

## 부산 동남부 지역의 해수침입 범위 연구

심병완, 정상용, 이민희  
부경대학교 환경지질학과  
e-mail: bwshim@mail1.pknu.ac.kr

### 요약문

본 연구의 목적은 부산 동남부 해안지역의 대수층에서 염수화에 미치는 조건들을 파악하고 해수침투 범위를 추정하는데 있다. 이를 위하여 Tidal damping method와 SUTRA 모델링을 실시하고 대수층의 특성 및 염수화가가능성을 파악하였으며, 모델링 결과의 타당성을 판단하기 위하여 전기비저항 탐사를 실시하였다. Tidal damping method에 의한 시간지연과 조석효율효과를 계산하여 대수층의 저류계수를 산출한 결과 시간지연 현상에 의한 방법이 적합하게 나타났다. SUTRA 모델링 결과, 건기인 5월에는 종분산 지수가 2.5m 일 때 500ppm의 TDS 등치선을 기준으로 해안에서 약 510m 내륙까지 해수의 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 그러나 우기인 7월에는 강수로부터 다량의 지하수 함양에 의한 지하수위 상승을 고려하여, 평균수리경사를 0.008로 설정한 조건에서는 500ppm의 TDS 등치선을 기준으로 해안에서 약 410m 내륙까지 해수의 영향을 받는 것으로 나타난다. 5월과 7월의 전기비저항 탐사결과를 비교하면 7월의 전기비저항 분포가 전반적으로 높게 나타났다. 그 이유는 6, 7월의 강수에 의한 지하수의 유입이 증가하여 침투된 염수의 농도가 다소 낮아졌기 때문이다.

### 서론

해안지역에서 해수침입으로 인한 대수층의 염수화에 대한 피해는 장기적이고 광범위하게 나타나고 있다. 그러나 국내에서 이러한 해수침입의 영향을 조사하는 경우는 매우 미미하여, 지하수의 염수화에 대한 체계적인 조사가 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서는 해수침입의 특성을 파악하기 위하여 Tidal damping method와 SUTRA 모델링 그리고 전기비저항 탐사를 적용하였다. 본 연구지역은 부산 동남부에 위치한 부경대학교 일대이며, 지반의 투수성이 낮고 대수층이 대부분 피압지하수위를 형성한다. 이러한 조건에서 대수층의 성질을 파악하는데 Tidal damping method를 이용하였다. 그리고 염수의 농도와 범위, 속도 벡터, 그리고 압력분포를 나타내는데는 SUTRA 수치모형을 이용하였다. 이러한 모델링결과와 전기비저항 탐사결과를 비교하여 염수의 분포와 염수침입의 범위를 추정하였다.

### Tidal damping method

Tidal damping method는 피압대수층에서 조석현상으로 인한 지하수체의 주기적인 변동으로부터 투수량계수와 저류계수의 비를 결정하여 대수층의 특성을 파악하는 방법이다. 양수시험을 실시하지 않고 조석의 주기와 모니터링 우물에서의 지하수위 주기만을 비교하여

시간지연현상과 진폭의 감소현상을 이용하므로 수리지질학적 인자를 결정하는데 유용하다. 기본가정은 첫째, 피압대수층이며 대수층은 균질하고, 지하수 유동은 수평적인 흐름으로 가정한다. 둘째, 대수층과 바다와의 경계면이 수직적인 형태로서 수리적인 접촉이 완벽하게 되어있다. 셋째, 조석의 영향 이외의 강수나 기압과 같이 대수층의 변화에 미칠 수 있는 다른 요소는 무시한다. 이러한 가정들은 해안선이 직선이고, 조석의 진폭에 비하여 대수층이 두꺼울 때 적합하다. 두 관측공의 거리는 해안으로부터 각각 약 180m, 188m 거리에 있으며, A공(심도 120m)이 B(심도 45m)공보다 지하수위가 2cm 낮다. 지하수위는 2개의 관측공에서 시간단위로 30회 측정된 값을 이용하였다. 그리고 조석자료는 국립조사원에서 부산항의 조석높이를 10분 간격으로 측정된 값을 이용하였다.

Ferris(1951)에 의하여 균질한 피압대수층에서 압력이 사인곡선 형태로 다음과 같은 식에 의하여 대수층내에서 전달된다는 것을 보여주었다.

$$h = h_0 \exp(-x\sqrt{\pi S/t_0 T}) \sin(S\pi t/t_0 - x\sqrt{\pi S/t_0 T}) \quad (1)$$

$h$ 는 평균해수면기준 지하수위;  $x$ 는 해안으로부터의 거리;  $t$ 는 시간(d);  $t_0$ 는 조석변동주기(d);  $h_0$ 는 조석변동의 진폭;  $T$ 는 대수층의 투수량계수와  $S$ 는 저류계수이다. 이 해는 조석과 모니터링 우물에서의 시간차에 의한 시간지연(time lag)과 해안으로부터의 거리가 멀어질수록 진폭이 지수적으로 감소하는 조석효율요소(tidal efficiency factor)로 나타낼 수 있다.

$$\text{Time lag} = x\sqrt{t_0 S/4\pi T} \quad (2)$$

$$\text{Tidal efficiency factor} = \exp(-x\sqrt{\pi S/t_0 T}) \quad (3)$$

Table 1. Tidal efficiency factor and time lag in monitoring wells.

Parameter	A hole	B hole
Tidal efficiency factor(%)	0.92	0.83
Time lag (min)	73	63
Tidal efficiency factor (/m)	0.00511	0.00461
Time lag (day/m)	0.0002816	0.0002431

A hole의 시간지연(time lag)이 크게 나타나는 것은 b hole과의 심도차이에 의한 영향으로 추정된다. 12시간 25분의 조석주기와 평균투수계수  $K=0.164$  m/day를 적용하면 두 우물에서 계산된 저류계수( $S$ )는 Table 2와 같다.

Table 2. Storage coefficients obtained by the tidal damping method.

monitoring well	S(tidal efficiency)	S(time lag)
A	0.0024	0.000024
B	0.0023	0.000015

Tidal damping method의 적용결과(Table 2)는 연구지역에서 slug test에 의한 저류계수 0.000025 ~ 0.000027과 시간지연(time lag)에 의한 저류계수와 잘 일치한다. 그러나 조석효율(time efficiency)에 의한 저류계수는 상부의 자유면대수층에 의한 영향을 받아 크게 나타나는 것으로 추정된다.

## SUTRA 모델링

해수침입의 범위와 농도분포를 추정하기 위하여 사용된 수치모형은 미국지질조사소에서 개발된 SUTRA (Saturated - Unsaturated TRANsport; Voss, 1984)이다. SUTRA는 해수침입현상을 설명하는데 일반적으로 많이 적용되고 있으며, 최근 많은 연구들이 이 프로그램을 이용하여 수행되었다. 그 이유는 여러 가지 물리적 과정들과 조건들을 수치적으로 모사하는 방법으로서 SUTRA는 수리지질학적 분석에 타당성 있는 해를 제공하기 때문이다 (Bear et. al., 1999). 이 프로그램의 지배방정식은 유체의 질량보존방정식, 고체매질과 유체의 에너지보존방정식 그리고 용질의 질량보존방정식으로 구성되어 있다. Fig. 1은 본 연구지역의 해수침입현상을 모델링하기 위한 모식도이며, 입력자료는 Table 3과 같다.

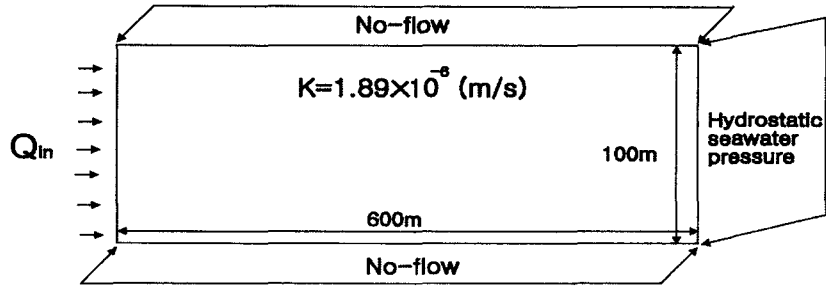


Fig. 1. Schematic cross section of aquifer and constant pressure boundary condition.

Table. 3. Parameters used in simulations.

Parameters	Values
Permeability, $k(m^2)$	$1.92 \times 10^{13}$
Hydraulic conductivity, $K(m/s)$	$1.89 \times 10^b$
Porosity, $\epsilon (\%)$	15
Fluid compressibility, $\beta$	0
Solid matrix compressibility, $\beta_s$	0
Freshwater density, $\rho (kg/m^3)$	1000
Fluid viscosity, $\mu (kg/m \cdot s)$	0.001
Seawater density, $\rho_s (kg/m^3)$	1025
Molecular diffusivity of solute in fluid, $D_m(m^2/s)$	$6.6 \times 10^{-b}$
Gravity vector, $g(m/s^2)$	9.8
Mean hydraulic gradient(May)	0.006
Mean hydraulic gradient(July)	0.008

위의 입력자료들을 이용하여 분산지수에 따른 해수의 농도분포와 지하수의 유속벡터 그리고 압력변화를 모델링하였다. Fig. 2에서는 중분산지수에 따른 TDS 농도 분포를 나타낸 것으로서, 횡분산지수는 중분산지수의 1/10로 설정하였다.

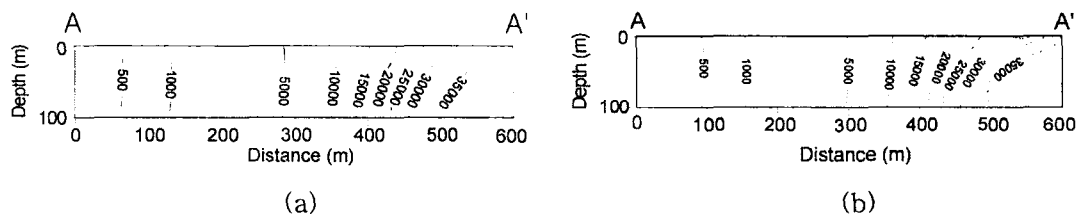


Fig. 2 TDS concentration sections with the longitudinal dispersivities of (a) 10m and (b) 2.5m. Contour values are in  $mg/l$ .

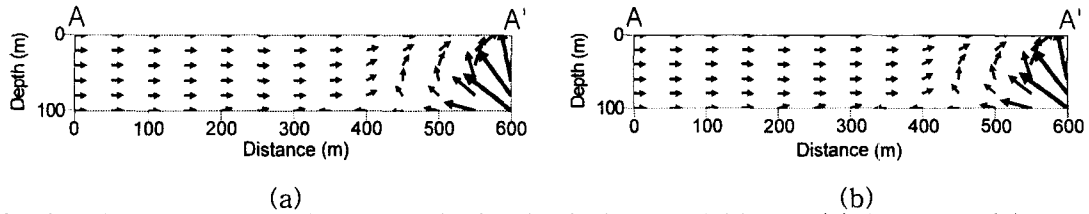


Fig. 3 Velocity vector sections with the longitudinal dispersivities of (a) 100m and (b) 10m.

그리고 Fig. 3은 분산지수에 따른 지하수의 유속을 벡터로 표시한 것으로서 해수와의 경계면 하부에 매우 큰 값을 나타낸다. 분산지수의 크기에 따른 유속의 변화는 거의 나타나지 않는다. 그러나 압력분포의 등치선도는 해수와의 경계면(A') 가까이에서 종분산지수가 100m일 때가 10m인 경우 보다 폭이 넓게 나타난다(Fig. 4).

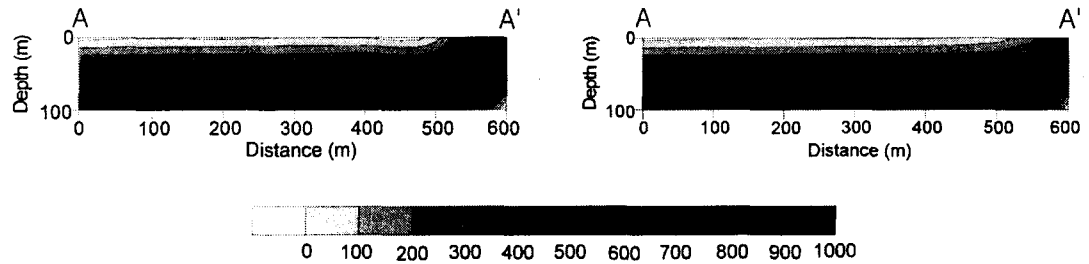


Fig. 4 Pressure sections with the longitudinal dispersivities of (a) 100m and (b) 10m. Scale values are in  $\text{kg/m} \cdot \text{s}^2$ .

Fig. 5는 종분산지수가 2.5m인 경우, 우기에 강수에 의한 지하수 함양량의 증가로 수위가 상승한 경우를 고려한 것이다. 입력조건은 좌단부의 지하수위가 2m 상승하여 평균수리경사를 0.008로 설정한 경우, TDS의 농도가 500ppm을 기준으로 평균수리경사가 0.006일 때(Fig. 2 (b))보다 우측으로 약 100m 이동한 것으로 나타난다. 그러나 해수와의 경계면에 가까이 갈수록 그 차이가 감소하여 TDS의 농도가 35000ppm의 등치선도에서는 거의 같다. 그러므로 낮은 농도분포에서는 지하수의 유입량에 따른 변화가 크게 나타나는 것으로 판단된다.

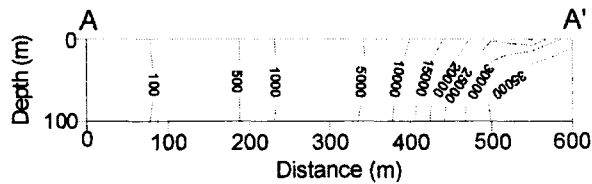


Fig. 5 TDS concentration section with the longitudinal dispersivity of 2.5m and horizontal hydraulic gradient with 0.008. Contour values are in  $\text{mg}/\ell$ .

수치모델링 결과를 비교·분석하기 위하여 전기비저항 탐사를 5월과 7월에 같은 지점에서 실시하였다. 전체적으로 동측과 동남쪽의 경계부에서 낮은 비저항분포가 나타나며, 7월의 전기비저항 분포는 5월보다 전기비저항 등치선도가 전체적으로 높게 형성된다. 이것은 6, 7월의 강수에 의한 대수층내 지하수 유입량 증가로 인하여 대수층에 침입된 염수의 농도가 다소 감소한 것으로 판단된다.

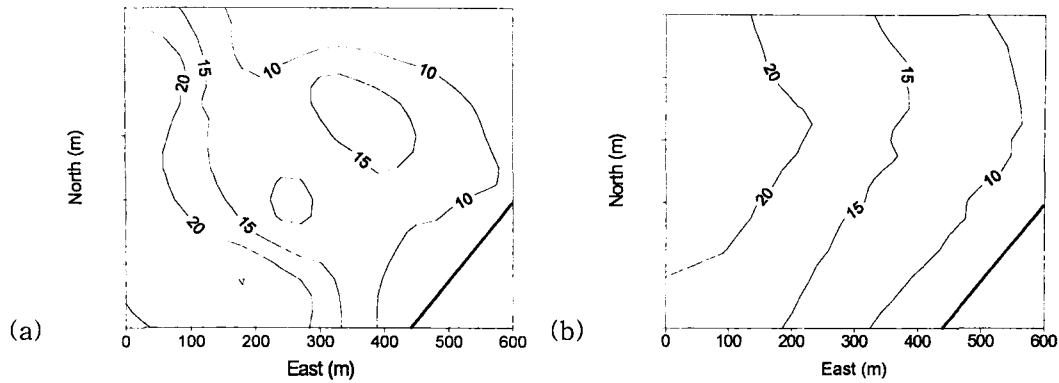


Fig. 6 Resistivity distribution from the inversion of VES data in (a) May and (b) July. Contour values are in ohm-m.

### 결론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 연구지역의 대수층은 피압상태로서, Tidal method에 의한 저류계수는 A hole에서 0.000024와 B hole에서는 0.000015로 측정되었다.
2. SUTRA 수치모델을 이용한 결과 분산지수가 커질수록 농도분포가 큰 차이를 나타내고 있으나, 지하수의 유속과 압력은 해수와 의 경계부에서만 약하게 변화한다.
3. SUTRA 모델링 결과 분산지수에 의한 대수층의 TDS 분포를 보면, 500ppm 등치선을 기준으로 종분산지수가 10m일 때와 2.5m일 때는 약 30m의 차이가 나타난다. 그러나 35,000ppm의 등치선에 가까울수록 두 단면의 농도 차이가 감소하였다. 속도 벡터의 크기는 종분산지수가 100m일 때와 10m일 때의 차이가 거의 없으나 압력분포는 우단 가까이에서 다소 변화가 있는 것으로 나타났다.
4. SUTRA 모델링 결과, 건기인 5월에는 종분산 지수가 2.5m 일 때 500ppm의 TDS 등치선을 기준으로 해안에서 약 510m 내륙까지 해수의 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 그러나 우기인 7월에는 강수로부터 다량의 지하수 함양에 의한 지하수위 상승을 고려하여, 평균수리경사를 0.008로 설정한 조건에서는 동일한 TDS 등치선을 기준으로 해안에서 약 410m 내륙까지 해수의 영향을 받는 것으로 나타났다.
5. 전기비저항 탐사에 의한 결과 염수침입은 우측하단의 경계면과 동쪽으로부터 시작되며, 7월의 전기비저항 분포가 5월보다 높게 나타나는 것은 6, 7월의 강수량에 의한 지하수 함양의 증가로 대수층의 염수 농도가 감소한 것에 기인한다.

### 참고문헌

- Ferris, J. G., 1951, Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility, IAHS Publ., 33, 148-155.
- Voss, C. I., 1984, SUTRA-Saturated Unsaturated Transport, U.S.Geol.Survey Water-Res.Inv.Rept. 84-4369, 409p.
- Bear, J., Cheng, A.H.-D., Sorek, S., Ouazar, D., and Herrera, I., 1999, Seawater Intrusion in Coastal Aquifers-Concepts, Methods and Practices, Kluwer Academic Publ., 625p.