한국지하수토양환경학회지 Vol. 13, No. 4, pp. 8~21, 2008 ≪原著≫

해수 침투에 대한 층상 불균질성 및 지하수 양수 방식의 영향 삼차원 수치 모의

박화석[1] · 김중휘[1] · 염병우[2] · 김준모[1]*
[1]서울대학교 지구환경과학부, [2]한국지질자원연구원 지하수지열연구부

Three-Dimensional Numerical Simulation of Impacts of Layered Heterogeneity and Groundwater Pumping Schemes on Seawater Intrusion

Hwa-Seok Park[1] · Jung-Hwi Kihm[1] · Byoung-Woo Yum[2] · Jun-Mo Kim[1]*
[1]School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University
[2]Division of Groundwater and Geothermal Resources, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

ABSTRACT

A series of three-dimensional numerical simulations using a hydrodynamic dispersion numerical model is performed to analyze quantitatively impacts of layered heterogeneity of geologic media and groundwater pumping schemes on groundwater flow and salt transport in coastal aquifer systems. A two-layer heterogeneous coastal aquifer system composed of a lower sand layer (aquifer) and an upper clay layer (aquitard) and a corresponding single-layer homogeneous coastal aquifer system composed of an equivalent lumped material are simulated to evaluate impacts of layered heterogeneity on seawater intrusion. In addition, a continuous groundwater pumping scheme and two different periodical groundwater pumping schemes, which withdraw the same amount of groundwater during the total simulation time, are applied to the above two coastal aquifer systems to evaluate impacts of groundwater pumping schemes on seawater intrusion. The results of the numerical simulations show that the periodical groundwater pumping schemes have more significant adverse influences on groundwater flow and salt transport not only in the lower sand layer but also in the upper clay layer, and groundwater salinization becomes more intensified spatially and temporally as the pumping intensity is higher under the periodical groundwater pumping schemes. These imply that the continuous groundwater pumping scheme may be more suitable to minimize groundwater salinization due to seawater intrusion. The results of the numerical simulations also show that groundwater salinization in the upper clay layer occurs significantly different from that in the lower sand layer under the periodical groundwater pumping schemes. Such differences in groundwater salinization between the two adjacent layers may result from layered heterogeneity of the layered coastal aquifer system.

Key words : Layered heterogeneity, Groundwater pumping schemes, Groundwater flow, Salt transport, Seawater intrusion, Numerical simulation

요 약 문

지질 매체의 층상 불균질성과 지하수 양수 방식이 해안 대수층 내에서의 지하수 유동과 염분 이동에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 수리동역학적 분산 수치 모델을 이용한 일련의 삼차원 수치 모델링이 수행되었다. 해수 침투에 대한 층상 불균질성의 영향을 평가하기 위하여 하부 사토층(대수층)과 상부 점토층(준대수층)으로 구성된 층상 불균질 해안 대수층과 이에 상응하는 등가의 물질로 구성된 균질 해안 대수층을 수치 모델링하였다. 또한 해수 침투에 대한 지하수 양수 방식의 영향을 평가하기 위하여 전체 수치 모델링 기간 동안에 동일한 양의 지하수를 양수하는 연속적인 지하수 양수 방식과 두 개의 주기적인 지하수 양수 방식을 상기한 두 해안 대수층에 적용하였다.

*Corresponding author : junmokim@snu.ac.kr
원고접수일 : 2007. 12. 12 심사일 : 2007. 12. 28 게재승인일 : 2008. 8. 22
질의 및 토의 : 2008. 10. 31 까지

수치 모델링 결과는 주기적인 지하수 양수 방식이 층상 대수층의 하부 사토층뿐만 아니라 상부 점토층에서의 지하수 유동과 염분 이동에 보다 중대한 악영향을 끼치며, 주기적인 지하수 양수 시에 양수 강도가 클수록 지하수 염수화가 공간적 및 시간적으로 더욱 심화됨을 보여준다. 이는 해수 침투에 의한 지하수 염수화를 최소화하기 위해서는 지속적인 지하수 양수 방식이 보다 더 적합할 수 있음을 의미한다. 또한 수치 모델링 결과는 주기적인 지하수 양수 시에 상부 점토층에서의 지하수 염수화 양상이 하부 사토층에서의 그것에 비해 매우 다르게 발생함을 보여준다. 이러한 두 지층 사이의 지하수 염수화 양상의 차이는 층상 해안 대수층의 층상 불균질성에 기인하는 것으로 해석된다.

주제어 : 층상 불균질성, 지하수 양수 방식, 지하수 유동, 염분 이동, 해수 침투, 수치 모의

1. 서 론

해안 지하수는 공급의 수월성과 경제적 효율성의 측면에서 해안 지역에서는 매우 중요한 수자원으로 평가받고 있다. 최근 인구의 증가와 더불어 해안 지역의 산업화 및 도시화가 급속도로 진행됨에 따라서 해안 지하수의 과도하고 무분별한 사용이 증가하고 있다. 그 결과 해수 침투(seawater intrusion, SWI)로 인한 광범위한 지하수 고갈(depletion)과 염수화(salinization)가 발생하고 있으며, 이로 인해 해안 지역뿐만 아니라 인근 내륙 지역에서도 해안 지하수의 지속적인 관리가 중요한 과제로 대두되고 있는 실정이다. 해수 침투 현상을 면밀히 파악하지 않고 해안 지하수 개발을 진행한다면 사용 가능한 지하수 수량의 감소는 물론이고, 염분 농도 증가로 인한 지하수 수질의 급격한 저하를 가져오게 된다. 그 결과 해안 지하수 자원의 지속적인 확보 및 인간 활동 전반에 걸쳐 제약을 받게 된다. 이러한 해수 침투의 악영향을 방지 내지는 최소화하기 위해서는 해안 대수층 내에서의 밀도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동 현상에 대한 정량적이고 통합적인 분석과 이해가 필요하다. 특히 수리동역학적 수치 모델링 연구는 이러한 해수 침투 현상에 대해 매우 현실적이고 경제적인 해답을 제공할 수 있다.

본 연구의 목적은 해안 대수층의 층상 불균질성(layered heterogeneity)과 지하수 양수 방식(groundwater pumping scheme)이 해수 침투에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것이다. 이러한 수리동역학적 분산 수치 모델링은 해안 대수층 내에서의 밀도 의존적 지하수 유동과 염분 이동에 대한 정확한 진단 및 평가 기법은 물론이고, 지하수 양수에 의한 해수 침투 저지 내지는 개선 방안을 제시하는 데 매우 유용하게 활용될 수 있다.

2. 수치 모델

본 연구에 사용된 수리동역학적 분산 수치 모델은 GMS(Groundwater Modeling System) 내에 포함되어 있는 3DFEMFAT(Yeh et al., 1994)이다. 이 수치 모델은 다차원 복합 유한요소 모델(multidimensional hybrid Lagrangian-Eulerian finite element model)로서 복잡한 지질 구조와 경계를 가지는 포화-불포화 불균질 이방성 다공질 지질 매체 내에서의 밀도 의존적 지하수 유동(density-dependent groundwater flow)과 이송(advection) 및 수리동역학적 분산(hydrodynamic dispersion)에 의한 용질 이동(solute transport) 현상은 물론이고, 강수-증발산-침투-삼출(precipitation-evapotranspiration-infiltration-seepage) 현상도 수치 모의할 수 있다. 이러한 3DFEMFAT(Yeh et al., 1994)은 비정상 상태 문제를 풀기 위해서 adaptive finite difference time-stepping scheme을 사용하며, 비선형 문제를 풀기 위해서 static 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^{-5} m와 10^{-5}로, 선형 반복 단계(linear iterations)에서는 각각 10^{-6} m와 10^{-6}로 설정하였다.

3. 수치 모델링 개요

본 연구에 사용된 층상 해안 대수층의 구성 및 물성값은 기본적으로 한국 서해안 해안 대수층에 대한 자료(Jeen et al., 2001; Kim 2001; Kim et al., 2002)를 기초로 하였으며, 부분적으로 기존 문헌(van Genuchten, 1980; Voss and Souza, 1987; Carsel and Parrish, 1988; Guymon, 1994)으로부터 수집한 자료를 이용하였다. 한국 서해안의 대수층은 일반적으로 하부로부터 기반암층(비대수층, aquifuge), 육성 사토층(대수층, aquifer) 및 해성 점토층(준대수층, aquitard) 순으로 구성되어 있다. 특히 화성, 김제 및 영광 지역에서 측정된 하부 사토층(sand

layer)의 두께는 20 m에서 30 m 정도이며, 상부 점토층(clay layer)의 두께는 8 m에서 18 m 정도이다. 또한 김제 지역에서 측정된 사토층의 포화수리전도도는 평균 1.1×10^{-3} m/sec 정도이며, 점토층의 포화수리전도도는 평균 5.6×10^{-8} m/sec 정도이다.

본 연구에 사용된 층상 해안 대수층의 크기와 유한요소망은 Fig. 1에 나타나 있다. 층상 해안 대수층의 크기는 지하수 양수정(pumping well)을 중심으로 한 면대칭을 고려하여 북남(y 축) 및 동서(x 축) 수평 방향으로 각각 500 m이고, 수직(z 축) 방향으로 45 m이다. 이러한 층상 해안 대수층은 30 m 두께의 하부 사토층과 15 m 두께의 상부 점토층으로 이루어져 있다. 이는 앞에서 언급한 것처럼 한국 서해안의 일반적인 층상 대수층 형태를 반영한 것이다. 수치 모델링을 위하여 상기한 층상 해안 대수층은 총 5,733(= 21 × 21 × 13)개의 절점과 4,800(= 20 × 20 × 12)개의 육면체 요소로 이산화되었으며, 사토층과 점토층 요소의 수직 길이는 각각 5.0 m와 2.5 m이다.

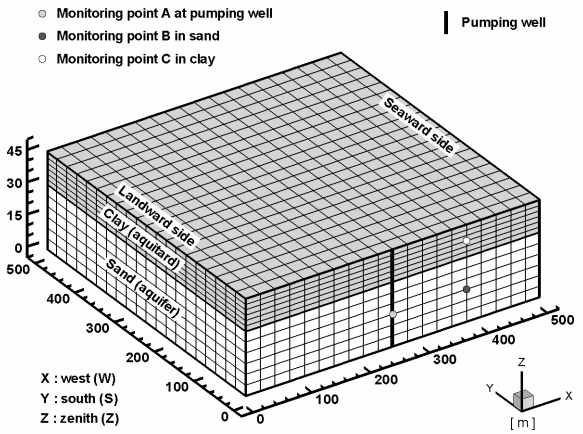

Fig. 1. Schematic diagram of the layered coastal aquifer system, pumping well, monitoring points, and finite element mesh.

층상 해안 대수층의 바닥면, 윗면 및 동서 방향의 두 측면(y = 0 m, 500 m)에는 지하수 유동과 염분 이동에 대하여 각각 no-flow와 no-transport 경계 조건을 적용하였다. 그리고 서쪽의 해안 측면(x = 500 m)에는 지하수 유동에 대해서는 해안선에서의 수리 수두가 40 m이고 수심이 깊어질수록 해수 내 염분 농도를 고려하여 수리 수두가 증가하는 경계 조건을, 염분 이동에 대해서는 해수가 유입되므로 지하수 내 염분 농도가 해수 내 염분 농도와 동일한 경계 조건을 적용하였다. 아울러 동쪽의 내륙 측면(x = 0 m)에는 지하수 유동에 대해서는 화성, 김제 및 영광 지역에서 관찰된 지하수면(water table)의 평균 동수구배(hydraulic gradient)를 고려하여 서쪽의 해안 측면에 비해 수리 수두가 1.7 m 높은 경계 조건을, 염분 이동에 대해서는 담수가 유입되므로 지하수 내 염분 농도가 0.0인 경계 조건을 적용하였다. 한편 지하수 양수정의 수평 위치는 해안 측면과 내륙 측면의 중간(x = 250 m, y = 0

Table 1. Material properties of aquifers, groundwater, fresh water, seawater, and salt

Property	Layered aquifer		Lumped aquifer
	Sand	Clay	
Porosity [dimensionless]	0.430	0.380	0.413
Saturated hydraulic conductivity [m/sec]	1.100×10^{-3}	5.556×10^{-8}	7.333×10^{-4}
Longitudinal dispersivity [m]	25.0	28.0	26.0
Transversal dispersivity [m]	2.5	2.8	2.6
Solid density [kg/m^3]	2.742×10^3	2.395×10^3	2.626×10^3
Compressibility [m^2/N]	1.649×10^{-8}	1.949×10^{-7}	7.596×10^{-8}
Tortuosity [dimensionless]	0.4	0.4	0.4
Residual water saturation [dimensionless]	1.05×10^{-1}	1.79×10^{-1}	1.30×10^{-1}
van Genuchten's (1980) unsaturated hydraulic parameters			
a_v [1/m]	14.50	0.80	9.93
n_v [dimensionless]	2.68	1.09	2.15
Compressibility of groundwater [m^2/N]		5.00×10^{-10}	
Dynamic viscosity of groundwater [kg/m/sec]		1.00×10^{-3}	
Density of fresh water [kg/m^3]		1000.0	
Density of seawater [kg/m^3]		1025.0	
Molecular diffusion coefficient of salt [m^2/sec]		1.50×10^{-9}	
Gravitational acceleration constant [m/sec^2]		9.81	

m)이며, 지하수 양수는 대수층인 사토층 구간(0 m ≤ z ≤ 30 m)에서만 수행하였다.

해수 침투에 대한 층상 불균질성의 영향을 비교·평가하기 위하여 층상 해안 대수층을 구성하는 30 m 두께의 하부 사토층(대수층)과 15 m 두께의 상부 점토층(준대수층)을 2 : 1로 혼합한 등가의 물질로 구성된 균질 해안 대수층도 층상 해안 대수층과 동일한 경계 조건을 적용하여 수치 모델링하였다. 층상 해안 대수층과 균질 해안 대수층의 물성 값은 Table 1에 정리되어 있다(van Genuchten, 1980; Voss and Souza, 1987; Carsel and Parrish, 1988; Guymon, 1994; Jeen et al., 2001; Kim, 2001; Kim et al., 2002).

해수 침투에 대한 지하수 양수 방식의 영향을 평가하기 위하여 다음과 같이 전체 수치 모델링 기간 10년 동안에 매년 동일한 양의 지하수 182,500 m^3/year를 양수하는 연속적인 지하수 양수 방식(continuous groundwater pumping

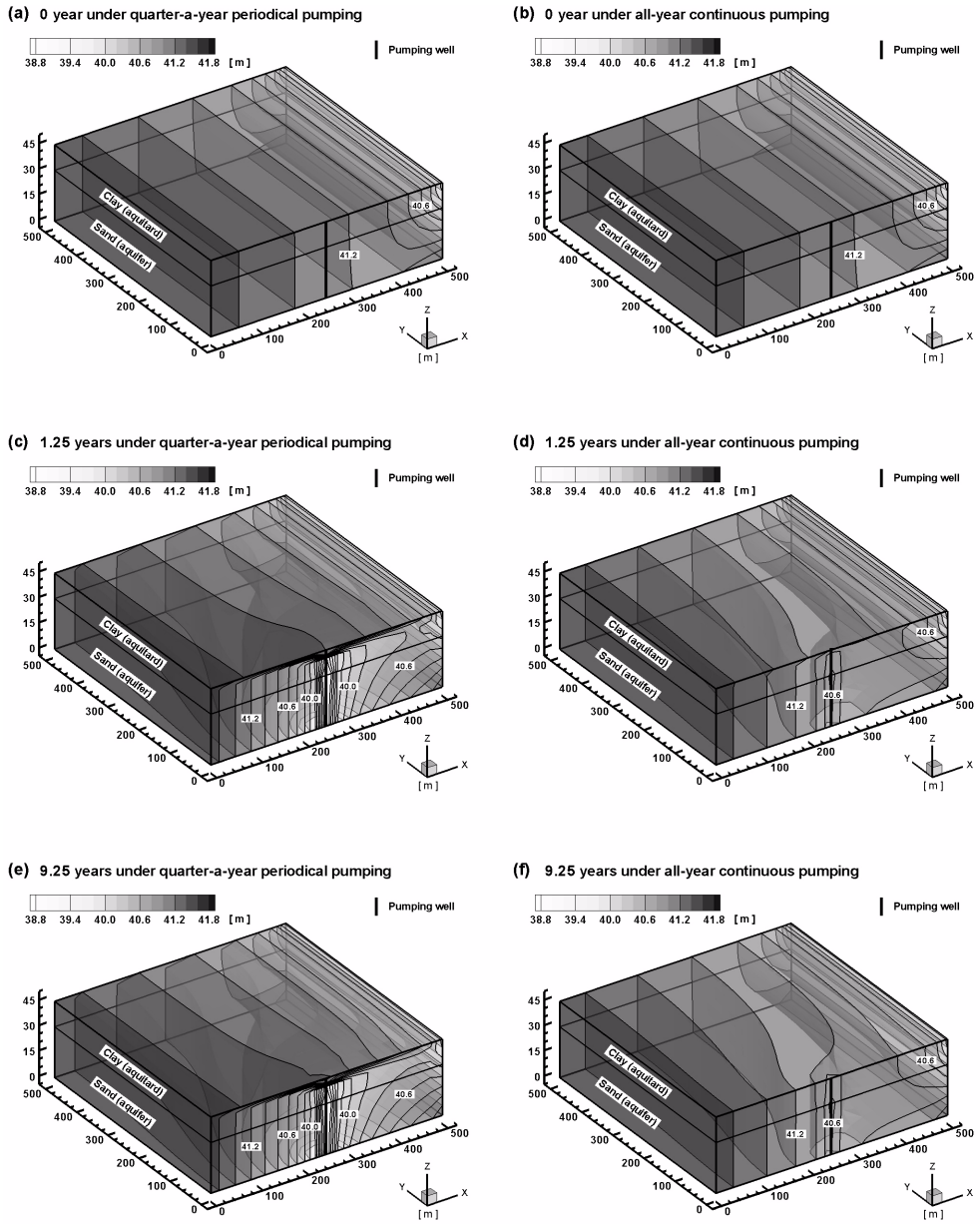

Fig. 2. Spatial distributions of hydraulic head in the layered coastal aquifer system after (a) and (b) 0 year (initial condition), (c) and (d) 1.25 years, and (e) and (f) 9.25 years under the quarter-a-year periodical (left column) and all-year continuous (right column) pumping schemes.

scheme)과 두 개의 주기적인 지하수 양수 방식(periodical groundwater pumping scheme)을 상기한 두 해안 대수층에 적용하였다.

① 양수 방식 1(연속적인 양수) : 매년 12개월 동안 500 m^3/day 양수

② 양수 방식 2(6개월 주기적인 양수) : 매년 초반 6개월 동안 1,000 m^3/day 양수 후 나머지 6개월 동안 양수 중단

③ 양수 방식 3(3개월 주기적인 양수) : 매년 초반 3개월 동안 2,000 m^3/day 양수 후 나머지 9개월 동안 양수 중단

4. 수치 모델링 결과

Fig. 2에서부터 Fig. 5는 층상 해안 대수층에서 양수 방식 3(왼쪽 열)과 양수 방식 1(오른쪽 열)로 지하수를

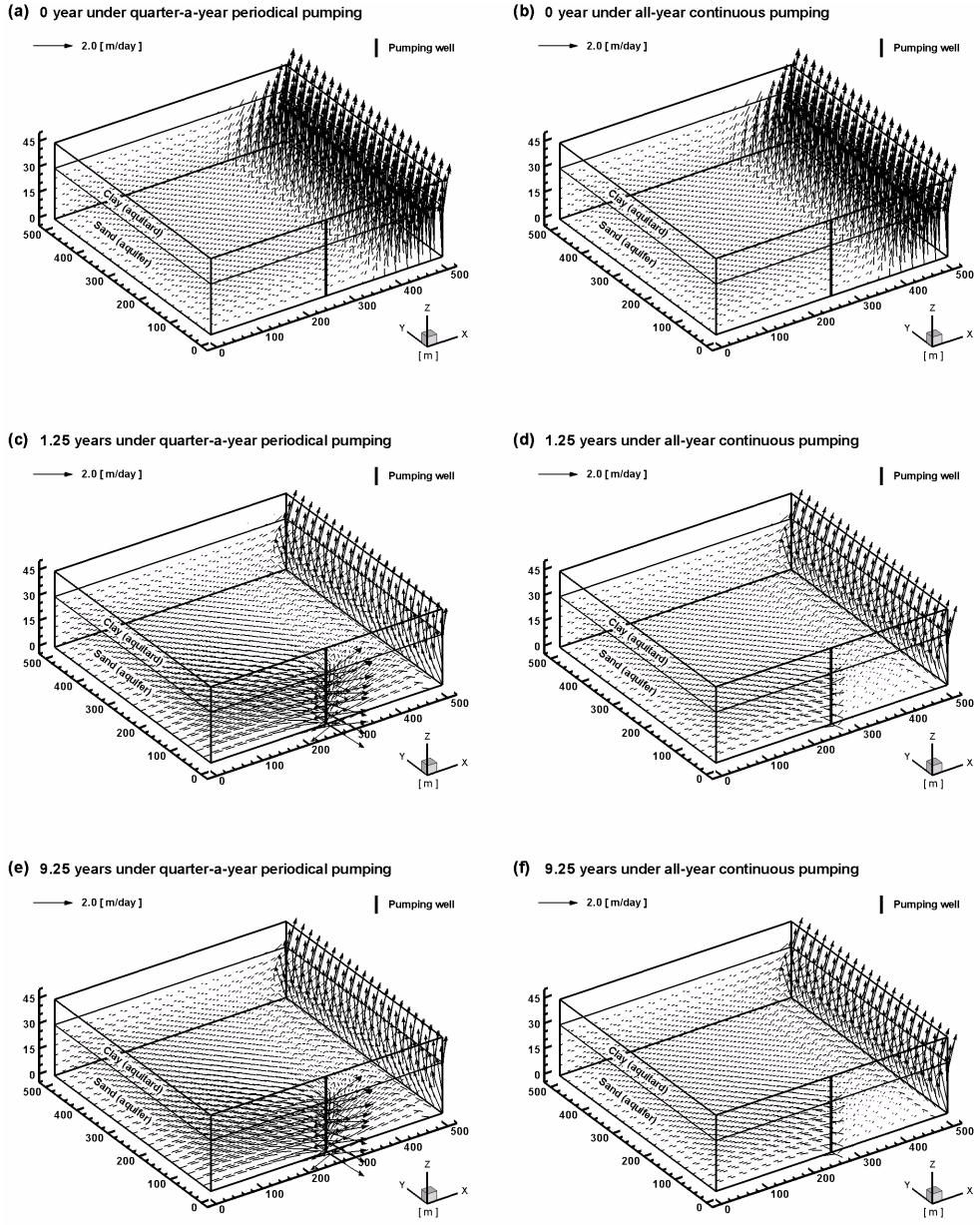

Fig. 3. Spatial distributions of groundwater flow flux in the layered coastal aquifer system after (a) and (b) 0 year (initial condition), (c) and (d) 1.25 years, and (e) and (f) 9.25 years under the quarter-a-year periodical (left column) and all-year continuous (right column) pumping schemes.

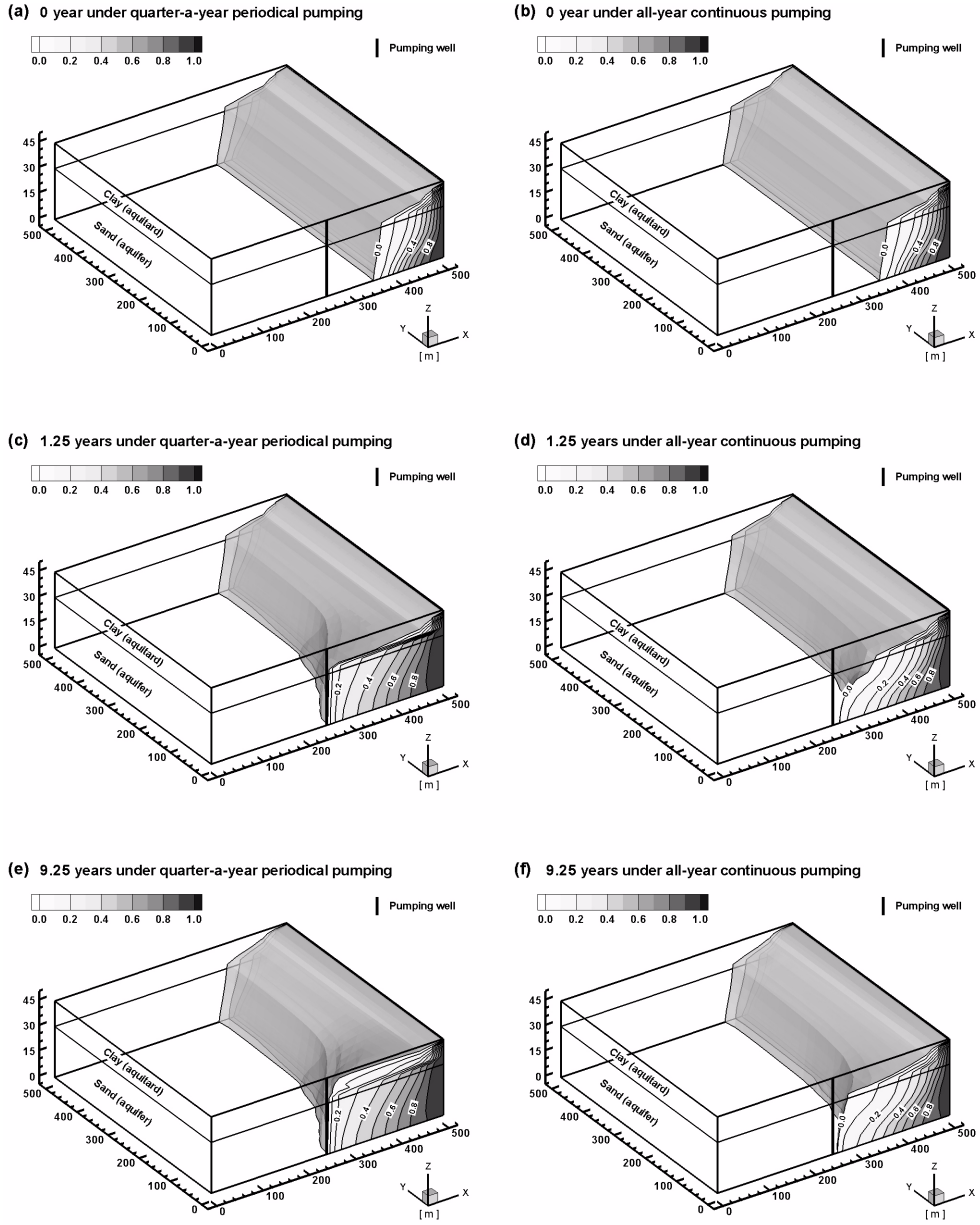

Fig. 4. Spatial distributions of seawater-normalized salt concentration in the layered coastal aquifer system after (a) and (b) 0 year (initial condition), (c) and (d) 1.25 years, and (e) and (f) 9.25 years under the quarter-a-year periodical (left column) and all-year continuous (right column) pumping schemes.

양수할 때의 수리 수두, 지하수 유동 속도, 해수 표준화 염분 농도 및 해수 표준화 염분 이동 속도를 각각 도시한 그림이다. 이들 그림에서 보다시피 연속적인 양수(양수 방식 1) 시에는 수리 수두의 하강과 해수의 침투가 지속적으로 진행되어 정적인 정상 상태에 도달하지만, 주기적인 양수(양수 방식 3) 시에는 양수 기간과 양수 중단 기간에 걸쳐 수리 수두의 하강과 상승 및 해수의 침투와 후퇴가 1년 주기로 반복적으로 일어나면서 그 변화의 정도가 점진적으로 증가하여 동적인 정상 상태에 도달한다. 그리고 두 가지 양수 방식 모두에서 수리 수두의 변화와 해수의 침투 양상이 점토층(준대수층)에서보다 사토층(대수층)에서 크게 나타난다. 이는 사토층의 수리전도도가 점토층의 그것에 비해 더 크기 때문이다.

한편 Fig. 4에서 보다시피 연속적인 양수(양수 방식 1)보다 주기적인 양수(양수 방식 3) 시에 시간이 지남에 따라 점토층 내에 더 많은 염분 축적(salt buildup)이 발생

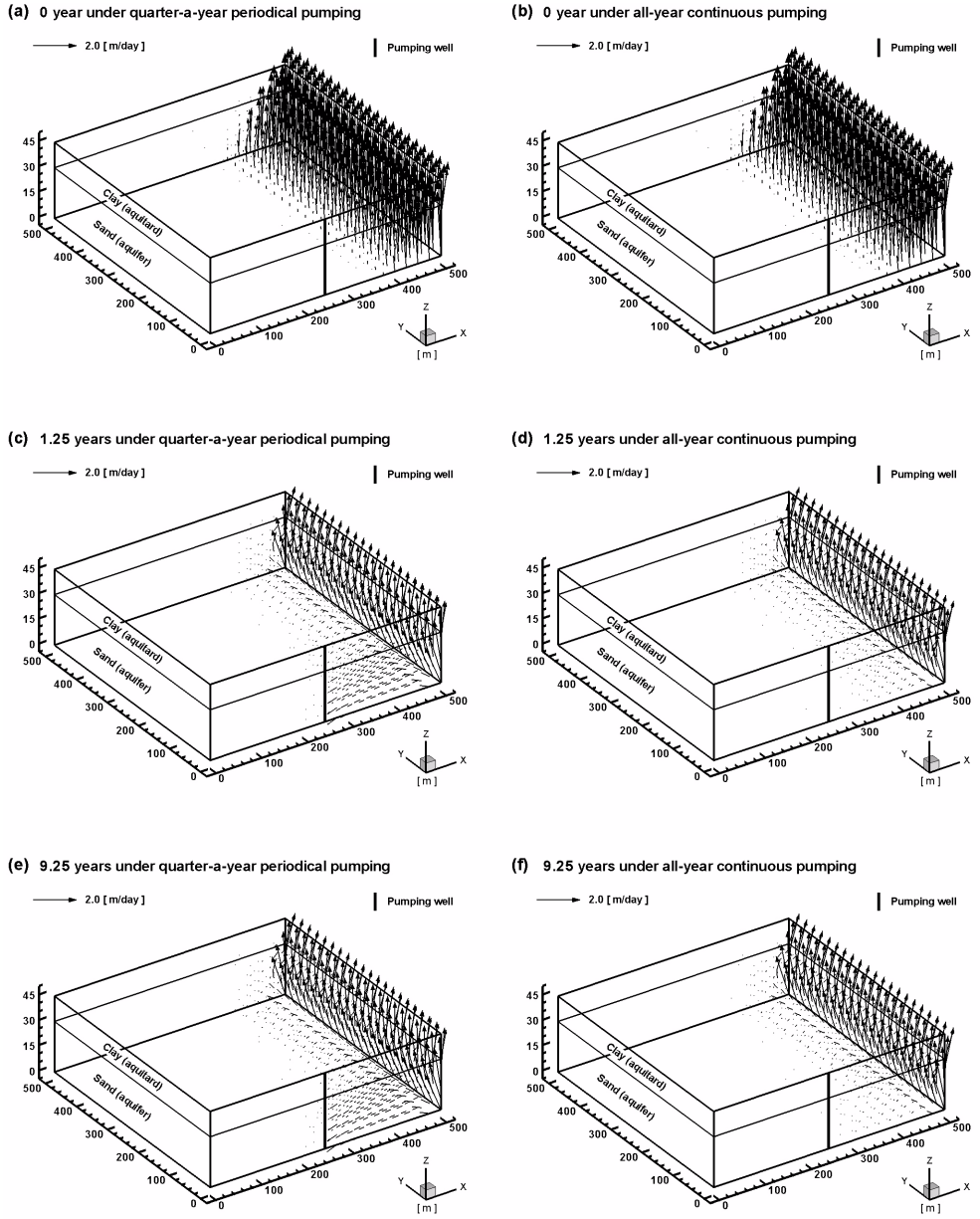

Fig. 5. Spatial distributions of seawater-normalized salt transport flux in the layered coastal aquifer system after (a) and (b) 0 year (initial condition), (c) and (d) 1.25 years, and (e) and (f) 9.25 years under the quarter-a-year periodical (left column) and all-year continuous (right column) pumping schemes.

한다. 또한 주기적인 양수(양수 방식 3) 시에 양수 기간 동안 사토층에서는 염분 농도가 증가하지만, 점토층에서는 염분 농도가 감소한다. 이는 양수 기간 동안 사토층에서는 해안으로부터 직접 유입되는 염분량이 상대적으로 많지만, 점토층에서는 해안으로부터 직접 유입되는 염분량이 상대적으로 적은데다가 잔류되어 있는 염분이 사토층을 통하여 양수정으로 쉽게 유출되기 때문인 것으로 해석된다. 반면에 주기적인 양수(양수 방식 3) 시에 양수 중단 기간 동안 사토층에서는 염분 농도가 감소하지만, 점토층에서는 염분 농도가 증가한다. 이는 양수 중단 기간 동안 사토층에서는 지하수 유동에 따라서 해안 쪽으로 염분이 상대적으로 빠르게 후퇴하지만, 점토층에서는 이러한 해안 쪽으로의 염분 이동이 상대적으로 느리게 일어나는데다가 후퇴 중인 사토층 내의 염분이 수리동역학적 분산에 의하여 사토층에서 점토층으로 이동하기 때문인 것으로 해석된다. 이러한 현상은 근본적으로 사토층과 점토층의 수리전도도 및 분산지수의 차이에 의한 것이다.

Fig. 6에서부터 Fig. 9는 균질 해안 대수층에서 양수

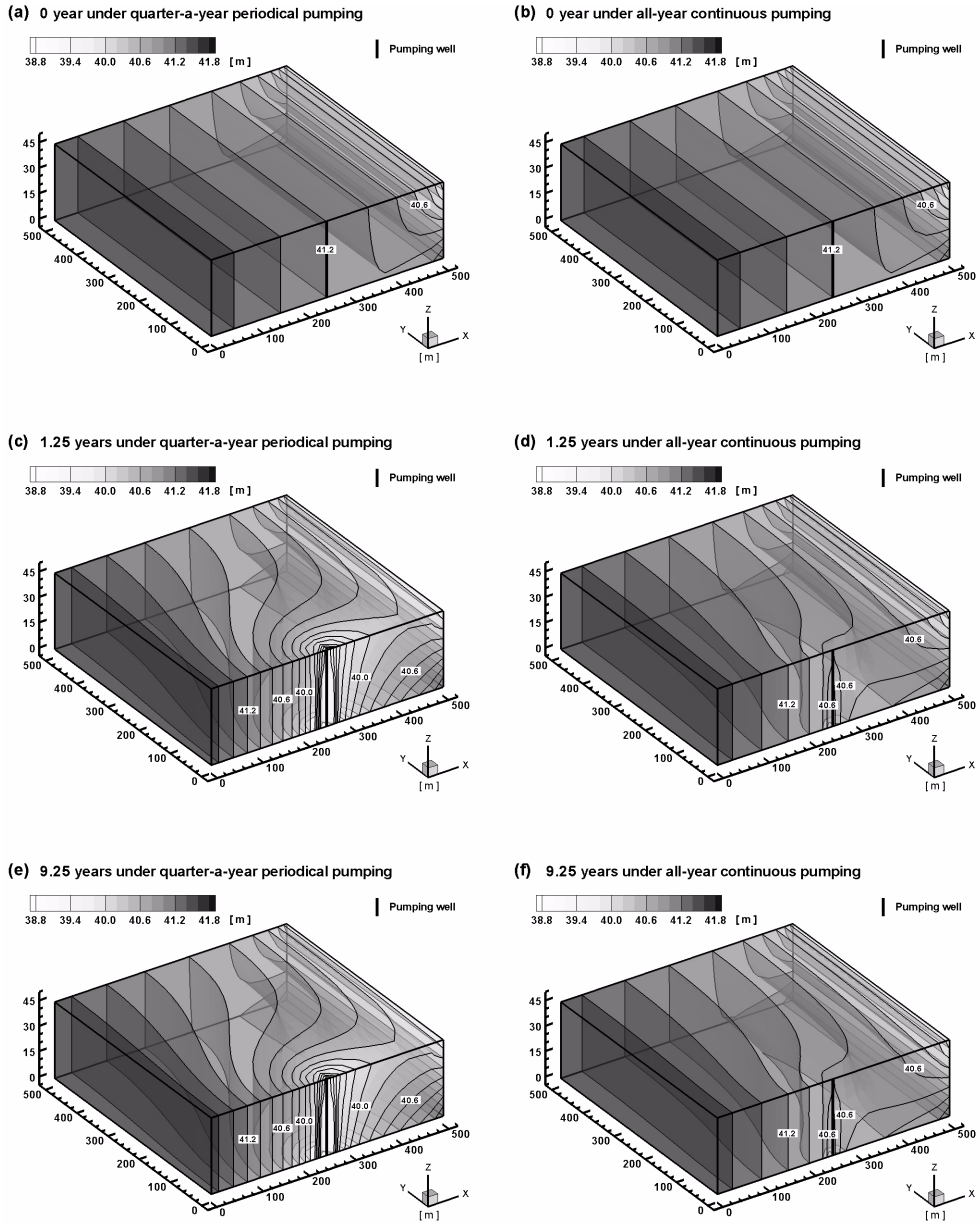

Fig. 6. Spatial distributions of hydraulic head in the lumped coastal aquifer system after (a) and (b) 0 year (initial condition), (c) and (d) 1.25 years, and (e) and (f) 9.25 years under the quarter-a-year periodical (left column) and all-year continuous (right column) pumping schemes.

방식 3(왼쪽 열)과 양수 방식 1(오른쪽 열)로 지하수를 양수할 때의 수리 수두, 지하수 유동 속도, 해수 표준화 염분 농도 및 해수 표준화 염분 이동 속도를 각각 도시한 그림이다. 이들 그림에서 보다시피 층상 해안 대수층에서와 마찬가지로 주기적인 양수(양수 방식 3)가 연속적인 양수(양수 방식 1)에 비해 상대적으로 더 큰 수리 수두와 염분 농도의 변화를 야기시킨다. 그러나 균질 해안 대수층 내에는 점토층이 존재하지 않기 때문에 층상 해안 대수층에서와 같은 층상 불균질성의 효과(Fig. 2에서부터 Fig. 5)는 나타나지 않는다.

Fig. 10은 층상(a, c, e) 및 균질(b, d, f) 해안 대수층에서 세 가지 양수 방식으로 지하수를 양수할 경우 세 관측점 A(양수정 중간, 즉 x = 250 m, y = 0 m, z = 15 m), B(양수정과 해안 측면 중간 사토층, 즉 x = 375 m, y = 0 m, z = 15 m) 및 C(양수정과 해안 측면 중간 점토층, 즉 x = 375 m, y = 0 m, z = 37.5 m)에서의 수리 수두 변화를 도시한 그림이다. 그림에서 보다시피 연속적인 양수(양수 방식 1) 시에는 세 관측점 모두에서 수리 수두가

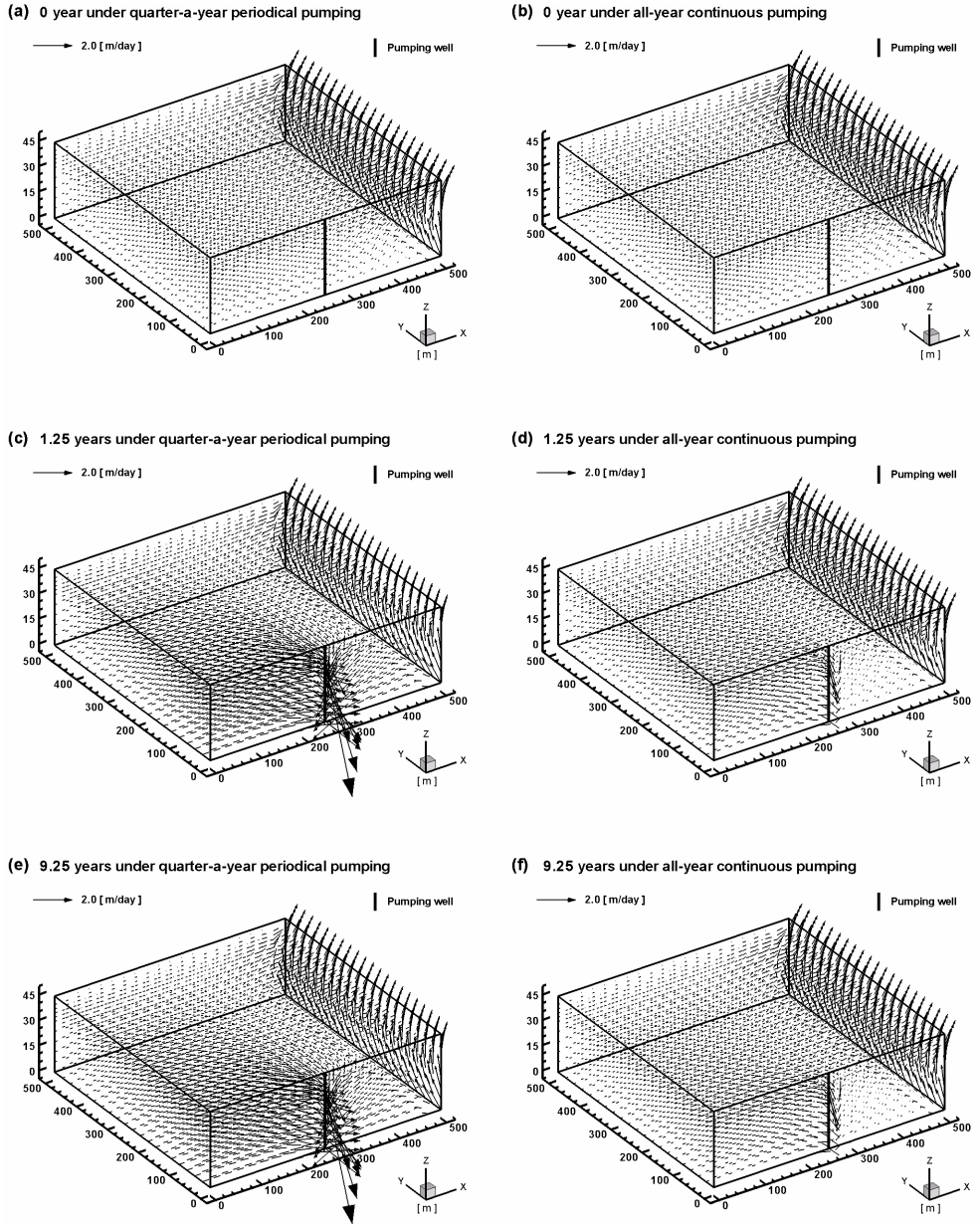

Fig. 7. Spatial distributions of groundwater flow flux in the lumped coastal aquifer system after (a) and (b) 0 year (initial condition), (c) and (d) 1.25 years, and (e) and (f) 9.25 years under the quarter-a-year periodical (left column) and all-year continuous (right column) pumping schemes.

지속적으로 감소하여 비교적 빠르게 정적인 정상 상태에 도달하며, 층상 해안 대수층에 비해 균질 해안 대수층 내에서 수리 수두가 더 크게 감소한다. 한편 주기적인 양수(양수 방식 2 및 3) 시에는 양수 기간과 양수 중단 기간에 걸쳐 수리 수두의 하강과 상승이 1년 주기로 반복적으로 일어나면서 그 변화의 정도가 점진적으로 증가하여 동적인 정상 상태에 도달한다. 또한 주기적인 양수(양수 방식 2 및 3) 시에는 양수 강도가 클수록, 즉 양수 방식 2보다 양수 방식 3인 경우에 각각의 관측점에서의 수리 수두의 변화 속도와 정도가 더 빨라지고 커진다.

그리고 이러한 주기적인 양수(양수 방식 2 및 3) 시에 각 관측점에서의 수리 수두의 변화는 대수층의 형태와 위치에 따라서 서로 다르게 나타난다. 관측점 A에서는 층상(Fig. 10a) 및 균질(Fig. 10b) 해안 대수층 모두에서 수리 수두가 양수 기간 초기에 순간적으로 급격히 감소하여 이후 일정하게 유지하다가 양수 중단 기간 초기에 순간적으

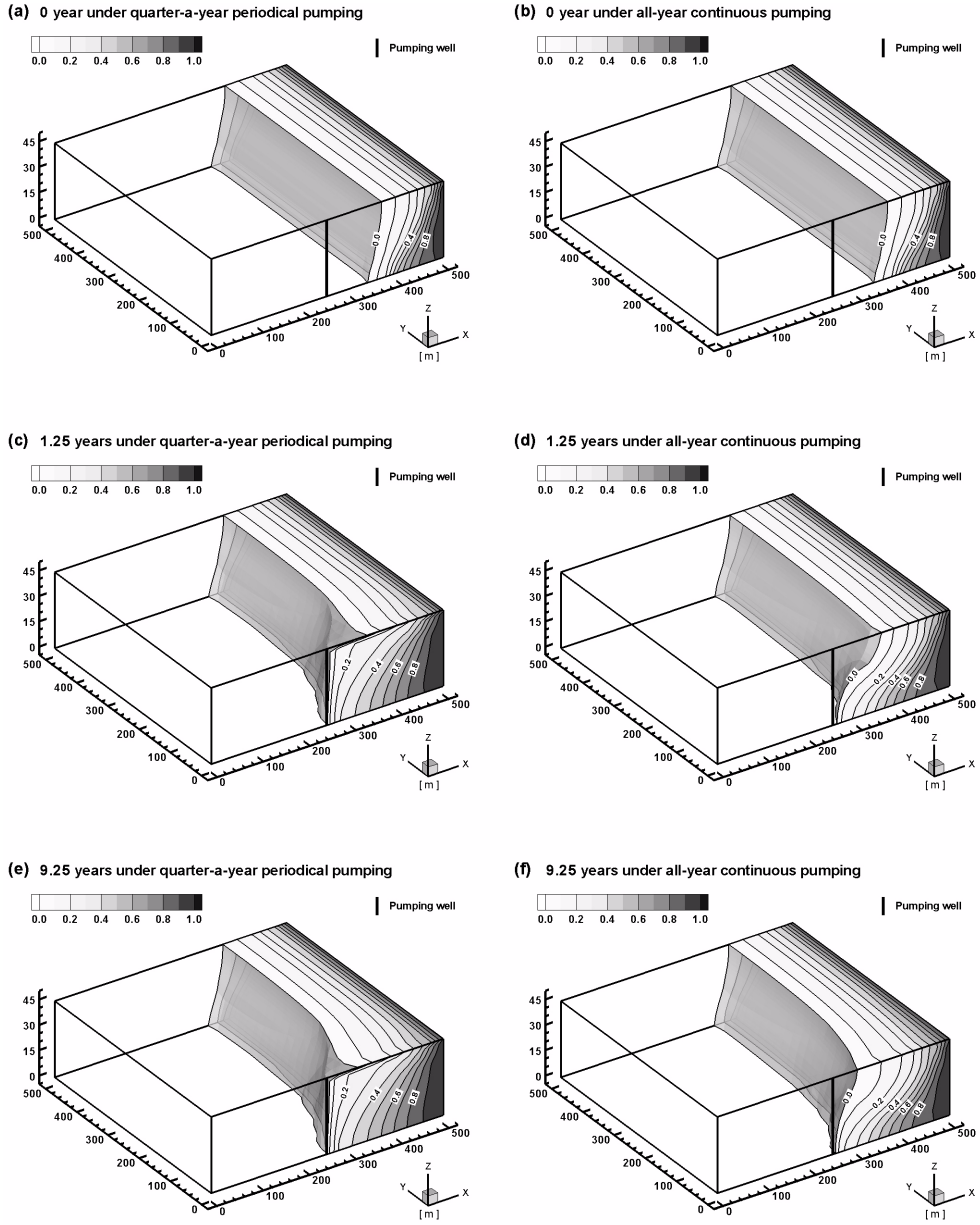

Fig. 8. Spatial distributions of seawater-normalized salt concentration in the lumped coastal aquifer system after (a) and (b) 0 year (initial condition), (c) and (d) 1.25 years, and (e) and (f) 9.25 years under the quarter-a-year periodical (left column) and all-year continuous (right column) pumping schemes.

로 양수 전 초기 상태를 향해 급격히 증가하여 이후 일정하게 유지하는 양상을 보여준다. 이와 같이 관측점 A에서 양수 및 양수 중단에 대해 수리 수두 변화가 매우 빠른 것은 관측점 A가 바로 양수정 중간(z = 15 m)에 위치하기 때문이다. 한편 관측점 B에서는 층상(Fig. 10c) 및 균질(Fig. 10d) 해안 대수층 모두에서 수리 수두가 관측점 A에서와 동일한 양상을 보여주지만, 그 변화의 폭은 관측점 A에서 보다 작다. 그 이유는 관측점 B는 관측점 A가 있는 양수정에서부터 해안 쪽으로 125 m 떨어져 있기 때문이다. 반면 관측점 C에서는 층상 해안 대수층인 경우(Fig. 10e)에는 수리 수두가 양수 기간 초기에는 순간적으로 급격히 감소하여 이후 서서히 더 감소하다가 양수 중단 기간 초기에는 순간적으로 양수 전 초기 상태를 향해 급격히 증가하여 이후 서서히 더 증가하는 양상을 보여주지만, 균질 해안 대수층인 경우(Fig. 10f)에는 양수 및 양수 중단에 대해 수리 수두가 상대적으로 더 급격하게 변

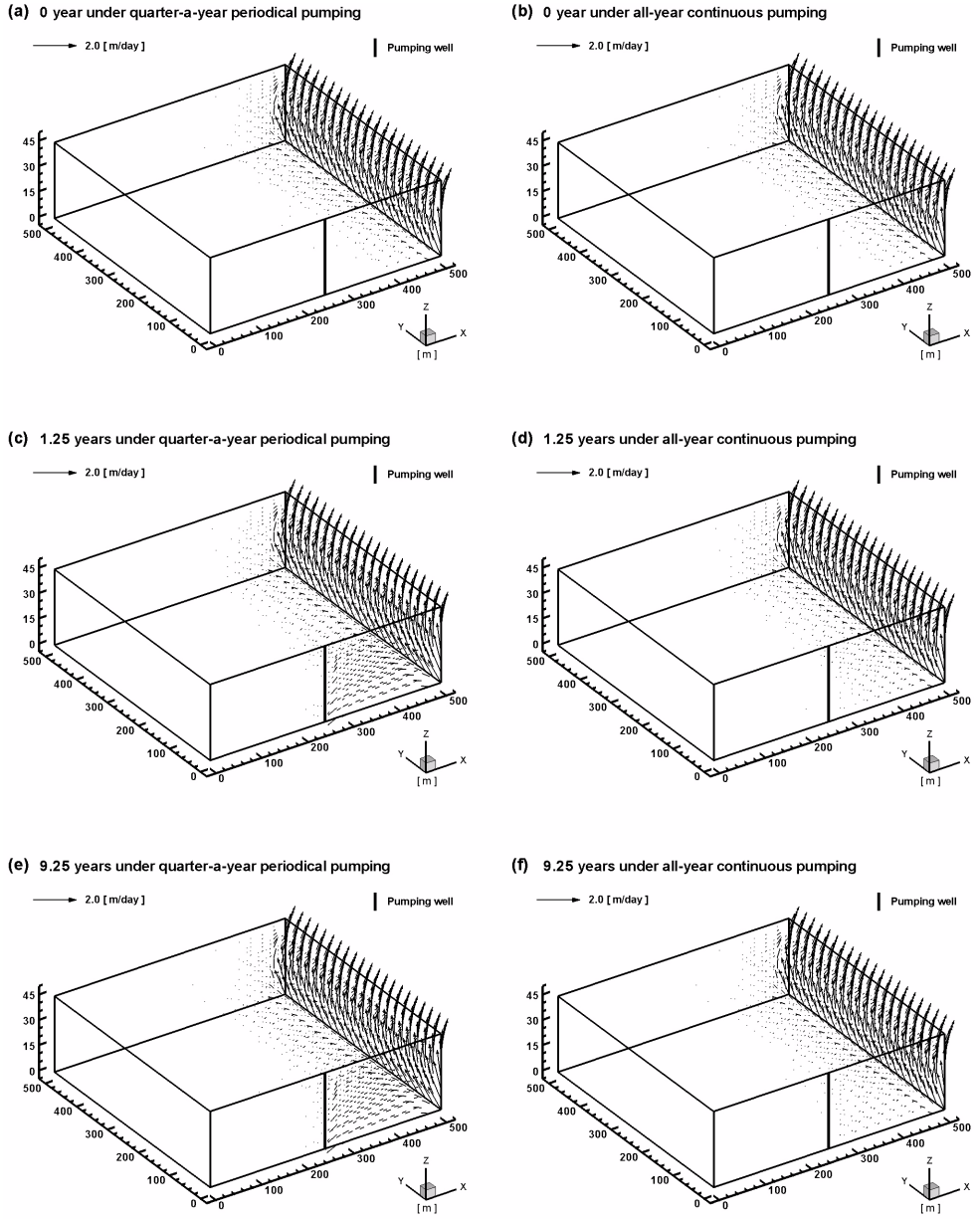

Fig. 9. Spatial distributions of seawater-normalized salt transport flux in the lumped coastal aquifer system after (a) and (b) 0 year (initial condition), (c) and (d) 1.25 years, and (e) and (f) 9.25 years under the quarter-a-year periodical (left column) and all-year continuous (right column) pumping schemes.

화하는 양상을 보여준다. 이러한 현상은 관측점 C가 층상 해안 대수층인 경우에는 사토층에 비해 상대적으로 수리 전도도가 작은 점토층 내에 위치하지만, 균질 해안 대수층인 경우에는 동일한 위치에서 그러한 층상 불균질성이 존재하지 않기 때문이다.

Fig. 11은 층상(a, c, e) 및 균질(b, d, f) 해안 대수층에서 세 가지 양수 방식으로 지하수를 양수할 경우 상기한 세 관측점 A, B 및 C에서의 해수 표준화 염분 농도 변화를 도시한 그림이다. 그림에서 보다시피 연속적인 양수(양수 방식 1) 시에는 세 관측점 모두에서 염분 농도가 지속적으로 증가하여 비교적 느리게 정적인 정상 상태에 도달하며, 층상 해안 대수층에 비해 균질 해안 대수층 내에서 염분 농도가 더 크게 증가한다. 한편 주기적인 양수(양수 방식 2 및 3) 시에는 양수 기간과 양수 중단 기간에 걸쳐 염분 농도의 증가와 감소가 1년 주기로 반복적으로 일어나면서 그 변화의 정도가 점진적으로 증가하여 동

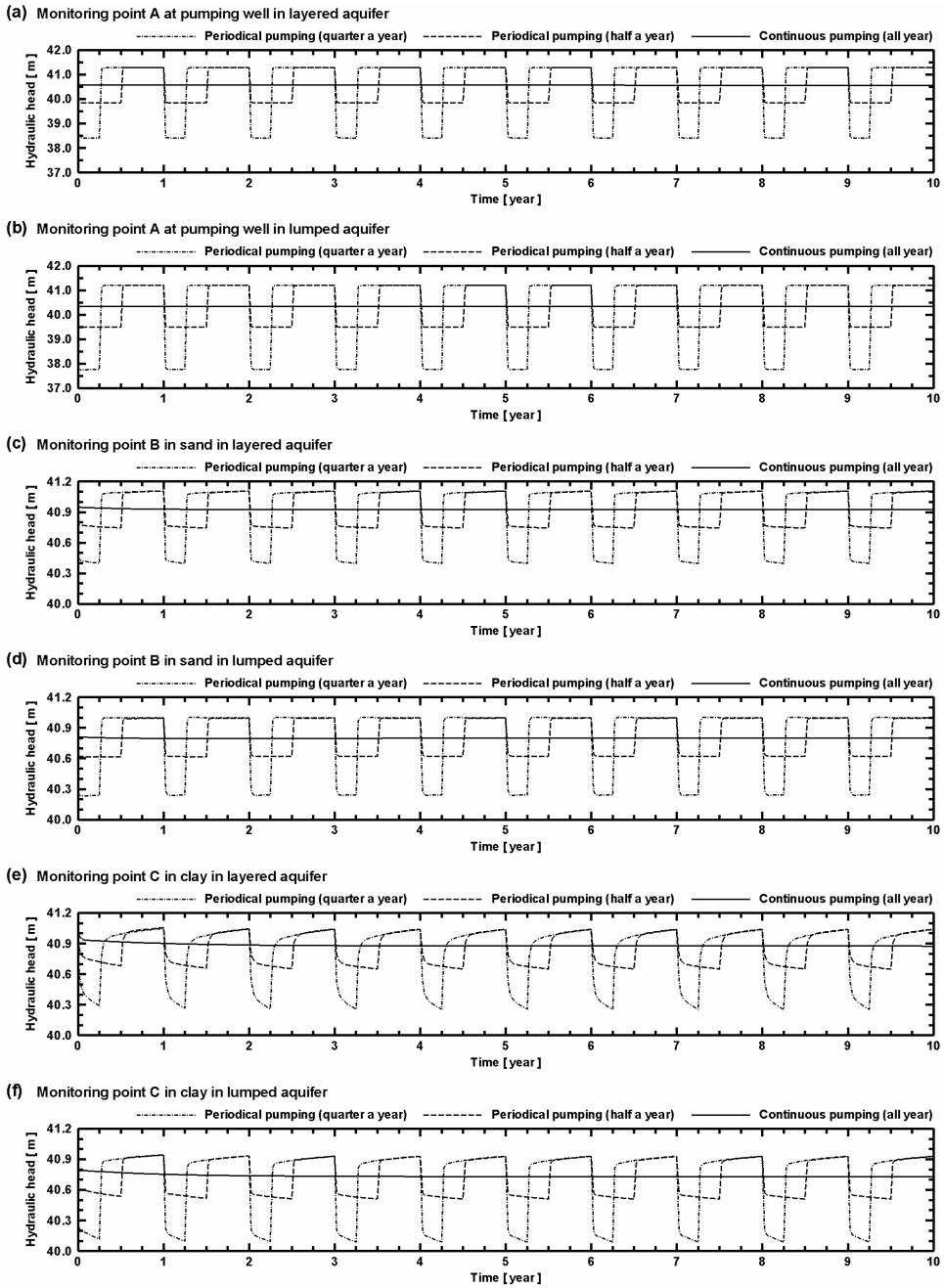

Fig. 10. Temporal changes of hydraulic head at the monitoring points (a) and (b) A, (c) and (d) B, and (e) and (f) C in the layered (odd rows) and lumped (even rows) coastal aquifer systems under the three different pumping schemes.

적인 정상 상태에 도달한다. 또한 주기적인 양수(양수 방식 2 및 3) 시에는 양수 강도가 클수록, 즉 양수 방식 2보다 양수 방식 3인 경우에 각각의 관측점에서의 염분 농도의 변화 속도와 정도가 더 빨라지고 커진다.

그리고 이러한 주기적인 양수(양수 방식 2 및 3) 시에 각 관측점에서의 염분 농도의 변화는 대수층의 형태와 위치에 따라서 서로 다르게 나타난다. 관측점 A에서는 층상(Fig. 11a) 및 균질(Fig. 11b) 해안 대수층 모두에서 염분 농도가 양수 기간 초기에는 순간적으로 급격히 감소하다가 서서히 증가하여 양수가 중단된 이후에는 비교적 짧은 시간 내에 급격히 증가하다가 다시 서서히 감소하는 양상을 보여준다. 이는 양수 기간과 양수 중단 기간 동안 모두 양수정 주변에서 지하수 유동에 비해 이송과 수리동역학적 분산에 의한 염분 이동이 상대적으로 더 느리게 일

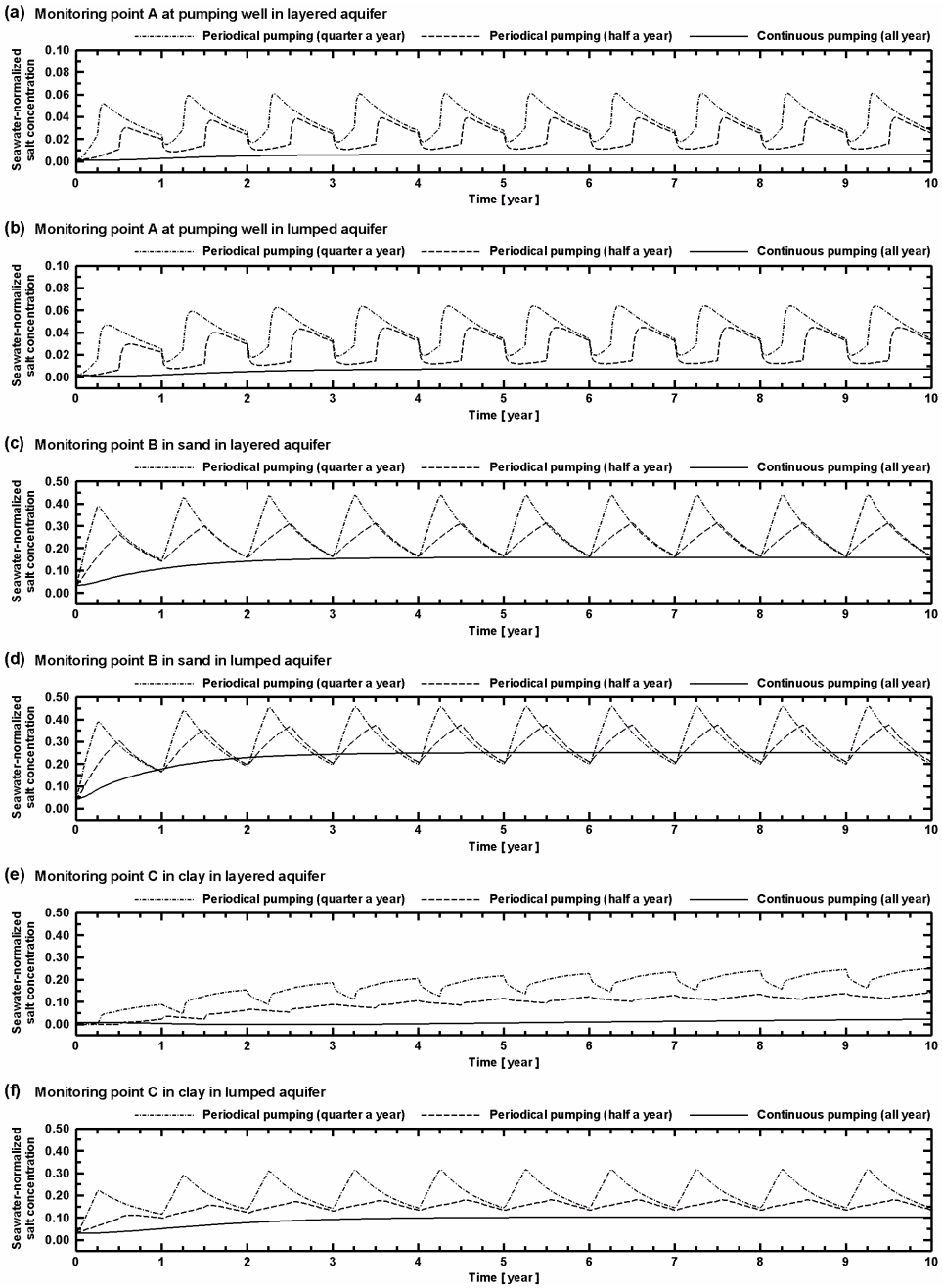

Fig. 11. Temporal changes of seawater-normalized salt concentration at the monitoring points (a) and (b) A, (c) and (d) B, and (e) and (f) C in the layered (odd rows) and lumped (even rows) coastal aquifer systems under the three different pumping schemes.

어나기 때문인 것으로 해석된다. 즉 양수 기간 초기에는 양수정을 통한 염분 유출이 발생하고 해수 침투는 더 느리게 일어나면서 염분 농도가 급격히 감소하지만, 이후 지속적인 해수 침투에 의해서 염분 농도가 서서히 증가하는 양상을 보이는 것이다. 그리고 양수 중단 기간 초기에는 양수정을 통한 염분 유출은 중지되고 해수 후퇴는 더 느리게 일어나면서 염분 농도가 급격하게 증가하지만, 이후 지속적인 해수 후퇴에 의해서 염분 농도가 서서히 감소하는 양상을 보이는 것이다. 한편 관측점 B에서는 층상(Fig. 11c) 및 균질(Fig. 11d) 해안 대수층 모두에서 염분 농도가 양수 기간 동안 지속적으로 증가하다가 양수 중단 기간 동안 지속적으로 감소하는 양상을 보여준다. 이는 양수정과 해안선 사이에서 일반적으로 발생하는 해수 침투와 후퇴에 기인하는 것으로 해석된다. 반면 관측점 C에서

는 균질 해안 대수층인 경우(Fig. 11f)에는 염분 농도가 관측점 B에서와 동일한 양상을 보여주지만, 층상 해안 대수층인 경우(Fig. 11e)에는 염분 농도가 관측점 B에서와 정반대로 양수 기간 동안 지속적으로 감소하다가 양수 중단 기간 동안 지속적으로 증가하는 특징적인 양상을 보여준다. 이러한 현상은 관측점 C가 층상 해안 대수층인 경우에는 사토층에 비해 상대적으로 수리전도도가 작고 분산지수가 큰 점토층 내에 위치하지만, 균질 해안 대수층인 경우에는 동일한 위치에서 그러한 층상 불균질성이 존재하지 않기 때문이다.

5. 결 론

지질 매체의 층상 불균질성과 지하수 양수 방식이 해안 대수층에서의 지하수 유동과 염분 이동에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 수리동역학적 분산 수치 모델을 이용한 일련의 삼차원 수치 모델링이 수행되었다. 해수 침투에 대한 층상 불균질성의 영향을 평가하기 위하여 하부 사토층(대수층)과 상부 점토층(준대수층)으로 구성된 층상 불균질 해안 대수층과 이에 상응하는 등가의 물질로 구성된 균질 해안 대수층을 수치 모델링하였다. 또한 해수 침투에 대한 지하수 양수 방식의 영향을 평가하기 위하여 전체 수치 모델링 기간 동안에 동일한 양의 지하수를 양수하는 연속적인 지하수 양수 방식과 두 개의 주기적인 지하수 양수 방식을 상기한 두 해안 대수층에 적용하였다. 수치 모델링 결과는 주기적인 지하수 양수 방식이 층상 대수층의 하부 사토층뿐만 아니라 상부 점토층에서의 지하수 유동과 염분 이동에 보다 중대한 악영향을 끼치며, 주기적인 지하수 양수 시에 양수 강도가 클수록 지하수 염수화가 공간적 및 시간적으로 더욱 심화됨을 보여준다. 이는 해수 침투에 의한 지하수 염수화를 최소화하기 위해서는 지속적인 지하수 양수 방식이 보다 더 적합할 수 있음을 의미한다. 또한 수치 모델링 결과는 주기적인 지하수 양수 시에 상부 점토층에서의 지하수 염수화 양상이 하부 사토층에서의 그것에 비해 매우 다르게 발생함을 보여준다. 이러한 두 지층 사이의 지하수 염수화 양상의 차이는 층상 해안 대수층의 층상 불균질성에 기인하는 것으로 해석된다. 따라서 해안 지역에서 지하수 염수화를 최소화하고 지하수 자원을 보호하기 위해서는 실제 해안 대수층의 수리지질학적 특성에 대한 보다 정확한 이해와 고려는 물론이고, 보다 적합한 지하수 양수 방식의 선택이 필수적이라 할 수 있다.

사 사

본 연구는 교육과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보 기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 본 연구는 또한 교육과학기술부의 Brain Korea 21 프로젝트의 부분적인 지원에 의해 수행되었습니다. 아울러 본 논문의 심사 과정에서 발전적인 조언과 비판을 해주신 강원대학교 이진용 교수님과 익명의 한 심사자님께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

Carsel, R.F. and Parrish, R.S., 1988, Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics, *Water Resources Research*, **24**(5), 755-769.

Guymon, G.L., 1994, Unsaturated Zone Hydrology, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, p. 210.

Jeen, S.W., Kim, J.M., Ko, K.S., Yum, B., and Chang, H.W., 2001, Hydrogeochemical characteristics of groundwater in a mid-western coastal aquifer system, Korea, *Geosciences Journal*, **5**(4), 339-348.

Kim, J.H., 2001, Hydrogeochemical Study on Shallow Groundwater at the Coastal Area of Kimjae, Master Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, p. 96.

Kim, R.H., Yum, B., and Chang, H.W., 2002, Hydrogeochemical and isotopic characteristics for salinization of a shallow groundwater in coastal area, Youngkwang, Korea, *Proceedings of the 17th Salt Water Intrusion Meeting*, *Delft*, *Netherlands*, *6-10 May*, p. 227-237.

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.

Voss, C.I. and Souza, W.R., 1987, Variable density flow and solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow freshwater-saltwater transition zone, *Water Resources Research*, **23**(10), 1851-1866.

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, p. 199.