

한국 부산광역시 수영구 지역 해안 대수층 내의 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 도시화의 영향 삼차원 수치 모의

조현조¹ · 김준모^{2*}

¹육군사관학교 토목환경학과, ²서울대학교 지구환경과학부

Three-Dimensional Numerical Simulation of Impacts of Urbanization on Groundwater Flow and Salt Transport in a Coastal Aquifer, Suyeong-Gu, Busan, Korea

Hyeon-Jo Cho¹ · Jun-Mo Kim^{2*}

¹Department of Civil Engineering and Environmental Sciences, Korea Military Academy, Seoul 139-799, Korea

²School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

ABSTRACT

A series of three-dimensional numerical simulations using a generalized multidimensional hydrodynamic dispersion numerical model is performed to simulate effectively and to evaluate quantitatively impacts of urbanization on density-dependent groundwater flow and salt transport in a coastal aquifer system, Suyeong-Gu, Busan, Korea. A series of steady-state numerical simulations of groundwater flow and salt transport before urbanization with material properties of geologic formations, which are established by numerical modeling calibrations considering all the urbanization factors, is performed first without considering all the urbanization factors. A series of transient-state numerical simulations of groundwater flow and salt transport after urbanization is then performed considering the urbanization factors individually and all together. Finally, the results of both numerical simulations are compared with each other and analyzed. The results of the numerical simulations show that density-dependent groundwater flow, salt transport, and seawater intrusion in the coastal aquifer system are intensively and extensively impacted by the urbanization factors. Especially, these urbanization factors result in the changes of the total groundwater volume and salt mass in the coastal aquifer system. However, such impacts of each urbanization factor are not spatially uniform but locally different.

Key words : Coastal aquifer, Urbanization, Groundwater flow, Salt transport, Seawater intrusion, Numerical simulation

요 약 문

한국 부산광역시 수영구 지역 해안 대수층 내의 밀도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 도시화의 영향을 효과적으로 모사하고 정량적으로 평가하기 위하여 하나의 범용 다차원 수리동역학적 분산 수치 모델을 이용한 일련의 삼차원 수치 모델링이 수행되었다. 먼저 모든 도시화 요소들을 고려한 수치 모델링 보정을 통해 확립된 연구 지역 해안 대수층의 지층 물성을 가지고, 도시화 요소들을 모두 고려하지 않은 도시화 이전의 지하수 유동과 염분 이동에 대한 정상 상태 수치 모델링을 수행하였다. 그 다음에 도시화 요소들을 개별적으로 그리고 통합적으로 고려한 도시화 이후의 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 비정상 상태 수치 모델링을 수행하였다. 그리고 두 수치 모델링 결과를 서로 비교하고 분석하였다. 수치 모델링 결과는 해안 대수층 내의 밀도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동 그리고 해수 침투가 이러한 도시화 요소들에 의해 크게 그리고 광범위하게 영향을 받음을 보여준다. 특히 이러한 도시화 요소

*Corresponding author : junmokim@snu.ac.kr

원고접수일 : 2009. 1. 14 심사일 : 2009. 1. 16 게재승인일 : 2009. 4. 1

질의 및 토의 : 2010. 2. 28 까지

들은 해안 대수층 내의 총지하수량 및 총염분량의 변화를 초래한다. 그러나 각 도시화 요소의 그러한 영향은 공간적으로 균일하지 않고 국부적으로 차별적이다.

주제어 : 해안 대수층, 도시화, 지하수 유동, 염분 이동, 해수 침투, 수치 모의

1. 서 론

도시화(urbanization)는 특정 지역으로 인구가 집중하여 도시적 특성이 확대되어 가는 과정으로서 수리학적 관점에서 보면 도로, 건물, 주거 및 상업 지역의 확대로 불투수성 피복(impermeable pavement)의 증가, 상·하수도 시설(waterworks and sewer facilities)의 확대, 지하수 양수(groundwater pumping)의 증가, 각종 지하 구조물(underground structure)로의 지하수 유출(groundwater discharge)의 증가, 각종 오염원(contamination source)에 의한 지반, 지표수 및 지하수의 오염, 그리고 공원 및 정원에서 과잉 관개(excessive irrigation) 등이 그 특징적인 요소가 된다. 일반적으로는 불투수성 피복의 증가로 강수 침투(rainfall infiltration)가 감소하여 지표 유출(surface runoff)이 증가하고 그에 따라 지하수 함양(groundwater recharge)이 감소하지만(Endreny, 2005) 일부 도시 지역에서는 상·하수도관(waterworks and sewerage pipelines)에서의 누수(leakage)가 발생하면서 오히려 지하수위(groundwater level)가 상승하여 지반 약화 등의 문제를 일으키기도 한다(Lawrence et al., 1998; Lerner, 2002). 또한 지하철(subway)과 같은 지하 구조물로의 지하수 유출(groundwater discharge)이 일어나면서 지하수위를 하강시키기도 하며(Kim et al., 2001), 각종 지하 구조물과 상·하수도관 등이 도시 지역 지하 공간을 마치 카르스트(karst) 지형과 유사하게 만들기도 한다(Garcia-Fresca and Sharp, 2005). 하지만 각 도시마다 이러한 도시화 요소들이 주는 영향이 상당히 다르기 때문에 한 도시 지역의 지하수 시스템을 이해하기 위해서는 해당 지역의 지질학적 및 수리지질학적 특성을 물론 도시화 요소들을 합리적으로 고려한 연구가 이루어져야 한다. Vázquez-Suñé et al.(2005)은 도시 지역의 지하수가 수리지질학 분야에서 하나의 새로운 분야로 부각되고 있음을 주목하고 도시 지역의 물 수지, 지하수에 대한 지하 구조물의 영향 및 지하수 오염 문제 등을 스페인 바르셀로나 지역의 사례를 중심으로 검토하였으며, Yang et al.(1999)은 영국 노팅엄 지역의 지하수 함양량을 정량화하는 연구에서 상·하수도 누수를 중요한 요소로 고려하였다. 한편 국내에서는 김윤영 외(1998)가 다양한 현장 관측 자료를 바탕으로 서울 지역 지하수 시스템을 분석하였고, Lee et al.(2007)은 대구 지역에서 지하철 건

설에 따른 지하수위 하강에 대한 연구를 수행하였으며, 이진용·구민호(2007)는 다양한 국내의 사례 등을 종합하여 도시화가 지하수에 미치는 전반적인 영향을 고찰하였다.

해안 대수층은 전 세계적으로 주요 담수 공급원이다. 하지만 해안 대수층은 인위적인 교란에 매우 민감하기 때문에 도시화가 진행되고 있는 많은 해안 지역에서 인간의 활동에 의해 해안 대수층 내 담수 자원이 양적으로나 질적으로나 모두 점점 파괴되고 있어 이에 대한 적절한 관리가 요구되고 있다(Cheng and Ouazar, 2004). 인간 활동에 의해 해안 대수층이 손상을 입는 대표적인 현상이 바로 해수 침투(seawater intrusion)이다. 해수 침투는 염수인 해수가 담수인 지하수계로 이동하는 현상으로서 일부 해안 지역에서는 오래전부터 해수 침투가 심화되어 해안 대수층이 염분에 의해 오염되는 문제가 발생하고 있다. 특히 미국에서는 대서양 연안을 따라 20세기 초부터 해수 침투가 발생해서 이에 대한 다양한 연구가 수행되어 왔으며, 많은 자료가 축적되어 왔다(Barlow and Wild, 2002; Barlow, 2003). 특히 2000년대에 들어서는 수리동역학적 분산 수치 모델(hydrodynamic dispersion numerical model)을 이용하여 해수 침투 현상을 규명하고 다양한 조건에 따른 반응을 예측하는 연구가 활발하게 수행되고 있다(Langevin, 2001; Masterson, 2004; Dausman and Langevin, 2005; Schneider and Kruse, 2005; Giambastiani et al., 2007; Misut and Voss, 2007). 수리동역학적 분산 수치 모델은 해수 침투를 규명하고 예측하는 데에 가장 효과적인 방법 중에 하나로 평가되고 있으며, 다양한 수리동역학적 분산 수치 모델(Voss, 1984; Yeh et al., 1994; Guo and Langevin, 2002)이 개발되어 실제 현장의 해수 침투 수치 모델링 연구에 활용되고 있다. 아시아 여러 나라에서도 이러한 수치 모델을 이용한 해수 침투 연구가 활발하게 이루어지고 있다(Gangopadhyay and Das Gupta, 1995; Cheng and Chen, 2001; Bobba, 2002; Qahman and Larabi, 2006). 국내에서도 수리동역학적 분산 수치 모델을 이용한 다양한 연구가 수행되고 있는데 그 중에서 박화석 외(2008)는 지질 매체의 층상 불균질성과 지하수 양수 방식이 해수 침투 양상에 미치는 영향을 분석하였고, 박주현 외(2008)는 부안 지역 해안 대수층 내 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 단층의 영향을 해석하였으며, 오찬성·김준모(2008)는 경주 중·저준위 방사성 폐기물 처분장 부지의

지형과 단층 및 절리뿐만 아니라 지하 처분장 시설들도 고려하여 지하수 유동과 염분 및 방사성 핵종 이동 양상을 평가하였다.

이와 같이 국내외에서 수리동역학적 수치 모델을 이용하여 해수 침투에 대한 다양한 연구가 수행되어 오고 있지만 아직까지 도시화 요소들을 종합적으로 고려한 해수 침투 수치 모델링 연구는 거의 전무하다. Schneider and Kruse(2005)는 작은 섬에서 몇몇 자연적 및 인위적 요인의 영향을 받는 담수 렌즈의 변화를 평가하였으며, Giambastiani et al.(2007)은 과거와 현재의 도시 및 산업 개발이 자유면 해안 대수층에서의 해수 침투 양상에 미치는 영향을 분석하였지만 이 두 연구 지역 모두 일반적인 도시 지역으로 보기는 어렵다. 한편 Misut and Voss(2007)는 향후 뉴욕에서의 대수층 저장 및 회수(aquifer storage and recovery)의 효과를 연구하기 위해 도시화에 의한 물 수지 변화량을 고려하여 수치 모델링을 수행하였지만 각 도시화 요소들을 세밀하게 반영하지는 못하였다.

본 연구의 목적은 하나의 범용 다차원 수리동역학적 분산 수치 모델을 이용한 일련의 삼차원 수치 모델링을 통하여 해안 대수층 내의 밀도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 각 도시화 요소들의 영향을 효과적으로 모사하고 정량적으로 평가하는 것이다. 해수 침투에 대한 이러한 도시화 요소들의 영향에 대한 수치 모델링 연구는 해안 도시 지역 지하수 시스템의 이해 및 지하수 자원의 최적 관리에 유용한 지침을 제공할 수 있다.

2. 수치 모델

본 연구에 사용된 수리동역학적 분산 수치 모델은 GMS (Groundwater Modeling System) 내에 포함되어 있는 3DFEMFAT Version 2.0(Yeh et al., 1994)으로부터 교육과학기술부 21세기 프론티어 수자원의 지속적 확보기술 개발사업(<http://www.swrrc.re.kr>) 연구 성과의 하나로 개발된 COFAT3D(Kim and Yeh, 2004)이다. 이 수치 모델은 범용 다차원 복합 유한요소 모델(generalized multidimensional hybrid Lagrangian-Eulerian finite element model)로서 복잡한 지질 구조와 경계를 가지는 포화-불포화 불균질 진이방성 다공질, 파쇄질 및 파쇄다공질 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 모의할 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 사용하고, 비선형 문제를 풀기 위해서 static and dynamic incremental Picard method를 사용하며, 선형화된 행렬 방정식의 해를 구하기 위해서는 5개의 matrix solver(1 direct and 4 iterative methods) 중 하나를 사용한다. 특히 본 연구에서는 iterative ICPCG(incomplete Cholesky LU decomposed preconditioned conjugate gradient) method를 사용하였으며, 압력 수두와 해수 표준화 염분 농도의 수렴 기준(convergence criterion)을 비선형 반복 단계(nonlinear iterations)에서는 각각 10^{-3} m와 10^{-3} 으로, 선형 반복 단계(linear iterations)에서는 각각 10^{-4} m와 10^{-4} 으로 설정하였다.

3. 연구 지역

3.1. 위치 및 지형

연구 지역은 행정 구역 상으로는 부산광역시 수영구를 중심으로 남구, 동래구, 부산진구, 연제구 및 해운대구에 속하고, 경위도 상으로는 동경 129° 07' 00", 북위 35° 10' 00" 인근에 위치한다(Fig. 1). 연구 지역의 남쪽은 동해와 접하고 있으며, 수영강이 연구 지역의 가운데를 가로 지르며, 북쪽에서 남쪽으로 흐르고 있다. 동해와 접한 해변에는 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 비교적 급한 경사의 산세를 지닌 유역(watershed), 즉 지하수계(groundwater divide)를 형성하고 있다(Fig. 1의 다각형 도형). 이러한 유역은 본 연구의 대상인 수영구 지역 해안 대수층의 수치 모델링 영역(numerical modeling domain)의 수평 범위를 설정해준다.

3.2. 지질학적 및 수리지질학적 특성

연구 지역의 지질은 하부로부터 백악기 퇴적암과 이를 분출·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(자원개발연구소, 1978; 한국동력자원연구소, 1983). 이들 지층

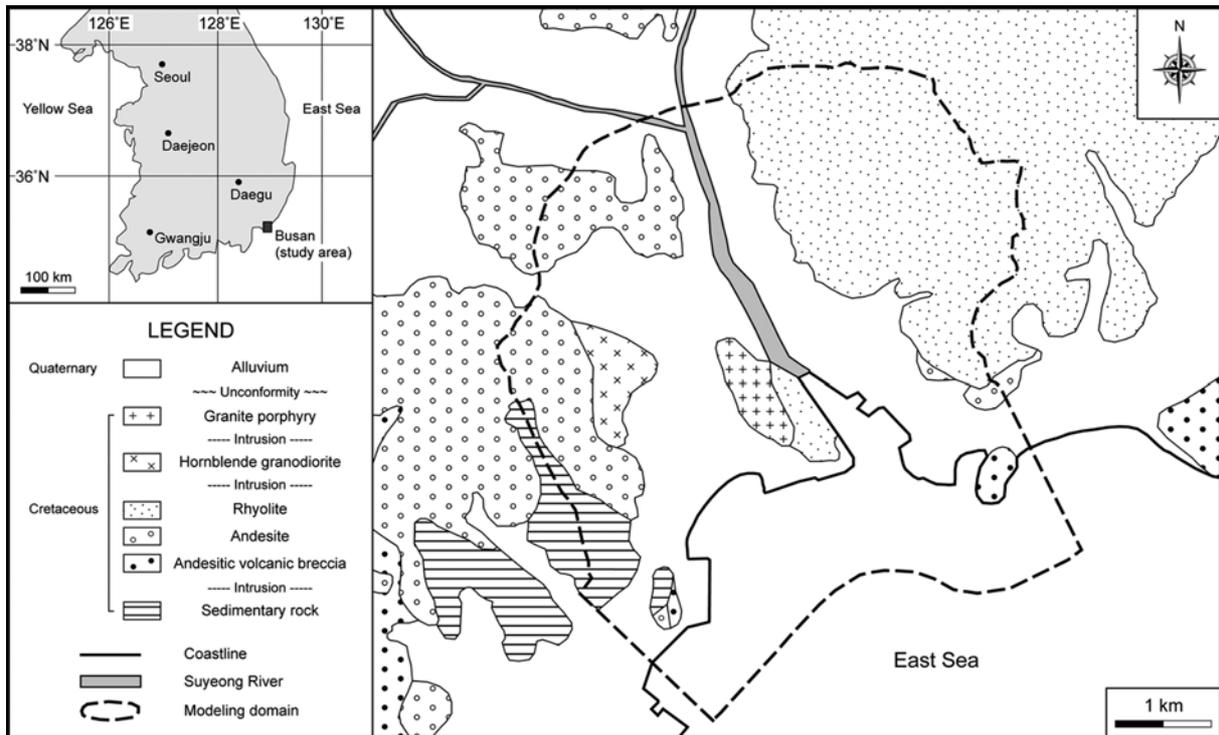


Fig. 1. Location and geologic maps of the study area.

은 다양한 방향의 많은 절리들을 포함하고 있어서 이 지역에 분포하는 해안 대수층은 수리지질학적으로 일련의 불균질 진이방성 지층들(heterogeneous and true anisotropic geologic formations), 즉 암체들(rock masses)로 구성되어 있다. 그리고 각각의 이방성 암체는 다공질 암석 기질(porous rock matrix)과 절리군(joint set)들로 구성되어 있어서 전체적으로 파쇄다공질 지질 매체(fractured porous geologic medium)로 작용한다.

3.3. 도시화 요소

Fig. 2는 해안 지역에서 도시화 이전과 이후의 물 순환(water cycle)을 개략적으로 나타낸다. 도시화 이전에는 크게 강수(precipitation), 증발산(evapotranspiration), 지표 유출(surface runoff), 침투(infiltration), 지하수 함양(groundwater recharge) 및 해안 지하수 유출(coastal groundwater discharge)의 과정을 거치면서 자연적인 물 순환을 이룬다(Fig. 2a). 하지만 도시화 이후에는 다양한 도시화 요소(urbanization factor)들에 의해 기존의 물 순환이 복잡하게 변화하여 새로운 물 순환을 형성한다(Fig. 2b).

연구 지역은 한국에서 두 번째로 인구가 많은 부산광역시 중심부에 위치하고 있다. 부산광역시는 예전부터 지리적인 위치상 군사 요충지이자 주요 항구였기 때문에 많

은 사람들이 모여 살고 있었다. 1876년 부산포 개항 이후 부산에 많은 산업 시설들이 세워지면서 도시적 면모를 보이기 시작하였으며, 일제 강점기와 한국 전쟁을 거쳐 1950년대 이후 급격한 산업 및 도시 발전을 거듭하여 지금은 전형적인 해안 대도시의 기능 체제를 갖추게 되었다.

연구 지역은 현재 도시화 이후를 나타내는 Fig. 2b와 같은 물 순환을 보이고 있다. 일부 산지를 제외한 대부분이 도로 및 건물 등의 불투수성 피복(impermeable pavement)으로 덮여 있어서 강수의 지표 유출이 증가하고 침투와 지하수 함양이 감소한다. Fig. 1에서 다각형으로 표시된 유역 내에서 해수면 위의 불투수성 피복, 즉 도시 지역의 면적은 14.03 km^2 이며, 이는 해수면 위의 전체 유역 면적 23.15 km^2 의 60.60%에 해당된다. 불투수성 피복의 평균 두께는 도시 지역 지표 하 0.5 m이다. 그리고 유역 내 지표 하 5 m에서 410 m 사이의 다양한 심도에 수중 펌프(submersible pump)가 설치된 347개의 양수정(pumping well) 및 양수정 밀집지(pumping well center)로부터 각종 목적으로 $7,672 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 지하수가 양수(pumping)되고 있다(부경대학교, 2008; 해운대구청, 2008). 한편 시설 안전을 목적으로 유역 내를 지나가는 지하철(subway) 2호선과 3호선 구간에서는 각각 $1,231 \text{ m}^3/\text{day}$ 와 $1,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 지하수가 유출(discharge)되고 있으며(부산

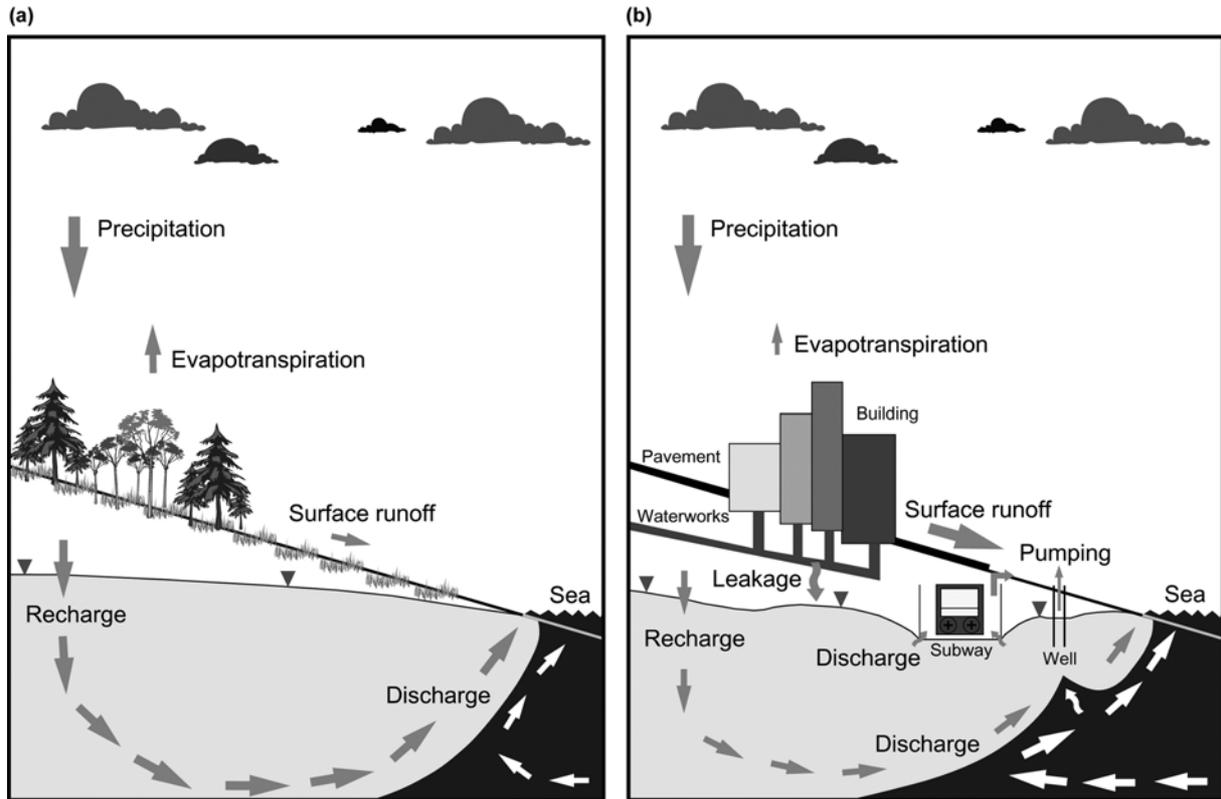


Fig. 2. Hydrologic water cycles in a coastal area (a) before and (b) after urbanization.

교통공사, 2008), 전력구 터널(power cable tunnel)에서도 981 m³/day의 지하수가 유출되고 있다(동아대학교, 2008). 유역 내의 지하철 2호선과 3호선 및 전력구 터널로의 지하수 유출은 그 노선을 따라서 위치별로 공간적으로 다르며, 그 노선 길이는 각각 7,508 m, 1,836 m 및 2,651 m에 달한다. 이러한 유역 내의 지하철 2호선 및 3호선은 각각 9개 및 2개의 역을 포함하며, 수영역에서 서로 만난다. 아울러 유역 내 도시 지역 전체 하부에 걸쳐 매우 복잡한 망상 조직 형태로 분포하고 있는 상수도관(waterworks pipeline)으로부터 13,167 m³/day의 상수도 누수(leakage)되고 있으며, 이는 총상수도 공급량 107,925 m³/day의 12.20%에 해당된다(부산광역시 상수도사업본부, 2007; 환경부, 2007). 상수도 누수대(waterworks leakage zone)의 평균 두께는 도시 지역 지표 하 1.5 m에서 2.0 m 사이의 0.5 m이다. 하지만 연구 지역에서의 도시 관개(municipal irrigation)나 하수도 누수(sewage leakage)는 그 양이 무시할 만큼 작거나 심지어는 파악할 수조차 없어서 본 연구에서는 도시화 요소로 고려하지 않았다. 또한 해수를 주요 지하수 오염원으로 고려하여 이에 초점을 맞추었으며, 기타 다른 지하수 오염원은 고려

하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 불투수성 피복(impermeable pavement), 지하수 양수(groundwater pumping), 지하철로의 지하수 유출(groundwater discharge to subway) 또는 지하철 유출(subway discharge), 전력구 터널로의 지하수 유출(groundwater discharge to power cable tunnel) 또는 전력구 터널 유출(power cable tunnel discharge) 및 상수도 누수(waterworks leakage) 등을 연구 지역의 5대 도시화 요소(urbanization factor)들로 설정하였다.

4. 해안 대수층

4.1. 삼차원 지층 모델 및 유한 요소망

수치 모델링 영역(numerical modeling domain)의 경계는 내륙 지역에서는 유역, 즉 지하수계를 고려하여 내륙 지역 동쪽은 장산의 능선을, 서쪽은 금련산의 능선을 설정하였으며, 해안 지역에서는 해수와 지층의 경계면인 해저 표면에서 발생하는 지하수 유동 및 염분 이동을 고려하기 위하여 해저 표면의 해발 고도가 약 -13m가 되는 지점들을 연결하여 해안선으로부터 바다 쪽으로 약 780 m

에서 1,650 m 정도 떨어진 곳을 설정하였다(Fig. 1의 다각형 도형). 수치 모델링 영역의 바다면 경계는 연구 지역 내의 최대 양수정(수중 펌프) 심도 410 m와 지형 고도 634 m(장산)을 고려하여 해발 고도 -700 m를 설정하였다.

상기한 수치 모델링 영역과 5대 도시화 요소들을 고려하여 연구 지역의 지형 및 지질을 대표하는 삼차원 지층 모델(geologic formation model)이 Fig. 3과 같이 수립되었다. 삼차원 지층 모델을 구성하는 내륙 지역의 고도는

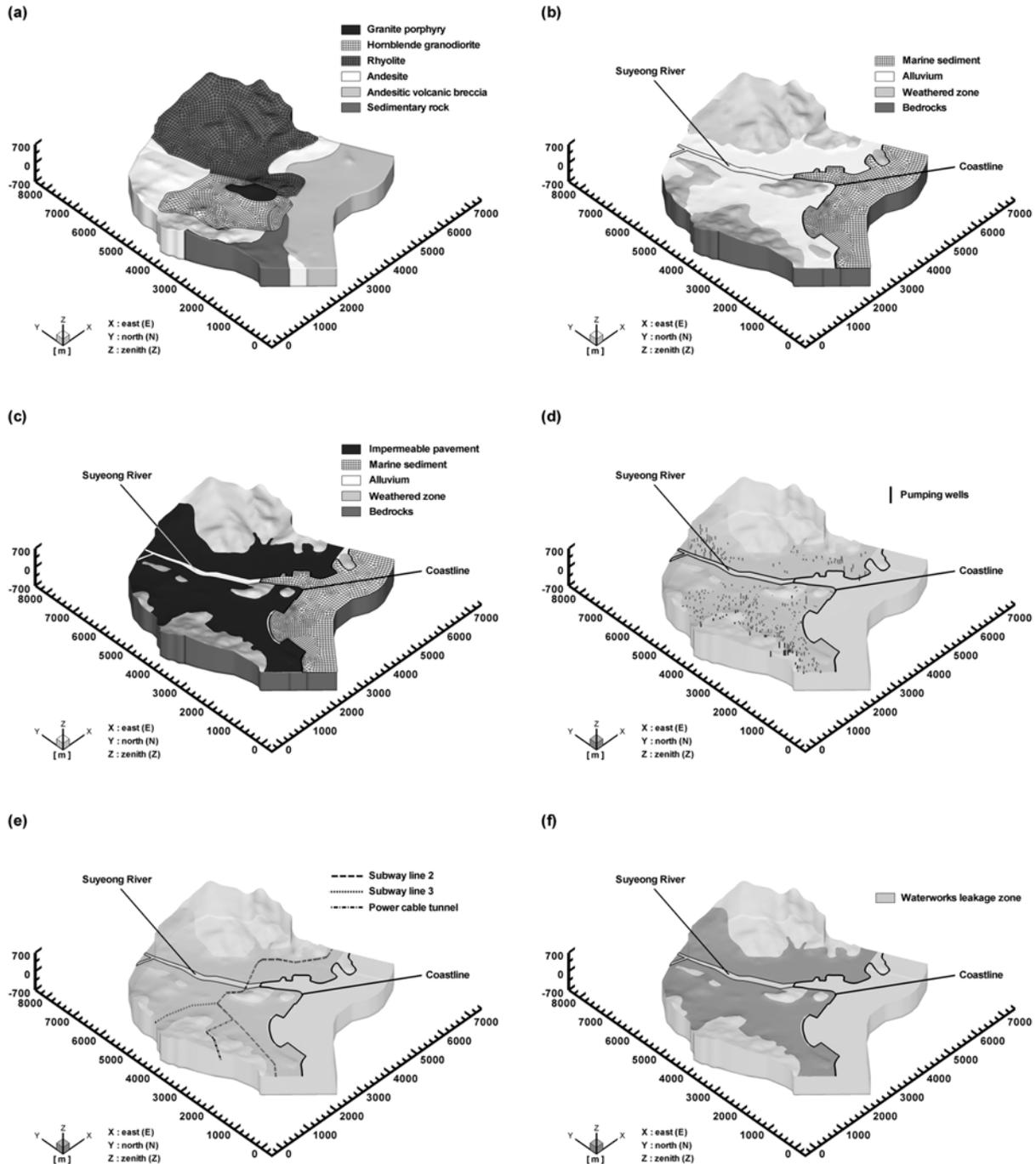


Fig. 3. Three-dimensional geologic formation models of the coastal aquifer system with (a) bedrocks (sedimentary rock, andesitic volcanic breccia, andesite, rhyolite, hornblende granodiorite, and granite porphyry), (b) bedrocks, weathered zone, alluvium, and marine sediment, (c) impermeable pavement (urbanization factor 1), (d) 347 pumping wells (urbanization factor 2), (e) subway lines 2 and 3 (urbanization factor 3) and power cable tunnel (urbanization factor 4), and (f) waterworks leakage zone (urbanization factor 5).

국립지리원(2005)에서 발간한 부산 수치지형도를 활용하였으며, 해안 지역의 고도는 국립해양조사원(2004)에서 발간한 부산항에서 가덕도 수치해도를 활용하였다. 삼차원 지층 모델을 구성하는 지층들은 퇴적암, 안산암질 화산각력암, 안산암, 유문암, 각섬석 화강섬록암 및 화강반암 등의 기반암(Fig. 3a), 그리고 이들 기반암을 피복하는 풍화대, 충적층 및 해양 퇴적층 순이다(Fig. 3b). 그리고 이와 같은 삼차원 지층 모델에 상기한 5대 도시화 요소들은 다음과 같이 반영하였다. 먼저 위성사진 분석을 통하여 구분한 도시 지역의 불투수성 피복층(도시화 요소 1)은 공간적 지형 고도를 고려하여 지표 하 0.5 m 두께의 단일층(layer)으로 설정하였다(Fig. 3c). 그리고 347개의 양수정 및 양수정 밀집지(도시화 요소 2)는 각 양수 위치와 심도(수층 펌프 심도)에 해당하는 개별 점(point)으로 설정하였다(Fig. 3d). 또한 지하철 2호선과 3호선(도시화 요소 3) 및 전력구 터널(도시화 요소 4)은 각 노선 위치와 심도에 해당하는 개별 선(line)으로 설정하였다(Fig. 3e). 마지막으로 도시 지역의 상수도 누수층(도시화 요소 5)은 공간적 지형 고도를 고려하여 지표 하 1.5 m에서 2 m 사이에 0.5 m 두께의 단일 층(layer)으로 설정하였다(Fig. 3f).

이러한 삼차원 지층 모델은 199,864개의 절점(node)과 188,433개의 육면체 요소(element)로 이산화되어 삼차원 유한 요소망으로 Fig. 4와 같이 변환되었다. 특히 5대 도시화 요소들을 가능한 한 실제 상황과 동일하게 반영하기 위하여 상당히 세밀하게 삼차원 지층 모델을 이산화하였다.

4.2. 지층 및 절리 물성

각 지층의 물성 값은 각종 지질 조사와 수리지질 시험 및 관련 문헌들(이희근 외, 1983; 부산교통공단, 1991; 부

산직할시 종합건설본부, 1993; 이찬구 외, 1995; 부산교통공단, 1997; 한국자원연구소, 1999; 한국수자원공사, 2003; 부산교통공단, 2004; 함세영 외, 2005; Morris and Johnson, 1967; Bear, 1972; Norton and Knapp, 1977; Freeze and Cherry, 1979; van Genuchten, 1980; Gelhar and Axness, 1983; Carsel and Parrish, 1988; Domenico and Schwartz, 1990; Fetter, 1994; Xu and Eckstein, 1995; Fetter, 1999)로부터 구하였다(Table 1).

각 지층 내에 분포하는 절리들을 대표하는 절리군의 수와 그 주향 및 경사는 기존의 절리 조사 자료(한국자원연구소, 1999)를 지층별로 분류한 후에 퍼지 클러스터링 기법(fuzzy clustering technique)(정용복·전석원, 2003; Hammah and Curran, 1998, 1999)을 적용하여 규명하였다(Table 2). 그리고 각 절리군의 간격(spacing)은 암반 분류(rock mass classification) 자료(부산교통공단, 1991; 부산직할시 종합건설본부, 1993; 부산교통공단, 1997, 2004)에 암질지수(rock quality designation, RQD)와 단위 부피당 절리의 수(volumetric joint count, VJC)의 관계식(Palmstrom, 2005)을 사용하여 결정하였다. 또한 각 절리군의 간극(aperture)은 그 간격과 팩커 및 양수 시험(packer and pumping test)으로부터 구한 해당 지층의 포화수리전도도에 cubic law(Parsons, 1966; Snow, 1968, 1969)를 적용하여 계산하였다.

지하수의 압축계수(compressibility)는 $4.40 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ 으로, 지하수의 동적 점성계수(dynamic viscosity)는 $1.12 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2/\text{sec}$ 로, 염분(salt)의 분자확산계수(molecular diffusion coefficient)는 $1.68 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 설정하였다(Li and Gregory, 1974; Freeze and Cherry, 1979; Domenico and Schwartz, 1990; Fetter, 1994). 그리고 담수의 밀도는

Table 1. Material properties of the geologic media and impermeable pavement

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_v [1/m]	1.00	2.70	2.70	2.70	2.70	1.60	1.90	12.40	1.00
n_v	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.37	1.31	2.28	1.23

Table 2. Material properties of the representative joint sets in the geologic media

Geologic medium (geologic formation)	Joint set number	Strike [°]	Dip [°]	Spacing [m]	Aperture [m] (before and after calibration)
Sedimentary rock	Joint set 1 (bedding plane)	N43E	83NW	9.04×10^{-2}	3.26×10^{-5} ↓
	Joint set 2	N46W	83SW		2.84×10^{-5}
Andesitic volcanic breccia	Joint set 1	N43E	85SE	8.78×10^{-2}	3.27×10^{-5} ↓
	Joint set 2	N56W	77NE		3.27×10^{-5}
Andesite	Joint set 1	N43E	83NW	8.78×10^{-2}	3.27×10^{-5} ↓
	Joint set 2	N46W	83SW		3.17×10^{-5}
Rhyolite	Joint set 1	N41E	84SE	1.33×10^{-1}	4.30×10^{-5} ↓
	Joint set 2	N54W	79NE		3.66×10^{-5}
Hornblende granodiorite	Joint set 1	N39E	77SE	1.33×10^{-1}	3.38×10^{-5} ↓
	Joint set 2	N27W	73NE		3.15×10^{-5}
	Joint set 3	N75E	90		3.15×10^{-5}
Granite porphyry	Joint set 1	N62E	73SE	1.37×10^{-1}	3.38×10^{-5} ↓
	Joint set 2	N8E	85SE		4.06×10^{-5}
	Joint set 3	N88W	78SW		4.06×10^{-5}

1,000 kg/m³으로, 해수의 밀도는 1,025 kg/m³으로 설정하였다. 즉 밀도차 비율(density difference ratio)은 0.025로 설정하였으며, 이는 해수 1 kg당 총용존고체(total dissolved solids, TDS) 0.035 kg (35,000 ppm) 또는 해수 염소 농도 19,400 mg/l (ppm)와 동일하다. 또한 염분은 비반응성이어서 흡착, 붕괴 및 생분해가 일어나지 않는다고 가정하였다. 중력가속도 상수(gravitational acceleration constant)는 9.81 m/sec²으로 설정하였다.

4.3. 경계 및 내부 조건

삼차원 유한 요소망(Fig. 4)의 내륙 및 해안 수직 측면에는 유역, 즉 지하수계를 고려하여 지하수 유동과 염분 이동에 대해서 각각 no-flow와 no-transport 경계 조건을 적용하였다. 그리고 해안선을 중심으로 북쪽의 육상 및 강 표면에는 지하수 유동에 대해서는 강수, 지표수 및 지하수의 상호 작용을 합리적으로 모사할 수 있는 가변 강수-침투-삼출(variable precipitation-infiltration-seepage) 경계 조건을, 염분 이동에 대해서는 염분이 나갈 수는 있지만 들어올 수는 없도록 하는 Neumann 경계 조건을 적용하였다. 이 경우에 최대 압력 수두는 육상 표면에서는 0 m로, 강 표면에서는 각 지점별 강 수위(river stage)(한국수자원공사, 2003)로 설정하였다. 그리고 순(알짜)연강수량

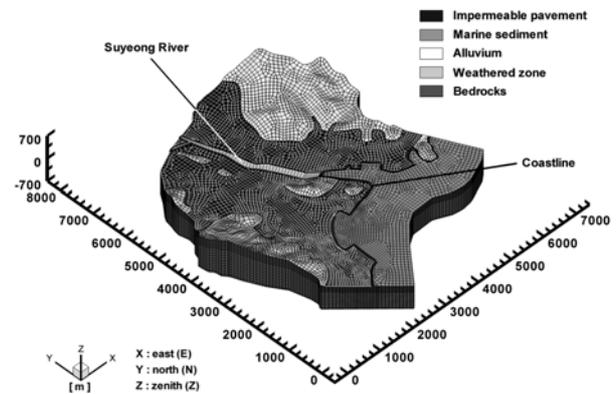


Fig. 4. Three-dimensional finite element mesh of the coastal aquifer system.

(net annual precipitation rate)은 연구 지역으로부터 가장 가까운 곳에 위치한 부산 기상관측소에서 측정된 연평균강수량(annual average precipitation rate)인 1,509.26 mm/year (한국기상청, 1961-2007)에서 증발산량(evapotranspiration)과 지표 유출량(surface runoff)을 삭감하여 불투수성 피복으로 덮여 있는 도시 지역(urban area)에서는 연평균강수량의 6.80%에 해당하는 102.69 mm/year로, 비도시 지역(nonurban area)에서는 연평균강수량의 26.49%에 해당하

는 399.76 mm/year로 설정하였다. 이때 증발산량은 FAO-56 Penman-Monteith 식(Allen et al., 1998)으로 구한 잠재증발산량에 증발산량과 잠재증발산량의 비(Penman, 1948)를 곱하여 산정되었으며, 지표 유출량은 NRCS-CN 방법(Natural Resources Conservation Service, 2004a, 2004b)을 사용하여 계산되었다. 한편 해안선을 중심으로 남쪽의 해저 표면에는 지하수 유동에 대해서는 해안선에서의 수리 수두가 0 m이고 수심이 깊어질수록 해수 내의 염분 농도를 고려하여 수리 수두가 증가하도록 하는 Dirichlet 경계 조건을, 염분 이동에 대해서는 지하수 유동에 따라서 지하수 내의 염분 농도가 해수 내의 염분 농도보다 작을 수도 있도록 하는 가변 이동 유입-유동 유출(variable run in-flow out) 경계 조건을 적용하였다. 아울러 수평 바다면에는 보다 심부에 있는 불투수성 기반암을 고려하여 지하수 유동과 염분 이동에 대해서 각각 no-flow와 no-transport 경계 조건을 적용하였다.

도시 지역의 불투수성 피복층(도시화 요소 1)은 아스팔트와 콘크리트로 구성된 면적이 14.03 km²이고 지표 하 두께가 0.5 m인 단일 최상부 element layer로 반영하였다. 해당 물질의 물성 값은 관련 문헌들(한국도로공사, 1996a, 1996b; Soroka, 1980; Chadbourn et al., 1997; Kanitpong et al., 2001; Kasatkin and Kuznetsov, 2004; Ahmedzade et al., 2007)로부터 구하였다(Table 1의 마지막 열). 그리고 347개의 양수정 및 양수정 밀집지(도시화 요소 2)는 공간적으로 서로 다른 양수 위치와 심도(수중

펌프 심도) 및 양수량을 가지는 개별 point sink들로 반영하였다. 총양수량은 7,672 m³/day이다. 한편 지하철 2호 선과 3호선(도시화 요소 3) 및 전력구 터널(도시화 요소 4)은 공간적으로 서로 다른 노선 위치와 심도 및 지하수 유출량을 가지는 개별 line sink들로 반영하였다. 총지하수 유출량은 각각 1,231 m³/day, 1,000 m³/day 및 981 m³/day이다. 아울러 도시 지역의 상수도 누수층(도시화 요소 5)은 면적이 14.03 km²이고 지표 하 1.5 m에서 2 m 사이에 두께가 0.5 m이며, 공간적으로 균일한 상수도 누수량을 가지는 단일 element layer source로 반영하였다. 총상수도 누수량은 13,167 m³/day이다.

5. 도시화 이전의 정상 상태 수치 모델링

5.1. 수치 모델링 보정

수치 모델링을 보정하는 동안 각 지층의 절리군 간극을 변화시키면서 일련의 시행착오(trial-and-error) 수치 모델링을 수행하였다. 그러한 과정 중에 Fig. 5a에 도시된 61개의 관측정(observation well)에서 측정된 지하수위(groundwater level)와 동일한 위치에서 계산된 지하수위를 반복 비교하였다. 이 때 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 수

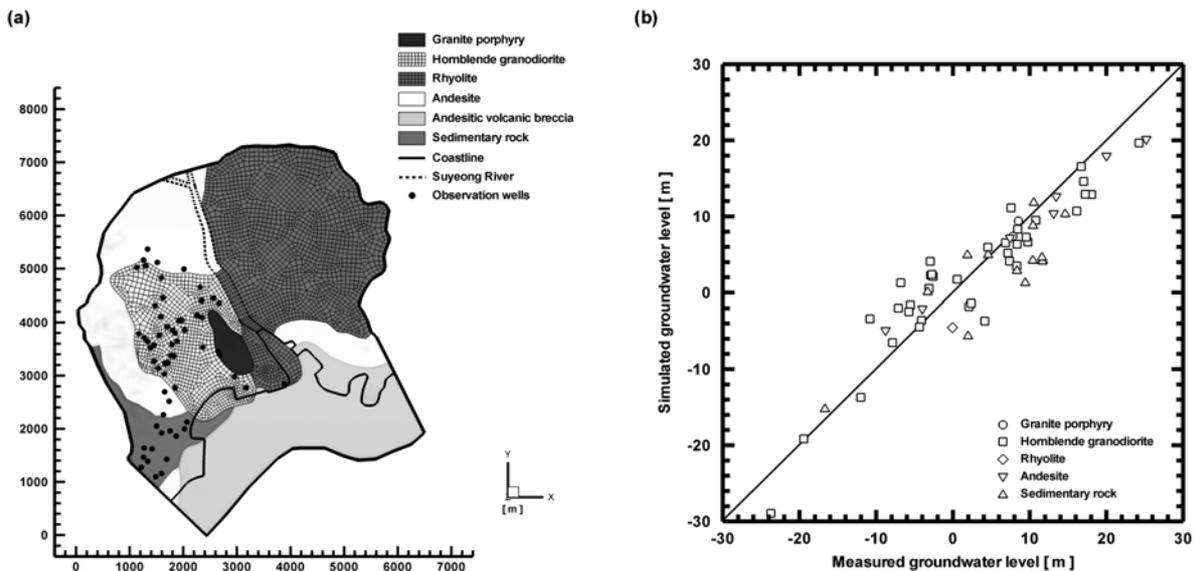


Fig. 5. (a) Locations of 61 observation wells used in numerical modeling calibration and (b) comparisons of measured and simulated groundwater levels at the observation wells after numerical modeling calibration.

치 모델링에서 계산된 지하수위를 측정된 값과 비교하였다.

수치 모델링 보정에서 대상 물성(target property)으로 지층의 절리 간극을 선택한 이유는 지층의 포화수리전도도가 다공질 암석 기질보다는 지층 내에 발달된 절리군에 의해 크게 좌우될 뿐만 아니라 앞에서 언급한 것처럼 Table 2의 절리 간극이 실제 측정된 값이 아니라 cubic law(Parsons, 1966; Snow, 1968, 1969)를 적용하여 절리군의 간격과 지층의 포화수리전도도로부터 계산된 값이기 때문이다.

결정계수(coefficient of determination, R^2), 제곱근평균 제곱오차(root mean square error, RMSE) 및 표준화 제곱근평균제곱오차(normalized root mean square error, NRMSE)를 수치 모델링 보정을 위한 유효화 매개 변수(validation parameter)로 사용하였다. Fig. 5b에 나타난 바와 같이 지하수위에 대한 수치 모델링 보정을 통해 얻은 결정계수는 0.828, 제곱근평균제곱오차는 4.223 m, 표준화 제곱근평균제곱오차는 8.63%이다. 그리고 보정된 각 지층의 절리군 간극 값은 Table 2에 화살표를 이용하여 정리하였다.

5.2. 수치 모델링 결과

상기한 수치 모델링 보정을 통해 최종적으로 확립된 연구 지역 해안 대수층의 지층 물성을 가지고, 5대 도시화 요소들을 모두 고려하지 않고 수행한 도시화 이전의 정상 상태 수치 모델링 결과가 Fig. 6에 도시되어 있다.

Fig. 6a 및 b는 각각 지하수면 및 수리 수두 분포도이다. 지하수면 분포는 산지와 평지의 지형 기복의 영향이 잘 반영되어 나타난다(Fig. 6a). 모델링 영역의 동쪽 경계인 장산 정상과 서쪽 경계인 금련산 정상에서 가장 높은 지하수면을 보여주며, 수영강과 해안선 부근의 평지에서 가장 낮은 지하수면을 보여준다. 수리 수두 분포 역시 지하수면 분포와 마찬가지로 지형 기복의 영향이 그대로 반영되어 나타난다(Fig. 6b). 이러한 수리 수두 분포를 통해 연구 지역의 지하수는 산지로부터 저지대의 평지인 중앙의 수영강과 남쪽의 해안으로 흐르고 있는 것을 알 수 있다. 또한 수리 수두 경사(동수 구배)가 산지에서는 급하게 형성되어 있고 가운데 평지에서는 수영강을 중심으로 완만하게 형성되고 있어 연구 지역 해안 대수층은 지하수가 풍부할 것으로 판단된다. 즉 산지로부터 지속적으로 공급되는 지하수가 저지대의 평지에서는 상대적으로 유동 속도가 느려지면서 상당한 양의 지하수가 해안 대수층 내에 저장될 수 있는 것이다.

Fig. 6c, d, e 및 f는 각각 해발 고도 -100 m, -300 m,

-500 m 및 -700 m(바닥면) 수평 단면에서의 해수 표준화 염분 농도 분포도이며, 이를 통해 해안 대수층 깊이에 따른 해수 침투 양상을 파악할 수 있다. 우선 전반적인 분포를 보면 도시화 이전의 자연 상태에서도 해수와 담수의 밀도차에 의해 해안 대수층 하부로 내려갈수록 해수가 많이 침투하여 담수인 지하수와 평형 상태를 이루고 있다(Fig. 6c, d, e, f). 수영강을 따라서 해수가 가장 많이 침투한 이유는 주변 해안 대수층보다 수영강을 따라서 수리 수두가 낮게 형성되기 때문인 것으로, 즉 수영강이 이득 하천(gaining stream)이기 때문인 것으로 판단된다. 한편 수영강 어귀 서쪽에 있는 해발 고도 100 m 내외의 낮은 산지에 의해서 해수 침투가 해발 고도 -500 m까지는 어느 정도 저지되고 있다(Fig. 6c, d, e). 이는 강수의 침투가 잘 되고 해발 고도가 주위에 비해 높은 해안 시구가 해수 침투에 대해 방벽 효과(barrier effect)를 보여준다는 기존의 연구(Giambastiani et al., 2007)와 잘 일치한다. 하지만 해발 고도 -500 m 아래의 해안 대수층 하부로 더 내려가면 그러한 효과는 거의 나타나지 않는다(Fig. 6f).

6. 도시화 이후의 비정상 상태 수치 모델링

6.1. 수치 모델링 설정

도시화가 지하수 유동 및 염분 이동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 도시화 이전의 정상 상태 수치 모델링 결과를 초기 조건으로 하면서, 상기한 연구 지역의 5대 도시화 요소들을 개별적으로 그리고 통합적으로 고려한 도시화 이후의 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 여섯 가지 경우의 비정상 상태 수치 모델링을 수행하였다.

이러한 도시화 이후의 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 일련의 비정상 상태 수치 모델링 기간은 10,000년으로 설정하여 연구 지역 해안 대수층 내에서 지하수 유동 및 염분 이동이 충분히 새로운 정상 상태에 도달하도록 하였다.

6.2. 수치 모델링 결과

상기한 5대 도시화 요소를 모두 고려한 도시화 이후의 비정상 상태 수치 모델링 결과는 연구 지역 해안 대수층 내에서 지하수 유동은 도시화 약 200년 후에, 염분 이동은 도시화 약 5,000년 후에 새로운 정상 상태에 도달함을 보여준다. 따라서 상기한 5대 도시화 요소들을 모두 고려한 도시화 5,000년 후의 새로운 정상 상태 수치 모델링 결과가 Fig. 7에 도시되어 있다. 도시화 이전과 이후의 차이를 쉽게 확인하기 위하여 도시화 이전의 정상 상태 수치 모델링 결과(Fig. 6)와 같은 종류의 그림을 같은 순

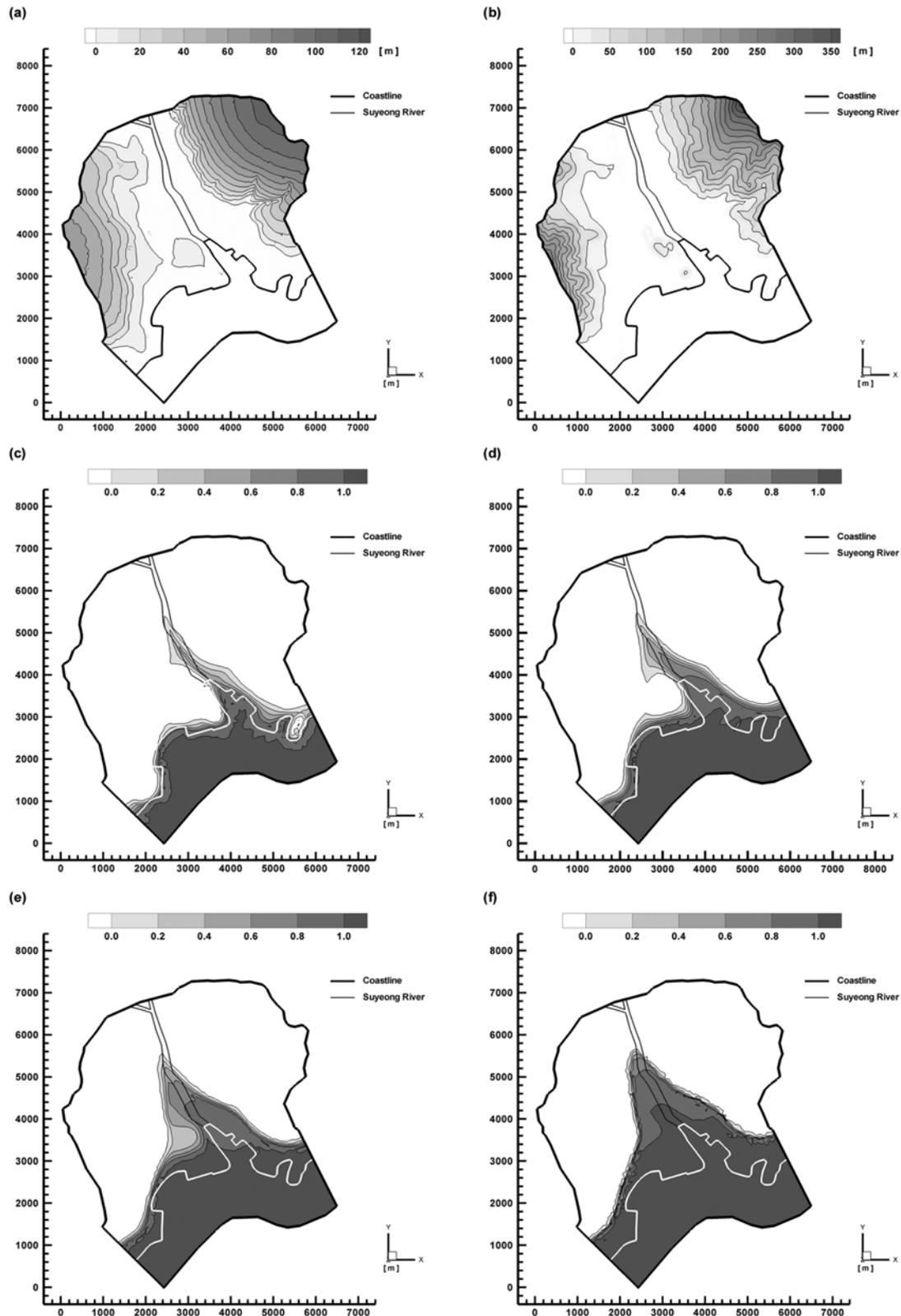


Fig. 6. Initial steady-state spatial distributions of (a) groundwater table (i.e., zero reference pressure head) elevation, (b) reference hydraulic head at the ground surface, and seawater-normalized salt concentration at (c) $z = -100$ m, (d) $z = -300$ m, (e) $z = -500$ m, and (f) $z = -700$ m in the coastal aquifer system before urbanization.

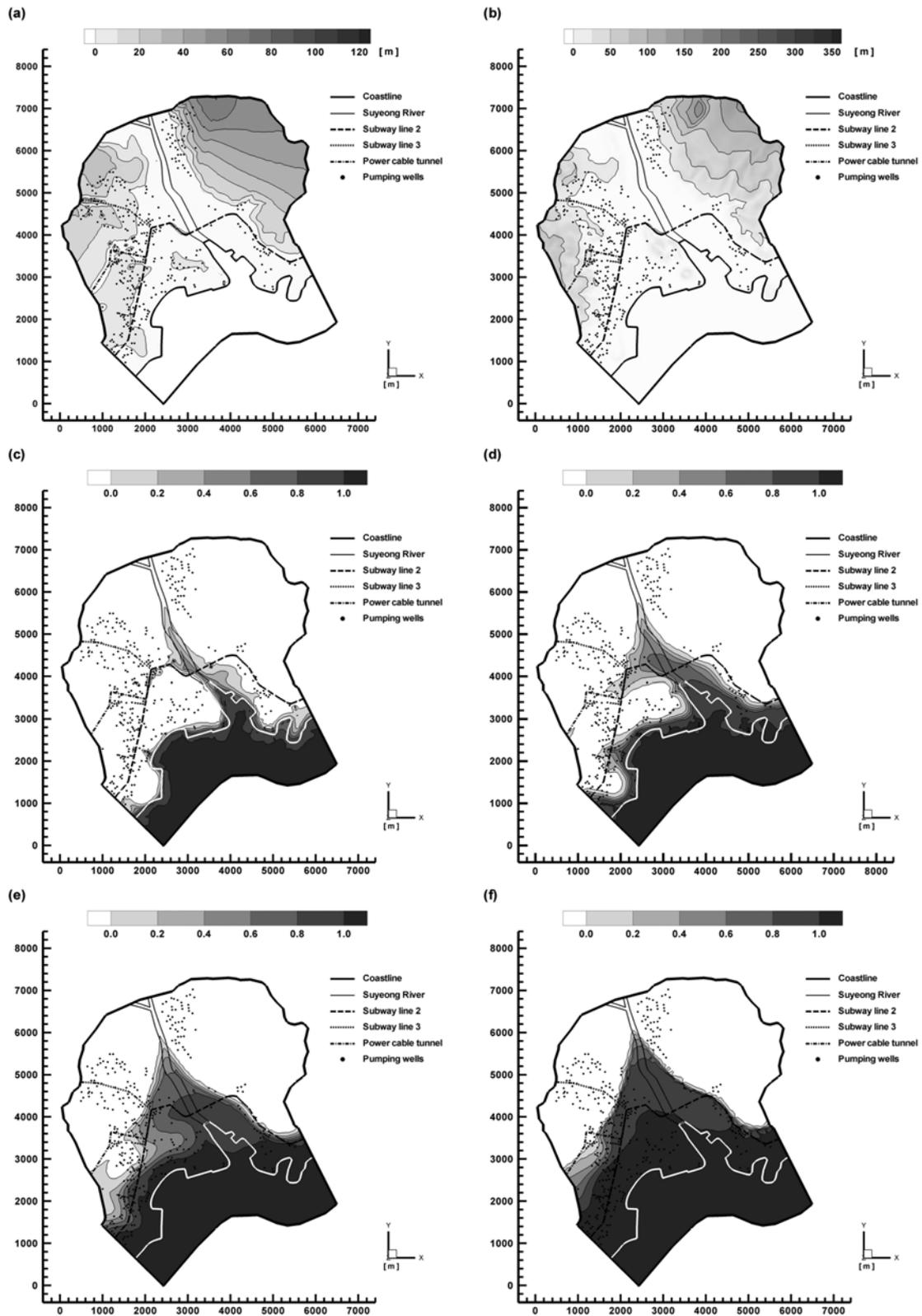


Fig. 7. Final steady-state spatial distributions of (a) groundwater table (i.e., zero reference pressure head) elevation, (b) reference hydraulic head at the ground surface, and seawater-normalized salt concentration at (c) $z = -100$ m, (d) $z = -300$ m, (e) $z = -500$ m, and (d) $z = -700$ m in the coastal aquifer system after 5,000 years of urbanization.

서로 배치하였다.

Fig 7a 및 b는 각각 지하수면 및 수리 수두 분포도이다. 이를 보면 도시화에 의해 지하수면 및 수리 수두가 전반적으로 상당히 하강한 것을 알 수 있다. 특히 지하수 양수량이 많은 일부 양수정을 중심으로는 동심원 형태로, 지하철과 전력구 터널을 따라서는 선 형태로 지하수면이 하강한다(Fig. 7a). 수리 수두 역시 도시화에 의해 연구 지역 전체에서 하강하며, 특히 수영강을 기준으로 지하수 양수량 및 지하 구조물(지하철 및 전력구 터널)로의 지하수 유출량이 많은 서쪽의 수영구 방면에서 동쪽의 해운대구 방면보다 더 많이 하강한다(Fig. 7b). 동쪽 경계인 장산 정상에서 서쪽으로 1 km 정도 떨어진 지점에서는 장산 정상보다 해발 고도는 낮지만 지하수면과 수리 수두가 오히려 더 높게 형성되어 있다. 이는 이 부근까지 도시 지역으로 포함되면서 고려된 상수도 누수에 의해 발생한 효과인 것으로 판단된다. 이는 도시화에 의해 도시 지역의 지하수 시스템 내에서는 지하수면이 전반적으로 하강하지만 국부적으로는 일부 도시화 요소에 의해 상승할 수도 있거나 또는 그 반대로 더 하강할 수도 있음을 의미한다. 즉 연구 지역 해안 대수층에서는 전반적으로 도시화가 진행되면서 상수도 누수(도시화 요소 5)에 의해 지하수 함양이 증가하는 효과보다는 불투수성 피복(도시화 요소 1), 지하수 양수(도시화 요소 2), 지하철 유출(도시화 요소 3) 및 전력구 터널 유출(도시화 요소 4)에 의해 지하수 함양이 감소하는 효과가 더 커서 전체적으로 해안 대수층 내 지하수량이 감소하고 국부적으로는 그 양상에

큰 차이가 발생한다.

Fig. 7c, d, e 및 f는 각각 해발 고도 -100 m, -300 m, -500 m 및 -700 m(바닥면) 수평 단면에서의 해수 표준화 염분 농도 분포도이다. 우선 전반적인 분포를 보면 도시화에 의해 해안 대수층의 모든 심도에 걸쳐 해수 침투가 심화되며, 특히 해안 대수층 상부(Fig. 7c)에서는 양수정이 밀집되어 있거나 수영강 하부를 통과하는 지하철을 따라서 해수 침투의 통로가 형성된다. 이를 통해 도시화에 의해 전체적으로 해안 대수층에서 수리 수두가 감소(Fig. 7b)하면서 전체 해안 대수층으로 해수가 침투하고 있으며, 지하철 및 전력구 터널과 개별 양수정에 의해서 국부적으로 이러한 해수 침투가 더욱 심화되고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 도시화 이전(Fig. 8a) 및 이후(Fig. 8b)의 연구 지역 해안 대수층 내 해수 표준화 염분 농도 0.03 등치면 분포도이다. 해수 표준화 염분 농도 0.03 등치면 위에 100 m 간격으로 해수면 아래 해발 고도 등고선을 표시하여 고도에 따른 해수 표준화 염분 농도 분포를 잘 구분할 수 있게 하였다.

해수 표준화 염분 농도 0.03은 총용존고체(total dissolved solids, TDS) 1,000 ppm에 해당하는 값으로 이는 일반적으로 담수와 염수를 구분하는 기준이 된다(Barlow, 2003). Fig. 8a 및 b를 비교해 보면 상기한대로 도시화에 의해 전체 해안 대수층으로 해수가 많이 침투하고 있으며, 그 양상은 해안 대수층 전체 영역에서 균일하지 않고 위치에 따라서 다르게 발생하고 있음을 알 수 있다. 이러한 해수 표

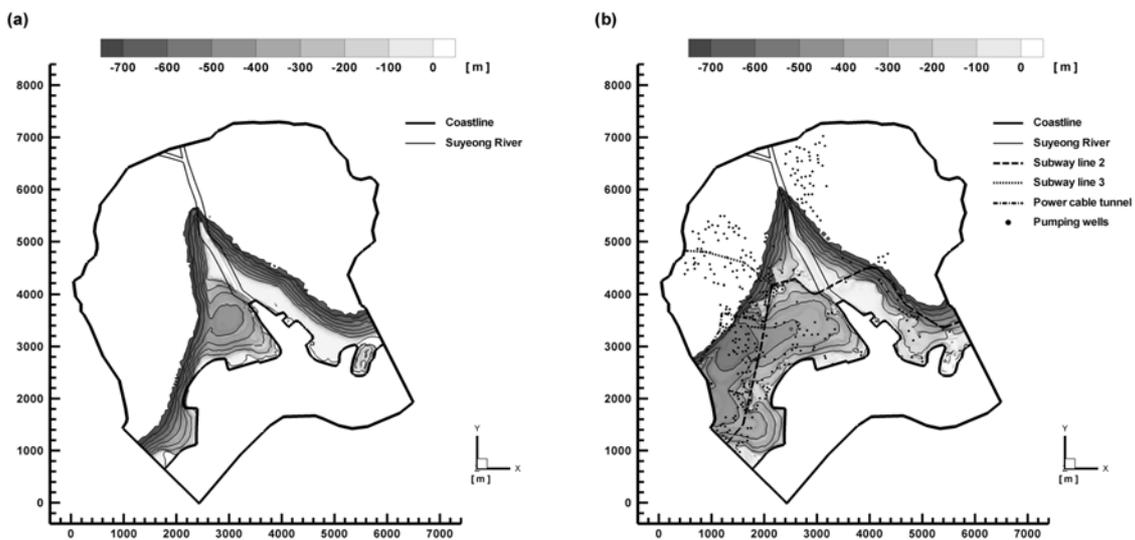


Fig. 8. Final steady-state spatial distributions of isosurface of seawater-normalized salt concentration of 0.03 in the coastal aquifer system (a) before urbanization and (b) after 5,000 years of urbanization.

준화 염분 농도 0.03 등치면 분포도는 일부 양수정으로 염분이 상승하는 업코닝(upconing) 현상도 잘 보여준다.

Fig. 9는 도시화 이후의 각 도시화 요소별 시간에 따른 연구 지역 해안 대수층 내 총지하수량(Fig. 9a) 및 총염분량(Fig. 9b) 변화도이다. 도시화 이전의 해안 대수층 내 총지하수량은 $1.07 \times 10^9 \text{ m}^3$ 이며, 총염분량은 $1.08 \times 10^{10} \text{ kg}$ 이다. 해안 대수층 내 총지하수량은 도시화 약 200년 후에, 총염분량은 도시화 약 5,000년 후에 새로운 정상 상태에 도달한다.

우선 시간에 따른 해안 대수층 내 총지하수량 변화(Fig. 9a)를 보면 상수도 누수(도시화 요소 5)에 의해서는 총지하수량이 증가하고, 불투수성 피복(도시화 요소 1)과 지하수 양수(도시화 요소 2)에 의해서는 총지하수량이 감소하며, 전체적으로는 도시화에 의해 해안 대수층 내 총지하수량이 상당히 감소하는 것을 알 수 있다. 한편 지하철헤 유출(도시화 요소 3) 및 전력구 터널 유출(도시화 요소 4)은 다른 도시화 요소들에 비해 총지하수량 변화에는 큰

영향을 주지 않는다. 하지만 전력구 터널 유출만을 고려한 수치 모델링은 미량이지만 해안 대수층의 총지하수량이 오히려 증가하는 결과를 보여준다. 전력구 터널 유출이 서쪽의 수영구에서만 발생하는 것을 고려한다면 동쪽의 해안대구 방면 해안 대수층 내에서 지하수량이 증가한 것이라고 추정할 수 있는데 이는 가운데 수영강이 어느 특정한 수리적인 경계(hydraulic boundary)가 되지 못하여 여러 가지 조건에 따라 수영강 동·서쪽 해안 대수층이 서로 영향을 주고받음을 시사한다. 한편 도시화 200년 후의 각 도시화 요소들을 개별적으로 고려한 경우의 총지하수 감소량의 단순 합($-7.03 \times 10^4 \text{ m}^3$)보다 모든 도시화 요소들을 통합적으로 고려한 경우의 총지하수 감소량($-1.11 \times 10^5 \text{ m}^3$)이 더 많은 것을 통해서 여러 가지 도시화 요소들이 동시에 작용하면서 해안 대수층 내 총지하수량이 더 많이 감소하는 것을 알 수 있다(Table 3의 두 번째 열).

다음으로 시간에 따른 해안 대수층 내 총염분량 변화(Fig. 9b)를 보면 상수도 누수(도시화 요소 5)에 의해서는

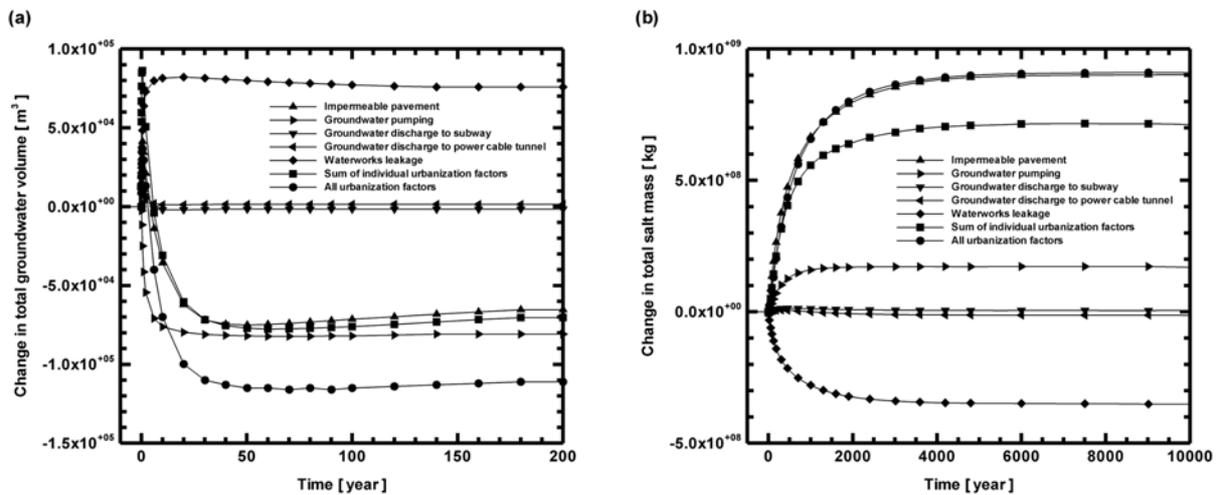


Fig. 9. Temporal changes in (a) total groundwater volume and (b) total salt mass in the coastal aquifer system since the start of urbanization.

Table 3. Changes in total groundwater volume and salt mass in the coastal aquifer system for 5,000 years of urbanization with various urbanization factors

Urbanization factor	Change in total groundwater volume [m³]	Change in total salt mass [kg]
Impermeable pavement	-6.54×10^4	$+9.02 \times 10^8$
Groundwater pumping	-8.08×10^4	$+1.70 \times 10^8$
Groundwater discharge to subway	-1.57×10^3	$+5.33 \times 10^6$
Groundwater discharge to power cable tunnel	$+1.57 \times 10^3$	-1.32×10^7
Waterworks leakage	$+7.59 \times 10^4$	-3.51×10^8
Sum of individual urbanization factors	-7.03×10^4	$+7.13 \times 10^8$
All urbanization factors	-1.11×10^5	$+9.10 \times 10^8$

총염분량이 감소하고, 불투수성 피복(도시화 요소 1)과 지하수 양수(도시화 요소 2)에 의해서는 총염분량이 증가하며, 전체적으로는 도시화에 의해 해안 대수층 내 총염분량이 상당히 증가하는 것을 알 수 있다. 한편 지하철 유출(도시화 요소 3) 및 전력구 터널 유출(도시화 요소 4)은 다른 도시화 요소에 비해 총염분량 변화에는 큰 영향을 주지 않는다. 하지만 Fig. 7c에서와 같이 일부 지하철 구간에서는 다른 도시화 요소들과 함께 작용하면서 해수 침투의 통로가 되기도 한다. 이는 도시화 5,000년 후의 각 도시화 요소들을 개별적으로 고려한 경우의 총염분 증가량의 단순 합($+7.13 \times 10^8$ kg)보다 모든 도시화 요소들을 통합적으로 고려한 경우의 총염분 증가량($+9.10 \times 10^8$ kg)이 더 많은 것을 통해서도 어느 정도 뒷받침이 된다 (Table 3의 세 번째 열). 즉 여러 가지 도시화 요소들이 동시에 작용하면서 해수 침투가 더 크게 그리고 광범위하게 발생하는 것이다.

이러한 비정상 상태 수치 모델링 결과들로부터 도시화에 의해 연구 지역 해안 대수층 내의 밀도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동 그리고 해수 침투 양상은 크게 변화하며, 그 영향 범위는 지표에서부터 해안 대수층 심부까지 매우 광범위함을 알 수 있다. 그러나 각 도시화 요소의 그러한 영향은 공간적으로 균일하지 않고 국부적으로 차별적이다.

7. 결 론

한국 부산광역시 수영구 지역 해안 대수층 내의 밀도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 도시화의 영향을 효과적으로 모사하고 정량적으로 평가하기 위하여 하나의 범용 다차원 수리동역학적 분산 수치 모델을 이용한 일련의 삼차원 수치 모델링이 수행되었다. 먼저 모든 도시화 요소들을 고려한 수치 모델링 보정을 통해 확립된 연구 지역 해안 대수층의 지층 물성을 가지고, 도시화 요소들을 모두 고려하지 않은 도시화 이전의 지하수 유동과 염분 이동에 대한 정상 상태 수치 모델링을 수행하였다. 그 다음에 도시화 요소들을 개별적으로 그리고 통합적으로 고려한 도시화 이후의 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 비정상 상태 수치 모델링을 수행하였다. 그리고 두 수치 모델링 결과를 서로 비교하고 분석하였다. 수치 모델링 결과는 해안 대수층 내의 밀도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동 그리고 해수 침투가 이러한 도시화 요소들에 의해 크게 그리고 광범위하게 영향을 받음을 보여준다. 해안 대수층 내 총지하수량은 도시화 약 200년 후에, 총

염분량은 도시화 약 5,000년 후에 새로운 정상 상태에 도달한다. 도시화에 의해 총지하수량이 감소하는 가장 큰 원인은 지하수 양수(도시화 요소 2)이며, 총염분량이 증가하는 가장 큰 원인은 불투수성 피복(도시화 요소 1)이다. 또한 지하철 유출(도시화 요소 3) 및 전력구 터널 유출(도시화 요소 4)은 총지하수량 및 총염분량 변화에는 큰 영향을 미치지 않지만 일련의 통로를 형성하면서 해수 침투가 국부적으로 큰 차이가 나는 효과를 가져온다. 상수도 누수(도시화 요소 5)는 해안 대수층 내에서 전체적으로 지하수량을 증가시키고 해수 침투를 감소시키는 작용을 하는 것은 분명하지만 그 누수량에 비해서는 해수 침투를 효과적으로 저지한다고 판단하기는 어렵다. 또한 실제 상수도 누수는 균일하게 발생하지 않는다는 점을 고려할 때 본 연구의 수치 모델링 결과로부터 상수도 누수의 효과에 대한 정확한 평가는 제한적일 수밖에 없다. 이와 같이 각 도시화 요소들은 개별적으로 또는 통합적으로 작용하여 해안 대수층 내의 지하수 유동과 염분 이동에 중요하고 많은 영향을 끼친다. 따라서 수리동역학적 분산 수치 모델을 이용하여 해안 도시 지역에서의 해수 침투를 보다 정확하고 현실적으로 예측하기 위해서는 우선 해당 도시 지역의 지질학적 및 수리지질학적 특성은 물론 도시화 요소를 면밀하게 검토하여 그 지역의 복잡한 물 순환과 지하수 시스템을 이해하고 이를 수치 모델링에 합리적으로 반영하여야 한다.

사 사

본 연구는 교육과학기술부 산하 한국연구재단의 21세기 프론티어 수자원의 지속적 확보 기술 개발사업 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 본 연구는 또한 부분적으로 교육과학기술부 산하 한국연구재단의 Brain Korea 21 프로젝트 지원에 의해 수행되었습니다. 아울러 본 논문의 심사 과정에서 발전적인 조언과 비판을 해주신 익명의 두 심사자님들께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 국립지리원, 2005, 부산 1:5,000 수치지형도, 도엽번호 359130-24/25/26/34/35/36/44/45.
- 국립해양조사원, 2004, 부산항에서 가덕도 1:50,000 수치해도, 해도번호 202.
- 김용영, 이강근, 성익환, 1998, 서울지역 지하수 시스템 조사: 수리적 특성 분석, 지질공학, 8(1), 51-73.

- 동아대학교, 2008, 345kV 신양산-동부산 4차 전력구공사 지하수 유출량 자료, 미출판 자료.
- 박주현, 김중휘, 김한태, 김준모, 2008, 한국 부산 지역 해안 대수층 내의 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 단층 존재의 영향 삼차원 수치 모의, *지하수토양환경*, **13**(5), 33-46.
- 박희석, 김중휘, 염병우, 김준모, 2008, 해수 침투에 대한 층상 불균질성 및 지하수 양수 방식의 영향 삼차원 수치 모의, *지하수토양환경*, **13**(4), 8-21.
- 부경대학교, 2008, 부산광역시 수영구 양수정 조사자료, 미출판 자료.
- 부산광역시 상수도 사업본부, 2007, 2007년 부산광역시 상수도 통계연보, p. 142.
- 부산교통공단, 1991, 부산지하철 2호선 기본설계 시설분야(제3구간) 지질조사보고서, p. 230.
- 부산교통공단, 1997, 부산지하철 3호선 시설분야 기본설계(미남수영) 지질조사보고서, p. 347.
- 부산교통공단, 2004, 부산지하철 3호선 2단계 323공구 토목공사 지반조사보고서, p. 345.
- 부산교통공사, 2008, 부산지하철 지하수 유출량 자료, 미출판 자료.
- 부산직할시 종합건설본부, 1993, 광안대로건설 기본 및 실시설계 용역 지반조사보고서, p. 317.
- 오찬성, 김준모, 2008, 경주 중·저준위 방사성 폐기물 처분장 부지에서의 지하수 유동과 염분 및 방사성 핵종 이동 삼차원 수치 모의, *지질학회지*, **44**(4), 489-505.
- 이진용, 구민호, 2007, 도시화가 지하수에 미치는 영향 및 도시지역 지하수 문제 고찰, *지질학회지*, **43**(4), 517-528.
- 이찬구, 최원학, 장천중, 김지영, 이지훈, 1995, 온도변화가 암석의 기본물성과 압력인장특성에 미치는 영향, *지질공학*, **5**(1), 21-29.
- 이희근, 이정인, 양형식, 1983, 우리나라에 분포하는 주요암석류의 역학적 특성연구(제2보), 원자력발전소, 지하철건설지역 등에 분포하는 화산암 및 변성암의 역학적 성질, *대한광산학회지*, **20**(2), 101-109.
- 자원개발연구소, 1978, 동래 및 월내 1:50,000 지질도폭 7019-IV/I 설명서, p. 44.
- 정용복, 전석원, 2003, 절리군 분석을 위한 퍼지 클러스터링 기법, *터널과 지하공간*, **13**(4), 294-303.
- 한국기상청, 1961-2007, 부산 기상관측소 기후자료, <http://www.kma.go.kr>.
- 한국도로공사, 1996a, 아스팔트 포장 설계의 표준화 연구 보고서, No. 96-46-20, p. 244.
- 한국도로공사, 1996b, 일반콘크리트 및 특수콘크리트 투수특성 연구(II) 보고서, No. 96-46-28, p. 104.
- 한국동력자원연구소, 1983, 부산-가덕 1:50,000 지질도폭 설명서, p. 47.
- 한국수자원공사, 2003, 부산지역 지하수 기초조사 보고서, No. HG-203-BS, p. 678.
- 한국자원연구소, 1999, 지하수 오염방지 및 응용화 기술연구(부산지역) 보고서, No. KR-99(B)-2, p. 541.
- 함세영, 차용훈, 정재열, 2005, 부산 도심지역 미고결층과 기반암의 수리지질 특성, *지질공학*, **15**(4), 407-421.
- 해운대구청, 2008, 부산광역시 해운대구 양수정 조사자료, 미출판 자료.
- 환경부, 2007, 2006 상수도 통계, 상하수도국 수도정책과 연차보고서, p. 1885.
- Ahmedzade, P., Tigdemir, M., and Kalyoncuoglu, S.F., 2007, Laboratory investigation of the properties of asphalt concrete mixtures modified with TOP-SBS, *Construction and Building Materials*, **21**(3), 626-633.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M., 1998, Crop Evapotranspiration (Guidelines for Computing Crop Water Requirements), FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56, United Nations Food and Agriculture Organization, p. 300.
- Barlow, P.M., 2003, Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast, Circular, No. 1262, United States Geological Survey, Reston, Virginia, p. 113.
- Barlow, P.M. and Wild, E.C., 2002, Bibliography on the Occurrence and Intrusion of Saltwater in Aquifers along the Atlantic Coast of the United States, Open-File Report, No. 02-235, United States Geological Survey, Northborough, Massachusetts, p. 30.
- Bear, J., 1972, Dynamics of Fluids in Porous Media, American Elsevier Publishing Company, New York, p. 764.
- Bobba, A.G., 2002, Numerical modelling of salt-water intrusion due to human activities and sea-level change in the Godavari Delta, India, *Hydrological Sciences Journal*, **47**(S), S67-S80.
- Carsel, R.F. and Parrish, R.S., 1988, Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics, *Water Resources Research*, **24**(5), 755-769.
- Chadborn, B.A., Newcomb, D.E., and Timm, D.H., 1997, Measured and theoretical comparisons of traffic loads and pavement response distributions, *Proceedings of the Eighth International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, Washington, August 10-14*, p. 229-238.
- Cheng, J.M. and Chen, C.X., 2001, Three-dimensional modeling of density-dependent salt water intrusion in multilayered coastal aquifers in Jahe River Basin, Shandong Province, China, *Ground Water*, **39**(1), 137-143.
- Cheng, A.H.D. and Ouazar, D. (eds.), 2004, Coastal Aquifer Management: Monitoring, Modeling, and Case Studies, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, p. 280.
- Dausman, A. and Langevin, C.D., 2005, Movement of the Salt-water Interface in the Surficial Aquifer System in Response to

- Hydrologic Stresses and Water-Management Practices, Broward County, Florida, Scientific Investigations Report, No. 2004-5256, United States Geological Survey, Reston, Virginia, p. 73.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1990, Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley and Sons, New York, p. 824.
- Endreny, T.A., 2005, Land use and land cover effects on runoff processes: Urban and suburban development, In: Melo Anderson (ed.), *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, John Wiley and Sons, Chichester, p. 1775-1804.
- Fetter, C.W., 1994, Applied Hydrogeology, third edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, p. 691.
- Fetter, C.W., 1999, Contaminant Hydrogeology, second edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, p. 500.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979, Groundwater, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, p. 604.
- Gangopadhyay, S. and Das Gupta, A., 1995, Simulation of salt-water encroachment in a multi-layer groundwater system, Bangkok, Thailand, *Hydrogeology Journal*, **3**(4), 74-88.
- Garcia-Fresca, B. and Sharp, J.M., Jr., 2005, Hydrogeologic considerations of urban development: Urban-induced recharge, In: J. Ehlen, W.C. Haneberg, and R.A. Larson, (eds.), *Humans as Geologic Agents, Reviews in Engineering Geology*, Vol. XVI, Geological Society of America, Boulder, Colorado, p. 123-136.
- Gelhar, L.W. and Axness, C.L., 1983, Three-dimensional stochastic analysis of macrodispersion in aquifers, *Water Resources Research*, **19**(1), 161-180.
- 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**(1-2), 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, Vol. 6, Chapter A7 (Supercedes Open-File Report, No. 01-434), United States Geological Survey, Tallahassee, Florida, p. 77.
- Hammah, R.E. and Curran, J.H., 1998, Fuzzy cluster algorithm for the automatic identification of joint sets, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **35**(7), 889-905.
- Hammah, R.E. and Curran, J.H., 1999, On distance measures for the fuzzy K-means algorithm for joint data, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **32**(1), 1-27.
- Kanitpong, K., Benson, C.H., and Bahia, H.U., 2001, Hydraulic conductivity (permeability) of laboratory-compacted asphalt mixtures, *Transportation Research Record*, **1767**(1), 25-32.
- Kasatkin, Y.N. and Kuznetsov, E.I., 2004, Design and construction of asphalt concrete cutoff structures in earthfill dams, *Power Technology and Engineering*, **38**(2), 74-78.
- Kim, Y.Y., Lee, K.K., and Sung, I.H., 2001, Urbanization and the groundwater budget, metropolitan Seoul area, Korea, *Hydrogeology Journal*, **9**(4), 401-412.
- Kim, J.M. and Yeh, G.T., 2004, COFAT3D: A Finite Element Model for Fully Coupled Groundwater Flow and Solute Transport in Three-Dimensional Saturated-Unsaturated Porous and Fractured Media, Version 1.0, Technical Report, No. GGEL-2004-12, Geological and Groundwater Engineering Laboratory, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea, p. 354.
- Langevin, C.D., 2001, Simulation of Ground-Water Discharge to Biscayne Bay, Southeastern Florida, Water-Resources Investigations Report, No. 00-4251, United States Geological Survey, Tallahassee, Florida, p. 130.
- Lawrence, A.R., Morris, B.L., and Foster, S.S.D., 1998, Hazards induced by groundwater recharge under rapid urbanization, In: J.G. Maunds and M. Eddleston (eds.), *Geohazards in Engineering Geology, Engineering Geology Special Publications*, No. 15, Geological Society of London, p. 319-328.
- Lee, J.Y., Yi, M.J., Moon, S.H., Cho, M., Won, J.H., Ahn, K.H., and Lee, J.M., 2007, Causes of the changes in groundwater levels at Daegu, Korea: The effect of subway excavations, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **66**(3), 251-258.
- Lerner, D.N., 2002, Identifying and quantifying urban recharge: A review, *Hydrogeology Journal*, **10**(1), 143-152.
- Li, Y.H. and Gregory, S., 1974, Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediments, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **38**(5), 703-714.
- Masterson, J.P., 2004, Simulated Interaction between Freshwater and Saltwater and Effects of Ground-Water Pumping and Sea-Level Change, Lower Cape Cod Aquifer System, Massachusetts, Scientific Investigations Report, No. 2004-5014, United States Geological Survey, Reston, Virginia, p. 72.
- 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**(1-2), 87-103.
- Morris, D.A. and Johnson, A.I., 1967, Summary of Hydrologic and Physical Properties of Rock and Soil Materials, as Analyzed by the Hydrologic Laboratory of the United States Geological Survey 1948-60, Water-Supply Paper, No. 1839-D, United States Geological Survey, Reston, Virginia, p. 42.
- Natural Resources Conservation Service, 2004a, Hydrologic Soil-Cover Complexes, National Engineering Handbook, Part 630. Hydrology, Chapter 9, United States Department of Agriculture, Washington, DC, p. 1-14.
- Natural Resources Conservation Service, 2004b, Estimation of

- Direct Runoff from Storm Rainfall, National Engineering Handbook, Part 630. Hydrology, Chapter 10, United States Department of Agriculture, Washington, DC, p. 1-22.
- Norton, D. and Knapp, R., 1977, Transport phenomena in hydrothermal systems: The nature of porosity, *American Journal of Science*, **277**(8), 913-936.
- Palmstrom, A., 2005, Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD), *Tunnelling and Underground Space Technology*, **20**(4), 362-377.
- Parsons, R.W., 1966, Permeability of idealized fractured rock, *Society of Petroleum Engineers Journal*, **6**(2), 126-136.
- Penman, H.L., 1948, Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A. Mathematical and Physical Sciences*, **193**(1032), 120-145.
- Qahman, K. and Larabi, A., 2006, Evaluation and numerical modeling of seawater intrusion in the Gaza aquifer (Palestine), *Hydrogeology Journal*, **14**(5), 713-728.
- Schneider, J.C. and Kruse, S.E., 2005, Assessing selected natural and anthropogenic impacts on freshwater lens morphology on small barrier islands: Dog Island and St. George Island, Florida, USA, *Hydrogeology Journal*, **14**(1-2), 131-145.
- 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**(SM1), 73-91.
- Snow, D.T., 1969, Anisotropic permeability of fractured media, *Water Resources Research*, **5**(6), 1273-1289.
- Soroka, I., 1980, Portland Cement Paste and Concrete, Chemical Publishing Company, New York, p. 338.
- van Genuchten, M.Th., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, **44**(5), 892-898.
- Vázquez-Suñé, E., Sánchez-Vila, X., and Carrera, J., 2005, Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain, *Hydrogeology Journal*, **13**(3), 522-533.
- Voss, C.I., 1984, SUTRA: A Finite Element Simulation Model for Saturated-Unsaturated, Fluid-Density-Dependent Groundwater-Flow with Energy Transport of Chemically-Reactive Single-Species Solute Transport, Water-Resources Investigations Report, No. 84-4369, United States Geological Survey, Reston, Virginia, p. 409.
- Xu, M. and Eckstein, Y., 1995, Use of weighted least-squares method in evaluation of the relationship between dispersivity and field scale, *Ground Water*, **33**(6), 905-908.
- Yang, Y., Lerner, D.N., Barrett, M.H., and Tellam, J.H., 1999, Quantification of groundwater recharge in the city of Nottingham, UK, *Environmental Geology*, **38**(3), 183-198.
- 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, p. 200.