

# 지하수의 염분농도 변화에 미치는 양수의 영향

## Effects of the Pumping Rate on the Salt Concentration

박재성\*, 이호진\*\*, 김경호\*\*\*, 윤영호\*\*\*\*

Jae Sung Park, Ho Jin Lee, Kyoung Ho Kim, Young Ho Yun

---

### Abstract

Seawater intrusion phenomenons of coastal area happen by natural or artificial factor. For example, density difference of seawater and fresh water, surface of the water change by tidal current, pumping, aggregate picking from mouth of a river, large scale reclamation in water area business etc. This research analyzed effect that groundwater TDS changed by pumping. As a result, it was expose that TDS density increases by sudden inflow of seawater when do pumping up more than 200m<sup>3</sup>/day. Finally, We are expected to prevent calamity by seawater intrusion in coastal area through this study and propose optimum pumping amount to use groundwater safety.

*Key words:* Seawater Intrusion, Pumping, TDS, 3DFEMWATER

---

### 요 지

해안지역에서는 해수와 담수의 밀도차, 조석에 의한 해수면변화등과 같은 자연적 요인과 양수, 하구에서의 골재채취, 대규모 간척사업등의 인위적 요인에 의해서 해수가 육지부로 침투되는 현상이 발생한다. 본 연구에서는 양수가 지하수의 염분농도변화에 미치는 영향을 분석하였다. 모의결과, 200m<sup>3</sup>/day이상 양수시에는 지하수위의 저하보다는 횡방향흐름이 가속화 됨에 따라 밀도차에 의한 흐름과 횡방향흐름 유속이 합쳐져서 해수의 급격한 유입으로 TDS농도가 증가하는 것으로 나타났다. 결론적으로 기 관측된 점자료를 이용하여 3차원 공간분포상에서 양수에 따른 염분농도의 변화를 가시적으로 확인 할 수 있으며, 이를 통하여 해안지역에서 해수침투로 인한 재해를 막고 지하수를 보다 안전하게 이용하기위한 적정양수량을 제안할 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어 :** 해수침투, 양수, TDS, 3DFEMWATER

---

## 1. 서 론

일반적으로 해안지역에서 해수가 담수 대수층으로 유입되는 현상을 해수침투라고 하는데,

---

\* 정회원·(주)에이피테크 대표이사·E-mail : parkjaesung@chungbuk.ac.kr  
\*\* 정회원·(주)에이피테크 기술이사·E-mail : lhjce@chungbuk.ac.kr  
\*\*\* 정회원·충북대학교 토목공학과 교수·E-mail : coastal@chungbuk.ac.kr  
\*\*\*\* 정회원·도립강원전문대학 건설시스템과 교수·E-mail : yhyoon@gw.ac.kr

이러한 해수침투 현상은 강우량, 지하수면의 높이 변화, 조석에 의한 해수면 변화, 해수와 담수간의 밀도차등 자연적인 요인에 의해서 발생되며, 양수와 같은 인위적 요인에 의해서도 발생된다.

따라서, 해안지역의 지하수를 안정적으로 개발하고 이용하기 위해서는 해수침투현상의 특성을 파악하고 정확한 침투 범위를 예측하여, 적정 개발량을 설정하는 것이 바람직하다. 해수침투에 의한 담수지하수의 염수화 과정은 지하수 개발 지구의 수리지질학적 특성에 따라 다양하게 나타나는데, 이는 크게 염수체의 이동에 따른 침투과정과 담수체와의 혼합과정으로 크게 구분할 수 있다. 해수 침투에 대한 국내의 연구는 기존의 관측자료나 전기비저항 탐사를 이용하여 해수침투의 범위를 추정하고 있다. 이렇게 수행된 모델링의 대부분은 관측점을 기준으로 1차원 내지는 2차원적인 분석만을 수행하였으며, 지역전체에 대한 염수침투 분포 양상을 파악하는 데는 많은 어려움이 있다.

본 연구에서는 흐름 및 이송현상을 모의할 수 있는 3차원 유한요소 모형인 FEMWATER를 이용하여 개념모형을 구축하고 양수량 변화에 따른 해수침투현상을 모의하였다. 모의에 필요한 매개변수는 기존의 조사자료를 이용하고, 현장시험이 어려운 인자들은 외국의 연구결과에서 얻어진 값을 사용하여 모의를 수행하였다.

## 2. FEMWATER 모형

FEMWATER 모형은 다공성 매질의 포화 및 비포화 조건에서 오염물질의 흐름과 이송을 모의할 수 있는 3차원 해석모형으로, 이 모형은 수리전도 특성과 수리지질학적 물질의 특성값, 초기조건과 경계조건에 따라 해수침투를 해석할 수 있다.

### 2.1 흐름방정식

흐름에 대한 기본방정식은 Richards방정식을 기초로 하며, 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\rho}{\rho_0} F \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot \left( K \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_0} \nabla z \right) \right) + \frac{\rho}{\rho_0} q \quad (1)$$

여기서,  $h$ 는 압력수두,  $K$ 는 수리전도도,  $q$ 는 유입/유출,  $\rho$ 는 농도  $C$ 에서의 물의 밀도,  $\rho_0$ 는  $C=0$ 에서의 물의 밀도이며,  $\rho^*$ 는 주입수(injection fluid) 또는 양수(withdrawn water)의 밀도,  $\theta$ 는 습윤상수,  $\alpha'$ 은 매체의 수정 압축성,  $\beta$ 는 물의 수정 압축성,  $n$ 은 공극률,  $S$ 는 포화상태,  $F$ 는 저류계수이다. 또, Darcy속도는 다음과 같이 정의된다.

$$V = -K \cdot \left( \frac{\rho_0}{\rho} \nabla h + \nabla z \right) \quad (2)$$

### 2.2 이송에 대한 기본방정식

이송에 대한 기본 방정식은 질량과 플럭스의 연속법칙을 기초로 유도되며, 주계산과정은 이류, 분산/확산, 흡착, 감쇄, 생물분해와 유입/유출 등을 포함한 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned} \theta \frac{\partial C}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial S}{\partial t} + V \nabla C - \nabla (\theta D \nabla C) = & \quad (10) \\ - \left( \alpha' \frac{\partial h}{\partial t} + \lambda \right) (\theta C + \rho_b S) - (\theta K_w C + \rho_b K_s S) \\ + m - \frac{\rho^*}{\rho} q C + \left( F \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\rho_o}{\rho} V \cdot \nabla \left( \frac{\rho}{\rho_o} \right) - \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) C \end{aligned}$$

여기서,  $\theta$ 는 습윤농도,  $\rho_b$ 는 bulk density,  $D$ 는 분산계수 텐서,  $C$ 는 물에 녹았을 때의 물질농도,  $\alpha'$ 은 지층의 압축률,  $\lambda$ 는 감쇠상수,  $S$ 는 흡착점에서의 물질농도이다.

### 3. 연구대상지역 및 모형화

#### 3.1 연구대상지역 및 모형구성

본 연구에서는 해수침투 전용 관측정이 설치되어 있어 관측자료가 존재하는 전라북도 김제시 죽산면 대창리를 그 대상지역으로 하였으며, 대창지역의 양수에 의한 해수침투 모의를 수행하기 위하여 가로 약 2.2km, 세로 2.8km의 지역을 대상으로 개념모형을 설정하고, 그림 1과 같이 격자를 구성 하였다. 그림에서 막대기둥은 관측정의 위치를 나타내며 총 요소는 54,280개, 절점 31,419개로 구성되어 있다.

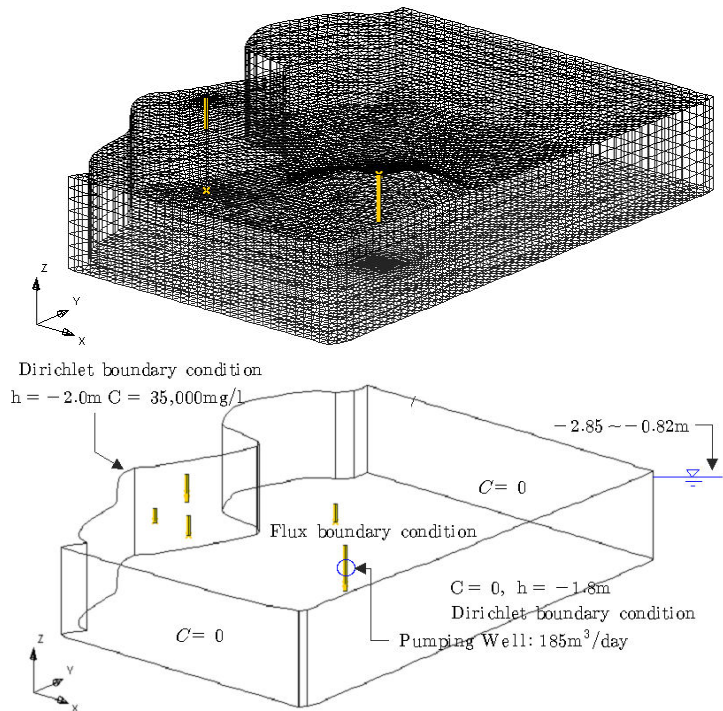


그림 2. Boundary conditions of the numerical model

그림 2는 경계조건을 나타낸 것으로 해안에 직접 맞는 부분은 지표면에서 수직으로 잘려있다고 가정하였다. 해수의 밀도는  $1.025\text{kg/m}^3$ , 염수의 농도는  $35,000\text{mg/l}$ 로 설정하였으며 내륙쪽에 해당하는 부분의 농도는  $C=0$ 으로 설정하였다. 또한, 대수층의 하부와 상부 및 측면부는 각각 불투수 경계면으로 설정하였다.

대창지역의 수리지질특성 파악을 위해서 기 조사되어 있는(농업기반공사, 2004) 자료를 바탕으로 Freeze and Cherry (1979)의 분류표를 이용하여 수리전도도와 투수계수값을 표 1과 같이 설정하였다. 표 1에서 Bulk density는 Mills(1985)등이 지질학적 물질에 따라 평균값의 범위를 제시하였는데 이를 이용하였다. 또, 해수와 담수의 경계면을 고찰하는데 일반적으로 많이 이용되는 총고용물질(TDS)과 전기전도도(EC) 사이의 상관 관계식은 한국수자원공사에서 실시한 영산강-섬진강 권역의 암반지하수와 충적층지하수의 수질분석 결과를 토대로 하여 도출한 식을 이용하였다.

표 1. Hydraulic parameters at Daechang

Property \ Layer	Layer1	Layer2	Layer3
Conductivity(m/s)	$4.17e^{-6}$	$3.81e^{-6}$	$1.39e^{-5}$
Bulk density(kg/m <sup>3</sup> )	1,300	1,490	1,500
Compressibility(m·hr <sup>2</sup> /kg)	$3.57e^{-15}$	$7.72e^{-14}$	$7.72e^{-15}$
Water viscosity(kg/m·hr)	3.63e-5		
Density of water(kg/m <sup>3</sup> )	1,000		

4.2 양수량 변화에 따른 TDS농도변화

모의결과 Layer1과 Layer2에서는 200 m<sup>3</sup>/day이하의 양수시에는 시간에 따라 TDS 농도가 감소하는 경향을 보였으나 200m<sup>3</sup>/day 이상 400m<sup>3</sup>/day, 600m<sup>3</sup>/day 양수시에는 농도가 서서히 증가하는 경향을 보였다. 이는 200m<sup>3</sup>/day이하 양수시 양수로 인하여 전체적인 지하수위가 저하함에 따라 해수와 담수의 밀도차에 의한 흐름속도보다 지하수위가 저하하는 속도가 더 빨라서 TDS농도가 감소하는 경향으로 나타난 것으로 사료되며, 200 m<sup>3</sup>/day이상 양수시에는 지하수위의 저하보다는 횡방향흐름이 가속화 됨에 따라 밀도차에 의한 흐름과 횡방향흐름 유속이 합쳐져서 해

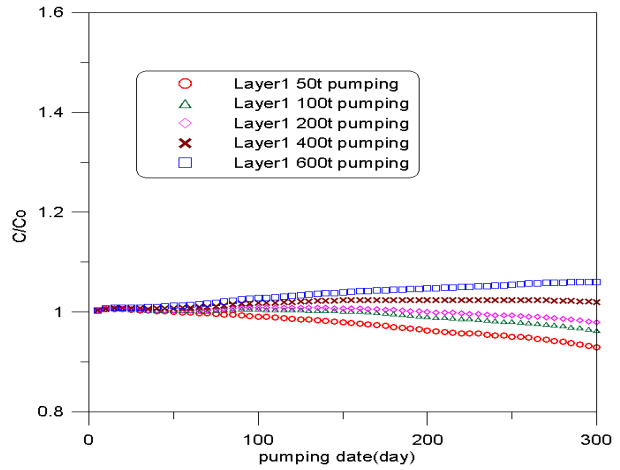


그림 3. C/C<sub>0</sub> values according to the pumping rates in Layer1

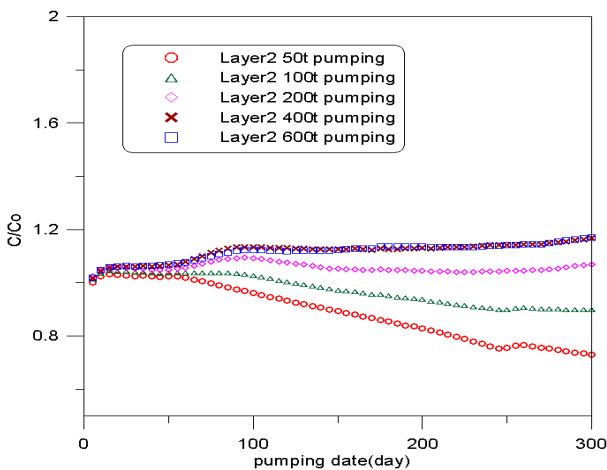


그림 4. C/C<sub>0</sub> values according to the pumping rates in Layer2

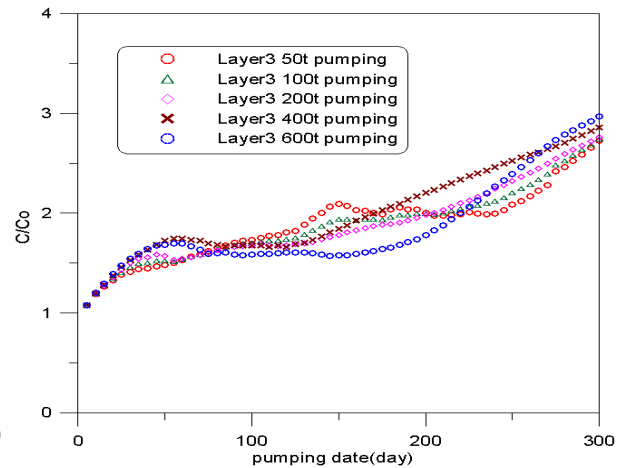


그림 5. C/C<sub>0</sub> values according to the pumping rates in Layer3

수의 급격한 유입으로 TDS농도가 증가하는 것으로 사료된다.

한편, Layer3에서는 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 양수량의 증감에 따른 TDS농도비의 규칙적인 변화양상은 나타나지 않았고 양수시 시간이 증가함에 따라 TDS농도비도 증가하는 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 3차원 유한요소모형인 FEMWATER 모형을 이용하여 양수가 해수침투 현상에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 300일간 50m<sup>3</sup>/day, 100m<sup>3</sup>/day, 200m<sup>3</sup>/day, 400m<sup>3</sup>/day, 600 m<sup>3</sup>/day의 양수를 가정하고 수치모의를 실시하였다. 모의결과에 따르면 Layer1과 Layer2에서는 50 ~ 200m<sup>3</sup>/day 양수시에는 초기농도에 비하여 TDS농도가 감소하는 경향을 보였으나 200 m<sup>3</sup>/day이상일 경우에는 농도가 서서히 증가하는 경향을 보였다. 반면, Layer3에서는 전체적으로 TDS농도비가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 Layer3에서는 양수량의 증가영향보다는 밀도차에 의한 영향이 더 많은 것으로 보여 진다. 3차원 모의를 이용한 분석은 해안지역에서의 양수시 해수침투의 한계허용량 및 한계 양수량을 설정하는데 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. Freeze, R.A. and Cherry J.A.(1979). Groundwater, Prentice-Hall, p.375.
2. Todd D.K.(1976). Groundwater hydrology 2nd edition, John Wiley&Sons.
3. Lin, H. C. et al. (1996), FEMWATER: a three-dimensional finite element computer model for simulating density dependent flow and transport, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Pennsylvania State University, Bringham Young University.
4. 한국수자원공사(1998), 영산강-섬진강 권역 광역 지하수조사 보고서, GW-98-4a.
5. 농림부, 농업기반공사(2004). 2004해수침투조사 보고서.
6. Oude Essink G.H.P. and Boekelman R.H.(1996). Problems with large-scale modelling of salt water intrusion in 3D, 14th salt water intrusion meeting, Malmö.
7. Mills et al.(1985). Water quality assessment: A Screening procedure for toxic and conventional pollutants in surface and ground water Part II, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.