

## 한국 부안 지역 해안 대수층 내의 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 단층 존재의 영향 삼차원 수치 모의

박주현<sup>1</sup> · 김종휘<sup>1</sup> · 김한태<sup>2</sup> · 김준모<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 지구환경과학부, <sup>2</sup>한국건설기술연구원 수자원연구부

## Three-Dimensional Numerical Simulation of Impacts of Fault Existence on Groundwater Flow and Salt Transport in a Coastal Aquifer, Buan, Korea

Ju-Hyun Park<sup>1</sup> · Jung-Hwi Kihm<sup>1</sup> · Han-Tae Kim<sup>2</sup> · Jun-Mo Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

<sup>2</sup>Department of Water Resources Research, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, 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 fault existence on density-dependent groundwater flow and salt transport in coastal aquifer systems. A series of steady-state numerical simulations with calibration is performed first for an actual coastal aquifer system which contains a major fault. A series of steady-state numerical simulations is then performed for a corresponding coastal aquifer system which does not have such a major fault. Finally, the results of both numerical simulations are compared with each other and analyzed. The results of the numerical simulations show that the major fault produces hydrogeologically significant heterogeneity and true anisotropy in the actual coastal aquifer system, and density-dependent groundwater flow, salt transport, and seawater intrusion patterns in the coastal aquifer systems are intensively and extensively dependent upon the existence or absence of such a major fault. Especially, the major fault may act as a pathway for groundwater flow and salt transport along the direction parallel to its plane, while it may also behave as a barrier against groundwater flow and salt transport along the direction perpendicular to its plane.

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

### 요 약 문

해안 대수층 내의 밀도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 단층 존재의 영향을 효과적으로 모사하고 정량적으로 평가하기 위하여 하나의 범용 다차원 수리동역학적 분산 수치 모델을 이용한 일련의 삼차원 수치 모델링이 수행되었다. 먼저 단층이 존재하는 실제 해안 대수층에 대해 보정을 병행한 일련의 정상 상태 수치 모델링을 수행한 다음에 이러한 단층이 존재하지 않는 해안 대수층에 대해 일련의 정상 상태 수치 모델링을 수행하여 그 결과를 서로 비교·분석하였다. 수치 모델링 결과는 단층이 실제 해안 대수층 내에 수리지질학적으로 중대한 불균질성과 진이방성을 야기시키며, 해안 대수층 내의 밀도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동 그리고 해수 침투 양상이 이러한 단층의 존재 여부에 크게 그리고 광범위하게 좌우됨을 보여준다. 특히 단층은 단층면과 평행한 방향으로서는 지하수 유동과 염분 이동에 대해서 통로로 작용하지만, 단층면과 수직인 방향으로서는 지하수 유동과 염분 이동에 대해서 방벽으로 작용하는 것으로 해석된다.

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

\*Corresponding author : junmokim@snu.ac.kr

원고접수일 : 2007. 12. 12 심사일 : 2007. 12. 24 게재승인일 : 2008. 9. 23

질의 및 토의 : 2008. 12. 31 까지

## 1. 서 론

해안 지역에서 염수인 해수가 담수인 지하수가 분포하는 대수층 내로 침투하는 현상을 해수 침투(seawater intrusion, SWI)라고 한다(Bear et al., 1999; Cheng and Ouazar, 2004). 이러한 해수 침투의 일차적인 원인은 해수와 지하수의 밀도 차이이며, 조석, 지하수 양수 및 지하공간 개발 등에 의해서 그 양상이 심화되고 광범위해지게 된다. 이러한 해수 침투 현상은 해안 지하수 자원 고갈(depletion) 및 염수화(salinization)의 직접적인 원인이 되고 있다. 최근 이러한 해수 침투 현상은 우리나라에서도 그 중요성이 인식되어 해안 지하수 수질 분석, 지구물리탐사 및 해수 침투 관측 등의 야외 현장 조사가 활발히 이루어지고 있다(Jeen et al., 2001; 박세창 외, 2002; Kim et al., 2003; Kim et al., 2004; Hwang et al., 2004; 송성호 외, 2005; Park et al., 2005; Kim et al., 2006; Lee and Song, 2007a; Lee and Song, 2007b; Song et al., 2007). 이러한 현장 조사를 통하여 해수 침투 현상을 장기간 관측하고 지속적으로 분석하기 위해서는 많은 시간과 비용이 소모된다. 또한 이러한 현장 조사에서 관정수가 충분히 많지 않을 경우에는 해수 침투의 범위를 시공간적으로 명확히 파악하지 못할 수도 있다. 따라서 이러한 현장 조사 연구의 한계를 보완하고 극복하기 위하여 해안 지역에서의 해수 침투 현상에 대한 수치 모델링 연구가 필요하며, 또한 활발히 진행되어오고 있다.

해안 대수층 내에서의 해수 침투 현상을 모사하는데 이용되는 수치 모델은 크게 경계면 모델(sharp interface model)과 수리동역학적 분산 모델(hydrodynamic dispersion model)로 구분된다. 경계면 모델은 염수와 담수가 혼합되는 전이대(transition zone) 또는 분산대(dispersion zone)를 두께가 없는 하나의 면으로 가정하여 해석하는 방법으로 비교적 간단하지만, 해수 침투의 시간적 및 공간적 양상을 정확하게 모사하지는 못한다. 한편 수리동역학적 분산 모델은 이러한 전이대를 물리적으로 좀 더 현실적으로 정확하게 모사할 수는 있지만, 모델을 구현하는 것이 경계면 모델에 비하여 어렵고 복잡하다. 국외에서는 1960년대부터 현재까지 해수 침투에 대한 다양한 수치 모델링 연구가 진행되어 오고 있다(Henry, 1964; Pinder and Cooper, 1970; Segol et al., 1975; Frind, 1982; Huyakorn et al., 1987; Voss and Souza, 1987; Essaid, 1990; Galeati et al., 1992; Kontis, 1999; Misut and Voss, 2007). 국내에서는 박남식 · 이용두(1997)가 경계면 모델을 이용하여 중·동 제주 수역의 지하수 개발로 인한 지하

수위 변화와 해수 침투에 대한 수치 모델링을 수행하였다. 또한 심병완 · 정상용(2003)은 경계면 모델을 이용하여 해안 대수층의 해수 침투 경계면을 추정하는 수치 모델링을 수행하였다. 이러한 경계면 모델링은 실제 해안 대수층 내에서 발생하는 해수와 지하수 사이의 전이대를 모사하지 못하였고 그에 따른 밀도 의존적 지하수 유동과 염분 이동 현상도 제대로 모사하지 못하였다. 심병완 외(2002)는 수리동역학적 분산 수치 모델을 이용하여 분산 지수의 변화에 따른 해수 침투 범위의 변화를 이차원적으로 모사하는 수치 모델링을 수행하였다. 이러한 이차원 수치 모델링은 실제 해안 대수층에서 관찰되는 해수 침투의 삼차원적 공간 분포를 명확히 보여 주지 못하였다. 김경호 외(2005)는 수리동역학적 분산 수치 모델을 이용하여 전라북도 김제시 죽산면 대창리 일대에 분포하는 포화 및 불포화 다공질 지질 매체 내에서의 해수 침투 현상을 모사하는 수치 모델링을 수행하였다. 이러한 수치 모델링은 대상 지역의 밀도 의존 지하수 유동과 염분 이동 현상을 삼차원으로 모사하였지만, 지층(geologic formation), 절리(joint) 및 단층(fault) 등의 지질학적 및 수리지질학적 분포 특성을 고려하지는 못하였다.

소규모의 절리와 대규모의 단층과 같은 불연속면은 해안 대수층 내에 수리지질학적 불균질성(heterogeneity)과 진이방성(true anisotropy)을 야기시키므로 해수 침투 현상을 보다 정량적이고 정확하게 모사하기 위해서는 이들의 분포 특성을 수치 모델링에 합리적이고 타당하게 반영하는 것이 매우 필요하다. 특히 단층면에 평행한 방향으로의 단층의 수리전도도는 주변의 지층에 비하여 매우 높고 수직인 방향으로의 단층의 수리전도도는 평행한 방향의 그것에 비하여 매우 낮기 때문에 해안 대수층 내에 매우 중대한 불균질성과 진이방성을 발생시키게 된다. 따라서 해수 침투 수치 모델링을 수행하는 연구 지역 내에 실제로 단층이 존재하는 경우에는 이를 수치 모델링에 합리적이고 타당하게 반영하는 것이 보다 정량적이고 정확한 해수 침투 현상 예측 및 분석에 반드시 필요하다.

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 단층 존재의 영향을 효과적으로 모사하고 정량적으로 평가하는 것이다. 해수 침투에 대한 이러한 단층 존재의 영향에 대한 정량적 이해는 해안 지하수 자원의 최적 관리를 위한 지하수 양수 기법의 계획, 설계, 평가 및 수정에 활용될 수 있는 개선된 지침을 제안할 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 질량을 시간에 따라 계산할 수 있다. 이러한 COFAT3D(Kim and Yeh, 2004)는 비정상 상태 문제를 풀기 위해서 adaptive finite difference time-stepping scheme을 사용하며, 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, 입력 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. 해수 침투 현황

연구 지역은 행정 구역 상으로 전라북도 부안군 변산면 격포리에 속하며, 경위도 상으로는 동경 126° 29' 00", 북위 35° 38' 00" 인근에 위치한다(Fig. 1).

최근 연구 지역에서는 전기전도도 탐사 결과 작물의 생육이 불가능할 정도의 높은 염분 농도가 관측되고 있으며, 지하수 수질 분석 결과 이미 해수 침투가 상당히 진행되어 있음이 밝혀졌다(농업기반공사, 2005). 또한 연구 지역에서는 농업 용수로 사용되는 지하수 개발량이 꾸준히 증가하고 있기 때문에 앞으로도 해수 침투와 지하수 염수화(groundwater salinization)가 더욱 심화될 가능성이 매우 높은 것으로 평가되었다(농업기반공사, 2004).

### 3.2. 지형 및 지질

연구 지역의 지형은 전반적으로 동쪽에서 서쪽으로 갈

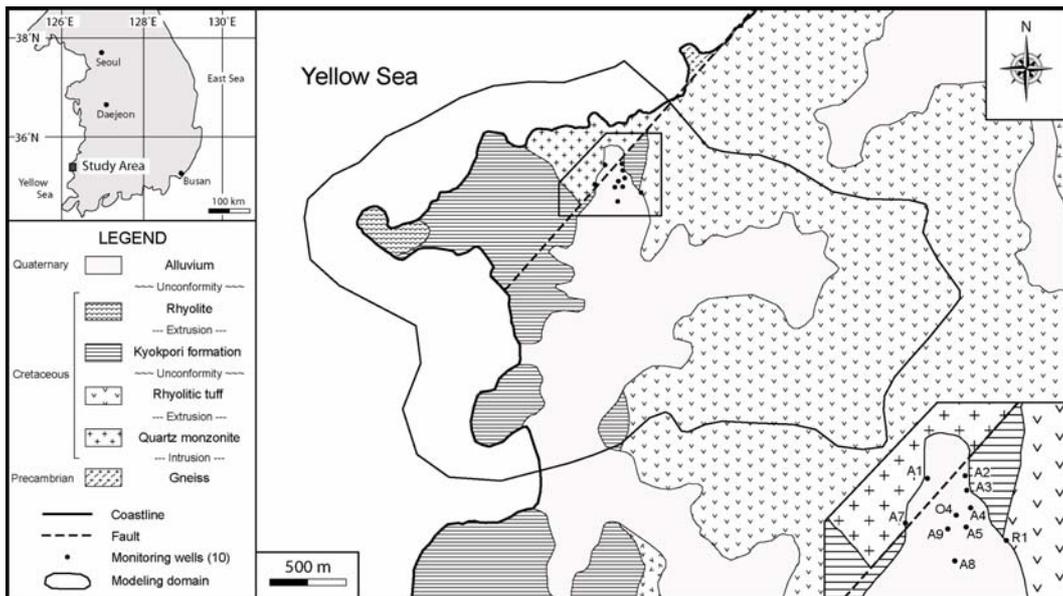


Fig. 1. Location and geologic maps of the study area and layout of the 10 monitoring wells.

수록 고도가 낮아지는 동고서저의 특징을 보여 주며, 풍화가 많이 진행되어 연구 지역 중심부가 저지대를 형성하고 있다.

연구 지역의 지질은 하부로부터 선캠브리아기 편마암과 백악기 석영몬조니암, 유문암질 응회암, 격포리층(역암, 사암, 셰일) 및 유문암으로 이루어져 있으며, 이들을 포복하는 제4기 충적층이 연구 지역 중심부에 분포하고 있다 (Fig. 1). 이들 지층은 다양한 방향의 많은 절리들을 포함하고 있으며, 특히 연구 지역 북쪽에서는 폭이 약 10 m 이고 경사가 거의 수직인 대규모 단층(fault) 한 개가 북동 방향으로 분포하고 있다. 따라서 연구 지역에 분포하는 해안 대수층은 수리지질학적으로 대규모 단층에 의해서 절개되어진 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 절리군들(joint sets)로 구성되어 있어서 전체적으로 파쇄다공질 지질 매체(fractured porous geologic medium)로 작용한다.

3.3. 지층 및 단층의 물성

본 연구에 사용된 각 지층 및 단층의 물성 값은 다양

한 현장 지질 조사 및 수리지질학적 시험 결과와 관련 참고문헌들(Bear, 1972; Li and Gregory, 1974; Anderson, 1979; Freeze and Cherry, 1979; Klotz et al., 1980; van Genuchten, 1980; Carsel and Parrish, 1988; Domenico and Schwartz, 1990; Neuman, 1990; Fetter, 1994)로부터 구하였다(Table 1). 그리고 각 지층 및 단층 내에 분포하는 절리들을 대표하는 절리군의 수와 그 주향, 경사 및 간격(spacing)은 현장 지질 조사 자료에 대한 통계 처리를 통해 얻었으며, 절리군의 간극(aperture)은 절리군의 간격과 양수 시험을 통해 결정된 각 지층의 포화수리전도도로부터 cubic law(Parsons, 1966; Snow, 1968; Snow, 1969)를 사용하여 구하였다(Table 2).

4. 수치 모델링

4.1. 삼차원 지층 모델 및 유한 요소망

수치 모델링 영역의 측면 경계로 내륙 지역에서는 주변 산지의 능선을 설정하였으며, 해안 지역에서는 해수와 지층 경계면인 해저 표면에서 발생하는 지하수 유동 및 염분 이동을 고려하기 위하여 해안선으로부터 바다 쪽으로 300 m에서 600 m 정도 떨어진 곳을 설정하였다(Fig. 1).

Table 1. Properties of geologic media, groundwater, fresh water, seawater, and salt

Property	Quartz monzonite	Rhyolitic tuff	Kyokpori formation Unit 1	Kyokpori formation Unit 2	Rhyolite	Weathered zone	Alluvium and marine sediment	Fault
Porosity of matrix	$1.60 \times 10^{-2}$	$8.50 \times 10^{-2}$	$2.60 \times 10^{-2}$	$2.60 \times 10^{-2}$	$1.00 \times 10^{-1}$	$1.92 \times 10^{-1}$	$4.30 \times 10^{-1}$	$1.92 \times 10^{-1}$
Saturated hydraulic conductivity of matrix [m/sec]								
$K_{sat \ x'x'}$	$8.00 \times 10^{-9}$	$9.00 \times 10^{-12}$	$2.12 \times 10^{-8}$	$2.12 \times 10^{-8}$	$8.00 \times 10^{-9}$	$6.00 \times 10^{-5}$	$1.04 \times 10^{-4}$	$2.28 \times 10^{-10}$
$K_{sat \ y'y'}$	$8.00 \times 10^{-9}$	$9.00 \times 10^{-12}$	$2.12 \times 10^{-8}$	$2.12 \times 10^{-8}$	$8.00 \times 10^{-9}$	$6.00 \times 10^{-5}$	$1.04 \times 10^{-4}$	$2.28 \times 10^{-10}$
$K_{sat \ z'z'}$	$8.00 \times 10^{-9}$	$9.00 \times 10^{-12}$	$4.90 \times 10^{-11}$	$4.90 \times 10^{-11}$	$8.00 \times 10^{-9}$	$6.00 \times 10^{-5}$	$1.04 \times 10^{-4}$	$2.28 \times 10^{-10}$
Longitudinal dispersivity [m]	15.80	15.80	15.80	15.80	15.80	31.60	31.60	31.60
Transversal dispersivity [m]	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	3.16	3.16	3.16
Solid density [kg/m <sup>3</sup> ]	$2.65 \times 10^3$	$2.62 \times 10^3$	$2.65 \times 10^3$	$2.65 \times 10^3$	$2.57 \times 10^3$	$2.65 \times 10^3$	$2.65 \times 10^3$	$2.65 \times 10^3$
Compressibility of medium [m <sup>2</sup> /N]	$2.50 \times 10^{-11}$	$3.45 \times 10^{-10}$	$2.17 \times 10^{-10}$	$2.17 \times 10^{-10}$	$1.00 \times 10^{-9}$	$1.92 \times 10^{-9}$	$4.30 \times 10^{-9}$	$1.92 \times 10^{-9}$
Tortuosity	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
Residual water saturation	$1.49 \times 10^{-1}$	$1.49 \times 10^{-1}$	$1.81 \times 10^{-1}$	$1.81 \times 10^{-1}$	$1.49 \times 10^{-1}$	$1.59 \times 10^{-1}$	$1.05 \times 10^{-1}$	$1.05 \times 10^{-1}$
van Genuchten's (1980) unsaturated hydraulic parameters								
$a_v$ [1/m]	2.00	2.00	3.60	3.60	2.00	7.50	14.50	14.50
$n_v$	1.41	1.41	1.56	1.56	1.41	1.89	2.68	2.68
Compressibility of groundwater [m <sup>2</sup> /N]						$4.40 \times 10^{-10}$		
Dynamic viscosity of groundwater [kg/m·sec]						$1.12 \times 10^{-3}$		
Density of fresh water [kg/m <sup>3</sup> ]						1000.0		
Density of seawater [kg/m <sup>3</sup> ]						1025.0		
Molecular diffusion coefficient of salt [m <sup>2</sup> /sec]						$1.68 \times 10^{-9}$		
Gravitational acceleration constant [m/sec <sup>2</sup> ]						9.81		

**Table 2.** Properties of representative joint sets in geologic media

Geologic medium (geologic formation or fault)	Joint set number	Strike [°]	Dip [°]	Spacing [m]	Aperture [m] (before and after calibration)
Quartz monzonite	Joint set 1	N76W	4SW	$3.75 \times 10^{-1}$	$5.13 \times 10^{-5}$
	Joint set 2	N52W	64SW	$2.64 \times 10^{-1}$	↓
	Joint set 3	N10E	88NW	$2.18 \times 10^{-1}$	$3.23 \times 10^{-5}$
Rhyolitic tuff	Joint set 1	N9E	10NW	$2.03 \times 10^{-1}$	$5.07 \times 10^{-5}$
	Joint set 2	N25W	80NE	$2.32 \times 10^{-1}$	↓
	Joint set 3	N72E	82SE	$1.92 \times 10^{-1}$	$6.39 \times 10^{-5}$
Kyokpori formation Unit 1 (bedding plane)	Joint set 1	N47E	14NW	$2.70 \times 10^{-1}$	$6.87 \times 10^{-5}$
	Joint set 2	N10E	79NW	$3.38 \times 10^{-1}$	↓
	Joint set 3	N84W	85SW	$2.71 \times 10^{-1}$	$4.16 \times 10^{-5}$
Kyokpori formation Unit 2 (bedding plane)	Joint set 1	N35E	7NW	$2.20 \times 10^{-1}$	$7.53 \times 10^{-5}$
	Joint set 2	N49E	90	$3.10 \times 10^{-1}$	↓
	Joint set 3	N58W	85SW	$6.00 \times 10^{-1}$	↓
	Joint set 4	N16E	72NW	$5.32 \times 10^{-1}$	$5.55 \times 10^{-5}$
Rhyolite	Joint set 1	N84W	82SW	$1.25 \times 10^{-1}$	$4.25 \times 10^{-5}$
	Joint set 2	N10E	90	$1.20 \times 10^{-1}$	$4.25 \times 10^{-5}$
Fault	Joint set 1	N49E	90	$1.25 \times 10^0$	$1.61 \times 10^{-4}$
	Joint set 2	N49E	90	$2.00 \times 10^{-1}$	↓
	Joint set 3	N49E	90	$6.67 \times 10^{-2}$	$1.61 \times 10^{-4}$

또한 수치 모델링 영역의 바닥면 경계로 해발 고도 -150 m를 설정하였다.

상기한 수치 모델링 영역을 고려하여 연구 지역의 지형 및 지질을 대표하는 삼차원 지층 모델(geologic formation model)을 Fig. 2와 같이 수립하였다. 삼차원 지층 모델을 구성하는 내륙 지역의 고도는 국립지리원(1997a, 1997b)에서 발간한 부안과 위도 수치지형도와 농업기반공사(2005)의 현장 측정 자료를 활용하였으며, 해안 지역의 고도와 해양 퇴적층의 두께는 국립지리원(1981a, 1981b)에서 발간한 격포와 비안도 연안해역기본도를 활용하였다. 삼차원 지층 모델을 구성하는 지층들은 석영몬조니암, 유문암질 응회암, 격포리층 및 유문암, 그리고 이들 기반암을 피복하는 풍화대, 충적층 및 해양 퇴적층 순이다. 특히 격포리층은 층리의 방향이나 절리의 분포 특성이 상기한 북동 방향의 대규모 단층(Fig. 1)을 기준으로 북서쪽과 남동쪽이 서로 다르기 때문에 북서쪽을 격포리층 Unit 1, 남동쪽을 격포리층 Unit 2로 양분하였다(Fig. 2).

이러한 삼차원 지층 모델은 62,160개의 절점과 57,060개의 육면체 요소로 이산화되어 Fig. 3과 같은 삼차원 유

한 요소망으로 변환되었다.

#### 4.2. 경계 조건

삼차원 유한 요소망(Fig. 3)의 수평 바닥면과 내륙 및 해안 수직 측면에는 지하수 유동과 염분 이동에 대하여 각각 no-flow와 no-transport 경계 조건을 적용하였다. 그리고 해안선을 중심으로 동쪽의 육상 표면에는 지하수 유동에 대해서는 강수와 지하수의 상호 작용을 합리적으로 모사할 수 있는 variable precipitation-infiltration-seepage 경계 조건을, 염분 이동에 대해서는 염분이 나갈 수는 있지만, 들어올 수는 없도록 하는 Neumann 경계 조건을 적용하였다. 이 경우에 육상 표면에서의 최대 압력 수두는 0 m로 설정하였으며, 순(알짜)연강수량(net annual precipitation rate)은 연구 지역으로부터 가장 가까운 곳에 위치한 군산 기상관측소에서 지난 30년 동안 측정된 연강수량인 1,219.40 mm/year(한국기상청, 1971-2000)에 지하수 위 변동 곡선 해석을 통해 추정된 지하수 함양량(groundwater recharge rate)인 연강수량의 12.15%(농업기반공사, 2004)를 곱한 148.16 mm/year로 설정하였다. 한

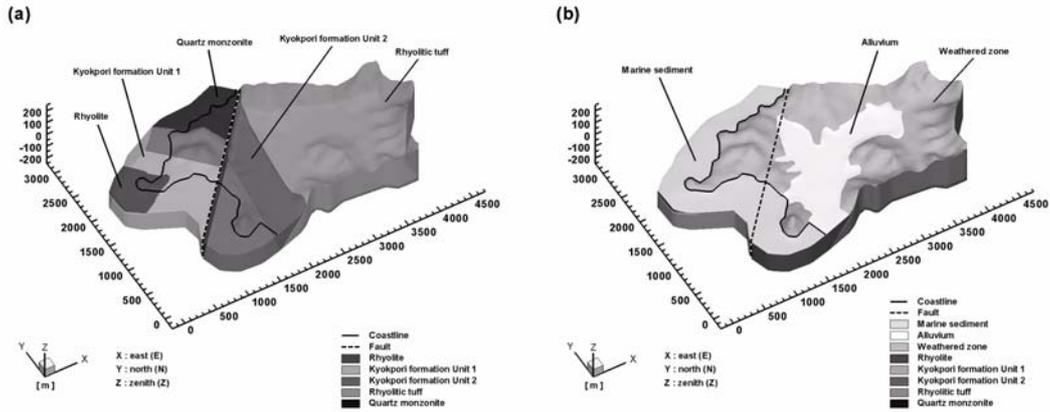


Fig. 2. Three-dimensional geologic formation models of the coastal aquifer system (a) without and (b) with weathered zone, alluvium, and marine sediment over bedrock (quartz monzonite, rhyolitic tuff, Kyokpori formation Unit 1, Kyokpori formation Unit 2, and rhyolite) and fault.

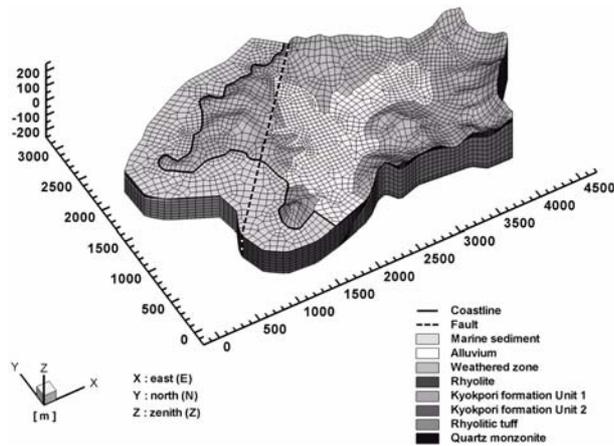


Fig. 3. Three-dimensional finite element mesh of the coastal aquifer system with the fault.

편 해안선을 중심으로 서쪽의 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 variable run-in/flow-out 경계 조건을 적용하였다.

4.3. 수치 모델링 보정

수치 모델링 보정은 수치 모델링 결과의 정확성과 신뢰성을 높이기 위해서 반드시 필요한 절차이다.

연구 지역에 분포하는 해안 대수층 내에 상기한 대규모 단층이 존재하는 경우에 대한 수치 모델링을 보정하는 동안 각 지층 및 단층의 절리군 간극을 변화시키면서 일련의 trial-and-error 수치 모델링을 수행하였다. 그러한 과정

중에 Fig. 1에 도시된 10개의 관측정(monoring well)에서 측정된 지하수위(groundwater level)와 동일한 위치에서 계산된 지하수위를 반복 비교하였다.

수치 모델링 보정에서 대상 물성(target property)으로 지층의 절리 간극을 선택한 이유는 지층의 포화수리진도도가 다공질 암석 기질보다는 지층 내에 발달된 절리군에 의해 크게 좌우될 뿐만 아니라(Parsons, 1966; Snow, 1968; Snow, 1969), 앞에서 언급한 것처럼 Table 2의 절리 간극은 실제 측정된 값이 아니라 지층에 대한 양수 시험으로부터 계산된 값이기 때문이다.

결정계수(coefficient of determination, R<sup>2</sup>)와 제곱근평균제곱오차(root mean square error, RMSE)를 수치 모델링 보정을 위한 유효화 매개 변수(validation parameter)로 사용하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 지하수위에 대한 수치 모델링 보정을 통해 결정계수는 0.602에서 0.808로, 제곱근평균제곱오차는 0.243 m에서 0.169 m로 향상되었다. 그리고 보정된 각 지층의 절리군 간극 값은 Table 2에 화살표를 이용하여 정리하였다.

4.4. 수치 모델링 결과

연구 지역에 분포하는 해안 대수층 내에 단층이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우의 정상 상태 수치 모델링 결과는 Fig. 5에서부터 Fig. 10의 좌측과 우측에 각각 도시되어 있다.

Fig. 5는 수리 수두 및 지하수 유동 속도의 정상 상태 삼차원 분포도이다. 단층이 존재하는 경우에는 수리 수두의 분포에서 평지와 산지의 지형 기복의 영향이 매우 잘 반영되어 나타난다(Fig. 5a). 또한 지하수 유동 속도의 분포에서도 지형 기복의 영향이 잘 반영되어 전체적으로 주

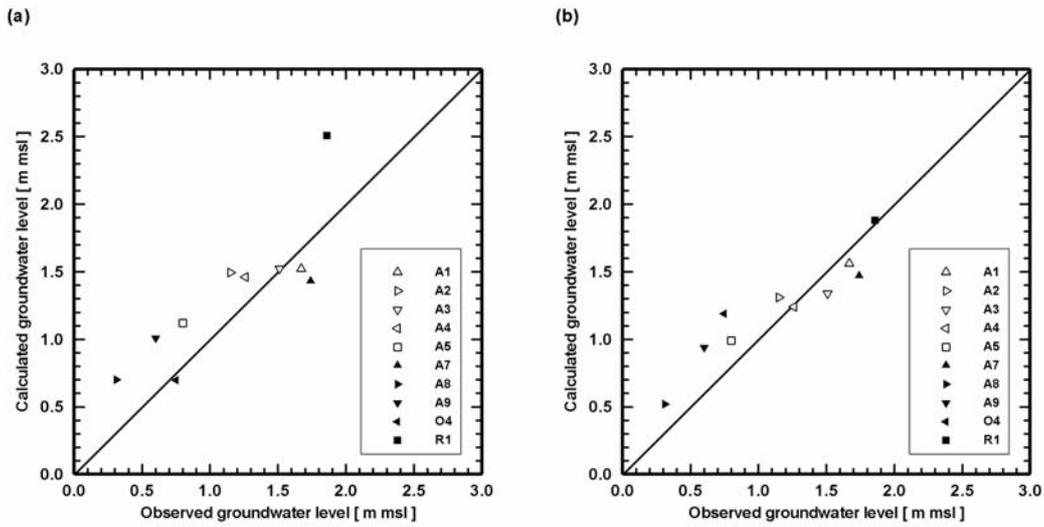


Fig. 4. Comparisons of observed and calculated groundwater levels at the 10 monitoring wells (a) before and (b) after numerical modeling calibration.

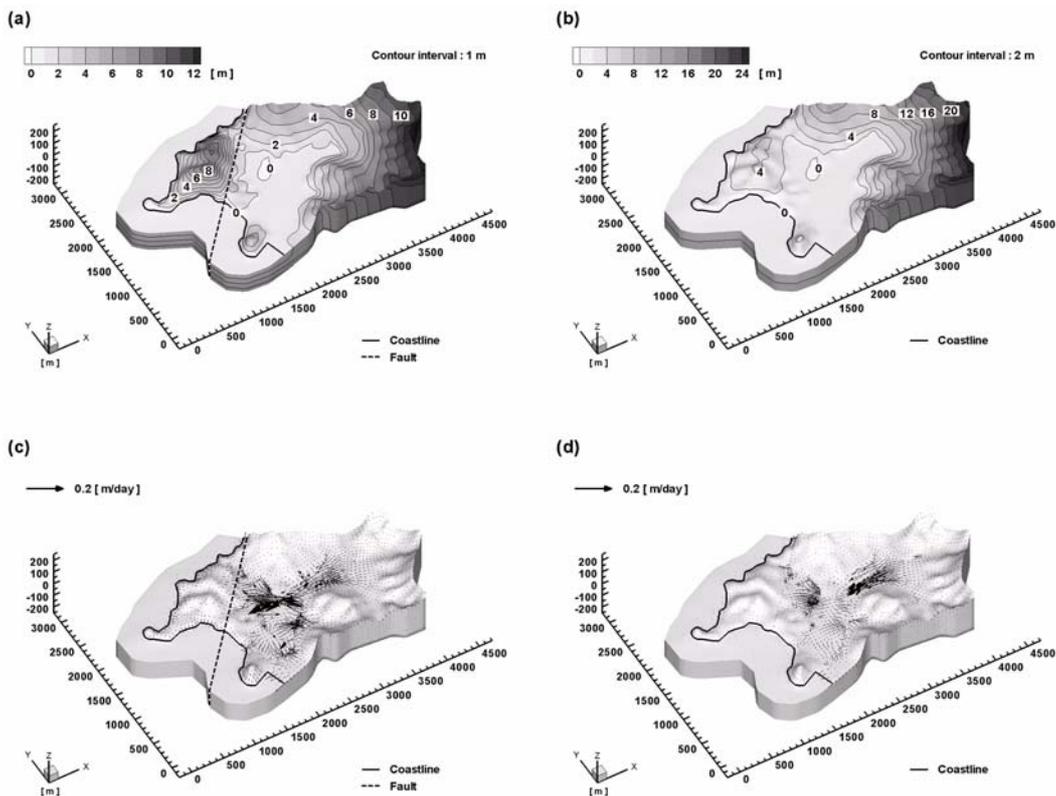


Fig. 5. Steady-state three-dimensional distributions of (a) and (b) hydraulic head and (c) and (d) groundwater flow flux in the coastal aquifer system with (left column) and without (right column) the fault.

변의 산지에서 중앙의 평지로 지하수가 유입되는 양상을 보여준다(Fig. 5c). 반면에 단층이 존재하지 않는 경우에는 수리 수두의 분포에서 수리 수두가 주로 산지를 중심

으로 크게 증가하고 북서쪽의 언덕에서는 감소하는 양상을 나타낸다(Fig. 5b). 이는 단층이 존재하는 경우에는 북서쪽 언덕에서의 지하수가 단층에 가로막혀서 중앙의 평

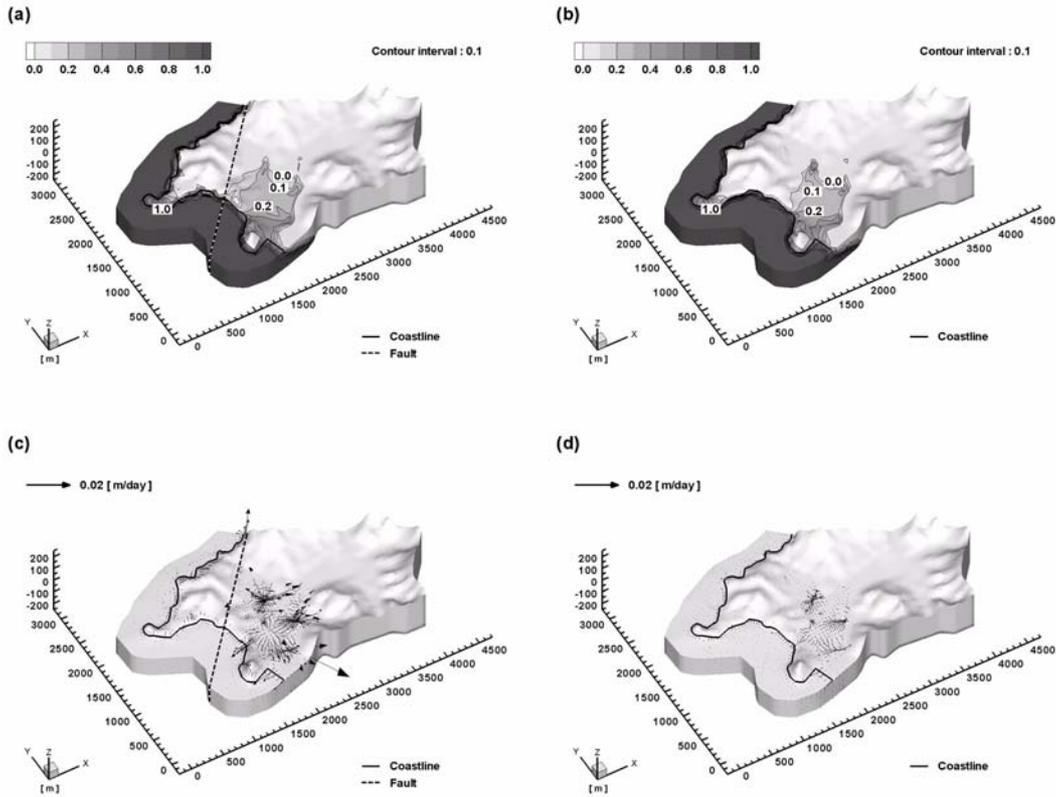


Fig. 6. Steady-state three-dimensional distributions of (a) and (b) seawater-normalized salt concentration and (c) and (d) seawater-normalized salt transport flux in the coastal aquifer system with (left column) and without (right column) the fault.

지로 유입되지 못하지만, 단층이 존재하지 않는 경우에는 많은 양의 지하수가 중앙의 평지로 유입되기 때문인 것으로 해석된다. 또한 산지에서의 수리 수두가 증가하면서 평지와 수리 수두 차이가 커지게 되고 그에 따라 산지에서 평지 방향으로의 지하수 유동 속도가 증가하는 양상을 보여준다(Fig. 5d).

Fig. 6은 해수 표준화 염분 농도 및 해수 표준화 염분 이동 속도의 정상 상태 삼차원 분포도이다. 단층이 존재하는 경우에는 해수 표준화 염분 농도의 분포에서 지형과 단층의 영향이 잘 반영되어 나타나고, 전체적으로 격포리층 Unit 2가 분포하는 남동쪽의 평지를 중심으로 해수가 주로 침투하는 양상을 잘 보여준다(Fig. 6a). 그리고 북서쪽 지역에서는 단층이 위치하는 지역을 중심으로 해수가 주로 침투한 양상을 보여준다. 또한 해수 표준화 염분 이동 속도의 분포에서도 단층을 따라서 그 크기가 매우 커지는 양상을 보여준다. 특히 중앙의 평지를 중심으로 해수 표준화 염분 이동 속도가 크게 나타난다(Fig. 6c). 이는 주변의 산지에서 함양된 지하수가 지형이 낮은 중앙의 평지로 유동하면서 해안선을 통해 침투한 염분을 지표 방향으로 이동

시키기 때문인 것으로 해석된다. 반면에 단층이 존재하지 않는 경우에는 해수 표준화 염분 농도의 분포에서 전반적으로 북서쪽의 단층이 위치하던 지역과 격포리층 Unit 2가 분포하는 남동쪽 평지로의 해수 침투가 감소하는 양상을 잘 보여준다(Fig. 6b). 또한 해수 표준화 염분 이동 속도의 분포에서도 단층을 따라서 크게 나타나던 해수 표준화 염분 이동 속도가 나타나지 않는다(Fig. 6d). 그리고 평지에서의 해수 표준화 염분 이동 속도가 감소한다.

Fig. 7은 동서 수직 단면( $y = 1,480 \text{ m}$ )에서의 수리 수두 및 지하수 유동 속도의 정상 상태 이차원 분포도이다. 단층이 존재하는 경우에는 수리 수두의 분포에서 중앙의 평지를 중심으로 수리 수두가 낮고 지형의 고도가 높아질수록 수리 수두가 증가하는 양상이 잘 나타난다(Fig. 7a). 특히 단층의 주변에서 수리 수두의 등고선이 특징적으로 변화하는 양상이 잘 나타난다. 이는 단층이 단층면과 평행한 방향으로의 지하수 유동과 염분 이동에 대해서 통로(pathway)로 작용하지만, 단층면과 수직인 방향으로의 지하수 유동과 염분 이동에 대해서 방벽(barrier)으로 작용하기 때문이다. 또한 지하수 유동 속도의 분포에서도 지형

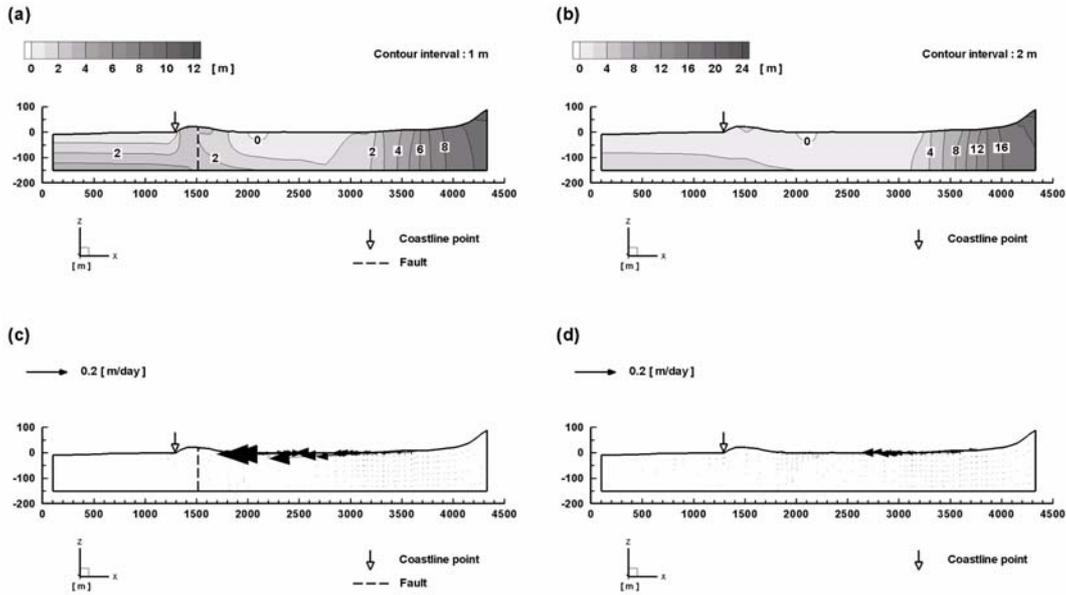


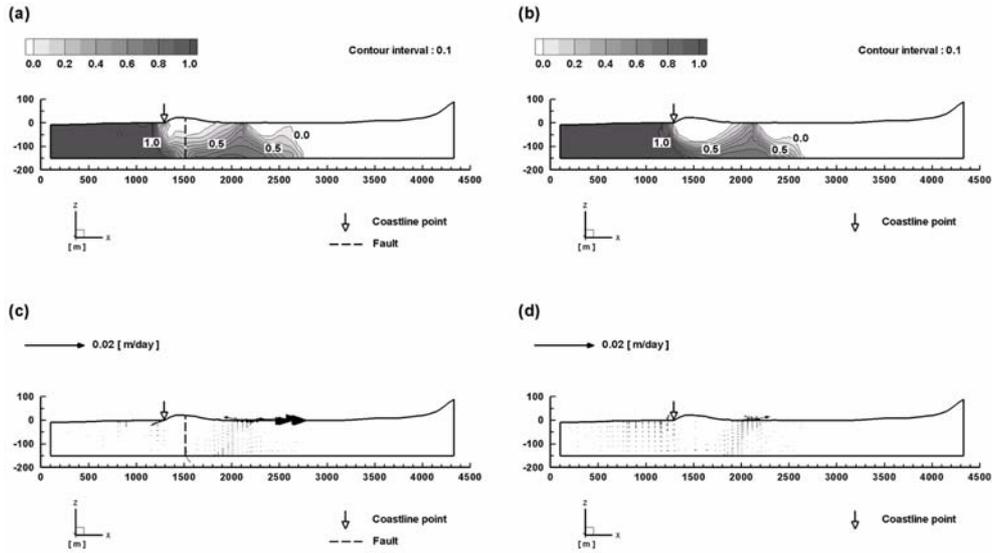
Fig. 7. Steady-state two-dimensional vertical distributions of (a) and (b) hydraulic head and (c) and (d) groundwater flow flux along the west-east cross section at  $y = 1,480$  m in the coastal aquifer system with (left column) and without (right column) the fault.

의 영향이 반영되어 전체적으로 주변의 산지에서 중앙의 평지로 지하수가 유입되는 양상을 잘 보여준다(Fig. 7c). 반면에 단층이 존재하지 않는 경우에는 수리 수두의 분포에서 산지에서의 수리 수두는 증가하지만, 평지와 해안에서의 수리 수두는 오히려 감소하는 양상을 보여준다(Fig. 7b). 이는 앞에서 설명한 바와 같이 단층면에 수직인 방향으로의 방벽 효과가 사라졌기 때문인 것으로 해석된다. 또한 지하수 유동 속도의 분포에서도 산지에서의 수리 수두 증가에 의하여 평지 방향으로 지하수 유동 속도가 증가하는 양상을 보여준다(Fig. 7d).

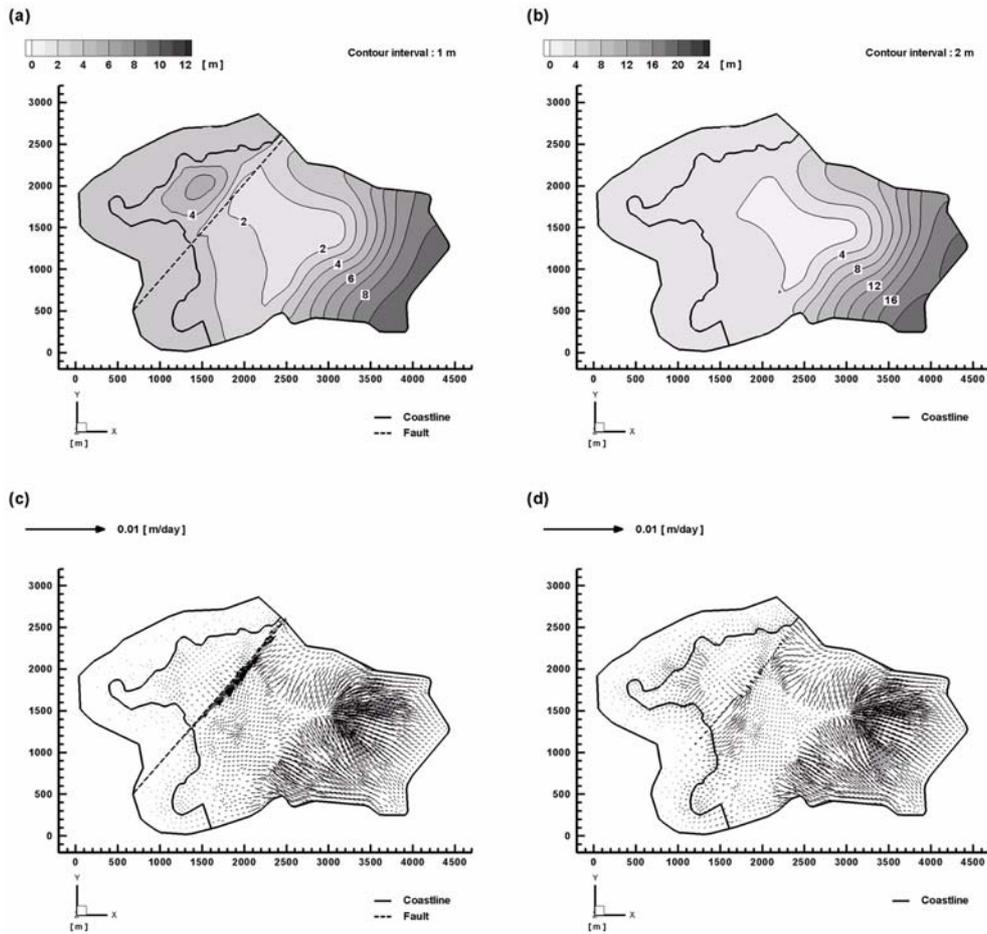
Fig. 8은 동서 수직 단면( $y = 1,480$  m)에서의 해수 표준화 염분 농도 및 해수 표준화 염분 이동 속도의 정상 상태 이차원 분포도이다. 단층이 존재하는 경우에는 해수 표준화 염분 농도의 분포에서 염분 농도가 해안선에서 단층 쪽으로 근접할수록 감소하다가 단층을 넘어서 평지 쪽으로 갈수록 염분 농도가 다시 증가하는 양상을 보여준다(Fig. 8a). 이는 해수가 단층 서쪽 해안이 아니라 평지 남서쪽 해안으로부터 단층을 경계로 하여 평지를 향해 북동 방향으로 침투하기 때문인 것으로 해석된다. 그리고 지하수가 삼출되는 중앙의 평지 방향으로 표준화 염분 농도가 크게 증가하는 양상을 보여준다. 이는 지하수가 삼출될 때 해안선을 통해 침투한 염분을 지표 방향으로 이동시키기 때문인 것으로 해석된다. 또한 해수 표준화 염분 이동 속도의 분포에서도 지하수가 삼출되는 중앙의 평지에서 그

크기가 다른 지역에 비해 매우 크게 나타난다(Fig. 8c). 반면에 단층이 존재하지 않는 경우에는 해수 표준화 염분 농도의 분포에서 평지의 해수 침투 범위가 감소하는 양상을 잘 보여준다(Fig. 8b). 그리고 단층이 존재하는 경우와는 다르게 서쪽 해안에서 유입된 해수가 중앙 평지에서의 해수와 그 분포가 이어지고 있다. 또한 해수 표준화 염분 이동 속도의 분포에서도 단층이 존재하는 경우에 비해 중앙의 평지에서의 염분 이동 속도 분포가 크게 감소하는 양상을 잘 보여준다(Fig. 8d).

Fig. 9는 바닥면( $z = -150$  m)에서의 수리 수두 및 지하수 유동 속도의 정상 상태 이차원 분포도이다. 단층이 존재하는 경우에는 수리 수두의 분포에서 지형의 기복이 해안 대수층의 하부에서도 매우 잘 반영되어 나타나는 것을 볼 수 있으며, 단층이 지나가는 지역에서는 수리 수두의 양상이 특징적으로 변화하는 것을 볼 수 있다(Fig. 9a). 또한 지하수 유동 속도의 분포에서도 단층을 따라서 매우 빠른 지하수 유동이 일어나고 있음을 잘 보여준다(Fig. 9c). 그리고 해안 대수층의 하부에서도 지형을 잘 반영하여 산지에서 평지로의 지하수 유동이 집중되는 양상을 잘 보여준다. 반면에 단층이 존재하지 않는 경우에는 수리 수두의 분포에서 수리 수두가 산지에서는 크게 증가하지만, 북서쪽 언덕에서는 오히려 감소하는 양상을 보여준다(Fig. 9b). 그리고 단층이 존재하는 경우에는 단층의 주변에서 수리 수두가 특징적으로 변화하던 양상이 단층이 존재하



**Fig. 8.** Steady-state two-dimensional vertical distributions of (a) and (b) seawater-normalized salt concentration and (c) and (d) seawater-normalized salt transport flux along the west-east cross section at  $y = 1,480$  m in the coastal aquifer system with (left column) and without (right column) the fault.



**Fig. 9.** Steady-state two-dimensional horizontal distributions of (a) and (b) hydraulic head and (c) and (d) groundwater flow flux along the bottom surface at  $z = -150$  m in the coastal aquifer system with (left column) and without (right column) the fault.

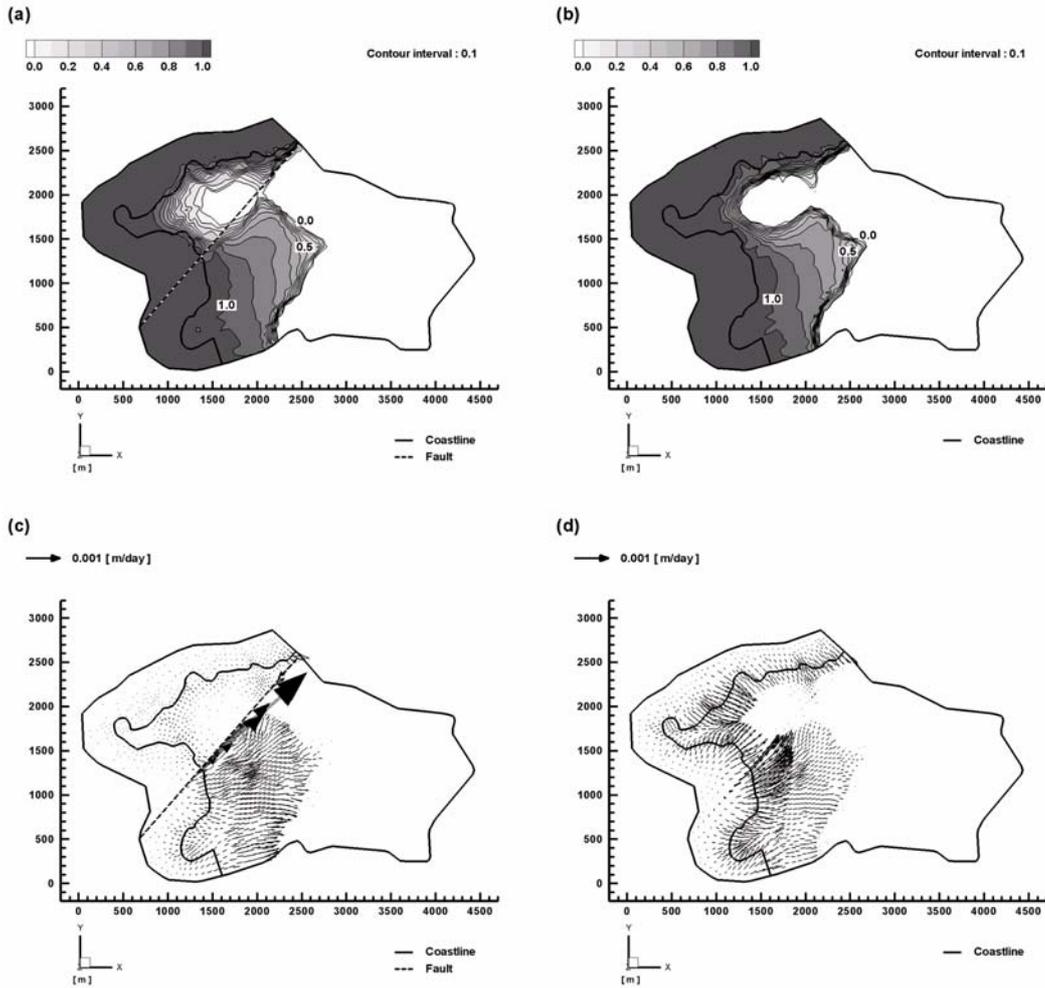


Fig. 10. Steady-state two-dimensional horizontal distributions of (a) and (b) seawater-normalized salt concentration and (c) and (d) seawater-normalized salt transport flux along the bottom surface at  $z = -150$  m in the coastal aquifer system with (left column) and without (right column) the fault.

지 않는 경우에는 나타나지 않는다. 이는 단층이 해안 대수층 하부에서의 수리 수두에까지 큰 영향을 끼침을 보여준다. 또한 지하수 유동 속도의 분포에서도 산지에서 평지 방향으로의 지하수 유동 속도가 증가하고 단층을 따라 일어나던 지하수 유동 양상은 나타나지 않는다(Fig. 9d).

Fig. 10은 바닥면( $z = -150$  m)에서의 해수 표준화 염분 농도 및 해수 표준화 염분 이동 속도의 정상 상태 이차원 분포도이다. 단층이 존재하는 경우에는 해수 표준화 염분 농도의 분포에서 해수 침투가 단층에 수직인 방향으로 제한되는 양상을 보여주나 단층에 평행한 방향으로 크게 발생하는 양상을 보여준다(Fig. 10a). 또한 해수 표준화 염분 이동 속도의 분포에서도 이러한 염분 농도 분포가 잘 반영되어 나타난다(Fig. 10c). 반면에 단층이 존재하지 않는 경우에는 해수 표준화 염분 농도의 분포에서

해수 침투가 평지에서는 감소하고 북서쪽 언덕 하부에서는 소폭 증가함을 보여준다(Fig. 10b). 이는 북서쪽 언덕에서 공급된 지하수가 단층을 통하여 주로 유동하던 것이 단층이 없어지면서 중앙의 평지로 유입되고 그 결과 해수를 해안 쪽으로 밀어내어 생긴 결과로 해석된다. 또한 해수 표준화 염분 이동 속도의 분포에서도 이러한 염분의 분포 양상이 잘 반영되어 나타난다(Fig. 10d). 특히 단층이 없어지면서 단층을 따라서 특징적으로 나타나던 해수 표준화 염분 이동 속도의 분포가 나타나지 않는다.

이러한 수치 모델링의 결과들로 미루어 보아 단층의 존재 여부에 따라 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.

## 5. 결 론

해안 대수층 내의 밀도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 단층 존재의 영향을 효과적으로 모사하고 정량적으로 평가하기 위하여 하나의 범용 다차원 수리동역학적 분산 수치 모델을 이용한 일련의 삼차원 수치 모델링이 수행되었다. 먼저 단층이 존재하는 실제 해안 대수층에 대해 보정을 병행한 일련의 정상 상태 수치 모델링을 수행한 다음에 이러한 단층이 존재하지 않는 해안 대수층에 대해 일련의 정상 상태 수치 모델링을 수행하여 그 결과를 서로 비교·분석하였다. 수치 모델링 결과는 단층이 실제 해안 대수층 내에 수리지질학적으로 증대한 불균질성과 진이방성을 야기시키며, 해안 대수층 내의 밀도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동 그리고 해수 침투 양상이 이러한 단층의 존재 여부에 크게 그리고 광범위하게 좌우됨을 보여준다. 특히 단층은 단층면과 평행한 방향으로서는 지하수 유동과 염분 이동에 대해서 통로로 작용하지만, 단층면과 수직인 방향으로서는 지하수 유동과 염분 이동에 대해서 방벽으로 작용하는 것으로 해석된다. 따라서 해수 침투 현상에 대한 보다 정확하고 현실적인 예측을 위해서는 소규모의 질리는 물론 대규모의 단층과 같은 연구 지역의 수리지질학적 특성을 종합적으로 고려하여 수리동역학적 분산 수치 모델링을 수행해야 한다.

## 사 사

본 연구는 교육과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발 사업인 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 익명의 두 심사자님께 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

- 국립지리원, 1981a, 격포 1:25,000 연안해역기본도, 도엽번호 NI52-1-09-4.  
 국립지리원, 1981b, 비안도 1:25,000 연안해역기본도, 도엽번호 NI52-1-09-2.  
 국립지리원, 1997a, 부안 1:5,000 수치지형도, 도엽번호 35607041/51.  
 국립지리원, 1997b, 위도 1:5,000 수치지형도, 도엽번호

35606049/50/59/60.

- 김경호, 박재성, 이호진, 연주흠, 2005, 3D-FEMWATER 모델을 이용한 대창지역의 해수침투 범위추정, 한국농공학회논문집, 47(5), 3-13.  
 농업기반공사, 2004, 부안군 농촌지하수관리사업 보고서, 181 p.  
 농업기반공사, 2005, 2005 해수침투조사 사업 보고서, 461 p.  
 박남식, 이용두, 1997, 중-동 제주 수역의 지하수 개발로 인한 해수침투, 지하수환경, 4(1), 5-13.  
 박세창, 윤성택, 채기탁, 이상규, 2002, 서해 연안지역 천부지하수의 수리지구화학: 연안 대수층의 해수 혼입에 관한 연구, 지하수도양환경, 7(1), 63-77.  
 송성호, 이규상, 용환호, 김진성, 성백옥, 우명하, 2005, 지구통계 분석을 이용한 해수침투지역에서의 전기비저항탐사 자료 해석, 제2회 한국물리탐사학회·대한지구물리학회 공동학술대회 논문집, 한국지질지원연구원, p. 59-64.  
 심병완, 정상용, 2003, SHARP 모델을 이용한 해안 대수층의 해수침투 경계면 추정, 지하수도양환경, 8(1), 68-74.  
 심병완, 정상용, 김희준, 성익환, 2002, 수리동역학적 모델링에서 분산지수에 따른 해수침투 범위의 변화, 지하수도양환경, 7(4), 59-67.  
 한국기상청, 1971-2000, 군산 기상관측소 기후자료, <http://www.kma.go.kr>.  
 Anderson, M.P., 1979, Using models to simulate the movement of contaminants through groundwater flow systems, *Critical Reviews in Environmental Control*, 9(2), 97-156.  
 Bear, J., 1972, Dynamics of Fluids in Porous Media, American Elsevier Publishing Company, New York, 764 p.  
 Bear, J., Cheng, A.H.D., Sorek, S., Ouaza, D., and Herrera, I. (eds.), 1999, Seawater Intrusion in Coastal Aquifers - Concepts, Methods and Practices, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 625 p.  
 Carsel, R.F. and Parrish, R.S., 1988, Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics, *Water Resources Research*, 24(5), 755-769.  
 Cheng, A.H.D. and Ouazar, D. (eds.), 2004, Coastal Aquifer Management: Monitoring, Modeling, and Case Studies, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 280 p.  
 Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1990, Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley and Sons, New York, 824 p.  
 Essaid, H.I., 1990, A multilayered sharp interface model of coupled freshwater and saltwater flow in coastal systems: Model development and application, *Water Resources Research*, 26(7), 1431-1454.  
 Fetter, C.W., 1994, Applied Hydrogeology, third edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 691 p.  
 Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979, Groundwater, Prentice-

- Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 604 p.
- Frind, E.O., 1982, Simulation of long-term transient density-dependent transport in groundwater, *Advances in Water Resources*, **5**(2), 73-88.
- Galeati, G., Gambolati, G., and Neuman, S.P., 1992, Coupled and partially coupled Eulerian-Lagrangian model of freshwater-seawater mixing, *Water Resources Research*, **28**(1), 149-165.
- Henry, H.R., 1964, Effects of dispersion on salt encroachment in coastal aquifers, In: H.H. Cooper, Jr., F.A. Kohout, H.R. Henry, and R.E. Glover (eds.), *Sea Water in Coastal Aquifers*, Water-Supply Paper, No. 1613-C, United States Geological Survey, p. C70-C82.
- Huyakorn, P.S., Andersen, P.F., Mercer, J.W., and White, Jr., H.O., 1987, Saltwater intrusion in aquifers: Development and testing of a three-dimensional finite element model, *Water Resources Research*, **23**(2), 293-312.
- Hwang, S., Shin, J., Park, I., and Lee, S., 2004, Assessment of seawater intrusion using geophysical well logging and electrical soundings in a coastal aquifer, Youngkwang-gun, Korea, *Exploration Geophysics*, **35**(1), 99-104.
- 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., Kim, R.H., Lee, J., and Chang, H.W., 2003, Hydrogeochemical characterization of major factors affecting the quality of shallow groundwater in the coastal area at Kimje in South Korea, *Environmental Geology*, **44**(4), 478-489.
- 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, 354 p.
- Kim, K., Rajmohan, N., Kim, H.J., Hwang, G.S., and Cho, M.J., 2004, Assessment of groundwater chemistry in a coastal region (Kunsan, Korea) having complex contaminant sources: A Stoichiometric approach, *Environmental Geology*, **46**(6-7), 763-774.
- Kim, R.H., Kim, J.H., Ryu, J.S., and Chang, H.W., 2006, Salinization properties of a shallow groundwater in a coastal reclaimed area, Yeonggwang, Korea, *Environmental Geology*, **49**(8), 1180-1194.
- Klotz, D., Seiler, K.P., Moser, H., and Neumaier, F., 1980, Dispersivity and velocity relationship from laboratory and field experiments, *Journal of Hydrology*, **45**(3-4), 169-184.
- Kontis, A.L., 1999, Simulation of Freshwater-Saltwater Interfaces in the Brooklyn-Queens Aquifer System, Long Island, New York, Water-Resources Investigations Report, No. 98-4067, United States Geological Survey, 26 p.
- Lee, J.Y. and Song, S.H., 2007a, Evaluation of groundwater quality in coastal areas: Implications for sustainable agriculture, *Environmental Geology*, **52**(7), 1231-1242.
- Lee, J.Y. and Song, S.H., 2007b, Groundwater chemistry and ionic ratios in a western coastal aquifer of Buan, Korea: Implication for seawater intrusion, *Geosciences Journal*, **11**(3), 259-270.
- 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.
- 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.
- Neuman, S.P., 1990, Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media, *Water Resources Research*, **26**(8), 1749-1758.
- Park, S.C., Yun, S.T., Chae, G.T., Yoo, I.S., Shin, K.S., Heo, C.H., and Lee, S.K., 2005, Regional hydrochemical study on salinization of coastal aquifers, western coastal area of South Korea, *Journal of Hydrology*, **313**(3-4), 182-194.
- Parsons, R.W., 1966, Permeability of idealized fractured rock, *Society of Petroleum Engineers Journal*, **6**(2), 126-136.
- Pinder, G.F. and Cooper, Jr., H.H., 1970, A numerical techniques for calculating the transient position of the saltwater front, *Water Resources Research*, **6**(3), 875-882.
- Segol, G., Pinder, G.F., and Gray, W.G., 1975, A Galerkin-finite element technique for calculating the transient position of the saltwater front, *Water Resources Research*, **11**(2), 343-347.
- 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.
- Song, S.H., Lee, J.Y., and Park, N., 2007, Use of vertical electrical soundings to delineate seawater intrusion in a coastal area of Byunsan, Korea, *Environmental Geology*, **52**(6), 1207-1219.
- 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, Ver-

sion 2.0, Technical Report, Department of Civil and Environmental Engineering, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, USA, 199 p.