

분산형 해수침투 모델을 이용한 양적 지표 기반의 해안지하수 취약성 평가연구

장 선 우*

한국건설기술연구원

Quantitative Assessment of Coastal Groundwater Vulnerability to Seawater Intrusion using Density-dependent Groundwater Flow Model

Chang, Sun Woo*

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-Do 10223, Korea

ABSTRACT

Extensive groundwater abstraction has been recognized as one of the major challenges in management of coastal groundwater. The purpose of this study was to assess potential changes of groundwater distribution of northeastern Jeju Island over 10-year duration, where brackish water have been actively developed. To quantitatively estimate the coastal groundwater resources, numerical simulations using three-dimensional finite-difference density-dependent flow models were performed to describe spatial distribution of the groundwater in the aquifer under various pumping and recharge scenarios. The simulation results showed different spatial distribution of freshwater, brackish, and saline groundwater at varying seawater concentration from 10 to 90%. Volumetric analysis was also performed using three-dimensional concentration distribution of groundwater to calculate the volume of fresh, brackish, and saline groundwater below sea level. Based on the volumetric analysis, a quantitative analysis of future seawater intrusion vulnerability was performed using the volume-based vulnerability index adopted from the existing analytical approaches. The result showed that decrease in recharge can exacerbate vulnerability of coastal groundwater resources by inducing broader saline area as well as increasing brackish water volume of unconfined aquifers.

Key words : Seawater Intrusion (SWI), Brackish groundwater, Future Scenarios, Volumetric analysis, SWI Vulnerability, Recharge

1. 서 론

해수 침투는 해안에 인접한 지하수 대수층으로 해수의 염분이 자연적으로 침투하는 현상으로 정의된다. 해수침투는 자연적으로 일정 거리만큼 내륙으로 진행되며 침투한 거리는 수리전도도, 지하수 함양량 등의 수문지질학적 요인에 의해 결정된다. 최근들어 해안 도서지역 및 내륙 연안의 시기별, 계절별 농업용수, 생활용수의 이용량 증가, 쓰나미, 가뭄 등의 자연재해 등으로 인한 여러 위협 요인

으로 인위재해 및 자연재해 형태의 해수침투가 심화되어 해안 지하수 수자원의 안정적인 이용 및 확보를 위협하는 주요 요인이 되어가고 있다. 해수침투의 양상은 지역에 따라 편차가 크기 때문에 수리지질학적, 물이용 특성을 반영한 현장 적용 연구가 증가하고 있다. 특히 수치 모델은 지형 복잡성과 지질학적 변동성을 반영할 수 있으므로 해수침투 연구에 많이 활용되고 있다(Chang et al., 2016; Chun et al., 2019; Giambastiani et al., 2007; Oude Essink et al., 2010; Praveena et al., 2010; Ranjan et al., 2006; Sulzbacher et al., 2012; Vandenbohede et al., 2014).

해수침투와 관련한 관측 지표로는 대표적으로 특정 모니터링 위치에서의 지하수위, 온도, 염분(또는 전기전도도)가 있으며 해당 값의 증가 및 감소로 해수침투를 직간접적으로 파악한다. 이 관측지표들은, 동역학적 해석모델 및 수치 모델의 모델 검보정에도 사용한다. 동역학적 해석 모

주저자: 장선우, 직위: 한국건설기술연구원 수석연구원
*교신저자: 장선우, 직위: 한국건설기술연구원 수석연구원
Email: chang@kict.re.kr

Received : 2021.11.29 Reviewed : 2021.12.06
Accepted : 2021.12.14 Discussion until : 2022.02.28

텔 및 수치 모의 결과의 신뢰성을 확보하기 위한 산정방식 또는 정량적 지표로는 해수침투의 거리, 해안지하수 부존량등이 있다. 부존량 중심의 평가는 사용 가능한 수자원을 추정하는 데 유용한 접근 방식으로서 해석 모델 및 다양한 실증 모델의 지표로 활용되었다(Werner et al., 2011). 담염수 혼합대를 고려하지 않는 경우에는 해안지하수의 50% 담염수 경계면을 기준으로 경계면보다 상부에 자리잡은 담수지역과 경계면 아래에 위치한 염수 지역으로 구분한다. 혼합대를 고려하는 경우는 50% 외에 연구 목적에 맞는 경계면을 기준으로 삼아 담수의 부존량을 계산한다. 담염수 혼합대를 고려하는 경우는 연구 목적에 따라 더욱 세밀하게 구분할 수 있다. 예를 들어 Chang et al.(2016)은 미국 지하수 음용 기준인 염소 농도 250 mg/L에 따라 약 1.2%의 담염수 경계면을 설정하고 1.2% 이하의 농도 이하의 지역만을 담수로 정의한 바 있다. 해수침투 관련 대표적 모의 예제인 Henry Problem(Henry, 1960)가 여러 경계면을 채택하고 해석하는 방식으로 모의 결과를 해석한 이후로 후속 연구(Goswami and Clement, 2007; Fahs et al., 2016)에서 10%, 50%, 90%의 경계면을 해석지표로 선택하고 10%와 90% 사이의 영역을 혼합대로 정의하는 방식이 일반적으로 널리 활용되고 있다. Werner et al.(2011)의 정량적 취약성 평가 지표의 정의에 따라 담염수 경계면 및 해수 부존량 기준 해수침투 취약성 분석 지표를 도출하였다. Werner et al.(2011)은 1) 해수면 상승, 2) 지하수 함양량의 변화 및 3) 해안지역으로 유입되는 담수량 변동 정도 대비 1) 해안으로부터의 담염수경계면까지의 거리, 2) 염수의 부피의 변화율을 취약성으로 규정하고 이 중, 해수면 상승 및 지하수 함양에 의한 취약성 평가를 수행하였다. 이러한 해수침투 취약성 지표를 기반으로 호주의 28개 연안 대수층을 기반으로 하는 호주 SWI 취약성의 국가 인벤토리가 도입되었다(Morgan and Werner, 2015)

최근 들어 국내에서는 다양한 방식의 해안지하수 연구가 진행되고 있다. Lee et al.(2016)은 제주 공천포 지역 대상으로 무인항공기에 탑재된 열적외선 센서 기반의 해안유출수 탐사하였고, El-Kadi et al.(2016)은 기후변화 시나리오 하에서 제주도의 수자원 지속가능성 평가를 위해 다양한 지하수 개발 및 지하수 함양 시나리오에서 지하수 개발 지속 가능성 수율(P-SY) 지표를 사용했다. Chang et al.(2019)는 제주 전역의 해안지역을 대상으로 해수침투 취약성 평가를 실시하였는데, 이 연구는 지리정보시스템(GIS)을 이용하여 공간적으로 취약성을 매핑하는 GALDIT 기법으로 제주도 해안 지하수의 취약성 평가를

수행한 첫 번째 사례이다. Chachadi and Lobo-Ferreira (2001)가 개발한 GALDIT 기법은 해수침투 취약성을 시각적으로 조명하는 GIS 중첩 분석 방식으로, 대수층 특성, 수리전도도 특성, 지하수위, 해안으로부터의 거리, 해수침투 정도의 및 대수층 깊이를 주요 평가 인자로 사용하여 시공간적 취약성 분포를 시각적으로 구현하는 해수침투 취약성 진단방식이다. 국내 해수침투 관측정에서 측정하는 전기전도도를 별도의 변환과정 없이 취약성 입력 인자로 활용하는 방식을 최초로 고안하였으며, 그 결과 제주 일부 지역의 취약성 고위험군 지역을 시각적으로 확인하고, 해당 해수침투 취약지역에서 취약성이 지속적으로 증가하는 경향을 밝혔다. 제주 동부 지역을 대상으로 Shin and Hwang(2020)은 수위, 수온, 전기전도도를 관측하여 지하수위 분포와 변동특성을 확인하였다. Chang et al.(2020)은 10년 동안의 지하수 개발 증가 및 지하수 함양량의 증가/감소 시나리오를 밀도중속 수치해석에 적용하여 모델 단면에서의 담염수 경계면의 움직임을 예측하였고, GIS 중첩 방식의 취약성 평가를 수행하여 기동 및 지하수 개발로 인해 제주 동부지역 취약성이 증가한다는 결과를 제시하였다.

본 연구에서는, 해안지하수의 동역학적 흐름에 대한 이해를 바탕으로 3차원 해안지하수 수치 모의를 수행하여 10%, 50%, 90%의 담염수 경계면의 위치를 파악하고, 10%와 90% 경계면을 기준으로 담수, 기수, 염수 부존량을 양적 지표로 채택하여 소유역 규모 해안지하수 자원의 정량적 부존량을 산정하였다. 또한 해안 지하수의 취약 정도를 이해할 수 있는 정량적이고 과학적인 해석 방식으로서 기존 해석해 기반 해수침투 선행연구에서 적용하였던 동역학적 해수침투 취약성 평가지표를 채택하여 수치 모의 기반의 연구결과에 적용 가능성을 판별하고 연구 지역의 취약성을 평가하고자 하였다.

2. 본 론

2.1. 연구대상 지역 및 연구방법

제주도는 지표수의 발달이 빈약하여 모든 용수를 지하수에 의존하고 있고, 최근 채소류의 경작 비율 및 농절기 농업용수 취수량 증가로 인해 적정 개발량 이상의 과도한 지하수 양수를 실시하는 지하수 관정이 증가하고 있다. 제주 해수침투는 제주도의 지질학적 비균질성과 지역 특이적인 지하수 개발 활동으로 인해 제주도 전역에서 다양한 패턴으로 발생하고 있다.

제주도 동부지역의 구좌 유역에 위치한 연구대상 지역

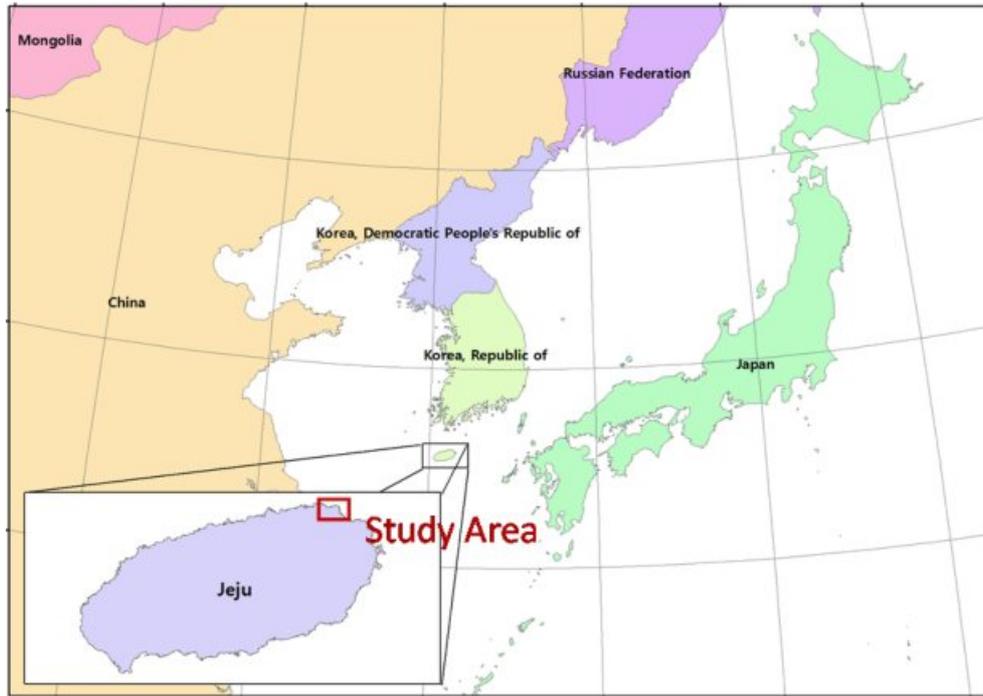


Fig. 1. Location of site-study in Jeju Island, Korea.

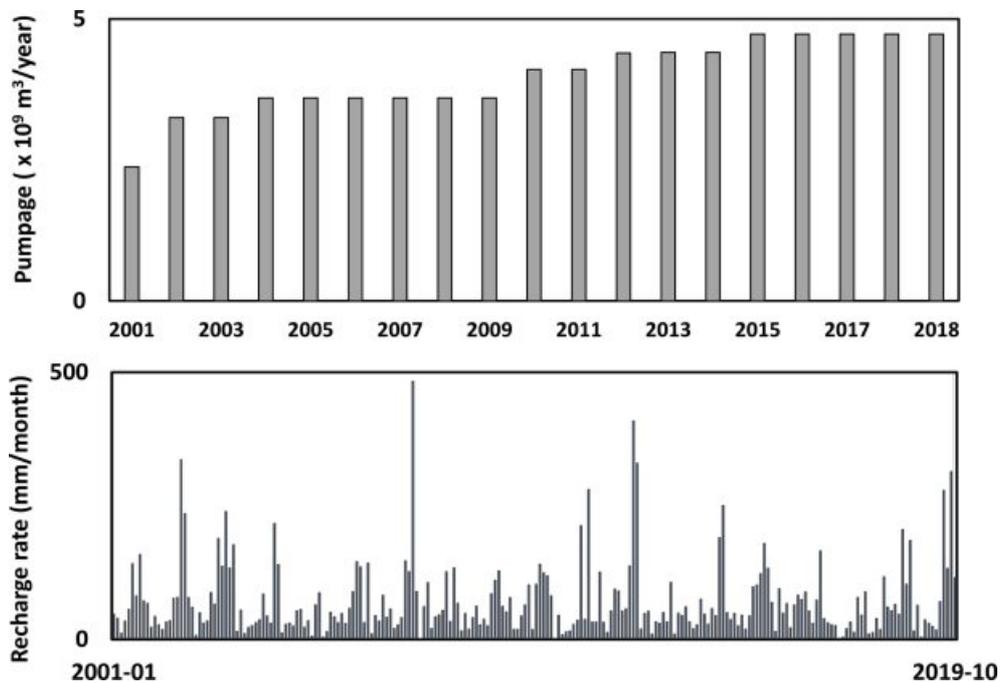


Fig. 2. (a) Permitted total pumping rate and (b) Estimated monthly areal recharge at the study-site from January 2001 to October 2019 (modified from Chang et al., 2020).

은 담염수 개발을 위해 염수를 개발하는 관정이 집중적으로 운영되고 있다(Fig. 1). 관정이 해안선을 따라 다수 설

치되었으며, 염지하수 개발은 해안 근처에서 활발하게 이루어지고 있다. 연구지역의 2000년부터 2019년까지 지하

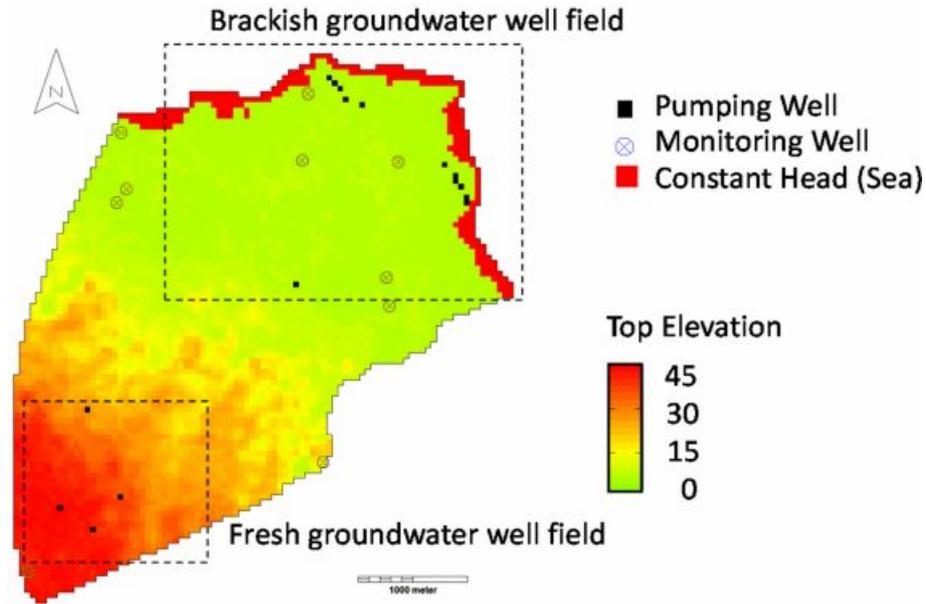


Fig. 3. Boundary conditions and well locations of the study site at eastern Jeju Island. Red represents constant head boundary conditions describing ocean, black cells represent freshwater pumping wells and brackish water pumping wells, and circles represent monitoring wells (modified from Chang et al., 2020).

수 양수 및 함양 패턴은 다음 Fig. 2와 같다. 지하수 양수정의 위치와 양수량은 제주특별자치도에서 제공한 데이터를 입력자료로 활용하였다. 이 지역의 지하수 개발 허가량은 연단위로 환산하면 2001년에 $2.4 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{년}$ 으로 추산되었으며 해마다 증가해 2019년에는 $4.7 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{년}$ 에 이르렀다. 이 중 내륙의 농업용 지하수 관정 이용량은 전체 이용량의 1% 미만으로 추산된다. 월 지하수 함양은 여름이 높고 겨울에 낮은 계절별 특성을 보이고 있다.

Fig. 3은 유한차분 모델의 경계 조건, 관측정 및 양수 관정을 표기한 개념도이다. 본 연구는 SEAWAT(Guo and Langevin, 2002) 프로그램을 이용하여 3차원 정밀 모델을 구축하고 밀도중속 유한차분 모의를 수행하였다. 모델은 105개의 행, 91개의 열 및 7개의 층으로 구성된 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 의 균일한 격자로 구성되었다. 해수로 둘러싸인 해안 지역은 35 kg/m^3 의 농도의 고정수두로 설정하였으며 내륙 경계 조건은 무흐름 경계로 설정하여 지하수 함양의 정도에 의해 내륙의 수위가 결정되도록 모델을 구축하였다. 분산의 영향을 최소화하기 위해 분산 계수를 0으로 설정하였다. 3차원 모델의 적절한 모의시간 및 안정성을 확보를 위해 음해유한차분법(Implicit Finite Difference) 방식을 채택하였다. 담수 및 해수의 밀도는 각각 $1,000 \text{ kg/m}^3$ 및 $1,025 \text{ kg/m}^3$ 이다. 담수를 개발하는 농업지하수 관정은 주로 모델 서남쪽 방향의 내륙에 위치하고

있고, 해안 근처는 염지하수를 개발하는 관정이 분포되어 있다. 수치 모델의 수리지질학적 구성은 연구 현장에서 얻은 시추 코어 분석을 참고하였다. 투수율이 높은 현무암이 해수면 아래에 뻗어 있고, 퇴적층은 해발 90~132 m에서 확장되는 것을 관측할 수 있었다. 해당 퇴적층은 서귀포 층이라고 결론짓고, 서귀포층과의 경계면을 본 모델의 수직 바닥면으로 결정하였다. 해안 지역의 고도는 완만하게 섬 중앙 방향으로 상승하며 연구 영역내의 최고 고도는 45 m 정도에 해당한다. Table 1에 본 연구에 사용된 모델 매개변수 값이 정리되어 있다.

본 연구는 지하수 개발량 증가에 의한 영향은 미래예측 시나리오에 고려하지 않았으며, 2019년 이후 기간 동안 함양량 변화만을 시나리오를 적용하였다. 예측 시나리오에 의한 모의는 2019년 이후 10년간의 대수층 변화를 탐구하기 위해 수행하였으며 이 때 미래예측 모의는 2019년까지의 모델과 동일한 모델 매개 변수를 사용하였다. 미래 예측 시나리오는 다음과 같이 3개로 구분된다.

- 기준 시나리오(base case scenario): 현재 기후가 계속 유지된다는 가정하에 10년의 미래 월별 지하수 함양량 데이터를 2019년까지의 과거 평균값에서 채택하였으며 연간 연구지역에 함양되는 지하수는 830 mm/year 에 달한다. 지하수 개발량은 미래에 변화없이 2019년 이후로 일정하게 유지되었다.

Table 1. Model parameters used for the SEAWAT simulation (modified from Chang et al., 2020)

Parameter	Symbol	Value
Horizontal hydraulic conductivity	K_H	320 m/day
Vertical hydraulic conductivity	K_Z	6.4 m/day
Specific yield	S_y	0.1
Specific storage	S_s	$1 \times 10^{-5} m^{-1}$
Longitudinal dispersivity	α_L	0.0 m
Transverse dispersivity	α_T	0.0 m
Saltwater concentration	C_s	35 kg/m ³
Saltwater density	ρ_s	1,025 kg/m ³
Freshwater density	ρ_f	1,000 kg/m ³
Density slope	E	0.714
Porosity	n	0.3

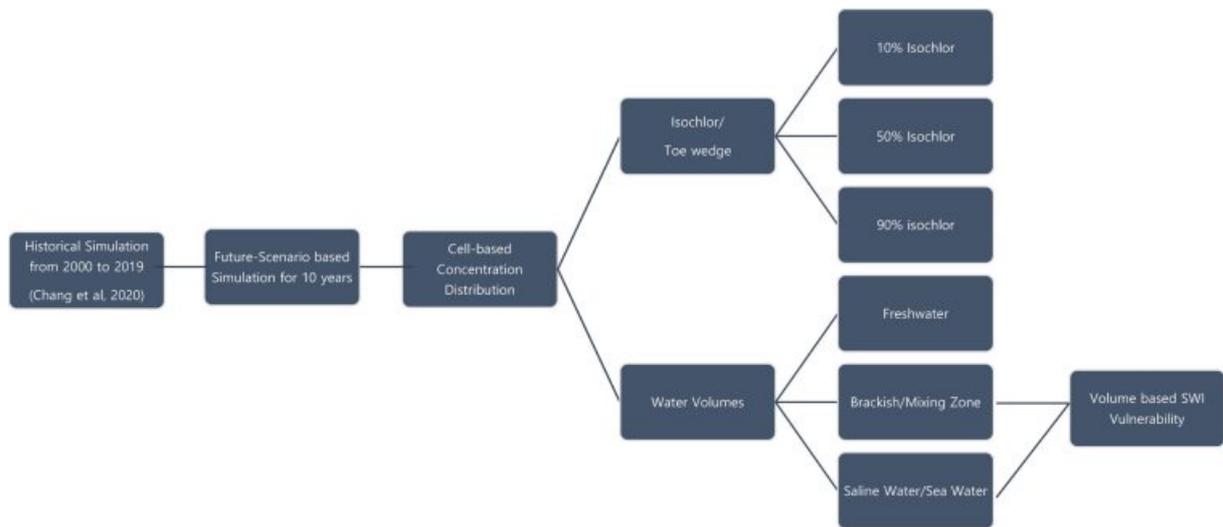


Fig. 4. Flow diagram to estimate quantitative SWI metrics.

- 미래 시나리오 1(wet climate scenario): 습윤 기후로 인해 현재 기후에서 지하수 함양이 증가하는 미래 시나리오이다. 2000년부터 2019년까지의 과거 20년 중에 가장 많은 지하수 함양이 발생했던 2012 년의 월별 지하수 함양을 시나리오에 적용하였으며 월별로 변동하는 함양량을 합산하여 연평균으로 환산할 경우 약 1260 mm/year에 해당한다. 지하수 개발량은 미래에 변화없이 2019년 이후로 일정하게 유지되었다
- 미래 시나리오 2(dry climate scenario): 가뭄으로 인해 현재 기후에서 지하수 함양이 감소한 상황을 모사하기 위해 과거 20년간의 데이터 중에서 가장 건조했던 2017 년의 월별 지하수 함양을 적용하였다. 월별로 변동하는 함양량을 합산하여 연간 함양량으로 환산할 경우 약 360 mm/year에 해당한다. 지하수 개발

량은 미래에 변화없이 2019년 이후로 일정하게 유지되었다.

Fig. 4는 SEAWAT 모의결과를 바탕으로 한 동역학적 해수침투 지표 산정 프로세스를 보여준다. Chang et al. (2020)은 개발 전 기간의 시뮬레이션 결과를 초기 조건으로 하여 2000년부터 2019년까지 지하수 개발에 따른 해수침투 변화를 모의하고 동일 모델에서 모델 검·보정 위해 시변성 모의 결과와 7개의 해수침투 관측점에서 얻은 지하수 모니터링 데이터를 비교한 결과, 지하수위 및 염분 농도의 모의결과와 관측치가 높은 일치율을 보여주었다. 해수침투의 정량적 지표에는 담염수 경계면의 위치, 해안으로부터의 담염수 경계면의 거리, 해안지하수 유출량, 해안지하수 부존량 등이 있다. 가장 일반적인 담염수 경계면은 해수 농도의 50%를 기준으로 하는 연결선 및

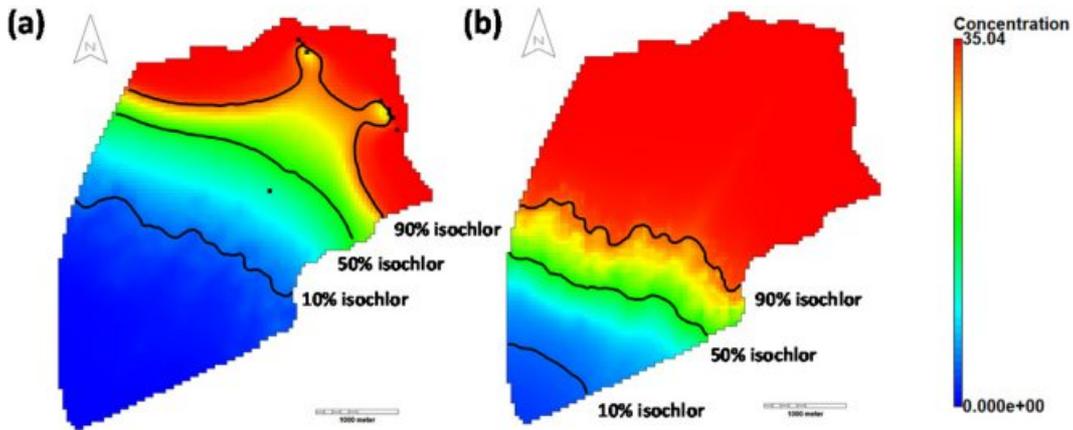


Fig. 5. Plan view of concentration in (a) layer 4 , 40 to 50 m below sea-level and (b) the bottom layer, 80 to 95 m below sea-level at the initial time of the future-scenario based simulation in October 2019. Salt concentrations range from 0.0 (blue) to 35 kg/m³ (red). Black dots represent brackish pumping wells. Black lines represent 10%, 50% and 90% isochlors.

연결면을 의미한다. 10% 및 90%의 농도는 담염수 혼합 영역을 고려하는 수치 모델에서 50% 기준 외의 해수침투의 추가적 지표로 채택되며, 본 연구에서도 정밀한 부존량 분석을 위해 10%, 50%, 90% 경계면의 분포를 분석하였다. 모의 결과로 도출한 경계면을 이용하여 해안지하수를 담수, 기수, 염수로 구분하였고 미래 예측 시나리오에 따른 각각의 부존량을 계산하였다. 마지막으로 해안지하수 중 기수 및 염수 부존량을 중심으로 Werner et al. (2011)가 제시한 동적 취약성 지표 중 하나인 부피 중심의 해안지하수 취약성 평가(volume-based SWI vulnerability)를 진행하였다.

2.2. 연구결과

Fig. 5는 미래 시나리오를 적용하기 전 모의 초기 조건인 2019년의 대수층에서 각각 (a) 해수면 아래 40~50 m의 중간 깊이(layer 4)에서의 염도분포 및 (b) 바닥층(layer 7)의 염도분포를 보여주고 있다. 2019년의 초기 조건이란 미래 시나리오의 초기 조건을 의미한다. 그림에서 적색은 바닷물을 나타내고, 청색은 담수를 나타내고, 황색에서 청록색은 기수를 나타낸다. 각각 10% isochlor, 50% isochlor, 90% isochlor 로 명명된 검은색 선은 해수 대비 염도의 10%, 50%, 90% 수준을 나타내는 경계면으로서 각각 3.5, 17.5, 31.5 kg/m³의 농도 수준을 대표한다. 대수층 중간 깊이는 양수정이 밀집해 있으며 이곳의 염분 농도 분포를 살펴보면 염지하수 양수정 주변에서 90% 경계면이 왜곡되어 있는 것을 관측할 수 있다. 모의결과에서 해수침투가 염지하수 관정 근처에서는 관정 위치보다

해안 방향으로 후퇴하는 현상이 발생하는 동시에, 염지하수 관정이 비교적 덜 위치해있는 모델의 북쪽과 동쪽에서는 내륙으로 전진하는 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)의 대수층 바닥의 염분 분포는 대략 해안선과 평행하게 분포한다. 모든 시나리오에서 염지하수 개발로 인한 대수층의 교란이 나타나고 해수 침투 영역이 염지하수 양수 영역은 왜곡되는 현상을 발견할 수 있으며 담·염수 경계면 위치는 염지하수 관정의 위치 및 양수에 의해 제어되는 것으로 추정할 수 있다. 이 영역 근처에서의 담·염수 경계면 위치는 계절별 차이가 크지 않음을 관측하였기 때문에 계절별 염분 분포는 본 연구에서 구분하지 않았다.

Fig. 6는 10년 동안 미래 함양 시나리오에 따라 테스트 베드 해안대수층 내의 중간깊이의 염도분포 모의 결과를 보여준다. Fig. 6(a)는 기준 시나리오(Base case)는 2000년부터 2019년까지의 월평균 함양량으로 구성하며 현재의 지하수 개발 수준이 유지했을 때의 10년 후의 상황을 모사한다. 기준 시나리오 모의 결과를 시나리오 초기 조건과 비교해보면, 2019년의 지하수 함양과 지하수 개발수준이 지속적으로 유지된다고 하더라도 염지하수 관정 위치한 주변은 10년동안 해수가 더욱 침투한 것을 파악할 수 있다. Fig. 6(b)는 낮은 함양량이 미치는 영향을 모의 하였다. 2000년부터 2019년까지의 과거 20년간의 데이터 중에서 가장 건조했던 2017년 가뭄으로 인한 1년 동안의 지하수 함양 패턴을 사용하여 지하수 함양 시나리오를 구성하였는데, 이 기간 동안의 지하수 함양량은 기준 시나리오 함양량의 44%에 해당한다. 모의 결과 낮은 지하수 함양으로 인해 50% 경계면이 기준 시나리오보다 더욱 내

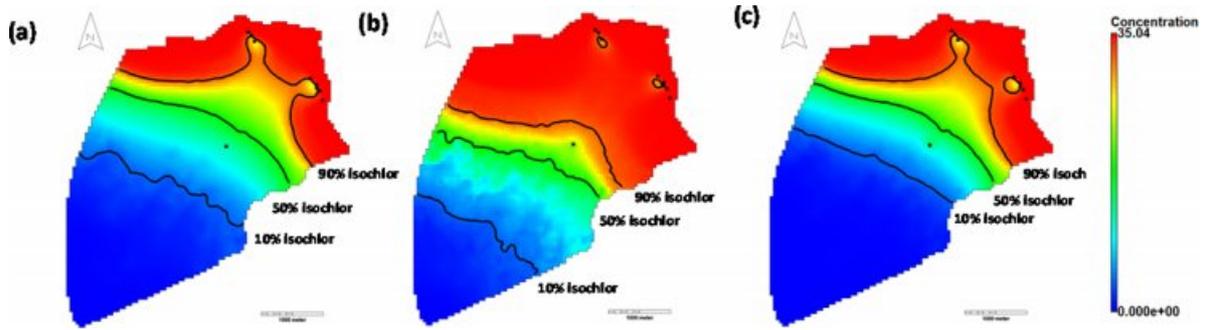


Fig. 6. Plan view of concentration in layer 4 at the end of the future-scenario based simulation for (a) base case, (b) dry-climate, and (c) wet-climate. Salt concentrations range from 0.0 (blue) to 35 kg/m³ (red). Black dots represent brackish pumping wells. Black lines represent 10%, 50% and 90% isochlores.

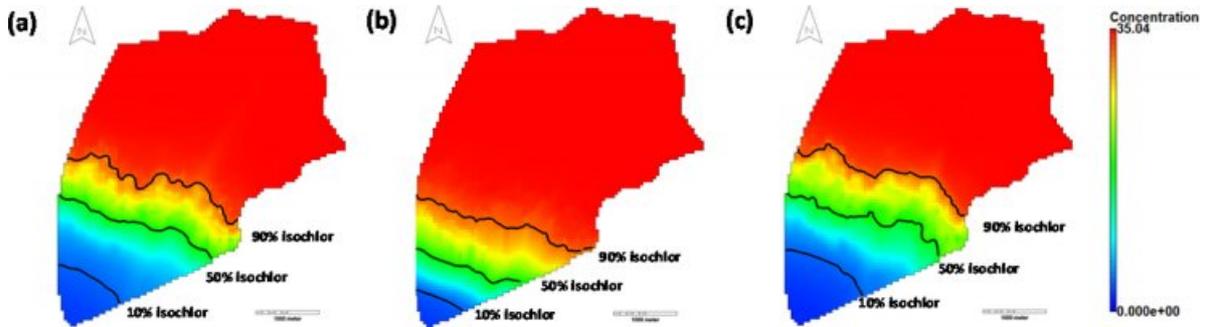


Fig. 7. Plan view of concentration in bottom layer at the end of the future-scenario based simulation for (a) base case, (b) dry-climate, and (c) wet-climate. Salt concentrations range from 0.0 (blue) to 35 kg/m³ (red). Black lines represent 10%, 50% and 90% isochlores.

북 방향으로 이동한 것을 알 수 있으며 해수의 영역도 더욱 넓어졌다. Fig. 6(c)는 높은 함양량이 미치는 영향을 모의하였다. 과거 20년 중에 가장 많은 지하수 함양이 발생했던 2012년의 지하수 함양 패턴을 사용하여 지하수 함양 시나리오를 구성하였는데, 이 기간 동안의 지하수 함양량은 기준 시나리오 함양량보다 52%에 증가한 수치이다. 모의 결과 높은 지하수 함양으로 인해 50% 경계면이 기준 시나리오보다 해안 방향으로 밀려난 것을 알 수 있으며 90% 경계면은 시나리오 초기 조건과 유사하게 형성되었다. 기준시나리오 및 낮은 함양량 모의 결과와 비교하였을 때 해수의 영역은 좁아지고, 담수의 영역이 넓어졌다. 세 개 시나리오 기반 모의 결과 염지하수 관정이 위치한 깊이에서는 함양량 변화가 50% 담·염수 경계면 미치는 영향이 크게 나타나지 않았으나, 10% 및 90% 담·염수 경계면의 움직임이 예측되고, 그 결과 염지하수 및 담수 영역의 변화가 발생함을 알 수 있다.

Fig. 7는 미래 시나리오에 의해 모의한 염분 분포 결과를 바닥층에서 공간 분포로 나타내었다. Fig. 7(a)는 기준 시나리오이며, Fig. 7(b)는 낮은 함양량이 미치는 영향,

Fig. 7(c)는 높은 함양량에 의한 바닥층의 염분 농도 분포를 보여준다. 염지하수 관정이 있던 중간 깊이의 깊이와는 달리 모든 시나리오에서 경계면의 왜곡이 일어나지 않고, 10%, 50%, 90% 경계면이 해안과 평행하게 위치하고 있다. Fig. 7(a)의 기준시나리오의 50% 경계면은 모의 초기보다 내륙 방향으로 진행하였다. Fig. 7(b)에서 지하수 함양이 크게 낮아질 경우의 모의 결과에서는 다른 경우들과 달리 염지하수 관정의 영향으로 인한 경계면의 왜곡이 크지 않고 10, 50, 90% 경계면 모두 내륙방향으로 큰 폭으로 이동한 것을 관측할 수 있어, 이 경우에는 해수침투에 의한 담·염수 경계면이 내륙 방향으로 이동하였다고 판단된다. Fig. 7(c)에서 지하수 함양이 기준 시나리오보다 높아질 역시 경계면의 왜곡없이 내륙방향에서 해안 방향으로 해안 방향으로 경계면이 밀려났다.

앞서 10%, 50%, 90% 경계면을 기준으로 깊이별(중간 깊이 및 바닥) 염분 분포를 살펴본 결과, 염지하수 관측정이 설치된 근방에서는 염분 분포의 왜곡이 일어나기 때문에, 해안선에서의 수직거리만으로는 그 영향을 정량적으로 평가하기 쉽지 않았다. 이에 따라 추가적으로 염지

Table 2. Simulated freshwater volume by SEAWAT for groundwater recharge scenarios

Scenario Title	Data Input for the 10-years future scenario (m ³)		Data Output at the end of the 10-years future scenario (m ³)		
	Accumulated recharge	Accumulated groundwater extraction	Freshwater volume (< 10%)	Brackish water volume (10%~90%)	Saline water volume (> 90%)
Initial time (2019) of Scenarios			5.03 × 10 ⁷ (39.1%)	4.25 × 10 ⁷ (33.0%)	3.49 × 10 ⁷ (27.9%)
Base Case Scenario	1.16 × 10 ⁸	1.78 × 10 ⁶	5.08 × 10 ⁷ (39.5%)	3.57 × 10 ⁷ (27.7%)	4.23 × 10 ⁷ (32.8%)
Wet Scenario	1.75 × 10 ⁸	1.88 × 10 ⁶	5.65 × 10 ⁷ (43.9%)	3.62 × 10 ⁷ (28.1%)	3.61 × 10 ⁷ (28.1%)
Dry Scenario	0.50 × 10 ⁸	1.88 × 10 ⁶	3.75 × 10 ⁷ (29.1%)	3.86 × 10 ⁷ (30.0%)	5.26 × 10 ⁷ (40.8%)

Table 3. Sensitivities for volume of changes compared to base-case scenario

Scenario Title	Change in Accumulated recharge, $\Delta(V_{freshwater\ input})$	Volumetric Change, $\Delta(V_{stored\ groundwater\ volume})$			Sensitivity, $\frac{\Delta(V_{stored\ groundwater\ volume})}{\Delta(V_{freshwater\ input})}$		
		Freshwater volume (< 10%)	Brackish water (10%~90%)	Saline water (> 90%)	Freshwater volume (< 10%)	Brackish water (10%~90%)	Saline water (> 90%)
Wet Scenario	5.9 × 10 ⁶	0.57 × 10 ⁶	0.05 × 10 ⁶	-0.62 × 10 ⁶	9.7%	0.8%	-10.5%
Dry Scenario	-6.6 × 10 ⁶	-1.33 × 10 ⁶	0.29 × 10 ⁶	1.03 × 10 ⁶	20.3%	-4.5%	-15.7%

하수 개발에 의한 해수침투를 평가하기 위해 대수층의 지하수 부존량을 계산하였다. Table 2에서 미래 시나리오의 10년 동안의 누적 함양량 및 양수량의 두 가지 입력 데이터를 표기하였고, 해석 결과는 미래 시나리오의 마지막 시기인 2029년의 모의 결과 파악된 부존량을 표시하였다. 해수면 위의 지하수위는 월별, 일별 변동이 있기 때문에, 부존량은 해수면 아래에 저장된 지하수의 부피로 정의하였다. 해수면 아래의 지하수 부존량은 “담수(fresh groundwater)”, “기수(brackish groundwater)” 및 “염수 또는 해수(saline water)”로 구분되어 산정되었다. 앞서 경계면의 기준을 3.5 kg/m³(10% 염도 수준), 17.5 kg/m³(50% 염도 수준), 31.5 kg/m³(90% 염도 수준) 설정하였다. 이러한 정의에 따라 Table 2의 첫 번째 열은 담수를 염 농도가 3.15 kg/m³ 미만인 물로 정의할 때 계산된 지하 담수의 총 부피이며, 두 번째 열은 기수를 염 농도가 3.15 kg/m³와 31.5 kg/m³ 미만인 물로 정의할 때 계산된 부피로, 세 번째 열은 염수를 농도가 31.5 kg/m³ 이상으로 정의할 때 계산된 지하 담수의 총량이다. 이것은 해당하는 셀의 부피에 0.1의 비산출을 값을 곱한 합계로 계산하였다.

시나리오 초기 조건에 의해 계산된 담수의 양은 5.03 × 10⁷ m³로서 전체 대수층 내 지하수 부피의 39.1%를 차지한다. 또한 2019년에 파악된 기수 및 염수의 양은 4.25 × 10⁷ m³, 3.49 × 10⁷ m³로서 전체 대수층 내 지하수 부피

의 33.0%, 27.9%를 차지한다. 초기 조건 이후 10년 동안의 기존 지하수 함양량이 유지되었을 경우 담수 및 염수 부피는 각각 5.08 × 10⁷ m³ 및 4.23 × 10⁷ m³로 증가했으며, 기수의 부피는 3.57 × 10⁷ m³로 감소했다. 이 결과로부터 해당 대수층의 혼합대가 꾸준히 줄고 있음을 알 수 있다. 초기 조건 이후 10년 동안의 기존 지하수 함양량이 증가하였을 경우 담수 및 염수 부피는 각각 5.65 × 10⁷ m³ 및 3.61 × 10⁷ m³로 증가했으며, 기수의 부피는 3.62 × 10⁷ m³로 계산되었다. 특히 담수의 부존량이 초기 조건보다 증가하여 실제 사용 가능한 담수가 증가한 것으로 추론할 수 있다. 반면 크게 증가한 지하수 함양에도 불구하고 기수의 부피는 상대적으로 적게 늘어난 것을 알 수 있어, 기수의 영역은 염지하수 관정의 위치 및 개발량에 영향을 받는 것으로 추론할 수 있다. 초기 조건 이후 10년 동안의 기존 지하수 함양량이 감소하였을 경우 담수 및 기수의 부피가 각각 3.75 × 10⁷ m³ 및 3.86 × 10⁷ m³로 감소했으며, 다른 시나리오들과 달리 염수의 부피가 5.26 × 10⁷ m³로 증가하였고 해당 대수층의 40.8%를 차지하였다.

Table 3에서는 앞서 얻은 누적 함양량과 부존량을 바탕으로 기존 시나리오 대비 지하수 누적 함양량의 변화로 인한 지하수의 부존량 변화에 대해 민감도 분석을 실시하였다. 높은 함양량 시나리오에서는 기존 시나리오보다

Table 4. Volume-based SWI vulnerability compared to base-case scenario

Scenario Title	SWI Vulnerability considering saline and brackish water (year)	SWI Vulnerability only for saline water (year)
Dry Scenario	-2.02	-1.57

5.9 × 10⁶ m³의 함양량이 증가하여 담수 및 기수는 0.57 × 10⁶ m³, 0.05 × 10⁶ m³ 증가하고 염수는 0.62 × 10⁶ m³ 감소하였다. 민감도는 각각 9.7%, 0.8%, -10.5%로 나타났다. 민감도가 0보다 큰 값은 함양량의 변화와 부존량의 변동이 양의 상관관계를 가지는 것을, 0보다 낮은 민감도 값은 함양량의 변화와 부존량의 변동이 음의 상관 관계인 현상을 의미한다. 낮은 함양량 시나리오에서는 기준 시나리오보다 6.6 × 10⁶ m³의 함양량이 감소하여 담수는 1.33 × 10⁶ m³ 감소하고 기수 및 염수는 각각 0.29 × 10⁶ m³, 1.03 × 10⁶ m³ 증가하였다. 민감도는 각각 20.3%, -4.4%, -15.7%로 나타났다.

두 시나리오에 대한 담수의 민감도를 비교하면, 지하수 함양 저하에 의한 담수 부존량의 감소 정도가 지하수 함양 증가에 의한 담수 부존량 증대보다 더욱 큰 것을 알 수 있다. 또한 두 시나리오에 대한 해수의 민감도를 비교하면 지하수 함양 저하에 의한 해수침투의 발생 정도가 지하수 함양 증가에 의한 해수침투 완화 보다 더욱 큰 것을 알 수 있다.

Table 4에서는 민감도 분석과 유사한 방식의 해수침투 지표를 채택하여 두 시나리오에 대해 다시 비교해결과를 제시하였다. 지하수 함양량 대비 해수의 부존량 변화는 Werner et al.(2011)가 정의한 정량적 해수침투 취약성 평가 지표에 해당한다. 괄호안의 값은 식 (1)의 정의에 따라 계산된 부피 기반 해수침투 취약성이며 단위는 year [T]이다.

$$Volume_based\ SWI\ Vulnerability = \frac{\partial V_{sw}}{\partial q} \quad (1)$$

여기서 V_{sw}는 염수/해수의 부피[L³], q는 대수층으로 충전되어 해안으로 유출되는 담수의 유량[L³/T]을 의미한다.

GIS 중첩 방식의 취약성 평가 기법과 달리 부존량 변화 진단 방식의 취약성 평가는 비교할 수 있는 기준 상태가 필요한데, 본 연구에서는 기준 시나리오의 함양량 및 부존량을 기준 상태로 설정한다. 또한 수자원 관리의 관점에서 관리의 목적에 따라 해수침투를 정의하는 염도의 범위가 다양함을 고려하여, 취약성 평가를 1) 10% 이상

의 기수를 포함한 경우, 및 2) 90% 이상의 해수만을 고려한 경우 부존량 기반 해수침투 평가에 고려하였고 그 결과는 다음 Table 4와 같다. 이 방식은 해수침투의 악화에 대한 진단이 시도되었지만, 해수침투 완화에 진단된 사례가 없었기 때문에 본 연구에서도 해수침투가 악화되는 낮은 지하수 함양에서만 시도되었고, 그 결과 -2.02 year 및 -1.57 year값이 도출되었다.

3. 결 론

최근 국내외에서 해안대수층의 담수 및 염수 자원의 활용 범위가 넓어지고 가치가 확대되고 있는 반면, 과다이용에 따른 재해발생의 문제도 동시에 대두되고 있어 해안 지하수의 해수침투 취약성 관리에 대한 필요성이 커지고 있다. 본 연구에서는 염지하수 개발이 활발히 진행되고 있는 연구 지역의 특성을 고려하여 해안지하수의 부존량을 계산하고 부존량에 기반한 취약성 지표를 채택하여 해수침투 취약성 분석을 실시하였다. 일반적으로 내륙에 위치하는 담수 지하수 관정으로 인해 담염수 경계면이 해안과 평행하고 해수침투의 진행방향이 섬 중앙인 내륙방향으로 진행되는 현상과 달리 본 연구의 염지하수 관정이 위치한 해안 지역에서는 해수침투 진행방향이 다소 불규칙하고 경계면 역시 교란되는 형태로 해수침투가 발생함을 연구 결과로 확인하였다. 이러한 현상으로 인해 부존량을 중심으로 해안지하수의 해수침투 영향을 파악하였고, 부존량 산정 결과가 담염수 경계면 이동 거리 측정 방식의 평가로 간과할 수 있는 현상을 보완할 수 있는 현실적인 해수침투 측정방식으로 활용될 수 있음을 알 수 있었다.

전세계적으로 연안에서 일어나는 염제해 현상에 미치는 기후변화의 등의 환경적 영향을 인식하고 그 영향을 파악하기 위해 기존의 염분 농도, 담염수 경계면, 부존량 등의 해수침투 지표 외에 취약성 평가 등의 새로운 지표 개발이 진행되고 있다. GALDIT 등으로 대표되는 정성적인 해안지하수 취약성 지표 산정 방식은 즉각적으로 이해하기 쉬워 향후 더욱 널리 사용될 것으로 예상되지만 지표 체계에 물리적 단위가 포함되어 있지 않고 취약성 예측 등을 수행하기 위해서는 추가적인 분석 도구를 필요로 한다. 본 연구에서 분산형 수치모델 모의 결과로 계산한 부존량 기반 취약성 지표는 대수층의 향후 취약성 변화를 예측할 수 있는 새로운 정량적 지표로 활용할 수 있는 장점이 있다. 부존량 기반 취약성 지표 산정 방식은 정상상태의 해석해를 가정하여 개발되었기 때문에 담염수 경계 이동 경로를 고려해야하는 단기 또는 중장기 예측이

필요한 경우 지표 적용과 해석 방식에서 개선되어야 할 사항이 많을 것으로 예상된다.

마지막으로, 본 연구에서 시도된 부존량 기반 계산 방식을 해안수자원 관리에 실질적으로 적용하기 위해서는 후속 연구를 통하여 더욱 정밀한 부존량 해석을 수행할 필요가 있다. 예를 들어 본 연구의 담수, 기수, 해수의 기준을 채택할 때 해수침투 연구의 일반적인 구분 방식을 차용하였으나 해당 지역의 농업, 산업적 물이용 특성을 세밀하게 파악한다면 담수의 기준 농도, 기수의 기준 농도 등을 지역맞춤형으로 설정할 수 있을 것으로 판단한다. 또한 실증지역을 3차원 모델로 수치적으로 모의하는 과정에서 많은 격자를 계산하는 부담을 덜기 위해 음해유한차분법을 채택하였는데 이 방식은 내재적으로 수치분산에 의한 오차를 발생시킬 수 있다. 기존에 무차원화된 대표 예제 또는 실내 실험 규모의 해수침투의 수치모의 연구에서 용질 이동의 이송(advection) 프로세스를 양해(explicit)법인 3rd order TVD(Total Variation Diminishing)법 등으로 계산할 경우 더욱 정확한 경계면 예측이 가능했지만 계산 시간 등의 부담으로 본 연구와 같은 정밀한 현장 모델의 증장기 예측에 적용하기는 쉽지 않다. 향후 더욱 효율적이고 정확한 실증 모델의 결과 도출을 위해서 정밀 모델의 수치해석법의 계산 방식에 대해서도 지속적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단한다.

사 사

이 논문은 대한민국 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 기후변화영향최소화기술개발사업(과제번호: NRF-2020M3H5A1080735) 및 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업 제주권 건설교통기술 지역거점센터(과제번호: 20RDRP-B076272-07)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

Chachadi, A.G. and Lobo-Ferreira, J.P., 2001, Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method. Proc. Workshop on modelling in hydrogeology, Anna University, Chennai, pp.143-156, and in COASTIN A Coastal Policy Research Newsletter, Number 4, March 2001. New Delhi, TERI, 7-9.

Chang, S.W., Nemeč, K., Kalin, L., and Clement, T.P., 2016, Impacts of climate change and urbanization on groundwater resources in a barrier island, *J. Environ. Eng.*, **142**(12), D4016001

Chang, S.W., Chung, I.-M., Kim, M.-G., Tolera, M., and Koh, G.-W., 2019, Application of GALDIT in Assessing the Seawater Intrusion Vulnerability of Jeju Island, South Korea, *Water*, **11**, 1824.

Chang, S.W., Chung, I.-M., Kim, M.-G. and Yifru, B.A., 2020, Vulnerability assessment considering impact of future groundwater exploitation on coastal groundwater resources in north-eastern Jeju Island, South Korea, *Environ. Earth Sci.*, **79**, 498, doi:10.1007/s12665-020-09254-2.

Chun, J.A., Lim, C., Kim, D., Kim, J.S., 2018, Assessing Impacts of Climate Change and Sea-Level Rise on Seawater Intrusion in a Coastal Aquifer, *Water*, **10**(4), 357.

El-Kadi, A.I., Tillery, S., Whittier, R.B., Hagedorn, B., Mair, A., Ha, K., and Koh, G.-W., 2014, Assessing sustainability of groundwater resources on Jeju Island, South Korea, under climate change, drought, and increased usage, *Hydrogeol. J.*, **22**, 625-642, doi:10.1007/s10040-013-1084-y.

Fahs, M., Ataie-Ashtiani, B., Younes, A., Simmons, C.T., and Ackerer, P., 2016, The Henry problem: New semianalytical solution for velocity-dependent dispersion, *Water Resour. Res.*, **52**(9), 7382-7407, doi:10.1002/2016wr019288.

Giambastiani, B.M.S., Antonellini, M., Oude Essink, G.H.P., and Stuurman, R.J., 2007, Saltwater intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): A numerical model, *J. Hydrol.*, **340**(1-2), 91-104.

Goswami, R.R. and Clement, T.P., 2007, Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics, *Water Resour. Res.*, **43**(4), doi: 10.1029/2006WR005151.

Henry, H.R., 1964, Effects of dispersion on salt encroachment in coastal aquifers, *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper Rep. 1613-C*, C71-C84. pp.

Guo, W. and Langevin, C.D., 2002, User's Guide to SEWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow, United States Geological Survey.

Lee, E., Kang, K., Hyun, S.P., Lee, K.-Y., Yoon, H., Kim, S.H., Kim, Y., Xu, Z., Kim, D., Koh, D. -C., and Ha, K., 2016, Submarine groundwater discharge revealed by aerial thermal infrared imagery: a case study on Jeju Island, Korea, *Hydrol. Process*, **30**(19), 3494-3506. doi: 10.1002/hyp.10868.

Morgan, L.K. and Werner, A.D., 2015, A national inventory of seawater intrusion vulnerability for Australia, *J. Hydrol.*, **4**, 686-698, doi:https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.10.005.

Oude Essink, G.H.P., van Baaren, E.S., and de Louw, P.G.B., 2010, Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands, *Water Resour. Res.*, **46**(10), W00F04, doi:10.1029/2009wr008719

Praveena, S.M. and Aris, A.Z., 2009, Groundwater resources

assessment using numerical model: A case study in low-lying coastal area, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, **7**, 135-146.

Ranjan, P., Kazama, S., Sawamoto, M., 2006, Effects of climate and land use changes on groundwater resources in coastal aquifers, *J. Environ. Manage.*, **80**, 25-35. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.08.008>.

Shin, J. and Hwang, S., 2020, A borehole-based approach for seawater intrusion in heterogeneous coastal aquifers, eastern part of Jeju Island, Korea, *Water*, **12**(2), 609.

Sulzbacher, H., Wiederhold, H., Siemon, B., Grinat, M., Igel, J., Burschil, T., Günther, T., and Hinsby, K., 2012, Numerical modelling of climate change impacts on freshwater lenses on the North Sea Island of Borkum using hydrological and geophysical methods, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **16**, 3621-3643. doi:

10.5194/hess-16-3621-2012.

Vandenbohede, A. and Lebbe, L., 2002, Numerical modelling and hydrochemical characterisation of a fresh-water lens in the Belgian coastal plain, *Hydrogeol. J.*, **10**, 576-586. <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0209-5>

Werner, A.D., Ward, J.D., Morgan, L.K., Simmons, C.T., Robinson, N.I., and Teubner, M.D., 2011, Vulnerability Indicators of Sea Water Intrusion, *Ground Water*, **50**(1), 48-58 doi:10.1111/j.1745-6584.2011.00817.x.

Werner, A.D., Bakker, M., Post, V.E.A., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C.T., and Barry, D.A., 2013, Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges, *Adv. Water Resour.*, **51**, 3-26.