008, A seepage meter designed for use in flowing water, Journal of Hydrology, 359(1-2), 118-130.

Santos, I.R., Bryan, K.R., Pilditch, C.A., Tait, D.R., 2014, Influence of porewater exchange on nutrient dynamics in two New Zealand estuarine intertidal flats, Marine Chemistry, 167, 57-70.

Selvam, S., Muthukumar, P., Sajeev, S., Venkatramanan, S., Chung, S.Y., Brindha, K., Babu, D.S.S., Murugan, R., 2021, Quantification of submarine groundwater discharge (SGD) using radon, radium tracers and nutrient inputs in Punnakayal, south coast of India, Geoscience Frontiers, 12(1), 29-38.

Slomp, C.P., Van Cappellen, P., 2004, Nutrient inputs to the coastal ocean through submarine groundwater discharge: Controls and potential impact, Journal of Hydrology, 295(1-4), 64-86.

Szymczycha, B., Borecka, M., Bialk-Bielinska, A., Siedlewicz, G., Pazdro, K., 2020, Submarine groundwater discharge as a source of pharmaceutical and caffeine residues in coastal ecosystem: Bay of Puck, southern Baltic Sea case study, Science of The Total Environment, 713, 136522.

Taniguchi, M., Burnett, W.C., Cable, J.E., Turner, J.V., 2002, Investigation of submarine groundwater discharge, Hydrological Processes, 16(11), 2115-2129.

Taniguchi, M., Dulai, H., Burnett, K.M., Santos, I.R., Sugimoto, R., Stieglitz, T., Kim, G., Moosdorf, N., Burnett, W.C., 2019, Submarine groundwater discharge: Updates on its measurement techniques, geophysical drivers, magnitudes, and effects, Frontiers in Environmental Science, 7, 141.

Urquidi-Gaume, M., Santos, I.R., Lechuga-Deveze, C., 2016, Submarine groundwater discharge as a source of dissolved nutrients to an arid coastal embayment (La Paz, Mexico), Environmental Earth Sciences, 75(2), 154.

Varma, S., Turner, J., Underschultz, J., 2010, Estimation of submarine groundwater discharge into Geographe Bay, Bunbury, Western Australia, Journal of Geochemical Exploration, 106(1-3), 197-210.

Wang, X., Zhang, Y., Luo, M., Xiao, K., Wang, Q., Tian, Y., Qiu, W., Xiong, Y., Zheng, C., Li, H., 2021, Radium and nitrogen isotopes tracing fluxes and sources of submarine groundwater discharge driven nitrate in an urbanized coastal area, Science of The Total Environment, 763, 144616.

Waska, H., Kim, G., 2011, Submarine groundwater discharge (SGD) as a main nutrient source for benthic and water-column primary production in a large intertidal environment of the Yellow Sea, Journal of Sea Research, 65(1), 103-113.

Wilson, J., Rocha, C., 2012, Regional scale assessment of submarine groundwater discharge in Ireland combining medium resolution satellite imagery and geochemical tracing techniques, Remote Sensing of Environment, 119, 21-34.

Xing, Q., Braga, F., Tosi, L., Lou, M., Zaggia, L., Teatini, P., Gao, X., Yu, L., Wen, X., Shi, P., 2016, Detection of low salinity groundwater seeping into the eastern Laizhou Bay (China) with the aid of landsat thermal data, Journal of Coastal Research, 74(sp1), 149-156.

Yu, J., Tian, Y., Wang, X., Wang, X., Lancia, M., Li, H., Andrews, C.B., Zheng, C., 2022, A new simulation-optimization framework for estimation of submarine groundwater discharge based on hydrodynamic modeling and isotopic data, Geophysical Research Letters, 49(23).

Yu, X., Xin, P., Lu, C., Robinson, C., Li, L., Barry, D.A., 2017, Effects of episodic rainfall on a subterranean estuary, Water Resources Research, 53(7), 5774-5787.