

# 해안지역 지하수자원 확충을 위한 우기 인공주입정의 최적설계

## Design of Optimal Wet-Season Injection Well for Augmenting Groundwater Resources in Coastal Areas

박 남 식\* / 시 례\*\* / 최 례\*\*\* / 이 찬 종\*\*\*\* / 문 유 리\*\*\*\*\*  
Park, Namsik / Shi, Lei / Cui, Lei / Lee, Chanjong / Mun, Yuri

### Abstract

Artificial injection of surplus surface water during wet seasons and recovery is one of possible solutions for conjunctive uses of surface water and groundwater. The methodology is especially attractive for regions of monsoon type weather. In this work a simulation-optimization model is developed to identify an optimal injection system to sustain an over-exploiting freshwater pumping well. The injection well is to be operated during wet seasons only while the pumping well is to be operated throughout an entire year. The objective function is the minimization of injected volume of freshwater. Saltwater intrusion and dry wells are considered as constraints. An example application is made on a small hypothetical island with poor hydrogeologic conditions. The optimization model is successful in determining optimal injection locations and rates for various cases.

**keywords** : conjunctive use of groundwater and surface water, injection during wet seasons, sustainable over exploitation

### 요 지

대수층 바닥이 해수면보다 낮은 해안 지역에서는 관정에서의 적정양수량이 해수침투 여부에 의하여 결정될 수 있다. 이러한 지역에서 관정의 적정 양수량을 초과하는 수요를 만족시키기 위하여 과잉양수를 시행해야하면 우기의 잉여 지표수를 대수층에 주입함으로써 과잉 양수정을 연중 보호할 수 있다. 본 연구에서는 최소의 주입으로 과잉 양수정을 보호할 수 있는 주입정의 위치와 우기의 주입량을 계산하는 전산모델을 개발하였다. 경계면모델과 최적화방법을 조합하여 개발된 수치모델에서 목적함수는 주입량의 최소화이며 제약조건으로 해수침투와 지하수 고갈을 고려하였다. 상태변수는 과잉양수량, 설계연한, 우기 기간, 그리고 양수정에서의 해수비율이다. 지하수 개발이 어려운 수리지질 특성을 가진 소규모 가상 도서에 대하여 본 기술의 적용성과 지하수 추가 개발의 가능성을 평가하였다. 적용결과 다양한 조건에서도 적정개발량을 초과하는 지하수 관정을 보호할 수 있는 주입정의 가동이 가능한 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 지표수-지하수 연계활용, 우기 지하수 주입, 지속가능 과잉양수

\* 교신저자, 동아대학교 공과대학 토목공학과 교수  
Corresponding Author, Full professor Dong-A University, 840 Hadan2-dong, Saha-gu, Busan 604-714, Korea (e-mail: nspark@dau.ac.kr)  
\*\* 동아대학교 공과대학 토목공학과 박사수료  
Ph.D. Student, Dong-A University, 840 Hadan2-dong, Saha-gu, Busan 604-714, Korea  
\*\*\* 동아대학교 공과대학 토목공학과 박사과정  
Ph.D. Student, Dong-A University, 840 Hadan2-dong, Saha-gu, Busan 604-714, Korea  
\*\*\*\* 동아대학교 공과대학 토목공학과 석사수료  
MS. Student, Dong-A University, 840 Hadan2-dong, Saha-gu, Busan 604-714, Korea  
\*\*\*\*\* 한국환경정책평가연구원 통합환경연구본부 전략평가연구실 책임연구원  
Associate Research Fellow, Division of Strategic Assessment, Integrated Environmental Research Group, Korea Environment Institute, 290 Jinheungno, Eunpyeong-gu, Seoul

## 1. 서론

2008년 가을부터 계속된 가뭄으로 강원도 및 서남해안 지역에 그 피해가 극심하였다 (환경부, 2009). 특히 지표수자원의 발달이 빈약하고 기반시설이 열악한 도서 지역에서는 그 피해가 더욱 심각하였다. 7개 특, 광역시와 해안을 접하고 있지 않는 충청북도를 제외한 8개도 내에 21개 시, 29개 군 그리고 322개 읍, 면이 해안선을 포함하고 있으며, 상기 지역의 총 인구는 약 250만 명이다. 환경부에서는 섬의 식수 공급을 위하여 10여 년 전부터 지속적으로 도서지역 식수원개발사업을 수행하였으나 수해 도서는 전체 500여개에 달하는 유인도 중 일부에 그친다 (환경부, 2005). 그런데 소규모 도서의 경우 설치된 시설이 대부분 해수담수화 시설이다. 2003년 말 현재 전국에서 시설총량 2,980m<sup>3</sup>/일로 47개소의 해수담수화 시설이 13,000명의 급수를 담당하고 있다 (환경부, 2005). 그런데 해수담수화 시설의 비싼 유지관리비 또는 관리 전문 인력의 부재로 시설이 활용되지 않는 경우가 빈번하다. 게다가 담수화시설이 환경친화적이지 않다는 주장도 있다. 세계야생기금(WWF)은 담수화에 많은 에너지가 필요하며 이로 인하여 배출되는 온실가스가 결과적으로 담수공급을 더욱 줄이고 담수화 과정에서 발생하는 고염도 폐수가 해양생물과 생태계에도 악영향을 끼친다고 주장하였다(인터넷 중앙일보, 2007).

지표수의 대수층 인공주입은 지표수자원의 시공간적 편중성을 환경친화적으로 완화시킬 수 있는 방법이다. 호주, 유럽, 중동 그리고 미국 등에서 다수의 인공주입 및 회수 프로젝트가 수행되고 있다 (Bloetscher *et al.*, 2005). 2005년 현재 미국 내에 총 72 개소에서 대수층 저장 및 회수 (ASR) 시스템이 가동되고 있다 (National Research Council, 2008). Hercezeg *et al.*(2004)은 남 호주 석회암 지대의 피압 탄산염 대수층에서 5년 동안 인공주입 및 회수 시험을 시행하고 지화학반응에 대한 연구를 수행하였다. 5년간 약 250,000m<sup>3</sup> 정도의 강수기원의 유기물질을 함유한 지표수를 대수층으로 주입하였다. 주입수의 총 용존 고형물 농도는 150mg/L이며 대수층의 지하수의 농도는 2,400mg/L로 기수의 특성을 띄고 있다. 주입정의 반경 25m 내의 주요 지화학반응은 탄산염의 용해, 황화물의 산화로 조사되었다. 주입수의 회수 시험을 위하여 시험 개시 5년 째 약 150,000m<sup>3</sup> 정도의 물을 양수하였다. 양수 시에는 지화학반응이 거의 일어나지 않았다고 보고하였다.

Lowry와 Anderson (2006)은 수치모델링을 이용하여 인공 주입 및 회수 시스템의 회수 효율을 분석하였다.

입자추적방법 (particle-tracking method)과 용질 이류-확산방법 (solute advection-and-dispersion method)을 가상 문제들에 대하여 적용한 결과 입자추적방법이 후자 보다 회수효율을 최대 30%까지 과대평가할 수 있다고 조사하였다. 이들은 회수한계로 주입수의 비율이 75%와 50%인 두 가지 경우에 대하여 분석하였는데 두 가지 경우 공히 확산지수가 증가하면 회수율이 감소한다고 보고하였다. Ward *et al.*(2008)은 수치모델을 이용하여 투수계수의 이방성이 회수율에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 주입수의 비중이 대수층의 지하수의 비중과 다른 경우 밀도변화를 무시하면 회수율은 이방성에 무관한 것으로 나타났지만 밀도변화를 고려하면 약간의 밀도 차이가 있는 경우에도 이방성이 회수율에 큰 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 그들은 연직투수 계수가 작으면 부력효과가 감소하기 때문에 회수율이 높아진다고 보고하였다. Weeks (2002)는 인공주입 및 회수 분야에서 미 지질조사소의 역할에 대하여 조사하였다. Weeks는 미국에서 지하수 수자원의 보충을 위한 인공주입은 1930년대에 뉴욕과 캘리포니아주를 중심으로 시작되었다고 보고하였다. Khan (2008)은 호주 New South Wales에 있는 Murrumbidgee Region의 가뭄피해를 저감시키기 위하여 지하수 인공주입 및 회수에 대한 기술적 경제적 잠재력을 조사하였다. 그는 지하수 인공주입의 장점으로 건기에 지하수를 공급하고, 저하된 지하수위를 상승시키며, 지표수 저장에 비하여 증발산 손실이 적다고 보고하였다. 침투를 통한 지하수 인공주입의 편익/비용 비율은 약 3에서 7에 이른다고 보고하였다. Goyal *et al.*(2008)은 고 염도 지하수가 존재하는 시험현장에서 5회의 인공주입/회수 사이클에 대한 실험을 통하여 저장기간 (2.5일에서 70일까지)과 완충체적 (2,000에서 14,000m<sup>3</sup>)의 효과에 대하여 조사하였다. Pitman (2008)은 남 호주 Adelaide에서 시행한 인공주입 및 회수 시험에서 대수층 체류시간 증가로 얻어지는 자연정화효과를 위하여 주입정과 회수정을 별도로 운영한 바 있다.

우리나라 대부분 지역의 대수층의 규모와 투수성 등의 수리지질 특성이 대규모 지하수 개발에는 불리하다. 그러나 대부분의 해안 및 도서 지역에서 물수요가 크지 않기 때문에 인공주입 기법이 활용될 수 있다. 또한 건기와 우기와 뚜렷한 국내의 기상조건에서 인공주입방법은 녹색댐으로 일컬어지는 대수층의 활용도를 높이는 데 적합하다.

인공주입 방법은 건기에 부작용이 없이 지하수 수요를 만족시킬 수 있도록 우기에 담수를 대수층으로 주입하는 것을 말한다. 여기서 부작용이라 함은 인접한

해수로 인한 지하수 양수정의 오염, 담수의 과잉 양수로 인한 관정의 지하수 고갈 등을 들 수 있다. 인공주입 방법의 핵심은 어디서 얼마만큼의 담수를 대수층에 주입하느냐이다. 따라서 본 연구에서는 필요한 지하수 수요를 만족시키는데 필요한 주입정의 위치와 최소 주입량을 탐색하기 위한 기술을 개발하였다. 지하수 개발에 불리한 수리지질 특성을 가진 가상도서의 해안에 설치된 양수관정에 대하여 전산모델을 적용하고 우리나라의 인공주입을 통한 지하수 자원 확충 가능성을 조사하였다.

유전자 알고리즘은 자연세계의 진화과정에 기초한 계산 모델로서 John Holland에 의해서 1975년에 개발된 전역적(global)인 최적화 알고리즘이다(Goldberg, 1997). 유전자 알고리즘은 자연 선택의 원리와 자연계의 생물 유전학에 기본 이론을 두며 병렬적이고 전역적 탐색 알고리즘으로서, 모든 생물은 주어진 다양한 환경에 적응함으로써 살아남는다는 Darwin의 적자생존의 이론을 기본 개념으로 한다. 유전자 알고리즘은 풀고자 하는 문제에 대한 가능한 해들을 정해진 형태의 자료 구조로 표현한 다음 이들을 점차적으로 변형(진화)시킴으로써 더 나은 해를 찾아가는 유사진화형의 탐색 알고리즘이다.

자연계의 모든 생물들은 유전인자인 염색체에 의해서 생식과 유전 등 진화과정을 반복하여 발전해 간다. 유전자 알고리즘에서는 생물학적 유전인자인 염색체에 해당하는 문자열(일반적으로 이진수의 조합)을 가지고 생물과 같은 재생산(reproduction), 교배(cross over), 돌연변이(mutation) 등을 통하여 부모세대(parent generation)로부터 다음 세대의 자손을 인공적으로 만들어 낸다. 즉, 생물유전을 모방한 연산자들을 인공 염색체에 반복적으로 적용하여 최적 해를 탐색한다.

후보 해들의 고정된 크기 모집단을 반복적으로 처리하며 각 후보 해는 생물학적 체계에서 유추한 염색체라 불리는 고정된 크기의 문자열에 의해 표현된다. 각 염색체는 목적 함수에 의해 평가된 적합도 값을 가지며, 한 염색체의 적합도는 그들이 생존하고 자식을 생산할 수 있는 능력을 결정한다. 즉, 우수한 적합도를 갖는 개체는 살아남아 자손을 만들 수 있지만 그렇지 못한 개체는 도태된다. 각 염색체는 일련의 유전자로 구성되어 있으며, 일반적으로 유한한 수의 비트(bit)들로 표현되지만 정수나 실수들도 사용될 수 있다. 유전자 방법과 같은 진화적방법은 국부 극치들이 존재하는 문제에서도 초기가정에 관계없이 전역극치에 가까운 해를 찾아 낼 수 있다는 것이 도함수에 기반을 둔 방법과의 근본적 차이점이다(Goldberg, 1997).

최근에는 지하수 최적개발 문제를 다루기 위한 연구에서 유전자 기법이 빈번히 사용되었다(Cheng, *et al.* (2000); Park and Aral (2004); Ayvaz and Karahan (2008); Mantoglou *et al.* (2004); Katsifarakis and Petala (2006), 박남식 등, 2003).

## 2. 최소 주입량 평가를 위한 최적화 문제

### 2.1 목적함수

관정의 적정개발량을 초과하는 물 수요를 만족시키는 주입시스템의 설치 및 운영비용은 주입량에 비례한다고 가정하였다. 그러면 최적 설계의 목적함수는 주입량의 최소화가 될 수 있다.

$$\text{minimize } \int_0^T Q_{i,f} dt \quad (1)$$

여기서  $Q_{i,f}$ 는 우기에 가동되는 주입정에서의 담수 주입량,  $T$ 는 주입시스템의 목표 가동기간이다. 위의 목적함수는 목표 가동기간 동안의 담수 주입량을 최소화함으로써 관련 비용을 최소화하는 것을 목표로 한다. 주입량을 결정하는데 영향을 미치는 제약조건들은 다음과 같다:

- 지하수위 강하로 인한 양수정 지하수고갈 방지
- 양수정으로의 해수침투오염 방지

상기 목적함수와 제약 조건들은 다음의 스칼라 목적함수로 변환될 수 있다.

$$\text{minimize } \int_0^T dt (Q_{i,f} + w_1 Q_{p,f} + w_2 Q_{p,s}) \quad (2)$$

여기서  $Q_{p,f}$ 는 수위 저하로 인하여 지하수가 고갈된 양수정에서 공급에 실패한 담수 양수량,  $Q_{p,s}$ 는 해수침투로 인하여 오염된 담수 양수정에서의 해수 양수량,  $w_1$ 과  $w_2$ 는 각각 지하수 고갈과 해수 오염에 대한 벌칙 가중치이다. 가중치를 주입량의 규모에 비하여 크게 하면 제약조건을 위배하지 않는 범위 내에서 최소 주입량을 탐지할 수 있다.

상기 목적함수의 최적값은 여러 변수들에 의하여 변화되지만 본 연구에서는 다음을 결정변수로 선정하였다.

- 주입정의 위치
- 주입량

인공 주입 시스템의 개념은 Fig. 1로 설명될 수 있다. 그림에 도시된 상황은 시스템 가동 전에는 양수정에서

적정 양수량으로 지하수가 개발되고 있다가 어느 시점에 발생한 추가 수요를 연중 균일하게 충족시키기 위하여 과잉 양수와 인공주입 시스템을 동시에 가동하는 경우이다. 잉여 지표수는 우기에 확보되므로 주입은 우기에만 이루어진다.

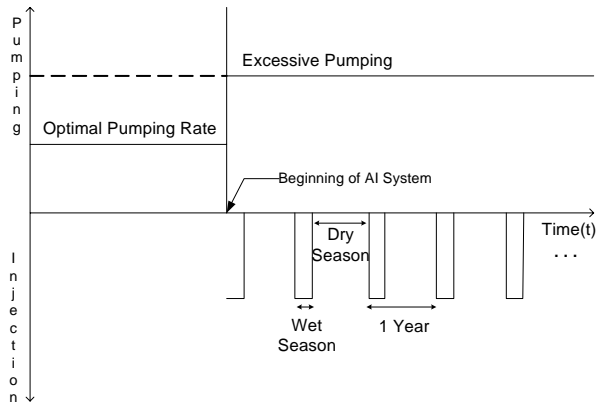


Fig. 1. Schematic Diagram for Pumping and Injection Scenario

## 2.2 최적 전산모델

전술된 목적함수를 계산하기 위해서는 양수와 주입에 대한 지하수계의 반응을 모의할 수 있어야 한다. 해안지역이라는 특성을 반영할 수 있는 밀도류 모델의 사용이 필요하다. 경계면 모델은 담수와 해수 사이에 선명한 경계면(sharp interface)이 존재한다는 가정 아래 지하수 흐름을 모의하는 모형이다(Bear, 1979). 경계면 모형은 담수와 해수의 흐름을 나타내는 두 개의 흐름방정식으로 구성되는데 이들 역시 비선형연립 편미분방정식이지만 용질수송식이 포함되지 않으므로 안정성조건이 확산 모형에서처럼 제한적이지 않다. 즉, 경계면 모델은 광역 또는 소구역 염수 침입을 예측하고 관정의 최적 양수량을 평가하는데 사용되기도 한다. 따라서 경계면 모델의 접근법은 동수역학적 분산의 전반적인 효과가 그리 중요하지 않은 상황에 적절하다. 분산의 중요성은 문제의 규모에 의하여 결정된다. 같은 두께의 천이대라 해도 광역 규모에서는 천이대의 두께가 중요하지 않을 수 있다. 따라서 해수침투의 위험이 있는 광역적인 지하수 흐름에 대한 모델링에 적합한 방법이다.

경계면 모델의 지배방정식은 두 개의 액체(담수와 해수)에 대한 흐름 방정식으로 구성된다. 담수의 흐름에 대한 지배 방정식은

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (b^f \mathbf{K}^f \cdot \nabla h^f) \\ = b^f S_s^f \frac{\partial h^f}{\partial t} - \theta \frac{\partial \xi}{\partial t} - Q^f \end{aligned} \quad (3)$$

해수의 흐름에 대한 지배 방정식은

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (b^s \mathbf{K}^s \cdot \nabla h^s) \\ = b^s S_s^s \frac{\partial h^s}{\partial t} + \theta \frac{\partial \xi}{\partial t} - Q^s \end{aligned} \quad (4)$$

이다. 여기서  $\nabla (= \vec{i} \partial/\partial x + \vec{j} \partial/\partial y)$  은 경사벡터 연산자,  $\cdot$  는 내적, 위치자  $l$  은 담수( $l=f$ ) 혹은 해수( $l=s$ ),  $b^l$  는 액체상  $l$  의 두께,  $\mathbf{K}^l (= \rho^l \mathbf{gk}/\mu)$  는 수리전도도텐서,  $\rho^l$  은 밀도,  $\mathbf{k}$  는 고유투수계수텐서,  $h^l (= p^l/\rho^l g + z)$  는 수두,  $S_s^l$  는 저류계수,  $\theta$  는 유효공극률,  $\xi$  는 담수-해수 경계면의 표고,  $Q^l$  는 양수량 또는 함양량을 나타낸다(Fig. 2). 담수와 해수의 두께는 다음의 관계를 만족한다.

$$b^f + b^s = B \quad (5)$$

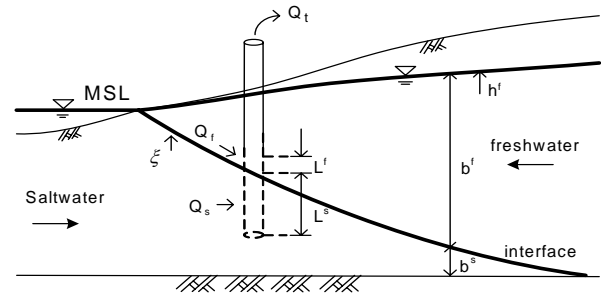


Fig. 2. Cross-sectional View of a Saltwater-Intruded Coastal Aquifer

여기서  $B$ 는 포화층의 두께로 대수층의 상태(즉, 피압 혹은 비피압)에 따라 달라진다. 경계면의 표고와 담수와 해수의 수두사이에는 다음 관계가 성립된다.

$$\xi = \frac{\rho^s h^s - \rho^f h^f}{\rho^s - \rho^f} \quad (6)$$

Eq. (6)은 경계면에서 담수와 해수의 압력은 연속이라는 것을 의미한다. 위 식들은 Galerkin 유한요소법으로 이산화되고, 비선형성은 Newton-Raphson 방법으로 처리되었다(Huyakorn *et al.*, 1996). 개발된 수치모형은 검정(Park and Wu, 1994)과 대규모 유역에 적용(Park *et al.*, 1993)된 바 있다. Park *et al.*(2003)은 경계면 모델과 최적화기법을 조합하여 해안지역 지하수 최적 개발량 평가 모델을 개발하였다. 또한 시뢰 등(2009)은 경계면 모델을 이용하여 양수정의 수질을 개략적으로 모의하는 방법을 개발하고 모래상자 수리모형 실험을 통하여 검증한 바 있다.

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

$$Q_f = \left( \frac{K_f L_f}{K_f L_f + K_s L_s} \right) Q_t \quad (7)$$

$$Q_s = \left( \frac{K_s L_s}{K_f L_f + K_s L_s} \right) Q_t \quad (8)$$

$$L = L_f + L_s \quad (9)$$

여기서,  $L$ 은 관정 스크린의 총 길이,  $L_f$ 는 관정 스크린 상단에서 해수-담수 경계면까지의 길이,  $L_s$ 는 해수-담수 경계면 표고에서 관정 스크린 바닥까지의 거리이다. 그러면 양수 관정에서의 염분도는 다음과 같이 계산될 수 있다(Fig. 2).

$$c_w = \frac{c_f Q_f + c_s Q_s}{Q_t} \quad (10)$$

여기서,  $c_f$ 와  $c_s$ 는 각 각 담수와 염수의 염분 농도이다.

상술된 경계면 모델을 유전자기법(Carroll, 2004)과 조합하여 최적전산모델을 구성하였다.

### 3. 가상 도서에 대한 적용 예

#### 3.1 가상도서 및 기본 지하수 흐름

우리나라에서 인공주입기술의 적용성의 보수적 평가를 위하여 지하수개발 및 회수에 불리한 여건의 가상의 섬에 대하여 적용하였다. 이를 위하여 가상도서의 해안선 부근 임의의 위치의 관정에서 확보할 수 있는 최대 지하수량을 먼저 구하고 이를 초과하는 과잉 양수를 지속하기 위한 주입정의 위치와 주입량을 분석하였다.

가상도서는 반경 1km인 원형 도서로 우리나라 기준으로 작은 섬이다. 분석에서는 1/4분원 부분만을 모의 대상으로 설정하였다(Fig. 3). 주입량과 양수량이 과다하지 않으면 절단 경계(x와 y축)의 영향을 받지 않으므로 분석결과에는 영향이 없다.

대수층은 비피압으로 가정하였으며 대수층 바닥의 표고는 평균해수면 기준 -15m이다. 유효공극률은 0.3,

투수계수는 8.3m/d를 가정하였다. 지하수 함양율은 우리나라 연 평균 강수량의 약 10%인 125mm/yr를 가정하였다. 영역의 원호 부분은 해안선으로 담수와 해수의 수두를 평균해수면과 동일한 표고로 지정하였다. 수치 해석을 위하여 25m x 25m의 정사각형 유한요소망을 이용하였다.

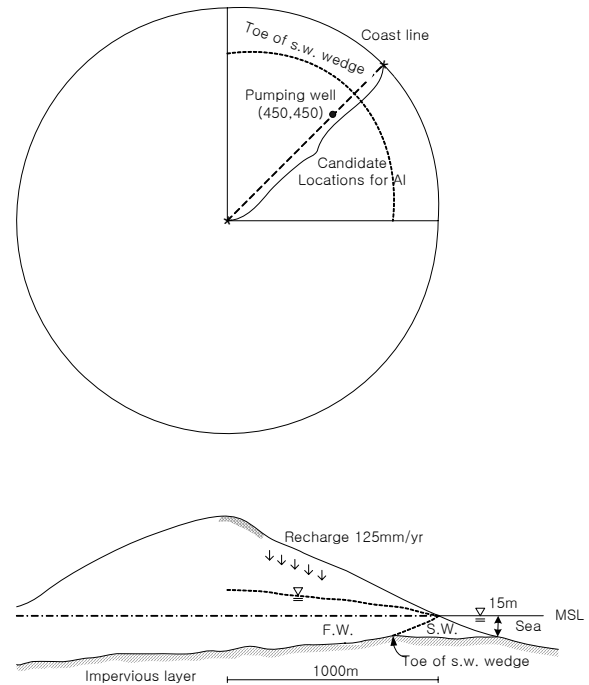


Fig. 3. Hypothetical Circular Island

지하수 함양이 125mm/yr일 때 관정이 없으면 정상상태의 등 지하수위선은 동심원의 형태를 이룬다. 해수는 방사방향으로 침투하며 해안선에서 내륙방향으로 100m 지점에 위치하는 것으로 계산되었다(Fig. 4).

가상유역에서 임의의 한 지점(450,450)에 양수정을 설치하였다. 해안선과 양수정 사이의 거리는 약 360m이다. 지정된 양수정에서의 적정 양수량은 78.6m<sup>3</sup>/d이다. 최적양수가 적용되면 해수썰기는 내륙으로 이동하며 평형상태에 도달한 해수썰기의 침투거리는 130m로 개발 전 상태보다 약 30m 더 침투하였다(Fig. 5). 해수 침투 거리 130m는 관정 위치까지 약 230m 정도의 여유가 있으나 양수량을 적정 양수량보다 증가시키면 해수썰기가 관정에 도달한다는 것을 의미한다. 이는 해안선에서 130m 지점과 360m 지점(관정위치) 사이에서는 해수썰기의 최대 침투 지점(toe)이 정적평형(static equilibrium)을 이룰 수 없다는 것을 의미한다. 관정을 오염시키지 않는 범위 내의 최대 침투지점을 critical point라 한다. Strack (1976)은 직선형 흐름에 대하여 critical point를 유도한 바 있다. 적정양수량을 초과하는

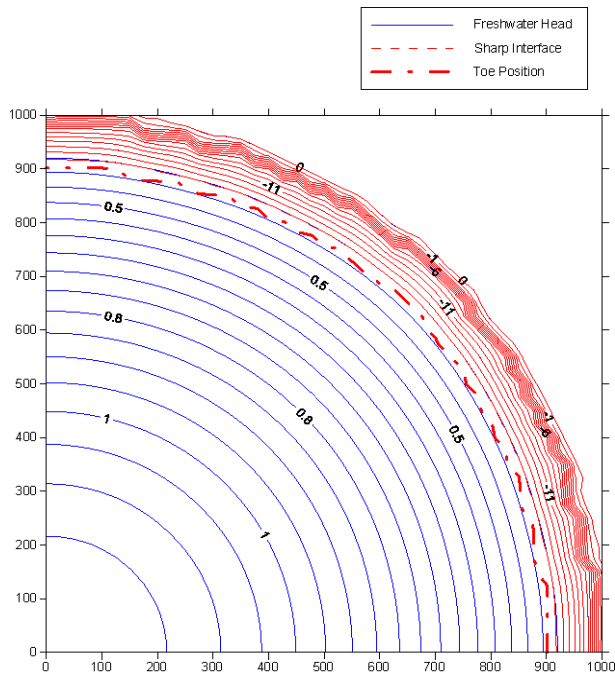


Fig. 4. Groundwater Levels and Saltwater Intrusion for the Predevelopment Condition

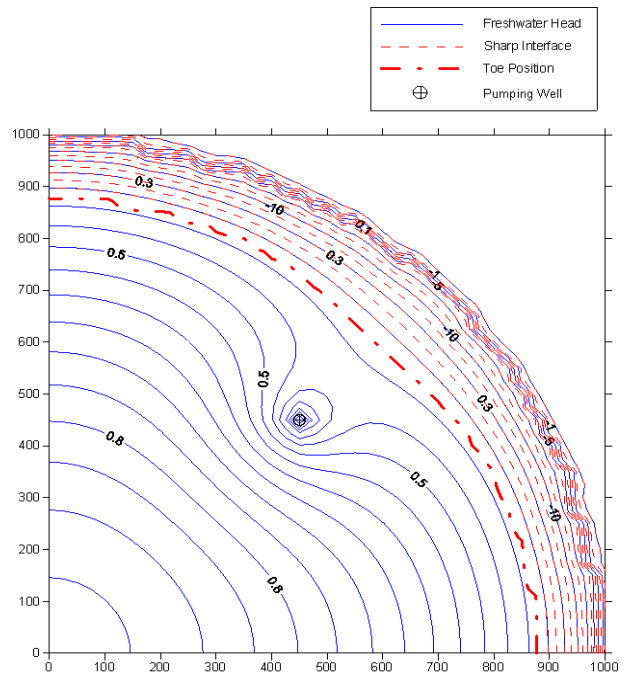


Fig. 5. Groundwater Levels and Saltwater Intrusion with Optimal Pumping

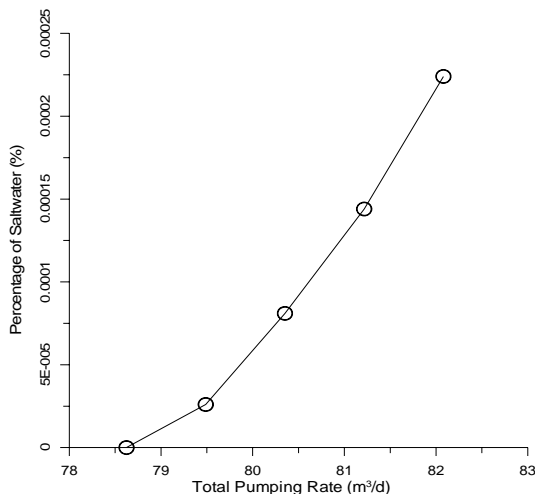


Fig. 6. Steady-state Percentage of Saltwater vs Pumping Rates

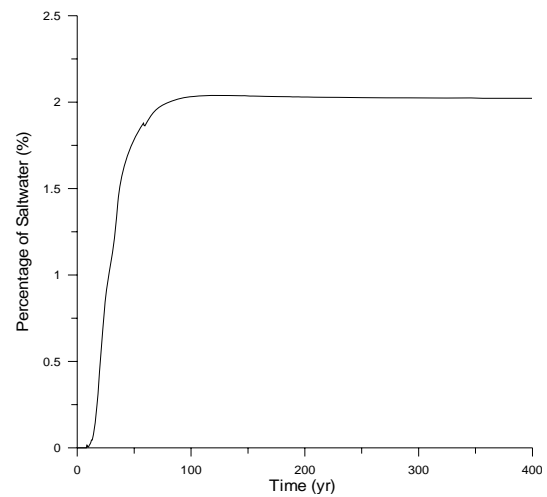


Fig. 7. Percentage of Saltwater at the Over-exploiting Pumping Well

양수량 대비 정상상태 해수비율을 Fig. 6에 도시하였다. 예상할 수 있듯이 적정양수량이 초과되면 양수량 중의 해수 비율이 점차 증가하는 양상을 보여준다.

### 3.2 과잉양수

본 연구에서는 적정양수량  $78.6\text{m}^3/\text{d}$ 를 54% 초과하는  $121\text{m}^3/\text{d}$ 의 수요를 해당 관정에서 충족시켜야하는 경우에 대하여 가정하였다. 먼저 주입 없이 과잉 양수를 시작하면 약 10년 후부터 양수정에서 해수가 검출되기 시작하여 약 100년 후에 평형상태에 도달하여 총 양수량의 2% 정도가 해수인 것으로 나타났다(Fig. 7).

### 3.3 최적 인공주입

적정개발량을 초과하는 물 수요를 연중 감당하기 위한 주입정의 위치와 최소 주입량을 평가하였다. 여기서 우기는 120일로, 1년을 360일로 가정하였다. 또한 인공 주입정의 목표 가동연한은 20년으로 설정하였다. 유전자 방법에서는 결정 변수의 탐색 범위를 설정해야한다. 여기서는 주입정의 위치와 주입량이 결정변수이다. 주입정의 정확한 위치는 사전에 알 수 없지만 관정을 통과하는 45도 직선상에 위치하는 것은 명백하다. 따라서 주입정의 후보지점은 원점을 통과하는 45도 직선상의

절점 (총 29개)로 지정하였다(Fig. 3). 주입량은 0부터  $220\text{m}^3/\text{d}$ 까지  $0.864\text{m}^3/\text{d}$  간격으로 256가지 주입량을 대상으로 지정하였다. 그러면 총 조합의 수는  $29 \times 256 = 7,424$ 가지 경우가 발생한다. 물론 이 경우에는 조합의 수가 크지 않기 때문에 모든 가능성에 대하여 목적함수를 계산하는 것이 가능하나 통상적인 문제에서 가능성의 수가 수백만을 초과할 수 있기 때문에 효과적인 최적해 탐색기법의 사용은 필수적이다. 유전자 기법의 적용에서는 개체수를 5개, 세대수는 100개를 사용하는 micro-GA (Carroll, 2004)를 사용하였다. 이 경우 경계면 모의모형을 수행해야하는 횟수는 최대  $5 \times 100 = 500$ 회이다. 그러나 많은 경우 중복된 조합이 재생산되므로 실제 수행횟수는 최대횟수의 일부에 지나지 않는다.

상기 조건에 대하여 최적모형을 적용한 결과 주입정의 최적 위치는 (525,525)이며 120일간의 우기의 주입량은  $51.8\text{m}^3/\text{d}$ 로 산정되었다. 산정된 주입정은 과잉 양수 관정의 약 105m하류 지점이다. 이는 관정에서 대상 양수 관정에서 개발량을 제한하는 요소가 수자원 부족보다는 하류의 해수침투임을 의미하는 것이다. Fig. 8에는 상기 최적계산 과정을 도시하였다. 각 세대별 5개체에 대한 목적함수의 평균값을, 실선은 각 세대별 5개체 중 가장 우수한 값을 나타낸다. 본 계산에서는 18번째 세대에서 최적값에 도달하였다. 각 세대마다 5개체가 존재하므로 최적값에 도달하는 데 지하수흐름 모형을 총 90회 호출하나 그 중 34회는 중복된 값으로 실제 모델이 수행된 횟수는 56회이다. 따라서 전체 탐색공간의 0.75% 이내의 시도로 최적해를 탐색하였다.

최적 주입정이 가동되는 경우 양수정의 수두변화를

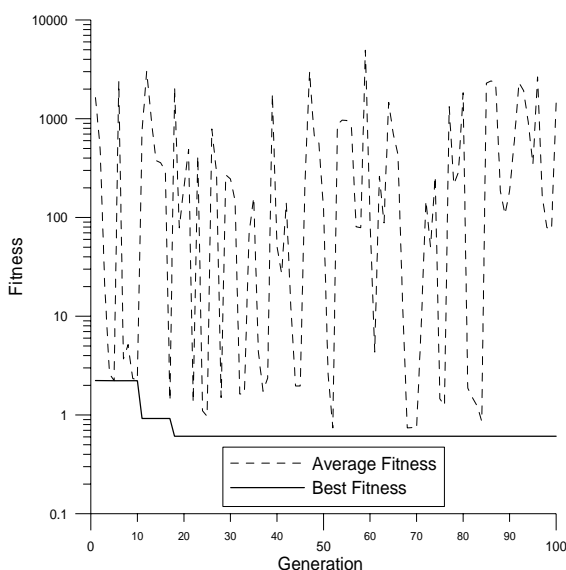


Fig. 8. Convergence Behavior of the Genetic Algorithm

Fig. 9에 도시하였다. 우기에 수위 상승, 건기에 수위 하강의 주기적 양상을 잘 보여준다. 과잉 양수 개시 직후 수위가 전반적으로 하강하며 약 5년 후에는 큰 변화 없이 동적 평형상태에 도달함을 보여준다.

주입정에서의 수위변화는 Fig. 10에 도시하였다. 양수정의 진폭에 비하여 약 4배 정도 큰 것 외에는 유사한 경향을 보인다. Fig. 11에는 주입정에서 약 70m 하류 지점(575,575)의 담수-해수 경계면 표고 변화를 도시하였다. 역시 우기 건기의 반응이 나타나고 있으나 과잉 양수 개시 후 40년이 경과해도 경계면 표고가 계속 증가하고 있음을 보여준다. 이는 지하수위가 약 5년 이후 평형상태에 도달하는 것과 대비되는 것이다.

양수정에서의 해수비율의 시간 변화를 Fig. 12에 도시하였다. 과잉양수와 주입이 개시된 이후 20년간은 해수가 나타나지 않으나 20년 이후부터 해수가 양수되기 시작함을 보여준다. 이는 주입정의 목표 가동연한을 20년으로 설정하였기 때문에 목표 년도 이후에는 과잉 양수정이 더 이상 보호대상이 아니기 때문이다. 따라서 산정된 주입량이 20년간 양수정을 보호하는 최소량임을 알 수 있다.

### 3.4 민감도 분석

최적 주입정의 민감도 분석을 위하여 다음 3가지 상황을 설정하였다.

- 우기 90일 (30일 감소)
- 목표 가동연한 40년 및 200년 (20년 및 180년 증가)
- 초과양수 100% (46% 증가)

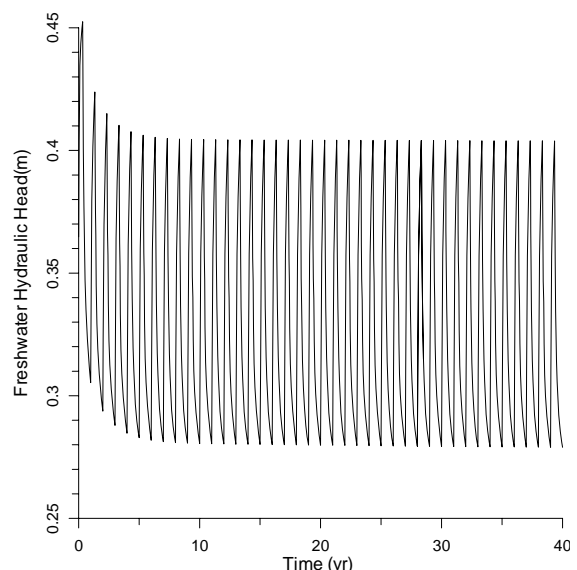


Fig. 9. Freshwater Head at the Pumping Well (450,450)

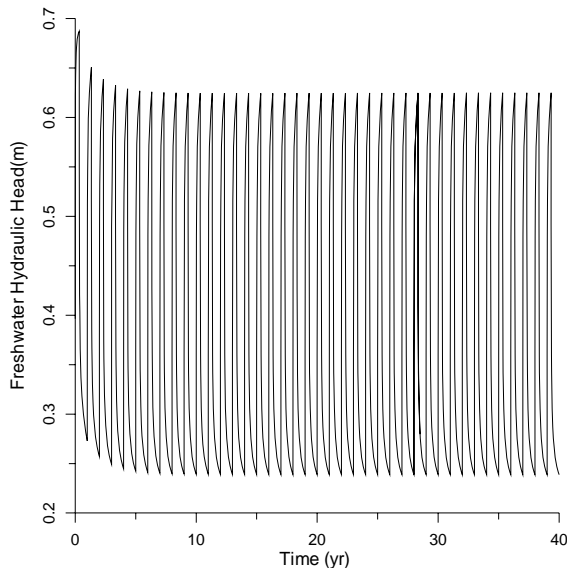


Fig. 10. Freshwater Head at the Injection Well (525,525)

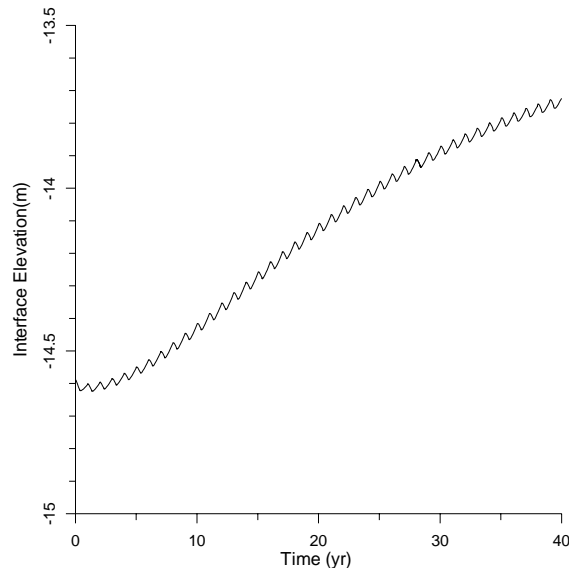


Fig. 11. Interface Elevation at (575,575)

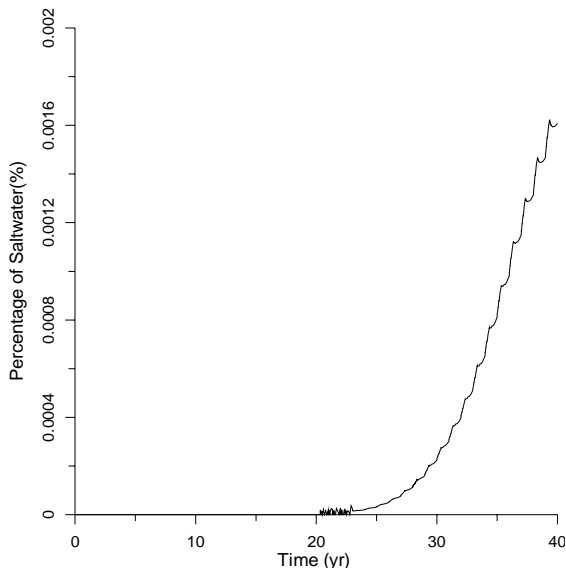


Fig. 12. Percentage of Saltwater at the Pumping Well

분석 대상 3가지 경우 계산결과 주입정의 최적 위치는 기본 경우의 주입정의 위치와 동일하게 나타났다. 주입량은 우기가 90일인 경우에는  $70\text{m}^3/\text{d}$ 로 기본경우의  $53\text{m}^3/\text{d}$ 보다 약 32% 증가하였다. 그러나 연간 총 주입량은 두 경우 모두 약  $63,000\text{m}^3$  정도로 큰 차이가 없다. 목표 가동연한이 40년인 경우 최소 주입량이  $76\text{m}^3/\text{d}$ 로 기본 경우보다 약 43%가 더 요구되었다. 과잉양수비율이 100%인 경우 최소주입량은  $143\text{m}^3/\text{d}$ 로 기본경우보다 약 1.7배 증가하였다. Table 1에는 민감도 분석결과를 수록하였다. 양수정에서 적정개발량으로 취수하면 연중 지하수 확보량은  $28,305\text{m}^3$ 이다. 기본경우로 54% 과잉양수 시에는  $43,546\text{m}^3$ 으로 적정개발 경우보다  $15,241\text{m}^3$ 을 추가 확보할 수 있다. 기본 경우의 최소 주입량을 120일간 가동하면 총 주입량은  $6,324\text{m}^3$ 으로 연간 순 추가확보량 (=추가량-주입량)은  $8,916\text{m}^3$ 이다. 따라서 주입정 가동에 따른 추가확보율은 2.41 (=15,241/6,324)이다. 우기가 90일인 경우에도 연간 추가

Table 1. Result of Sensitivity Analysis

	Wet period (d) A	Pumping rate ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) B	Annual pumping ( $\text{m}^3/\text{yr}$ ) C	Optimal injection ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) D	Annual gain ( $\text{m}^3$ ) E =C-28,305	Annual injection ( $\text{m}^3$ ) F=A*D	Annual gain/injection
Optimal pumping		78.6	28,305	-	-	-	-
Base case	120	121	43,546	53	15,241	6,324	2.41
90 days	90	121	43,546	70	15,241	6,299	2.42
40 years	120	121	43,546	76	15,241	9,124	1.67
200 years	120	121	43,546	89	15,241	10,679	1.43
200%	120	157	56,609	143	28,305	17,107	1.65



확보율은 기본경우와 유사하게 나타난다. 목표가동년한이 40년인 경우에는 연간 추가확보율은 1.67이다. 추가 확보율이 감소하는 이유는 해수침투를 더 오랜 기간 저지해야하므로 더 많은 주입이 필요하기 때문이다. 가동 연한이 증가함에 따라 최적 주입량이 증가한다. 주입정이 가동되지 않는 경우 과잉 양수정에서 해수비율이 평형값인 2%에 도달하는 데 약 100년 정도의 시간이 걸린다. 따라서 목표가동년한이 100년까지는 주입량이 증가한다는 것을 예상할 수 있다. 최대 주입량을 조사하기 위하여 목표연한을 200년으로 설정하면 필요 주입량은 일  $89\text{m}^3/\text{d}$ 이며 추가확보율은 1.43으로 나타났다. 목표가동년한이 300년으로 연장한 경우에도 필요 주입량은 200년인 경우와 동일하게 나타났다. 따라서 평형상태에서도 주입량보다 더 많은 지하수량을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 초과양수비율이 100%인 경우에는 추가확보율이 1.65로 나타났다.

#### 4. 결 론

건기와 우기가 뚜렷한 국내의 기상조건 수자원의 시공간적 불균형이 심각한 우리나라의 도서 및 해안 지역에서 우기의 잉여 수자원을 대수층에 주입하여 지하수 자원을 확충하는 인공주입방법을 사용하면 시간적 불균형을 해소하여 제한적인 수자원의 활용도를 높일 수 있다. 따라서 인공주입 기술은 우리나라 수문현상을 고려할 때 합리적인 대안이 될 수 있다. 일반적으로 우리나라 대부분 지역에서 대수층의 산출성이 그다지 뛰어나지 않으나 대부분의 해안 및 도서 지역에서 물수요가 크지 않기 때문에 우리나라에 적용하는데 적합한 수자원 관리기법이다. 본 연구에서는 지하수 적정개발량을 초과하는 연중 물 수요를 최소 비용으로 충족시키기 위한 주입정의 최적설계전산모델을 개발하였다. 최적모델의 결정변수는 주입정의 위치와 주입량이며, 주요 상태변수는 양수정의 해수비율, 목표 가동연한, 우기의 기간, 그리고 초과 양수량이다.

우리나라에서 우기의 인공주입을 통한 지하수 자원의 추가개발 가능성을 조사하기 위하여 지하수 개발에 불리한 수리지질 특성을 가진 소규모 가상도서에 대하여 적정개발량을 초과하는 과잉양수정을 보호할 수 있는 우기의 인공주입정을 분석하였다. 주요 변수들에 대한 민감도 분석결과 적절한 위치에 적절한 양을 주입하면 적정개발량을 초과하는 양수량을 목표 연한동안 지속적으로 유지할 수 있는 것으로 나타났다. 검토한 모든 경우에서 연간 추가확보량이 주입량을 초과하여 주입의 효과가 우수한 것으로 나타났다. 과잉 양수정을

보호하기 위한 위치에 따라 소요 주입량에 큰 차이가 있으므로 주입시스템의 효율을 높이기 위해서는 최적 주입 위치 선정과 주입량 결정이 중요하다.

본 연구에서 개발한 최적설계 전산모델은 낙후된 도서 및 해안 지역의 수자원 공급의 안정성을 제고시켜 지역 발전의 밑거름이 될 수 있을 것으로 생각된다. 개발된 모델을 이용하여 더욱 다양한 경우에 대한 분석을 수행하여 지표수-지하수 연계활용의 이점과 중요 이슈를 도출할 수 있다. 실제 현장의 경우 불확실한 지질 및 수리수문 조건으로 인하여 모델결과의 적용성에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 불확실성 등을 고려한 신뢰도를 높일 수 있는 연구가 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 동아대학교의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- 박남식, 홍성훈, 심명근 (2003). "유전자 방법과 병렬처리를 이용한 해안지하수 최적 양수량 결정 모형 개발." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제23권, 제5B호, pp. 397-403.
- 인터넷중앙일보 (2007). JOINS, 뉴스기사, 6월 21일.
- 시뢰, 최뢰, 이찬중, 홍성훈, 박남식 (2009). "모래상자 수리모형실험을 통한 경계면 모델의 관정 염도 모의 실험." **대한지질공학회논문집**, 대한지질공학회, 제19권, 제1호, pp. 9-14.
- 환경부 (2009). 봄철 가뭄대비 식수공급 대책마련, 2009년 2월 26일 환경부 **보도자료**
- 환경부 (2005). 농어촌 · 도서지역 2단계 (2005-2014년). **상수도 확충계획**
- Ayvaz, M.T., Karahan, and Halil (2008). "A simulation/optimization model for the identification of unknown groundwater well locations and pumping rates." *J. of Hydrology*, Vol. 357, pp. 76-92
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater* McGraw-Hill Companies
- Bloetscher, F., Muniz, A., and Witt, G.M. (2005). *Groundwater Injection*, McGrawHill.
- Carroll, D.L. (2004). fortran genetic algorithm driver, Open Source GA.
- Cheng, A.H.D, Halhal, D., Naji, D., and Ouazar, D. (2000). "Pumping optimization in saltwater-intruded

- coastal aquifers." *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 8, pp. 2155-2165.
- Goldberg, D.E. (1997). "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning." Addison-Wesley.
- Goyal, V., Jhorar, B. S., Malik, R. S., and Streck, T. (2008). "Performance evaluation of aquifer storage recovery wells for conjunctive water management as influenced by buffer storage volume and storage time." *CURRENT SCIENCE*, Vol. 94, No. 4.
- Hartman, J. (2002). "Civil Engineering News." *Magazine article*, Vol. 72, No. 5.
- Herczeg, AL, Rattray, KJ, Dillon, PJ, Pavelic, PP, and Barry, KE. (2004). "Geochemical processes during five years of aquifer storage recovery." *Ground Water*, Vol. 42, No. 3, pp. 438-445.
- Huyakorn, PS, YS Wu, NS Park (1996). "Multiphase approach to the numerical solution of a sharp interface saltwater intrusion problem." *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 1, pp. 93 - 102
- Katsifarakis, K.L. and Petala, Z. (2006). "Combining genetic algorithms and boundary elements to optimize coastal aquifers management." *J. of Hydrology*, Vol. 327, pp. 200-207.
- Lowry, CS and Anderson, MP. (2006). "An assessment of aquifer storage recovery using ground water flow models." *Ground Water*, pp. 1-7.
- Mantoglou, A., Papantoniou, M. Giannouloupoulos, P. (2004). "Management of coastal aquifers based on nonlinear optimization and evolutionary algorithms." *J of Hydrology*, Vol. 297, pp. 209-228.
- National Research Council, The National Academies Press [Washington DC] (2008). *Prospects for Managed Underground Storage of Recoverable Water*
- Park, C.H. and Aral, M.M. (2004). "Multi-objective optimization of pumping rates and well placement in coastal aquifers." *J. of Hydrology*, Vol. 290, pp. 80-99.
- Park, N.S., Huyakorn, P. S., Wu, Y. S. and Barcelo, M. D. (1993). "A sharp-interface saltwater intrusion code for layered aquifer systems." *Proceedings of ASCE International Symposium on Engineering Hydrology*, San Francisco, USA. pp. 1159-1164.
- Park, N.S. and Wu, Y.S. (1994). "Evaluation of vertical leakage schemes for multilayer sharp-interface saltwater intrusion model." *Proceedings of the X International Conference on Computational Methods in Water Resources*, Heidelberg, Germany, Kluwer Academic Publishers. pp. 1027-1034.
- Pitman, C. (2008). "Aquifer storage transfer and recovery: How to substitute mainswater with stormwater." *Journal of Public Works and Infrastructure*, Vol. 1, No. 1.
- Khan, S., Mushtaq, S., Hanjra, M. A., and Schaeffer, J. (2008). "Estimating potential costs and gains from an aquifer storage and recovery program in Australia." *Agricultural Water Management*, Vol. 95, No. 4, April , pp. 477-488.
- Strack, O.D.L. (1976). "A single-potential solution for regional interface problems in coastal aquifers." *Water Resources Research*, Vol. 12, pp. 1165-1174.
- Ward, JD, Simmons, CT, Dillon, PJ (2008). "Variable-density modelling of multiple-cycle aquifer storage and recovery (ASR): Importance of anisotropy and layered heterogeneity in brackish aquifers." *Journal of Hydrology*, Vol. 356, pp. 93-105.
- Weeks, EP (2002). "A historical overview of hydrologic studies of artificial recharge in the US Geological Survey." *US Geological Survey Artificial Recharge Workshop Proceedings* (Editors: Aiken, G.R. and Kuniansky, E.L.), Sacramento, CA, USA, pp. 5-12.

(논문번호:09-33/접수:2009.03.20/심사완료:2009.04.20)