

## 경계면 수치 모델을 이용한 해안 지역 이중 양수정의 해수침투 저감 효과

### Effectiveness of Double Negative Barriers for Mitigation of Sewater Intrusion in Coastal Aquifer: Sharp-Interface Modeling Investigation

정 은 태\* / 이 성 준\*\* / 이 미 지\*\*\* / 박 남 식\*\*\*\*

Jung, Eun Tae / Lee, Sung Jun / Lee, Mi Ji / Park, Namsik

#### Abstract

Saltwater pumping method can be used to mitigate saltwater intrusion in coastal aquifers. However, the saltwater pumping well may discharge large freshwater along with saltwater, thereby wasting precious resources. A double negative barrier was proposed: an inland well to capture freshwater and a saltwater well near the coastline to pump saltwater. A previous study analyzed effects of double negative barriers in dispersion-dominated coastal aquifers and determined the critical pumping rate at the saltwater well which minimized the saltwater ratio at the freshwater well. However, the study resulted in 1~15% of saltwater ratios, which were too high, for example, for drinking water standards. This study analyzed cases that were considered in the previous study, but for advection-dominated cases, and found that freshwater with sufficiently low saltwater ratios could be developed at the freshwater well. In addition, for optimal groundwater management of a watershed not only the minimum saltwater ratio at the freshwater well but also the least freshwater wasted at the saltwater well must be pursued.

**keywords** : double negative barrier, saltwater pumping rate, freshwater pumping rate, management of coastal groundwater

#### 요 지

해안지역에서 지하수 해수침투 저감을 위하여 해수 양수 관정을 가동할 때 해수정으로 많은 양의 담수가 낭비되는 사례가 있다. 해수 침투를 저감시키고 낭비되는 담수를 유용하게 활용하기 위하여 이중 양수정이 제안된 바 있다. 이중 양수정은 해수 양수를 위한 해안 쪽의 해수정과 담수 양수를 위한 내륙 쪽의 담수정으로 구성된다. 선행 연구에서는 담수정의 해수 비율을 최소화시키기 위한 해수정의 양수량을 산정하였으나 담수정의 해수비율이 1~15% 범위로 나타나 담수정에서 담수를 확보하기 어렵다고 판단하였다. 본 연구에서는 이송이 지배적인 상황에서 이중 양수정의 효과를 분석하였다. 연구 결과 담수정에서 저염도 지하수를 확보할 수 있음을 밝혔다. 또한 해안 유역 차원의 적정 지하수관리를 위해서는 담수정의 해수비율을 최소화하는 것 외에도 해수정으로 낭비되는 담수량을 최소화하는 것도 함께 고려해야 한다.

**핵심용어** : 이중 양수정, 해수 양수량, 담수 양수량, 해안 지하수관리

\* 동아대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (e-mail: dkwkro123@nate.com)

Ph.D Program, Dept. of Civil Eng., Dong-A University, Busan 604-714, Korea

\*\* 동아대학교 건설기술연구소 전임연구원 (e-mail: bradjun@gmail.com)

Researcher., Research Institute of Construction Technology and Planning., Dong-A University, Busan 604-714, Korea

\*\*\* 동아대학교 토목공학과 학부과정 (e-mail: ecoleyyy@hanmail.net)

Undergraduate Program, Dept. of Civil Eng., Dong-A University, Busan 604-714, Korea

\*\*\*\* 교신저자, 동아대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: nspark@dau.ac.kr, Tel: 82-51-200-7629)

Corresponding Author, Professor., Dept. of Civil Eng., Dong-A University, Busan 604-714, Korea

## 1. 서 론

내륙 지역의 지하수 개발 시와 비교할 때 해안 지역의 지하수 개발에는 해수침투 현상에 대하여 추가적 고려가 필요하다. 알려진 바와 같이 해안 지역의 과잉 양수는 지하수 계로 해수침투를 야기시켜 유역의 대수층의 염분량을 증가시키고 취약한 관정에서는 해수침투로 인하여 우물을 포기해야 하는 사태를 일으킨다. 따라서 해안지역에서는 해수침투를 허용 가능한 위치까지로 국한시키는 유역 차원의 적정 지하수 개발이 필요하지만 지역의 지하수 수요가 적정 개발량을 초과하는 등의 경우에는 침투된 해수의 퇴치를 위한 적극적인 대책을 적용해야만 하는 경우도 있다.

해수의 침투를 방지하는 방법에는 여러 가지 대안이 고려될 수 있다. 첫째, 지하수 개발량을 줄여서 해수침투 방지에 요구되는 최소 지하수위를 회복시키는 것이다. 그러나 당초에 해수침투 원인을 제공했던 배경과 상반된 조치로 다른 수원이 확보되지 않는다면 현실적으로 불가능한 대책이 된다. 둘째, 담수를 대수층에 인공 함양시켜 해수의 내륙 침투를 방지할 수 있다. 해수빼기 퇴치를 위한 인공 함양 사례 중 가장 널리 알려진 시설은 1960년대에 시작된 미국 남캘리포니아 지방에 있다(Herndon, 2002; Bloetscher et al., 2005). 셋째, 해수빼기에서 해수를 양수하여 내륙으로 침투하는 해수를 차단하는 방법이 있다. Kim (2007)은 실험실에서 모래상자 수리모형실험으로 염수 양수를 통한 염수빼기 제어 실험을 수행하고 수치모델(경계면 모델 및 분산 모델)의 적용성을 조사하였다. 동 연구에서 경계면 모델로 양수정의 염수비율을 모의할 수 있음을 보인 바 있다. Suh et al. (2010)은 실험실 모래상자 수리모형실험을 통해 염수침투가 일어나지 않는 지하수의 최적 양수량에 대한 실험 연구를 수행하였다. 해수 양수방법은 논리적으로는 단순한 방법이나 해수와 함께 담수가 낭비되는 경우 해수침투를 더욱 촉진시킬 수 있다는 위험이 있다. 본 연구에서 대상으로 하는 이중 양수정은 해수 양수방법의 일종이며 다음 단락에서 세부적으로 다루고자 한다. 넷째, 그라우팅 등을 통한 물리적 차수벽이 사용될 수 있다(Kaleris and Ziogas, 2013). 차수벽은 다른 대안에 비하여 해수침투 차단의 효과가 가장 우수하지만 비용이 크다는 단점을 가지고 있다. 상술된 방법들 외에 전기적 방법을 이용하여 해수침투 차단 연구가 실험실 모래상자 모형에서 수행된 바 있다(Barbieri et al., 1988).

Sherif and Hamza (2001)는 담수-해수 천이대에서 기수를 양수하여 해수침투를 저감시키는 방안에 대하여 연

직 2차원 수치모델링 연구를 수행하였다. 그러나 기수를 양수하므로 상당한 양의 담수가 낭비되는 것으로 나타났다. Kacimov et al. (2009)은 해안선 인근에서는 해수를 양수하고 내륙에서는 담수를 양수하는 이중 양수정(double negative barrier)의 해수침투 저감효과에 대한 연직 2차원 수치모델을 이용하여 분석하였다. 이중 양수정은 해수 양수를 위한 관정(해수정) 하나만 가동할 때 상당한 양의 담수가 낭비되는 단점을 보완하기 위하여 해수정의 내륙에서 별도의 관정으로 담수를 양수하여(담수정) 해수정으로 유입되는 담수량을 축소시키려는 목적으로 제안되었다. 이중 양수정의 이상적 결과는 담수정과 해수정 사이에 정체점을 형성시켜 해수정과 담수정의 포획구간(capture zone)을 분리시키고, 해수정에서는 해수만, 담수정에서는 담수만 양수하는 것이라 할 수 있다. 연직 2차원 단면에서는 두 개 관정의 양수량을 조절하여 소기의 목적을 달성할 수 있었다. Pool and Carrera (2010)는 3차원 영역에서 이중 양수정의 효과를 조사하기 위하여 수치모델링 연구를 수행하였다. 동 저자들은 3차원 영역에서는 확산이 지배적인 경우에 해수 양수에도 불구하고 담수정의 해수농도가 높게 나타나서 해수침투 차단 효과가 2차원 연직단면에서보다 낮은 것으로 나타난다고 보고하였다.

그런데 본 논문의 저자들은 두 가지 사항 때문에 Pool and Carrera (2010)가 내린 결론이 일반화되기 어렵다고 판단하였다. 첫째, 해수정으로 유입되어 낭비되는 담수량에 대한 자료가 제시되지 않았다. 전술된 바와 같이 이중 양수정은 단일 해수정을 가동할 때 해수로 오염되어 낭비되는 담수를 오염없이 확보하기 위하여 제안되었는데 담수정으로의 해수 유입량에 대한 결과는 제시되고 있으나 해수정으로 유입되는 담수량에 대한 결과는 제시되고 있지 않아 동 연구의 의미를 퇴색시키고 있다. 둘째, 고려된 이중 양수정 시나리오 중 담수정으로 유입되는 해수 비율이 적게는 1%, 많게는 15%에 달하여 당초 연구 목적으로 제시된 해수로 오염되지 않은 담수 확보의 가능성이 낮다는 결론이 제시되었다. 그러나 이러한 결과는 선행 연구가 확산이 지배적인 경우에 대하여 수행되었고 추후 언급될 매개변수의 범위가 적당하지 못하여 도출된 결과로 나타났다.

본 연구에서는 이송이 지배적인 경우에 이중 양수정의 효과를 분석하였다. 경계면 모델은 담수와 해수 사이의 확산을 무시하고 선명한 경계를 가정하므로 이송이 지배적인 해안 지하수 흐름 상황을 모의하는 데 적절하다. 또한 본 연구에서는 선행 연구의 미비점에 대한 분석 및 보완을 통하여 이중 양수정의 효과에 대한 포괄적 분석을 시도하였다. 연구결과 이중 양수정을 적절히 설치하고 운

영하면 담수 관정만 가동할 때보다 최대 2~4배 가량의 지하수를 추가 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

## 2. 경계면 지하수 흐름모델

담수와 해수 사이의 천이대의 두께가 크지 않아 무시될 수 있을 때에는 두 유체가 서로 섞이지 않고 선명한 경계로 구분될 수 있다는 가정 하에 유도되는 모델을 경계면 모델이라 한다. 이러한 경우 해수침투 현상은 담수와 해수의 흐름에 대한 두 개의 지하수 흐름 방정식으로 구성될 수 있다(Bear, 1979).

$$\nabla \cdot (b_f \mathbf{K}_f \cdot \nabla h_f) = b_f S_{s_f} \frac{\partial h_f}{\partial t} - \theta \frac{\partial \xi}{\partial t} - Q_f \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (b_s \mathbf{K}_s \cdot \nabla h_s) = b_s S_{s_s} \frac{\partial h_s}{\partial t} + \theta \frac{\partial \xi}{\partial t} - Q_s \quad (2)$$

여기서,  $\nabla$ 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,  $\theta$ 는 유효공극률,  $\xi$ 는 경계면의 표고,  $Q_f$ 와  $Q_s$ 는 양수 및 함양 등이 고려되는 각 유체의 체적흐름률이다. 담수와 해수의 두께는 다음의 관계를 만족한다.

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

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.

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

여기서,  $\rho_f$ 와  $\rho_s$ 는 각 유체의 밀도를 나타내며, Eq. (4)는 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.

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

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

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

여기서,  $L$ 은 관정 스크린의 총 길이,  $L_f$ 는 관정 스크린 상단에서 해수-담수 경계면까지의 길이,  $L_s$ 는 해수-담수 경계면에서 관정 스크린 바닥까지의 거리이다. 따라서 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 각각 담수와 염수의 염분 농도이다. 본 연구에서는 상술된 지배방정식을 유한요소법으로 이산화한 수치모델(Huyakorn et al., 1996)을 이용하였다. 본 수치모델은 해석해가 알려진 다양한 경우에 대하여 검증되었으며 실제 광역 유역의 해수침투 문제에 대하여 적용된 바 있다(Park et al., 1994).

## 3. 문제의 정의

Pool and Carrera (2010)의 선행연구에서는 지하수흐름과 용질수송방정식을 이용하였는데 영역의 규모(두께 50m)에 비하여 큰 값의 확산지수(10m)가 사용되었다. 이는 수치모델의 수렴에는 유리하지만 염분의 확산 현상이 지배적인 상황을 나타낸다. Pool and Carrera (2010)의 선행연구에서 고려한 대수층 특성은 다음과 같다: 해안선 방향 길이 500m, 내륙 방향 500m의 정사각형 유역에 존재하는 두께 50m의 대수층. 정사각형의 경계 중 해안선에 수직한 두 경계와 대수층의 바닥은 불투수경계조건이 적용되고 해안선에서 지하수위는 평균해수면 수위(0m)가, 해수가 유입되는 경우 농도가 해수농도라는 조건이, 지하수가 유출되는 경우 농도의 경사가 0이라는 경계조건이 사용되었다. 해안선과 평행한 내륙 측 경계에는 담수가 균일한 유량(648 m<sup>3</sup>/d=7.5 kg/s)으로 유입된다고 지정되었다.

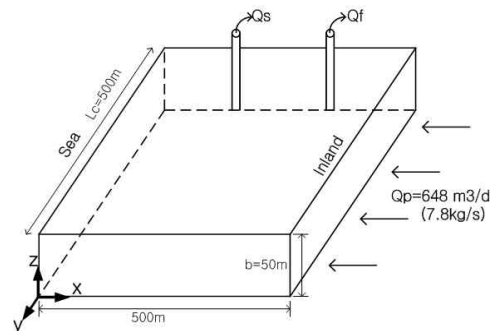


Fig. 1. Hypothetical Aquifer for Analyzing a Double Negative Barrier

대수층의 투수계수는 10.6 m/d, 유효공극률은 0.3으로 지정되었다. 해수의 밀도는 1,027 kg/m<sup>3</sup>, 담수의 밀도는 1,000 kg/m<sup>3</sup>이다. 담수정은 해안선에서 300 m 위치에, 해수정은 20 m, 40 m, 55 m, 70 m, 90 m 지점에 설치되는 경우를 분석하였다. 담수정에는 400 m<sup>3</sup>/d (=4.63 kg/s)의 양수량이, 해수정에는 0에서 64.8 kg/s의 양수량이 적용되었다.

본 연구에서는 먼저 선행 연구에서 고려되었던 매개변수(확산지수 제외)에 대한 경계면 모델의 결과를 도출하고 선행 연구결과와 비교하였다. 그리고 이중 양수정의 효과를 높이기 위하여 주요 매개변수의 범위를 조정된 사례에 대한 모의분석을 시행하였다.

조정 대상 매개변수로 담수정의 위치와 양수량을 선정하였으며 조정된 범위는 다음과 같다: 담수정의 위치로 300 m와 400 m의 두 지점을 고려하였다. 또한 담수정의 양수량을 Pool and Carrera (2010)의 선행연구의 4.63 kg/s 보다 대폭 축소된 0~2.2 kg/s로 조정하였다. 해수정의 양수량도 0~18 kg/s의 축소된 범위로 지정하였다.

## 4. 모의 결과 및 분석

### 4.1 선행 모의 사례에 대한 분석

Pool and Carrera (2010)의 선행연구에서는 담수정과 해수정이 해안선으로부터 각각 300 m와 90 m에 위치한 경우 담수정의 해수 비율의 시간 변화에 대하여 제시하였다 (Fig 2(a)). 그림에서 상태 I(0~50년)은 담수정만 가동시키는 상황을, 상태 II는 50년 시점에 해수정을 가동한 이후의 상황을 나타낸다. 담수정의 해수비율은 대략 30년 이후 정상상태에 도달한 것으로 나타나며 해수정의 가동 이후 담수정의 해수비율은 급격히 감소하나 짧은 기간 이후 다시 증가하여 상태 I의 정상상태 해수비율보다는 낮지만 새로운 평형상태의 해수비율에 도달한다는 결과를 보인다.

본 연구에서 사용된 경계면 모델은 정성적으로 유사한

결과를 산출하였다(Fig 2(b)). 상태 I과 II에서 평형상태에 도달하는 시간은 두 연구에서 유사하게 나타났으며 해수정 가동 이후 해수비율의 거동도 유사하게 나타났다. 그러나 주요한 차이점은 경계면 모델에서 담수정의 정상상태 해수비율이 2배 이상 크게 나타났으며, 부정류 상태의 해수비율도 높게 나타난 것이다. 이러한 차이점의 원인은 확산이 지배적인 경우보다 이류가 지배적인 경우에 해수가 더 많이 침투하기 때문이다(Segol, 1994).

당초에 이중 양수정은 해수정에서 낭비되는 담수를 줄이기 위하여 제안되었다. 그런데 Pool and Carrera (2010)의 선행연구에서는 해수정의 담수비율에 대한 결과가 제시되지 않았다. 본 연구에서는 경계면 모델에서 산정된 해수정의 담수비율을 제시하였다(Fig 2(c)). 해수정에서는 염수비율이 60~75% 정도에 불과해 양수량의 25~45%는 담수임을 의미한다.

선행 연구에서는 담수정의 해수비율을 최소화시키는 해수정의 양수량을 평가하는 데 목표를 두고 해수정의 위치와 양수량을 변화시키며 상태 II의 담수정(위치와 양수량은 고정)의 정상상태 해수비율을 조사하고 도시하였다 (Fig 3(a)). 고려된 해수정의 위치는 전술된 바와 같이 최소 20 m에서 최대 90 m까지, 양수량은 0에서 64.8 kg/s의 범위이다. 선행 연구에서는 해수정의 위치를 모델링 영역의 길이 500 m로 무차원화 하였다. 따라서 해수정의 무차원 위치는 0.04~0.18의 범위이다. Fig. 3(a)에는 가장 작은 담수정의 해수비율에 대한 해수정의 양수량이 심볼(solid dot)로 표시되었다. 본 연구의 경계면 모델에서 도출된 담수정의 정상상태 해수비율은 Fig 3(b)에 제시하였다. 두 결과를 비교하면 경계면 모델은 확산모델과 정성적으로 유사한 결과를 제시했다고 판단된다. 또한 담수정에서 최소 해수비율을 산출하는 해수정의 양수량도 두 모델에서 유사한 값으로 나타났다. 그러나 여기서도 경계면 모델의 해수 비율이 확산모델에서보다 더 크게 나타났다.

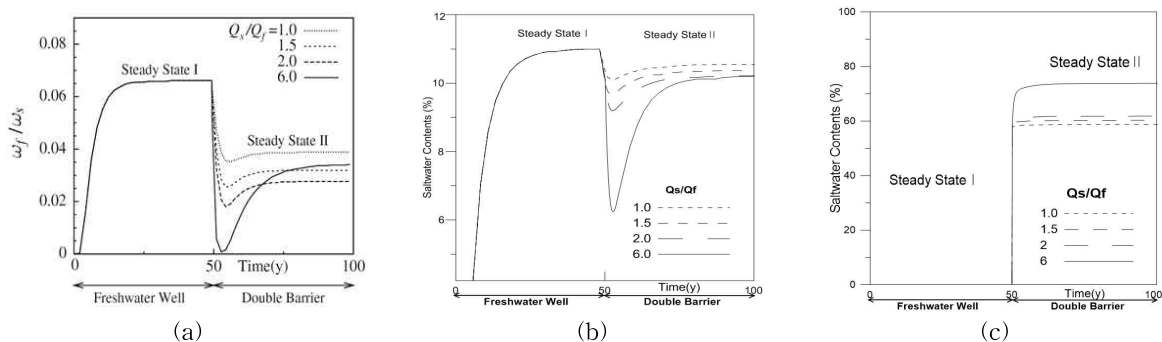


Fig. 2. Breakthrough Curves (a) Seawater Ratio at the Freshwater Well (Pool and Carrera, 2010), (b) Seawater Ratio at the Freshwater Well (this work), (c) Seawater Ratio at the Seawater Well (this work)

선행 연구에서 제시되지 않았던 해수정의 담수 낭비량을 평가하기 위하여 Fig. 3(c)에는 해수정의 해수 비율을 도시하였다. 최소값을 가지는 담수정의 해수비율과는 다르게 해수정의 해수비율은 양수량에 비례하여 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 해수 비율이 증가(즉, 담수 비율이 감소)하는 것이 바람직하다고 보일 수 있으나 양수량의 증가에 따라 낭비되는 담수량도 증가하므로 유역의 지하수 자원 관리 차원에서는 낭비되는 담수량이 적은 경우가 더 바람직하다고 할 수 있다.

Pool and Carrera (2010)의 선행연구에서 고려된 사례에 대한 확산모델과 경계면모델의 비교를 통하여 확산이 지배적인 경우(Pool and Carrera (2010)의 선행연구)와 이류가 지배적인 경우(본 연구)에 대한 이중 양수정의 효과를 비교하였다. 고려된 사례에서는 경계면 모델이 확산 모델 보다 해수 비율을 더 높게 산정하였다. 실제 지하수 흐름에 대한 적용 시에 확산지수를 파악하는 것이 매우 어렵고 불확실성이 크다는 점을 고려하면 경계면 모델의 사용이 더 안전하다고 할 수 있다.

#### 4.2 이중 양수정의 효과에 대한 재 고찰

선행 연구에서는 해수정의 해수 양수에도 불구하고 담수정의 최소 해수 비율이 1%에서 12%까지 검출되어 이

중 양수정의 효과를 기대하기 어렵다고 결론을 내렸다. 본 연구에서는 이류가 지배적인 사례를 다루었지만(확산이 지배적이지만) 선행 연구에서 사용된 매개변수의 범위는 이중 양수정의 효과를 정확하게 파악하기 어렵다고 판단하였다. 첫째, 해안선에서 300 m 거리에 설치된 담수정을 고려하였는데 주어진 대수층의 수리수문지질 조건에서는 자연상태에서도 해수침투가 담수정 인근까지 침투할 수 있으므로 담수 확보를 위한 담수정의 위치로 적합하지 않다. 경계면 모델 이론에서 자연 상태의 해수침투 거리는 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$x = \frac{s(s-1)Kd^2}{2q} \quad (9)$$

여기서  $s$ 는 해수의 비중(1.027),  $K$ 는 투수계수(10.6 m/d),  $d$ 는 대수층의 두께(50 m),  $q$ 는 단위 폭당 담수 유출량(1.296 m<sup>2</sup>/d)이다. 그러면 지하수 양수 전 자연 상태의 해수침투 거리는 283.5 m로 담수정의 위치에 근접해 있다. 둘째, 지나치게 과도한 양수량이 담수정에 적용되었다. 경계면 모델로 산정한 300 m 지점의 담수정에서 양수량별 해수 비율을 Fig. 4(a)에 도시하였다. 경계면 모델에 따르면 양수량이 0.12 kg/s를 초과하면 양수정으로 해수가 침투하는 것으로 나타났다. Pool and Carrera (2010)의 선행

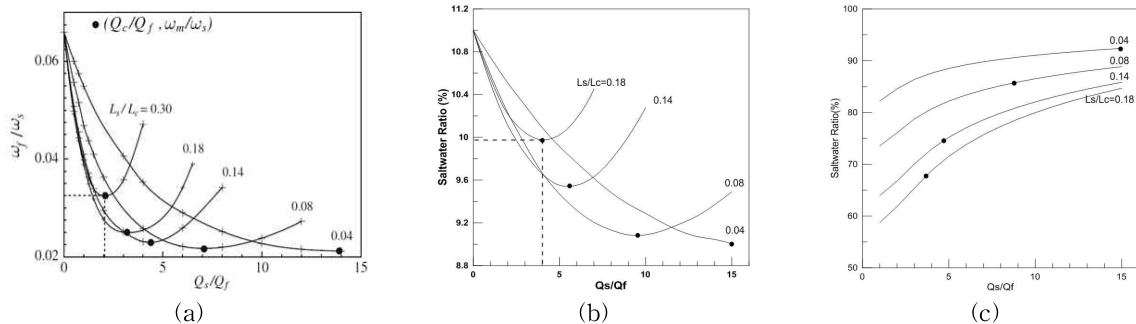


Fig. 3. Steady State Seawater Ratios at Various Seawater Pumping Rates, (a) at the Freshwater Well (Pool and Carrera, 2010), (b) at the Freshwater Well (this work), (c) at the Seawater Well (this work)

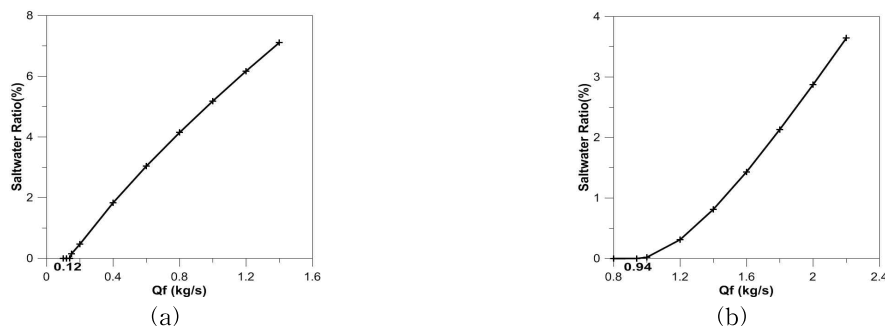


Fig. 4. Seawater Ratios for Various Pumping Rates for a Single Well at (a) 300 m, (b) 400 m

연구에서 고려된 4.63 kg/s(=400 m<sup>3</sup>/d)는 동 위치의 적정 양수량을 20배 이상 초과하는 양수량이다.

따라서 본 연구에서는 축소된 담수정 양수량 범위와 내륙으로 이동시킨 담수정에 대한 이중 양수정의 효과를 분석하였다. 축소된 담수정의 양수량 범위는 0~2kg/s, 위치는 300m와 400m의 두 경우를 고려하였다. 400m 지점의 담수정이 단독 가동될 때 양수량 별 해수비율은 Fig 4(b)에 도시하였다. 해수정의 위치는 선행 연구에서 고려되었던 20m, 55m, 그리고 90m의 3개 지점을 대상으로 하였다. 해수정의 양수량은 0~15kg/s의 범위에 대하여 고려하였다.

Fig. 5에는 담수정이 300m 지점에 설치된 경우 담수정(Fig. 5(a)~(c))과 해수정(Fig. 5(d)~(f))의 해수 비율을 등비율선으로 도시하였다. 도시된 담수정의 해수비율은 최소 0.3%에서 최고 6% 정도의 비율로 나타난다. 우리나라 TDS 음용수 수질 기준은 500 mg/l이다. 해수의 TDS

를 35,000 mg/l로 고려할 때 허용 가능 해수 비율은 1.43%이다. Fig. 5 (a)~(c)에는 과선으로 도시된 1.4% 선의 아래 부분에 해당하는 담수정과 양수정의 양수량 조합에서는 담수정에서 음용수 기준을 충족하는 담수가 확보될 수 있음을 의미한다. 해수정의 위치와 양수량에 따라 상이하지만 최대 0.5~0.6 kg/s 정도의 음용수 TDS 기준을 만족시킬 수 있는 담수 확보가 가능한 것으로 나타난다. 이는 선행 연구에서 선택한 담수정의 위치와 양수량의 조합이 그다지 적절하지 못했음을 의미한다.

해수정이 해안선에 인접한 경우(Fig. 5(a))에는 주어진 담수정의 양수량에 대해서 해수정의 양수량이 증가할수록 담수정의 해수 비율이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 내륙에 위치한 해수정의 경우(Fig. 5(c))에는 해수정 양수량이 증가하면 담수정의 해수비율이 감소했다가 다시 증가하는 것으로 나타난다. 따라서 해수정의 위치에 따라 담수정의 해수비율 거동이 상이함을 알 수 있다.

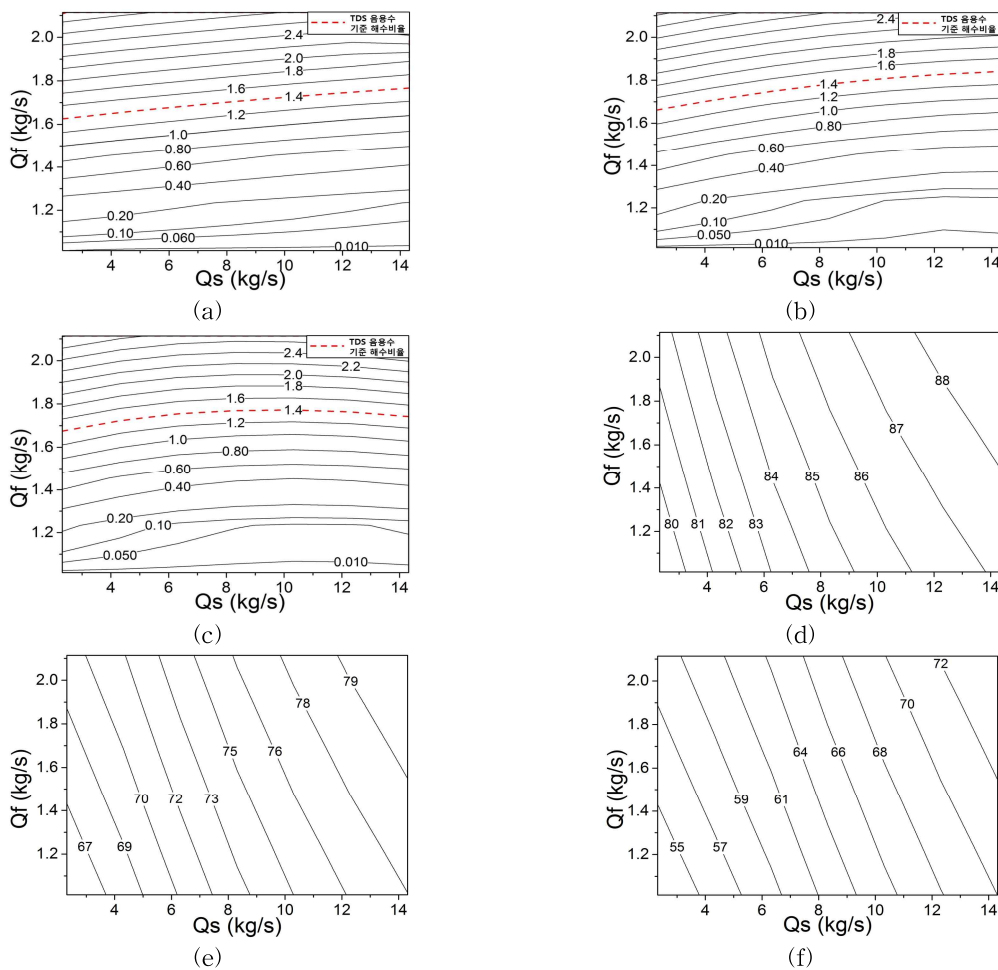


Fig. 5. Seawater Ratios (%) of Freshwater Well (a)~(c), at 300 m, and of Saltwater Well (d)~(f). Saltwater Well Locations: (a) and (d) at 20 m, (b) and (e) at 55 m, and (c) and (f) at 90 m

해수정의 해수비율은 Fig. 5(d)~(f)에 도시하였다. 예상할 수 있다시피 해수정의 해수 비율은 해안에 가까울수록 더 높게 나타난다. 주어진 담수정의 양수량에 대하여 해수정의 위치에 관계없이 해수정의 양수량이 증가하면 해수정의 해수 비율은 증가하지만 해수정으로 유출되는 담수량은 더 크게 증가하므로 담수 지하수 자원의 관리 관점에서 해수정에서 적은 양수량을 적용하는 것이 더 바람직하다. 따라서 해수정이 해안에 인접한 경우 해수정의 양수량을 크게하는 것이 담수정의 담수량 확보에 유리하지만 해수정에서 낭비되는 담수량을 고려하면 담수정의 담수량과 해수정의 담수량 간의 균형을 찾는 것이 중요하다.

담수정을 해안선으로부터 400m 거리에 설치하는 경우 대한 담수정과 해수정의 해수비율을 Fig. 6에 도시하였다. 담수정의 해수비율은 300m 지점의 경우보다 전반적으로 약 50% 정도 감소하며 이에 따라 TDS 음용수 기준을 충족하는 담수량도 약 1.7~1.8kg/s 정도로 크게 증가하였다(Fig.

6(a)~(c)). 해수정의 해수비율은 300m 지점의 담수정의 경우와 거의 유사한 분포를 나타내고 있다(Fig. 6(d)~(f)).

## 5. 결 론

해안 지역 대수층에서 해수침투 저감을 위하여 Kacimov et al. (2009)이 제안하였던 이중 양수정(double negative barrier)을 3차원 확산모델을 이용하여 연구한 Pool and Carrera (2010)는 담수정의 해수비율을 최소화시킬 수 있는 해수정의 양수량에 대하여 연구하였으나 대부분의 사례에서 담수정의 해수 비율이 높게 나타나 이중 양수정의 효과가 그다지 크지 않다고 보고한 바 있다. 선행 연구자들은 확산이 지배적인 지하수 흐름을 다루었다. 본 연구에서는 이송이 지배적인 경우를 모의할 수 있는 경계면 모델을 이용하여 이중 양수정의 효과를 분석하였다. 두 연구결과를 비교한 결과 경계면 모델에서 해수 비율이 2배 가까이 높

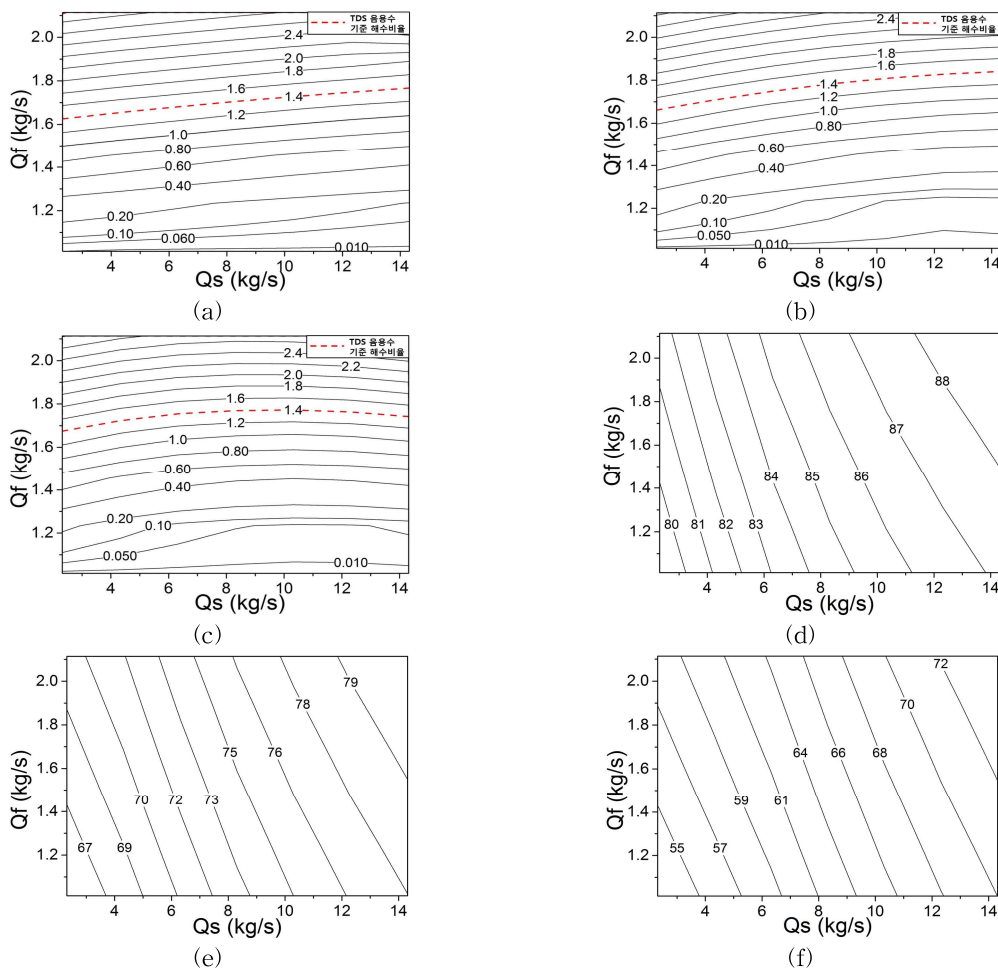


Fig. 6. Seawater ratios (%) of freshwater well (a)~(c), at 400 m, and of saltwater well (d)~(f). Saltwater well locations: (a) and (d) at 20 m, (b) and (e) at 55 m, and (c) and (f) at 90 m.

게 나타나 선행 연구에서 고려된 매개변수의 범위에서는 이송이 지배적인 경우 역시 담수 확보가 불가능한 것으로 나타났다. 그러나 조정된 매개변수의 범위에 대해서는 담수정의 담수 확보가 가능한 것으로 나타났다. 선행 연구에서는 담수정과 개발 전 자연 상태 해수빼기 사이의 간격이 작고, 과도한 양수량을 적용하였기 때문에 담수 확보에 실패한 것으로 판단되어 적용된 매개 변수의 범위가 그다지 적절치 못했다 판단된다. 또한 선행 연구에서 보고되지 않았던 해수정으로 유입되는 담수 낭비량을 분석하고 선행 연구에서 추정한 담수정의 최소 해수비율이 지역의 최적 지하수 관리 대안을 의미하지 않을 수 있음을 제시하였다.

본 연구에서 밝힌 이중 양수정의 효과는 다음과 같다. 이중 양수정을 이용하여 해수침투를 저감시키고 담수정에서 담수를 확보할 수 있다. 고려된 사례에서는 이중 양수정으로 부터 확보할 수 있는 지하수 량이 담수정만 가동할 때보다 2배에서 4배 가량 증가하는 것으로 나타났다. 다만 담수정은 지하수 개발 이전 자연 상태의 해수빼기 침투 지점의 내륙에 위치해야하며 그 거리가 증가할수록 이중 양수정의 담수 확보량이 증가한다. 그러나 담수정의 양수량이 지나치게 과도하면 해수정을 가동해도 담수정의 해수비율을 낮추기 어렵다. 담수정의 해수 비율은 해수정의 위치에 따라 상이하게 나타나므로 해수정의 위치 또한 이중 양수정의 중요한 인자로 나타난다. 담수정의 해수 비율을 낮추기 위하여 해수정의 양수량을 증가시키면 해수정으로 유입되어 낭비되는 담수량이 크게 증가하므로 이중 양수정의 설계 시에는 담수정의 해수 비율 뿐 아니라 해수정의 담수 낭비량도 중요한 인자로 고려되어야한다.

## 감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(세부과제명: 해수면 상승에 따른 지하수 염분 침투 및 농경지 염류화 평가, 세부과제번호: PJ010475022014)의 지원에 의해 작성되었습니다.

## References

Barbieri, G., Barrocu, G., and Ranieri, G. (1988). "Salt-water intrusion control with electric barriers." *Proc. 10th SWIM*, pp. 231-237.

Bear, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*. McGraw Hill.

Herndon, R. (2002). 35 years of controlling seawater

intrusion in Orange County, California Report on the facilitated meeting on The most promising methods of stopping saltwater intrusion. Anonymous, Georgia Geologic Survey. Atlanta, GA, United States.

Huyakorn, P.S., Park, N., and Wu, Y.S. (1996). "Multi-phase approach to the numerical solution of a sharp-interfaces saltwater intrusion problem." *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 1, pp 93-102.

Kacimov, A.R., Sherif, M.M., Perret, J.S., and Al-Mushikhi, A. (2009). "Control of sea-water intrusion by salt-water pumping: Coast of Oman." *Hydrogeology Journal*, Vol. 17, No. 3, pp. 541-558.

Kaleris, V.K., and Ziogas, A.I. (2013). "The effect of cutoff walls on saltwater intrusion and groundwater extraction in coastal aquifers." *Journal of Hydrology*, Vol. 476, pp. 370-383.

Kim, S.Y. (2007). *The Technique of controlling Saltwater Intrusion Using Saltwater Pumping*. Mater dissertation, Dong-A University, pp. 11-16.

Park, N.S., and Wu, Y.S. (1994). "Evaluation of vertical leakage schemes for multilayer sharp-interface salt-water intrusion model." Proc. of X International Conf. on Computational Methods in Water Resources, A. Peters et al. eds, Kluwer Academic Publisher.

Pool, M., and Carrera, J. (2010). "Dynamics of negative hydraulic barriers to prevent seawater intrusion." *Hydrogeology Journal*, Vol. 18, No. 1, pp. 95-105.

Segol, G. (1994). *Classic Groundwater Simulations*, PTR Prentice Hall.

Sherif, Mohsen M., and Khaled I. Hamza. (2001). "Mitigation of Seawater Intrusion by Pumping Brackish Water." *Transport in Porous Media*, Vol. 43, No. 1, pp. 29-44.

Suh, S.K., Oh, C.M., Kim, W.I., and Ho, J.S. (2010). "Experimental Study of Freshwater Discharge and Saltwater Intrusion control in Coastal Aquifer." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 5, pp. 159-168.

paper number : 14-099  
 Received : 6 October 2014  
 Revised : 20 October 2014  
 Accepted : 20 October 2014