

한국 부산광역시 수영구 지역의 도시화에 의한 해안 대수층 내 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 담수 주입의 영향 삼차원 수치 모델링

이지민 · 김준모[‡]
서울대학교 지구환경과학부

요 약

한국 부산광역시 수영구 지역의 도시화에 의한 해안 대수층 내의 해수 침투 저감을 위한 담수 주입 기법의 영향을 효과적으로 예측하고 정량적으로 평가하기 위하여 기존의 폐공 및 방치공을 활용한 다양한 담수 주입 시나리오(주입 위치, 주입 심도, 주입률)에 대해서 범용 다차원 수리동역학적 분산 수치 모델을 이용한 일련의 밀도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동 삼차원 수치 모델링을 수행하였다. 수치 모델링 결과들은 담수 주입에 의해 해안 대수층 내의 밀도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동이 크게 영향을 받음을 보여준다. 담수 주입에 의해 특히 산지 및 평지의 지하수면이 전반적으로 상승하며, 도시화에 의해 산지까지 침투한 해수는 해안 쪽으로 크게 후퇴한다. 그리고 담수 주입에 의한 해안 대수층 내의 총지하수량(부피) 증가 및 총염분량(질량) 감소는 담수 주입 위치, 주입률 및 주입 심도 순서로 민감하게 반응한다. 총지하수량 증가에 가장 효과적인 담수 주입 위치는 산지 6개 공(Case A)이며, 담수 주입 위치가 산지에서 해안 쪽으로 이동할수록 그 효과는 감소한다. 산지 6개 공(Case A) 또는 평지 5개 공(Case B)에서 담수를 주입하는 경우 그 주입률이, 그리고 다음으로 주입 심도가 증가할수록 총지하수량이 증가한다. 하지만 해안 6개 공(Case C) 또는 해안 7개 공(Case D)에서 담수를 주입하는 경우 그 주입률이, 그리고 다음으로 주입 심도가 증가하여도 총지하수량은 거의 증가하지 않는다. 총염분량 감소에 가장 효과적인 담수 주입 위치는 해안 7개 공(Case D)이며, 담수 주입 위치가 해안에서 산지 쪽으로 이동할수록 그 효과는 감소한다. 모든 담수 주입 위치(Cases A, B, C, D)에서 담수를 주입하는 경우 그 주입률이, 그리고 다음으로 주입 심도가 증가할수록 총염분량이 감소한다. 그러한 경향은 담수 주입 위치가 산지에서 해안 쪽으로 이동할수록 더욱 뚜렷하다. 이러한 수치 모델링 결과들은 담수 주입 기법이 도시화에 의한 도시 해안 대수층 내의 해수 침투 저감에 매우 효과적임을 보여준다.

주요어: 해안 대수층, 도시화, 해수 침투, 담수 주입, 수치 모델링

Jimin Lee and Jun-Mo Kim, 2015, Three-dimensional numerical modeling of impacts of fresh water injection on groundwater flow and salt transport in a coastal aquifer due to urbanization of Suyeong-gu, Busan, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 2, p. 203-219

ABSTRACT: A series of three-dimensional numerical modeling of density-dependent groundwater flow and salt transport using a generalized multidimensional hydrodynamic dispersion numerical model is performed with respect to various fresh water injection scenarios (injection location, injection depth, injection rate) to predict effectively and to evaluate quantitatively impacts of fresh water injection schemes for mitigating seawater intrusion in a coastal aquifer due to urbanization of Suyeong-Gu, Busan, Korea. The results of the numerical modeling show that density-dependent groundwater flow and salt transport in the coastal aquifer are intensively and extensively impacted by fresh water injection. As fresh water injection progresses, the groundwater table overallly rises especially in the mountain and plain areas, and seawater, which intrudes up to the mountain area due to urbanization, significantly regresses toward the coast area. In addition, the increase in the total groundwater amount (volume) and the decrease in the total salt amount (mass) due to fresh water injection respond sensitively to the location, rate, and then depth of fresh water injection. The most effective location of fresh water injection for increasing the total groundwater amount is the 6 wells in the mountain area (Case A), and such effectiveness reduces as the location of fresh water injection shifts from the mountain area to the coast area. When fresh water is injected at

[‡] Corresponding author: +82-2-880-8190, E-mail: junmokim@snu.ac.kr

the 6 wells in the mountain area (Case A) or the 5 wells in the plain area (Case B), the total groundwater amount increases as its rate and then depth increase. However, when fresh water is injected at the 6 wells in the coast area (Case C) or the 7 wells in the coast area (Case D), the total groundwater amount almost does not increase even though its rate and then depth increase. The most effective location of fresh water injection for decreasing the total salt amount is the 7 wells in the coast area (Case D), and such effectiveness reduces as the location of fresh water injection shifts from the coast area to the mountain area. When fresh water is injected at every locations (Cases A, B, C, D) of fresh water injection, the total salt amount decreases as its rate and then depth increase. Such trends are more distinct as the location of fresh water injection shifts from the mountain area to the coast area. These results of the numerical modeling show that fresh water injection schemes are very effective for mitigating seawater intrusion in urban coastal aquifers due to urbanization.

Key words: coastal aquifer, urbanization, seawater intrusion, fresh water injection, numerical modeling

(Jimin Lee and Jun-Mo Kim, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Republic of Korea)

1. 서 론

해수 침투(seawater intrusion)는 자연적 요인(예, 강수량 변화, 증발산량 변화, 기후 변화, 조석, 해수와 담수의 밀도 차이)과 인위적 요인(예, 지하수 개발, 산업화, 도시화)에 의해 해수가 해안 대수층(coastal aquifer)으로 침투하는 현상이다(Booth *et al.*, 2005). 특히 해안 지역에서는 도시화(urbanization)가 진행되면서 지표의 불투수성 피복층의 증가, 무분별한 지하수 양수, 그리고 지하 구조물로의 지하수 유출 등이 일어나서 비교적 짧은 기간 안에 지하수량이 급격히 감소하며, 이로 인해 해안 대수층으로 해수 침투가 심화된다(Nishikawa *et al.*, 2009). 해수 침투가 오랜 기간 동안 진행되면 지하수 고갈, 지하 구조물 부식, 그리고 생태계 파괴 등의 심각한 문제가 발생한다. 그리고 이러한 해수 침투 현상이 일단 진행되면 도시화 이전 상태로 회복하는 데에 상당히 오랜 시간과 많은 비용이 소요된다. 따라서 해안 도시 지역에서는 해수 침투를 저감하고 지하수 자원을 지속적으로 확보하기 위한 적절한 계획과 관리가 필요하다.

해수 침투를 저감하기 위한 방안으로는 (1) 지하수 양수 감소(groundwater pumping reduction), (2) 양수정 재배치(pumping well relocation), (3) 불투수성 인공 방벽 설치(impermeable artificial barrier installation), (4) 인공 함양(artificial recharge) 등이 있다(Atkinson *et al.*, 1986; Abd-Elhamid and Javadi, 2008, 2010). 이 중에서 특히 인공 함양 중 관정을 통한 담수 주입 기법(fresh water injection scheme)은

좁은 지역에 많은 양의 담수를 함양시킬 수 있고 지하수위 회복, 해수 침투 저감, 지하수질 개선, 지반 침하 방지 등과 같은 많은 장점이 있기 때문에 전세계 여러 나라에서 시행하고 있다(Kim *et al.*, 1998; Kim and Hamm, 2003).

국외에서 담수 주입 기법을 실제로 적용한 사례를 살펴보면 Phien-wej *et al.* (1998)은 태국 방콕에서 지하수의 과잉 양수로 인해 발생한 지하수 고갈과 지반 침하를 개선하기 위해 대수층에 담수를 주입한 후 지하수량 증가와 지반 회복을 관측하였다. Bourri and Dhia (2010)는 튀니지에서 30년간 농업용 관개 수로를 통해 주기적인 담수 주입을 실시한 후 압력 수두와 염분 농도 측정을 통하여 담수 주입으로 인한 해수 침투 저감 효과를 확인하였다. Izbicki *et al.* (2010)은 미국 캘리포니아에서 염소로 처리된 담수를 사용하여 대수층 저장 및 회수(aquifer storage and recovery, ASR) 실험을 수행하였고 수치 모델링을 통하여 담수 이동에 대한 지질 매체의 이방성의 영향을 연구하였다. Masciopinto (2006)는 경계면 모델을 통해 이탈리아 남부 해안 지역에 존재하는 싱크홀(sinkhole)로 담수를 주입했을 때의 담수와 해수간의 경계면의 이동을 분석하였다. 한편 국내에서도 해수 침투 저감을 위한 모의 담수 주입 시험이 전라남도 영광군 해안 지역에 적용되었다. Park *et al.* (2007)은 전라남도 영광군 해안 충적층에 담수를 주입한 후 시추공을 통하여 주입된 담수체의 거동과 영향 반경을 관측하였다. Shin and Byun (2010)은 동일한 지역에서 해안 균열 암반 대수층 내에 담수를 주입한 후 지하수의 전기전도도가 점진적

으로 감소하는 것을 관측하여 담수 주입 기법이 해수 침투 개선에 효과가 있음을 확인하였다.

한편 담수 주입 기법을 해안 대수층 내에 적용하려면 상당히 오랜 시간과 많은 비용이 소요되기 때문에 이러한 기술을 적용하기 이전에 후보 지역에서 담수 주입 기법의 적용성 및 효율성에 대한 철저한 사전 조사가 선행되어야 한다. 이러한 사전 조사 단계에서는 해안 대수층 내의 밀도 의존적 지하수 유동과 염분 이동을 효율적이고 정량적으로 모사할 수 있는 수리동역학적 분산 수치 모델(예, Voss, 1984; Yeh *et al.*, 1994; Guo and Langevin, 2002)을 이용한 예측 및 분석이 필수적이다. 국외의 경우 Giambastiani *et al.* (2007)은 이탈리아 라벤나에서 대수층의 압질, 그리고 지표 토지 이용에 따른 침투율 변화가 해수 침투 양상에 미치는 영향을 수치 모델링을 통해 분석하였다. Misut and Voss (2007)는 미국 뉴욕에서 심부 대수층에 대수층 저장 및 회수(aquifer storage and recovery, ASR) 기법을 적용할 때 담수 저장 기간과 회복량에 따른 해안 대수층 내의 해수 이동 양상을 수리동역학적 분산 수치 모델을 이용하여 예측하였다. 한편 국내에서도 수리동역학적 분산 수치 모델을 이용한 다양한 연구가 수행되었다. Park, H.S. *et al.* (2008)은 전라북도 부안군 지역 지질 매체의 층상 불균질성과 지하수 양수 방식이 해수 침투 양상에 미치는 영향을 분석하였다. Park, J.H. *et al.* (2008)은 전라북도 부안군 지역 해안 대수층 내의 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 단층의 영향을 해석하였다. Oh and Kim (2008)은 경상북도 경주시 양북면 중저준위 방사성 폐기물 처분장 후보 부지에서 지형과 단층 및 절리, 그리고 지하 처분장 시설 등이 지하수 유동과 염분 및 방사성 핵종 이동에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 Cho and Kim (2009)은 부산광역시 수영구 지역 해안 대수층 환경 변화에 많은 영향을 미치는 다섯 가지의 도시화 요소(urbanization factor)를 선정한 후 이들 도시화 요소에 의한 해안 대수층 내의 지하수 유동과 염분 이동을 시간적 및 공간적으로 분석하였다.

본 연구의 목적은 범용 다차원 수리동역학적 분산 수치 모델을 이용하여 한국 부산광역시 수영구 지역의 도시화에 의한 해안 대수층 내의 해수 침투 저감을 위한 담수 주입 기법의 영향을 효과적으로 예측하고 정량적으로 평가하는 것이다. 이를 달성하

기 위하여 기존의 폐공 및 방치공을 활용한 총 112 (4 × 7 × 4)가지의 다양한 담수 주입 시나리오(주입 위치, 주입 심도, 주입률)를 설계하였으며, 이에 대한 일련의 밀도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동 수치 모델링을 수행하였다.

2. 연구 지역

2.1 위치 및 지형

연구 지역은 행정 구역 상으로는 한국 부산광역시 수영구를 중심으로 남구, 동래구, 부산진구, 연제구 및 해운대구에 해당하는 지역이며, 경위도 상으로는 동경 129° 07', 북위 35° 10' 인근에 위치하고 있다(그림 1). 연구 지역의 남쪽은 동해와 접하고 있으며, 수영강(Suyeong River)이 북쪽에서 남쪽으로 흐르면서 연구 지역의 가운데를 가로 지르고 있다. 동해와 접하고 있는 해안에는 관광 명소로 유명한 광안리 해수욕장과 해운대 해수욕장이 위치하고 있다. 수영강을 기준으로 동쪽에는 해발 고도 634 m의 장산이, 서쪽에는 428 m의 황령산과 403 m의 금련산이 위치하고 있어 연구 지역은 비교적 산세가 급한 지형의 유역(watershed)이다(Cho and Kim, 2009).

2.2 지질학적 및 수리지질학적 특성

연구 지역의 지질은 하부로부터 백악기 퇴적암과 이를 분출 또는 관입한 백악기 화산암류(안산암질 화산각력암, 안산암, 유문암) 및 심성암류(각섬석 화강섬록암, 화강반암)로 이루어져 있으며, 이들을 피복하는 제4기 충적층이 수영강을 중심으로 연구 지역 중심부에 분포하고 있다(Son *et al.*, 1978; Chang *et al.*, 1983) (그림 1). 이들 지층은 다양한 방향의 많은 절리들을 포함하고 있어서 연구 지역에 분포하는 해안 대수층은 수리지질학적으로 일련의 불균질 진이방성 지층들(heterogeneous and true anisotropic geologic formations)로 구성되어 있다. 그리고 각각의 지층들은 다공질 암석 기질(porous rock matrix)과 절리군들(joint sets)로 구성되어 있어서 전체적으로 파쇄다공질 지질 매체(fractured porous geologic medium)로 작용한다(Cho and Kim, 2009).

2.3 도시화 요소

Cho and Kim (2009)은 연구 지역인 부산광역시 수

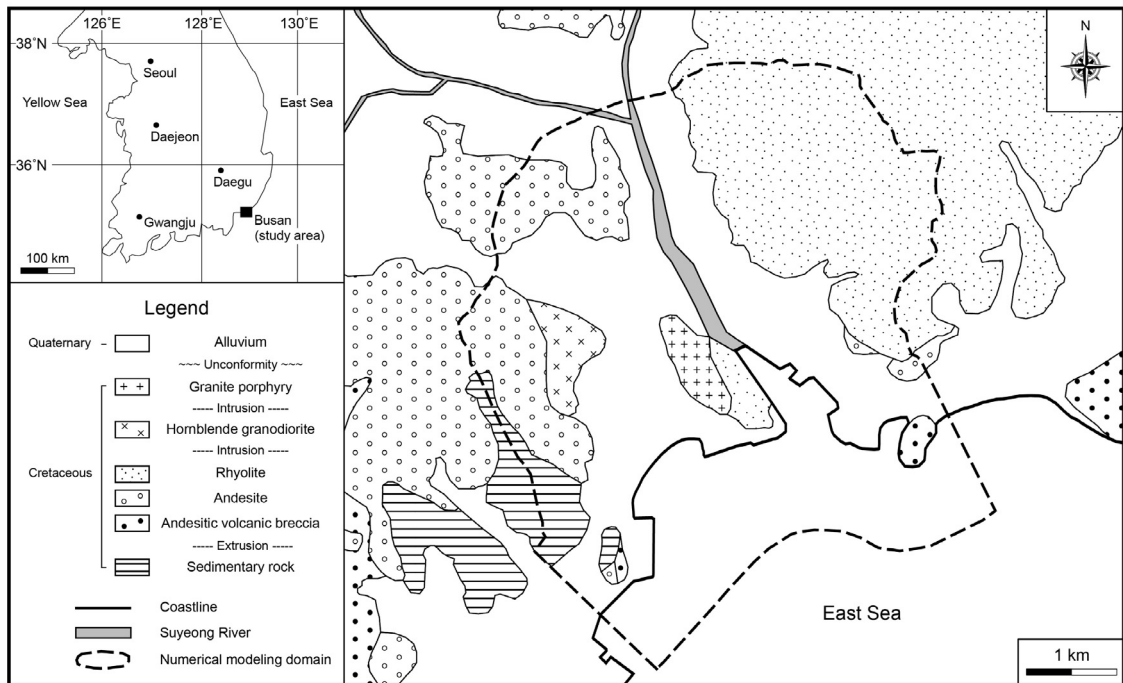


Fig. 1. Location and surface geologic maps of the study area with numerical modeling domain (Cho and Kim, 2009). The surface geologic map is modified from Son *et al.* (1978) and Chang *et al.* (1983).

영구 일대의 해안 대수층 환경 변화에 커다란 영향을 미치는 다섯 가지의 대표적인 도시화 요소(urbanization factor)와 그 특성을 선정하였다. 선정된 5대 도시화 요소는 (1) 불투수성 피복(impermeable pavement) (도시 지역 지표 하 0.0~0.5 m 구간), (2) 지하수 양수(groundwater pumping) (347개 양수정 및 양수정 밀집지), (3) 지하철로의 지하수 유출(groundwater discharge to subway) (2호선 7,508 m 길이, 3호선 1,836 m 길이), (4) 전력구 터널로의 지하수 유출(groundwater discharge to power cable tunnel) (2,651 m 길이) 및 (5) 상수도 누수(waterworks leakage) (도시 지역 지표 하 1.5~2.0 m 구간)이다. 따라서 본 연구에서도 Cho and Kim (2009)의 기존 연구에서 선정한 것과 동일한 5대 도시화 요소와 그 특성을 고려하였다.

3. 수치 모델

본 연구에 이용된 수치 모델은 범용 다차원 수리 동역학적 분산 수치 모델인 COFAT3D (Kim and Yeh, 2004)이다. COFAT3D (Kim and Yeh, 2004)는 GMS (Groundwater Modeling System, <http://www>

www.aquaveo.com) 내에 포함되어 있는 3DFEMFAT (Yeh *et al.*, 1994)으로부터 교육과학기술부 21세기 프론티어 수자원의 지속적 확보기술개발사업 연구 성과의 하나로 개발되었다. 이 수치 모델은 범용 다차원 복합 유한 요소 모델(generalized multidimensional hybrid Lagrangian-Eulerian finite element model)로서 복잡한 지질 구조와 경계를 가지는 포화-불포화 불균질 진이방성 다공질, 파쇄질 및 파쇄 다공질 지질 매체와 개별 절리 내에서의 밀도 의존적 지하수 유동(density-dependent groundwater flow) 및 다성분 용질 이동(multicomponent solute transport) 현상은 물론 강수 증발산-침투-삼출(precipitation-evapotranspiration-infiltration-seepage) 현상도 수치 모델링할 수 있다. 이러한 COFAT3D (Kim and Yeh, 2004)는 선(2 절점) 요소, 사면체(4 절점) 요소, 삼각 기둥(6 절점) 요소 및 육면체(8 절점) 요소 등을 이용하여 복잡한 내-외부 구조를 구현할 수 있다. 또한 Dirichlet, Neumann, Cauchy 및 mixed-type (variable) 등과 같은 다양한 지하수 유동 및 용질 이동 경계 조건을 설정할 수 있다. 그리고 12개의 포화-불포화 지하수 유동 모델(예, van Genuchten, 1980)을 고려하여

불포화대(unsaturated zone, vadose zone) 내에서의 지하수 유동 및 용질 이동을 수치 모델링할 수 있다. 또한 COFAT3D (Kim and Yeh, 2004)는 요소 군집 기법(element cluster technique)을 이용하여 우물이나 터널 등과 같은 임의의 구조물로 유입되는 지하수 및 용질의 유입 속도와 유입량을 시간에 따라 계산할 수 있다. 이러한 COFAT3D (Kim and Yeh, 2004)는 비정상 상태 문제를 풀기 위해서 adaptive finite difference time-stepping scheme을 이용하며, 비선형 문제를 풀기 위해서 static and dynamic incremental Picard method를 이용하며, 선형화된 행렬 방정식의 해를 구하기 위해서는 다섯 개의 matrix solver (1 direct and 4 iterative methods) 중 하나를 이용한다. 특히 본 연구에서는 iterative ICPCG (incomplete Cholesky LU decomposed preconditioned conjugate gradient) method를 이용하였으며, 압력 수두와 해수 표준화 염분 농도의 수렴 기준(convergence criterion)을 비선형 반복 단계(nonlinear iterations)에서는 각각 최대 해발 고도 634 m (장산)의 0.000158%에 해당하는 10^{-3} m와 최대 해수 표준화 염분 농도 1의 0.1%에 해당하는 10^{-3} 으로, 선형 반복 단계(linear iterations)에서는 각각 비선형 반복 단계에서의 값의 10%에 해당하는 10^{-4} m와 10^{-4} 로 설정하였다.

4. 수치 모델링 개요

Cho and Kim (2009)은 5대 도시화 요소를 포함

하는 부산광역시 수영구 일대의 수치 모델링 영역 (그림 1)에 대해 삼차원 지층 모델 및 유한 요소망을 수립하였다. 그리고 강수량과 5대 도시화 요소 등을 반영한 경계 조건 및 내부 조건을 결정하고 수치 모델링에 적용하였다. 또한 연구 지역의 지질 매체 (geologic media)와 불투수성 피복(impermeable pavement)의 물성 값 및 지질 매체 내 절리군의 특성을 분석하였다. 따라서 본 연구에서도 Cho and Kim (2009)의 기존 연구에서 사용한 것과 동일한 도시화 요소, 삼차원 지층 모델, 유한 요소망, 경계 조건, 내부 조건, 지질 매체와 불투수성 피복의 물성 값 및 지질 매체 내 절리군의 특성을 고려하였다. 이와 같이 본 연구에 사용된 지질 매체(지층)와 불투수성 피복의 물성 값 및 지질 매체 내 절리군의 특성은 각각 표 1 및 표 2에 정리되어 있다.

5. 도시화 이전 및 이후 수치 모델링

5.1 수치 모델링 보정

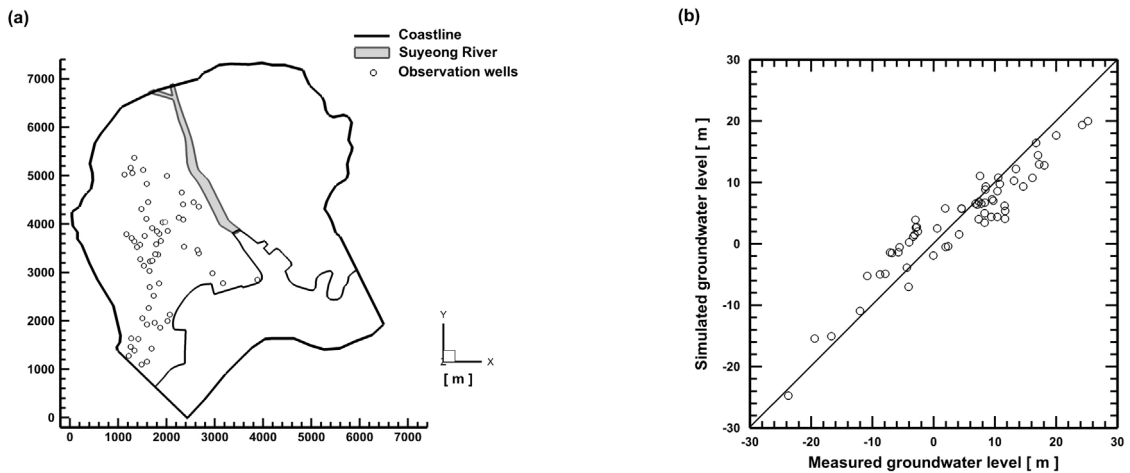
수치 모델링 보정을 위하여 각 지층의 절리군의 절리 간극(aperture)을 변화시키는 일련의 시행착오(trial and error) 수치 모델링을 Cho and Kim (2009)의 기존 연구 이후에 추가적으로 더 수행하였다. 이러한 과정에서 그림 2a에 도시된 61개의 관측정(observation well)에서 측정된 지하수위(measured groundwater level)와 동일한 위치에서 계산된 지하수위(simulated groundwater level)를 반복해서 비교하였다. 이 때

Table 1. Material properties of the geologic media and impermeable pavement (Cho and Kim, 2009).

Property	Sedimentary rock	Andesitic volcanic breccia	Andesite	Rhyolite	Hornblende granodiorite	Granite porphyry	Weathered zone	Alluvium and marine sediment	Impermeable pavement
Porosity of matrix	3.75×10^{-2}	4.50×10^{-2}	2.68×10^{-2}	6.74×10^{-2}	7.00×10^{-3}	6.11×10^{-2}	1.75×10^{-1}	3.06×10^{-1}	7.32×10^{-2}
Saturated hydraulic conductivity of matrix [m/sec]	3.98×10^{-9}	2.45×10^{-12}	2.45×10^{-12}	2.45×10^{-12}	2.45×10^{-12}	2.45×10^{-12}	9.66×10^{-7}	3.39×10^{-5}	2.50×10^{-6}
Longitudinal dispersivity [m]	18.31	18.31	18.31	18.31	18.31	18.31	18.31	18.31	18.31
Transversal dispersivity [m]	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83
Solid density [kg/m ³]	2.85×10^3	2.56×10^3	2.65×10^3	2.78×10^3	2.76×10^3	2.69×10^3	2.68×10^3	2.65×10^3	2.56×10^3
Compressibility [m ² /N]	1.65×10^{-11}	4.17×10^{-9}	1.29×10^{-11}	1.36×10^{-11}	9.27×10^{-11}	9.27×10^{-11}	1.11×10^{-8}	4.52×10^{-8}	2.27×10^{-9}
Tortuosity	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
Residual water saturation	2.07×10^{-1}	2.63×10^{-1}	2.63×10^{-1}	2.63×10^{-1}	2.63×10^{-1}	7.39×10^{-2}	2.32×10^{-1}	1.39×10^{-1}	2.07×10^{-1}
van Genuchten's (1980) unsaturated hydraulic parameters									
α_s [m ⁻¹]	1.00	2.70	2.70	2.70	2.70	1.60	1.90	12.40	1.00
n_s	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.37	1.31	2.28	1.23

Table 2. Characteristics of the joint sets in the geologic media (Cho and Kim, 2009).

Geologic medium (geologic formation)	Joint set number	Strike [°]	Dip [°]	Spacing [m]	Aperture [m] (before and after calibration)
Sedimentary rock	1 (bedding plane)	N43E	83NW	9.04×10^{-2}	3.26×10^{-5}
	2	N46W	83SW		3.39×10^{-5}
Andesitic volcanic breccia	1	N43E	85SE	8.78×10^{-2}	3.27×10^{-5}
	2	N56W	77NE		3.27×10^{-5}
Andesite	1	N43E	83NW	8.78×10^{-2}	3.27×10^{-5}
	2	N46W	83SW		3.17×10^{-5}
Rhyolite	1	N41E	84SE	1.33×10^{-1}	4.30×10^{-5}
	2	N54W	79NE		4.77×10^{-5}
Hornblende granodiorite	1	N39E	77SE	1.33×10^{-1}	3.38×10^{-5}
	2	N27W	73NE		3.24×10^{-5}
	3	N75E	90		3.24×10^{-5}
Granite porphyry	1	N62E	73SE	1.37×10^{-1}	3.38×10^{-5}
	2	N08E	85SE		3.28×10^{-5}
	3	N88W	78SW		3.28×10^{-5}

**Fig. 2.** (a) Locations of 61 observation wells used in numerical modeling calibration and (b) comparisons of measured and simulated groundwater levels at the observation wells after numerical modeling calibration.

현장에서 측정된 지하수위는 상기한 연구 지역의 5대 도시화 요소들이 모두 함께 작용하여 나타난 결과이기 때문에 계산된 지하수위도 이러한 도시화 요소들을 모두 고려한 수치 모델링으로부터 구하였다. 즉 5대 도시화 요소들을 모두 고려한 정상 상태 수치

모델링에서 계산된 지하수위를 측정된 값과 비교하였다. 수치 모델링 보정에서 대상 물성(target property)으로 지층의 절리 간극을 선택한 이유는 지층의 포화수리전도도(saturated hydraulic conductivity)가 다공질 암석 기질보다는 지층 내에 발달된 절리군

에 의해 크게 좌우될 뿐만 아니라 표 2에 정리된 절리군의 절리 간극이 실제 측정된 값이 아니라 Cubic Law (Parsons, 1966; Snow, 1968, 1969)를 적용하여 절리군의 절리 간격(spacing)과 지층의 포화수리 전도도로부터 계산된 값이기 때문이다. 수치 모델링 보정을 위한 유효화 매개 변수(validation parameter)로 결정계수(coefficient of determination, R^2), 제곱근평균제곱오차(root mean square error, RMSE) 및 표준화 제곱근평균제곱오차(normalized root mean square error, NRMSE)를 사용하였다. 그림 2b에서 보다시피 지하수위에 대한 수치 모델링 보정을 통해 얻은 결정계수는 0.861, 제곱근평균제곱오차는 3.801 m, 표준화 제곱근평균제곱오차는 7.77%이다. 그리고 보정된 각 지층의 절리군의 절리 간극 값은 표 2에 화살표를 이용하여 정리되어 있다. 그 결과 보정 후의 유효화 매개 변수 값이 Cho and Kim (2009)의 값에 비해 더 향상되었으며, 보정된 각 지층의 절리군의 절리 간극 값도 Cho and Kim (2009)의 값과 다르다.

5.2 도시화 이전 수치 모델링 결과

도시화 이전의 지하수면(groundwater table) 및 해수 표준화 염분 농도 0.03 등치면(isosurface) 분포가 각각 그림 3a 및 그림 3c에 도시되어 있다. 해수 표준화 염분 농도 0.03은 총용존고체(total dissolved solids, TDS) 1,000 ppm에 해당하는 값으로서 이는 일반적으로 담수와 염수를 구분하는 기준이 된다 (Barlow, 2003). 따라서 해수 표준화 염분 농도 0.03 등치면 분포를 통해 해안 대수층 내 해수의 공간적 분포를 잘 파악할 수 있다. 지하수면 분포는 산지와 평지의 지형 기록의 영향이 잘 반영되어 나타난다 (그림 3a). 수치 모델링 영역의 동쪽 경계인 장산 정상과 서쪽 경계인 금련산 정상에서 가장 높은 지하수면을 보여주며, 수영강과 해안선 부근의 평지에서 가장 낮은 지하수면을 보여준다. 해수의 분포를 보면 도시화 이전의 자연 상태에서도 해수와 담수의 밀도 차에 의해 해안 대수층으로 해수가 침투하여 담수인 지하수와 평형 상태를 이루고 있다(그림 3c). 수영강을 따라서 해수가 가장 많이 침투한 이유는

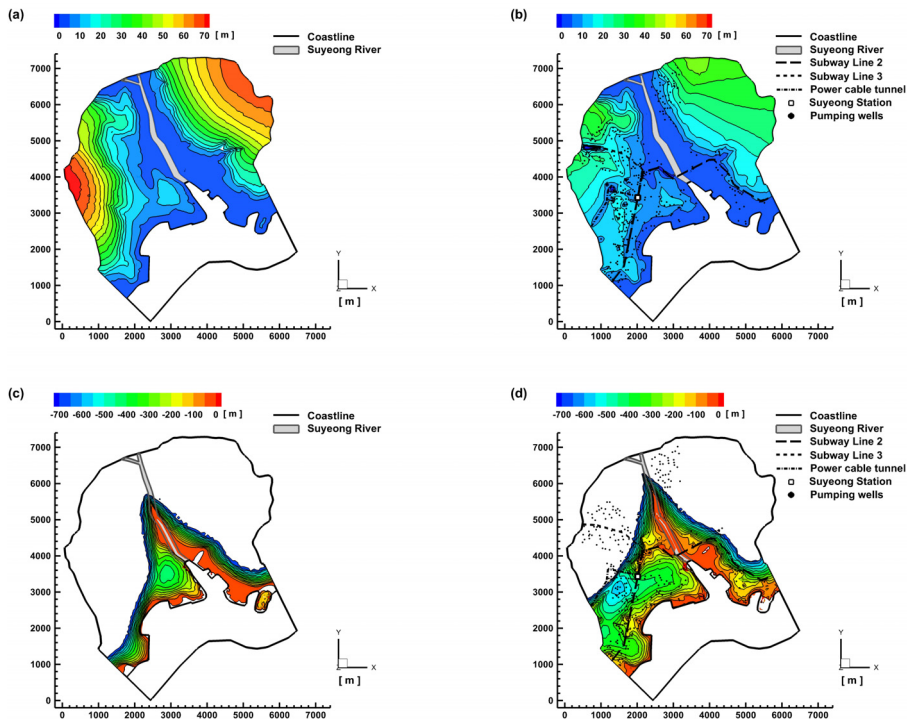


Fig. 3. Steady-state spatial distributions of groundwater table (zero reference pressure head) (a) before and (b) after urbanization and isosurface of seawater-normalized salt concentration of 0.03 (c) before and (d) after urbanization in the coastal aquifer.

주변 해안 대수층보다 수리 수두(hydraulic head)가 낮게 형성되어 수영강이 이득 하천(gaining stream)으로 작용하기 때문인 것으로 판단된다. 도시화 이전의 해안 대수층 내 총지하수량(부피)은 $1.06 \times 10^9 \text{ m}^3$ 이며, 총염분량(질량)은 $1.11 \times 10^{10} \text{ kg}$ 이다.

5.3 도시화 이후 수치 모델링 결과

도시화 이후의 지하수면 및 해수 표준화 염분 농도 0.03 등치면 분포가 각각 그림 3b 및 그림 3d에 도시되어 있다. 도시화에 의해 지하수면은 전반적으로 상당히 하강한 것을 알 수 있다. 특히 지하수 양수량이 많은 일부 양수정 주변에서는 동심원상으로, 지하철과 전력구 터널을 따라서는 선상으로 지하수면이 더 하강한다(그림 3b). 해수의 분포를 보면 도시화에 의해 해안 대수층 내에 전반적으로 해수 침투가 진행되며, 양수정 밀집 지역 및 수영강 하부를 통과하는 지하철을 따라서 해수 침투가 특히 심화된다(그림 3d). 도시화 이후의 해안 대수층 내 총지하수량(부피) 감소는 도시화 약 200년 후인 최종 정상 상태에서 $1.13 \times 10^5 \text{ m}^3$ 이며, 총염분량(질량) 증가는 도시화 약 5,000년 후인 최종 정상 상태에서 $1.18 \times 10^9 \text{ kg}$ 이다. 이는 실제로 지하수 유동이 염분 이동보다 훨씬 더 빠르게 일어나기 때문이며, Cho and Kim (2009)의 기존 연구에 의하면 도시화 이후 총지하수량 감소의 대부분은 약 50년 이내에, 총염분량 증가의 대부분은 약 1,250년 이내에 발생한다.

6. 담수 주입 수치 모델링

6.1 수치 모델링 설정

연구 지역 해안 대수층 내의 담수 주입에 의한 지하수 확보와 해수 침투 저감에 대한 효과를 평가하기 위해 다양한 담수 주입 위치, 주입 심도 및 주입률에 대한 비정상 상태 수치 모델링을 수행하였다. 비정상 상태 수치 모델링의 초기 조건은 도시화 이후의 최종 정상 상태 수치 모델링 결과(예, 그림 3b, 3d)이다. 그리고 담수 주입에 의해 지하수 유동 및 염분 이동이 언제 새로운 정상 상태에 도달할지 모르게 때문에 수치 모델링 기간은 충분히 20,000년으로 설정하여 연구 지역 해안 대수층 내에서 지하수 유동 및 염분 이동이 완전히 새로운 정상 상태에 도달하도록 하였다.

6.2 담수 주입 시나리오 설계

연구 지역 해안 대수층 내의 지하수 개발 현황을 파악하기 위하여 각종 문헌 자료 및 현장 조사 자료를 수집하고 분석하였으며, 이를 바탕으로 연구 지역에 적용 가능한 담수 주입 시나리오를 설계하였다. 부산광역시 수영구 내에는 2009년 10월 기준 총 377개의 시추공이 존재하며, 이들 중에서 사용되고 있는 양수정이 306개, 폐공(closed well) 및 방치공(abandoned well)이 59개, 위치 불명공이 11개, 마지막으로 측정 거부공이 1개로 조사되었다(Pukyong National University, 2009). 이들 중에서 위치 정보가 자료상에 명시되어 있는 총 55개의 폐공 및 방치공을 담수 주입 기술을 적용할 대상으로 검토하였다. 담수 주입 기술을 적용할 대상 폐공 및 방치공 선정 시에 다음의 세 가지 조건을 고려하였다. 첫 번째로 도시화 이후에 해수가 침투해 있는 지역의 폐공 및 방치공을 우선적으로 고려하였다. 두 번째로 담수 주입 기술의 수리학적 차단 효과(hydraulic barrier effect)를 기대할 수 있도록 선상의 배열성(linear configuration)을 고려하였다. 세 번째로 담수 주입 기술 적용의 효과를 증대하기 위하여 굴착 심도(boring depth)가 깊은 폐공 및 방치공을 우선적으로 고려하였다. 이러한 세 가지 조건을 만족하는 폐공 및 방치공을 선정하여 다음과 같은 다양한 범위의 담수 주입 위치, 주입 심도 및 주입률을 가지는 담수 주입 시나리오를 설계하였다. 먼저 담수 주입 위치(injection location)의 효과를 평가하기 위하여 함양 지역(recharge area)에 위치한 산지 6개 공(Case A), 중간 지역(intermediate area)에 위치한 평지 5개 공(Case B), 그리고 유출 지역(discharge area)에 위치한 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D) 등 총 네 가지 경우의 주입 위치 또는 배열(configuration)을 고려하였다. 네 가지 담수 주입 위치 경우별로 선정된 담수 주입정의 위치는 그림 4에 도시되어 있다. 그림에서 보다시피 해안 7개 공(Case D)은 수영강 서쪽 어귀에 위치하는 방치공 1개의 효과를 파악하기 위하여 해안 6개 공(Case C)에 이를 더 추가한 경우이다. 그리고 담수 주입 심도(injection depth)의 효과를 평가하기 위하여 각 담수 주입정의 위치에서 해수면 기준 기존 굴착 심도(boring depth) (Case a) (Pukyong National University, 2009), -100 m (Case

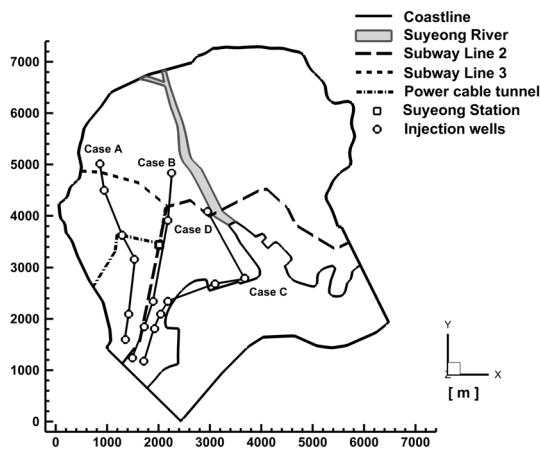


Fig. 4. Locations of fresh water injection (wells) for Case A (6 injection wells in the mountain area), Case B (5 injection wells in the plain area), Case C (6 injection wells in the coast area), and Case D (7 injection wells in the coast area).

b), -200 m (Case c), -300 m (Case d), -400 m (Case e), -500 m (Case f) 및 -600 m (Case g) 등 총 일곱 가지

지 경우의 주입 심도를 고려하였다. 또한 담수 주입률 (injection rate)의 효과를 평가하기 위하여 각 담수 주입정의 위치에서 지하철로 유출되는 지하수량(2,231 m³/day) (Busan Transportation Corporation, 2008)의 25% (Case 1), 50% (Case 2), 75% (Case 3) 및 100% (Case 4) 등 총 네 가지 경우의 주입률을 고려하였다. 따라서 담수 주입 이후 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 비정상 상태 수치 모델링에 사용되는 담수 주입 시나리오는 총 112 (4 × 7 × 4)가지이다. 담수 주입 시나리오별 담수 주입 위치, 주입 심도 및 주입률은 표 3에 정리되어 있다.

6.3 담수 주입 수치 모델링 결과

6.3.1 지하수면 변화

담수 주입 이후의 비정상 상태 수치 모델링 결과는 연구 지역 해안 대수층 내의 지하수 유동이 담수 주입 약 300년 후에 새로운 정상 상태에 도달함을 보여준다. 산지 6개 공(Case A), 평지 5개 공(Case B), 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D)에서

Table 3. Fresh water injection scenarios.

Injection rate [m ³ /day]	Injection depth [m]						
	Boring depth	-100	-200	-300	-400	-500	-600
Case A: 6 injection wells in the mountain area (-75.0, -235.0, 22.0, 21.0, -52.7, -22.3)							
557.75	Case A-1-a	Case A-1-b	Case A-1-c	Case A-1-d	Case A-1-e	Case A-1-f	Case A-1-g
1,115.50	Case A-2-a	Case A-2-b	Case A-2-c	Case A-2-d	Case A-2-e	Case A-2-f	Case A-2-g
1,673.25	Case A-3-a	Case A-3-b	Case A-3-c	Case A-3-d	Case A-3-e	Case A-3-f	Case A-3-g
2,231.00	Case A-4-a	Case A-4-b	Case A-4-c	Case A-4-d	Case A-4-e	Case A-4-f	Case A-4-g
Case B: 5 injection wells in the plain area (-142.0, -155.0, -81.0, -294.0, -196.0)							
557.75	Case B-1-a	Case B-1-b	Case B-1-c	Case B-1-d	Case B-1-e	Case B-1-f	Case B-1-g
1,115.50	Case B-2-a	Case B-2-b	Case B-2-c	Case B-2-d	Case B-2-e	Case B-2-f	Case B-2-g
1,673.25	Case B-3-a	Case B-3-b	Case B-3-c	Case B-3-d	Case B-3-e	Case B-3-f	Case B-3-g
2,231.00	Case B-4-a	Case B-4-b	Case B-4-c	Case B-4-d	Case B-4-e	Case B-4-f	Case B-4-g
Case C: 6 injection wells in the coast area (-175.0, -91.0, -94.0, -15.0, -119.0, -118.0)							
557.75	Case C-1-a	Case C-1-b	Case C-1-c	Case C-1-d	Case C-1-e	Case C-1-f	Case C-1-g
1,115.50	Case C-2-a	Case C-2-b	Case C-2-c	Case C-2-d	Case C-2-e	Case C-2-f	Case C-2-g
1,673.25	Case C-3-a	Case C-3-b	Case C-3-c	Case C-3-d	Case C-3-e	Case C-3-f	Case C-3-g
2,231.00	Case C-4-a	Case C-4-b	Case C-4-c	Case C-4-d	Case C-4-e	Case C-4-f	Case C-4-g
Case D: 7 injection wells in the coast area (-175.0, -91.0, -94.0, -15.0, -119.0, -118.0, -197.0)							
557.75	Case D-1-a	Case D-1-b	Case D-1-c	Case D-1-d	Case D-1-e	Case D-1-f	Case D-1-g
1,115.50	Case D-2-a	Case D-2-b	Case D-2-c	Case D-2-d	Case D-2-e	Case D-2-f	Case D-2-g
1,673.25	Case D-3-a	Case D-3-b	Case D-3-c	Case D-3-d	Case D-3-e	Case D-3-f	Case D-3-g
2,231.00	Case D-4-a	Case D-4-b	Case D-4-c	Case D-4-d	Case D-4-e	Case D-4-f	Case D-4-g

Note: The numbers in parentheses indicate the boring depths of fresh water injection wells above the sea level from the southernmost one in each location case (Cases A, B, C, D) of fresh water injection (wells) as illustrated in Fig. 4.

최대 주입 심도 -600 m (Case g)에 지하철로 유출되는 지하수량의 25% (Case 1) (최소 주입률) 및 100% (Case 4) (최대 주입률)를 주입하였을 때 300년 후의 지하수면 분포가 각각 그림 5 및 그림 6에 도시되어 있다. 해안 대수층 내의 지하수면 변화는 담수 주입 위치에 따라서 크게 달라진다. 지하수면 상승(groundwater table rise)에 가장 효과적인 담수 주입 위치는 산지 6개 공(Case A)이며, 평지 5개 공(Case B), 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D) 순으로 지하수면이 상승하는 정도가 줄어든다. 산지 6개 공(Case A)에서 담수를 주입하는 경우 주입률에 따라 지하수면이 가장 많이 상승한다(그림 5a, 6a). 특히 산지 6개 공에서 -600 m 심도에 지하철로 유출되는 지하수량의 100% (Case A-4-g)를 주입하는 경우 주입정 부근만이 아니라 산지 전체의 지하수면이 크게 상승하여 도시화 이후에 급격히 낮아졌던 지하철 노선 및 양수정 밀집 지역에서의 지하수면이 주변 지역과 동일한 정도로 회복된다(그림 6a). 그 이유는 산지 6개 공(Case A)이 불포화대가 두껍게 존재하는 함양 지역에 위치해 있기 때문이다. 평지 5개 공(Case B), 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D)에서 담수를 주입하는 경우 지하수면이 상승하는 효과가 줄어들고 주입률에 따른 차이도 작아진다(그림 5b, 5c, 5d, 6b, 6c, 6d). 그 이유는 평지 5개 공(Case B), 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D)이 중간 지역 및 유출 지역에 위치해 있기 때문이다. 이러한 경우 주입된 담수의 대부분이 빠른 시간 내에 다시 바다로 빠져 나간다. 또한 평지 5개 공(Case B), 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D)에서 담수를 주입하는 경우 수영구 내의 지하철 2호선(Line 2)과 전력구 터널 사이의 지하수면이 상승한다(그림 5b, 5c, 5d, 6b, 6c, 6d). 이는 평지 5개 공(Case B), 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D)에서 담수를 주입하면 주입정 부근의 수리 수두가 높아져 산지에서 해안으로의 지하수 유동이 저지되기 때문이다. 한편 산지 6개 공(Case A), 평지 5개 공(Case B), 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D)에서 담수를 주입하여도 수영강 동쪽에 있는 해운대구 지역의 지하수면은 변화가 없다(그림 5, 6). 이는 상기한 바와 같이 연구 지역의 가운데를 가로 지르고 있는 수영강이 이득 하천으로 작용하기 때문이다.

6.3.2 해수 표준화 염분 농도 0.03 등치면 변화

담수 주입 이후의 비정상 상태 수치 모델링 결과는 연구 지역 해안 대수층 내의 염분 이동이 담수 주입 약 5,000년 후에 새로운 정상 상태에 도달함을 보여준다. 산지 6개 공(Case A), 평지 5개 공(Case B), 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D)에서 최대 주입 심도 -600 m (Case g)에 지하철로 유출되는 지하수량의 25% (Case 1) (최소 주입률) 및 100% (Case 4) (최대 주입률)를 주입하였을 때 5,000년 후의 해수 표준화 염분 농도 0.03 등치면 분포가 각각 그림 7 및 그림 8에 도시되어 있다. 해안 대수층 내의 해수 표준화 염분 농도 0.03 등치면 변화는 담수 주입 위치에 따라 크게 달라진다. 해수 후퇴(seawater regression)에 가장 효과적인 담수 주입 위치는 해안 7개 공(Case D)이며, 해안 6개 공(Case C), 평지 5개 공(Case B) 및 산지 6개 공(Case A) 순으로 해수가 후퇴하는 정도가 줄어든다. 산지 6개 공(Case A)에서 담수를 주입하는 경우 수영구 지역에 침투한 해수는 수영구 내의 지하철 2호선 부근까지 후퇴한다(그림 7a, 8a). 하지만 산지 6개 공(Case A)에서 담수를 주입하는 경우 해수 후퇴의 정도가 가장 작고 주입률에 따른 차이도 작다(그림 7a, 8a). 그 이유는 산지 6개 공(Case A)이 해수 침투 지역에서 가장 멀리 위치해 있기 때문이다. 평지 5개 공(Case B), 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D)에서 담수를 주입하는 경우 주입률에 따라 해수 후퇴의 정도가 크게 달라진다(그림 7b, 7c, 7d, 8b, 8c, 8d). 그 이유는 평지 5개 공(Case B), 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D)이 모두 해수 침투 지역에 위치해 있기 때문이다. 또한 평지 5개 공, 해안 6개 공 및 해안 7개 공에서 -600 m 심도에 지하철로 유출되는 지하수량의 25% (Cases B-1-g, C-1-g, D-1-g)를 주입하는 경우 주입정 주변에서 원형의 담수체를 형성하지만 수영구 산지까지 침투한 해수는 바다 쪽으로 크게 후퇴하지 않는다(그림 7b, 7c, 7d). 하지만 평지 5개 공, 해안 6개 공 및 해안 7개 공에서 -600 m 심도에 지하철로 유출되는 지하수량의 100% (Cases B-4-g, C-4-g, D-4-g)를 주입하는 경우 수영구 산지까지 침투한 해수는 바다 쪽으로 크게 후퇴한다(그림 8b, 8c, 8d). 특히 지하철 2호선과 전력구 터널이 만나는 수영역(Suyeong Station)을 기준으로 서쪽에 분포해 있던 해수가 바다 쪽으로 크게 후퇴한다(그림 8b,

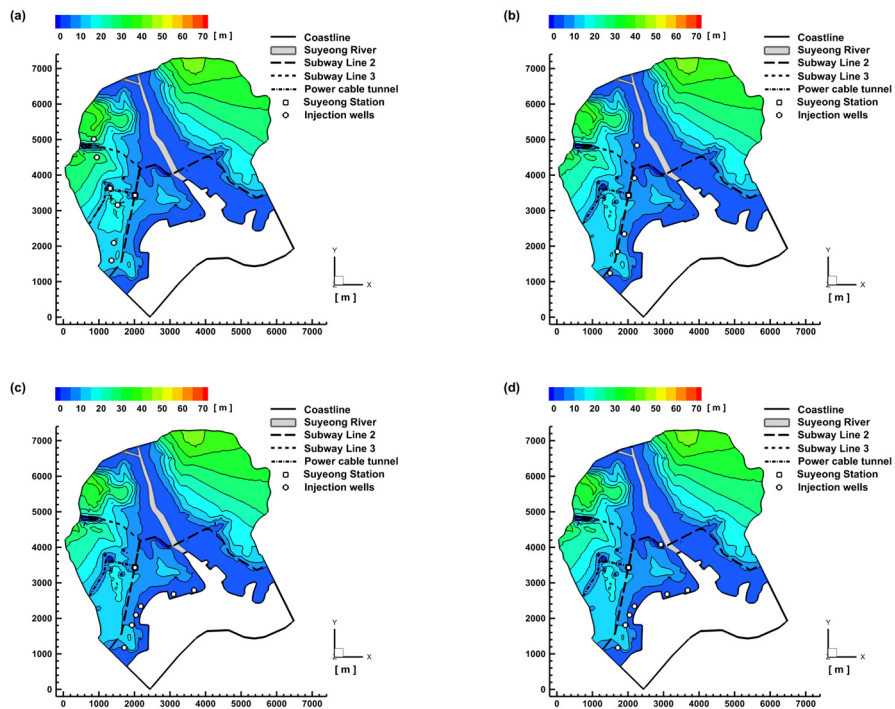


Fig. 5. Final steady-state spatial distributions of groundwater table (zero reference pressure head) after 300 years of fresh water injection in the coastal aquifer for (a) Case A-1-g, (b) Case B-1-g, (c) Case C-1-g, and (d) Case D-1-g.

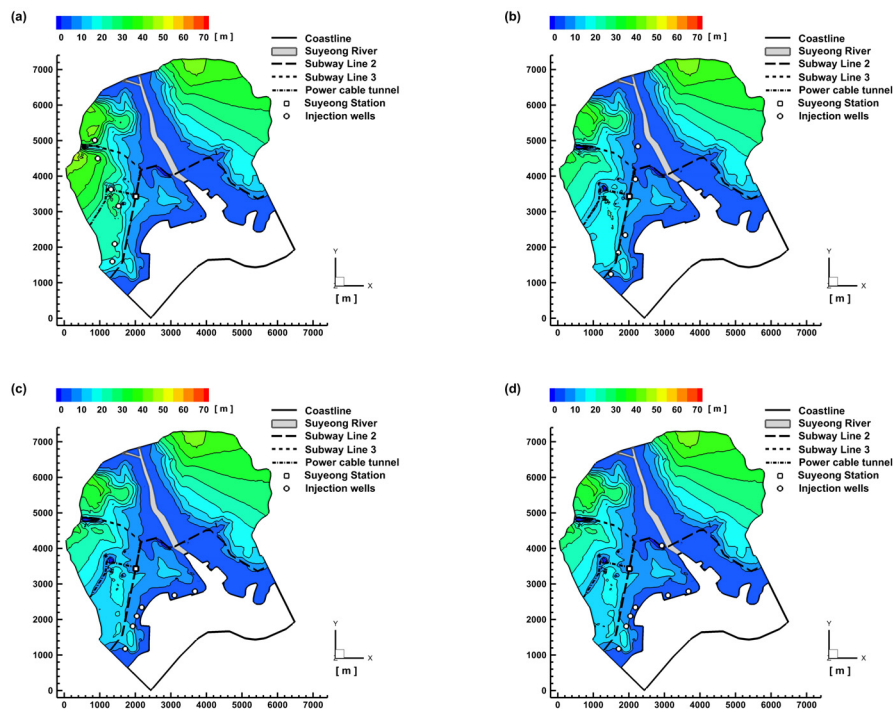


Fig. 6. Final steady-state spatial distributions of groundwater table (zero reference pressure head) after 300 years of fresh water injection in the coastal aquifer for (a) Case A-4-g, (b) Case B-4-g, (c) Case C-4-g, and (d) Case D-4-g.

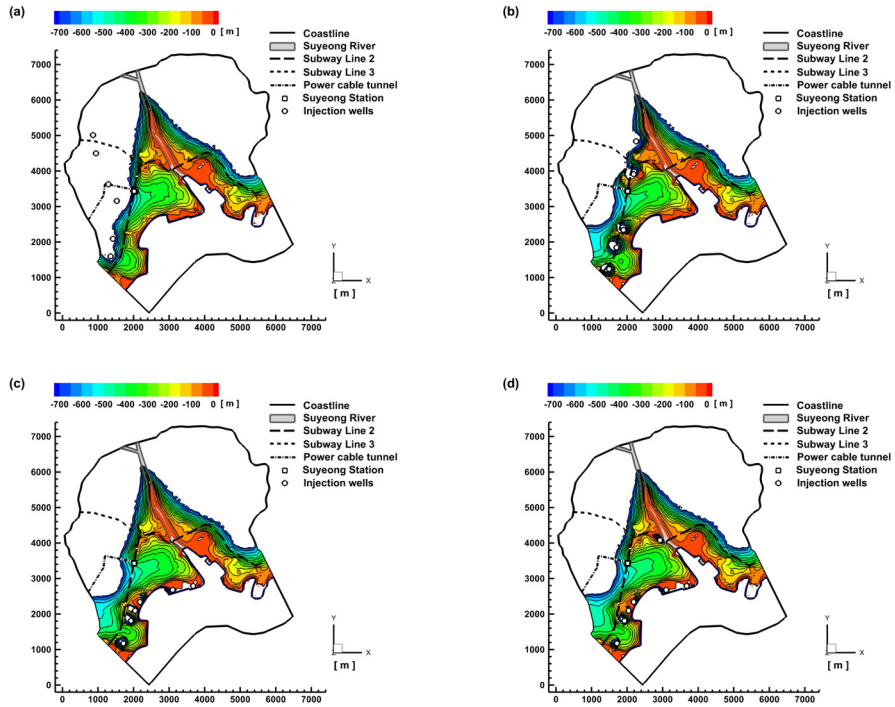


Fig. 7. Final steady-state spatial distributions of isosurface of seawater-normalized salt concentration of 0.03 after 5,000 years of fresh water injection in the coastal aquifer for (a) Case A-1-g, (b) Case B-1-g, (c) Case C-1-g, and (d) Case D-1-g.

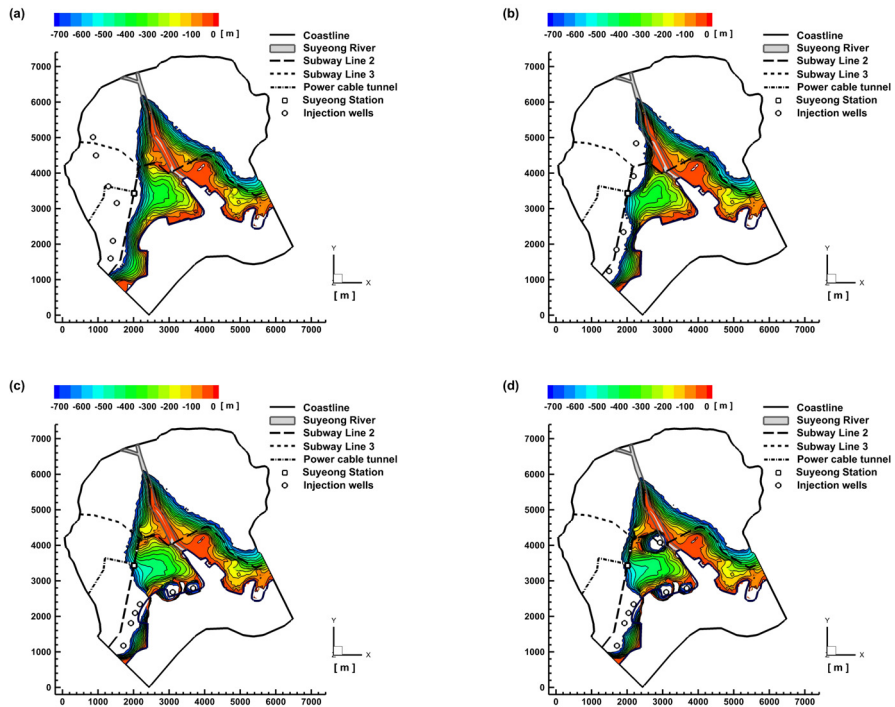


Fig. 8. Final steady-state spatial distributions of isosurface of seawater-normalized salt concentration of 0.03 after 5,000 years of fresh water injection in the coastal aquifer for (a) Case A-4-g, (b) Case B-4-g, (c) Case C-4-g, and (d) Case D-4-g.

8c, 8d). 이는 지하철 2호선 주변에 선상으로 배열되어 있는 평지 5개 공(Case B), 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D)에 주입된 담수가 해수 침투를 효과적으로 차단하기 때문이다. 한편 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D)에서 담수를 주입하는 경우 나타나는 특징적인 현상은 수영강 및 해운대구 지역에 침투한 해수가 더 바다 쪽으로 후퇴하는 것이다(그림 7c, 7d, 8c, 8d). 특히 해안 7개 공(Case D)에서 담수를 주입하는 경우 이러한 현상은 더욱 뚜렷하다(그림 7d, 8d). 이는 산지 6개 공(Case A) 및 평지 5개 공(Case B)보다 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D)이 수영강 및 해운대구 지역에 더 가까이 위치해 있기 때문이다.

6.3.3 총지하수량 변화

담수 주입 시나리오에 따른 최종 정상 상태에서의 총지하수량(부피) 변화가 그림 9에 도시되어 있다. 담수 주입에 의한 해안 대수층 내의 총지하수량(total groundwater volume) 변화는 담수 주입 위치, 주입률 및 주입 심도 순서로 민감하게 반응한다. 해안 대수층 내의 총지하수량 증가에 가장 효과적인 담수 주입 위치는 함양 지역에 위치한 산지 6개 공(Case A)이며, 중간 지역에 위치한 평지 5개 공(Case B)과 유출 지역에 위치한 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D) 순서로 그 효과는 줄어든다. 특히 산지 6개 공에서 굴착 심도에 지하철로 유출되는 지하수량의 100% (Case A-4-a)를 주입하는 경우 해안 대수층 내의 총지하수량이 도시화 이전 상태로 회복된다(그림 9a). 그 이유는 산지에는 불포화대가 두껍게 존재하며, 산지 6개 공 중 굴착 심도가 가장 깊은 하나의 공을 제외한 5개 공에서의 굴착 심도와 지하수면 사이 평균 거리가 약 37 m로 비교적 가깝기 때문이다. 또한 산지 6개 공(Case A) 및 평지 5개 공(Case B)에서 담수를 주입하는 경우 주입률이 증가할수록 총지하수량이 증가하며, 특히 이러한 현상은 함양 지역에 위치한 산지 6개 공(Case A)에서 담수를 주입하는 경우 더욱 뚜렷하다(그림 9a, 9b). 하지만 유출 지역에 위치한 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D)에서 담수를 주입하는 경우 주입률이 증가하여도 총지하수량은 거의 변화하지 않는다(그림 9c, 9d). 이는 상기한 바와 같이 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D)에

주입된 담수의 대부분이 빠른 시간 내에 다시 바다로 빠져 나가기 때문이다. 한편 총지하수량에 대한 주입 심도의 영향을 살펴보면 산지 6개 공(Case A) 및 평지 5개 공(Case B)에서 담수를 주입하는 경우 주입률이 증가할수록 주입 심도에 따른 영향이 커지지만(그림 9a, 9b) 이와는 반대로 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D)에서 담수를 주입하는 경우 주입률이 증가하여도 주입 심도에 따른 영향이 거의 나타나지 않는다(그림 9c, 9d).

6.3.4 총염분량 변화

담수 주입 시나리오에 따른 최종 정상 상태에서의 총염분량(질량) 변화가 그림 10에 도시되어 있다. 담수 주입에 의한 해안 대수층 내의 총염분량(total salt mass) 변화는 담수 주입 위치, 주입률 및 주입 심도 순서로 민감하게 반응한다. 해안 대수층 내의 총염분량 감소에 가장 효과적인 담수 주입 위치는 해수 침투가 상당히 진행된 곳에 위치한 해안 7개 공(Case D)이며, 해안 6개 공(Case C), 평지 5개 공(Case B) 및 산지 6개 공(Case A) 순서로 그 효과는 줄어든다. 특히 산지 6개 공(Case A)은 해수 침투 지역에서 가장 멀리 위치해 있기 때문에 주입 심도 및 주입률 변화에 따른 총염분량 변화의 차이가 작다(그림 10a). 하지만 해수 침투가 상당히 진행된 곳에 위치한 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D)에서 담수를 주입하는 경우 주입 심도 및 주입률 변화에 따른 총염분량 변화의 차이가 매우 크다(그림 10c, 10d). 또한 모든 담수 주입 위치에서 주입 심도가 증가할수록 해안 대수층 내의 총염분량이 감소한다(그림 10a, 10b, 10c, 10d). 이는 담수와 해수의 밀도 차이로 인해 해안 대수층 아래로 갈수록 해수 침투가 더 많이 진행되기 때문이다. 따라서 동일한 양의 담수를 보다 깊은 곳에 주입할수록 해안 대수층 내의 총염분량이 더 감소한다. 그리고 모든 담수 주입 위치에서 주입률이 증가할수록 해안 대수층 내의 총염분량이 감소한다(그림 10a, 10b, 10c, 10d). 한편 해안 6개 공(Case C)에서 -400 m 심도에 지하철로 유출되는 지하수량의 82%, -500 m 심도에 지하철로 유출되는 지하수량의 65%, -600 m 심도에 지하철로 유출되는 지하수량의 55%를 각각 주입하는 경우 해안 대수층 내의 총염분량은 도시화 이전 상태로 회복될 수 있다(그림 10c). 그리고 해안 7개

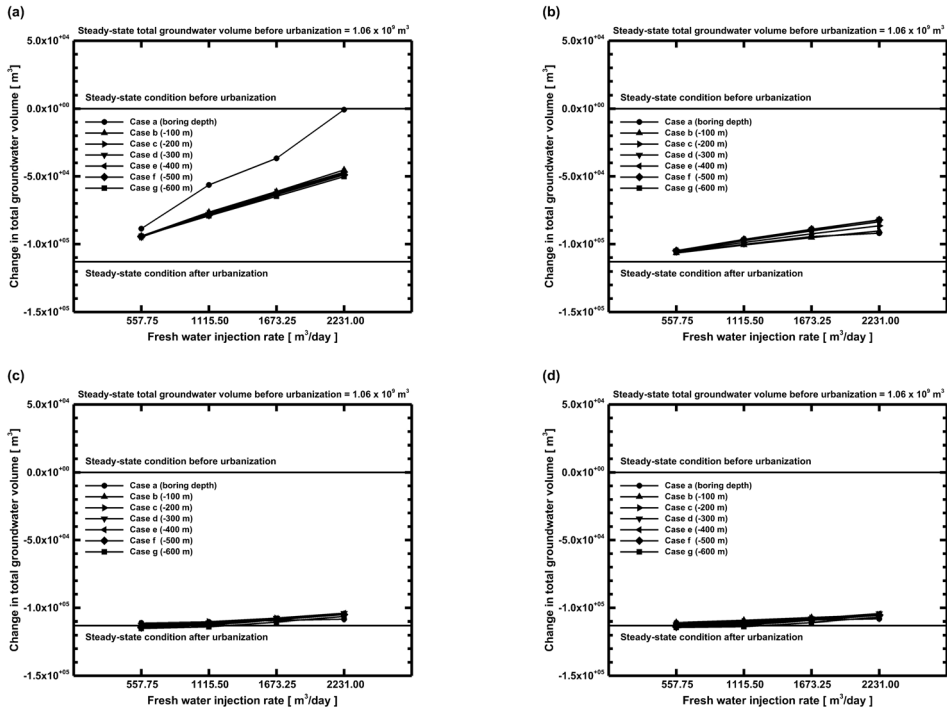


Fig. 9. Changes in total groundwater amount (volume) in the coastal aquifer for (a) Case A, (b) Case B, (c) Case C, and (d) Case D.

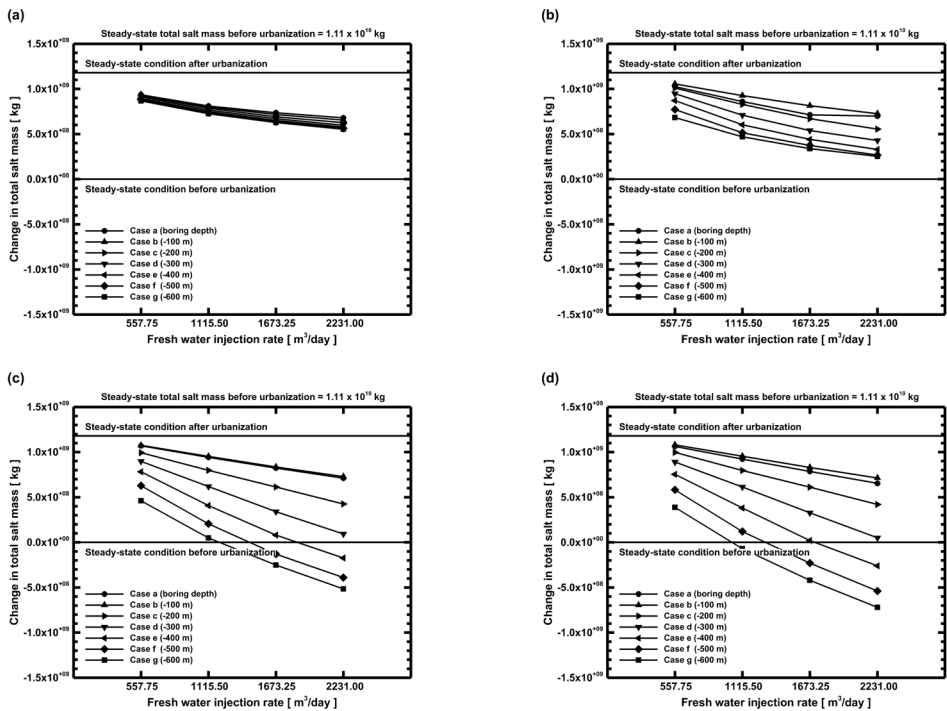


Fig. 10. Changes in total salt amount (mass) in the coastal aquifer for (a) Case A, (b) Case B, (c) Case C, and (d) Case D.

공(Case D)에서 -400 m 심도에 지하철로 유출되는 지하수량의 75%, -500 m 심도에 지하철로 유출되는 지하수량의 57%, -600 m 심도에 지하철로 유출되는 지하수량의 45%를 각각 주입하는 경우 해안 대수층 내의 총염분량은 도시화 이전 상태로 회복될 수 있다(그림 10d). 하지만 위의 제시된 양보다 더 많은 양의 담수를 주입하면 해안 대수층 내의 총염분량이 도시화 이전보다 더 작아지는 해수 침투 과잉 개선의 가능성이 있다.

7. 결론

한국 부산광역시 수영구 지역의 도시화에 의한 해안 대수층 내의 해수 침투 저감을 위한 담수 주입 기법의 영향을 효과적으로 예측하고 정량적으로 평가하기 위하여 범용 다차원 수리동역학적 분산 수치 모델을 이용한 일련의 밀도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동 삼차원 수치 모델링을 수행하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 먼저 기존의 폐공 및 방치공을 활용한 총 112 ($4 \times 7 \times 4$)가지의 다양한 담수 주입 시나리오(주입 위치, 주입 심도, 주입률)를 설계하였다. 또한 본 연구에서는 동일한 연구 지역에 대한 기존 연구에서 사용한 것과 동일한 도시화 요소, 삼차원 지층 모델, 유한 요소망, 경계 조건, 내부 조건, 지질 매체와 불투수성 피복의 물성 값 및 지질 매체 내 절리군의 특성을 고려하였다. 수치 모델링 결과들은 담수 주입에 의해 해안 대수층 내의 밀도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동이 크게 영향을 받음을 보여준다. 담수 주입에 의해 특히 산지 및 평지의 지하수면이 전반적으로 상승하며, 도시화에 의해 산지까지 침투한 해수는 해안 쪽으로 크게 후퇴한다. 그리고 담수 주입에 의한 해안 대수층 내의 총지하수량(부피) 증가 및 총염분량(질량) 감소는 담수 주입 위치, 주입률 및 주입 심도 순서로 민감하게 반응한다. 총지하수량 증가에 가장 효과적인 담수 주입 위치는 산지 6개 공(Case A)이며, 담수 주입 위치가 산지에서 해안 쪽으로 이동할수록 그 효과는 감소한다. 산지 6개 공(Case A) 또는 평지 5개 공(Case B)에서 담수를 주입하는 경우 그 주입률이, 그리고 다음으로 주입 심도가 증가할수록 총지하수량이 증가한다. 하지만 해안 6개 공(Case C) 또는 해안 7개 공(Case D)에서 담수를 주입하는 경우 그 주입률이,

그리고 다음으로 주입 심도가 증가하여도 총지하수량은 거의 증가하지 않는다. 총염분량 감소에 가장 효과적인 담수 주입 위치는 해안 7개 공(Case D)이며, 담수 주입 위치가 해안에서 산지 쪽으로 이동할수록 그 효과는 감소한다. 모든 담수 주입 위치(Cases A, B, C, D)에서 담수를 주입하는 경우 그 주입률이, 그리고 다음으로 주입 심도가 증가할수록 총염분량이 감소한다. 그러한 경향은 담수 주입 위치가 산지에서 해안 쪽으로 이동할수록 더욱 뚜렷하다. 특히 해안 6개 공(Case C) 및 해안 7개 공(Case D)에서 -400~-600 m 심도에 지하철로 유출되는 지하수량의 82~45%를 각각 주입하는 경우 총염분량은 도시화 이전 상태로 회복될 수 있다. 하지만 위의 제시된 양보다 더 많은 양의 담수를 주입하면 총염분량이 도시화 이전보다 더 작아지는 해수 침투 과잉 개선의 가능성이 있다. 이러한 수치 모델링 결과들은 담수 주입 기법이 도시화에 의한 도시 해안 대수층 내의 해수 침투 저감에 매우 효과적임을 보여준다. 따라서 본 연구에서 제시된 수치 모델링 기술 및 담수 주입 기법은 도시화에 의한 도시 해안 지하수 관리 및 해수 침투 저감에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 교육과학기술부 산하 한국연구재단의 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 본 연구는 또한 부분적으로 교육과학기술부 산하 한국연구재단의 Brain Korea 21 사업 지원에 의해 수행되었습니다. 아울러 본 논문의 편집위원을 맡아주신 이진용 교수님, 그리고 심사 과정에서 발전적인 조언과 비판을 해주신 익명의 두 심사자님께 깊은 감사를 드립니다. 끝으로 본 논문의 그림 제작을 도와준 서울대학교 지구환경과학부 이성호 학생과 박재용 학생에게도 진심어린 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Abd-Elhamid, H.F. and Javadi, A.A., 2008, An investigation into control of saltwater intrusion considering the effects of climate change and sea level rise. Proceedings of the Twentieth Salt Water Intrusion

- Meeting (SWIM), Naples, Florida, USA, June 23-27, 4-7.
- Abd-Elhamid, H.F. and Javadi, A.A., 2010, A simulation-optimization model to study the control of seawater intrusion in coastal aquifers using ADR methodology. Proceedings of the Twenty-First Salt Water Intrusion Meeting (SWIM), Azores, Portugal, June 21-26, 173-176.
- Atkinson, S.F., Miller, G.D., Curry, D.S. and Lee, S.B. (eds.), 1986, Salt Water Intrusion: Status and Potential in the Contiguous United States. Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, USA, 390 p.
- Barlow, P.M., 2003, Ground water in freshwater-saltwater environments of the Atlantic coast. Circular 1262, United States Geological Survey, Reston, Virginia, USA, 113 p.
- Booh, S.A., Song, S.H., Lee, G.S., Kim, J.S. and Kim, H.B., 2005, A study on prevent seawater intrusion and artificial groundwater recharge. Technical Report, Rural Research Institute (RRI), Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation (KARICO), Ansan, Korea, 55 p (in Korean).
- Bouri, S. and Dhia, H.B., 2010, A thirty-year artificial recharge experiment in a coastal aquifer in an arid zone: The Teboulba aquifer system (Tunisian Sahel). *Comptes Rendus Geoscience*, 342, 60-74.
- Busan Transportation Corporation, 2008, Data of groundwater discharge of the Busan Subway. Unpublished Data, Busan Transportation Corporation (BTC), Busan, Korea, various pages (in Korean).
- Chang, T.W., Kang, P.C., Park, S.H., Hwang, S.K. and Lee, D.W., 1983, Explanatory text of the geological map of Busan-Gadeog sheet, Scale 1:50,000. Technical Report Sheet-7019-III & Sheet-6919-II, Korea Institute of Energy and Resources (KIER), Seoul, Korea, 47 p, 2 map sheets (in Korean and English).
- Cho, H.J. and Kim, J.M., 2009, Three-dimensional numerical simulation of impacts of urbanization on groundwater flow and salt transport in a coastal aquifer, Suyeong-Gu, Busan, Korea. *Journal of the Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 14, 1-18 (in Korean with English abstract).
- 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. *Journal of Hydrology*, 340, 91-104.
- Guo, W. and Langevin, C.D., 2002, User's guide to SEAWAT: A computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A7. Technical Report TWI 6-A7, United States Geological Survey, Tallahassee, Florida, USA, 77 p.
- Izbicki, J.A., Petersen, C.E., Glotzbach, K.J., Metzger, L.F., Christensen, A.H., Smith, G.A., O'Leary, D., Fram, M.S., Joseph, T. and Shannon, H., 2010, Aquifer Storage Recovery (ASR) of chlorinated municipal drinking water in a confined aquifer. *Applied Geochemistry*, 25, 1133-1152.
- Kim, H.S., Baik, K.H., Hahn, C., Ryu, J., Park, H. and Won, J.H., 1998, A study on artificial groundwater recharge and enlargement of groundwater use (1st year). Interim Report WRRI-GG-98-4, Water Resources Research Institute (WRRI), Korea Water Resources Corporation (KWRC), Daejeon, Korea, 104 p (in Korean with English bibliographic data sheet).
- Kim, H.S. and Hamm, S.Y., 2003, Development of artificial groundwater recharge technologies. Proceedings of the Symposium on Sustainable Development, Utilization, and Management of Twenty-First Century Groundwater Resources, Daejeon, Korea, May 30, 39-55 (in Korean).
- Kim, J.M. and Yeh, G.T., 2004, COFAT3D: A finite element model for fully coupled groundwater flow and solute and heat transport in three-dimensional saturated-unsaturated porous and fractured media, version 1.0. Technical Report GGEL-2004-12, Geological and Groundwater Engineering Laboratory, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea, 404 p.
- Masciopinto, C., 2006, Simulation of coastal groundwater remediation: The case of Nardò fractured aquifer in Southern Italy. *Environmental Modelling and Software*, 21, 85-97.
- Misut, P.E. and Voss, C.I., 2007, Freshwater-saltwater transition zone movement during aquifer storage and recovery cycles in Brooklyn and Queens, New York City, USA. *Journal of Hydrology*, 337, 87-103.
- Nishikawa, T., Siade, A.J., Reichard, E.G., Ponti, D.J., Canales, A.G. and Johnson, T.A., 2009, Stratigraphic controls on seawater intrusion and implications for groundwater management, Dominguez Gap area of Los Angeles, California, USA. *Hydrogeology Journal*, 17, 1699-1725.
- Oh, C.S. and Kim, J.M., 2008, Three-dimensional numerical simulation of groundwater flow and salt and radionuclide transport at a low and intermediate level radioactive waste disposal site in Gyeongju, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 44, 489-505 (in Korean with English abstract).
- Park, H.S., Kihm, J.H., Yum, B.W. and Kim, J.M., 2008, Three-dimensional numerical simulation of impacts of

- layered heterogeneity and groundwater pumping schemes on seawater intrusion. *Journal of the Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 13, 8-21 (in Korean with English abstract).
- Park, J.H., Kihm, J.H., Kim, H.T. and Kim, J.M., 2008, Three-dimensional numerical simulation of impacts of fault existence on groundwater flow and salt transport in a coastal aquifer, Buan, Korea. *Journal of the Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 13, 33-46 (in Korean with English abstract).
- Park, K.G., Shin, J., Hwang, S. and Park, I., 2007, Fresh water injection test to mitigate seawater intrusion and geophysical monitoring in coastal area. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 10, 353-360 (in Korean with English abstract).
- Parsons, R.W., 1966, Permeability of idealized fractured rock. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 6, 126-136.
- Phien-wej, N., Giao, P.H. and Nutalaya, P., 1998, Field experiment of artificial recharge through a well with reference to land subsidence control. *Engineering Geology*, 50, 187-201.
- Pukyong National University, 2009, Investigation data of pumping wells in Suyeong-Gu, Busan. Unpublished Data, Pukyong National University (PNU), Busan, Korea, various pages (in Korean).
- Shin, J. and Byun, J., 2010, Fresh water injection test in a fractured bedrock aquifer for the mitigation of seawater intrusion. *Economic and Environmental Geology*, 43, 371-379 (in Korean with English abstract).
- Snow, D.T., 1968, Rock fracture spacings, openings, and porosities. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 94, 73-91.
- Snow, D.T., 1969, Anisotropic permeability of fractured media. *Water Resources Research*, 5, 1273-1289.
- Son, C.M., Lee, S.M., Kim, Y.K., Kim, S.W. and Kim, H.S., 1978, Explanatory text of the geological map of Dongrae and Weolnae sheets, Scale 1:50,000. Technical Report Sheet-7019-IV & Sheet-7019-I, Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources (KRIGMR), Seoul, Korea, 44 p, 1 map sheet (in Korean and English).
- van Genuchten, M.Th., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- Voss, C.I., 1984, SUTRA: A finite-element simulation model for saturated-unsaturated, fluid-density-dependent ground-water flow with energy transport or chemically-reactive single-species solute transport. Water-Resources Investigations Report 84-4369, United States Geological Survey, Reston, Virginia, USA, 409 p.
- Yeh, G.T., Cheng, J.R. and Cheng, H.P., 1994, 3DFEMFAT: A 3-dimensional finite element model of density-dependent flow and transport through saturated-unsaturated media, version 2.0. Technical Report, Department of Civil and Environmental Engineering, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, USA, 200 p.

Received : February 9, 2015

Revised : March 18, 2015

Accepted : March 18, 2015