



Development of minimum-salinity feedwater for reduction of unit production cost of reverse-osmosis desalination plants

Park, Namsik^{a*} · Jang, Chi Woong^a · Babu, Roshina^a

^aDept. of Civil Eng., Dong-A University, Busan 49315, Korea

Paper number: 16-036

Received: 31 March 2016; Revised: 7 April 2016; Accepted: 7 April 2016

Abstract

Large energy consumption is one of the main weaknesses of RO desalination. A new method is proposed to reduce the energy consumption of RO desalination which depends on the salinity of the feedwater. Low salinity feedwater can be obtained using groundwater wells which extracts both fresh groundwater and subsurface sea water. Subsurface feedwater is advantageous in overcoming other problems associated with surface seawater intakes. Salinities of groundwater depend on a number of factors. In this work a new simulation-optimization model is proposed to identify well locations and pumping rates with would provide the required design flow rate with the minimum salinity. When groundwater is developed in a coastal area, the saltwater wedge advances inland and may contaminate existing groundwater wells, which must be prevented. The model can protect existing wells while developing minimum salinity feedwater. Examples are provided to demonstrate the usage of the model.

Keywords: RO desalination, energy consumption, minimum salinity feedwater, simulation-optimization model

역삼투 담수화 시설의 생산단가 절감을 위한 저 염도 지하 기수 개발

박남식^{a*} · 장치웅^a · Babu Roshina^a

^a동아대학교 공과대학 토목공학과

요 지

역삼투 해수 담수화 공법의 주요 단점으로 여겨지고 있는 에너지 소비량을 줄이기 위한 방편으로 해안선을 통하여 바다로 유출되는 담수 지하수를 활용하여 낮은 염도의 원수를 확보하는 방안을 제시하였다. 저 염도 지하 염수는 담수화 비용 뿐 아니라 표류 해수 취수의 알려진 단점을 극복하는 데도 유리하다. 지하 염수의 염도는 해안선을 통하여 바다로 유출되는 담수 지하수량의 영향을 크게 받는다. 본 연구에서는 담수화 시설에 필요한 수량을 최저 염도로 충족시킬 수 있는 지하 염수 관정의 위치 및 양수량 분포를 산정할 수 있는 최적 전산설계모델을 개발하였다. 해안 지역에서 지하 염수를 개발하면 대수층으로 해수가 추가 침투하여 다른 사용자의 지하수 관정을 오염시킬 수 있다. 본 모델은 지하 염수 관정의 최적 설계 시에 기존 지하수 관정을 해수 침투로부터 보호할 수 있도록 구성되었다.

핵심용어: 역삼투 해수담수화, 에너지 소비량, 최저염도 원수, 최적설계 전산모델

1. 서 론

해수 담수화 공법 중 역삼투(Reverse Osmosis, RO) 공법은 에너지 효율이 높아 경제적이고 친환경 공법으로서

해수담수화 공법 중에서 가장 널리 쓰이고 있는 공법이다 (Greenlee, 2009, Sackinger et al., 1982, Karagiannis, 2008, Lattemann, 2008). 역삼투 공법 분야에서는 많은 연구가 진행되고 있다(Penate, 2012, Malaeb, 2011, Greenlee 2009). 최근 연구동향으로는 삼투막 표면의 염분착생 및 생물막을 줄여주는 삼투막 개발(Kim, 2016, Qi, 2016), 원수의 전처리(Jeong, 2016), 혼합 시스템 사용(Ang,

*Corresponding Author. Tel: +82-51-200-7629
E-mail: nspark@dau.ac.kr (N. Park)

2015), 에너지 재생장치와의 통합(Qureshi, 2015) 그리고 대체 에너지원의 선택(Mudgal, 2016) 등 설비의 효율증대에 초점을 맞춰 비용절감을 꾀하고 있다.

담수화 비용에 영향을 미치는 요소로는 원수의 염분농도(Klinko, 1985)와 화학 및 물리적 특성, 담수화 공법, 에너지 재생장치의 유무 및 종류, 가동 조건과 담수플랜트의 규모 등이 있다. 일반적으로 담수화 시설에 제공될 원수의 수질에 맞춰 담수화 시설이 설계, 제작 되므로 담수화 비용은 공급되는 원수에 기초하여 달라진다(Reddy, 2007). 역삼투 설비의 운영 및 유지 보수비용에서 가장 큰 비중을 차지하는 항목의 약 50%는 역삼투 시설 가동에 사용되는 에너지 비용이며, 두 번째 항목은 약 37%의 시공비로 알려져 있다(Miller, 2003, Younos, 2003). 기타 비용으로는 설비 유지 보수비(7%), 삼투막 교체 비용(5%), 인건비(4%), 화학약품 소비(3%)이다(Miller, 2003; Greenlee 2009). Park et al. (2011)은 K-Water에서 위탁관리하고 있는 우리나라 40개 도시에 설치된 소규모 역삼투 담수화 시설에 대한 비용을 분석한 결과 운영 및 유지관리 비용의 60%가 원수의 염도의 영향을 받는다고 보고한 바 있다.

영향 요인 중 가장 중요한 인자는 원수의 염도라 할 수 있다. 저 염도 원수는 역삼투 공정의 에너지 소비, 담수 회수율, 시설 유지관리 측면에서 유리하다. 염분농도가 30,500mg/L에서 27,500mg/L로 감소 할 때 소요 압력은 4기압이 감소한다(Kim, 2009). 담수 회수율이 높으면 시설의 설비 규모가 작아질 수 있으므로 시설의 설치 및 운영비용을 절감할 수 있다(Wilf, 2001). 해수를 원수로 사용하면 회수율은 70~85%에 불과하지만 염도가 낮은 기수의 경우 회수율을 90~95%까지 끌어 올릴 수 있다(Greenlee 2009). 또한 저 염도 원수는 막의 스케일링 및 기타 원인의 막힘 관리 차원에서도 유리하다(Ettouney, 2002, Younos, 2005). 종합적인 역삼투 담수화 단가에는 시공비와 운영비가 포함된다. 단가와 염분농도 사이의 선형적인 비례 관계는 없지만 염분 농도가 2배 증가하면 비용이 약 20% 증가하는 것이 관찰 되었다(Akgul, 2008). 중간용량의 역삼투 설비에서 해수 염도가 35,000ppm에서 40,000ppm으로 증가 할 때 약 5.3%의 물 생산 비용이 증가하는 것으로 나타났다(AI-Karaghoul, 2012).

저 염도 원수는 하구에서 취수될 수 있지만 하천이 없는 지역에서는 해안 지역의 지하수에서 얻을 수 있다. 해안선 부근의 대수층에는 육지에서 유출되는 담수 지하수와 해저를 통하여 침투하는 해수짜기가 공존한다. 따라

서 대수층에서 유출되는 담수 지하수의 비율을 높일수록 담수화 시설에 공급되는 원수의 염도를 낮출 수 있다. 지하 염수는 표류 해수에 비하여 수온이 일정하고 조류, 탁도, 유류 오염 사고 등의 측면에서 유리하다. 또한 표류 해수의 경우 취수시설로 유입되는 해양 생물의 피해, 담수화 후 농축 염수의 방류로 야기되는 해저 생태계 피해 등의 환경·생태 문제를 야기할 수 있으나 저염도 지하 염수의 경우에는 그러한 우려가 적다(Cooley et al., 2013). Han et al. (2006)은 우리나라 4대 하천 권역 해안을 통하여 연간 약 18억m³의 지하수가 유출되고 있다고 보고한 바 있다. 본 연구의 목표는 담수화 시설에 공급되어야 하는 목표 수량을 최저 염도로 공급할 수 있는 지하 염수 개발을 위한 관정 최적 배치기법을 제시하는 것이다. 기법의 기반은 담수-해수 지하수 흐름을 모의할 수 있는 경계면 지하수 모델과 최적화기법이다.

2. 최저 염도 지하 염수 관정 설계

2.1 목적함수 및 설계변수

역삼투 시설을 위한 최저 염도 지하수 개발 문제는 최적화문제의 형태로 제시될 수 있다. 최적 계산의 목적함수는 N_c 개 최적화 대상 관정에서 양수되는 해수량을 최소화하는 것이다. 그런데 같은 유역에 기존 지하수 사용자의 관정이 존재하는 경우 신규 관정의 지하수 개발로 인하여 기존 지하수 관정이 해수침투의 피해를 입을 수 있다. 따라서 기존 관정으로 해수가 유입되는 것을 방지하기 위하여 벌칙함수가 적용된다. 유역 내 N_c 개 기존 관정이 있으면 목적함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^{N_s} Q_{is} + w \sum_{i=1}^{N_c} Q_{is} \quad (1)$$

여기서 Q_{is} 는 i 번째 관정에서 양수되는 해수량, w 는 가중치이다. 기존 관정을 보호하기 위해서는 큰 값의 가중치 ($\gg 1$)가 적용된다. 지하수 관정으로 담수와 해수가 유입될 수 있지만 사용자가 조절할 수 있는 변수는 양수량 ($Q_i = Q_{if} + Q_{is}$)뿐이다. 담수와 해수의 비율은 지하수 흐름의 반응으로 결정되는 종속변수이다. 해수담수화 시설에 공급되는 총 수량이 지정되어 있으면 이는 다음의 제약조건으로 적용된다.

$$Q_t = \sum_{i=1}^{N_t} Q_i \quad (2)$$

그러면 N_o 개 최적화 대상 관정에서 역삼투 담수화 시설에 공급하는 원수의 해수 비율은 다음과 같다.

$$\frac{1}{Q_t} \sum_{i=1}^{N_o} Q_{is} \quad (3)$$

양수정으로 유입되는 해수량은 관정의 위치와 양수량 (Q_i)에 따라 결정된다. 따라서 최적화 문제의 결정변수는 각 관정의 위치와 양수량이다.

2.2 담수해수 흐름모델

본 연구에서는 대수층 내 담수와 염수의 상호작용을 모의하기 위하여 경계면 지하수 흐름모델을 사용하였다. 담수와 해수 사이의 천이대의 두께가 크지 않아 무시될 수 있을 때에는 두 유체가 서로 섞이지 않고 선명한 경계로 구분될 수 있다는 가정 하에 유도되는 경계면 모델이 사용될 수 있다. 이러한 경우 해수침투 현상은 담수와 해수의 흐름에 대한 두 개의 지하수 흐름 방정식으로 구성될 수 있다(Bear, 1979, Huyakorn et al., 1996).

$$\nabla \cdot (b_f \mathbf{K}_f \cdot \nabla h_f) = b_f S_{s_f} \frac{\partial h_f}{\partial t} - \theta \frac{\partial \xi}{\partial t} - Q_f \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (b_s \mathbf{K}_s \cdot \nabla h_s) = b_s S_{s_s} \frac{\partial h_s}{\partial t} + \theta \frac{\partial \xi}{\partial t} - Q_s \quad (5)$$

여기서, ∇ 는 경사벡터 연산자, \cdot 는 내적, 아래 첨자 f 와 s 는 담수와 해수를 표기하고, b_f 와 b_s 는 각각 담수와 해수층의 두께, \mathbf{K}_f 와 \mathbf{K}_s 는 각각 담수와 해수의 수리전도도 텐서, h_f 와 h_s 는 각 유체의 수두, S_{s_f} 와 S_{s_s} 는 대수층 비저류계수, θ 는 유효공극률, ξ 는 경계면의 표고, Q_f 와 Q_s 는 양수 및 함양 등이 고려되는 각 유체의 체적흐름율이다.(Fig. 1)

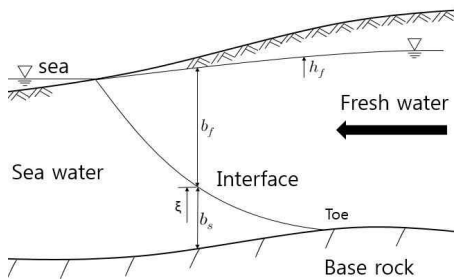


Fig. 1. Cross-sectional view of a groundwater system in a coastal area

담수와 해수의 두께는 다음의 관계를 만족한다.

$$b_f + b_s = B \quad (6)$$

여기서, B 는 포화층의 두께로 대수층의 상태(즉, 피압 혹은 비피압)에 따라 달라진다. 그리고 해수-담수 경계면의 표고와 각 유체 수두는 다음의 관계를 가진다.

$$\xi = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} h_s - h_f \right) = \frac{\rho_s h_s - \rho_f h_f}{\rho_s - \rho_f} \quad (7)$$

여기서, ρ_f 와 ρ_s 는 각 유체의 밀도를 나타내며, Eq. (7)은 해수-담수 경계면에서 압력은 연속임을 의미한다. 지하수 관정에서 총 양수량 Q_t 가 양수될 때 양수되는 물의 종류는 여러 가지 인자에 의하여 결정된다. 여기서는 양수되는 해수와 담수의 비율이 관정의 스크린 구간에서 각 유체의 투수량계수에 의하여 결정된다고 가정하였다. 그러면 각 유체의 양수량은 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$Q_{if} = \left(\frac{K_f L_{if}}{K_f L_{if} + K_s L_{is}} \right) Q_i \quad (8)$$

$$Q_{is} = \left(\frac{K_s L_{is}}{K_f L_{if} + K_s L_{is}} \right) Q_i \quad (9)$$

$$L_i = L_{if} + L_{is} \quad (10)$$

여기서, L_i 는 i 번째 관정 스크린의 총 길이, L_{if} 는 관정 스크린 상단에서 해수-담수 경계면까지의 길이, L_{is} 는 해수-담수 경계면에서 관정 스크린 바닥까지의 거리이다.

상술된 방정식은 유한요소기법으로 전산화되었다(Huyakorn et al., 1996). Shi et al. (2011)은 전술된 경계면 모델이 실험실 수리 모형실험에서 측정된 양수정의 염수 비율을 잘 재현한다고 보고한 바 있다.

2.3 최적화 기법

전술된 목적함수 값을 최소화시키는 결정변수의 조합을 탐지하기 위하여 유전자 기법을 사용하였다. 동 기법은 적자생존으로 표현되는 생물체 집단의 진화과정을 수치적으로 구현하여 목적함수의 개선을 피하는 방법이다(Goldberg, 1984). 유전자 알고리즘은 i 번째 세대에 속한 개체들의 재생, 선택, 교배 및 돌연변이 등의 연산을 통하여 $i+1$ 번째 세대의 개체들을 생산한다. 각 개체의 성능을 고려하여 다음 세대의 개체들을 생산하면 최고 성능 개체는 물론 모든 개체의 평균 성능도 개선될 수 있다.

2.4 최적설계 전산모델

전술된 경계면 지하수 흐름 수치모델과 유전자 기법을 통합하여 최적설계 전산모델을 구축하였다. 전산모델의 구동 절차는 다음과 같다. 결정 변수(관정의 위치 및 양수량)의 값을 최적화 기법에서 도출한다. 이 때 선행 단계에서도 도출된 결정변수의 조합에 대한 목적함수 값이 이용된다. 지하수 흐름 수치모델에서는 최적화 기법에서 도출한 결정 변수의 조합을 적용하고 흐름을 모의한다. 흐름 결과로부터 목적함수 값을 산정한다. 위 절차는 충분한 회수의 단계를 거치거나 목적함수의 값에 개선이 없으면 종료된다.

3. 가상의 적용 사례

저염도 지하 기수 개발을 위한 지하수 관정 설계 방법을 가상사례를 통하여 보이고자한다. 가상의 직사각형(1000m×500m) 영역의 자유면 대수층에서 기수를 개발하고자한다(Fig. 2). 대수층의 기반암은 평균 해수위 30m 아래 위치하며 투수계수는 15m/d, 유효공극율은 0.25로 가정하였다. 영역의 좌측(“서”측) 경계는 해안선, 500m 길이의 두(“북”측 및 “남”측) 경계는 불투수 경계조건, 우측(“동”측)의 경계에서는 10,000m³/d 양량의 담수 지하수가 등분포로 유입되는 경계조건이 지정되었다. 지하수 흐름 해석을 위하여 10m×10m의 정사각형 격자로 구성된 유한요소망으로 영역을 이산화하고 전술된 경계조건을 적용하였다. 해수의 비중은 1.027이 고려되었다.

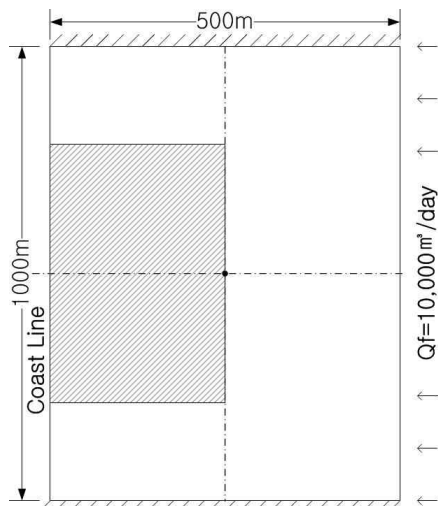


Fig. 2. Example domain (plan view)

여기서는 세 개의 가상사례를 통하여 전산모델의 기능을 보이고자한다. 모든 가상사례의 공통점은 담수화 시설로 공

급되어야할 목표 수량이 지정되었다는 것이다. 가상사례의 개요는 다음과 같다: (1) 단일 관정의 위치 선정: 목표 수량을 충족시키면서 최저 염도 기수 개발이 가능한 지점 선정, (2) 세 개 관정의 양수량 분포 결정: 최저염도 목표 수량 공급을 위한 세 개 관정 (지점은 사전에 지정된)의 양수량 설계, (3) 기존 관정 보호: 가상사례 (2)에 해수침투로부터 보호되어야할 기존의 지하수 관정 고려. 모든 가상사례에서 완전 관통 스크린을 고려하였다. 좌표의 원점은 영역의 중앙에, x 축은 동쪽으로, y 축은 북쪽으로 증가하는 것으로 설정하였다.

3.1 단일 관정의 최적 위치

여기서는 담수화 시설에서 필요한 수량이 각각 7,000, 8,000, 그리고 9,000m³/d인 세 가지 경우를 고려하였다. 관정을 설치할 수 있는 후보 지역은 500m×250m 면적으로 Fig. 2에 빗금으로 표시되어 있다. 후보지역에서 관정은 절점에 위치해야하므로 해당 절점은 총 702개로 최적화 탐색공간이 무척 작지만 최적 설계의 기능을 보여주는 목적을 달성하는 데 문제가 없다.

가상사례를 살펴보면 관정의 최적 위치에 대한 몇 가지 조건들이 관찰된다. 우선, 최저 염도 기수를 확보하기 위해서는 관정은 가급적 해안선에서 멀리 위치하는 것이 바람직하다. 그런데 내륙의 경계에서 지하수가 등분포로 유입되므로 목표 수량이 지하수 유입 총량의 70%~90%라는 점을 고려하면 관정이 유입 경계에 지나치게 가까우면 관정에서 지하수 고갈의 우려가 있다. 따라서 이 가상사례에서 관정의 최적 위치는 지하수 고갈을 피할 수 있는 최상류 지점이다. 여기서 관정의 지하수 고갈을 피하기 위해서는 관정은 내륙 경계 뿐 아니라 남북의 불투수 경계에서도 최대한 멀리 위치되어야 한다. 즉, 관정은 x 축 상에 설치되어야 한다는 것을 알 수 있다. 그리고 최적 위치는 목표 수량이 증가하면 해안선에 접근하며 해수 비율이 높아진다.

최적전산모델 계산 결과 세 개의 수량에 대해서 관정의 최적위치는 모두 x 축에 위치하는 것으로 나타났다. 해안선과의 거리는 목표 수량 증가에 따라 각각 240m, 180m, 그리고 140m, 해수 비율은 3.7%, 14.2%, 그리고 25.1%로 나타났다. 최적설계 결과를 확인하기 위하여 관정을 내륙 절점(즉, 10m 내륙)에 위치시키면 관정의 지하수위가 대수층 바닥면보다 낮아져 관정에서 지하수가 고갈되었다. 따라서 제시된 각 최적 위치는 목표 수량을 충족시킬 수 있는 최대 내륙 지점임을 확인할 수 있다. 세 가지 목표수량을 최적위치에서 개발할 때 나타나는 해수빼기의 최대 침투 지점(Toe)

을 Fig. 3에 제시하였다. 그림의 원은 관정의 양수량 별 최적 위치를 나타내며 Table 1에 해석결과를 정리하였다.

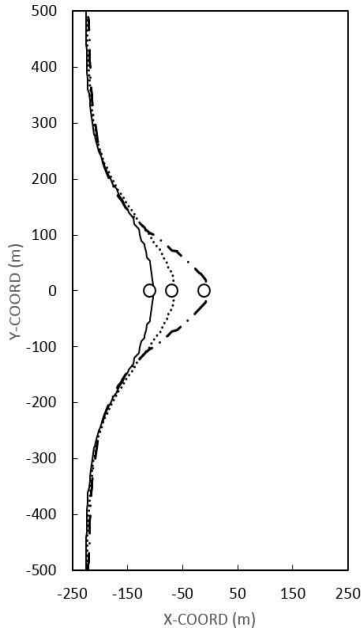


Fig. 3. Toes in relation to different pumping rates (7,000(short dash line), 8,000(dotted line) and 9,000 m³/d) and well locations

Table 1. Optimal result for example 1

Total pumping rate (m ³ /d)	Best Location		Fresh water rate (m ³ /d)	Sea water rate (m ³ /d)	Sea water ratio (%)
	x(m)	y(m)			
7,000	-10	0	6,743.7	256.3	3.66
8,000	-70	0	6,865.6	1,134.4	14.18
9,000	-110	0	6,744.3	2,255.7	25.06

3.2 복수 관정의 최적 양수량

여기서는 담수화 시설에서 필요로 하는 목표 수량 12,500 m³/d를 위치가 사전에 지정된 3개 관정에서 공급해야하는 경우를 고려하였다. 이 목표수량은 유역으로 유입되는 담수 총량(10,000m³/d)을 초과하는 유량이다. 가상사례에서 고려된 3개 관정의 좌표는 #1 (-210, 430), #2 (-40, 170), 그리고 #3 (-100, -250)이며 Fig. 4에 원으로 도시하였다. 본 연구에서 개발된 전산모델로 도출한 관정별 양수량은 Table 2에 제시되었다. 양수량 분포를 살펴보면 해안에서 가장 가까운 #1 관정에서 양수량이 1,296m³/d로 가장 작은 양수량이 제시되었다. 이는 관정 #1이 해안에서 가장 가까우므로 양수된 지하수의 해수 비율이 가장 높기 때문이다. 해안선에서 멀리 떨어진 두 개 양수정에서는 비슷한 크기의 양수량이

배정되었다. 총 양수량 12,500m³/d중 담수 유량은 약 9,795 m³/d로 해수 비율은 21.7%로 나타났다. 유역으로 유입되는 담수 총량의 98%가 최대 담수 개발량인 것으로 나타났다. 최적 계산 결과를 확인하기 위하여 도출된 최적 개발량을 약간씩 변경시켜 지하수 흐름 모델링을 수행한 결과 관정내 지하수가 고갈되거나 해수침투의 변화로 전체 해수 비율은 증가하는 것으로 나타났다. 최적 개발량을 적용하였을 때 예상되는 해수빼기의 최대침투지점은 Fig. 4에 실선으로 도시하였다.

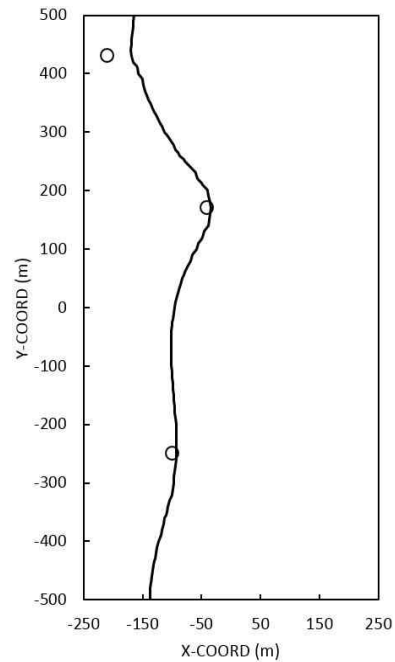


Fig. 4. Toe of the sea water wedge associated with optimal pumping from three wells(O)

Table 2. Pumping rates and sea water ratios for example 2

Well ID	Total pumping rate (m ³ /d)	Sea water ratio (%)	Fresh water rate (m ³ /d)	Sea water rate (m ³ /d)
#1	1,296	52.61	614.17	681.83
#2	5,315.33	9.58	4,806.12	509.21
#3	5,889.89	25.74	4,373.83	1,516.06
Total	12,501.22	21.65	9,794.71	2,706.51

3.3 기존 관정이 있는 경우의 3개 관정의 최적 양수량

본 가상사례에서는 기득수리권을 가진 기존 관정을 보호하면서 3개의 관정(가상사례 2와 동일 지점의)에서 최저 염도 기수 개발을 위한 최적 양수량 분포를 산정하고자한다. 이 가상사례는 기존 지하수 이용자의 수리권을 보장해야하는 경우 최적 개발 관정의 양수량 분포 및 해수 비율이 어떻

게 변화하는 지 살펴볼 수 있다. 고려된 기존 지하수 관정의 좌표는(160, -100)이다. 기존 관정의 양수량을 지정하기 위하여 기존 관정의 지하수 최대 개발 가능량을 평가한 결과 5,400m³/d의 담수 지하수 개발이 가능한 것으로 나타났다. 기수 개발 문제에서는 기존 관정의 양수량이 최대 개발 가능량의 1/3과 1/2인 1,800m³/d와 2,700m³/d인 두 경우를 고려하였다. Fig. 5에는 기존 관정이 단독으로 가동되는 경우에 여러 양수량에 대한 해수짜기 최대 침투지점의 위치를 도시하였다(해안선 쪽에서부터 1,800, 2,700 그리고 5,400m³/d에 대응).

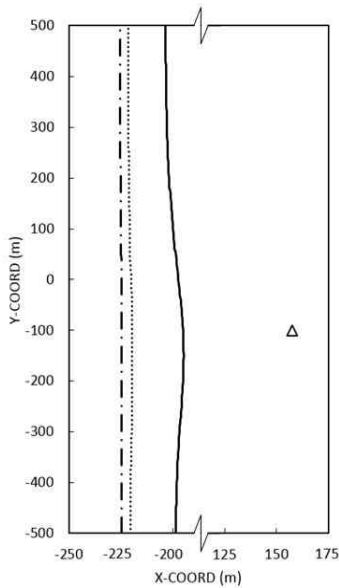


Fig. 5. Toes corresponding to 1,800, 2,700, and 5,400m³/d at the existing pumping well(Δ)

기존 관정의 해수침투를 방지하며 3개 기수 관정에서 최저 염도 지하수를 개발하기 위한 양수량 분포는 Table 3에 제시하였다. 결론적으로 3개 기수 관정에서 양수되는 물의 해수 비율은 기존 관정의 유량이 1,800m³/d일 때 34.9%, 2,700m³/d일 때 41.7%로 가상사례 2에서보다 크게 증가하였다. 그러나 4개 관정에 포획된 담수 지하수량은 9,989.9m³/d와 9,992.2m³/d로 가상사례 2에서보다 담수 포획율은 증가하였다. 이는 담수 지하수 포획에 3개 양수정보다 4개 양수정이 더 효과적임을 의미하는 것으로 직관적으로도 알 수 있다. 각각의 경우에 대한 해수짜기 최대 침투지점 위치는 Fig. 6에 도시하였다. 그림에서 파선은 기존 관정의 양수량이 1,800m³/d, 실선은 2,700m³/d 인 경우의 해수짜기 침투지점을 의미하며 관정의 양수량이 클 때 해수는 전반적으로 더 많이 침투하는 것으로 나타난다.

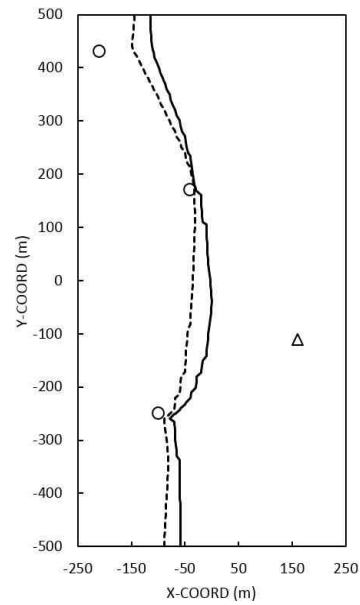


Fig. 6. Toes corresponding to existing well pumping (1,800, and 2,700 m³/d) and optimal brackish well(O) pumping rates

Table 3. Optimal brackish water pumping rates corresponding to two different pumping rates at the existing groundwater well.

Existing Pumping Well Rate (m ³ /d)	Well ID	Total pumping rate (m ³ /d)	Sea water ratio (%)	Fresh water rate (m ³ /d)	Sea water rate (m ³ /d)	Total Fresh Water Rate (m ³ /d)
1,800	#1	1036.80	65.01	362.77	674.03	9989.80
	#2	5833.73	22.70	4509.55	1324.18	
	#3	5630.69	41.08	3317.48	2313.20	
	Total	12501.22	34.49	8189.80	4311.41	
2,700	#1	518.40	70.35	153.71	364.69	9992.18
	#2	6352.13	30.76	4398.32	1953.81	
	#3	5630.69	51.34	2740.15	2890.54	
	Total	12501.22	41.67	7292.18	5209.04	

4. 결론

본 연구에서는 해안선을 통하여 바다로 유출되는 담수 지하수를 이용하여 역삼투 담수화 시설에 필요한 수량을 최저 염도로 충족시킬 수 있는 지하 염수 관정의 위치 및 양수량 분포를 산정할 수 있는 최적 전산설계모델을 개발하였다. 해안 지역에서 기득 수리권자의 지하수 관정이 있는 경우에 지하 염수가 개발되면 기존 사용자의 지하수 관정으로 해수가 침투할 수 있다. 따라서 개발된 모델은 지하 염수 관정의 최적 설계 시에 기존 지하수 관정을 해수 침투로부터 보호할 수 있도록 구성되었으며, 가상사례를 이용하여 모델의 적용성을 제시하였다.

지하 염수는 일반적으로 표류 해수보다 광물질의 농도가 높으며 대수층 및 지하수 흐름의 불확실성 등의 단점이 있으나 사전 조사를 통해서 대비될 수 있다. 해수 담수화의 경제성 제고를 위한 연구가 주로 설비 분야에 초점이 맞추어져 있는 실정에서 본 연구는 그동안 간과되어왔던 다른 측면의 수단을 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 지하 염수는 표류 해수에 비하여 생산비 절감 외에도 여러 가지 이점이 있으므로 역삼투 해수 담수화 시설의 경쟁력을 제고시키는 데 기여할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물 관리 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 15AWMP-B066761-03)에 의해 수행되었습니다.

References

- Akgul, D., Cakmakc, M., Kayaalp, N. and Koyuncu, I., (2008), Cost analysis of seawater desalination with reverse osmosis in Turkey, *Desalination*, 220(1), pp.123-131.
- Al-Karaghoul, A. and Kazmerski, L., (2012), Economic and Technical Analysis of a Reverse-Osmosis Water Desalination Plant Using DEEP-3.2 Software, *Journal of Environmental Science and Engineering*, A, 1, 318-328.
- Ang, W.L., Mohammad, A.W., Hilal, N. and Leo, C.P., (2015), A review on the applicability of integrated/hybrid membrane processes in water treatment and desalination plants, *Desalination*, 363, pp.2-18.
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*. McGraw Hill.
- Cooley, H., Ajami, N. and Heberger M., (2013), Key issues in seawater desalination in California - marine impacts, Pacific Institute, Oakland, California, USA.
- Ettouney, H.M., El-Dessouky, H.T., Faibish, R.S. and Gowin, P.J., (2002), Evaluating the economics of desalination, *Chemical Engineering Progress*, 98(12), pp.32-40.
- Goldberg, D.E., (1989) *Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison Wesley.
- Greenlee, L.F., Lawler, D.F., Freeman, B.D., Marrot, B. and Moulin, P., (2009), Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges, *Water research*, 43(9), pp.2317-2348.
- Han, S.Y., Hong, S.H., Park, N., (2006), Distribution of coastal ground water discharge from surficial aquifers of major river districts, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 1B, 1-6.
- Huyakorn, P.S., Park, N., and Wu, Y.S. (1996). "Multiphase approach to the numerical solution of a sharp- interfaces saltwater intrusion problem." *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 1, pp 93-102.
- Jeong, S., Naidu, G., Vollprecht, R., Leiknes, T. and Vigneswaran, S., (2016), In-depth analyses of organic matters in a full-scale seawater desalination plant and an autopsy of reverse osmosis membrane, *Separation and Purification Technology*, 162, pp.171-179.
- Karagiannis, I.C. and Soldatos, P.G., (2008), Water desalination cost literature: review and assessment, *Desalination*, 223(1), pp.448-456.
- Kim, S.J., Lee, Y.G., Cho, K.H., Kim, Y.M., Choi, S., Kim, I.S., Yang, D.R. and Kim, J.H., (2009), Site-specific raw seawater quality impact study on SWRO process for optimizing operation of the pressurized step, *Desalination*, 238(1), pp.140-157.
- Kim, T.S. and Park, H.D., (2016), Lauroyl arginate ethyl: An effective antibiofouling agent applicable for reverse osmosis processes producing potable water, *Journal of Membrane Science*, 507, pp.24-33.
- Klinko, K.A., Light, W.G. and Cummings, C.M., (1985), Factors influencing optimum seawater reverse osmosis system designs, *Desalination*, 54, pp.3-18.
- Lattemann, S. and Hopner, T., (2008), Environmental impact and impact assessment of seawater desalination, *Desalination*, 220(1), pp.1-15.
- Malaeb, L. and Ayoub, G.M., (2011), Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review, *Desalination*, 267(1), pp.1-8.
- Miller J. E., (2003), *Review of Water Resources and Desalination Technologies*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM. 49, SAND Report 2003-0800.
- Mudgal, A. and Davies, P.A., (2016), A cost-effective steam-driven RO plant for brackish groundwater, *Desalination*, 385, pp.167-177.
- Park, N., Park, J., Mun, Y., Kim, J., (2011) Cost reduction for small-scale desalination plants, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 10, 809-817.
- Penate, B. and Garcia-Rodriguez, L., (2012), Current trends and future prospects in the design of seawater reverse osmosis desalination technology, *Desalination*, 284, pp.1-8
- Qi, S., Wang, R., Chaitra, G.K.M., Torres, J., Hu, X. and Fane, A.G., (2016). Aquaporin-based biomimetic reverse osmosis membranes: Stability and long term performance, *Journal of Membrane Science*, 508, pp.94-103.
- Qureshi, B.A. and Zubair, S.M., (2015), Exergetic analysis of a brackish water reverse osmosis desalination unit with various energy recovery systems, *Energy*, 93, pp.256-265.
- Reddy, K.V. and Ghaffour, N., 2007, Overview of the cost of desalinated water and costing methodologies, *Desalination*, 205(1), pp.340-353.

- Sackinger, C.T., (1982), Energy advantages of reverse osmosis in seawater desalination, *Desalination*, 40(3), pp.271-281.
- Shi, L., Cui, L., Park, N. and Huyakorn, P.S., (2011) Applicability of a sharp-interface model for estimating steady-state salinity at pumping wells-validation against sand tank experiments, *J. of Contaminant Hydrology*, 124, pp.35-42.
- Wilf, M. and Klinko, K., (2001), Optimization of seawater RO systems design. *Desalination*, 138(1), pp.299-306.
- Younos, T. and Tulou, K.E., (2005), Overview of desalination techniques, *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 132(1), pp.3-10.
- Younos, T., (2003), The economics of desalination, *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 132, pp. 39-45.