

모래상자 수리모형실험을 통한 경계면 모델의 관정 염도 모의실험

시 퇴¹ · 최 퇴¹ · 이찬종¹ · 홍성훈² · 박남식^{1*}

¹동아대학교 토목공학부, ²낙동강 홍수통제소

Applicability of a Sharp-Interface Model in Simulating Saltwater Contents of a Pumping Well in Coastal Areas

Lei Shi¹, Lei Cui¹, Chan-Jong Lee¹, Sung-Hoon Hong², and Namsik Park^{1*}

¹School of Civil Engineering, Dong-A University

²Nakdong River Flood Control Office

본 연구에서는 해안지역 대수층에서 담수와 해수의 흐름을 개략적으로 모의하는 경계면(sharp-interface)모델이 관정규모의 지하수 흐름 문제에도 적용될 수 있는 지 조사하였다. 해안 지역에서 지하수를 개발할 때 고려해야하는 중요한 인자 중의 하나는 해수침투이다. 관정규모의 지하수흐름 문제에서 해수침투 여부를 평가하기 위해서는 양수관정의 염분도를 모의할 수 있어야한다. 경계면 모델의 양수관정 염도 모의 능력을 검증하기 위하여 소규모 모래상자 수리모형실험을 수행하고 경계면모델의 모의능력을 평가하였다. 여러 가지 실험에서 측정된 관정의 염분도는 0%에서 12%의 범위를 보였으며 모의된 염분도는 측정치를 잘 나타내었다.

주요어 : 모래상자, 염수침투실험, 관정염분도, 경계면수치모델

In this work applicability of a sharp-interface model to well-scale problems is examined. In coastal areas one of the main concerns in groundwater development is saltwater intrusion. To determine the saltwater intrusion at a well one needs to evaluate the saltwater content from a pumping well. We conducted laboratory sand-tank experiments to determine if a sharp-interface model can simulate the saltwater content of a pumping well. Lateral saltwater intrusion experiments and freshwater lens experiments are conducted. A partially penetrating well and a fully penetrating well are used. Comparison between numerical results and observation results indicates that the sharp-interface model can determine saltwater contents reasonably well. We conclude that a sharp-interface model can be applied to well-scale groundwater flow problems in coastal areas.

Key words : sandbox, saltwater-intrusion experiment, salinity, sharp-interface model

서 론

지표수 자원이 빈약한 해안 및 도서 지역에서는 빗물이나 지하수에 의존하는 경우가 많다. 안정적 음용수의 공급을 위하여 해수담수화 시설이 설치되는 경우에도 유지관리비의 부담으로 시설이 가동되지 못하는 경우가 빈번하기 때문에 무분별한 지하수 개발로 인한 해수침투 사례가 보고되는 경우가 있다. 이봉주와 황세호(2008)는 전남 영광 지역의 대수층으로의 조석파의 전달현상을 분석하여 해수

침투 특성을 분석하였으며, 이봉주와 문상호(2008)는 지하화 분석을 통하여 서천-군산 지역의 해수침투 특성을 평가하였다. 조병욱 외(2008)는 포항-홍해 지역의 심부 지하수가 해수침투에 의한 영향을 받았음을 보고하였다. 나춘기와 손창인(2005)는 섬진강 주변의 지하수 수질을 분석하여 약 23% 정도의 관정이 해수침투의 영향을 받았다고 보고하였다.

해안지역에서 지하수를 개발할 때 양수량 분포가 적절하지 못하면 침투하는 해수가 관정에 도달하여 관정을 사용하지 못하게 된다. 해안 지역의 적정 양수량 산정에는

*Corresponding author: nspark@dau.ac.kr

두 가지 어려움이 존재한다. 첫째, 상류의 다른 관정의 영향으로 인하여 하류의 관정이 해수로 오염될 수 있기 때문에 관정별 적정양수량도 유역 개념으로 접근해야한다. 둘째, 주어진 상황에 따라 다르지만 과잉양수로 인한 해수 오염이 발생하는 데 상당한 시간(수 개월에서 수 년 이상)이 소요될 수 있기 때문에 특정 관정에서의 양수량이 지속가능한 지 판단하기 어렵다.

따라서 해안 지역에서는 모의모형과 최적화 기법을 이용하여 관정별 적정개발량을 산정하는 것이 필요하다. 해안 지역의 지하수 흐름은 용질농도 변화에 따라 밀도가 변하는 확산모델(박주현 외, 2008; 박희석 외, 2008)이 가장 적합하다. 확산모델의 약점은 지배방정식의 비선형성이 크고 고해상도의 이산화가 요구되기 때문에 계산에 많은 시간이 요구된다는 것이다. 그런데 최적화기법은 많은 횟수의 모의를 요구하기 때문에 최적설계에 확산 모델을 사용하는 것은 현실적인 어려움이 따른다.

담수와 해수가 서로 섞이지 않는다는 가정을 사용하는 경계면모델(Huyakom 외, 1996; 심병완과 정상용, 2003)은 비선형성이 작고 낮은 해상도의 격자도 사용이 가능하기 때문에 최적화모델에의 적용에 적합하다. 다만 경계면 모델은 광역 지역에서의 해수침투 침투 현상에 대하여 많이 적용되었으나 관정 규모의 문제에 대해서는 그 적용성이 확인되지 못하였다.

본 연구의 목적은 관정 규모의 문제에 대한 경계면 모델의 적용성을 평가하는 데 있다. 이를 위해서는 경계면 모델을 이용하여 관정에서의 염도 모의가 가능해야한다. 본 연구에서는 이를 위한 선행연구로 실험실의 모래상자 수리모형을 이용한 염수침투 실험을 통하여 경계면모델의 관정 양수 시 염분도 모의 능력을 평가하였다.

경계면 지하수 흐름모델

경계면 지하수 모의모델의 지배방정식은 담수와 해수의 흐름에 대한 두 개의 흐름 방정식으로 구성된다 (Bear, 1979).

$$\nabla \cdot (b_f K_f \nabla h_f) = b_f S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} - \theta \frac{\partial \xi}{\partial t} - Q_f \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (b_s K_s \nabla h_s) = b_s S_s \frac{\partial h_s}{\partial t} - \theta \frac{\partial \xi}{\partial t} - Q_s \quad (2)$$

여기서, ∇ 는 경사벡터 연산자, \cdot 는 내적(inner vector product), 아래 첨자 f 와 s 는 담수와 해수를 표기하고, b_f 와 b_s 는 각 각 담수와 해수층의 두께[L], K_f 와 K_s 는 각 각 담수와 해수의 수리전도도[LT⁻¹] 텐서, h_f 와

h_s 는 각 유체의 수두(hydraulic heads), S_f 와 S_s 는 대수층 비저류계수[L⁻¹], θ 는 유효공극률, ξ 는 기준면으로부터 해수-담수 경계면(interface)의 표고[L], Q_f 는 Q_s 는 양수 및 함양 등이 고려되는 각 유체의 체적흐름률[L³T⁻¹]이다. 담수와 해수의 두께는 다음의 관계를 만족한다.

$$b_f + b_s = B \quad (3)$$

여기서, B는 포화층의 두께로 대수층의 상태(즉, 피압 혹은 비피압)에 따라 달라진다. 그리고 해수-담수 경계면의 표고와 각 유체 수두는 다음의 관계가 성립한다.

$$\xi = \frac{\rho_f (\rho_s h_s - h_f)}{\rho_s - \rho_f} = \frac{\rho_s h_s - \rho_f h_f}{\rho_s - \rho_f} \quad (4)$$

여기서, ρ_f 와 ρ_s 는 각 유체의 밀도[MT⁻³]를 나타내며, 식 (4)는 해수-담수 경계면에서 압력은 연속임을 의미한다.

지하수 관정에서 총 양수량 Q_t 가 양수될 때 양수되는 물의 종류는 여러 가지 인자에 의하여 결정되는데 양수가 과다하면 관정에 해수가 유입되어 담수와 해수의 혼합 물이 양수된다. 여기서는 양수되는 해수와 담수의 비율이 관정의 스크린 구간에서 각 유체의 투수량계수에 의하여 결정된다고 가정하였다. 그러면 각 유체의 양수량은 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$Q_f = \left(\frac{K_f L_f}{K_f L_f + K_s L_s} \right) Q_t \quad (5)$$

$$Q_s = \left(\frac{K_s L_s}{K_f L_f + K_s L_s} \right) Q_t \quad (6)$$

$$L = L_f + L_s \quad (7)$$

여기서, L은 관정 스크린의 총 길이[L], L_f 는 관정 스크린 상단에서 해수-담수 경계면까지의 길이[L], L_s 는 해수-담수 경계면 표고에서 관정 스크린 바닥까지의 거리이다. 그러면 양수 관정에서의 염분도는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$c_w = \frac{c_f Q_f + c_s Q_s}{Q_t} \quad (8)$$

여기서, c_f 와 c_s 는 각 각 담수와 염수의 염분 농도이다.

본 연구에서는 상술된 지배방정식을 유한요소법으로 이산화한 수치모델(Huyakom 외, 1996)을 이용하였다. 본 수치모델은 해석해가 알려진 다양한 경우에 대하여 검증되었으며 실제 광역 유역의 해수침투 문제에 대하여 적용된 바 있다 (Park 외, 1993).

실험실 모래수조 수리모형

경계면 모델의 양수정 염도 모의 능력을 평가하기 위하여 실험실에서 아크릴로 제작한 모래상자를 이용하여 모델 실험을 수행하였다. 실험실 모래상자 (Fig. 1)는 직육각형 형태로 길이는 43 cm, 높이는 30 cm 그리고 폭은 7.8 cm 이다. 모래 상자의 양쪽 끝에는 수위를 일정하게 유지할 수 있는 수조가 있으며 모래상자와는 스크린으로 분리되어 있다. 담수와 염수를 각 각의 수조에서 공급하면 측방 해수 침투 실험(lateral saltwater intrusion)을, 두 수조에서 염수를, 위해서 공급하면 소규모 도서에서 나타나는 담수렌즈 (freshwater lens) 실험을 수행할 수 있다.

양수실험을 위하여 내경 5 mm (외경 8 mm)의 유공 아크릴 관을 사용하였다. 실험에서는 스크린의 길이가

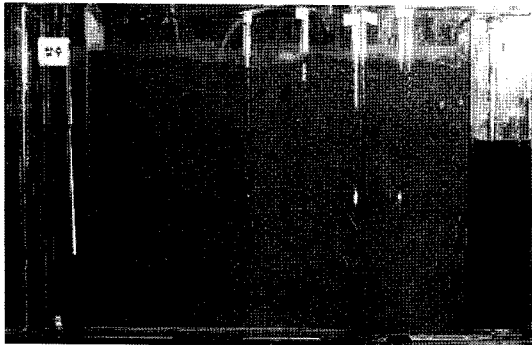


Fig. 1. experimental sand tank.

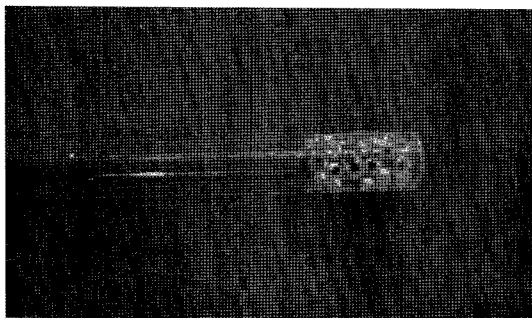


Fig. 2. Screen section of a partially-penetrating pumping well.

15 mm인 부분관통정 (Fig. 2)와 200 mm인 완전관통정 두 가지 관정을 이용하였다. 관정 내부로 모래의 유입을 방지하기 위하여 스크린 부에 철망을 삽입하였다.

수리모형의 수조가 작기 때문에 양수량도 상대적으로 작다. 양수량의 정밀도를 유지하기 위하여 peristaltic 펌프를 사용하였다 (Fig. 3). 펌프의 사양은 Table 1과 같다.

본 연구에서는 모래상자의 크기와 두 수조의 수위 차 조절의 정확도 등을 고려하여 실험에 사용할 염수의 비중을 1.04로 결정하였다. 보통 해수의 평균 비중이 1.025임을 고려하면 해수보다 비중이 약간 크다. 염수는 일반 소금을 수돗물에 용해시켜 제작하였다. 담수와 해수를 시각적으로 구분하기 위하여 모래 또는 아크릴에 착색 되지 않는 적조 염료를 사용하였다. 염분도는 Table 2의 사양을 가지는 간이 EC계로 측정되었다.

실험에 사용된 염수의 염분도는 46,300 ppm이며 모래 층을 통과한 수돗물의 염분도는 115 ppm이다.

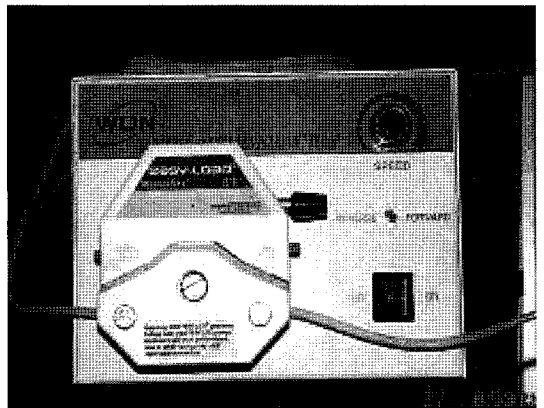


Fig. 3. Peristaltic pump.

Table 1. Specification of peristaltic pump.

| Pump driver | Tube | Ranges of pumping rate (ml/min) | |
|-------------|------|---------------------------------|-------------|
| | | #13 tube | #14 tube |
| BS-60101 | | 0.06 ~ 6.0 | 0.21 ~ 21.0 |
| BS-60601 | | 0.36 ~ 36.0 | 1.3 ~ 130.0 |

Table 2. Specifications of WP-84.

| | Cable type | Ranges | Resolution | Accuracy |
|--------------|------------|--------------|------------|------------------------------|
| Conductivity | k = 1.0 | 0~200 mS/cm | 0.1 mS/cm | ± 0.5% of full scale at 25°C |
| | k = 10.0 | 0~2000 mS/cm | 1.0 mS/cm | |
| Salinity | k = 1.0 | 0~50.0 ppK | 0.1 ppK | |
| | k = 10.0 | 0~500.0 ppK | 1.0 ppK | |
| Temperature | | -10~120.0°C | 0.1°C | ± 0.2% |

모래층의 투수계수를 평가하기 위하여 담수만으로 예비실험을 수행하였다. 두 수조의 수위가 12 mm가 차이나도록 채운 후 흐름이 정상상태에 도달한 후 유출량을 측정하였다. 자유면대수층에서의 수두가 일정한 두 지점 사이의 정상상태 흐름은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{2QL}{W(H_1^2 - H_2^2)} \quad (9)$$

여기서 는 모래층의 폭이며 $H_1 = 192 \text{ mm}$, $H_2 = 180 \text{ mm}$, 3회의 실험에서 측정된 $Q = 0.638 \sim 0.643 \text{ ml/s}$ 의 범위에 있다. 실험결과 투수계수는 $1.58 \sim 1.59 \text{ mm/s}$ 으로 산정되었다. 수치실험에서는 평균 투수계수를 사용하였다.

경계면 수치모델의 염도모의 능력 검증

수리모형내 흐름을 모의하기 위하여 모래층을 그림 격자망을 Fig. 4와 같이 구성하였다. 이 격자망은 x축 방향으로 1 cm 간격으로 일정한 격자로 되어있고 z축 방향으로는 마지막 격자의 간격(0.8 cm)을 제외하고 x축과 마찬가지로 1 cm의 간격의 격자로 구성되어 있다. 격자망은 총 396개의 절점(node)과 344개의 요소(element)로 구성된다.

본 연구에서는 경계면 모델의 다양한 지하수 흐름에 대한 적용성을 평가하기 위하여 측면 침투와 상승추(upconing) 현상이 지배적인 담수렌즈 흐름 실험을 수행하였다.

측면침투 실험

측면침투 실험을 위하여 오른쪽 수조에 염수를 180 mm 높이로 채우고 왼쪽 수조에는 염수면보다 12 mm 높게 담수를 유지하였다 (Fig. 1). 관정이 없는 상태에서 정상상태에 도달한 염수췘기의 길이는 15.9 cm로 나타났다.

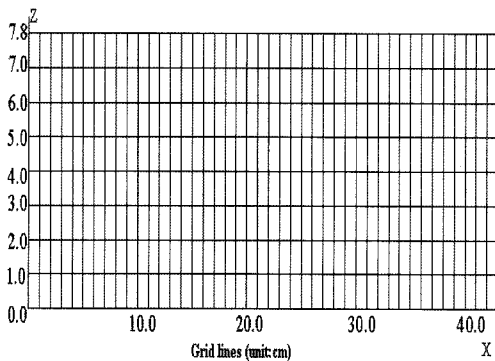


Fig. 4. Finite element grids designed in the numerical model Boundary conditions as mentioned above → Finite element grid for the sand tank.

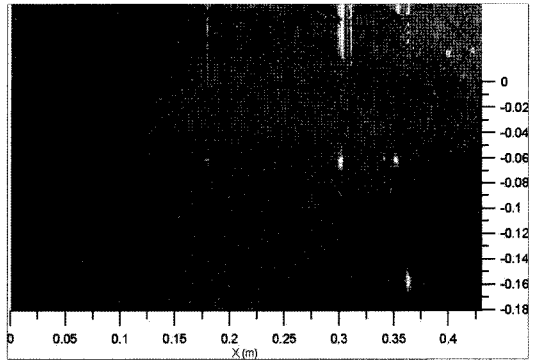


Fig. 5. Interface positions: observed and numerical for the partial-penetrating well case.

양수 실험을 위하여 두 개의 관정을 설치하였다. 스크린의 길이가 1.5 cm인 부분관통정의 설치위치의 좌표는 (30,0), 완전관통정의 설치 위치의 좌표는 (23,0)이다. 두 관정 모두 해수췘기에 미치는 영향을 쉽게 관찰하기 위하여 아크릴 면에 접하여 설치되었다 ($y = 0$). 부분관통정의 설치 심도는 염수면 기준 8 cm이다. 관정에 3가지 양수량을 적용하였다. 부분관통정의 경우 6.3, 7.0, 그리고 8.3 ml/min으로, 완전관통정의 경우에는 5.2, 8.8 그리고 14.0 ml/min 이다. 모든 양수량은 염수가 관정을 오염시키도록 결정하였다.

Fig. 5에는 부분관통정에서 7.0 ml/min으로 양수를 시행한 경우의 염수췘기에 대한 실험결과와 계산결과를 도시하였다. 경계면모델에서 연직방향 흐름이 무시되었기 때문에 upconing의 세부 형태에 차이가 있기는 하나 염수췘기의 전반적인 형태는 잘 나타내고 있다.

각 실험 경우에 대하여 측정된 관정에서의 염도와 계산결과를 Table 3에 제시하였다. 측정된 염도는 약 1%에서 12%의 범위를 보인다. 경계면 모델에서 예측한 결과에는 오차가 포함되어 있으나 측정된 값과 유사한 분포를 보인다

담수렌즈 실험

소규모 도서에서 발생할 수 있는 담수 렌즈에 대한 실험을 수행하였다. 담수렌즈의 형성을 위하여 두 수조 모두에서 염수를 일정 수위(18.2 cm)로 유지하고 모래상자 중앙 상부에서 담수를 6 ml/min의 비율로 함양하였다. 양수가 없는 상태에서 평형상태에 도달한 담수렌즈는 모래상자 중심부에서 염수위 기준 최고 8.7 cm 심도로 형성되었다 (Fig. 6).

담수 양수 실험을 위하여 좌측의 염수조로부터 12 cm 위

Table 3. Saltwater contents of pumping wells.

| Pumping well | Pumping Rate (ml/min) | Saltwater Contents of Pumping Wells (%) | |
|----------------------------|-----------------------|---|------------|
| | | Observation | Simulation |
| partially penetrating well | 6.3 | 2.63 | 2.29 |
| | 7.0 | 5.62 | 5.58 |
| | 8.3 | 10.53 | 10.26 |
| fully penetrating well | 5.2 | 1.05 | 2.91 |
| | 8.8 | 5.26 | 5.94 |
| | 14.0 | 11.84 | 9.68 |

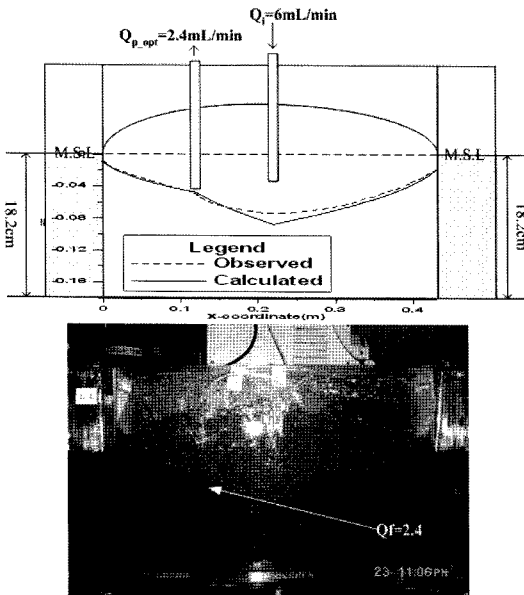


Fig. 6. Freshwater lens experiment.

치에 부분관통정을 설치하였다. 설치심도는 염수위 기준 3.5이다. 분당 2.4와 3.5 ml의 두 양수량에 대하여 실험을 수행하였다. Fig. 6에 분당 2.4ml 양수 경우에 대한 관측된 경계면과 모의된 경계면을 도시하였다. 관측된 경계면과 계산된 경계면은 대체로 잘 일치한다. 양수된 담수의 염도는 115 ppm으로 염수가 관정에 도달하지 않은 것으로 측정되었으며 계산결과도 동일하게 나타났다.

동 관정에서 3.5 ml로 양수할 때는 염수가 관정을 오염시키는 것으로 측정되었다. 양수량 중 염수의 비율은 3.4%로 측정되었으며 경계면 모델의 계산결과는 4.25%로 나타났다. 여기서도 계산된 염수비율이 적절히 평가되고 있다.

본 연구에서 수행한 총 8회의 실험과 수치모델에서 나타난 염수 비율을 종합하여 Fig. 7에 도시하였다. 종축에는 수치결과를 횡축에는 측정결과를 나타내었다. 모든

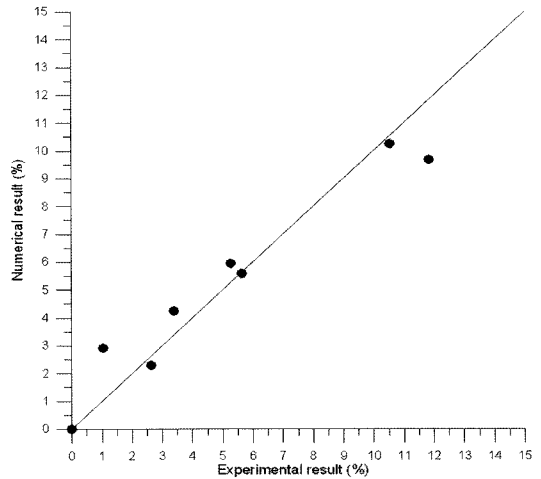


Fig. 7. Comparison of saltwater contents for all experiments.

자료가 45° 직선 인근에 분포하고 있어 경계면 모델로 계산한 양수관정의 염수비율이 측정자료와 잘 일치한다고 할 수 있다.

토의 및 결론

본 연구에서는 경계면 모델을 이용하여 해안지역의 과잉 양수정에서 해수가 양수되는 비율의 개략 산정 방법의 적용성을 실험실 모래상자 수리모형 실험을 통하여 검토하였다. 모형실험에서는 염수의 측방침투와 담수렌즈에서의 상승추 현상을 다루었다. 경계면 수치모델의 계산결과와 수리모형실험의 측정결과는 비교적 잘 일치하였다. 그러나 본 연구에서는 소규모 모래상자에서 제한된 회수의 실험만이 수행되었으므로 경계면 모델과 양수정 해수비율 측정방법이 실제 해안지역의 관정규모의 문제에도 적용될 수 있다는 것을 의미하지는 않지만 적용 가능성을 보였다고 할 수 있다. 이는 경계면 모델이 이미 적용성이 입증된 광역 해안지역의 흐름 뿐 아니라 관정

단위의 작은 규모의 문제에도 적용될 수 있는 가능성을 보여주는 것으로 해안지역 지하수 흐름 모델링 및 최적화 등을 이용한 고도 관리의 가능성을 열어 주는 것이다. 현재 본 연구진에서는 경계면 모델의 적용성을 확대하기 위하여 현장 규모의 문제에서 양수관정의 해수비율을 개략 산정하는 방법과 관측정의 염도를 개략 평가하는 방법에 대한 연구를 진행하고 있다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 3-3-3)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 나춘기, 손창인, 2008, 섬진강 주변 지하수의 수질 및 오염특성: 오염원 및 유해성 평가, 대한자원환경지질학회지, 38(3), 261-272.
- 박주현, 김중휘, 김한태, 김준모, 2008, 한국 부안 지역 해안 대수층 내의 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 단층 존재의 영향 삼차원 수치 모의, 한국지하수토양환경학회지, 13(5) 33-46.
- 박화석, 김중휘, 염병우, 김준모, 2008, 해수 침투에 대한 층상 불균질성 및 지하수 양수 방식의 영향 삼차원 수치 모의, 한국지하수토양환경학회지, 13(4) 8-21.
- 심병완, 정상용, 2008, SHARP 모델을 이용한 해안 대수층의 해수침투 경계면 추정, 한국지하수토양환경학회지, 8(1) 68-74.
- 이봉주, 분상호, 2008, 시계열 및 요인분석을 이용한 해수침투 특성 평가: 서천-군산 지역, 대한지질학회지, 44(2) 219-232.
- 이봉주, 황세호, 2008, 지하수위 변동 특성에 근거한 해수침투 특성 평가: 영광 백수지역, 대한지질학회지, 44(2) 233-240.
- 조병욱, 윤욱, 송운호, 2008, 양수시험에 의한 포항 흥해 지역 심부지열수의 수리지화학적 규명, 한국지하수토양환경학회지, 11(3) 20-30.
- Bear, J., "Hydraulics of Groundwater", 1979, McGraw-Hill Companies.
- Huyakorn, P.S., Y.S. Wu, and N.S. Park, 1996, Multiphase approach to the numerical solution of a sharp interface saltwater intrusion problem, WATER RESOURCES RESEARCH, 32(1) 93-102.
- Park, N.S., P. S. Huyakorn, Y. S. Wu, and M. D. Barcelo, 1993, A sharp-interface saltwater intrusion code for layered aquifer systems, Proceedings of ASCE International Symposium on Engineering Hydrology, pp 1159-1164, San Francisco, USA.

2008년 11월 21일 원고접수, 2009년 3월 19일 게재승인

시 료

동아대학교 토목공학부
부산광역시 사하구 하단 2동 840번지 604-714
Tel: 051-200-5743
Fax: 051-205-5187
E-mail: triloving@hotmail.com

최 료

동아대학교 토목공학부
부산광역시 사하구 하단 2동 840번지 604-714
Tel: 051-200-5743
Fax: 051-205-5187
E-mail: dazzle_linsong@msn.com

이찬중

동아대학교 토목공학부
부산광역시 사하구 하단 2동 840번지 604-714
Tel: 051-200-5743
Fax: 051-205-5187
E-mail: hbssses@hanmail.net

홍성훈

낙동강 홍수통제소
부산광역시 사하구 하단동 낙동남로 156번지 (하단동 1149번지)
Tel: 051-205-6341
E-mail: wghsh72@paran.com

박남식

동아대학교 토목공학부
부산광역시 사하구 하단 2동 840번지 604-714
Tel: 051-200-7629
Fax: 051-201-1419
E-mail: nspark@dau.ac.kr