한국지하수토양환경학회지 Vol. 8, No. 1, pp. 68~74, 2003 ≪原著≫

SHARP 모델을 이용한 해안 대수층의 해수침투 경계면 추정

심병완* · 정상용
부경대학교 환경지질과학과

Estimation of the Interface of Seawater Intrusion in a Coastal Aquifer System with SHARP Model

Byoung Ohan Shim* · Sang Yong Chung
Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University

ABSTRACT

SHARP numerical model was used to estimate the interface, ranges and seasonal variations of seawater intrusion. The interface obtained from the SHARP model represented more sensitive to seasonal variations than that estimated from the monitoring wells. When TDS and groundwater velocity vector distributions generated by SUTRA simulations are compared to the interfaces obtained from SHARP simulation, the difference of the range on seawater intrusion is less than 50 m, and the range of seawater intrusion from seasonal variations has the difference of about 12 m. These differences are small for the numerical simulation of the coastal aquifer at regional scale. Therefore, the model with sharp interface is very useful to estimate the interface at this study site, where is regional aquifer system in the scale of seawater intrusion. However the SHARP model have some limitations in simulating the range of seawater intrusion, when the hydrodynamic dispersion is significant for seawater intrusion at local aquifer system.

Key words : sea water intrusion, sharp interface model, disperse model, SHARP, SUTRA, Ghyben-Herzberg interface

요 약 문

본 연구에서는 해안 대수층에서 SHARP 수치모델을 이용하여 해수와 담수의 경계면 및 해수침투 범위를 추정하고, 계절적인 영향에 대한 모델의 민감도를 분석하였다. SHARP 수치모사에 의한 해수와 담수의 경계면이 연구지역내 관측정에서 측정된 해수와 담수의 경계면보다 계절적인 변화에 대하여 더 민감하게 반응하였다. 분산형 모델인 SUTRA를 이용하여 TDS와 벡터 분포를 계산하고, SHARP 모델에 의하여 만들어진 Ghyben-Herzberg 경계면과 비교한 결과, 해수침투 범위의 차이는 50 m 이하이며, 계절적인 영향에 의한 해수침투 변동폭의 차이는 약 12 m로 나타났다. 이러한 해수침투 범위의 차이는 해안 대수층의 수치모사에 이용된 광역적인 규모에 비하면 작은 편이다. 본 연구지역과 같이 광역적인 규모의 해안 대수층에서 해수와 담수의 경계면을 추정하는데, SHARP 모델은 매우 유용한 것으로 사료된다. 그러나 경계면 모델은 확산이 우세한 국지적인 규모의 모델링에서는 정확한 해수침투의 범위를 모사하는데 약간의 한계가 있는 것으로 보인다.

주제어 : 해수침투 범위, 경계면 모델, 분산형 모델, SHARP, SUTRA, Ghyben-Herzberg 경계면

1. 서 론

해안 대수층에서 해수침투현상을 분석하는데 이용되는 일반적인 수치모델은 분산형 모델(disperse model)과 경계면 모델(sharp interface model)이 있다. 분산형 모델은 수리동역학적 분산에 의하여 담수와 해수가 혼합되는 전이대(transition zone)를 농도분포, 속도벡터 및 압력분포 등으로 나타낼 수 있다. 그러나 경계면 모델은 담수와 해

*Corresponding author : bwshim@mail1.pknu.ac.kr
원고접수일 : 2002. 11. 12 게재승인일 : 2002. 12. 26

수가 혼합되는 전이대를 하나의 면으로 가정하여, 해수와 담수의 전이대를 해석하는데 비교적 단순한 방법을 이용한다. 일반적으로 분산형 모델은 3차원으로 계산할 경우 계산용량과 취득자료의 한계 등으로 인하여 보통 2차원에 한정되어 적용되어 왔다. 그러나 경계면 모델은 2차원 또는 3차원모델로서 층상의 대수층에 대한 해수와 담수의 경계면을 나타내는데 이용되며, 광역적인 규모의 해안 대수층에 많이 이용된다[1]. 그리고 전이대의 물리적 특성에 대한 자세한 모사는 불가능하지만 평균해수면 변화, 대수층내 양수, 강수에 의한 함양 등의 외부변화로 인한 해수와 담수의 경계면 변화를 나타낼 수 있다.

해안 대수층의 해수침투 현황을 모사하기 위하여 경계면 모델에 대한 수치모델들이 많이 개발되어 왔다[2-8]. 최근 개발된 모델들은 광역적인 규모에서 강수량 또는 양수량에 따른 지하수위 변동예측과 담수체의 두께를 측정하거나[9], 국지적인 지역에서 고전적인 경계조건을 벗어나 실제 조건에 가까운 형태의 해수침투 현황을 모사하는데 이용되고 있다[10,11]. 그리고 확률적인(stochastic) 경계요소법(BEM)을 이용한 해수침투 범위의 오차한계 추정[12] 등의 연구가 이루어지고 있다. 국내에서는 해수침투 현상에 대한 수리지질학적 연구가 주로 제주도를 중심으로 이루어지고 있다[13-15]. 그리고 최근에 서해안 지역을 중심으로 해수침투 평가, 예측 및 방지기술 개발에 대한 연구[16]와 부산 동남해안 지역의 해수침투 경로 및 특성 파악에 대한 연구가 수행되었다[17,18]. 또한 갈수기에 안정적인 용수확보 및 해안지역 염수침입 방지를 위하여 지하수댐을 건설하는 방법에 대한 연구[19] 등이 수행되었다. 이러한 해수침투 연구 결과를 효과적으로 활용하기 위해서는 해수침투 범위와 특성을 정량적으로 제시할 수 있는 수리동역학적 연구가 필요하다.

본 연구에서는 SHARP[7] 수치모델링을 실시하여 해수와 담수의 경계면을 설정하여 해수침투범위를 추정하고, 계절적인 변화에 대한 모델의 민감도를 분석하는데 목적이 있다. 그리고 분산형 모델인 SUTRA[20] 수치모델의 모사결과와 비교하여 경계면을 중심으로 해수와 담수의 유동 및 해수침투 특성을 파악하였다.

2. 해수침투 범위 추정

2.1. 수치모델의 이론적 배경

SHARP[7]은 USGS에 의하여 개발되었으며 단일 경계면(sharp interface)을 가진 준3차원(quasi-3D)의 유한차분법을 이용한 two-fluid phase 유동 수치모델이다. 이 모델은 피압대수층이나 자유면대수층 및 다층대수층계(multi-layered aquifer system)에서 단일 상의 포화된 밀도류 조건을 적용하여 해수와 담수의 경계면 모사가 가능하다. 그리고 SIP(Strongly Implicit Procedure) 해법을 이용하며, 일반적인 경계조건을 설정하여 유입(source) 및 유출(sink)을 계산한다.

담수와 해수의 혼합지점인 전이대의 폭이 대수층 전체 두께에 비하여 작을 때, 해수와 담수는 경계면(sharp interface)으로 분리된 비혼합성(immiscible)의 두 용액으로 가정할 수 있다. 이 가정은 경계면의 일반적인 위치 및 모양, 거동 등을 지배하며, 담수와 해수의 유동과 압력이 동시에 전이대의 연속적인 경계면을 따라 계산된다. 일반적으로 3차원에서 이러한 경계조건은 비선형적이므로 해를 구하기 매우 어렵다. 그러나 SHARP[7] 모델에서는 대수층내 흐름을 수평적인 것으로 간주하고 유동방정식을 수직방향으로 적분하여 해를 구할 수 있다. 이에 따른 각 피압대수층에서 담수와 해수의 유동에 대한 각각의 적분 방정식은 다음과 같다.

$$\int_{\zeta_1}^{\zeta_2}\left(\nabla\cdot q_f+S_f\frac{\partial\Phi_f}{\partial t}\right)dz\cong-\nabla'\cdot(B_fK_f'\cdot\nabla'\overline{\Phi_f})+$$
$$(n\delta+S_fB_f)\frac{\partial\overline{\Phi_f}}{\partial t}-n(1+\delta)\frac{\partial\overline{\Phi_s}}{\partial t}-q_f'|_{\zeta_2}\cdot\nabla'\zeta_2+q_{fz}|_{\zeta_2}=0 \quad (1)$$

$$\int_{\zeta_0}^{\zeta_1}\left(\nabla\cdot q_s+S_s\frac{\partial\Phi_s}{\partial t}\right)dz\cong-\nabla'\cdot(B_sK_s'\cdot\nabla'\overline{\Phi_s})+$$
$$[n(1+\delta)+S_sB_s]\frac{\partial\overline{\Phi_s}}{\partial t}-n\delta\frac{\partial\overline{\Phi_f}}{\partial t}+q_s'|_{\zeta_0}\cdot\nabla'\zeta_0-q_{sz}|_{\zeta_0}=0 \quad (2)$$

여기서, $\Phi_f=z+p_f/\gamma_f$는 담수의 높이(L)이며, 대수층내 유체는 비압축성으로 가정한다. 그리고 $\Phi_s=z+ps/\gamma_s$는 해수의 높이(L), z는 표고(L), p_f와 p_s는 담수와 해수의 압력($ML^{-1}T^{-2}$), γ_f와 γ_s는 담수와 해수의 비중($ML^{-1}T^{-2}$), S_f와 S_s는 담수와 해수의 비저류계수(L^{-1}), q_r과 q_s는 담수와 해수의 비유출량(LT^{-1}), ζ_0, ζ_1, ζ_2는 각각 대수층 바닥, 경계면, 대수층 상단의 높이(L), n은 유효공극율, $\overline{\Phi_f}$와 $\overline{\Phi_s}$는 수직적인 담수와 해수의 평균 수두(L), $B_f=\zeta_2-\zeta_1$는 담수의 두께(L), $B_s=\zeta_1-\zeta_0$는 해수의 두께(L), q_{fz}는 와 q_{sz}는 해수와 담수의 유동에 대한 수직적인 요소(L), 그리고 K_f'와 K_s'는 담수와 해수의 수리전도도를 수직방향으로 평균한 수리전도도(LT^{-1})이다. 그리고

$$\delta=\gamma_f/(\gamma_s-\gamma_f) \quad (3)$$

경계면에서 압력의 연속성을 나타내기 위하여 Fig. 1과 같이 경계면의 표고는 담수위와 해수위를 이용하여 다음과 같이 계산한다.

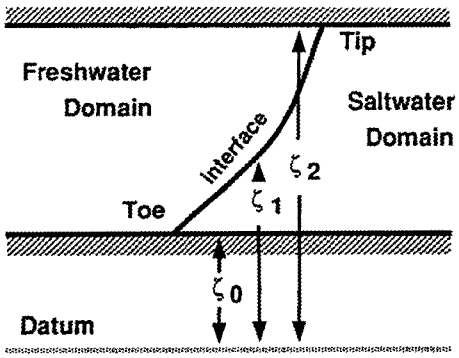

Fig. 1. Freshwater and saltwater flow domain in a confined aquifer (from Essaid, 1990b).

$$\zeta_1 = (1+\delta)\Phi_s - \delta\Phi_f \tag{4}$$

그리고, 식 (1)과 (2)의 마지막 두 항은 각 대수층 상부와 바닥에서의 경계조건을 나타낸다. 만약 이들 경계가 불투수층이라면 이 항들은 0이 되며, 누수 상태인 경우에는 상부나 하부의 피압층에 대한 누수량이 주어진다. 그리고 자유면대수층에서는 상부경계를 자유면 상태로 설정하고, 지하수면에서의 유출량은 $n\partial\Phi_f/\partial t$ 이다.

2.2. 유한차분 형태

공간적인 이산화는 블록중심(block-centered) 유한차분 격자법을 이용하며, 각 대수층(k)의 표고는 Fig. 2에서 도시된 것과 같이 그 대수층의 중간위치에 놓이게 된다[7]. 공간적인 미분을 위하여 중심차분 추정법에서 격자블록의 경계로부터 대수층의 두께는 선형적으로 내삽되며, 수리전도도 항들은 각 격자들에서 조화평균(harmonic mean)에 의해 추정된다. 그리고 양수정을 포함하는 블록에서는 우물의 스크린 위치에 따라 양수된 담수와 해수의 양이 달라진다.

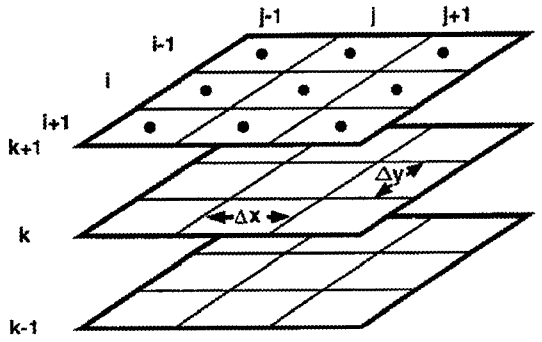

Fig. 2. Block-centered finite difference grid (from Essaid, 1990b).

2.3. 수리지질인자 설정 및 해수침투 범위 추정

본 연구의 대상 지역은 부산광역시 부경대학교 대연 캠퍼스 일대이며, 응회질퇴적암과 안산암 및 안산암질 화산각력암이 분포한다. 연구지역은 부산 동남해안에 위치하여 동쪽으로는 광안리 해수욕장 근처의 바다에 인접하고 있다. 해안에서 내륙쪽으로 약 180 m 위치에 설치된 심도 120 m의 MW1 관측정이 설치되어 있다(Fig. 3). 그리고 수리적인 특성을 파악하기 위하여 시추조사시 이루어진 투수시험결과 전체적인 투수계수 범위는 5.93×10^{-8}~5.02×10^{-6} m/s 이지만, 수압시험에서 암반층의 투수계수는 1.51×10^{-7}~3.86×10^{-9} m/s의 낮은 투수성을 나타낸다. 12개의 시추공에서 슬러그 시험에 의해 산출된 투수계수의 평균값을 수치모델링에 적용하였으며, 이 시추공들 가운데 1개의 공에서만 극히 낮은 투수계수를 나타내었으나 나머지 공들에서는 1 order 내외의 낮은 편차를 나타내었다. 지하수위 조사에 의한 전체적인 평균수리경사는 0.006~0.008이며, 조사결과 20 m 이하는 대부분 피압대수층으로 나타났다[21].

Fig. 3은 본 연구지역에서 해수와 담수의 경계면을 모사하기 위한 모식도로서 대수층을 단일 피압대수층 단면으로 설정하였다. 모식도의 우단은 해안과 직접 맞닿은 형태로 설정하였으며, 좌단은 해안에서 수직방향으로 내륙으로 향한다. 모사에 이용된 매개변수는 Table 1에 주어진 값을 적용하였으며, 좌단과 우단 및 대수층 하부는 각각 불투수 경계(no-flow boundary)로 설정하였다. 우단은 수리정역학적(hydrostatic) 해수침투 경계를 나타내기 위해서 고정수두(constant head)로 설정하였으며, 해저심도는

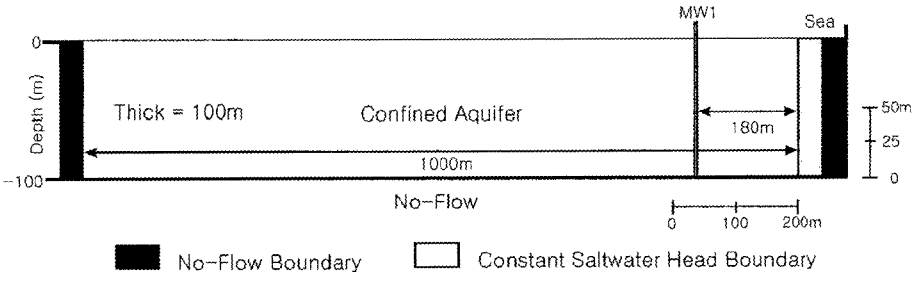

Fig. 3. Cross-section showing the geometry and boundary conditions.

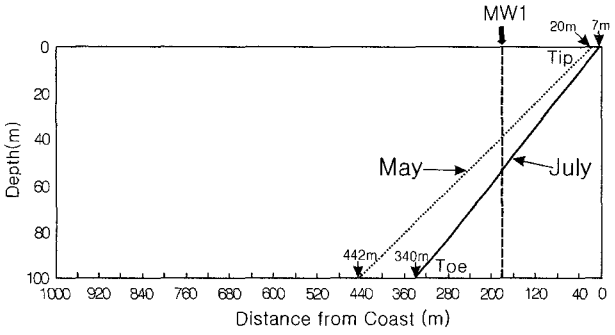

Fig. 4. The sharp interface positions from the SHARP simulations. The solid line and dotted lines are simulated for July and May, respectively, 2001.

-100 m로 대수층의 두께와 같게 설정하였다. 초기 지하수위는 각각 5월과 7월의 수위를 이용하여 평균수리경사를 각각 0.006과 0.008로 설정하였으며, 초기경계면은 Ghyben-Herzberg 방법[22]을 이용하여 설정하였다.

Fig. 4는 SHARP 수치모사에 의해 설정된 해수와 담수의 경계면으로서 거의 직선에 가까우며 아래로 약간 볼록한 형태를 나타낸다. MW1 관측정에서 6개월간의 관측결과 최저 지하수위와 최고 전기전도도(EC)가 측정된 갈수기인 5월에 해수와 담수의 경계면은 하부(Toe)가 해안에서 약 442 m 떨어진 지점에 위치하며, 상부(Tip)는 해안에서 약 20 m에 위치한다. 그리고 MW1 관측정에서 최고 지하수위가 형성된 우기인 7월에는 경계면 하부가 해안에서 340 m에 위치하며, 상부는 약 7 m 떨어진 지점에 위치한다. 이러한 변화는 6월과 7월의 강수에 의하여 함양된 지하수의 유입량이 증가하여 5월보다 7월의 해수침투 범위가 약 102 m 해안쪽으로 이동한 것으로 볼 수 있다. 그리고 해수와 담수의 경계면 상단(Tip)은 계절적인 변화에서 약 13 m의 차이를 나타낸다. 이것은 두 시기에 같은 경계조건과 Ghyben-Herzberg 가정[22]을 이용하여 해수와 담수의 경계면을 설정하였지만, 좌단으로부터 유입되는 담수의 유량 차이 및 해수와 담수의 비중차이에 의하여 담수위 변화량이 적은데도 불구하고 해수와 담수의 경계면 깊이는 큰 변화를 나타내기 때문이다. 연구지역내 MW1 관측정에서 수직방향으로 이동된 해수와 담수의 경계면은 5월에 심도 약 40 m에 위치하고 있으나, 7월에는 심도 약 52 m 지점에 위치한다. SHARP[7]를 이용한 모사에 의하면 계절적인 변화에 의하여 경계면 위치가 약 12 m 수직적으로 이동하였다. 그러나 MW1 관측정에서 2001년 3월 중순에서 8월까지 측정한 전기전도도에 의하면 약 25 m 지점에서 20,000 μS/cm를 초과하며, 5월과 7월의 계절적인 영향에 의해서 해수·담수의 경계면이 최대 약 80 cm 정도의 심도변화를 나타내고 있다[23]. 그러므로 SHARP[7] 수치모사에 의한 해수와 담수의 경계면이 연구지역내에서 측정된 해수와 담수의 경계면보다 수직적인 변화가 보다 크게 나타난다. 이러한 현상은 연구지역의 대수층이 투수성이 낮은 암반으로 이루어져서 확산현상이 해수와 담수의 경계면 변화에 많은 영향을 미치므로, 외부환경에 대한 대수층내 침투된 해수의 반응이 매우 느리기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 단일 경계면을 가진 모델로 확산이 우세한 지역의 정밀한 해수침투 범위를 추정하는 경우에 실제 대수층내에서 측정된 범위와 다소 차이가 있는 것으로 판단된다.

3. 수치모사 결과분석

3.1. TDS 분포도 비교

Fig. 5는 SHARP[7] 모사에 의한 경계면과 SUTRA[13] 수치모사에 의한 TDS 농도분포 결과를 비교하기 위한 단

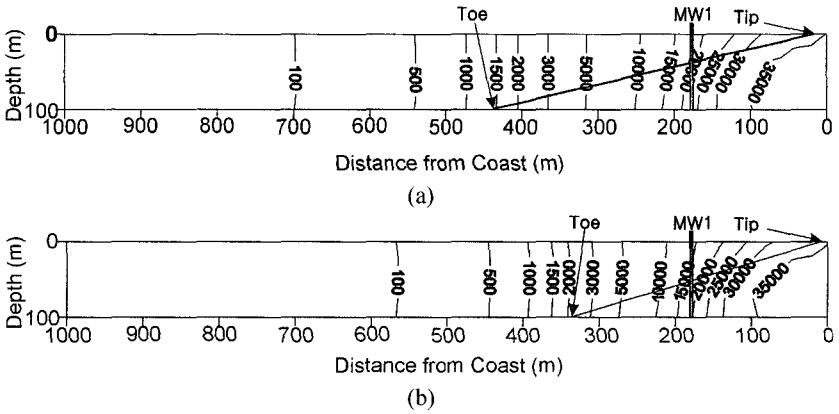

Fig. 5. TDS distribution produced by the SUTRA model and Ghyben-Herzberg interface generated by the SHARP model in May (a) and July (b), 2001.

Table 1. Hydraulic parameters used for SHARP modeling

Parameters	Values
Porosity, ε (%)	15
Fluid compressibility, β	0
Freshwater density, ρ (kg/m^3)	1000
Fluid viscosity, μ (kg/m·s)	0.001
Seawater density, ρ_s (kg/m^3)	1025
Gravity vector, g (m/s^2)	9.8
Mean hydraulic gradient (May)	0.006
Mean hydraulic gradient (July)	0.008
Hydraulic conductivity, K (m/s)	1.89×10^{-6}

면도이다. SUTRA[13] 모델링에서는 Table 1의 수리인자 및 분자확산계수(molecular diffusivity of solute in fluid) 6.6×10^{-6} m^2/s, 그리고 종분산지수(longitudinal dispersivity) 11.77 m를 이용하였다[23]. SUTRA 모사에서는 농도에 따른 밀도의 변화를 나타내기 위하여 우단에서 침투되는 해수의 농도는 해수내 일반적인 TDS의 질량으로서 0.0357 (kg-TDS/kg-fluid)이며, 농도에 따른 압력의 변화는 $\rho(c)=\rho_0+700\times(C-C_0)$로 설정하였다[24,25]. 종분산지수는 Xu[26]가 제시한 현장분산지수[27]에서 신뢰도를 차등화하여 가중최소자승법을 이용하여 만든 회귀식에 의하여 산출되었다. SUTRA 모델링에 이용된 종분산지수의 타당성을 검증하기 위하여 TDS 현장측정치 및 겉보기비저항 단면도들과 비교한 결과, 본 연구지역에 적합한 것으로 확인되었다[23]. 5월에는 해수와 담수의 경계면 하부가 1,500 mg/l의 TDS 등치선과 거의 일치하고 있으며, 7월에는 약 2,200 mg/l의 TDS 등치선에 위치하고 있다. 그리고 두 TDS 분포 단면도에서 SHARP[7] 모사에 의한 경계면이 TDS 농도분포의 약 95%에 해당되는 범위에 걸쳐 있다.

TDS 1000 mg/l 등치선을 해수와 담수 경계의 하한으로 설정하면[28], 5월과 7월에 추정된 해수침투 범위는 각각 해안에서 약 480 m와 390 m를 나타낸다. 이 경우에 SHARP[7] 수치모사에 의한 해수와 담수의 경계면에 의한 해수침투 범위는 SUTRA[20] 모델에서 설정된 해수침투 범위와 38 ~50 m의 차이가 나타난다. 계절적인 영향에 의한 차이를 비교하면 TDS 분포도에서 계절적인 요인에 의한 해수침투 범위의 변동폭이 약 90 m이며, SHARP[7] 모델은 102 m로 나타난다. 계절적인 영향에 대해서는 SHARP[7] 모델이 보다 큰 반응을 보이고 있으나, 전체적인 규모에 비하여 비교적 차이가 적다. 따라서 SHARP[7] 모사에 의한 경계면과 TDS 농도분포로 이루어진 경계면의 해수침투 범위 및 계절적인 변화에 큰 차이가 없다.

3.2. 벡터 분포도 비교

Fig. 6은 SHARP[7] 모사에 의한 경계면과 SUTRA[13] 모사에 의한 유체의 속도 벡터 분포를 비교한 것이다. 5월에 계산된 대수층내 유체의 속도벡터는 5.145×10^{-9}~2.283×10^{-5} m/s의 범위를 가지며, 해안으로부터 침투하는 해수

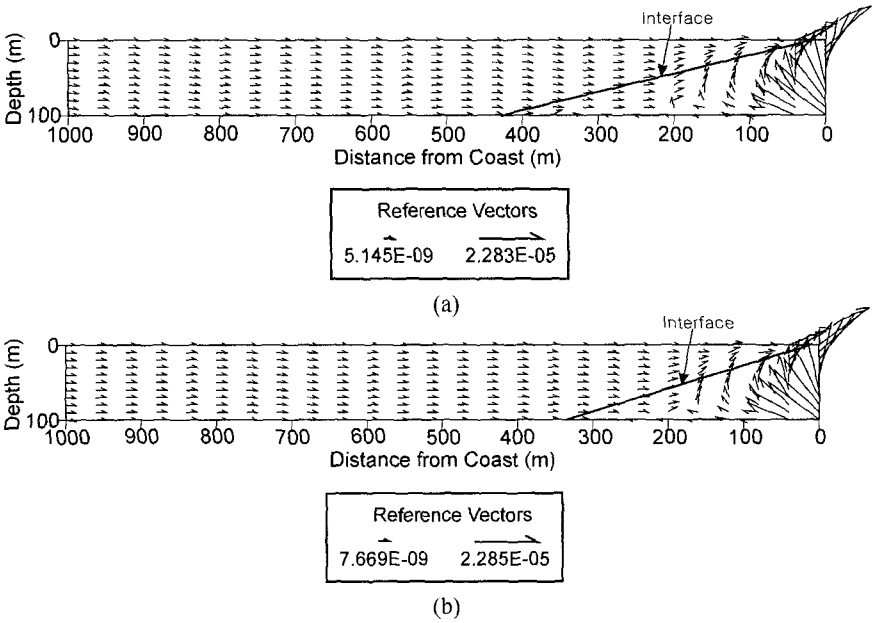

Fig. 6. *Comparisons of steady-state sharp interface positions from the SHARP simulations and fluid velocity vectors from the SUTRA simulations in May (a) and July (b), 2001.*

의 영향이 해안에서 약 400 m 지점까지 영향을 미치는 것으로 나타난다. 7월의 속도 벡터는 7.669×10^{-9}~2.285×10^{-5} m/s의 범위이며, 최소값이 5월보다 2.524×10^{-9} m/s 증가하였으나 변화량은 크지 않다. 7월의 속도벡터 분포에서 해수의 유동으로 인한 영향이 대수층 하부에서 해안으로부터 약 300 m 지점까지 나타나고, 5월에 비하여 해수침투 범위가 약 100 m 정도 해안쪽으로 이동하였다. SHARP[7] 모사에 의한 경계면을 중심으로 벡터의 크기와 방향으로 미루어 볼 때, 우단에서 침투되는 해수가 담수와의 밀도차에 의하여 상대적으로 빠른 속도로 하부에 침투되는 것을 알 수 있다. 그리고 침투된 해수는 유입되는 담수의 영향으로 해수와 담수의 경계면을 따라 다시 우단 상부로 유출되는 벡터 방향을 나타내고 있다.

벡터분포 단면도에서 벡터의 크기는 해수가 침투되는 우단에서 급격히 증가하며, 우단에서도 상부로 갈수록 크게 나타난다. 속도벡터에 의해 파악된 해수침투 범위는 SHARP 모사에 의한 해수침투 범위와 TDS 농도에 의하여 설정된 해수침투 범위의 차이가 약 42 m로서 SHARP 모사에 의한 해수침투 범위가 작다. 광역적인 지역에서 이러한 해수침투 범위의 차이는 작은 것으로서, 해수침투 범위를 설정하는데 SHARP 모사에 의해 결정된 경계면은 관측정에서 측정된 수질 자료와 비교할 때 적절한 것으로 사료된다. 그러므로 광역적인 지역에서 해수와 담수의 정밀한 경계면을 추정하는데 있어서 경계면 모델은 유용한 것으로 판단된다. 그러나 경계면 모델은 확산이 우세한 국지적인 규모에서 정확한 해수침투 현상을 모사하는데는 약간의 한계가 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 SHARP 모델을 이용하여 해안지역의 대수층에서 해수와 담수의 경계면을 모사하고 해수침투 범위와 그 계절적인 변동폭을 추정하였으며, SUTRA 수치모사 결과와 SHARP 수치모사에 의한 경계면을 비교하여 해수침투 경계면의 특성을 파악하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. SHARP 모사에 의한 경계면과 SUTRA 모사에 의한 TDS 농도분포를 비교한 결과, 해수침투의 범위 및 계절적인 변화에서 유사한 경향을 나타내었다.

2. TDS 분포와 벡터 분포에 의해 설정된 해수침투 범위의 차이가 최대 50 m 정도로 나타났으나, 이 차이는 광역적인 모델링 규모에서 볼 때 근소한 편이다. 따라서 본 연구지역과 같이 광역적인 규모의 대수층에서 SHARP 모델은 해수침투 범위에 대한 정량적인 변화를 파악하는데 유용한 것으로 판단된다.

3. SHARP 수치모델을 이용하여 모사된 해수와 담수간의 경계면은 실제 대수층내 염수분포에 의한 경계면과 다소 차이를 가지며, SHARP 모델은 확산이 우세한 국지적인 지역의 수직적 경계면 변화에 민감하게 반응하였다. 따라서 경계면 모델은 확산이 우세한 국지적인 규모에서 정확한 해수침투 현상을 모사하는데는 약간의 한계가 있는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 2000년도 부경대학교 발전기금의 지원을 받았으며, 부경대학교 지질환경연구소(Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University)와 일본 농업공학연구소(National Institute for Rural Engineering, Japan)의 공동연구협약의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

1. Bear, J., Cheng, A.H.-D., Sorek, S., Ouazar, D., and Herrera, I., Seawater Intrusion in Coastal Aquifers-Concepts, Methods and Practices, Kluwer Academic Publ., 625p. (1999).
2. Shamir, U. and Dagan, G., "Motion of the seawater interface in coastal aquifers: A numerical solution", *Water Resources Research*, **7**(3), pp. 644-657 (1971).
3. Wilson, J. L., and Sa Da Coasta, A., "Finite element simulation of a saltwater-freshwater interface with interface toe tracking", *Water Resources Research*, **18**, pp. 1078-1080 (1982).
4. Ledoux, E., Sauvagnac, S., and Rivera A., "A compatible single-phase/two -phase numerical model: 1. Modeling the transient salt-water/fresh-water interface motion", *Ground Water*, **28**(1), pp. 79-87 (1990).
5. Rivera A., Ledoux, and E., Sauvagnac, S., "A compatible single-phase/two-phase numerical model: 2. Application to a coastal aquifer in Mexico", *Ground Water*, **28**(2), pp. 215-223 (1990).
6. Essaid, H. I., A multilayered sharp interface model of coupled freshwater and saltwater flow in coastal system: Model development and application, *Water Resources Research*, **26**(7), pp. 1431-1454 (1990a).
7. Essaid, H. I., The computer model SHARP, A Quasi-Three-Dimensional Finite-Difference Model to Simulate Freshwater and Saltwater Flow in Layered Coastal Aquifer Systems, USGS WRIR 90-4130, 181p. (1990b).
8. Huyakorn, P. S., Wu, Y. S., and Park, N. S., Multiphase approach to the numerical solution of a sharp interface salt-

water intrusion problem. *Water Resources Research*, **32**(1), pp. 93-102 (1996).
9. Person, M., Taylor, J. Z., and Dingman, S. L., "Sharp interface models of salt water intrusion and wellhead delineation on Nantucket Island, Massachusetts", *Ground Water*, **36**(5), pp. 731-742 (1998).
10. Padilla, F., and Cruz-Sanjulin, J., "Modeling sea-water intrusion with open boundary conditions", *Ground Water*, **35**(4), pp. 704-712 (1997).
11. Kontis, A. L., Simulation of freshwater-saltwater interface in the Brooklyn-Queens aquifer system, Long Island, New York, USGS WRIR 98-4067, 26p. (1999).
12. Naji, A., Cheng, A.H.-D., and Ouazqr, D., BEM solution of stochastic seawater intrusion problems, Engineering Analysis with Boundary Elements, 23, pp. 529-537 (1999).
13. 제주도 · 농업기반공사, 제주도 지하수 보전 · 관리계획 보고서, 588 p. (2000).
14. 부성안, 정교철, "제주도 동부권역 담지하수 대수층에서의 염수침입", 대한지질공학회지, **10**(2), pp. 115-130 (2000).
15. 박윤석, 고기원, 강봉래, 함세영, "제주도 동부지역 수문지질에 관한 연구(I)", 한국지하수토양환경학회 춘계학술대회 논문집, pp. 81-84 (2002).
16. 과학기술부 · 한국자원연구소, 해수침투 평가, 예측 및 방지기술 개발, 474p. (1999).
17. 심병완, 정상용, 김희준, 성익환, 김병우, "지구물리 탐사자료의 지구통계학적 분석에 의한 부산 동남해안 지역의 해수침투 특성", 지하수토양환경, **7**(3), pp. 3-17 (2002a).
18. 정상용, 강동환, 박희영, 심병완, "부산지역 지하수 오염현황 분석을 위한 지구통계 기법의 응용", 대한지질공학회지, **10**(3), pp. 247-261 (2000).
19. 부성안, 이기철, 김진성, 정교철, 고양수, 2002, "지하수댐 물막이벽 시공법과 해안지역 염수침입 방지기술 개선 방안", 대한지질공학회지, **12**(2), pp. 215-234.
20. Voss, C. I., SUTRA-Sautrated Unsaturated Transport, USGS WRIR 84-4369, 409p. (1984).
21. 부경대학교, 대연 전화국 연결 통신구 공사로 인한 부경대학교 시설물 피해영향조사 연구(4/4), 168p. (1997).
22. Toad, D. K, Groundwater Hydrology, John Wiley & Sons, 535p. (1980).
23. 심병완, 정상용, 김희준, 성익환, "수리동역학적 모델링에서 분산지수에 따른 해수침투 범위 변화에 관한 연구", 한국지하수토양환경학회지, **7**(4), pp. 59-67 (2002b).
24. Holzbecher, E. Modeling Density-Driven Flow in Porous Media, New York: Springer-Verlag, 286p. (1998).
25. Ritzi Jr., R. W., Bukowski, J. M., Carney, C. K., and Boardman, M. R., "Explaining the thinness of the fresh water lens in the pleistocene carbonate aquifer on Andros isalnd, Bahamas", *Ground Water*, **39**(5), pp.713-720 (2001).
26. Xu M., and Eckstein Y., "Use of weighted least-squares method in evaluation of the relationship between dispersivity and field scale", *Ground Water*, **33**(6), pp. 905-908 (1995).
27. Gelhar, L. W., Welty, C., and Rehfeldt, K. R., "A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifers", Water Resources Research, **28**(7), pp. 1955-1974 (1992).
28. Freeze, R. A. and Cherry, J. A., Groundwater, Prentice-Hall, 604p. (1979).