

OpenGeoSys를 이용한 하굿둑 인근 지하수 내 염분 침투 수치모의

이현중¹ · 이승오^{2*} · 맹승진³

¹홍익대학교 건설환경공학과 석사과정, ²홍익대학교 건설환경공학과 교수, ³충북대학교 지역건설공학과 교수

Numerical Simulation of Salinity Intrusion into Groundwater Near Estuary Barrage with Using OpenGeoSys

Hyun Jung Lee¹, Seung Oh Lee^{2*}, and Seung Jin Maeng³

¹Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hongik University

²Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hongik University

³Professor, Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungbuk National University

요약

하굿둑은 내륙의 염분 침투를 방지하고 공급 용수를 확보하기 위해 설치되어 홍수기를 제외하고 닫힌 상태로 운용되고 있다. 그러나, 수문은 부영양화와 같은 수질 문제를 발생시켜 수질 개선과 용수 공급의 목적을 이루기 위해 수문 운영에 따른 염분 침투영향 파악이 필수적이다. 지하수는 지표하 조건과 느린 흐름 특성으로 인해 수치 모형을 통한 분석이 주로 수행된다. 본 연구에 이용된 OpenGeoSys는 열-수리-역학-화학 현상을 모의할 수 있는 오픈소스 모형이다. 모의는 하굿둑이 없는 자연흐름 조건, 3~9월의 농번기를 고려하여 수문이 운영된 조건을 반영하여 수행되었다. 모형은 해석해와 검증하여 3.7%의 오차를 획득함으로써 염분 침투 가능성을 평가하였고, 모의 결과, 농번기를 고려한 수문 운영 조건의 염분침투 길이는 자연흐름 조건보다 46% 감소하여 약 74.36 m로 파악되었다. 본 모의의 결과는 지하수 관련 정책 수립 및 지하수 이용자의 지하수 이용 결정에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어: 수치 모형, 염분 침투, 하굿둑, 지하수, Ghyben-Herzberg

ABSTRACT

The estuary dam is a structure installed and operated in a closed state except when flood event occurs to prevent inland saltwater intrusion and secure freshwater supply. However, the closed state of dam leads to issues such as eutrophication, so it is necessary to examine the extent of saltwater intrusion resulting from the opening of sluice gates. Groundwater, due to its subsurface conditions and slow flow characteristics, is widely analyzed using numerical models. OpenGeoSys, an open-source software capable of simulating Thermal-Hydraulic-Mechanical-Chemical phenomena, was adopted for this study. Simulations were conducted assuming natural flow conditions without dam and operating considering busy farming season, mostly from March to September. Verification of the model through analytical solutions showed error of 3.7%, confirming that OpenGeoSys is capable of simulating saltwater intrusion for these cases. From results simulated for 10 years, considering for the busy farming season, resulted in about 46% reduction in saltwater intrusion length compared to natural flow conditions, approximately 74.36 m. It may be helpful to make choices to use groundwater as a water resource.

Keywords: Numerical model, Salinity intrusion, Estuary, Groundwater, Ghyben-Herzberg

*Corresponding author: Seung Oh Lee, seungoh.lee@hongik.ac.kr ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1726-3694>

Received: 6 December 2023, Revised: 27 December 2023, Accepted: 27 December 2023



1. 서론

수권(hydrosphere)은 바다, 빙하, 지하수, 하천, 대기 등으로 구성되어 있다. 이 중, 바다가 전체 물의 96.5%를 차지하고 있으며, 약 2.5%의 담수가 지하수·지표수 순으로 저장되어 있다(Himiyama et al., 2020). 우리나라의 연간 수자원 이용량은 약 366억 m³이며 이 중 지하수는 약 29.1억 m³로 약 7.64%의 비중을 차지하고 있다. 연간 지하수 이용량은 1995년부터 2021년까지 증가 및 감소하였으나 1995년 대비 3.57억 m³ 증가하였고, 지하수 이용시설 수는 지속적인 증가 추세를 보인다(ME, 2023). 지하수 이용은 농업용 49.6%, 생활용 49.4% 수준으로 이용되고 있다. 지하수는 용수의 취수원을 공급하는 중요한 역할을 하는 만큼 지하수 이용시설의 증가는 용수공급을 위한 지하수 이용량을 증가시킬 수 있다. 특히, 농업용수 공급을 목적으로 가장 많이 이용되기 때문에 농업용수 이용을 위한 지하수 확보는 중요하다. 해안 인접 지역 중 일부는 지표수 및 지하수를 확보하기 위해 하굿둑이 설치되어 운용되고 있다. 하굿둑은 이처럼 공급 용수를 확보할 수 있다는 장점이 있으나, 해수 차단으로 인한 수질 악화 및 생태계 등의 문제가 발생하고 있어 하굿둑 운영 및 적절한 관리방안의 제시가 요구되고 있다(Lee and Kim, 2020). 이와 같은 문제를 해결하기 위해 하굿둑 운영에 따른 염분 침투영향 파악이 필요하며, 하굿둑 설치 지역은 농어촌에 인접해 있어 농업용수를 주로 이용하는 지하수로의 염분 침투영향을 파악하고자 한다. 지하수 염분 침투는 Ghyben-Herzberg가 제안한 염수와 담수의 밀도 차로 인해 발생하는 G-H비로 해석되고 있다(Verruijt, 1968). Oude Essink(2001)는 해수 침투 현상에 따른 해석적 해법을 제시하여 부존형태, 대수층특성에 따른 염분 침투 양상을 개념적으로 제시하였다. 지하수 해석은 지하에 위치하며 느린 흐름 특성으로 인해 수치 모형을 이용한 분석 기법이 주로 이용되고 있다. 수치 모형을 이용한 염분 침투 모의는 MODFLOW에 적용가능한 SEAWAT 코드와 FEFLOW를 이용한 3차원 염분 침투영향 수치 모의 등이 주로 이용되고 있다(Sarsak, 2011; Dibaj et al., 2020). 그러나 MODFLOW는 SEAWAT 코드와 같이 분석 대상에 따라 새로운 Package에 대한 코드 및 이해가 요구되고, FEFLOW는 구독형 소프트웨어 형태로 이용에 제한이 있다. 본 연구에서 사용된 OpenGeoSys는 오픈소스 모형으로 사용자가 원하는 방식에 따라 코드를 수정하여 이용할 수 있으며, 열·수리·역학·화학·지질 현상에 대한 복합 모의가 가능하다(Kolditz et al., 2012). OpenGeoSys 모형을 이용한 염분 침투는 지하수 흐름과 물질 이송에 대해 복합 모의를 수행함으로써 염분 침투영향을 파악할 수 있다. 본 연구는 하굿둑 인근 지역을 대상으로 하굿둑 운영에 따른 지하수 염분 침투영향 범위를 분석하고자 하였다. 분석 방법으로는 OpenGeoSys를 이용하여 3차원 염분 침투 모의를 수행하였고, 모의 조건은 수문이 없는 자연 흐름 조건과 농업용수 이용 시기를 고려하여 하굿둑을 운영하였을 때를 설정하여 조건에 따른 염분 침투영향 범위를 평가하였다.

2. 본론

2.1 Ghyben-Herzberg 이론

해안지역에서의 지하수 내 염분 침투는 섞이지 않는 담수와 염수의 밀도차에 의해 염수가 대수층 아래 켜기 형태로 침투한다. 중력가속도(g)는 9.81 m/s^2 , 담수의 밀도(ρ_f)는 $1,000 \text{ kg/m}^3$ 이며, 염수의 밀도(ρ_s)는 $1,025 \text{ kg/m}^3$ 이고(식(1)), G-H 비 α 는 식(2)와 같이 해수면 아래 담·염수 경계면 깊이(H)가 해수면 위 지하수면(h)의 40배까지 염수가 침투하게 된다(Fig. 1).

$$\rho_s H g = \rho_f (H + h) g \quad (1)$$

$$h = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} H, \quad h = \alpha H \quad (2)$$

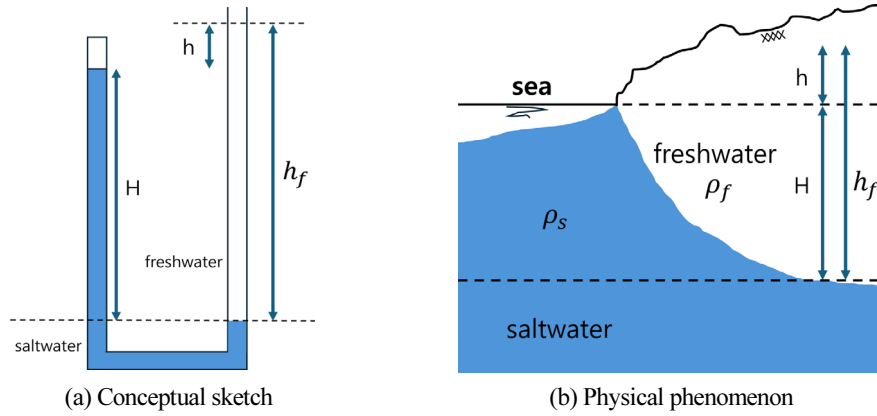


Fig. 1. Concept of air bubble barrier

2.2 OpenGeoSys

본 연구에 사용된 수치모형 OpenGeoSys는 독일 Helmholtz Centre for Environmental Research의 O. Kolditz가 개발한 오픈소스 소프트웨어이다. OpenGeoSys는 다공질 매체 내에서 thermo-hydro-mechanical-chemical 현상에 대한 복합 모의가 가능하며, 유한요소법(Finite Element Method)을 기반으로 모의 대상을 점부터 삼각기둥까지 자유롭게 구성한 3차원 모의가 가능하다. 염분 침투는 지하수 흐름과 물질 이송-확산의 원리에 대해 복합 모의가 이루어진다. 염분 침투 모의는 다공성 매체 내 대표 기본 체적(Representative Elementary Volume, REV)에 대해 연속방정식, 운동량 방정식, 물질 이송-확산 방정식에 대해 계산된다. 흐름에 대한 연속방정식은 REV 내 시간 t 에 대해 포화도 S , 공극률 \varnothing , 액체의 밀도 ρ , 유속 벡터 \vec{v} , 대수층 내 유량 ρQ_p 로 표현되어 식 (3)과 같다. 흐름에 대한 연속방정식을 수두 h 와 물질 농도 C 의 변화에 대한 비저류계수 S_0^h , 농도 확산 계수 λ_C , Darcy 유속 벡터 \vec{q} 를 정리하면 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial(S\varnothing\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varnothing\rho\vec{v}) = \rho Q_p \quad (3)$$

$$\varnothing \frac{\partial S}{\partial t} + S S_0^h \frac{\partial h}{\partial t} + S\varnothing\lambda_C \frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} + \lambda_C \vec{q} \cdot \nabla C = Q_p \quad (4)$$

흐름에 대한 운동량 방정식은 Darcy의 흐름 방정식으로 투수계수 텐서 \hat{k} , 중력 방향으로의 단위 벡터 \vec{e} , 해수의 밀도 ρ , 담수의 밀도 ρ_0 로 표현되어 식 (5)와 같다. 이 식은 확산 텐서 \hat{D} 로 정리할 수 있으며, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, γ 는 비틀림도, D_m 은 분자확산 계수, $\hat{\delta}$ 는 단위 텐서, $v_{i,j}$ 는 종(i)·횡(j) 방향으로의 속도, α_T 는 횡분산도, α_L 은 종분산도, δ 는 Kronecker delta를 의미한다.

$$\vec{q} = \varnothing \vec{v} = -\frac{\hat{k}\rho_0 g}{\mu} \left(\nabla h + \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) \vec{e} \right) \quad (5)$$

$$\hat{D} = \gamma D_m \hat{\delta} + \alpha_T |v| \hat{\delta} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{\vec{v}_i v_j}{|v|} \quad (6)$$

$$\varnothing \frac{\partial C}{\partial t} + (1 - \varnothing) \lambda_h C \frac{\partial C}{\partial t} + \varnothing \vec{v} \cdot \nabla C - \nabla \cdot (\varnothing \hat{D} \cdot \nabla C) + C Q_p = Q_C \quad (7)$$

물질 수송은 이송-확산 방정식에 의해 정리되며, 물질 농도에서 용질의 양을 Q_C 라고 할 때, 식 (7)로 나타낼 수 있으며, 본 연구에서는 연속·운동량·이송-확산 방정식의 계산을 이용한 염분 침투 복합 모의가 수행되었다.

2.3 모형검증

자유 대수층에서의 지하 담수는 불투수층과 접촉해 있고, 염수는 담·염수 밀도 차에 의해 담수 하부에 불투수층의 표면과 접촉하여 썩기 형태로 침투한다. OpenGeoSys 모형의 검증은 비피압대수층 조건에서의 염분 침투 썩기 길이 L 에 대해 Oude Essink(2001)가 제시한 해석해를 이용하여 검증하였다.

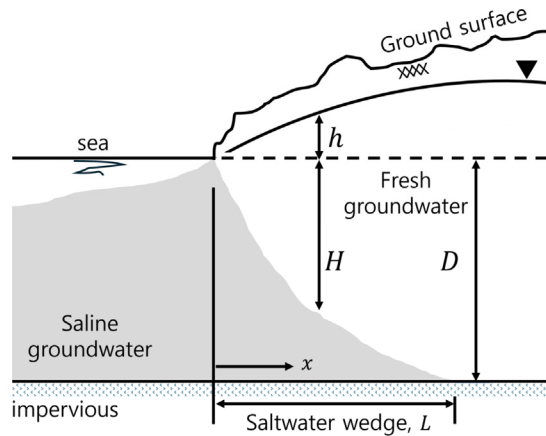


Fig. 2. Saltwater wedge in unconfined aquifer

해안대수층으로부터 지하 담수체까지의 폭을 W 라고 정의하고, 식 (8)과 같이 q_0 를 해안선 $x = 0$ 지점에서의 지하수 유출량, D 를 대수층의 두께, f 를 자연 함양량, k 를 투수계수로 정의하였을 때(Fig. 2), 해수침투 길이 L 은 식 (9)와 같이 구할 수 있다. 해석해는 Oude Essink(2001)가 제시한 조건으로 설정하였다. 모의는 OpenGeoSys 모형에 f 는 모형에 반영되지 않아 해석해와 동일한 조건으로 가정하였고, 투수계수는 모의 단위인 m^2 로 변환하였으며, 이외는 해석해와 동일하게 설정하여 Table 1과 같이 설정하였다. 해석해 L 은 175.11 m, 모의 결과 L 은 168.65 m로(Fig. 3) 3.68%의 오차를 획득함으로써 OpenGeoSys 모형이 지하수 염분 침투 모의에 적합하다고 판단하였다.

$$q_0 = -fW \quad (8)$$

$$L = -\frac{q_0}{f} - \sqrt{\left(\frac{q_0}{f}\right)^2 - \frac{k}{f} D^2 (1 + \alpha)} \quad (9)$$

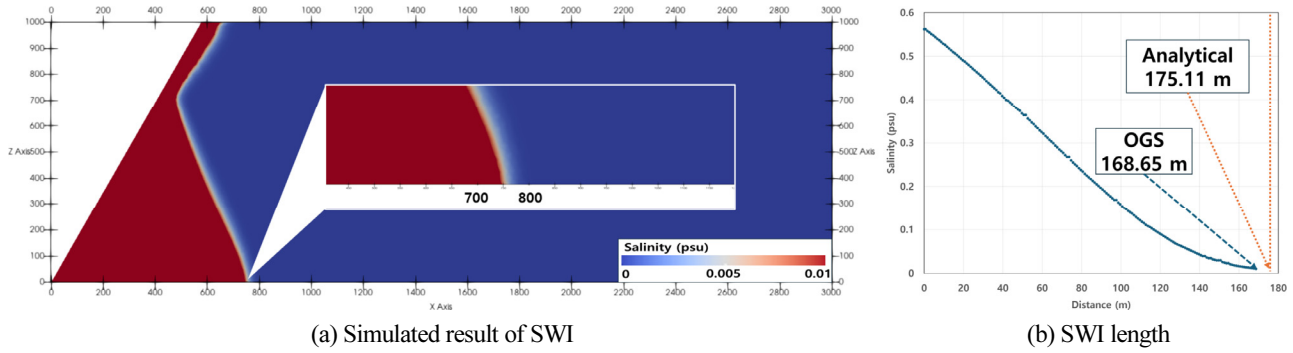


Fig. 3. OpenGeoSys SWI verification

Table 1. Test conditions for validation and results

Parameters		Results	
Analytical	OpenGeoSys	Analytical	OpenGeoSys
$W = 3,000$ m	$W = 3,000$ m	$L = 175.11$ m	$L = 168.65$ m
$f = 1$ mm/day	$\alpha = 0.020$		
$\alpha = 0.020$	$k = 2.315e^{-11}$ m ²		
$k = 20$ m/day	$D = 50$ m	Error = 3.68%	
$D = 50$ m	$\Delta x = 15$ m		
	$\alpha_T, \alpha_L = 15$ m, 1.5 m		

2.4 모의 구성

모의 대상지는 전라북도 군산에 위치한 금강하굿둑 인근 지역으로 선정하였다(Fig. 4(a)). 금강하굿둑은 1990년에 완공되어 서천·군산지역에 농업 및 공업용수 공급을 목적으로 운용되고 있다. 그러나, 수문으로 인한 퇴적물 문제 발생 및 수질 악화 등으로 인한 해수 유통의 입장과의 갈등이 대두되고 있다(Lee and Kim, 2020). 따라서, 해수가 유통되었을 때, 지하수의 염분 침투로 인해 농업용수 공급에 미치는 영향 범위를 파악하고자 하였다.

모의 범위를 구성하는 도메인의 투수계수는 서천군 지하수 기초조사보고서의 대수성 시험 결과를 참고하였다(KIGAM, 2003). 공극률은 국토교통부에서 제공하는 서천·군산지역의 시추정보도의 현장관찰기록을 참고하였고, 대상 지역은 실트질 모래, 모립질 자갈이 주로 관찰되어 0.3으로 설정하였다(Table 2). 시계열 조위 및 염분 측정자료는 국립해양조사원을 이용하였다. 금강하굿둑 수문(gate) 제원은 30 m × 20 려므로 600 m의 폭을 차지하며, 수문 폭 범위 내에서 염수가 침투하고 모의에도 현상이 반영되도록 해수 침투 폭을 600 m로 설정, 배수갑문 Sill 표고 EL -5.0 m를 반영하였다. 모의의 범위는 대상 지역의 해안 경계를 포함하여 염분 침투영향을 충분히 파악할 수 있도록 범위를 설정하여 shape file로 제작하여 Fig. 4(b)와 같이 Geometry를 구성하였다. 이후, 3차원 모의를 위해 Fig. 4(c)와 같이 총 353,643개의 Nodes와 tetrahedra 67개, pyramids 115개, prisms 582,374개의 elements로 3차원 mesh를 구성하였다.

모의 기간은 지하수 흐름 특성과 선행연구를 고려하여 10년으로 설정하였으며(Mansour et al., 2017; Nasiri et al., 2021), 수문이 없는 자연 흐름 조건과 농번기를 고려하여 수문이 운영되었을 때를 시나리오로 설정하여 지하수로의 염분 침투영향을 분석하였다. 수문 운영은 담수호의 수위 관리 혹은 수질 관리를 위한 목적으로 운영되며, 본 모의에서 수문 운영은 2017년 배수갑문 운영실적을 반영, 배수 갑문 폭에 해당하는 면적을 surface로 설정하여 경계조건을 부여하였다(Table 2). 결과의 분석은 금강하굿둑을 기준으로 시나리오별 거리에 따른 염분 농도로 차이를 평가하였으며, 침투한 염분의 농도는 농업용수 목적에 따라 관개용수 염해 기준인 0.6 psu를 기준으로 분석하였다.

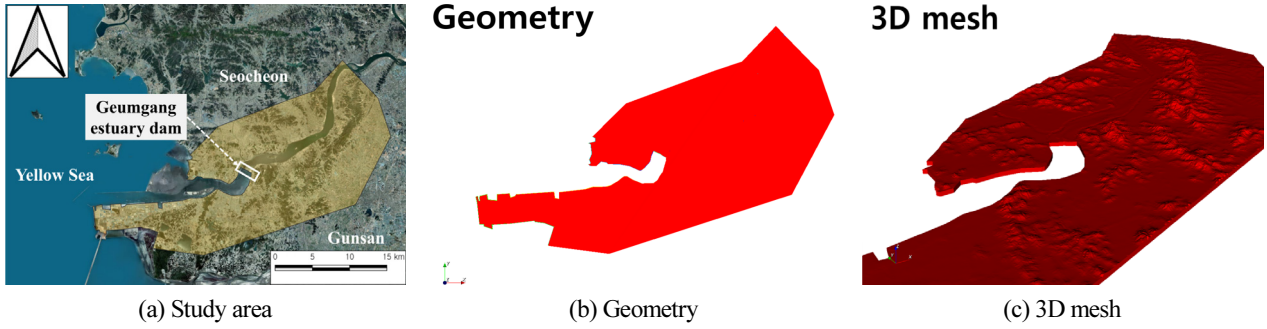


Fig. 4. Study area and mesh generation

Table 2. Parameters and scenarios setting

Parameters	Scenarios
$\varnothing = 0.3$	A : Natural flow (no gate) condition
$\alpha = 0.026$	
$k = 1.38e^{-13} \text{ m}^2$	B : Gate operating considering busy farming season with 2017 gate operation records (March~September)
$D = 150 \text{ m}$	
$\Delta x = 0.03\text{--}210.30 \text{ m}$	
$\alpha_T, \alpha_L = 250 \text{ m}, 25 \text{ m}$	

2.5 모의 결과 및 분석

시나리오별 수문으로부터의 염분 침투 깊이를 심도별로 구분하여 침투영향을 분석하였다. 심도는 EL -150, -100, -50, 0 m로 구분하였다(Fig. 5(b)). 모의 결과, 염분은 EL -150, -100 m에서 0.6 psu 기준 119.23 m까지 침투하였다(Figs. 6(a) and 6(b)). EL -50 m 구간에서 시나리오 A는 EL -100 m 이하 심도와 동일하게 119.23 m까지 침투하였으나, 시나리오 B는 74.36 m로 자연 흐름 조건보다 약 37.6% 감소하였다(Fig. 6(c)). 지표면 기준에서 시나리오 A는 119.23 m로 지표 하부와 동일한 반면, 시나리오 B의 염분 침투 깊이는 64.42 m로 심도 EL -50 m 구간보다 약 46.0% 감소하였다(Fig. 6(d)). 지표면에서 시나리오 B의 염분 침투 깊이는 EL -50 m 대비 약 13.7% 감소하였고, 지표면으로 향할수록 염분 침투 깊이가 감소하는 양상은 Ghyben-Herzberg 이론에서 제시된 담-염수 밀도차에 의한 염분 침투 양상이 표출된 것으로 설명된다.

또한, 수문 운영에 따른 염분 변화를 파악하기 위해 시나리오별 모의 결과를 시계열로 추출하여 분석하였다(Fig. 5(c)). 추출 지점은 시나리오에 따라 염분 농도 차이를 비교할 수 있도록 수문으로부터 수평거리 30 m 떨어진 지점으로 선정하였고, 심도는 농업용 관정 굴착 심도를 고려하여 EL -20 m로 설정하였다. 수문이 없는 자연 흐름 조건에서는 하천과 해수의 지속적인 소통으로 인해 최초 17.29 psu에서 상승하여 10년 후 19.15 psu로 약 10% 증가하였다. 반면, 시나리오 B에서는 수문 운영으로 인한 해수 차단 효과로 약 4년 동안 염분 농도가 감소하였다가 증가하는 경향을 보였다. 시나리오 B의 최저 염분 농도를 확인했을 때, 1,330일 후 3.70 psu까지 감소하여 시나리오 A 대비 74% 감소하였으며, 10년 후, 11.03 psu로 시나리오 A 대비 약 42% 감소하였다.

수문이 없는 자연 흐름 조건으로 모의하되 농번기를 고려하여 3~9월까지 해수를 차단하는 조건은 수문이 없는 자연 흐름 조건에 비해 지하수로의 염분 침투가 감소하였다. 이는 농번기 동안 수문으로 인한 해수와 담수의 차단 효과, 상류 수리구조물 방류량에 의한 희석효과, 강우에 의한 희석효과 등이 반영된 것으로 판단된다. 그러나, 조건에 따른 수문 운영 또한 시간의 경과에 따라 염분 농도가 증가함을 보였다(Fig. 5(c)). 이는 농번기 때 수문을 닫음으로써 해수의 유입이 일시적으로 차단됨에 따라 유속이 감소하며 유입된 염수의 정체 현상이 발생하고 하상 바닥의 잔존 염분이 지하로 침투하는 것으로 판단된다.

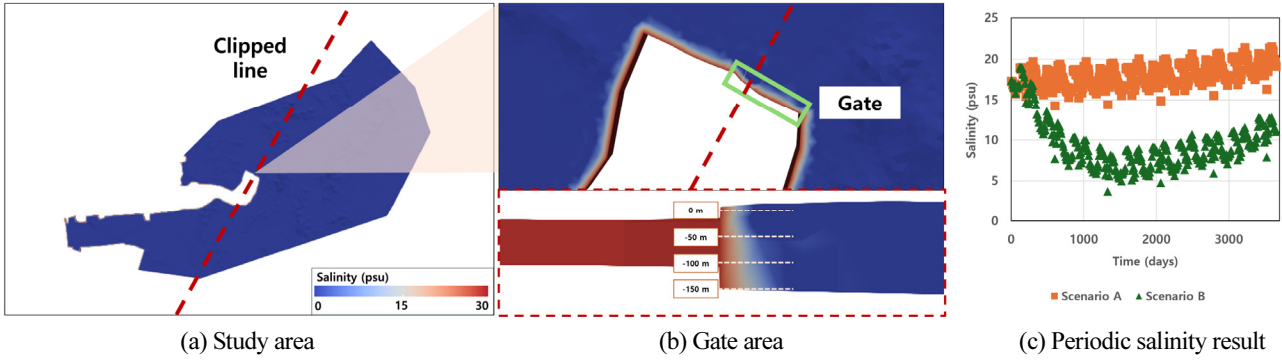


Fig. 5. Simulation result of scenario B and periodic salinity result

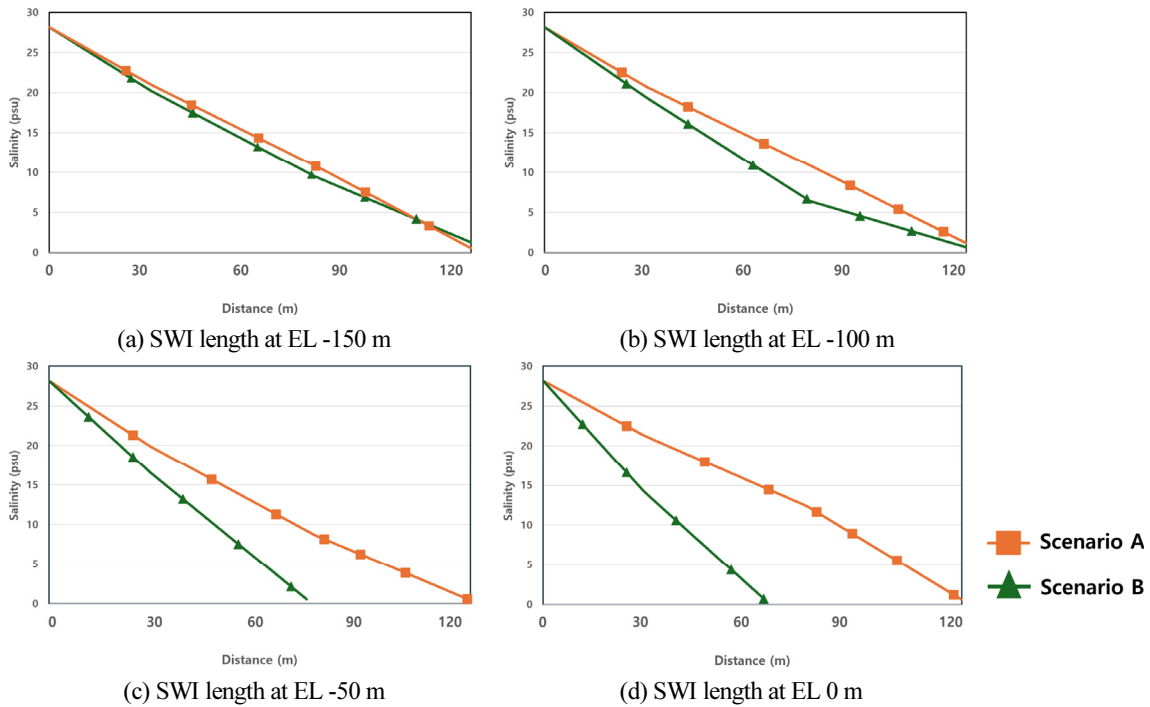


Fig. 6. Simulation result of SWI length divided by depth for each scenario

3. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 OpenGeoSys 3차원 모형을 이용하여 하굿둑 운영 조건에 따른 지하수 내 염분 침투영향을 파악하였다. 모형은 염분 침투 길이에 대한 해석해와 실험 규모의 2차원 모의 결과를 검증하여 염분 침투 모의 가능성을 검증하였다. 검증된 모형을 바탕으로 하굿둑에서 수문이 없는 자연 흐름 조건과 농번기를 고려하여 배수갑문을 운영했을 때를 비교하여 염분 침투영향을 검토하였다. 하굿둑에서 OpenGeoSys 3차원 모형 결과는 시·공간에 따른 해석을 수행함으로써 수문 운영이 염분 침투범위 및 농도를 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다. 그러나, 시간에 따른 염분 농도의 증가는 지하수 이용가능량을 감소시킬 수 있고, 지속적 배수갑문으로 인한 해수와 담수호의 차단은 담수호의 수질을 악화시킬 수 있다. 따라서, 지표수와 지하수에서 발생할 수 있는 문제를 종합적으로 해소할 수 있는 최적 수문 운영 방안이 도출될 필요가 있다.

향후 연구에서는 OpenGeoSys 모형에 사용된 파라미터의 분석 및 염분 침투에 대한 수정식 제안 등으로 지하수 염분 침투 연구를 발전시키고자 한다. 또한 강우-유출을 고려할 수 있는 모형 등을 고려하여 수문 인자(유출, 침투, 증발 등)를 복합적으로 해석할 수 있도록 모형을 고도화하고자 한다.

Acknowledgments

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (No. 2021R1A2C2013158).

References

- Dibaj, M., A. A. Javadi, M. Akrami, K.-Y. Ke, R. Farmani, Y.-C. Tan, and A. S. Chen. (2020). Modelling Seawater Intrusion in the Pingtung Coastal Aquifer in Taiwan, under the Influence of Sea-Level Rise and Changing Abstraction Regime. *Hydrogeology Journal*. 28: 2085-2103.
- Himiyama, Y., K. Satake, and T. Oki. (2020). *Human Geoscience*. Springer. 339p.
- Kolditz, O., S. Bauer, L. Bilke, N. Böttcher, J. O. Delfs, T. Fischer, U. J. Görke, T. Kalbacher, G. Kosakowski, C. I. McDermott, C. H. Park, F. Radu, K. Rink, H. Shao, H. B. Shao, F. Sun, Y. Y. Sun, A. K. Singh, J. Taron, M. Walther, W. Wang, N. Watanabe, Y. Wu, M. Xie, W. Xu, and B. Zehner. (2012). OpenGeoSys: An Open-Source Initiative for Numerical Simulation of Thermo-Hydro-Mechanical/Chemical (THM/C) Processes in Porous Media. *Environmental Earth Sciences*. 67: 589-599.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. (2003). Seocheon · Gunsan Area Groundwater Base Investigation Report. Daejeon: KIGAM.
- Lee, Sang Jin and Young Il Kim. (2020). Sustainable Management Policy for the Geumgang River Area. *ChungNam Report*. 374: 1-13.
- Mansour, A. Y. S., A. Baba, O. Gunduz, C. Şimşek, A. Elçi, A. Murathan, and H. Sözbilir. (2017). Modeling of Seawater Intrusion in a Coastal Aquifer of Karaburun Peninsula, Western Turkey. *Environmental Earth Sciences*. 76: 775.
- Ministry of Environment. (2023). The 4th Groundwater Basic Management Plan (2022~2031). Sejong: ME.
- Nasiri, M., H. K. Moghaddam, and M. Hamidi. (2021). Development of Multi-Criteria Decision Making Methods for Reduction of Seawater Intrusion in Coastal Aquifers Using SEAWAT Code. *Journal of Contaminant Hydrology*. 242: 103848.
- Oude Essink, G. H. P. (2001). *Density Dependent Groundwater Flow: Salt Water Intrusion*. Institute of Earth Sciences, Interfaculty Centre of Hydrology Utrecht, Utrecht University. 137p.
- Sarsak, R. F. S. (2011). Numerical Simulation of Seawater Intrusion in Response to Climate Change Impacts in North Gaza Coastal Aquifer Using SEAWAT. Master Thesis. An-Najah National University. 99p.
- Verruijt, A. (1968). A Note on the Ghyben-Herzberg Formula. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology*. 13: 43-46.

Korean References Translated from the English

- 이상진, 김영일 (2020). 금강하구역의 지속가능한 관리 정책방안. *충남리포트*. 374: 1-13.
- 한국지질자원연구원 (2003). 서천 · 군산 지역 지하수 기초조사 보고서. 대전: 한국지질자원연구원.
- 환경부 (2023). 제4차 지하수관리기본계획(2022~2031). 세종: 환경부.