터널과 지하공간, 한국암반공학회지
제14권 제3호, 2004년 6월, pp. 229~240

TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 14, No. 3, 2004, pp. 229-240
Journal of Korean Society for Rock Mechanics

연안 대수층에서 해수침투 특성 해석

이연규[1)]*, 이희석[2)]

Numerical Modeling of Seawater Intrusion in Coastal Aquifer

Youn-Kyou Lee and Hee-Suk Lee

Abstract Coastal aquifers may serve as major sources for freshwater. In many coastal aquifers, intrusion of seawater has become one of the major constraints imposed on groundwater utilization. The management of groundwater in coastal acquifers means making decision as to the pumping rate and the spatial distribution of wells. Several numerical techniques for flow and solute transport simulation can provide the means to achieve this goal. As a basic study to predict the intrusion of seawater in coastal phreatic aquifers, the coupled flow and solute transport analysis was conducted by use of the 3-D finite element code, SWICHA. In order to understand how the location and the shape of freshwater-seawater transition zone were affected by the boundary conditions and hydrogeologic variables, parametric study was carried out.

Keywords Seawater intrusion, Solute transport, Coastal aquifer, FEM

초 록 연안대수층은 주요한 지하수 공급원으로서 이용될 수 있다. 그러나 연안대수층의 개발은 해수침투에 의한 대수층 오염을 야기할 수도 있다.이에 따라 개발과정에서는 적절한 양수량과 양수정의 배치가 매우 중요하고, 이 들의 영향은 용질이동과 유동해석이 가능한 수치해석적 기법들을 적용하여 평가할 수 있다.이 연구에서는 연안 자유면 대수층 모델에 대해 양수량 및 수리지질학적 변수들이 해수침투 특성에 미치는 영향을 SWICHA 코드를 이용하여 수치해석적으로 검토하였다. 수치해석과정에서는 유동 및 용질의 상호작용이 고려되었다. 경계조건, 수리지질변수 등의 변화에 따른 해수-담수 경계부에서의 염수 확산대 분포, 양수정 부근에서의 수두변화 등이 분석되었다.

핵심어 해수침투, 용질이동, 연안대수층, 유한요소법

1. 서 론

인구의 증가와 산업화로 인해 지표수 수질오염이 심각해짐에 따라 지하수의 개발과 보존에 대한 관심이 높아지고 있다. 바다에 인접한 연안지역에는 과잉양수로 인한 지하수 고갈 및 이로 인한 해수침투(seawater intrusion) 가능성에 대한 우려가 제기되고 있다. 대규모 연안 산업단지 및 농업지역에서의 지하수 수요는 꾸준히 증가하는 추세이고, 이에 따라 연안대수층의 해수침투로 인한 오염문제도 중요한 환경문제로 제기될 가능성이 크다.

해수침입은 담수 대수층으로 염수가 유입되거나 담수 강물 내로 해수가 침투하는 현상을 가리키며 해안지역에서 흔히 발생한다. 이러한 해수침입의 직접적인 원인은 과도한 지하수 개발로 인한 지하수면의 저하이다. 이로 인해 자연적으로 안정한 상태에 있던 해수/담수 경계면의 평형이 깨어지고 해수/담수의 밀도차에 의한 물질 이동에 의해 염수가 담수 대수층 내로 침입하게 된다. 일단 담수 대수층 내로 염수가 유입되게 되면 기존에 개발된 지하수 관정 내의 염도(salinity)가 증가하여 이들 관정 내의 물은 식음용수는 물론 농/공업 용수로서의 기능을 상실하게 되어 폐기되어야 하므로 큰 경제적 손실을 초래할 수 있다.

연안 대수층의 지하수 자원을 체계적으로 관리하기 위해서는 염수 침입의 징후에 대한 지구화학, 지구물리 조사 및 계측, 대수층 수리 지질 조사에 근거하여 현 대수층의 상태에 대한 파악 및 미래 변화에 대한 예측을 실시해야 한다. 이러한 방법은 대부분 지하수 유동 및 물질 이동 해석 모델에 기초하며, 이로부터 나

[1)] 군산대학교 해양과학대학 해양응용공학부 조교수
[2)] SK 건설 GEO TASK팀, 공학박사
*교신저자(Corresponding Author): kyoulee@kunsan.ac.kr
접수일: 2004년 6월 9일
심사 완료일: 2004년 6월 22일

온 결과를 바탕으로 양수량 조절이나 담수 주입과 같은 적절한 대책을 마련해야 한다.

19세기 말과 20세기 초에 Badon-Ghyben과 Hertzberg가 최초로 해수침투 문제를 다룬 이후 오늘날까지 활발한 관련연구가 수행되고 있다. 외국에서는 1950년대와 1960년대에 연안대수층에 대한 수많은 현장조사가 실시되었으며, 이 결과를 바탕으로 해수침투 메카니즘과 해수-담수 경계면의 형태에 대한 기초적인 이해를 얻게 되었다. 초기의 연구들은 해수쐐기(seawater wedge)의 형태에 대한 해석해를 얻기 위하여 아주 단순화된 모델을 가정하였다. 예를 들어 대수층의 균질등방성, 대수층 하부에 수평불투수층의 존재, 비확산 해수-담수경계(sharp interface), 대수층내에서의 수평 유동(Dupuit가정) 등을 가정하였으며 Ghyben-Hertzberg 관계식(Fetter, 1994)과 Strack(1976)이 그 대표적 예이다.

수치해석 기법의 발달에 힘입어 70년대 이후로는 수치해석적 방법을 이용하여 보다 현실에 가까운 해석모델을 선정하여 해수침투문제를 다룰 수 있게 되었다. 즉 3차원, 비균질, 이방성 대수층을 대상으로 한 해수침투관련 연구들도 가능해지게 되었다. 해석적 방법, 수치해석적 방법, 현장계측 등에 의해 연안대수층에서의 해수침투문제를 다룬 최근의 연구들로는 Melloul & Goldenberg(1997), Padilla et al.(1997), Yakirevich et al.(1998), Naji et al.(1998), Singh & Gupta(1999), Sakr(1999), Cruz & Silva(2000), Zhou et al.(2000)을 들 수 있다.

국내의 해수침투 관련 연구는 주로 제주도를 대상으로 10여년 전부터 시작되어 외국의 경우에 비해 그 역사가 매우 짧다. 해수-담수 경계면에 대한 추정은 김천수 등(1997)이 여수지역에 건설된 지하유류비축시설을 대상으로 이론적으로 계산한 바 있다. 해수침투에 대한 수치해석 모델링으로는 박남식과 이용두(1997)가 제주도 중-동제주 수역의 지하수 개발로 인한 해수침투 거동에 대한 모사를 실시한 바가 있다. 이들의 연구에서는 수십 km에 이르는 넓은 지역을 대상으로 하였기 때문에 해수와 담수 경계부에서의 농도확산을 고려하지 않는 비확산모델이 이용되었다. 박남식(1995)은 여러 가지 수리변수들이 대수층 내의 담수 해수-확산대의 형성에 미치는 영향에 대한 정량적인 분석을 시도하였지만 양수량의 변화는 고려하지 못했다. 최근에는 서해안 지역에서의 해수침투 조사연구도 수행되었지만 지구화학적 분석에 의한 연구(서울대학교, 1998, 1999; 김옥배와 박희열, 1997)와 지구물리학적 연구(이희순 등, 1995)가 주를 이루고 있다. 지금까지 국내의 관련연구는 지구화학적 및 지구물리학적 기법을 이용한 해수침투의 탐지에 집중이 되고 있는 실정이다. 해수쐐기의 형태나 침투깊이의 추정에 필요한 수리지질학적 변수들의 현장측정과 이들 변수들을 이용한 침투거동 예측에 대한 수치해석적 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

본 연구는 연안대수층에서의 해수침투거동 해석을 위한 기초연구로서 연안 자유면 대수층 모델에 대해 해수침투의 특성을 수치해석적으로 평가하였다. 미국 IGWMC (1991)에서 개발한 SWICHA 프로그램을 이용하여 여러 가지 수리역학적 상수들이 해수침투 거동에 미치는 영향을 수치적으로 분석함으로써 수리 상수들의 상대적 중요성을 평가하였다.

2. 해수침투이론

2.1 Ghyben-Herzberg 관계식

일반적인 지하수 유동에서는 지하수에 용해된 용질 함량은 유동에 영향을 주지 않는 것으로 가정하지만 담수/해수 인접부에서는 이들 밀도차이가 중요하다. 용해물질의 차이로 인해 해수 밀도 ρ_s(1.025g/cm^3)는 담수 밀도 ρ_f(1.000g/cm^3)보다 크다. 담지하수는 일반적으로 용해 물질 함유량이 연속적으로 증가하여 염수로 변화되기 때문에 어느 정도의 확산대(transition zone)가 나타나게 된다(Fig. 1).

문제를 단순화시키기 위하여 해수-담수 사이에 뚜렷한 경계면이 존재한다고 가정하는 비확산 모델을 사용하는 경우도 있으며 Ghyben-Herzberg 문제가 그 대표적인 예이다(Fig. 2). 이 이론에 의하면 해수면 고도에서 해수-담수 경계면까지의 깊이(H)는 해수면 고도에서 지하수면까지의 높이(t)와 다음과 같은 관계가 있다.

$$H = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} t \tag{1}$$

Ghyben-Herzberg 관계식에 의하면 연안지역 대수층의 관측공으로부터 t가 측정되었다면 이 지점의 해수-담수 경계면은 해수면기준으로 약 40t 지하에 형성되었다는 것을 추측할 수 있다. 여러 가지 비현실적인 가정이 포함되어 있음에도 불구하고 Ghyben-Herzberg 관계식은 해수침투 깊이를 개략적으로 추정하는 수단으로 아직까지도 이용되고 있다.

2.2 용질이동에 의한 해수와 담수의 밀도차를 고려한 지하수 유동

해수침투 현상은 이론적으로 해수와 담수 사이의 밀도 차이에 의한 용질 이동(solute transport)에 의해 설명될 수 있다. 밀도 변화 유동(density driven flow)은

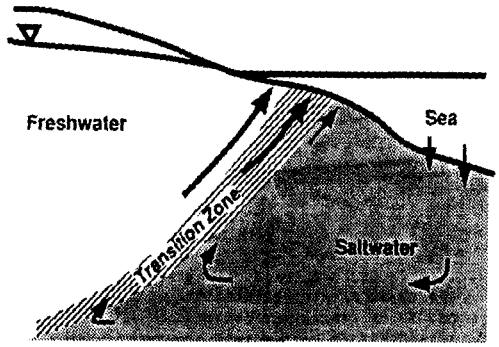

Fig. 1. Saltwater-freshwater interface(Fetter, 1994)

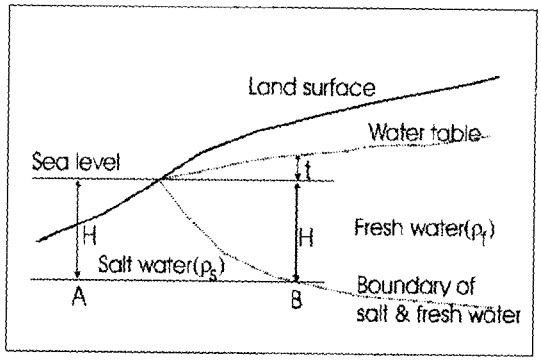

Fig. 2. Ghyben-Hertzberg problem

유동 시스템 내에서 유체 밀도 차이에 의해 유동 양상이 영향을 받아 변하는 상태를 말한다.

대부분의 일반적인 오염물 이동 문제에서는 유체 밀도가 일정하다고 가정되므로 지하수 유동 양상을 결정한 후 오염물의 이동을 해석하게 된다. 하지만 밀도 변화 지하수 유동의 경우에는 지하수 유동과 물질이동이 상호 결합되어 서로 영향을 미치게 되므로 일반적인 지하수 해석에 비해 해를 얻기 매우 어렵다.

유체의 밀도가 용질의 농도에 따라 변할 때 유체의 밀도 차에 기인한 해수침투 문제의 기본 지배방정식은 유체의 질량 보존식으로 표현할 수 있다. 이는 다시 유체의 부피 보존식과 용질의 질량 보존식의 일차결합으로 이해될 수 있다. 생성(source)과 소멸(sink)이 없다는 가정하에서 유체의 흐름 방정식은 다음과 같다 (Holzbecher, 1998).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi\rho) = -\nabla\cdot(\rho\,\mathbf{v}) \tag{2a}$$

$$\mathbf{v} = -\frac{\mathbf{k}}{\mu}(\nabla p - \rho\,\mathbf{g}) \tag{2b}$$

(2) 식에서 ρ는 유체의 밀도, $\mathbf{v}$은 Darcy 유속을 나타내는 벡터이고, ϕ는 매질의 공극률, $\mathbf{k}$는 고유투수계수 (intrinsic permeability) 텐서, μ는 점성계수, $\mathbf{g}$는 중력가속도 벡터, p는 압력이다. (2b) 식은 Darcy 법칙을 나타낸다. 두 식을 결합하면 통상적인 지하수 유동방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi\rho) = \nabla\cdot\left(\frac{\mathbf{k}}{\mu}(\nabla p - \rho\,\mathbf{g})\right) \tag{3}$$

일반적인 조건에서 위 식은 변수 ρ, μ, ϕ, $\mathbf{k}$가 변하지 않는다는 가정 하에 해를 구하므로 미지수는 압력 p가 된다. (3)식은 압력 항에 기초한 수식화이다. 만일 일반적으로 지하수 해석에 사용되는 수두(piezometric head, h)를 미지수로 하여 해석하려면 다음과 같은 관계를 이용하여 수리 수두의 항으로 다시 정리하면 된다.

$$h = \frac{p}{\rho g} + z \tag{4}$$

여기서 z는 위치 수두이다. 압력수두($p/\rho g$)는 밀도의 함수이므로 유체의 밀도가 변하는 흐름의 해석 시 기준 밀도(reference density, ρ_o)에 대하여 수두를 계산하여야 한다. 이 경우 보통 기준밀도는 담수의 밀도로 가정하는 경우가 많다. 유체의 수리전도도(hydraulic conductivity) 역시 기준 밀도에 대하여 계산된다.

해수침투 문제를 다루는 경우 유체 물성인 점성계수 (μ)와 밀도 (ρ)가 염도 변화에 따라 변하게 된다. 농도 (c)와 밀도의 관계식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho = \rho_o\left(1 + \varepsilon\frac{c}{c_m}\right) \tag{5a}$$

$$\varepsilon = \frac{(\rho_m - \rho_o)}{\rho_o} \tag{5b}$$

여기서 ρ_m과 c_m은 각각 최대 밀도와 최대밀도에 해당하는 농도를 나타낸다.

(3) 식을 풀기 위해서는 용질농도를 알아야하며 이를 위해 용질의 이동방정식이 필요하게 된다. 용질의 이동을 지배하는 방정식은 용질의 질량이 보존되어야 한다는 원리를 적용하여 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi R\rho c) = -\nabla\cdot(\rho(\mathbf{v}c + \mathbf{j}_c)) + q_c \tag{6a}$$

$$\mathbf{j}_c = -\phi\,\mathbf{D}\nabla c \tag{6b}$$

식 (6a)은 염분질량의 보존을 나타내며 우변에 속도

v를 포함한 항은 이류(advection)를 설명하며 $\mathbf{j}_c$항은 확산(diffusion)과 분산(dispersion)를 고려하는 항이다. 염분의 생성 및 소멸항은 q_c이다. R은 지연계수(retardation factor)로서 흡착(adsorption) 또는 탈착 과정을 고려하기위해 도입되었다. 대부분의 염수 이동의 경우 천연염분은 고체와 거의 화학반응을 일으키지 않으므로 $R \approx 1$이라 생각할 수 있다. (6b) 식은 일반화된 Fick의 법칙으로 농도경사(concentration gradient)로 인한 혼합 과정을 설명하는 식이다. Fick의 법칙에서 **D**는 분산지수텐서(dispersion tensor)로서 다음과 같이 나타낼 수 있다(Bear, 1979).

$$\mathbf{D} = (D_{ij}) = \left((D_m + \alpha_T |\mathbf{v}|)\delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T)\frac{v_i v_j}{|\mathbf{v}|} \right) \quad (i,j = 1,2,3) \tag{7}$$

여기서 δ_{ij}는 Kronecker delta이다. α_L은 종분산지수, α_T는 횡분산지수이고, D_m은 분자확산계수(molecular diffusion coefficient)이다. 식 (6a,b)를 다음과 같이 하나의 용질이동 방정식 형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi R \rho c) = -\nabla \cdot (\rho(\mathbf{v}c - \phi \mathbf{D} \nabla c)) + q_c \tag{8}$$

따라서 적절한 초기조건과 경계조건을 이용하여 식 (8)로부터 염분 농도의 변화를 구하고 이를 식 (3)의 지하수 유동 방정식과 결합시키면 용질 이동을 고려한 지하수 유동을 해석할 수 있다. 유동방정식의 풀이에 필요한 경계조건으로는 초기수두 조건, 경계수두 조건, 유체의 플럭스 경계조건 등이 있다. 용질이동 방정식과 관련된 경계조건에는 초기농도 조건, 경계농도 조건, 분산에 의한 용질의 질량 플럭스 조건, 용질의 총질량 플럭스 조건이 포함된다. 용질 이동 이론에 기초할 경우 염수와 담수는 서로 혼합 가능하며 이들의 경계면에서 농도 변화는 Fig. 1과 같이 연속적으로 일어나게 되어 확산대가 존재한다

3. 해수침투 모델링

3.1 해석 프로그램

이 연구에서는 미국의 IGWMC(International Ground Water Modeling Center)에서 개발된 SWICHA 코드(IGWMC, 1991)를 활용하여 연안 대수층에 대한 해수침투 모의해석을 수행하였다. SWICHA는 앞서 설명한 해수침투 관련 지배방정식을 Galerkin 근사법을 적용하여 유한요소코드로 구현한 3차원 프로그램으로 포화된 매질 내 가변 밀도 유체 유동과 물질이동 현상을 모사할 수 있다. 2.2절에서 설명한 이류, 수동력학적 분산(hydrodynamic dispersion), 흡착 등을 고려할 수 있다. 사각형 및 삼각형 프리즘 요소가 사용될 수 있으며 복잡한 대규모 연립방정식을 SSOR(slice successive over relaxation) 해법을 적용하여 근사해를 구한다. 유동과 물질이동의 상호작용으로 인한 비선형성은 Picard 반복법으로 구해진다. 이 코드는 범용 지하수 유동, 오염물 이동 양수시험 문제 등에 적용할 수 있지만 주로 염수침입 문제에 많이 사용되어 왔다. 국내에서도 이상호(1993)가 이 코드를 제주지역에 적용한 사례가 있다.

3.2 해석 모델

국내 서해안과 같은 해안평야지대는 육성 혹은 해성 기원의 제3기 혹은 제4기 퇴적물과 퇴적암으로 주로 구성되어 있다. 퇴적물들은 암석화된 부분도 있지만 대부분 미고결이나 고결이 진행 중인 상태이다. 투수성이 좋은 모래, 자갈 사암 및 해성 모래나 석회암 등이 연안 대수층을 구성하고, 해성 및 육성 실트와 점토가 불투수층을 구성하고 있다.

국내 서해안 지역은 해안지대에 미고결 충적층 내에 대수층이 형성되어 있는 경우가 많을 것을 판단되어 연안 자유면 대수층(phreatic aquifer)을 이 연구의 해석모델로 선정하였다. Fig. 3은 해석모델의 크기와 경계조건을 보여준다. 그림에서처럼 해석영역으로 두께 100 m의 대수층을 가정하였다. 해석영역은 길이 2680 m 폭 100 m이다. 모델의 왼쪽은 바다와 접하고 있으며 오른쪽은 내륙부이다. 내륙경계부로부터 680 m 지점에 양수정을 배치시켰다. 모델의 길이에 비하여 길이방향의 수두 차이는 미미하다고 판단하여 상부경계면을 수평으로 가정하였다.

흐름방정식에 대한 경계조건으로 바다와 접하는 면에서는 $h = z(\rho_s - \rho_w)/\rho_w$를 적용하였고, 우측 경계면에서는 $h = h^*$로 일정한 수두값 h^*를 가정하였다. 해수쪽 경계에서 용질이동 방정식에 대한 경계조건으로 하부 55 m 구간에서는 c=1(해수와 동일한 농도)를 가정하였고 상부 45 m 경계구간에서는 염화물을 그대로 유출시키는 조건 $\partial c/\partial n = 0$를 적용하였다. 순간적인 혼합을 가정하여 해수 쪽 경계면 전체에서 c = 1이라는 가정을 적용하는 경우도 가능하지만 유출부분의 농도는 상류로부터 도달하는 지하수의 농도에 의해 결정되므로 c = 1이라는 가정은 적합하지 않는 것으로 판단된다.우측 경계면은 바다에서 멀리 떨어져 있기 때문에 농도조건을 c = 0으로 가정하였다. 상부와 하부 경계면에서는 $\partial c/\partial n = \partial h/\partial n = 0$ 조건을 적용하였다. 경계조건만으로 볼 때 대수층내에서 흐름은 대체로 내륙쪽

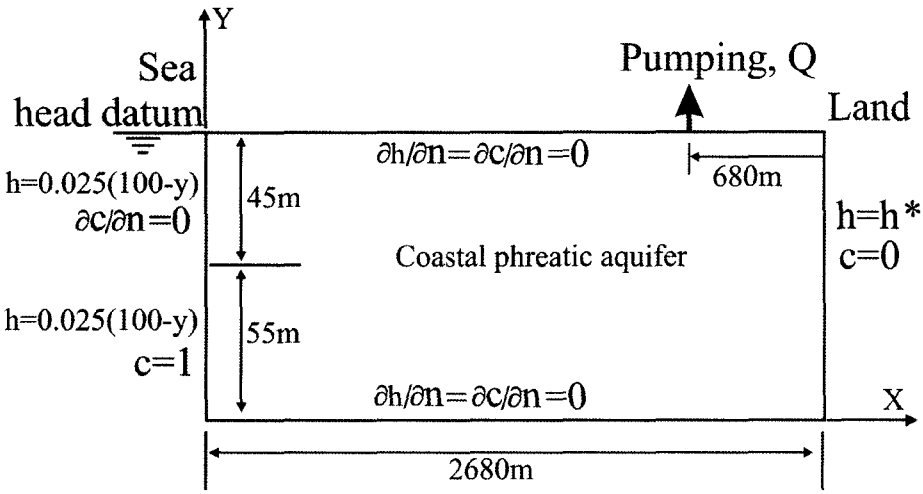

Fig. 3. Dimensions and boundary conditions for flow and transport in a coastal aquifer

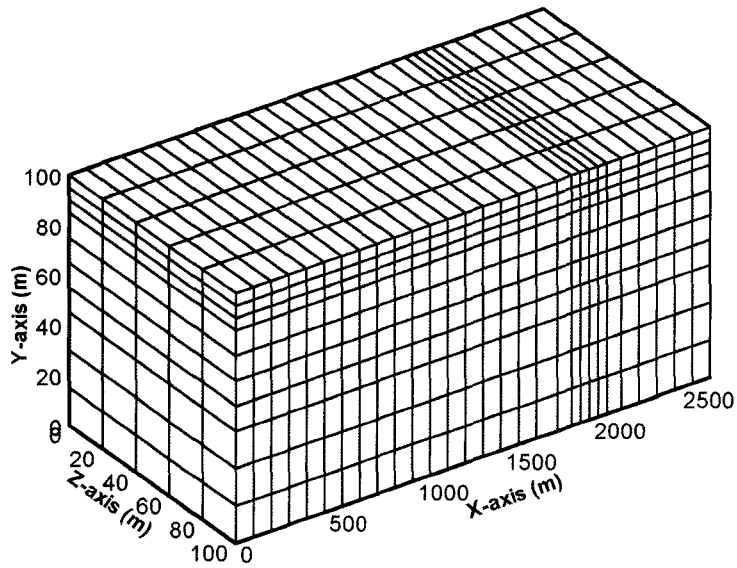

Fig. 4. Finte element mesh (1980 nodes, 1450 elements)

에서 유입된 담수가 해수쪽 하부 경계를 통하여 유입된 해수를 상부를 통하여 밀어내는 형태이다.

Fig. 4는 해석영역을 3차원 유한요소망으로 이산화시킨 모습이다. 요소망은 총 1980개의 절점과 1450개의 8절점 요소로 이루어져 있다. x-y면에 대한 대칭성을 생각하면 이 유한요소망은 폭 200 m의 영역에 대한 해석용 유한요소망으로 생각할 수 있다.

3.3 해석결과 및 분석

3.3.1 경계수두값의 변화에 따른 영향

우리나라의 서해안 지역을 대상으로 한 수리지질자료들의 체계적인 현장 계측자료가 거의 전무한 상황에서 해석에 이용한 기타 입력자료들은 여러 문헌들을 참고하여 결정하였다. 내륙 쪽 경계면의 일정 수두값 h*는 서울대학교 기초과학연구원(1999)이 전북 김제지역에서 조사한 지하수위 분포를 참고로하여 1.3 m, 1.5 m, 2.0 m로 변화시키면서 해석을 수행하였다. Table 1에 해석에 이용된 입력자료를 나타내었다.

Table 1. Input data for the simulation of seawater intrusion

input parameter	value
h*	1.3 m, 1.5 m, 2.1 m
Hydraulic conductivity	$K_x = K_z = 200$ m/d $K_y = 20$ m/d
Porosity, ϕ	0.25
Longitudinal dispersivity, α_L	20 m
Transverse dispersivity, α_T	10 m
Molecular diffusion, D_m	0

해석결과 얻은 해수농도 분포 및 유동방향을 Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7에 나타내었다. 그림은 양수정을 통과하는 종단면에 대한 해석결과이다. 그림에서 농도 수치는 상대농도를 나타내는 것으로 1은 해수를 0은 담수를 의미한다. 해석에 사용한 입력자료가 정확한 현장자료가 아니기 때문에 해석결과 나타난 절대수치들에 의미를 부여할 수는 없지만 해수와 담수가 만나는 경계면 부근에서의 유동 및 용질수송 특징을 잘 보여주고 있다. 담수와 해수사이에 밀도 차에 의한 흐름 및 염분 이동에 의한 확산대가 뚜렷하게 나타나고 있음을 보여준다. 상류쪽 경계의 수두가 커질수록 확산대의 폭은 크게 줄어들고 있으며 확산영역도 급속히 해안 쪽으로 이동되고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 해수는 모델의 하부 쪽에서 유입되어 담수와 섞인 후 상류쪽의 담지하수에 밀려 해수쪽 경계 상부를 통해 다시 바다로 유출되는 양상을 보인다.

해석결과는 해수침투 모델링시 유동에 대한 Dirichlet 경계조건값의 중요성을 잘 말해준다. 해수확산 범위와 침투깊이는 이 같은 경계조건에 민감하게 반응하기 때문에 해수침투거동을 정량적으로 수행하기 위해서는 장기간의 현장관측을 통한 지하수위의 결정이 중요하다 할 수 있다.

3.3.2 양수의 영향

양수(pumping)가 해수침투 현상에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 해안선으로부터 2000 m 떨어진 지점에 양수정을 가정하고 양수량을 1000 m^3/d, 2000 m^3/d로 변화시키면서 해석을 수행하였다. 나머지 입력자료는 Fig. 5의 경우와 동일한 값을 적용하였다. 해석결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 양수정 부근에서 유동벡터가 상향으로 보이지 않는 것은 양수정에서 약간 떨어진 지점의 유동벡터가 도시되었기 때문이다. 양수정의 좌우에서 유동벡터의 방향이 바뀌는 것을 보면 양수정 지점에서 유동벡터는 상향방향임을 유추해 볼 수 있다. 양수를 실시하지 않는 경우인 Fig. 5와 비교해볼 때 양수량의 증가에 따라 확산대의 폭은 줄어들지만 확산대가 내륙 쪽으로 급속히 이동되고 있음을 볼 수 있다. 예를 들어양수량이 2000 m^3/d인 경우 대수층 하부에서 0.7 농도선은 양수를 실시하지 않는 경우에 비하여 600 m 가량 내륙쪽으로 이동하였다. 따라서 연안대수층에서의 과잉양수가 해수침투의 주요 원인이 될 수 있음을 이 해석결과는 분명하게 보여준다. 유동방향도 양수량의 증가에 따라 확연히 달라지고 있음을 볼 수 있다. 2000 m^3/d 양수의 경우 대수층으로 유입된 해수는 확산을 거쳐 다시 바다 쪽으로 유출되는 것이 아니라 대부분 양수정

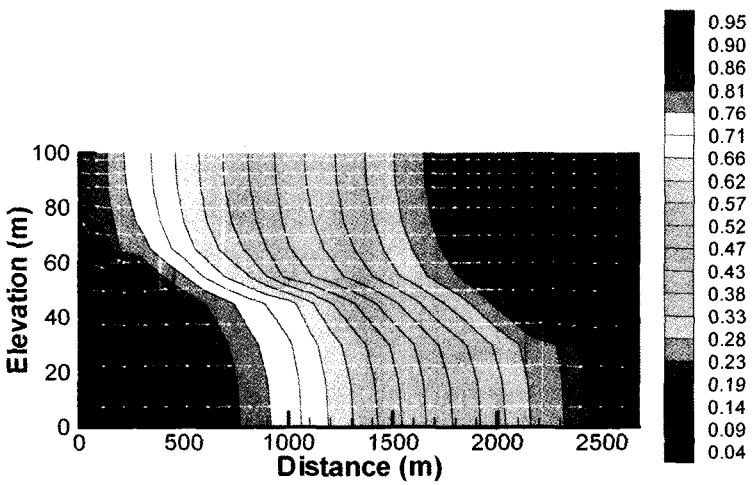

Fig. 5. Relative concentrations and flow directions without pumping ($K_x = K_z = 200$ m/d, $K_y = 20$ m/d, $\alpha_L = 20$ m, $\alpha_T = 10$ m, $h^* = 1.3$ m)

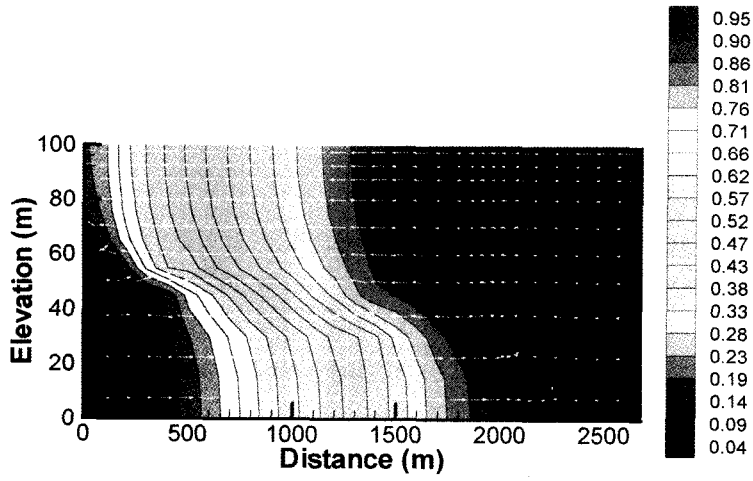

Fig. 6. Relative concentrations and flow directions without pumping ($K_x = K_z = 200$ m/d, $K_y = 20$ m/d, $\alpha_L = 20$ m, $\alpha_T = 10$ m, $h^* = 1.5$ m)

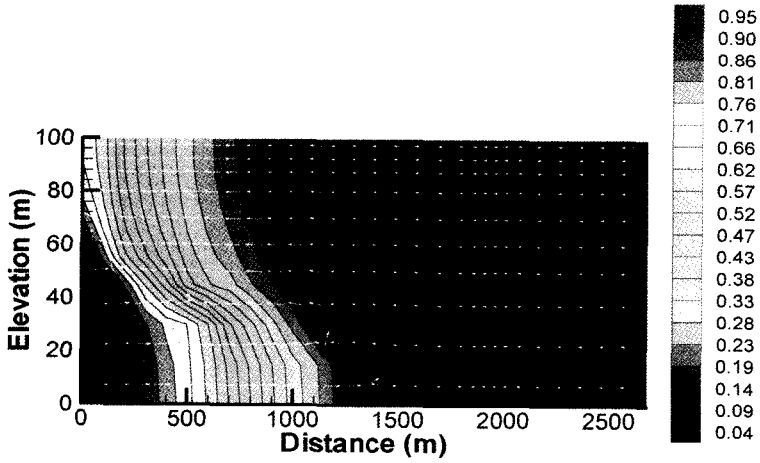

Fig. 7. Relative concentrations and flow directions without pumping ($K_x = K_z = 200$ m/d, $K_y = 20$ m/d, $\alpha_L = 20$ m, $\alpha_T = 10$ m, $h^* = 1.5$ m)

쪽으로 이동되는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 10은 양수하지 않는 경우, Fig. 11은 양수량이 1000 m^3/d인 경우, 그리고 Fig. 12는 2000 m^3/d인 경우에 얻어진 등수두선을 보여준다. 등수두선은 대체로 유사한 형태를 보여준다. 양수정 주위에서 수두강하 현상을 볼 수 있으며, 양수량이 증가함에 따라 수두강하 범위가 확대되어가는 현상을 뚜렷하게 볼 수 있다.

Fig. 13과 Fig. 14에 3차원 등농도분포 및 등수두분포를 표시하였다. 이들 그림으로부터 확산대에서의 농도분포 변화의 입체적 양상과 양수정 부근에서의 수두의 변화를 입체적으로 잘 관찰할 수 있다.

Fig. 15의 그래프는 대수층의 상부경계면을 따라 양수량의 변화에 따라 수두가 변하는 모습을 보여준다. 양수의 증가에 따라 전체적으로 수두가 낮아지고 있음을 보여준다. 양수량이 2000 m^3/d인 경우 해안선으로부터 내륙 쪽으로 약 1000 m 지점까지 수두값이 음의 값을 나타내고 있다. 이는 과잉양수로 인해 동수구배가 역전되어 대수층 상부 유출부에서도 바다쪽에서 육지쪽으로 흐름이 바뀌었음을 나타낸다. Fig. 9의 유동벡터 방향에서도 이 결과를 분명히 볼 수 있다. 따라서 해수침투 피해예방을 위한 양수량 조절의 중요성을 보여주고 있다.

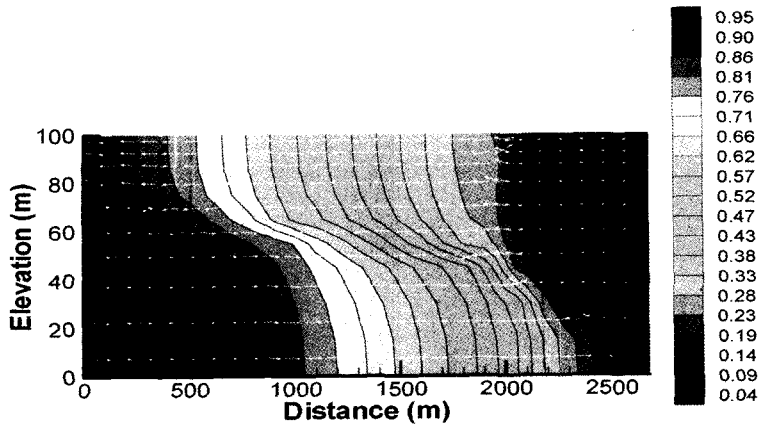

Fig. 8. Relative concentrations and flow directions with pumping ($K_x = K_z = 200$ m/d, $K_y = 20$ m/d, $\alpha_L = 20$ m, $\alpha_T = 10$ m, $h^* = 1.3$ m $Q = 1000$ m^3/day)

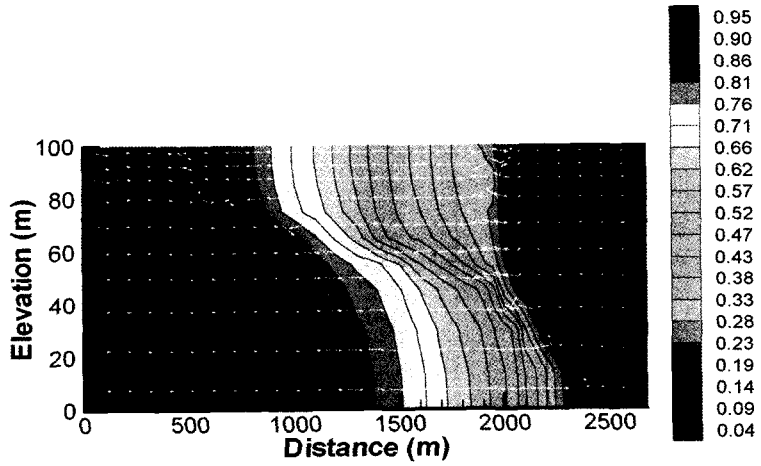

Fig. 9. Relative concentrations and flow directions with pumping ($K_x = K_z = 200$ m/d, $K_y = 20$ m/d, $\alpha_L = 20$ m, $\alpha_T = 10$ m, $h^* = 1.3$ m $Q = 2000$ m^3/day)

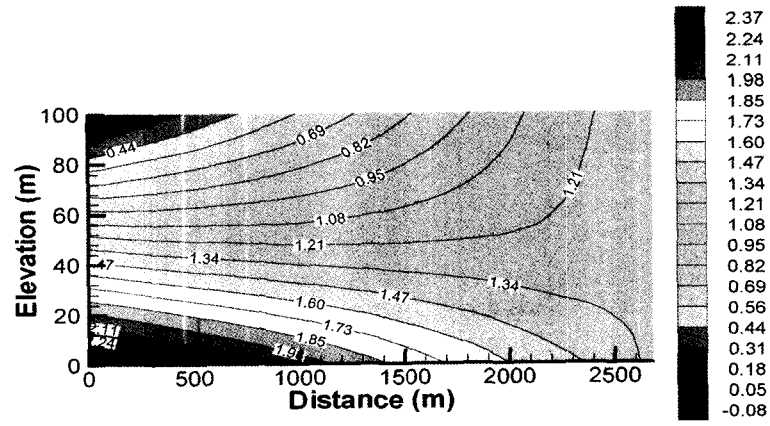

Fig. 10. Distribution of hydraulic head when the well is not pumped.($K_x = K_z = 200$ m/d, $K_y = 20$ m/d, $\alpha_L = 20$ m, $\alpha_T = 10$ m, $h^* = 1.3$ m)

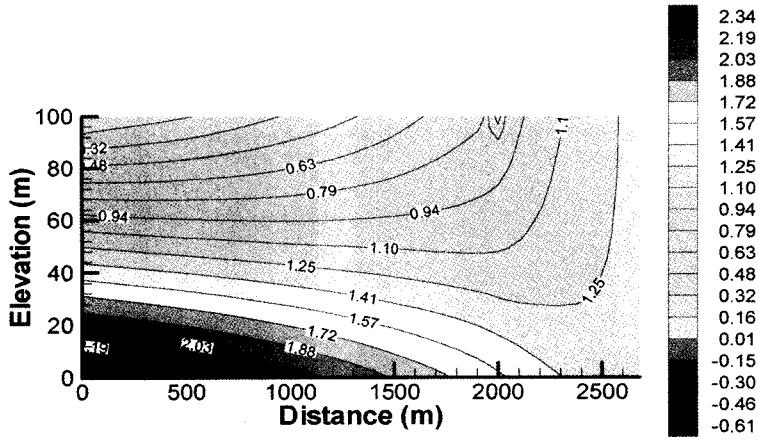

Fig. 11. Distribution of hydraulic head when the well is pumped. ($K_x = K_z = 200$ m/d, $K_y = 20$ m/d, $\alpha_L = 20$ m, $\alpha_T = 10$ m, $h^* = 1.3$ m, $Q = 1000$ m^3/d)

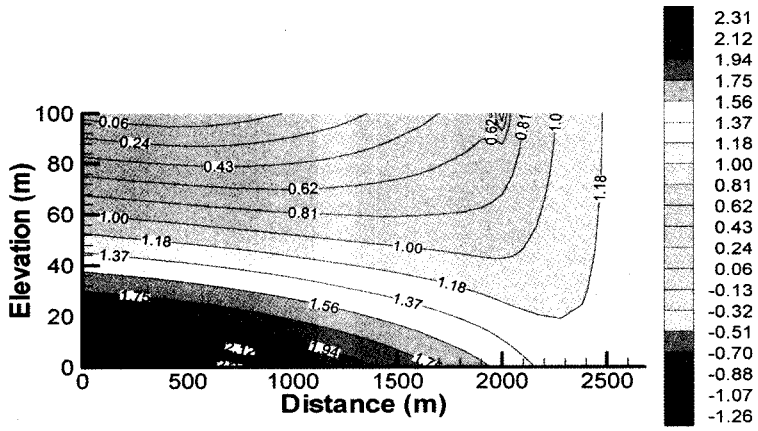

Fig. 12. Distribution of hydraulic head when the well is pumped. ($K_x = K_z = 200$ m/d, $K_y = 20$ m/d, $\alpha_L = 20$ m, $\alpha_T = 10$ m, $h^* = 1.3$ m, $Q = 2000$ m^3/d)

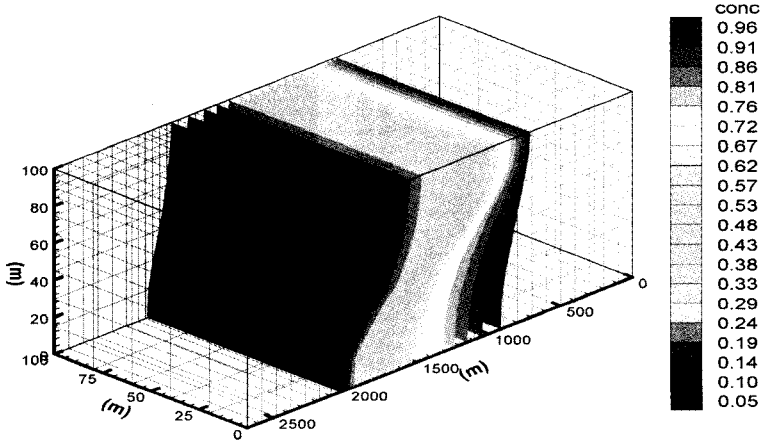

Fig. 13. 3-Dimensional surfaces of relative concentration. ($K_x = K_z = 200$ m/d, $K_y = 20$ m/d, $\alpha_L = 20$ m, $\alpha_T = 10$ m, $h^* = 1.3$m, $Q = 1000$ m^3/day)

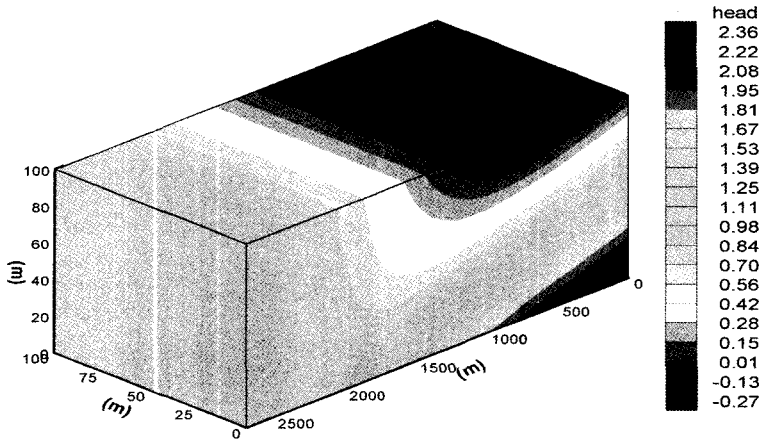

Fig. 14. 3-Dimensional distribution of hydraulic head. ($K_x = K_z = 200$ m/d, $K_y = 20$ m/d, $\alpha_L = 20$ m, $\alpha_T = 10$ m, $h^* = 1.3$ m, $Q = 1000$ m^3/day)

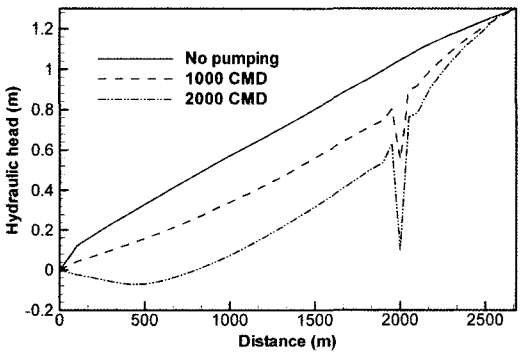

Fig. 15 Variation of hydraulic head along the line through the pumping well on the top of the model. ($K_x = K_z = 200$ m/d, $K_y = 20$ m/d, $\alpha_L = 20$ m, $\alpha_T = 10$ m, $h^* = 1.3$ m)

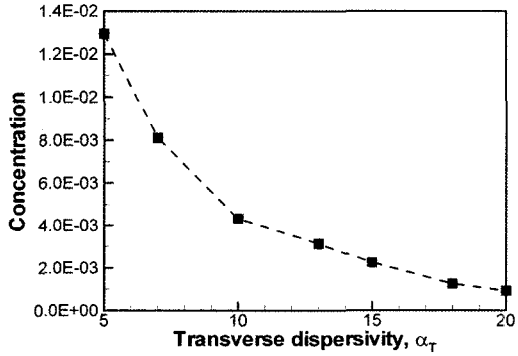

Fig. 16. The sensitivity of relative concentration at the pumping well with the transverse dispersivity (α_T)

3.3.3 분산지수 변화의 영향

횡분산지수(transverse dispersivity, α_T)의 변화가 양수정에서의 농도변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 α_T를 5 m, 7 m, 10 m, 13 m, 15 m, 18 m, 20 m로 변화시키면서 해석을 실시하였다. 기타의 입력자료는 Fig. 8의 경우와 동일한 값을 사용하였다. 해석결과를 Fig. 16에 나타내었다. α_T의 증가에 따라 양수정에서 염도는 감소하고 있음을 보여준다. α_T가 증가하여 종분산지수(α_L)에 가까워지면 분산지수가 등방성인 대수층이 됨을 의미한다. 등방성 분산지수를 보이는 대수층에서는 흐름방향으로의 수리동역학적 확산뿐만 아니라 흐름과 직각방향으로의 해수확산도 증가해 전체적으로 해수가 확산되는 깊이가 줄어들고 있기 때문에 Fig. 16과 같은 결과가 얻어졌다고 판단된다. 따라서 대수층 분산지수의 이방성도 해수침투쐐기의 깊이를 결정하는 중요한 변수임을 보여주고 있다.

4. 결 론

연안 자유면 대수층에 대한 해수침투 특성을 수치해석으로 모델링한 결과 대체로 해수는 해수와 담수의 밀도차에 의해 대수층 하부 쪽에서 유입되어 담수와 섞인 후 상류 쪽의 담지하수에 밀려 해수 쪽 경계 상부를 통해 다시 바다로 유출되는 양상을 보이는 것으로 나타났다. 또한 해수-담수의 경계부에서 확산대의 폭과 확산대의 위치는 Dirichlet 경계조건값, 양수량, 분산지수 등

에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 이는 입력자료를 잘못 선택하는 경우 엉뚱한 결과가 얻어질 수 있음을 의미한다. 따라서 장기적인 현장관측을 통하여 수리지질학적 변수들이 결정되어야 할 것으로 판단되었다. 양수량의 증가는 확산대의 폭을 감소시키는 대신 해수-담수 경계면을 내륙 쪽으로 전진시키는 결과를 가져옴을 알 수 있었다. 이는 해안지방의 해수침투가 과잉양수에서 비롯된 것이라는 추측을 뒷받침한다.

본 연구에서 수행한 해석결과는 수리지질학적 변수들의 적절한 선택이 매우 중요함을 보여주었다. 그러나 현실적으로 해석에 필요한 모든 입력자료를 확보하기 어려운 사정을 고려한다면 수치해석을 통한 수리지질학적 변수들의 민감도 분석을 통하여 해안지방에서의 지하수 양수량 결정 및 지하수 보존대책 수립에 필요한 각종 기초 자료를 어느 정도 확보할 수 있음을 본 연구의 해석결과로부터 알 수 있었다.

사 사

이 논문은 2000년 해양한국발전프로그램의 지원에 의해 연구되었다. 연구비를 지원해준 해양수산부에 감사드린다.

참고문헌

1. 김옥배, 박희열, 1997, 해수침투에 의한 지하수 수질오염 판별을 위한 환경지구화학적 연구, 한국자원공학회지, 34, 548-558.
2. 김천수, 김경수, 배대석, 송승호, 1997, 임해지역 주변에서의 해수침투특성, 지하수환경, 4.2, 61-72.
3. 박남식, 1995, 수리변수들이 대수층 내의 담수 해수 확산대의 형성에 미치는 영향에 대한 정량적 분석, 한국수자원학회지, 28.2, 137-143.
4. 박남식, 이용두, 1997, 중-동 제주 수역의 지하수 개발로 인한 해수침투, J. of the Korean Society of Groundwater Environment, 4.2, 5-13.
5. 서울대학교 기초과학연구원, 1998, 해수침투에 의한 지하수의 염수화가 원소의 거동에 미치는 거동에 미치는 영향 연구.
6. 서울대학교 기초과학연구원, 1999, 해수,담수,지질매체의 상호반응에 관한 수리지질학적-수리지구화학적 연구.
7. 이상호, 1993, 해수의 지하수 침투 예측모형 연구, 한국수자원공사 연구보고서.
8. 이희순, 이명종, 이상규, 이태섭, 서정희, 1995, TEM과 DC 수직탐사자료의 복합역산에 의한 해수침투대 해석, 한국자원공학회지, 32, 462-470.
9. Bear, J. 1979, Hydraulics of groundwater, McGraw-Hill
10. Cruz, J.V. and M.O. Silva, 2000, Groundwater salinization in Pico Island(Azores, Portugal): origin and mechanics, Environmental Geology, 39, 1181-1189.
11. Fetter, C.W., 1994, Applied Hydrogeology(3rd Ed.), Macmillan.
12. Holzbecher, E., 1998, Modeling desity-driven flow in porous media, Springer.
13. IGWMC, 1991, SWICHA - A Three-Dimensional Finite Element Code for Analyzing Seawater Intrusion in Coastal Aquifers.
14. Melloul, A.J. and L.C. Goldenberg, 1997, Monitoring of seawater intrusion in coastal aquifers: Basics and local concerns, J.of Environmental Management, 51, 73-86.
15. Naji, A., A.H.-D. Cheng and D. Quazar, 1998, Analytical stochastic of saltwater/fresh water interface in coastal aquifers, 12, 413-430.
16. Padilla, F., J. Benavente and J. Cruz-Sanjulian, 1997, Numerical simulation of the influence of management alternatives of a projected reservior on a small alluvial aquifer affected by seawater intrusion, Environmental Geology, 33.1, 72-80.
17. Sakr, Sameh A, 1999, Validity of a sharp-interface model in a confined coastal aquifer, Hydrogeology Journal, 7, 155-160.
18. Singh, V.S. and C.P. Gupta, 1999, Groundwater in a coral island, Environmental Geology, 37, 72-77.
19. Strack, O.D.L., 1976, A single-potential solution for regional interface problems in coastal aquifers, Water Resour. Res., 12, 1165-1174.
20. Yakirevich, A., A. Melloul, S. Sorek, S. Shaath and V. Borisov, 1998, Simulation of seawater intrusion into the Khan Yunis area of the Gaza Strip coastal aquifer, Hydrogeology, 6, 549-339.
21. Zhou, x., M. Chen, X. Ju, X. Ning, and J. Wang, 2000, Numerical simulation of sea water intrusion near Beihai, China, Environmental Geology, 40, 223-233.

이 연 규

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 063-469-1864
E-mail: kyoulee@kunsan.ac.kr
현재 군산대학교 해양과학대학 해양응용공학부 조교수

이 희 석

1993년 서울대학교 자원공학과 공학사
1999년 서울대학교 자원공학과 암반공학 공학박사
1999년 8월~2000년 12월 청주대 충북대 군산대 강사
2001년 4월~2003년 4월 스웨덴 Royal Institute of Technology 연구원
2002년 4월~2003년 9월 FRACOM ltd. 연구원
Tel: 02-3700-7229
E-mail: hslee@skec.co.kr
현재 SK 건설 GEO TASK팀, 공학박사