

지하댐 운영시 발생하는 염수침입 저감기법에 관한 연구

A Study for Reducing Sea Water Intrusion in the Ground Water Dam Operation

윤 상 훈* / 박 재 현** / 박 창 근***

Yun, Sang Hoon / Park, Jae Hyeon / Park, Chang Kun

Abstract

Recently the ground-water development using the ground-water dam was proposed for the efficient use of the limited water resources especially for islands or seaside area. But in operating the ground-water dam adjacent to seaside an excessive pumping causes the sea-water intrusion which is caused by the drawdown of ground-water level. In this study, the effect of the recharging well method to reduce the sea-water intrusion was evaluated, and was applied to the downstream of the Ssangcheon ground-water dam site. The SUTRA model was used to simulate the salinity transport in the unsaturated and saturated zone. As the results, the effect of recharging method on the downstream of the ground-water dam was proven to be very efficient to reduce the salinity in the pumping well, and especially the best result was shown at the case that the recharging well is located at 40~60m from the cutoff wall and the recharging rate is up to 6~7%.

Keywords : Sea-Water Intrusion, Artificial Recharge, SUTRA, Techniques of Reducing Sea-Water Intrusion, Ground Water Dam

요 지

최근 들어 도서지역이나 해안지역의 제한된 수자원을 보다 효과적으로 사용하기 위하여 지하댐을 이용한 지하수 자원 개발 방안이 제시되고 있다. 그러나 해안선에 인접한 지하댐의 경우 과도한 지하수 양수는 대수층의 지하수위를 저하시켜 결국 염수침입이라는 심각한 문제를 발생시키게 된다. 염수침입은 대수층의 지하수위 하강에 기인하므로 본 연구에서는 지하댐 하류에 함양정(Recharging well)을 설치하여 대수층의 지하수위를 상승시킴에 따른 염수침입 저감효과를 분석하였다. 이 방안을 쌍천유역에 적용하였으며, 이를 위해 염분의 이송·확산을 분석할 수 있는 SUTRA(Saturated-Unsaturated Transport) 수치모형을 적용하였다. 그 결과 지하댐 하류지역에 대한 함양기법이 양수정 염분 저하에 매우 효율적인 방법임이 증명되었고, 염해저감을 위한 함양정 운영시 차수벽으로부터 40~60m 거리에 함양정을 설치하고 함양률을 총 양수량의 6~7%정도로 하여 운영을 할 때 가장 효율적으로 염해를 저감시킬 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

핵심용어 : 염수침입, 인공함양, SUTRA, 염해 저감기법, 지하댐

* 인제대학교 토목공학과 · 공학석사
Former Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Inje Univ., Gimhae, Kyongsangnamdo 621-749, Korea
(E-mail : ehlab_0721@hotmail.com)

** 인제대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사
Assistant Professor, Dept. of Civil Eng., Inje Univ., Gimhae, Kyongsangnamdo 621-749, Korea
(E-mail : jh-park@ijnc.inje.ac.kr)

*** 관동대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사
Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Kwandong Univ., Yangyang, Kangwondo 215-802, Korea
(E-mail : ckpark@kwandong.ac.kr)

1. 서 론

경제와 산업의 발전에 따라 도시화는 가속화되고 있으며 이로 인해 용수 수요는 지속적으로 증가하고 있다. 유엔에 의해 물 부족 국으로 분류된 우리나라도 매년 인구 증가와 도시화로 인한 용수부족으로 국지적인 제한 급수를 실시하는 등 점차 물 문제가 중요한 사회 문제로 떠오르고 있는 가운데 새로운 대체 용수원의 개발이 시급하게 대두되어지고 있다(한국수자원공사, 1999).

이 가운데 지하댐(Ground Water Dam) 건설에 의한 지하수 자원의 개발이 제한된 수자원을 보다 효과적으로 사용하기 위한 하나의 방법으로 고안되어졌다. 이미 선진국에서는 지하수 자원에 대한 개발의 중요성을 인식하고 이의 효과적인 활용을 위하여 지역 내에 저류되어 있는 지하수의 정성적·정량적 분석을 통한 대수층 관리를 지속하여 왔다(국립환경연구원, 1993). 그러나 국내 대부분의 지하댐은 유역내 대수층의 특성을 완전히 파악하지 않은 상태에서 수요에 따라 과도하게 지하수를 양수 이용함에 의해 대수층의 파괴를 유발하거나 지반 침하, 차수벽의 기능저하 등이 발생되고 있다(신방웅과 김희성, 1996). 그리고 해안 접경 지역에 설치된 경우 해안 대수층이 평형상태에 있는 경우에는 담수(淡水)가 바다쪽으로 흐르지만 지하수의 이용이 급증하면서 담수의 수두(水頭)가 감소함에 따라 흐름이 역전(逆轉)되어 염수(鹽水)가 담수층(淡水層) 내로 침입하게 된다. 이로 인해 지하수를 생활용수뿐만 아니라 농업용수로도 사용할 수 없는 경우가 발생하게 된다.

국내에서 지하댐을 이용하여 상수원을 확보하는 유일한 지역인 속초시 쌍천 지하댐의 경우에도 해안선에서 불과 200m 떨어진 곳에 건설되어져 있고, 차수벽 설치시 기반암의 요철이 심하기 때문에 기반암과 차수벽 사이에 공간이 존재하여 갈수시 염수침입의 문제가 상존하는 문제점을 안고 있다. 따라서 본 연구에서는 지하수내 염분의 이송·확산을 분석하는 2차원 유한요소법이 적용된 SUTRA(Saturated-Unsaturated Transport) 수치모형을 이용하여 지하댐 운영시 발생하는 염수침입 특성을 분석하고, 이 자료를 토대로 인공함양(Artificial Recharging)시 물마루(Water Mound) 발생을 통한 염해저감 지하댐 운영 기법을 제안 하고자 한다.

2. 기존의 연구동향

해안 대수층이 개방된 해역과 상호 연결되는 지질구조의 형성은 해수의 침입을 용이하게 해주는데, 이런 잠재적인 지역에서 해수의 흐름으로 인해 우물 내에서 염분의 존재가 종종 확인되고 있다. 또한 이들 지역에

서 과도한 양수는 담수원의 고갈뿐만 아니라 해수의 침입을 초래하여 해안 대수층에서 혼합과 변환을 유발하는 원인이 되고 있다. 이렇게 해안에 인접하게 지하댐을 설치할 경우 정확하고 정밀한 대수층 구조 분석, 수문 및 물수지 분석 등 보다 효과적으로 염수침입을 방지할 수 있는 방안의 수립이 절대적으로 필요하다.

일본의 섬 지역에서는 식수와 농업용수의 확보를 위하여 많은 지하댐을 설치하여 운영 중에 있다. 일본 지하댐에 관한 연구들에서는 지하대수층과 지표 수문 특성에 따른 지하댐의 규모에 관한 연구들은 진행되었다. 일본에서는 차수벽의 벽체 최저 강도를 10kgf/cm^2 , 벽체의 투수계수는 $1.5 \times 10^{-5}\text{cm/s}$ 이하로 설계기준을 설정하여 내구성과 지수성을 유지하도록 하고 있다. 일본 지하댐의 경우 철저한 염수침입 방지 시공과 투수성이 큰 깊은 대수층, 충분한 강수량 등으로 염수침입이 거의 보고 되지 않는 것으로 판단된다. 우리나라의 경우 해안에 설치된 지하댐으로는 현재 쌍천 지하댐이 유일하며, 갈수기에는 염수침입으로 지하수 산출에 문제가 있는 것으로 보고 되고 있다. 원인으로서는 기반암과 대수층 경계의 불규칙으로 인한 시공상의 문제에 있는 것으로 판단되며, 차수벽의 재료와도 문제가 있는 것으로 판단된다. 우리나라의 경우 차수벽에 대한 강도, 벽 두께, 지수목표 등의 기준이 정해져 있지 않으며, 일반적으로 시공 후 투수계수가 $1.5 \times 10^{-5}\text{cm/s}$ 이내이면 조건을 만족하는 것으로 알려져 있다. 국내의 경우 염수침입 저감에 관한 기법으로 농업기반공사에는 지하댐 하류부에 2차 차수벽을 하나 더 설치한 후 그 사이 대수층을 담수로 채워 수위가 떨어지더라도 수압 및 토압에 의하여 하류부에서의 염수침입 현상을 방지할 수 있도록 하는 기법이 연구 중에 있다(부성안 등, 2002).

해안 근처의 우물들에서 발생하는 염수침입을 저감하는 방법으로는 인공함양지의 이용, 인공함양정(주입정)의 이용, 염수양수정의 이용 등이 알려져 있다(Fetter, 2003). 해안지역의 염수침입을 해결하려는 노력은 많은 곳에서 수행되어 왔는데, 특히 염수와 담수를 포함하는 피압대수층이 분포하는 캘리포니아 남부의 해안지역에서는 수압대(pressure-ridge system)를 형성하여 염수침입을 억제하는 기법이 이용되어 왔다(Bruington과 Seares, 1965). 또한 일본에서는 염수침입 저감 기법으로 연안대수층에서 염수침입이 발생하는 원인을 수치적으로 분석하여 염수침입 방지벽(sea water intrusion barriers)을 설치하였다. 실례로 서태평양에 위치한 오키나와 이오지마(Iwo Jima)섬에서는 비정상 상태에서 지하수위와 담수-염수의 거동을 수치적으로

분석하여 염수침입 방지벽을 설치하고 양수가 지속적으로 이루어질 때의 염수침입 양상을 분석하였다(Satoru Sugio 등, 1987). 마찬가지로 미시시피주에서도 멕시코 만으로부터 염수침입이 발생하여 뉴올리언스 주민들에게 생활용수 공급의 어려움을 겪고 있었다. 이에 대한 대비책으로 미공병단에서는 1, 2차원 수치모델을 통하여 염수침입 방지벽(sea water intrusion sill)을 설치하여 급수를 시작함으로써 \$50,000,000이상의 비용을 절감할 수 있었다(William H. McAnally와 Donald W. Pritchard, 1997).

이상과 같이 해안지역에 설치된 지하댐에서 발생하는 염수침입 저감에 관한 연구가 부분적으로는 이루어지고 있으나 저감에 관한 대책이나 연구 성과는 거의 없는 실정이며, 향후 설치지역 특성에 맞는 체계적이고 장기적인 계획의 수립과 연구가 필요할 것으로 사료된다.

3. 이론적 배경

연구대상지역의 염수침입 분포를 해석하기 위해 미국의 지질조사국(USGS)의 Voss(1984)에 의해 개발된 2차원 SUTRA 수치모형을 사용하였으며, 이 수치모형에서 지하수 흐름모형에 근간을 이루는 주요변수는 유체압력이다.

3.1 유체의 질량평형 방정식

질량평형 방정식은 흙에서의 순수한 물과 순수한 용질과의 질량평형의 합으로 표현되며 대부분의 경우에 있어서 매질 내에 용해된 용질의 질량은 유체의 질량에 비해 훨씬 작기 때문에 무시된다(Celia 등, 1990). 본 수치모형에서 수행되는 질량평형 방정식의 정확한 형태는 지하수 유동에 대해 Darcy 법칙을 도입하여 정리하면 식 (1)과 같이 유도된다.

$$(S_w \rho S_{op} + \epsilon \rho \frac{\partial S_w}{\partial p}) \frac{\partial p}{\partial t} + (\epsilon S_w \frac{\partial \rho}{\partial C}) \frac{\partial C}{\partial t} - \nabla \cdot [(\frac{k k_n \rho}{\mu}) \cdot (\nabla p - \rho g)] = Q_p \quad (1)$$

여기서 S_{op} 는 비압력저류계수이고, S_w 는 포화도이며 k_n 은 상대고유투수계수이다. 그리고 ϵ 은 공극률, C 는 용질의 농도, k 는 고유투수계수, ∇p 는 압력차이며 μ 는 유체의 점성계수이다.

3.2 용질의 질량평형 방정식

용질은 지하수의 흐름, 그리고 높은 농도에서 낮은 농도로 이동하는 분자확산에 의해 다공성 매질을 통해 이송된다. 실제 지하수 유속은 측정이 불가능하기 때문

에 평균유속보다 빠르거나 느리게 이동하는 서로 다른 농도를 가진 유체의 혼합효과를 근사 시키는 이송구조인 용질이송이 도입되었다. 따라서 용질확산에 대한 항이 포함된 일반적인 용질이송 방정식은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial(\epsilon S_w \rho C)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\epsilon S_w \rho v C) + \nabla \cdot [\epsilon S_w \rho (D_m I + D) \cdot \nabla C] + \epsilon S_w \rho \Gamma_w + Q_p C^* \quad (2)$$

여기서 D_m 은 용질입자의 확산계수, v 는 유속, Γ_w 는 단위유체질량 당 용질의 질량이며, C^* 는 용질의 농도이다.

확산텐서인 D 는 대수층 재질에 따라 등방성 투수능과 공간상으로 분포하는 비균질성을 가진 계에 대한 흐름을 표현하는데 사용된다.

$$D = \begin{vmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{vmatrix} \quad (3)$$

여기서 D 는 대칭이며 주대각선 요소는 다음과 같이 식 (4a)와 (4b)로 표현된다.

$$D_{xx} = (\frac{1}{v^2})(d_L v_x^2 + d_T v_y^2) \quad (4a)$$

$$D_{yy} = (\frac{1}{v^2})(d_T v_x^2 + d_L v_y^2) \quad (4b)$$

그리고 주대각선 밖의 요소는 식 (5)와 같다.

$$D_{xy} = D_{yx} = (\frac{1}{v^2})(d_L - d_T)(v_x v_y) \quad (5)$$

여기서 d_L 과 d_T 는 종방향과 횡방향의 확산계수이다. 확산계수의 크기는 지하수 흐름계에서 평균 유속의 국부 크기의 절대값에 의존하며 다음과 같이 식 (6a)와 (6b)로 표현된다(Bear, 1979).

$$d_L = \alpha_L v \quad (6a)$$

$$d_T = \alpha_T v \quad (6b)$$

여기서 α_L 과 α_T 는 흙의 종방향과 횡방향의 이송확산도이다.

4. 인공함양을 통한 염수침입 저감기법의 구상

4.1 인공함양을 통한 염수침입 저감기법의 적용

연안지역에서 지하수를 집중 양수하게 되면 담수의 수위가 강하하여 압력수두가 낮아지게 된다. 담수의 압력

이 감소하게 되면 담수층 아래에 염수층의 경계부는 염수침입으로 매우 빠르게 이동하며 수리경사가 낮은 지점 즉, 집중 양수지점에 도달하기까지 정지하지 않는다.

본 연구 대상지역인 속초시의 경우에도 지하담이 해안선에서 약 200m 지점에 설치되어 있기 때문에 갈수시 염수침입 문제가 상존한다. 속초시는 염수침입에 대한 대책으로 가장 하류에 위치한 집수정(pumping well)내의 염도를 측정하여 염도가 음용수 수질기준 0.000250 (kg-TDS/kg-fluid)이상이 되면 취수를 중단하도록 하고 있다. 그리고 강우가 발생하면 염분으로 오염된 집수정내의 물을 직접 하천으로 펌핑·방류시켜 집수정내 염도가 적정치 이하로 떨어지면 그 집수정을 취수정으로 다시 이용하는 소극적 방법을 채택하고 있다.

이와 같이 본 연구에서는 기존의 소극적 대처방안과는 달리 지하담 운영시 대수층의 수위 강하로 인한 염수침입 문제를 보다 적극적으로 해결하고자 차수벽과 해안사이에 함양정을 설치하여 물마루 발생을 통해 대수층의 수위를 상승시켜 염수침입을 저감시키는 기법을 구상하

였다. Fig. 1은 쌍천지하담의 구조를 나타낸 그림이다.

4.2 유역의 개요

하상은 상류 구배구간의 약 35%정도로 구간의 경사가 급하고 거의 기반암이 노출되어 있는 반면에 능선부는 약 30%정도가 고도 1,000m 이상의 고지대로 구배가 약 30% 정도의 급경사 능선구간으로 형성되어 있다. 그리고 암반의 노출지가 많고 토피가 적어 상대적으로 암상은 불량하므로 강우 시 하천으로의 직접유출량이 평균보다 높은 편이다.

Fig. 2는 쌍천 지하담의 지하 차수벽 위치를 나타낸 그림이며, Fig. 3은 쌍천 유역의 지층 단면을 나타낸 그림으로 대수층의 평균심도는 8.4m, 평균 자연수위는 2.9m로서 대수층의 구성을 이루는 자갈, 전석층의 심도는 3.5~18.6m로 나타난다. 그리고 풍화암층의 두께는 0.9~4.8m 정도로 구성되어 있어 기반암의 양상은 지표하 8.3~21.0m에서부터 형성되고 있다. 지하수위 분포는 지표하 0.3~4.6m로 지역적인 차이를 이룬다.

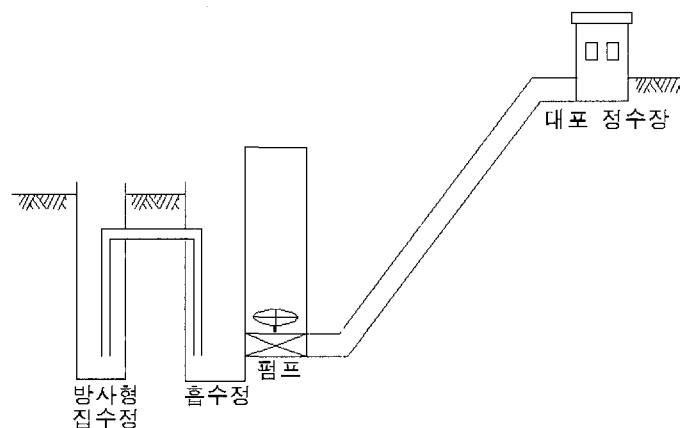


Fig. 1. Structure of Ssangcheon Ground Water Dam

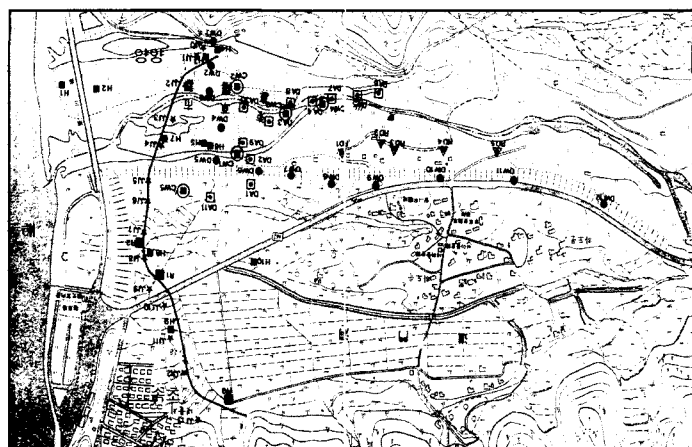


Fig. 2. Location of the Ssangcheon Ground Water Dam

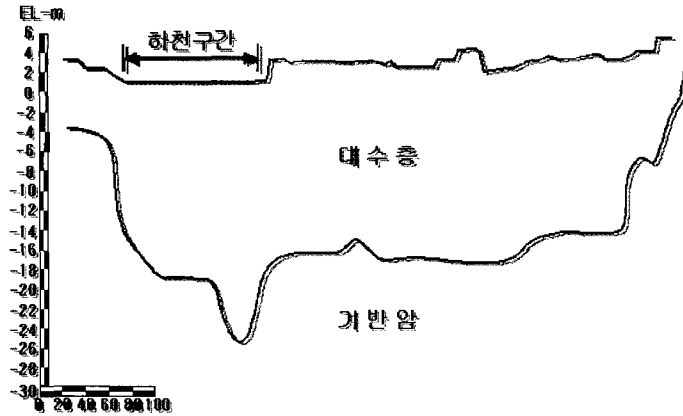


Fig. 3. Cross Section of Stratum

5. 수치모형 실험

5.1 유역의 이산화

본 수치모형 실험에 사용된 SUTRA모델은 격자를 수직(x, z)방향과 수평(x, y)방향으로 나누어 염수침입 분포를 해석할 수 있는 모델이다. 격자를 수직(x, z)방향으로 구성할 경우에는 확산과정으로 수치해석을 수행할 수 있으며, 수평(x, y)방향의 경우는 비확산 과정으로 염수침입 양상을 모의할 수 있다. 본 연구에서는 쌍천 지하담에서의 공간적 수위분포도와 염수의 농도분포 특성을 분석하기 위해 격자를 수평(x, y)방향으로 구성하였으며, 동서방향으로 2,000m, 남북방향으로 1,000m로 모의할 대상유역 안에서 격자를 구성할 구간을 설정하였다. 대수층은 동서로 약 1,750m정도로 설정하였으며 1,500m지점에 지하차수벽을 설치하고, 차수벽에서 상류쪽으로 250m, 해안쪽으로 150m 떨어진 곳에 집수정과 함양정을 각각 설치하였다. 그리고 설정한 구

간에서 동서방향으로 50개와 남북방향으로 25개의 40m 등간격의 격자망을 구성하였다. 구성된 격자망에서 격자의 수는 1,250개, 격점의 수는 1,326개로 구성되었다. Fig. 4에 구성된 유한요소 격자망을 나타내었다.

5.2 경계조건

본 실험에서 사용된 모형에서 필요한 경계조건으로는 수리수두와 농도이다. 수리수두와 농도는 갈수기시 등지하수위도(속초시 쌍천취수원 개발에 따른 수리지질 연구 용역 보고서, 1998)를 토대로 설정하였다. 격자구성지역의 서쪽은 하천의 상류부분으로 수리수두를 5.0m로 설정하고 농도는 담수이므로 0.0(kg-TDS/kg-fluid)으로 결정하였다. 또한 동쪽지역은 해안이므로 수두를 평균해수면인 0.0m로 설정하였고, 농도는 염수의 농도인 0.0375(kg-TDS/kg-fluid)를 사용하였다. 북쪽과 남쪽은 능선으로 둘러싸인 모암지대로 Fig. 3에서와 같이 기반암이 U자형으로 형성되어 있어 북쪽과 남쪽으로 유입되는 지하수의 양은 적다. 그래서 본 실험에서

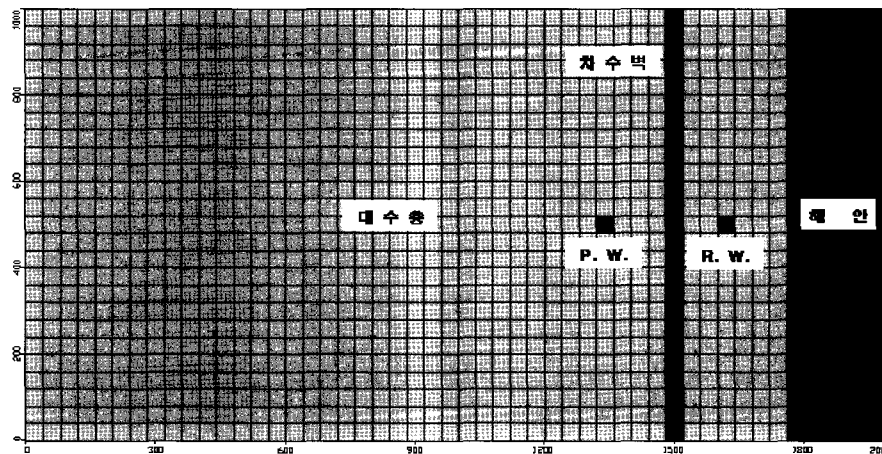


Fig. 4. Finite Element Lattice Net Schematic Diagram

는 수치해석의 편의상 이 지역을 비유동 경계(No Flow Boundary)로 설정하였다.

5.3 초기조건 및 매개변수

계산에 필요한 매개변수로는 대수층의 공극률과 포화투수계수, 그리고 두께 등이 있다. 본 실험에 적용한 대수층의 공극률은 대수층이 모래자갈 섞인 호박돌, 전석층인 것을 감안하여 0.35로 결정하였고, 대수층의 평균 두께는 21.0m정도가 되나 풍화암의 파쇄대까지 고려하여 25.0m로 하였다. 그리고 대수층의 최대 및 최소 포화투수계수는 기존 조사 자료(속초시 쌍천취수원 개발에 따른 수리지질연구 용역 보고서, 1998)에 의하여 1.7×10^{-3} m/s에서 8.4×10^{-4} m/s의 범위로 나타났으며, 그 수치를 적용하였다.

5.4 수치모형 실험

모델링에 필요한 모든 입력변수를 고려하여 구성된 수치모델을 이용하여 수치모형 실험을 수행하였다. 수치모형 실험은 $10,000 \text{m}^3/\text{day}$ 를 집수정에서 양수했을 경우 함양정에서의 함양률을 총 양수량의 1~10%까지

상승시키면서 각 경우에 대한 집수정에서의 염분농도 변화와 대수층의 지하수위 변화를 살펴보았다. 여기서 함양률이란 총 양수량에 대한 함양량의 비를 의미한다. 수치모형 실험의 조건은 염수침입을 보다 적극적으로 모의하기 위하여 염수침입의 문제가 심각히 대두되는 갈수기로 가정하여 무강우 지속조건으로 하였으며, 함양정의 위치 변화와 차수벽의 차수효과 저감에 따른 경우로 나누어 수행하였다. 차수벽의 초기 포화투수계수는 기존 조사 자료(속초시 도문동 쌍천 취수원 개발사업 최종 보고서, 1998)에 의하여 9.2×10^{-5} m/s에서 8.4×10^{-7} m/s의 범위로 나타났으며 그 수치를 적용하였다. 그리고 시간에 따른 차수벽의 차수효과 저감에 의한 염수침입 분포를 알아보기 위하여 차수벽의 포화투수계수를 세 가지 경우로 나누어 수치모형 실험을 수행하였다. 세 가지 경우의 차수벽 포화투수계수는 기존에 조사된 차수벽 평균 포화투수계수보다 작은 값과 큰 값들로 나누어 설정하였다. Table 1과 2에 입력한 초기 조건과 매개변수들, 그리고 수치모형 실험조건들을 나타내었다.

Table 1. Values of Parameters

Parameters	Values
Porosity	0.35
Saturated Permeability Coefficient of Aquifer	Min. : 8.4×10^{-4} m/s Max. : 1.7×10^{-3} m/s
Thickness of Aquifer	25.0m

Table 2. Concion of Modeling

Classification	Location of Recharging well (Distance from Cutoff Wall)	Permeability Coefficient of Cutoff Wall	Recharging Rate
Case I	No Recharging well	$1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ m/s $5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$ m/s $1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$ m/s	1~10%
Case II	50m		
Case III	100m		
Case IV	150m		

5.5 수치모형 실험결과

5.5.1 Case I (함양정이 없을 경우)

인공함양 없이 집수정에서 양수만을 했을 경우 차수벽 상류의 대수층의 지하수위는 Fig. 5에서와 같이 해수면을 기준으로 0.19m정도 강하하였으며 양수를 시작한 날로부터 63일 경과 후 집수정의 염분농도는 Fig. 6에서와 같이

음용수 수질기준인 $0.000250(\text{kg-TDS}/\text{kg-fluid})$ 을 초과하여 채수를 할 수가 없게 되었다. 그리고 차수벽의 차수효과가 저감됨에 따라 집수정에서의 염분농도 증가는 현저하게 차이가 났으며 Fig. 7에서 보는 것과 같이 차수벽의 포화투수계수가 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ m/s 일 경우에는 63일 후 염분농도가 음용수 수질기준 이상으로 증가하였으며 $5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$ m/s 일 때는 48일 후, 그리고 1×10^{-5}

$\sim 5 \times 10^{-5}$ m/s일 때는 27일 후 각각 음용수 수질기준 이 상으로 증가하였다.

5.5.2 Case II(함양정을 차수벽으로부터 50m지점에 설치)

차수벽으로부터 50m지점에 함양정을 설치하고 함양을 시작하면서 차수벽 상류의 대수층 지하수위는 Fig. 8에서와 같이 선형적 분포를 보이며 상승하였으며 함양률이 10%일 때 양수만을 했을 때의 지하수위보다 2.4% 상승한 0.6m가 상승하는 결과를 보였다. Fig. 9에 함양률이 10%일 때의 지하수위 변화 특성을 나타내었다. 침수정에서의 염분농도는 50일 후 Fig. 10에서와 같이

함양률이 6%일 경우 감소율이 86%가 되었으며, 10%일 경우에는 감소율이 95%로 함양률이 1~6%까지는 감소율의 크기가 커지다가 6% 이상부터는 감소율의 크기가 작아짐을 알 수 있었다. 함양을 시작하면서 함양률이 10%일 때 50일 후에는 Fig. 11에서와 같이 차수벽의 포화투수계수가 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ m/s일 경우 염분농도 감소율은 95%로 나타났으며 $5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$ m/s일 때는 89%, 그리고 $1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$ m/s일 때는 69%의 감소율을 보이는 것으로 같은 함양률일 경우 차수벽의 차수능력이 저하됨에 따라 염분농도 감소율도 작아 짐을 알 수 있었다.

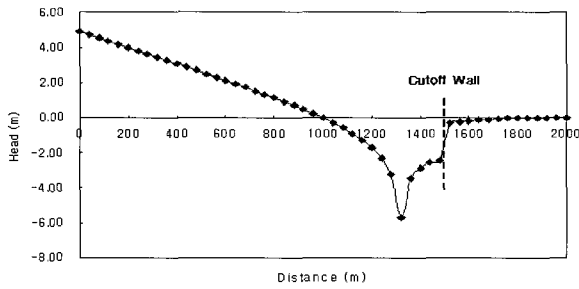


Fig. 5. G.W.L. Change at the Recharging Rate 0%

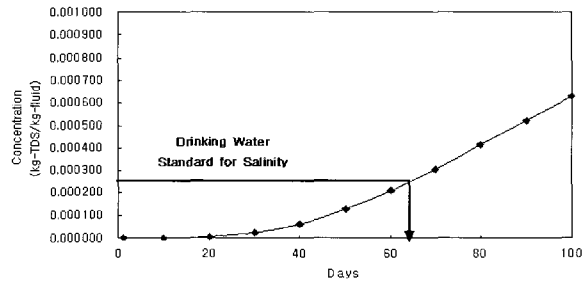


Fig. 6. Concentration Change in Pumping well (Recharging Rate 0%)

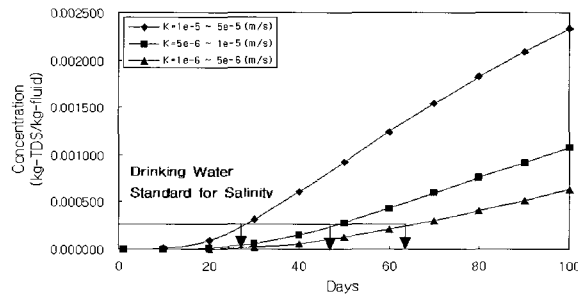


Fig. 7. Concentration Change in Pumping well by the Change of the Cutoff Wall's Coefficient of Permeability (Recharging Rate 0%)

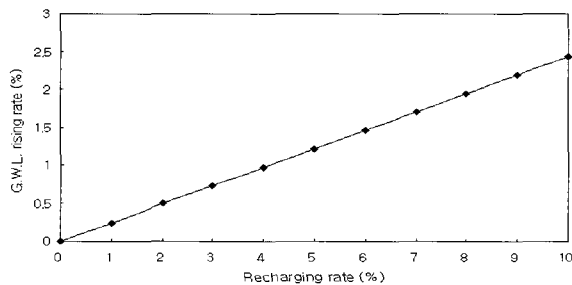


Fig. 8. G.W.L. Change in Recharging well by the Change of the Recharging Rate

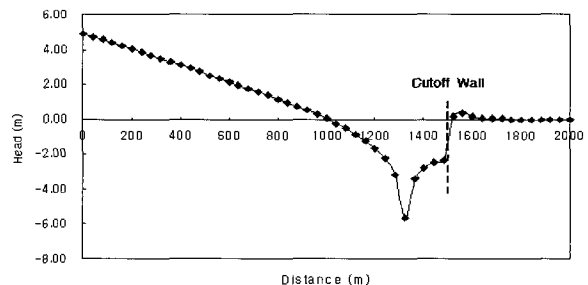


Fig. 9. G.W.L. Change at the Recharging Rate 10%

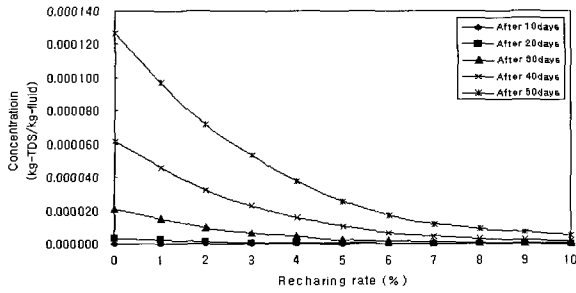


Fig. 10. Concentration Change in Pumping well by the Change of the Recharging Rate

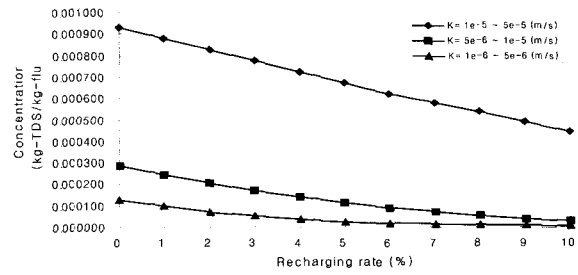


Fig. 11. Concentration Change in Pumping well by the Change of the Cutoff Wall's Coefficient of Permeability (After 50days)

5.5.3 Case III(함양정을 차수벽으로부터 100m지점에 설치)

차수벽으로부터 100m지점에 함양정을 설치하고 함양을 시작하면서 차수벽 상류의 대수층 지하수위는 Fig. 12에서와 같이 함양률이 10%일 때 양수만을 했을 때의 지하수위보다 1.8%상승한 0.46m가 상승하는 결과를 보였다. Fig. 13에 함양률이 10%일 때의 지하수위 변화 특성을 나타내었다. 집수정에서의 염분농도는 50일 후 Fig. 14에서와 같이 함양률이 6%일 경우 감소율이 78%가 되었으며, 10%일 경우에는 감소율이 85%로

함양률이 1~6%까지는 감소율의 크기가 커지다가 6% 이상부터는 감소율의 크기가 작아짐을 알 수 있었다. 함양을 시작하면서 함양률이 10%일 때 50일 후에는 Fig. 15에서와 같이 차수벽의 포화투수계수가 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 일 경우 염분농도 감소율은 85%로 나타났다. $5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 일 때는 82%, 그리고 $1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 일 때는 52%의 감소율을 보이는 것으로 함양정이 차수벽으로부터 50m거리에 있을 때 보다 5~10%정도 낮은 감소율을 보였다.

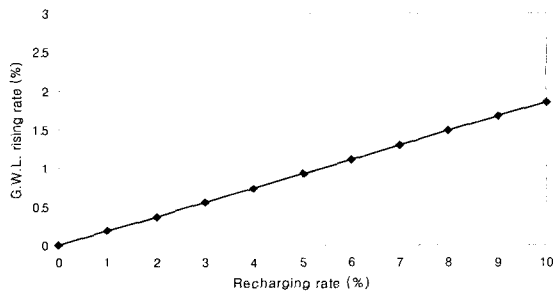


Fig. 12. G.W.L. Change in Recharging well by the Change of the Recharging Rate

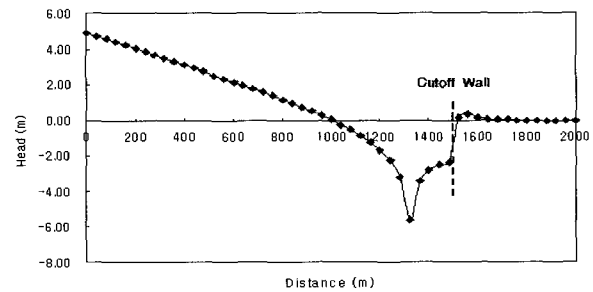


Fig. 13. G.W.L. Change at the Recharging Rate 10%

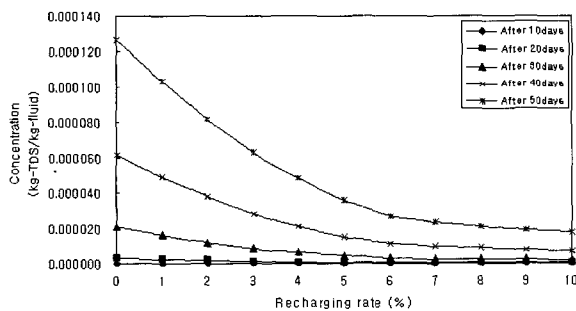


Fig. 14. Concentration Change in Pumping well by the Change of the Recharging Rate

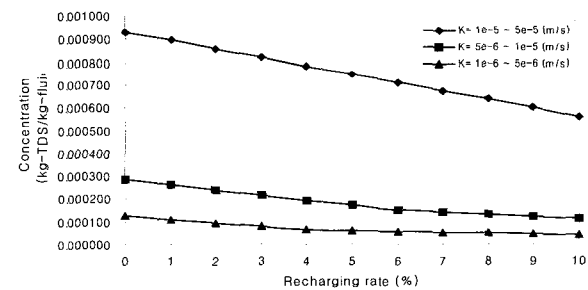


Fig. 15. Concentration Change in Pumping well by the Change of the Cutoff Wall's Coefficient of Permeability (After 50days)

5.5.4 Case IV(함양정을 차수벽으로부터 150m지점에 설치)

차수벽으로부터 150m지점에 함양정을 설치하고 함양을 시작하면서 차수벽 상류의 대수층 지하수위는 Fig. 16에서와 같이 함양률이 10%일 때 양수만을 했을 때의 지하수위보다 1.2%상승한 0.30m가 상승하는 결과를 보였다. Fig. 17에 함양률이 10%일 때의 지하수위 변화 특성을 나타내었다. 집수정에서의 염분농도는 50일 후 Fig. 18에서와 같이 함양률이 6%일 경우 감소율이 56%가 되었으며 10%일 경우에는 감소율이 65%로

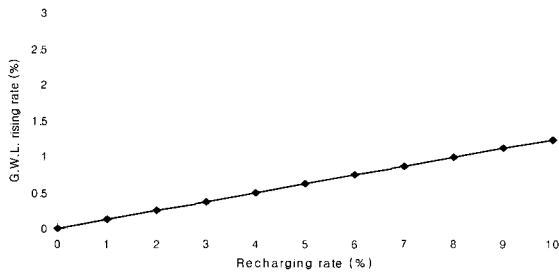


Fig. 16. G.W.L. Change in Recharging well by the Change of the Recharging Rate

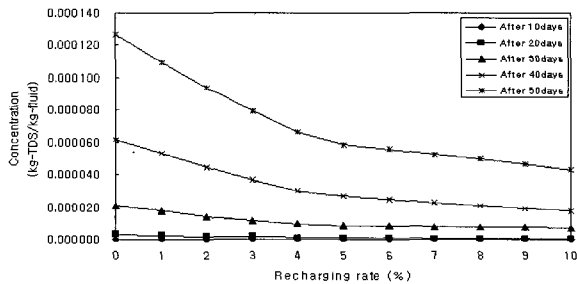


Fig. 18. Concentration Change in Pumping well by the Change of the Recharging Rate

6. 실험결과 및 고찰

수치모형 실험결과 함양정을 운영하지 않고 양수만을 했을 경우 차수벽 상류의 대수층의 지하수위는 해수면을 기준으로 0.19m정도 강하하였으며 양수를 시작한 날로부터 63일 경과 후 집수정의 염분농도가 음용수 수질기준인 0.000250(kg-TDS/kg-fluid)을 초과하여 채수를 할 수 없게 되었다. 그러나 함양정을 설치하고 함양을 시작하면서 집수정의 염분농도는 감소하였는데, 함양정의 거리가 차수벽으로부터 50m일 경우 집수정의 염분농도는 최대 95%, 100m일 경우는 85%, 그리고

함양률이 1~6%까지는 감소율의 크기가 커지다가 6% 이상부터는 감소율의 크기가 작아짐을 알 수 있었다. 함양을 시작하면서 함양률이 10%일 때 50일 후에는 Fig. 19에서와 같이 차수벽의 포화투수계수가 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ m/s일 경우 염분농도 감소율은 65%로 나타났으며 $5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$ m/s일 때는 60%, 그리고 $1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$ m/s일 때는 45%의 감소율을 보이는 것으로 함양정이 차수벽으로부터 50m거리에 있을 때 보다 20%정도, 100m 거리에 있을 때보다는 10%정도의 감소율이 저하됨을 보였다.

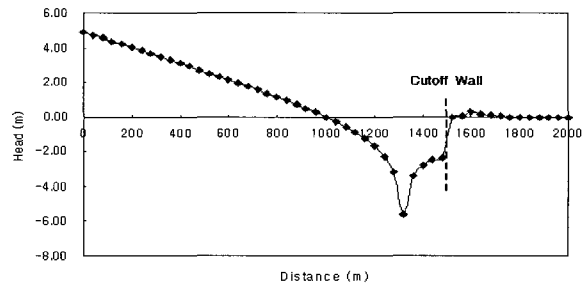


Fig. 17. G.W.L. Change at the Recharging Rate 10%

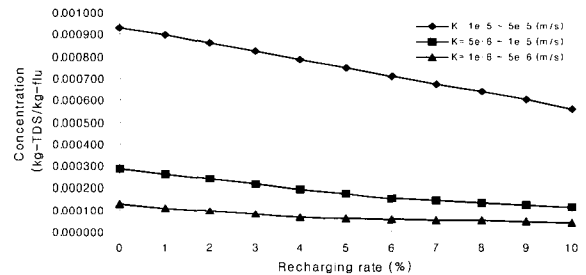


Fig. 19. Concentration Change in Pumping well by the Change of the Cutoff Wall's Coefficient of Permeability (After 50days)

150m일 경우는 76%가 감소하는 것을 알 수 있었다. 수치모형 실험결과를 정리하여 함양정의 위치와 차수벽의 차수효과 저감에 따른 집수정에서의 염분농도 감소율을 Table 3과 4에 나타내었으며, Fig. 20~ 22까지는 차수벽의 차수효과가 일정할 경우 함양정의 위치에 따른 집수정에서의 염분농도 변화를 나타내었는데, 차수효과가 일정할 경우 차수벽으로부터 함양정의 거리가 멀어질수록 염분농도 감소율이 작아짐을 알 수 있다.

Table 3과 4에서 보는 바와 같이 함양정의 위치가 일정할 경우 차수벽의 포화투수계수가 10^{-6} m/s일 때에는 포화투수계수가 10^{-5} m/s일 때 보다 집수정에서

Table 3. Result of Simulation at Recharging Rate 6% (After 50days)

Classification		G.W.L. Rising Rate (%)	Salinity Reduction Rate at Pumping well (%)
Position of Recharging well (m)	Permeability Coefficient of Cutoff Wall (m/s)		
50	$1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$	1.0	45
	$5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$	1.3	69
100	$1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$	0.6	39
	$5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$	0.9	60
150	$1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$	0.4	35
	$5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$	0.6	47

Table 4. Result of Simulation at Recharging Rate 10% (After 50days)

Classification		G.W.L. Rising Rate (%)	Salinity Reduction Rate at Pumping well (%)
Position of Recharging well (m)	Permeability Coefficient of Cutoff Wall (m/s)		
50	$1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$	1.8	69
	$5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$	2.2	89
100	$1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$	1.3	52
	$5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$	1.6	82
150	$1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$	0.7	45
	$5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$	1.0	60

의 염분농도 감소율이 20~30%정도 높음을 알 수 있다. 또한 차수효과가 일정할 경우 함양정의 위치가 차수벽으로부터 가장 가까운 50m지점에 있을 때 함양률에 따른 대수층의 지하수위 상승률은 100m와 150m지점에 있을 때 보다 높았으며, 이 때 집중정에서의 염분농도 감소율도 100m거리에 있을 경우 10%, 150m거리에 있을 경우보다 20%정도 염분농도 감소율이 높음을 알 수 있다. 그리고 차수벽의 포화투수계수가 10^{-6} m/s일 경우 함양률을 6%로 했을 때 염분농도 감소율은 평균 73%정도였으며, 함양률을 10%로 했을 때에는 82%정도로 1~6%까지는 염분농도 감소율이 커지다가 6%이상부터는 감소율의 크기가 작아짐을 알 수 있었다. 그리

고 Fig. 23에서와 같이 함양률을 6%로 했을 경우 차수벽의 포화투수계수가 10^{-6} m/s일 때 함양정의 거리가 차수벽으로부터 50~100m에서는 염분농도 감소율이 80~90%정도였으나 100m이상 떨어졌을 경우 염분농도 감소율이 55%정도로 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 차수벽의 포화투수계수가 10^{-5} m/s일 경우에도 함양정의 거리가 차수벽으로부터 100m이상부터는 염해저감 효과가 저하되는 것을 알 수 있다.

수치모형 실험결과 차수벽의 포화투수계수가 10^{-6} m/s일 경우에도 염수침입이 발생하여 63일 후 집중정의 염분농도가 음용수기준인 0.000250(kg-TDS/kg-fluid)을 초과하여 채수를 할 수 없게 되었다. 그러나 함

양정을 차수벽으로부터 50m지점에 설치하고 함양률을 6%로 해서 함양을 시작한지 50일 후 집수정의 염분농도는 0.000100(kg-TDS/kg-fluid)이하로 감소하였다. 이

결과로 지하댐 운영시 발생하는 염해저감 기법의 한 방안으로 함양정을 운영함으로써 염수침입에 대한 효율적인 대처가 가능함을 판단할 수 있었다.

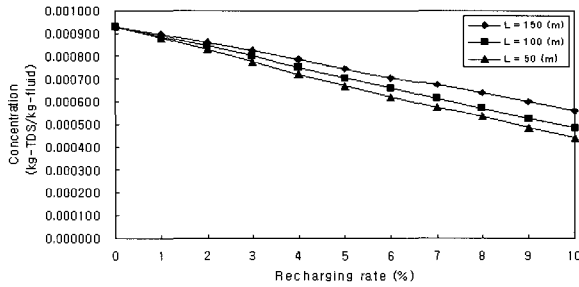


Fig. 20. Concentration Change in Pumping well by the Change of the Recharging well's Location($k=1\times 10^{-5}\sim 5\times 10^{-5}$ m/s, After 50days)

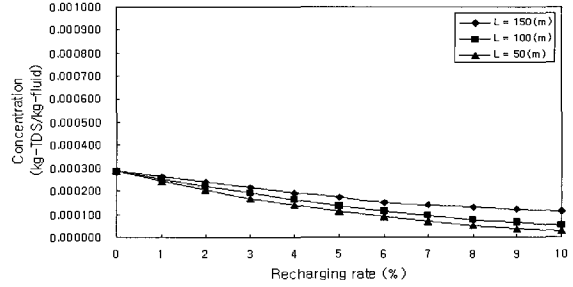


Fig. 21. Concentration Change in Pumping well by the Change of the Recharging well's Location($k=5\times 10^{-6}\sim 1\times 10^{-5}$ m/s, After 50days)

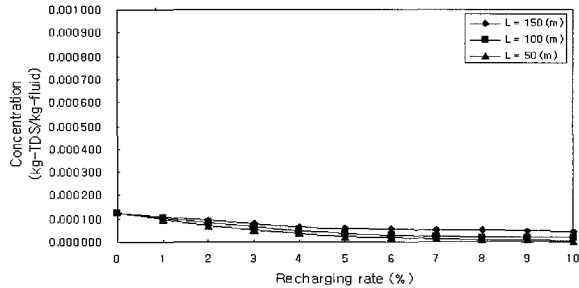


Fig. 22. Concentration Change in Pumping well by the Change of the Recharging well's Location ($k=1\times 10^{-6}\sim 5\times 10^{-6}$ m/s, After 50days)

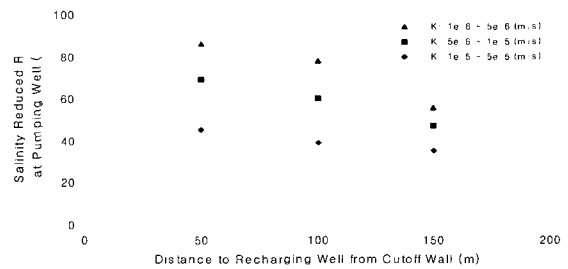


Fig. 23. Relation with Location of Recharging well and Salinity Reduction Rate(Recharging Rate 6%)

7. 결론

본 연구에서는 해안과 인접한 지하댐 설치지역에서 과다하게 지하수를 양수할 경우 대수층의 지하수위 강하와 차수벽의 차수효과 저감 등의 이유로 염수침입이 발생한다. 이러한 염수침입을 저감시키기 위하여 차수벽 하류부에 함양정을 운영하는 방안에 대하여 연구하였다.

이를 위해 염분의 이송·확산을 분석하는 2차원 유한요소법이 적용된 SUTRA 수치모형을 적용하여 수치모형 실험을 통해 함양정의 위치, 함양률에 따른 대수층의 지하수위 상승률과 집수정에서의 염분농도 감소율의 관계를 규명하였으며, 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 차수벽과 지하의 기반암 사이에 공간이 존재하지 않아 완전히 차수가 이루어진다는 가정 하에 차수벽의 포화투수계수를 $1\times 10^{-6}\sim 5\times 10^{-6}$ m/s 로

설정한 후 집수정에서 양수를 하기 시작하였을 때 무강우 지속 63일 후 집수정의 염분농도가 음용수 수질기준을 초과하여 채수를 할 수 없게 되었다. 이 결과 완전한 차수가 이루어진다고 하더라도 기존의 차수효과를 가진 차수벽에 염수침입이 발생함을 알 수 있었으며 지하댐 운영시 염수침입을 저감시킬 수 있는 적절한 방안이 강구되어야 할 것으로 판단되어졌다.

- (2) 염수침입 저감기법의 한 방안으로 함양정을 운영하면서 함양률을 증가시킬수록 대수층 지하수위는 함양률 1~10%구간에서 선형적 분포를 보이며 상승하였으며, 이 때 집수정에서의 염분농도 지하수위가 상승함에 따라 선형적 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 지하댐 운영시 발생하는 염수침입 저감기법의 한 방안으로 함양정을 운영함으로써 염수침입에 대한 효율적인 대처가 가능함을 알 수 있었다.
- (3) 함양정의 거리가 차수벽으로부터 일정할 경우 차

수벽의 차수효과가 클수록 함양률에 따른 대수층 지하수위 상승률은 높아지는 것을 알 수 있었으며, 이 때 집수정에서의 염분농도 감소율도 가장 높았다.

- (4) 차수벽의 차수효과가 일정할 경우에는 차수벽으로부터 함양정의 거리가 가까울수록 높은 지하수위 상승률을 보였으며, 염분농도의 감소율도 높아짐을 알 수 있었다.
- (5) 수치모형 실험을 통해 함양률을 총 양수량의 1~10%까지 증가시키면서 집수정에서의 염분농도 감소율을 산정 해 본 결과 함양률이 6~7%일 때 염분농도 감소율은 평균 67%정도를 나타내었으며, 7%이상부터는 감소율의 크기가 작아지는 것으로 나타났다. 따라서 효과적인 저감기법으로 함양정을 운영시 차수벽으로부터 40~60m거리에 함양정을 설치하고 함양률을 총 양수량의 6~7% 정도로 하여 운영을 할 때 가장 효율적으로 염해를 저감시킬 수 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 한국수자원공사 (1999). **지하수 함양 및 활용증대방안 연구**.
- 신방웅, 김희성 (1996). "3차원 흐름모델을 이용한 지하댐의 차수특성 규명.", **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제16권, 제3-1호, pp. 93~109.
- 국립환경연구원 (1993). **독일의 지하수 관리**, WHO 지원 해외훈련 귀국보고서.
- 부성안, 이기철, 김진성, 정교철, 고양수 (2002). "해안지역 지하수담 염수침입 방지기술 개선 방안.", **춘계 학술발표 논문집**, 한국지하수토양환경학회, pp. 148~154.
- 손호웅, 김수삼, 우남철, 김상환, 이용규, 김지수, 김형수, 박재현, 이강원, 이범희, 박창근, 정교철(역자) (2003). **지하수학**(원저자 : Fetter, C.W., 1980), 시그마프레스, pp. 524~525.
- Bruington, A.E., and F.D. Seares (1965). "Operating a sea water barrier project.", *Journal of Irrigation and Drainage Division*, ASCE. 91, pp. 117~140.
- Satoru Sugio, Kinya Nakada, and Daniel W. Urish (1987), "Subsurface seawater intrusion barrier analysis.", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 113, No. 6, pp. 767~779.
- William H. McAnally, and Donald W. Pritchard, (1997), "Salinity control in Mississippi River under drought flows.", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 123, No. 1, pp. 34~40.
- Voss. C. I. (1984). SUTRA: "A finite element simulation model saturated-unsaturated fluid density dependent groundwater flow with energy transport or chemically reactive single-species solute transport.", U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report.
- Celia, M.A., Bouloutas, E.T., and Zarba, R.L. (1990). "A general mass conservative numerical solution for the unsaturated flow equation.", *Water Resour. Res.*, 26(7), pp.1483~1496.
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of groundwater*. McGraw-Hill.
- 속초시 (1998). **속초시 쌍천취수원 개발에 따른 수리지질연구 용역 보고서**.
- 속초시 (1998). **속초시 도문동 쌍천 취수원 개발사업 최종 보고서**.
- (논문번호:03-80/접수:2003.09.30/심사완료:2004.01.05)