

PBM (Porous Body Model) 기반의 N-S Solver를 이용한 해안대수층의 해수침투모의 Numerical Simulation on Seawater Intrusion in Coastal Aquifer using N-S Solver Based on Porous Body Model

이 우 동* / 정 영 한** / 허 동 수***

Lee, Woo-Dong / Jeong, Yeong-Han / Hur, Dong-Soo

Abstract

This study applies 3-D N-S solver based on PBM (Porous Body Model), LED-WASS-3D ver 2.0 to directly analyze non-linear interaction of seawater-freshwater-coastal aquifer in order to simulate the seawater infiltration into coastal aquifer. This numerical simulation is the first trial in Korea, as well as unusual and new numerical analysis abroad. Firstly, to validate the applied numerical model, the validity and effectiveness was verified for the numerical model by comparing and considering it with the result of laboratory experiment for seawater-freshwater interface in coastal aquifer. And then it simulated the seawater infiltration into coastal aquifer considering the changed levels of seawater and groundwater in order to analyze the distribution characteristics of flow field and seawater-freshwater interface of coastal aquifer as the level difference between seawater and groundwater and rate of seawater level ($\Delta h/h$) increased. In addition, the characteristics of seawater infiltration were analyzed from the vertical salinity in the coastal aquifer by $\Delta h/h$, which cannot be obtained from existing non-diffusion numerical models. Finally, it analyzed the effect of $\Delta h/h$ on the seawater infiltration distance in coastal aquifer, which was indexed.

Keywords : coastal aquifer, seawater intrusion, salt wedge, PBM (porous body model), 3-D N-S Solver (LES-WASS-3D)

요 지

본 연구에서는 해수-담수-해안대수층의 비선형 상호작용을 직접 해석할 있는 PBM(Porous Body Model) 기반의 3차원 N-S Solver인 LES-WASS-3D ver 2.0을 적용하며, 해안대수층의 해수침투모의를 수행하였다. 이와 같은 N-S Solver를 적용한 해안대수층의 해수침투모의는 국내 최초 수행되는 것일 뿐만 아니라, 국외적으로도 찾아보기 어려운 새로운 수치해석방법이라고 할 수 있다. 먼저 적용하는 수치모델을 검증하기 위하여 해안대수층의 해수-담수 경계면에 관한 수리모형실험결과와 비교-검토 하여 수치모델의 타당성 및 유효성을 확인하였다. 그리고 해수위 및 지하수위 변화를 고려한 해안대수층 내의 해수침투모의를 수행하여 해수위-지하수위 차와 해수위의 비($\Delta h/h$)의 증가에 따른 해안대수층 내의 유동장 그리고 해수-담수 경계면 분포 특성에 관하여 논의하였다. 또한 기존의 비확산 수치모델에서 도출할 수 없었던, $\Delta h/h$ 에 따른 해안대수층 내의 연직 염분농도로부터 해수침투 특성을 파악하였으며, 최종적으로 지표화 할 수 있는 $\Delta h/h$ 가 해안대수층 내의 해수침투거리에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 이 결과로부터 $\Delta h/h$ 가 작을수록 해안대수층 내의 해수침투가 약해지는 메커니즘을 이해할 수 있었다.

핵심용어 : 해안대수층, 해수침투, 염수짜기, 투과성 매체 모델, N-S 방정식 모델(LES-WASS-3D)

* 경상대학교 해양산업연구소 선임연구원 (e-mail: leewoodong@gnu.ac.kr)

Researcher, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

** (주) 지오시스템리서치 해양조사부 주임 (e-mail: yhjeong@GeoSR.com)

Master, Department of Oceanographic Survey, Geosystem Research Corporation, Gunpo, Korea

*** 교신저자, 경상대학교 해양토목공학과 교수 (e-mail: dshur@gnu.ac.kr, Tel: 82-55-772-9122)

Corresponding Author, Professor, Department of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

1. 서 론

지구상의 존재하는 물의 총량은 13.51억 km^3 이며, 담수의 비율 2.5%로 해수에 비해 매우 작다. 게다가 2.5%의 담수 중에 1.76%의 빙설을 제외하면, 0.009%의 지표수(하천, 호수 등)에 비해 지하수는 0.76%로서 월등한 비율을 차지한다. 그리고 지표수는 단시간에 바다로 유출되기 때문에 수자원을 확보하기 위해서는 막대한 비용을 들여 저류시설을 갖추어야 한다. 하지만 지하수는 특별한 저류시설이 없이도 유출시간이 길어 지표수에 비해 수자원으로 활용하기가 매우 유용하다.

그리고 급속한 산업발전과 인구증가로 인해 물 수요가 크게 증가하고 있는 추세이며, 지하수의 이용량 또한 계속해서 증가하고 있다. 이에 2000년도 1,078,000개소의 지하수 시설에 불과했던 것이 2011년 1,447,000개소로 대략 35% 증가하였으며, 사용량 역시 3,096 (백만 m^3 /년)에서 3,907 (백만 m^3 /년)로 크게 증가하였다. 특히 3면이 바다이고, 크고 작은 섬이 많은 지형적 특성으로 인해 해안 및 도서지역의 용수공급은 지하수에 대한 의존도가 높은 편이다. 대표적인 도서지역인 제주도는 공당 지하수 이용량이 전국 평균에 비해 몇 배가량 높을 뿐만 아니라, 단위면적당 지하수 이용량 또한 전국에서 가장 높다.

이러한 해안 및 도서지역은 용수공급에 있어서 불가결한 지하수의 사용량 증가는 지하수위를 저하시키게 되고, 이 영향으로 인해 해안대수층의 해수침투가 발생할 잠재적 위험성을 지내고 있다. 한번 해수침투가 발생하면 복구를 하는 데 막대한 비용과 시간이 소요되어, 사실상 한번 해수침투가 발생한 지역은 더 이상 식수 및 용수로 사용이 불가능해지는 악순환이 발생한다. 또한 지구온난화에 기인한 해수면 상승은 해안대수층의 해수침투를 더욱더 가속화 시킬 것이 확실하다. 이에 우리나라에서는 해수침투 관리를 위하여 1998년부터 2011년까지 전국 117개소에서 해수침투 관측 망을 설치하여 운영하고 있다. 특히 해수침투 피해가 큰 제주도에는 56개소의 관측소를 별도로 설치하여 지방정부로 이관되어 별도로 관리하고 있다.

이상과 같은 현장조사를 통한 해안대수층의 해수침투에 관한 연구들이 가장 활발히 진행되어 왔다. 국내에서는 Oh et al. (2000)과 Kim et al. (2001)은 제주도 동부지역의 관측소 자료로부터 해안대수층 지하수의 염수화에 관한 분석을 수행하였다. Kim (2009)은 부산 용호만의 조석이 해안대수층의 해수-담수 경계면에 미치는 영향을 지하수 관측공을 통해 조사하였다. Shin et al. (2002)은 전남 고금도 지역의 시추공에서 채취한 시료에서 염소이

온 등을 측정하여 해수침투범위를 산정하였다. Shim and Lee (2011)는 석모도 일대에서 장기 모니터링을 통하여 지하수위와 조석과의 관계를 분석하였다. 또한 농림수산식품부와 한국농어촌공사에서 매년 해수침투조사 보고서 그리고 한국환경정책·평가연구원에서 해안지역 지하수위 수자원 통합관리방안 연구를 통하여 해수침투 실태 및 관리방안을 검토하고 있지만, 지하수 관측망을 설치한 구역에 국한되어 중·소단위의 지하수는 관리가 힘든 실정이다. 미국에서는 연방정부와 주정부의 이원화된 효율적인 체계를 갖추고 100년 전부터 활발히 연구를 수행하고 있다. 대표적인 해수침투 지역인 플로리다는 주 전체를 5개 구역으로 나누어 각각 물 관리지구를 설치하여 관찰지역 내의 자료를 수집·조사하고 관련 연구를 수행하며, 수자원을 관리하고 있다. 하지만 국내에서는 이러한 현장조사에 의한 해수침투 관리 시스템을 구축하는 데에는 막대한 비용 및 시간이 소요되기 때문에 현실적으로 어려움이 많다.

한편 해안대수층 내에서는 상대적으로 밀도가 큰 해수가 지하수(담수) 아래에 췌기형태로 해수가 침입한다. 이러한 췌기형태는 압력경도의 평형에 의해 경계면이 유지되며, 이때의 해수-담수 사이에 Ghyben-Herzberg의 법칙이 성립되며, 해안대수층의 해수-담수 경계면을 근사하는데 널리 이용되고 있다. 그 밖의 해수-담수면의 근사방법들은 위치흐름 분석법에 근거한 이론식(Glover, 1959), 호도그래프를 적용한 이론식(Henry, 1959) 그리고 위치흐름 분석법을 이용한 Strack (1976)의 근사법 등이 있다. 이러한 이론식은 연직방향의 흐름과 해수와 담수가 만나는 복잡한 천이영역을 해석하기에는 무리가 있으므로 해안대수층의 해수침투 예측에 있어서 오류를 범할 가능성이 매우 높다고 할 수 있다.

최근에는 실험기기의 발달과 실험기술의 향상으로 정밀한 측정이 가능해짐에 따라 해안대수층의 해수침투에 관한 수리모형실험이 활발히 진행되고 있다. 국내에는 Park et al. (2009)이 해안대수층 내의 담수-염수 경계면 형성특성에 관하여 기존 근사식과 실험결과를 비교·분석하여 나타내었다. Suh et al. (2010)은 양수 시에 담수-염수 경계면 변화에 대한 고찰을 통하여 최대 및 최적 양수량을 추정하였다. 국외에서는 Goswami and Clement (2007)는 안정상태의 해수-담수 경계면에서 지하수위 조절에 따른 경계면의 변화특성을 고찰하였다. Lu et al. (2013)은 투수층의 매질의 종류 및 입도분포에 따른 해수침투특성에 대해 논의하였다. 이와 같은 실험적 연구들은 해안대수층의 해수침투특성을 이해하는 데 크게 기여하고 있다. 하지만 거의 대부분의 실험이 소규모의 모래수조에서 이루어지

고 있기 때문에 실제 현장에서 발생하는 해수침투 현상을 파악 및 예측을 수행하기에는 미흡한 점이 많다.

1990년대에 접어들면서 컴퓨터 성능의 비약적인 발전과 여러 가지 수치해석방법이 제안됨에 따라 이론적 해석 및 수리모형실험에서 검토하기 어려웠던 부분들의 분석이 가능해짐에 따라 해안대수층의 해수침투특성을 밝히는 하나의 접근방법으로 자리매김하고 있다. 대표적인 국내연구로는 Park (1995)은 DSTRAM 확산모델을 사용하여 대수층 내의 정상 해수-담수 경계면 및 염분확산에 영향을 미치는 유속과 확산지수에 관한 분석을 수행하였다. Shim and Chung (2003)은 SHARP모델을 이용하여 해안대수층의 해수-담수 경계면을 모사하고, 분석결과로부터 해수침투모사의 한계성에 대하여 논의하였다. Kim et al. (2004)은 MODFLOW모델을 이용하여 해안대수층의 지하수-지표수 연계에 관한 분석을 실시하였다. Hong et al. (2009)은 해안대수층 내의 염수뺀기를 제어하기 위한 인공주입에 관한 단면 2차원 수치실험을 수행하였다. 국외에서는 과거부터 많은 연구가 수행되었다. Jung et al. (2014)은 비확산 수치모델을 이용한 이중 양수법에 의한 해수침투 저감효과에 관한 수치적인 검토를 수행하였다. Bear et al. (1999)은 해수침투 피해사례로부터 해안대수층 내의 해수침투에 관한 기본개념 및 위험성을 경고하였을 뿐만 아니라, 정립되어 있지 않던 해수침투해석방법에 관하여 통합을 추진하였다. Barlow (2003)는 미국 대서양 연안의 해수침투 현황 및 관리 시스템에 관하여 논의하고 있다. Werner and Simmons (2009)는 IPCC 보고서에 따른 해수면 상승에 따른 해안대수층 내의 해수침투의 위험성에 대하여 나타내었다. Ataie-Ashtiani et al. (1999)은 SUTRA모델을 이용하여 조석영향을 고려한 해수-담수 경계면의 변화에 관하여 논의하였다. Oude Essink (2001)는 MOC3D (Konikow et al., 1996)를 활용하여 네덜란드의 북부에 해안 지하수 시스템에 조사하였다. Wood and Harrington (2015)은 계절변화에 따른 해수면변동이 해수침투에 미치는 영향을 해석하였다. 하지만 이 수치모델들은 해안대수층이라는 투수층 매체의 특성을 투수계수에 의존하고 있어 해안대수층 내의 유동특성을 수치적으로 나타내기에는 어려움이 존재한다. 또한 대부분의 해수침투모사가 비확산 모델에 의해 이루어지고 있기 때문에 해안대수층 내의 염분농도를 추정하기에 무리가 있다.

이상과 같이 다양한 방법(현장조사, 근사식, 실험, 수치해석 등)을 통하여 해안대수층의 해수침투에 관한 연구들이 많은 분야에서 많이 수행되고 있으나, 아직까지 여러 가지 문제점을 내재하고 있는 것은 엄연한 사실이다. 따

라서 본 연구에서는 수치적인 접근방법에서 아직까지 해안대수층 내의 유동현상분석에 투수계수를 이용하는 방법에서 탈피하여 투수성 매체의 특성(입경, 공극, 형상 등)을 고려할 수 있는 PBM(Porous Body Model) 기반의 3차원 N-S Solver (LES-WASS-3D ver 2.0; Lee and Hur, 2014)를 적용하여 해수침투모의를 수행한다. 먼저 기존 실험결과(Park et al., 2009) 및 수치실험결과(Shim and Chung, 2003)와의 비교·분석을 통하여 적용하는 LES-WASS-3D의 타당성 및 유효성을 확인한다. 그리고 해수-지하수위차에 따른 해안대수층 내의 유동장, 지하수위분포, 해수-담수 경계면, 연직염분농도분포, 해수침투거리 등으로부터 N-S Solver의 적용성을 확인함과 더불어 해수침투특성을 분석하는 것을 본 연구의 목적으로 한다.

2. 수치모델의 개요

본 연구에서는 해안대수층의 해수침투모의를 위하여 염분과 온도차에 의한 밀도류를 직접 해석할 수 있는 3차원 N-S Solver (LES-WASS-3D ver. 2.0; Lee and Hur, 2014)를 이용한다. LES-WASS-3D ver. 2.0은 기존의 3차원 파동장 모델(LES-WASS-3D Ver. 1.0; Hur et al., 2012)을 토대로 밀도류를 해석할 수 있게 새롭게 개발되었다. 이 LES-WASS-3D ver 2.0은 PBM(porous body model)을 기반의 3차원 수치모델로서 유체-구조물-지반의 비선형 상호간섭을 수치적으로 해석할 수 있을 뿐만 아니라, 물의 밀도와 동점성계수에 관한 상태방정식(Gill, 1982; Riley and Skirrow, 1965) 및 3차원 이류-확산 방정식을 도입하여 온도 및 염분의 이류-확산을 정량/정성적으로 추정할 수 있다. 난류재현을 위해 LES (Large Eddy Simulation)기법의 와동점성모델(Smagorinsky, 1963)의 취약점을 보완하기 위하여 Germano et al. (1991)과 Lilly (1991)가 제안한 동적 와동점성모델을 적용하고 있다. 자유수면의 표면장력을 수치적으로 고려할 수 있는 CSF(Continuum Surface Force)모델(Brackbill et al., 1992)을 적용하였다.

또한 Lee and Hur (2014)에서는 개발한 LES-WASS-3D ver. 2.0을 검증하기 위하여 담수 내를 이류-확산하는 해수의 형상 그리고 해수-담수 상호간섭에 의한 연직염분농도에 수리모형실험결과와의 비교·분석하였다. 그 결과 수치해석결과가 높은 정도로 실험결과를 재현하였다.

2.1 지배방정식

기초방정식은 3차원 비압축성·점성유체에서 무반사로 파랑과 흐름을 발생시키기 위한 소스항이 포함된 연속방

정식 (1) 그리고 PBM(Porous Body Model) 기반에 의해 수정된 Navier-Stokes 운동방정식 (2)로 구성된다.

$$\frac{\partial(\gamma_i v_i)}{\partial x_i} = q^* \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\gamma_v v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_i v_i v_j)}{\partial x_j} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(\gamma_i \nu_T D_{ij})}{\partial x_j} + S_i - Q_i - R_i - \gamma_v g_i - D_i \quad (2)$$

여기서 v_i 는 x, y, z 방향의 유속, q^* 는 파랑/흐름소스의 유량밀도, γ_v 는 투과매체의 체적 공극률, γ_i 는 투과매체의 x, y, z 방향의 면적 공극률, t 는 계산시간, ρ 는 물의 밀도, p 는 압력, ν_T 는 물의 동점성계수(ν)와 와동점성계수(ν_t)의 합을 의미한다. $D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$ 는 변형률속도텐서, S_i 는 CSF모델의 표면장력항, Q_i 는 파랑/흐름의 소스항, R_i 는 투과매체에 의한 유체저항항, g_i 는 중력가속도항, D_i 는 부가감쇠영역의 에너지 감쇠항을 나타낸다.

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \gamma_i \frac{\partial v_i F}{\partial x_i} = F q^* \quad (3)$$

VOF함수 F 는 각 격자에서 물이 차지하고 있는 체적비로서 연속방정식 (1)에 비압축성 유체에 대한 가정과 PBM (porous body model)에 기초한 VOF 함수를 고려하여 유체의 보존형식으로 나타내면 Eq. (3)과 같다.

2.2 상태방정식

2.2.1 밀도에 관한 상태방정식

밀도류를 해석하기 위해서는 물의 정확한 밀도산정이

무엇보다 중요하다. LES-WASS-3D ver 2.0에서는 Gill (1982)의 수온과 염분에 따른 물의 밀도산정식 (4)를 적용하고 있다. Eq. (4)에서 ρ_0 는 4°C 물의 밀도이며, Eq. (5)의 $\Delta\rho_T$ 는 수온변화에 따른 밀도의 증분, Eq. (6)의 $\Delta\rho_S$ 는 염분변화에 따른 밀도의 증분을 나타낸다. 그리고 밀도산정에 이용되는 경험상수들은 Table 1과 같다.

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho_T + \Delta\rho_S \quad (4)$$

$$\Delta\rho_T = a_1 T - a_2 T^2 + a_3 T^3 - a_4 T^4 + a_5 T^5 \quad (5)$$

$$\Delta\rho_S = (a_6 - a_7 T + a_8 T^2 - a_9 T^3 + a_{10} T^4) S + (-a_{11} + a_{12} T - a_{13} T^2) S^{3/2} + a_{14} S^2 \quad (6)$$

여기서, T 는 수온, S 는 염분이며, 온도의 단위는 [°C]이고, 염분의 단위는 [psu]이다.

2.2.2 동점성계수에 관한 상태방정식

Navier-Stokes 운동방정식 (2)에 대입되는 물의 동점성계수(ν)는 Eq. (7)과 같다. 여기서 물의 밀도(ρ)는 Eq. (4)에서 산정한 값을 적용하고, 유체의 점성계수(μ)는 Riley and Skirrow (1965)이 제안한 염분과 온도를 고려할 수 있는 Eq. (8)을 이용한다. Eq. (8)의 μ_0 는 4°C 물의 점성계수이며, Eq. (9)의 $\Delta\mu_T$ 는 수온변화에 따른 점성계수의 증분, Eq. (10)의 $\Delta\mu_S$ 는 염분변화에 따른 점성계수의 증분이다. 그리고 물의 점성계수에 이용되는 경험상수들은 Table 2와 같다.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (7)$$

$$\mu = \mu_0 + \Delta\mu_T + \Delta\mu_S \quad (8)$$

Table 1. The Coefficients for Density Estimation

$\rho_0 = 9.99842594 \times 10^{-1} [g/cm^3]$	$a_5 = 6.536332 \times 10^{-12}$	$a_{10} = 5.3875 \times 10^{-12}$
$a_1 = 6.793952 \times 10^{-5}$	$a_6 = 8.24493 \times 10^{-4}$	$a_{11} = 5.72466 \times 10^{-6}$
$a_2 = 9.09529 \times 10^{-6}$	$a_7 = 4.0899 \times 10^{-6}$	$a_{12} = 1.0227 \times 10^{-7}$
$a_3 = 1.001685 \times 10^{-7}$	$a_8 = 7.6438 \times 10^{-8}$	$a_{13} = 1.6546 \times 10^{-9}$
$a_4 = 1.120083 \times 10^{-9}$	$a_9 = 8.2467 \times 10^{-10}$	$a_{14} = 4.8314 \times 10^{-7}$

Table 2. The Coefficients for Viscosity Estimation

$\mu_0 = 1.802863 \times 10^{-2} [g/cm \cdot s]$	$b_2 = 1.31419 \times 10^{-5}$	$b_4 = 2.15123 \times 10^{-5}$
$b_1 = 6.1086 \times 10^{-4}$	$b_3 = 1.35576 \times 10^{-7}$	$b_5 = 3.59406 \times 10^{-10}$

$$\Delta\mu_T = -b_1 T + b_2 T^2 - a_3 T^3 \quad (9)$$

$$\Delta\mu_S = b_4 S + b_5 S^2 \quad (10)$$

2.3 이류-확산 방정식

전술한 물의 밀도(ρ)와 동점성계수(ν)를 정확하게 추정하기 위해서는 밀도와 동점성계수에 영향을 미치는 인자(염분, 온도)의 정량적 산정이 무엇보다 중요하다. 따라서 LES-WASS-3D ver 2.0에서는 온도와 염분에 관한 3차원 이류-확산방정식 (11) and (12)를 도입하였다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial S}{\partial z} \right)$$

$$D_h = \nu_t \quad (13)$$

$$D_v = \frac{\nu_t}{\sigma_c} \quad (14)$$

여기서, D_h 은 수평방향의 확산계수, D_v 은 연직방향의 확산계수로서 Eqs. (13) and (14)와 같다. 그리고 ν_t 는 난류모델에서 구해진 와동점성계수, σ_c 는 Prandtl/Schmidt수이며, 본 연구에서는 연구실의 실험결과(Mellor and Yamada, 1982) 및 해양 관측결과(Gregg et al., 1986; Peters et al., 1988)로부터 추정된 1.0을 사용한다.

2.4 투과성 매체의 유체저항

PBM(Porous Body Model)의 토대가 되는 투과매체에

의한 유체저항(R_i)은 Eq. (15)와 같이 층류저항, 난류저항 그리고 관성저항으로 구분된다. 본 연구에서는 층류저항은 Liu and Masliyah (1999), 난류저항은 Ergun (1952) 그리고 관성저항은 Sakakiyama and Kajima (1992)가 제안한 실험식을 사용하고 있다.

$$R_i = a_p V_i + b_p V_i |V_i| + c_p \frac{\partial V_i}{\partial t} \quad (15)$$

$$a_p = C_L \frac{\nu_f}{D_{50}^2} \frac{(1-\gamma_i)^2}{\gamma_i} \quad (16)$$

$$b_p = C_T \frac{1}{2} \frac{(1-\gamma_i)}{D_{50} \gamma_i} \quad (17)$$

$$c_p = C_I (1-\gamma_i) \quad (18)$$

여기서, D_{50} 는 투과성 구조물의 평균입경, C_L 은 층류저항계수, C_T 는 난류저항계수 그리고 C_I 는 관성저항계수를 의미한다. 그리고 해수침투모의에서는 $C_L = 2.5$, $C_T = 0.8$ 와 $C_I = 1.5$ 를 사용한다.

그리고 LES-WASS-3D ver. 2.0에 관한 상세한 수치해석방법에 대해서는 Lee and Hur (2014)를 참고할 수 있다.

3. 수치모델의 검증

본 연구에서는 해수침투모의에 앞서 이용하는 N-S Solver (LES-WASS-3D ver 2.0; Lee and Hur, 2014)의 타당성과 유효성을 확인하기 위하여 해수침투에 관한 수리모형 실험(Park et al., 2009) 및 수치실험(Shim and Chung, 2003)의 결과와 비교·분석한다.

3.1 해수침투에 관한 수리모형실험

Fig. 1의 같은 수치수조는 Park et al. (2009)의 수리모형실험에 근거한 것으로 수치수조의 교란을 방지하기 위

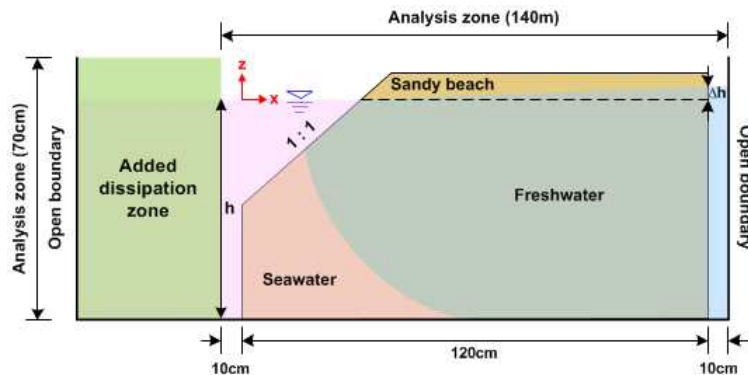


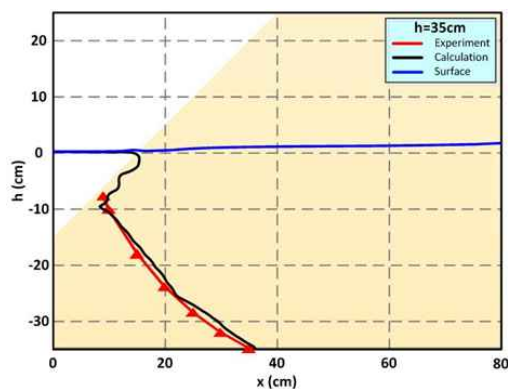
Fig. 1. Definition Sketch of Numerical Water Tank Based on the Experiments by Park et al. (2009)

해 경계에는 개경계조건(open boundary) 그리고 해수영역 끝에는 부가감쇠영역을 설치한다. 그리고 해석영역에는 평균입경(D_{50}) 0.2cm , 체적 공극률(γ_v) 0.378 의 모래를 1:1 경사로 설치하여 해안대수층을 구성한다.

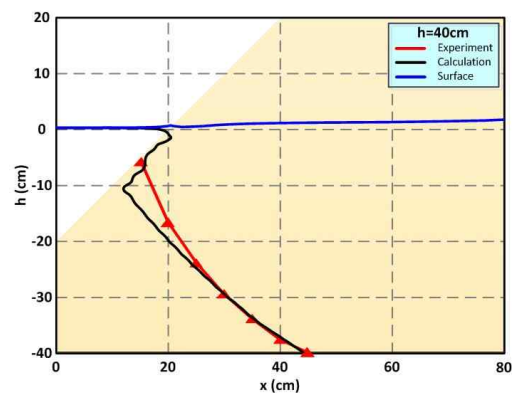
해석영역의 바다 측에는 염분농도 35psu 의 해수, 해안대수층 내의 지하수는 담수를 고려함과 동시에 해수위-지하수위 차(Δh)에 따른 해수-담수 경계면을 모의한다. 여기서 이용된 수치해석 조건은 Table 3과 같고, 수치수조의 격자크기는 $\Delta x = 0.5\text{cm}$, $\Delta y = 0.5\text{cm}$, $\Delta z = 0.25\text{cm}$ 이며, $\Delta t = 1/500\text{sec}$ 의 시간간격으로 시뮬레이션 한다.

Table 3. Incident Conditions of Numerical Simulation Used for Verification

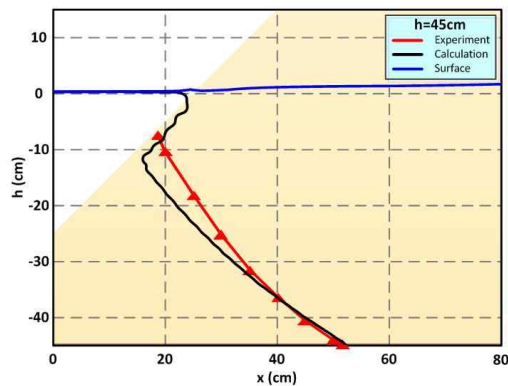
Test	$h(\text{cm})$	$\Delta h(\text{cm})$
1	35	2.16
2	40	2.42
3	45	2.54
4	50	2.64



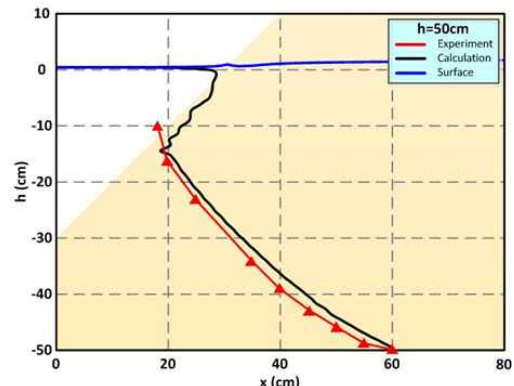
(a) Test-1 ($h = 35\text{cm}$)



(b) Test-2 ($h = 40\text{cm}$)



(c) Test-3 ($h = 45\text{cm}$)



(d) Test-4 ($h = 50\text{cm}$)

Fig. 2. Comparison between the Measured (Park et al., 2009) and the Calculated Interface between Saltwater and Freshwater

Fig. 2는 해안대수층 내의 해수-담수 경계면을 비교한 것으로 Park et al. (2009)의 실험결과는 빨간색 삼각형(\blacktriangle)이고, LES-WASS-3D ver 2.0을 적용한 계산결과는 검정색 실선(—)이다. 여기서 (a)는 Test-1, (b)는 Test-2, (c)는 Test-3 그리고 (d)는 Test-4의 경우로서 수심은 각각 35cm , 40cm , 45cm 그리고 50cm 이다.

Fig. 2로부터 수심이 깊어질수록 해수-담수의 압력 평형지점이 해안대수층 내부로 이동함에 따라 해수침투거리가 길어지는 특성을 잘 나타내며, 전반적으로 본 연구의 계산결과가 저면의 해수침투거리, 해수-담수 경계면의 기울기 등을 잘 재현하고 있다.

3.2 해수침투에 관한 수치실험

Fig. 3은 Shim and Chung (2003)이 SUTRA 모델을 이용하여 부산 동남해안을 대상으로 수행한 수치실험을 기반으로 구성된 수치수조이다. 해석영역에는 1000m 의 육지와 100m 의 바다로 나누어지고, 양측에는 개경계조건(open boundary)을 설치한다.

Shim and Chung (2003)이 SUTRA 모델에 적용한 입

사조건은 Table 4와 같으며, 해수위(h)는 100m, 해수와 지하수의 동수경사는 5월에는 0.006, 7월에는 0.008이다. 그리고 본 검증에서는 $1.025g/cm^3$ 의 해수 밀도를 고려하기 위하여 32psu의 염분을 고려하고, 지반조건은 평균입경(D_{50}) 0.1mm, 체적 공극률(γ_v) 0.15를 적용하였다. 그리고 수치수조의 격자크기는 $\Delta x = 5m$, $\Delta y = 5m$, $\Delta z = 2m$ 이며, $\Delta t = 1/10sec$ 의 시간간격으로 시뮬레이션을 수행한다.

한편 SUTRA는 미국 지질조사소(USGS; United States

Table 4. Seasonal Depth Conditions

Month	h (m)	Δh (m)
May	100	0.06
July		0.08

Geological Survey)에서 개발된 단일 경계면을 고려할 수 있는 준3차원 유동해석모델이다. 이 모델은 해안대수층 내의 해수-담수 경계면의 모사 및 유동해석이 가능하다.

Fig. 4는 중앙단면($y = 0m$)에서 정상상태의 해수-담수 경계면 및 유동장을 나타낸 것이다. 여기서 빨간색 원(○)은 Shim and Chung (2003)이 SUTRA 모델을 적용하여 산정한 해수-담수 경계면이고, 색으로 구분되는 경계면은 N-S Solver를 이용하여 추정한 경계면이다.

Fig. 4로부터 상대적으로 동수경사가 작은 5월의 경우가 동수경사가 큰 7월의 경우에 비해 해수침투거리가 짧고, 해수-담수 경계면의 기울기가 완만한 것을 확인할 수 있다. 그리고 N-S Solver (LES-WASS-3D ver. 2.0)의 결과가 기존 수치모델(SUTRA)의 결과와 매우 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

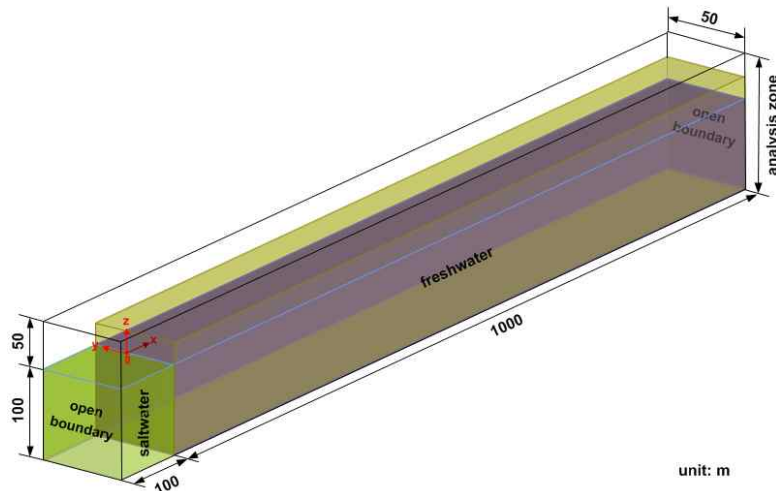


Fig. 3. Definition Sketch of 3-d Numerical Water Tank Based on the SUTRA Simulation by Shim and Chung (2003)

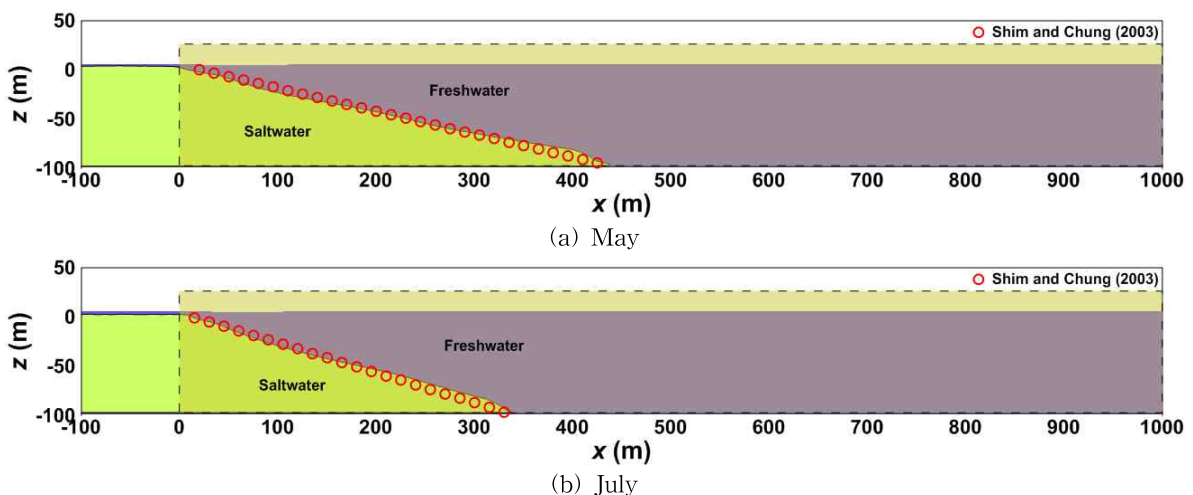


Fig. 4. Comparison of the Salt-freshwater Interfaces for Arrested Salt Wedge in Underground

이상의 수리모형실험 및 수치실험과의 비교·분석결과에 근거하여 해안대수층 내의 해수침투모의에 있어서 새롭게 적용하는 3차원 N-S Solver 수치모델의 타당성과 유효성이 검증되었다고 판단되며, 본 연구에서는 LES-WASS-3D ver. 2.0을 이용하여 해안대수층 내의 해수침투모의를 수행한다.

4. 해수침투모의

4.1 수치실험의 개요

해안대수층에서 수심(h) 및 해수위-지하수위 차(Δh)에 따른 해안대수층 내의 해수침투특성을 파악하기 위하여 Fig. 5와 같은 수치수조를 구성한다. 수위차에 의해 발생하는 흐름의 재반사 및 수치수조의 교란을 방지하기 위하여 수치수조의 바다 측에는 부가감쇠영역 그리고 양단에는 개경계조건(open boundary)을 고려한다. 해석영역에는 해안대수층을 고려하기 위해 평균입경(D_{50}) 0.2cm, 체적 공극률(γ_v) 0.4, 경사 1:5의 투과성 해빈을 설치한다. 여기서 해수의 염분농도 35psu 그리고 해안대수층 내부의 지하수는 담수를 적용한다.

해수침투모의에 이용된 초기조건은 Table 5와 같으며,

Table 5. Initial Conditions for Simulations of Seawater Infiltration

Total	h (m)	Δh (m)	$\Delta h/h$
54	4 ~ 8	0 ~ 0.5	0 ~ 0.125

수심은 4 ~ 8m로서 0.5m 간격으로 9가지 그리고 지하수위를 변화시켜 해수위-지하수위의 차(Δh)를 0 ~ 0.5m 범위에서 0.1m 간격으로 6가지의 조건을 고려한다. 따라서 본 해수침투모의에서 적용한 입사조건은 총 54가지 경우($\Delta h/h = 0 \sim 0.125$)가 된다. 그리고 수치수조의 격자크기는 $\Delta x = 1m$, $\Delta y = 1m$, $\Delta z = 0.25m$ 이며, $\Delta t = 1/100sec$ 의 시간간격으로 해수침투모의를 수행한다.

4.2 해안대수층의 유동장 및 해수-담수 경계면 분포 특성

Fig. 6은 수심(h) 6m의 경우에서 해수위-지하수위 차(Δh)에 따른 압력 평형상태의 해수-담수 경계면, 평균유속 그리고 평균 지하수위의 공간분포를 나타낸 것으로 빨간색 실선(—)은 해수-담수 경계면, 백터는 평균유속, 파란색 실선(—)은 평균 지하수위이다. 여기서 (a)는 Δh 가 0인 경우 그리고 (b)-(f)는 $\Delta h/h$ 가 각각 0.017, 0.033, 0.05, 0.067, 0.083의 경우이다.

Fig. 6으로부터 해안대수층 내에서 상대적으로 밀도가 큰 해수가 지하수(담수) 아래로 췌기형태로 침투하고, 수위차에 의해 발생한 지하수 흐름은 상대적으로 밀도가 작기 때문에 해빈의 수면부근으로 빠져나간다. 이와 같은 경향은 Δh 가 커질수록, 해수침투 유속은 작아지고, 유출되는 지하수(담수)의 유속은 커진다.

또한 Δh 가 0인 (a)의 경우에서는 해안대수층 내의 수위가 동일하기 때문에 압력 평형점이 존재하지 않는다. 따라서 (a)는 해수가 담수 아래로 침투하여 층이 이루어질 때까지 해수가 계속 침투 진행되고 있는 상황을 나타

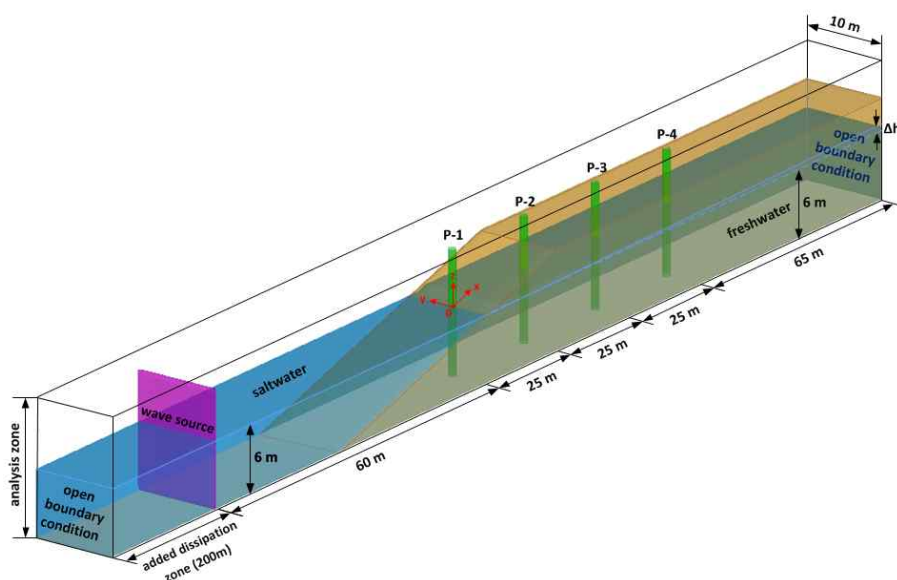


Fig. 5. Definition Sketch of Numerical Water Tank for Simulation on Seawater Intrusion in Coastal Aquifer

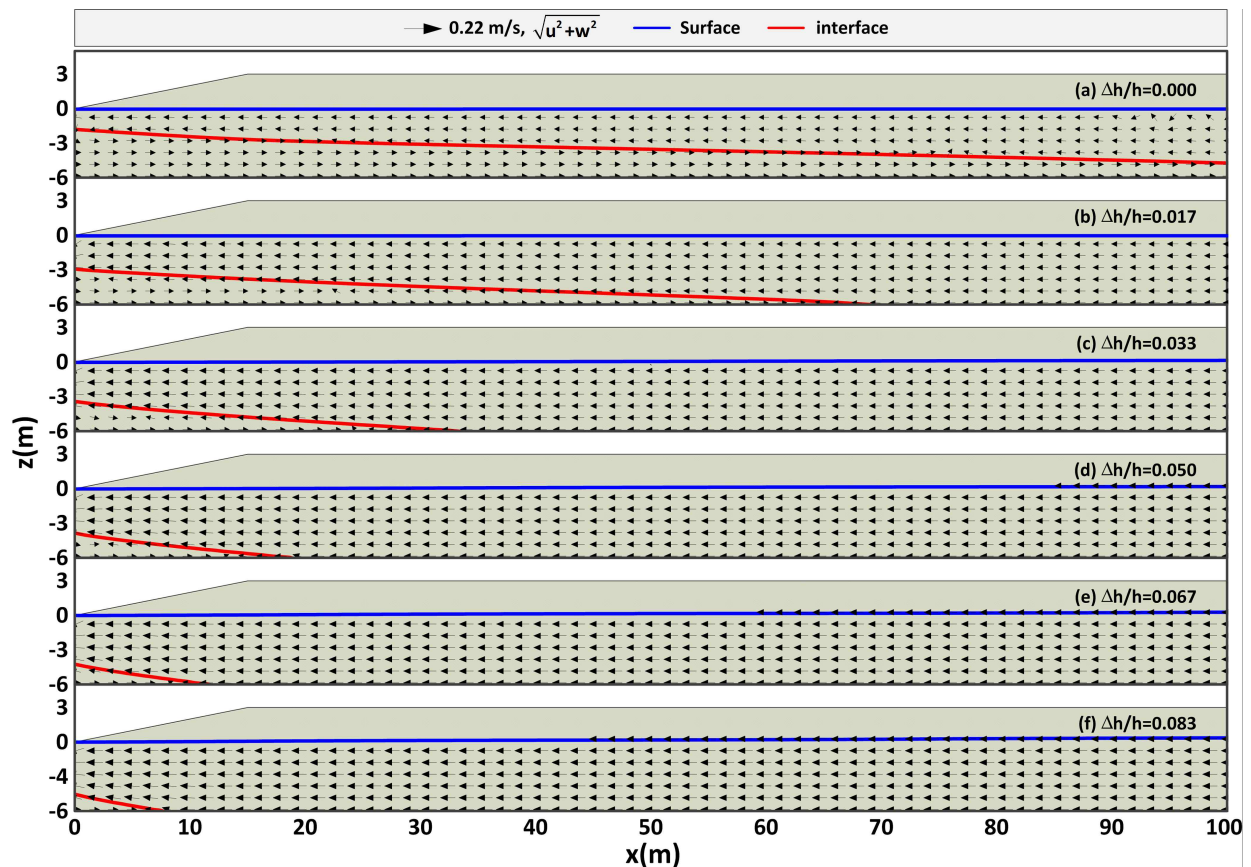


Fig. 6. Spatial Distributions of Equilibrium Saltwater Wedge, Mean Flow and Mean Surface Due to Differences of Elevation between Saltwater and Freshwater

내고 있다. 반면에 Δh 가 있는 (b)-(d)의 경우에는 해안 대수층 내의 수위가 내륙($x = 100m$)에서 정선($x = 0m$)까지 거의 선형적 분포를 나타낸다. 이에 Δh 가 커질수록 압력 평형지점이 정선 측으로 이동함으로 인하여 해수-담수 경계면이 해안대수층 내의 바다 쪽으로 밀려나는 경향을 나타낸다.

이와 같이 지하수위의 변화는 해안대수층으로 침투하는 해수에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 지하수위 변화가 가장 큰 홍수기와 갈수기에 대한 해안대수층 내의 해수침투 정도를 예측하여 적절한 대응이 필요할 것으로 판단된다. 또한 무분별한 지하수 남용이 Δh 를 줄일 수 있기 때문에 해안 및 도서지역의 효율적인 취수시스템이 갖춰 주어야 할 것이다.

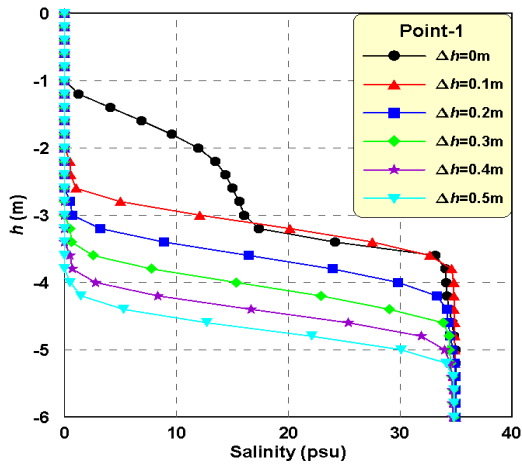
4.3 지하수의 연직 염분농도분포

Fig. 7은 대표적인 수심(h) 6m의 경우에 대하여 해안 대수층 내의 연직염분농도를 나타내며, 측정지점은 Fig. 3에 나타난 것과 같이 P-1지점은 정선 그리고 P-2, P-3, P-4의 간격은 25m로서 정선으로부터 각각 25m, 50m

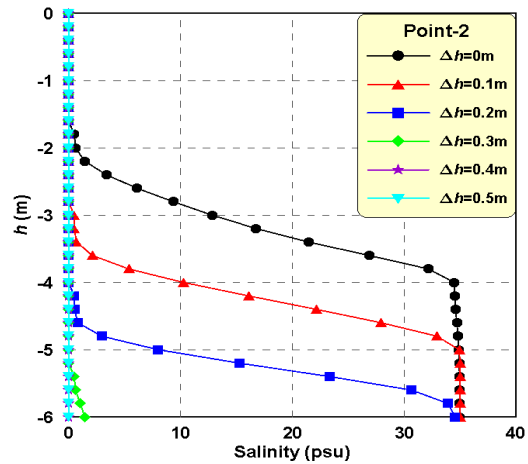
그리고 75m 떨어진 지점이다. 여기서 검정색 원(●)는 해수위-지하수위 차가 없는 경우($\Delta h = 0m$) 그리고 나머지 부호(▲, ■, ◆, ☆, ▼)는 해수위-지하수위의 차(Δh)가 있는 경우이며, 각각의 초기수위조건은 $\Delta h = 0.1m$ ($\Delta h/h = 0.017$), $\Delta h = 0.2m$ ($\Delta h/h = 0.033$), $\Delta h = 0.3m$ ($\Delta h/h = 0.05$), $\Delta h = 0.4m$ ($\Delta h/h = 0.067$), $\Delta h = 0.5m$ ($\Delta h/h = 0.083$)이다.

Fig. 7(a)로부터 정선에 해당하는 P-1지점에서는 Δh 가 작을수록 지하수의 염분농도의 급변지점이 정수면에 가깝게 위치하는 것을 확인할 수 있다. 내륙으로 들어갈수록(b)→(c)→(d) 연직염분농도가 작아질 뿐만 아니라, Δh 가 큰 경우에는 해수침투거리가 짧아 지하수에서 염분이 검출되지 않는다.

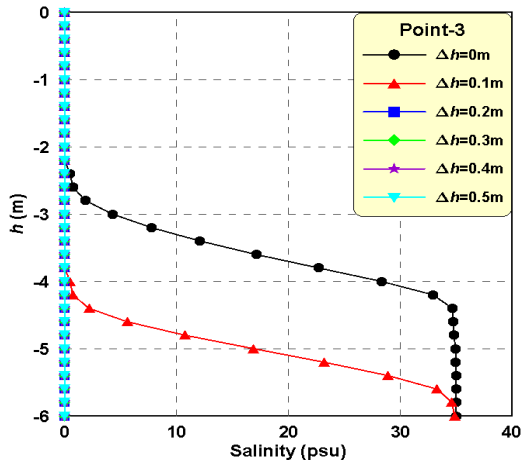
이상의 결과로부터 기존의 비확산 수치모델을 이용한 해수침투 계산결과에서는 얻을 수 없었던 이와 같은 연속적인 연직염분농도를 확인할 수 있다. 따라서 이러한 연직분포를 이용한다면 해안 및 도서지역에서 지하수 활용에 있어서 관정의 위치 및 깊이 그리고 최대/적정 양수량 등을 추정하는데 유용하게 활용될 수 있을 것이다.



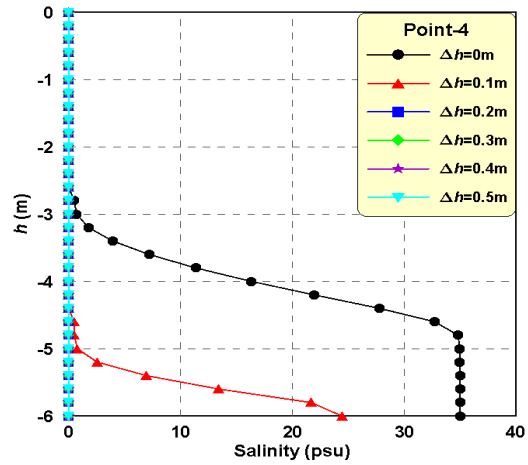
(a) Point-1 ($x = 0m$)



(b) Point-2 ($x = 25m$)



(c) Point-3 ($x = 50m$)



(d) Point-4 ($x = 75m$)

Fig. 7. Vertical Distributions of Equilibrium Salinity Due to Variation of Water Elevation Difference (Δh)

4.4 해수침투거리 특성

Fig. 8은 Table 4에 나타난 모든 초기수위조건에서 해수위-지하수 차가 0인 경우를 제외한 총 45가지 조건에 대한 계산결과를 나타내고 있으며, 그래프의 분포곡선은 Δh 에 따른 해안대수층의 해수침투거리(I_L)이다. 여기서 빨강색 삼각형(\blacktriangle)은 $\Delta h = 0.1m$ ($\Delta h/h = 0.017$)의 경우, 파란색 사각형(\blacksquare)은 $\Delta h = 0.2m$ ($\Delta h/h = 0.033$)의 경우, 연두색 마름모(\blacklozenge)는 $\Delta h = 0.3m$ ($\Delta h/h = 0.05$) 보라색 별모양(\blackstar)은 $\Delta h = 0.4m$ ($\Delta h/h = 0.067$)의 경우 그리고 민트색 역삼각형(\blacktriangledown)은 $\Delta h = 0.5m$ ($\Delta h/h = 0.083$)의 경우이다.

Fig. 8부터 전반적으로 Δh 가 작아질수록 해수와 담수의 압력 평행지점이 해안대수층 내에서 내륙으로 이동하기 때문에 해수침투거리가 증가하는 경향을 나타낸다. 그리고 Δh 가 작을수록 수심의 영향을 크게 받아 해수침투

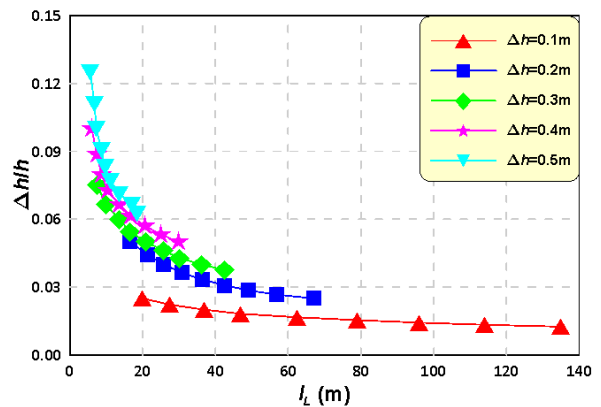


Fig. 8. Seawater Intrusion Distance (I_L) Due to Difference of Elevation between Saltwater and Freshwater

거리 분포곡선이 완만해진다. 반면에 Δh 가 커질수록 수심에 의한 침투거리의 변화가 작기 때문에 해수침투거리

분포곡선이 급해지는 경향을 나타낸다. 이와 같이 2차 포물선 형태를 띠고 있는 해수침투거리 분포곡선을 적절히 활용한다면, 본 해수침투모의와 유사한 조건의 현장에서 침투거리를 추정하는데 하나의 중요한 지표로 활용될 수 있다. 향후 이러한 결과를 이용하여 해수침투 대응방안에 대한 검토를 수행해 나갈 예정이다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 해안대수층의 해수침투 특성을 PBM (Porous Body Model) 기반의 N-S Solver인 3차원 수치모델 LES-WASS-3D ver. 2.0 (Lee and Hur, 2014)를 적용하여 수치적으로 분석하였다. 그리고 기존의 수리모형실험(Park et al., 2009) 및 수치실험(Shim and Chung, 2003)의 결과와 비교·검토하여 해안대수층의 해수침투모의에 적용하는 LES-WASS-3D의 타당성 및 유효성을 확인하였다. 해안대수층의 해수침투모의에서는 해수위-지하수위의 차(Δh)에 따른 해안대수층의 유동 그리고 해수-담수 경계면의 분포 특성에 대하여 논의하였다. 또한 기존의 비확산 수치모의에서는 도출할 수 없었던 해안대수층의 연직염분농도의 분포특성을 수치적으로 조사하였다. 나아가 $\Delta h/h$ 에 따른 해안대수층 내의 해수침투거리를 나타내었으며, 이로부터 얻어진 주요한 결론을 아래와 같이 기술한다.

국내에서는 최초로 PBM (Porous Body Model) 기반의 N-S Solver를 적용한 해안대수층의 해수침투모의를 수행하였으며, 수치모델의 적합성을 확인하였다.

기존의 수리모형실험결과(Park et al., 2009) 및 수치실험결과(Shim and Chung, 2003)와의 비교·검토하여 적용한 수치모델 N-S Solver (LES-WASS-3D)의 타당성 및 유효성을 검증하였다.

해안대수층 내에서는 상대적으로 밀도가 큰 해수가 지하수(담수) 아래로 췌기형태로 침투하고, Δh 에 의해 발생한 지하수 흐름은 상대적으로 밀도가 작기 때문에 해면의 수면부근으로 유출되는 것을 확인할 수 있었다.

$\Delta h/h$ 가 커질수록 압력경도의 평형지점이 바다 측으로 이동하기 때문에 해수-담수 경계면이 전체적으로 바다 쪽으로 이동하는 경향을 나타내었다.

기존의 비확산 수치모델에서는 파악할 수 없었던, 해안대수층 내의 연직염분농도로부터 해수침투에 따른 염분농도 특성을 조사·분석하였다.

$\Delta h/h$ 에 따른 해안대수층의 해수침투거리 분포는 2차 포물선의 형태를 가지며, $\Delta h/h$ 가 증가할수록 해수침투

거리는 크게 감소하였다. 그리고 해수침투거리는 $\Delta h/h$ 가 작을수록 수심의 영향을 크게 받는 것을 알 수 있었다.

이상의 결과는 특정한 해석조건에 대한 결과이기는 하지만, 유사한 현장조건에서 해수침투에 대한 지표로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 본 연구에서 국내 최초로 적용한 N-S Solver는 해안대수층의 해수침투모의에 있어서 하나의 해석도구로 자리매김할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이다(NRF-2015R1D1A4A01020046).

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2013-0549).

References

- Ataie-Ashtiani, B., Volker, R.E., and Lockington, D.A. (1999). "Tidal effects on sea water intrusion in unconfined aquifers." *Journal of Hydrology*, Vol. 216, pp. 17-31.
- Barlow, P.M. (2003). "Groundwater in freshwater-salt-water environments of the Atlantic coast." USGS Circular 1262.
- Bear, J., Cheng, A.H.-D., Sorek, S., Ouazar, D., and Herrera, I. (1999). "Seawater intrusion in coastal aquifers - concepts, methods, and practices. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 625 p.
- Brackbill, J.U., Kothe, D.B., and Zemach, C. (1992). "A continuum model for modeling surface tension." *J. Comp. Phys.*, Vol. 100, pp. 335-354.
- Ergun, S. (1952). "Fluid flow through packed columns." *Chemical Eng.*, Vol. 48, No. 2, pp. 89-94.
- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., and Cabot, W.H. (1991). "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model." *Physics of Fluids*, Vol. 3, pp. 1760-1765.
- Gill, A.E. (1982). "Atmosphere-ocean dynamics." New York, Academic Press.
- Glover, R.E. (1959). "The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer." *Journal of Geophysical Research*,

- Vol. 64, No. 4, pp.457-459.
- Goswami R.R., and Clement, T.P. (2007). "Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics." *Water Resources Research*, Vol. 43, W04418, doi:10.1029/2006WR005151.
- Gregg, M.C. D'Asaro, E.A., Shay, T.J., and Larson, N. (1986). "Observations of persistent mixing and near-inertial internal waves." *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 16, pp. 856-885.
- Henry, H.R. (1959). "Salt water intrusion into fresh water aquifers." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 64, pp.1911-1919.
- Hong, S.H., Shi, L., Cui, L., and Park, N.S. (2009). "Artificial injection to control saltwater intrusion in groundwater-numerical study on a vertical cross section." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 19, No. 2, pp. 131-138.
- Hur, D.S., Lee, W.D., and Cho, W.C. (2012). "Three-dimensional flow characteristics around permeable submerged breakwaters with open inlet." *Ocean Eng.*, Vol. 44, pp. 100-116.
- Jung, E.T., Lee, S.J., Lee, M.J., and Park, N.S. (2014). "Effectiveness of double negative barriers for mitigation of seawater intrusion in coastal aquifer: sharp-interface modeling investigation." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 11, pp. 1087-1094.
- Kim, J.Y., Oh, Y.K., and Ryu, S.P. (2001). "Study on the salinization in groundwater of the eastern area of Cheju island." *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 10, No. 1, pp. 47-58.
- Kim, K.Y., Lee, C.W., Kim, Y.J., Kim, T.H., and Woo, N.C. (2004). "Water-level fluctuation due to groundwater-surface water interaction in coastal aquifers." *Journal of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 9, No. 4, pp. 32-41.
- Kim, S.S. (2009). "The variation of seawater/freshwater interface with the tide at the coastal aquifer of the Yongho Bay in Busan." Master's Thesis, Pukyong National University, Korea
- Konikow, L.F., Goode, D.J., and Hornberger, G.Z. (1996). "A three-dimensional method-of-characteristics solute-transport model (MOC3D)." U.S.G.S., Water-Resources Investigations Report 96-4267.
- Lee, W.D., and Hur, D.S. (2014). "Development of 3-d hydrodynamical model for understanding numerical analysis of density current due to salinity and temperature and its verification." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, NO. 3, pp. 859-871.
- Lilly, D.K. (1991). "A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method." *Phy. Fluids*, Vol. 4, pp. 633-635.
- Liu, S., and Masliyah, J.H. (1999). "Non-linear flows porous media." *J. Non-Newtonian Fluid Mech*, Vol. 86, pp. 229-252.
- Lu, C., Chen, Y., Zhang., and Luo, Z. (2013). "Steady-state freshwater-seawater mixing zone in stratified coastal aquifers." *Journal of Hydrology*, Vol. 505, pp. 24-34.
- Mellor, G.L., and Yamada, M. (1982). "Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems." *Rev. Geophys.*, Vol. 20, pp. 851-875.
- Oh, Y.K., Kim, K.H., and Ryu, S.P. (2000). "Physico-chemical characteristics of groundwater salinization in the eastern area of Cheju island." *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 9, No. 3, pp. 253-259.
- Oude Essink, G.H.P. (2001). "Salt water intrusion in a three-dimensional groundwater system in the Netherlands: a numerical study." *Transport in Porous Media*, Vol. 43, pp. 137-158.
- Park, H.J., Kim, W.I., Ho, J.S., and Ahn, W.S. (2009). "Experimental study to parameterize salt-wedge formations in coastal aquifer." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 11, pp. 1005-1015.
- Park, N.S. (1995). "Quantitative analysis for the effects of hydraulic variables on the formation of freshwater-saltwater transition zones in aquifers." *Magazine of Korea Water Resources Association*, Vol. 28 No. 2, pp. 137-143.
- Peters, F., Gregg, M.C., and Toole, J.M. (1988). "On the parameterization of equatorial turbulence." *J. Geophys. Res.*, Vol. 93, pp. 1199-1218.
- Riley, J.P., and Skirrow, G. (1965). "Chemical oceanography." Vol. 3, Academic Press.
- Sakakiyama, T., and Kajima, R. (1992). "Numerical simulation of nonlinear wave interacting with permeable breakwater." Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng.,

- ASCE, Venice, pp. 1531-1544.
- Shim, B.O., and Chung, S.Y. (2003). "Estimation of the interface of seawater intrusion in a coastal aquifer system with SHARP model." *Journal of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 8 No. 1, pp. 68-74.
- Shim, B.O., and Lee, C.W. (2011). "Hydrologic characterization through ground water monitoring in a coastal aquifer." *Economic and Environmental Geology*, Vol. 44, No. 3, pp. 239-246.
- Shin, I.H., Park, C.Y., Ahan, K.S., and Jeong, Y.J. (2002). "Hydrogeochemistry of groundwaters at the Gogum island area in Jeonnam, Korea." *Journal of the Korean Earth Science Society*, Vol. 23, No. 6, pp. 474-485.
- Smagorinsky, J. (1963). "General circulation experiments with the primitive equation." *Mon. Weath. Rev.*, Vol. 91, No. 3, pp. 99-164.
- Strack, O.D.L. (1976). "A single potential solution for regional interface problems in coastal aquifers." *Water Resources Research*, Vol. 12, pp. 1165-1174.
- Suh, S.K., Oh, C.M., Kim, W.I., and Ho, J.S. (2010). "Experimental study of freshwater discharge and salt-water intrusion control in coastal aquifer." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 5, pp. 159-168.
- Werner, A.D., and Simmons, C.T. (2009). "Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers." *Ground Water*, Vol. 47, No. 2, pp. 197-204.
- Wood, C, Harrington, G.A. (2015). "Influence of seasonal variations in sea level on the salinity regime of a coastal groundwater-fed wetland." *Ground Water*, Vol. 53 pp. 90-98.

paper number : 15-065

Received : August 2015

Revised : 7 October 2015 / 23 October 2015

Accepted : 23 October 2015