

감조구역에서 지하수 수두의 거동 해석

Analysis of the Hydraulic Head Affected by Stage of Tidal Rivers

김민환(Min-Hwan Kim)* · 이재형(Jae-Hyoung Lee)**

요 약 : 조석의 영향을 받는 감조구역의 대수층은 감조 하천의 수위에 따라 지하수 수두의 변화가 예상된다. 지하수 수두가 주기적으로 변화하는 대수층에서 지하수를 이용하거나 구조물을 시공하기 위해서는 지하수 수두의 거동을 고려해야 한다. 감조구역에서 지하수 수두에 영향을 미치는 조석의 진폭과 투수계수 등의 변수에 대해서 수치실험을 수행하였다. 수치실험을 위해 1차원 유한차분 모형을 이용하였다. 우선 수치 모형의 안정성을 검토하기 위해 해석해와 비교하였다. 그리고 조석의 진폭과 투수계수가 지하수 수두에 미치는 영향에 대해 고찰하고 이 때 지하수의 수리경사가 존재하는 경우와 없는 경우에 대해 수치실험하였다. 또한 감조구역 내에서 양수를 하는 경우에 지하수 수두의 변화 양상을 고찰하기 위해 수치실험을 수행하였다. 본 논문에서 사용된 변수값을 이용하면 영향권은 약 60 m 정도인데 이는 한 파장($=\sqrt{(4\pi_0 T)/S}$) 내에서 영향권이 설정된다. 조석의 영향을 받는 대수층과 영향을 받지 않은 대수층에서 일정한 율로 양수하였다. 영향권 내에서 조석의 영향을 받는 대수층의 수두가 크기 때문에 상대적으로 양정고는 작아져 동력비의 절감을 가져올 수 있음을 알았다. 그리고 이들의 결과를 이용하면 감조구역에서 오염원의 추적, 지하수의 효율적인 이용, 구조물을 시공할 때 구조물의 안정성과 안전성을 검토하는데 도움이 될 것이다.

Abstract : In the tidal compartment, the hydraulic head is affected by the stage of tidal rivers. For groundwater or construct works, head variation of groundwater should be considered in zone of this aquifer. A numerical analysis is performed which has an 1-dimemsional explicit finite difference scheme to show the head variation of groundwater with tidal stage and hydraulic conductivity, etc. The stability of the numerical scheme is validated by using the analytic solution. The head variation of groundwater is observed for various tidal amplitude and hydraulic conductivity, mean hydraulic gradient and pumping at any point. The range of influence corresponding to the parameters used in this study is about 60m. This value is not beyond a wave length ($=\sqrt{(4\pi_0 T)/S}$). There was a pumping at a constant rate out of aquifers affected by tide and not affected by tide. Because pumping head in aquifer affected by tide is short, the expense of electric power is economized in this zone. These results are applicable to trace of contaminant transport, efficient operation of groundwater, and examination of the safety and stability of works in the tidal compartment.

서 론

하천수는 대양을 향해 유출되는데 하구 지역에서 용수 사용이 날로 증가되고 있는 실정이다. 전반적으로 용수 사용의 증가와 강우 부족으로 인한 하천수의 감소로 하구에서 양질의 용수 부족이 심각하다. 이를 극복하기 위해 지하수의 사용이 증가하고 있는데 감조구역에서 조석의 영향을 받는 하천 수위는 조위에 따라 상승 혹은 하강된다. 하천 수위의 상승 혹은 하강에 의한 변화에 따라서 하천 주변의 지하수 수두도 변화가 예상된다. 수위가 주기적으로 변화하는 해안지역이나 감조구역에서 지하수를 이용하거나 구조물을 시공하는 경우에 지하수 수두가 일정한 경우와는 다르게 취급되어야 한다. 하천의 중상류에서

다량의 하천수를 취수하는 경우에 하천의 하류 부분인 감조하천에서는 양질의 용수 감소가 예상된다. 따라서 하천에서 취수가 부적합한 경우에 용수가 비교적 풍부하고 하천수 보다 양질인 하천 주변의 지하수를 취수하는 경우가 발생한다. 이와 같이 조석의 영향을 받는 지하수의 경우에 하천 수위 변동이 지하수 수두 변동을 어느 정도 야기 시키고 양수시 어떤 영향을 미치는지는 흥미로운 연구 대상이다.

조석의 영향을 고려한 지하수 문제는 Erskine(1991)와 Serfes(1991)의 논문에서 찾아 볼 수 있다. 기존의 핵발전소 인근에 새로운 핵발전소의 건설 계획을 세운 후에 기초공사를 수행하기 위해 지하수를 배수시키는 문제가 발생하였다. 지하수의 배수로 인해 기존의 핵발전소 지역 아래의 지하수 압력교란이 발생하기 때문에 이를 최소화하기 위해 격벽을 설치하고 격벽 내외부에 83개의 피조메터를 설치하였다. Erskine(1991)는 피조메터에서 측정된 수위와 조위의 자료를 이용하여 조석의 영향을 관측하였다. 이 연구에서 조위와 내륙쪽의 피조메터 수위를

*호남대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Honam University, Kwangju), 506 - 090, 광주광역시 광산구 서봉동 59 - 1
**전북대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Chonbuk National University, Chonju), 560 756, 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가

시간지체(time lag: 조위 자료에서 최대치와 피조메터 자료에서 최대치의 시간차)와 조석 효율 계수(tidal efficiency factor: 조위 독치와 피조메터 독치의 곡선에서 이들의 진폭 비)를 이용하여 증첩시켰다. 시간지체와 조석 효율 계수는 대수층의 특성과 경계에서 내륙쪽의 거리에 따라서 변한다. Erskine(1991)는 지질에 따라서 거리와 시간지체, 거리와 조석효율의 관계를 제시하였다. 즉, 시간지체와 거리는 선형으로 증가하고 조석 효율과 거리는 지수적으로 감소함을 실측자료를 이용하여 제시하였다.

Sefes(1991)는 지하수의 수두가 변동하는 구역에서 지하수의 흐름 방향을 결정하기 위해 지하수의 수두 자료를 이용한 적이 있다. 지하수의 흐름 방향은 지하수 해석에 중요하다. 조석의 영향을 받고 있는 우물의 수위는 주기적으로 여러가지 원인에 의해서 변동하는데 단순히 수위의 측정만으로는 지하수의 흐름 방향을 결정할 수 없다. 정확한 지하수 흐름 방향을 결정하기 위해서 평균 수리 경사의 계산이 필요하다. Serfes(1991)는 내륙의 임의의 지점에서 지하수의 흐름 방향을 알기 위해 이 지점에서 평균 수위의 계산이 필요함을 제시하였다. 즉, 임의의 지점에서 조석의 영향으로 변화하는 지하수의 수리 경사 크기와 방향은 평균 수리 경사에 관해 변동된다. 지하수의 흐름은 평균 수리 경사를 사용하여 결정할 수 있다. 이는 평균 지하수 수위와 변동하는 지하수 수위를 비교하여 계산된다. 지하수의 평균 수위를 계산하면 평균 수리 경사를 결정할 수 있다. 본 논문에서 지하수의 평균 수리 경사를 결정하는 것이 아니기 때문에 이 문제는 다루지 않는다.

본 논문에서는 조석의 영향을 받는 대수층에서 양수를 하는 경우와 조석의 영향을 받는 하천 수위와 내륙의 경계로부터 내륙의 안쪽으로 조석의 영향이 어떻게 지하수에 전달되고 관련된 변수가 어떻게 영향이 미치는가를 파악하고자 한다. 이 결과는 감조구역에서 구조물을 시공하는 경우에 고려되어야 하며, 조석의 영향을 받는 하천이 오염되었을 경우에 오염원이 대수층으로 미치는 영향과 반대로 내륙의 임의의 점에서 오염원이 주입되었을 경우에 오염원의 전달 과정을 파악하는데 도움이 될 것이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위한 기초적인 연구 과정으로서 조석의 영향을 받는 1차원 수치 모형을 구성하여 해석해와 비교한다. 해석해는 1950년대의 여러 문헌과 Todd(1980), Iichirou Kono(1994) 문헌에 소개되어 있다. 우선 해석해와 1차원 수치해를 비교하여 해의 안정성을 살펴 본 후에 지하수 수두의 변동에 영향을 미치는 변수를 고찰하고 그 영향 정도를 평가한다. 수치해를 확장하여 조석의 영향을 받는 대수층에서 양수시 어떤 변화가 나타나는가를 고찰한다. 이를 토대로 조석의 영향을 받는 대수층에서 지하수 이용의 효율적인 운영 계획을 수립할 수 있고 지하수의 영향을 받는 구조물의 시공을 안전하게 수행할 수 있도록 기초적인 연구 성과를 제시하고자 한다.

조석 영향을 받는 지하수의 지배 방정식

조석의 영향을 받는 대수층에서 지하수 수위는 변동한다. 조석의 영향을 받는 하천 수위가 간단한 조화운동(harmonic motion)을 한다면 사인파 열(train)이 대수층의 내부로 전달된

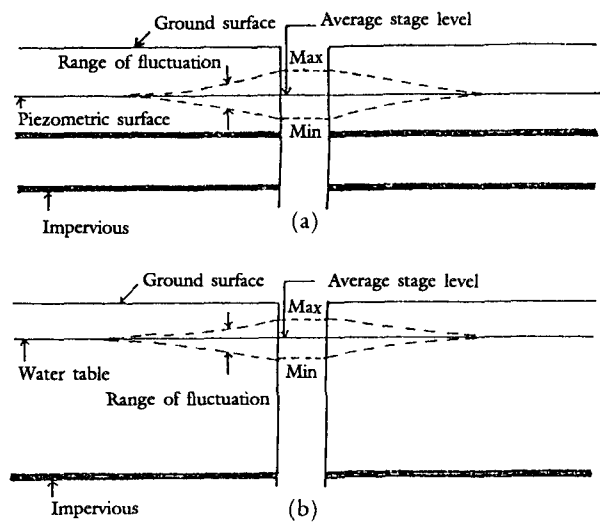


Figure 1. Hydraulic head fluctuations in tidal rivers. (a) Confined aquifer. (b) Unconfined aquifer.

다. 흐름이 1차원일 때 감조하천에서 지하수의 수두 변동을 피압대수층과 비피압대수층으로 구분하여 Figure 1에 나타냈다. 흐름의 상태가 비정상이고, 양수나 주수가 있는 경우의 피압대수층에 대한 2차원 지배방정식은 다음과 같이 나타 낼 수 있다 (Todd,1980; Wang et al.,1981).

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{W}{T} \quad (1)$$

여기서 h는 평균 수면에 대한 피조메터의 상승 혹은 하강 수두이고 x는 조석의 영향을 받는 수면과 내륙과의 경계로부터 내륙 쪽으로의 거리이다. S는 저류계수, T는 전달계수, t는 시간, W는 양수량, 혹은 주수량이다. Figure 1에서 조석의 진폭이 h_0 일 때 경계 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} h &= h_0 \sin \omega t & \text{at } x &= 0 \\ h &= 0 & \text{at } x &= \infty \end{aligned} \quad (2)$$

조석의 주기가 t_0 일때 각속도는 다음과 같다.

$$\omega = \frac{2\pi}{t_0} \quad (3)$$

피압대수층에 대한 지배방정식(1)에서 $W=0$ 인 1차원식과 경계 조건식(2)를 적용한 해석해는 다음과 같다(Todd, 1980).

$$h = h_0 \exp(-x\sqrt{\pi S/t_0 T}) \sin\left(\frac{2\pi t}{t_0} - x\sqrt{\pi S/t_0 T}\right) \quad (4)$$

이 해는 지체시간에 따라서 조석의 변동이 사인파로 형성되고 해안으로부터의 거리에 따라서 진폭이 지수적으로 감소하기 때문에 이(조석 효율)에 비례함을 보여 주고 있다. 즉 이들의 크기를 식으로 나타내면 다음과 같다(Erskine,1991).

$$\text{시간지체(time lag)} = x\sqrt{t_0 S/4\pi T} \quad (5)$$

$$\text{조석 효율 계수(tidal efficiency factor)} = \exp(-x\sqrt{\pi S/t_0 T}) \quad (6)$$

그리고 파장은 다음 식에 의해 계산된다(Serfes,1991; Todd, 1980).

$$\text{파장(wave length)} = \sqrt{(4\pi t_0 T)/S} \quad (7)$$

이상의 식들은 비피압대수층에서 수두 변동성분이 대수층의 포화두께에 비해서 작다면 수정없이 그대로 적용하여도 양호한 결과를 얻을 수 있다(Todd,1980). 앞 절에서 소개된 Erskine (1991)와 Serfes(1991)는 관측된 자료를 이용하여 위의 식들과의 관계로 접근시켰다. 조석의 영향을 받고 있는 수위 변동이 식(4)와 같이 주어질 때 이에 대한 유속은 식(4)를 x 에 관해 미분하여 투수계수 K 를 곱하고 유효공극률 n_c 로 나누어 주면 구할 수 있다 (Chan, 1992).

$$V_0 = h_0 \frac{K}{n_c} \beta \exp(-x\beta) \sqrt{2} \sin\left[\frac{2\pi t}{t_0} - x\beta + \frac{\pi}{4}\right] \quad (8)$$

여기서,

$$\beta = \sqrt{(\pi S)/(t_0 T)} \quad (9)$$

식(8)은 조석에 의해 발생하는 변동 유속장(velocity field)이라고 할 수 있다. 조석의 영향을 받고 있는 지하수의 총 유속장은 지역의 지하수 흐름(regional ground-water flow)의 유속과 조석의 영향으로 인한 변동 유속을 합하면 된다. 본 논문에서는 조석의 진폭과 대수층 특성에 따른 지하수의 거동과 감조구역에서 양수하는 경우의 지하수 거동을 고찰하고자 한다.

수치실험 및 고찰

본 절에서는 수치해와 식(4)의 해석해와 비교하기 위해 지배방정식(1)을 1차원의 양해 유한차분법을 적용하였다. 대상 영역은 Figure 1에 나타난 바와 같이 1차원의 대상영역으로서 길이 L , 길이의 간격을 Δx , 시간 간격을 Δt 라고 할 때 평균 수두에 대한 수두 변동은 다음과 같다.

$$h_i^{n+1} = h_i^n + \frac{T \cdot \Delta t}{S} \left[\left(\frac{h_{i+1}^n - 2h_i^n + h_{i-1}^n}{\Delta x^2} \right) - \frac{W_i^n}{T} \right] \quad (10)$$

여기에서 n 은 시간 단계를 나타내는 첨자이다. 모형 실험을 위해 사용되는 변수 값은 별도의 언급이 없는 한 Table 1에 제시된 값을 사용한다. 실측자료가 없어서 본 연구에서는 양수에 의한 지하수 거동을 고찰하기 위한 것이기 때문에 Chan (1992)가 사용한 변수값을 근거로 하여 양수가 가능한 대수층이 되도록 선우(1991)의 투수계수 분류표를 참고로 수정하였다. 앞 절에서는 해석해를 소개하였으며 양수와 주수가 있는 경우의 1차원 수치모형을 본 절에서 제시하였다. 수치해의 안정 여부를 판단하기 위해 식(10)에서 $W=0$ 인 경우와 해석해의 식(4)를 비교한다. 이 후에 지역의 지하수 수리 경사가 존재하는 경우에 대해 수치실험한다. 또한 지배방정식에 관련된 제 변수(투수계수, 진폭 등)의 변화를 고찰하고 양수하는 경우에 대해서도 실험한다.

Table 1. Input parameters used in model.

변 수	값
조석의 진폭	$h_0 = 0.5 \text{ m}$
조석의 주기	$t_0 = 0.52 \text{ days}$
대수층의 성질	$\beta = 0.0898 \text{ m}^{-1}$ (식 (9) 참조)
	투수계수 $K = 1.5 \text{ m/day}$
	대수층의 두께 $D = 10 \text{ m}$
	저류계수 $S = 0.02$
대상영역	유효공극률 $n_c = 0.20$
	$L = 100 \text{ m}$
시간 간격	$\Delta x = 4 \text{ m}$
	$\Delta t = 0.01 \text{ day}$

수치해와 해석해의 비교

본 절에서는 해석해(식(4))와 수치해(식(10))를 비교하기 위해 식(10)에서 양수나 주수가 없는 경우에 대해서 수행한다($W=0$). Figure 1에서 보는 바와 같이 경계($x=0 \text{ m}$)에서 평균 수위가 15 m 일 때 식(10)에 식(2)의 경계 조건을 적용하고 초기 조건으로는 $t=0$ 일 때 전 구간에 대해 수두가 15 m 로 일정하다고 가정하였다. 양해 유한차분법으로 구성된 식(10)은 해가 안정 되도록 전달계수와 저류계수에 대해 공간 변수와 시간변수의 값을 적절히 선택해야 한다($T\Delta t/S(\Delta x)^2 \leq 0.5$, Rushton *et al.*, 1979; Wang *et al.*, 1982). 식(10)에 의해 수행된 수치해에 대한 결과를 Figure 2에 도시하였으며 식(4)에서 제시한 해석해의 결과를 역시 Figure 2에 도시하였다. Figure 2는 $x=20 \text{ m}$ 지점에서 시간에 따라서 수두의 변화 양상을 도시한 것이다. 수치해와 해석해는 거의 비슷한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 초반부에서의 약간의 차이는 수치해인 경우에 초기 조건으로 수두가 15 m 로 일정하다고 가정하였으며 해석해인 경우에 $t=0$ 일 때 $x=20 \text{ m}$ 지점에서 수두 15 m 보다 약간 작은 값을 갖기 때문이다. 이 차이는 수치해에서 조석의 영향이 $x=20 \text{ m}$ 지점까지 전달될 충분한 시간 이후에 제거된다. 그리고 $x=20 \text{ m}$ 지점에서 시간에 대한 유속을 고찰하기 위해 식(8)을 적용해 얻은 결과를 Figure 3에 도시하였다. Figure 2와 Figure 3으로부터 수두가 큰 곳에서 유속이 작고, 반대로 수두가 작은 곳에서 유속이 큰 것을 알 수 있다. 즉 유입과 유출이 없는 경우이기 때문에 질량보존의 법칙을 만족하는 형상으로 변화되고 있음을 알 수 있다.

Figure 2로부터 식(4)와 식(10)을 비교한 결과, 수치실험이 정상적으로 운영됨을 알 수 있다. 본 모형 실험은 지하수의 영역 내부에 수두가 15 m 로 일정하게 간주하여 지하수의 수리 경사가 없는 경우이나 만일 지하수의 수리 경사가 있을 경우에 조석의 영향이 있는 경우와 없는 경우를 구분하여 수치실험을 확장하여 수행한다.

지하수의 수리 경사가 있는 경우

지하수의 흐름이 발생하면 지하수는 수리 경사를 갖는다. 본 절에서는 수리 경사가 존재하고 조석의 영향을 받는 지하수의 수두 변화에 대해서 고찰한다. 사용할 제 변수는 앞 절의 예와 동일한데 영역 내부에서 수리 경사가 있는 경우에 대해서 수행

한다. 영역 내부의 수리 경사는 0.01의 값(Chan S., 1992) 사용한다. 이 모형에서 수치실험에 사용될 경계 조건은 2가지로 구분하여 적용한다. 첫번째의 경계 조건으로 $x=0$ m 지점에서 조석의 영향이 없이 수두가 15 m로 일정한 경우에 대해 적용하였다. 이 결과, $x=20$ m 지점에서 $t=0$ day일 때 수두는 15.2 m인데 $t=29.9$ day일 때 경계에서의 수두인 15.00 m로 되었다. 또한 약 36.44 day일 때 전 구간의 수두가 경계에서의 수두인 15.00 m로 정상상태가 되었다. $x=20$ m 지점에서 수두의 변화를 시간에 따라서 감소되는 과정을 Figure 4에 도시하였다. 두번째는 경계 조건으로 조석의 영향을 받는 식(2)를 적용하여 수행하여 살펴 보았다. Figure 4에서 보는 바와 같이 조석의 영향을 받고 있는 수두는 첫번째의 경계 조건인 경우에 대한 수두 변화 양상을 중심으로 사인파를 형성하면서 변화함을 알 수 있다. 또한 시간 6.24 day에서 처음으로 수두가 15 m이하로 떨어짐을 알 수 있으며 시간이 29.9day 이상이면 수두 15 m를 중심으로 진폭이 8.60 cm인 일정한 사인파가 계속된다.

이와 같이 한 지점에서 조석의 영향이 있는 경우는 없는 경우를 중심으로 변화됨을 알 수 있다. 다음 예제에서 수두에 영향을 주는 요소에 대해 고찰한다.

진폭과 투수계수가 수두에 미치는 영향

본 절에서 조석의 진폭과 투수계수의 변화가 어떻게 지하수 영역 내부에 전달되는가를 고찰하고 이 관계를 설정한다. 조석

의 진폭이 내부 영역의 지점에 전달되는 상황을 알아 보기 위해 $x=20, 28, 36$ m를 선택하여 시간에 따라 수두 변화를 계산하였다. 이 지점에서 수두 변화를 Figure 5에 나타냈는데 그림에서 보는 바와 같이 경계에서 멀어질 수록 수두 변동 폭이 달라지며 전달 시간이 지체됨을 알 수 있다. 즉, 최대 수두는 $x=20$ m에서 8.60 cm, $x=28$ m에서 4.25 cm, $x=36$ m에서 2.10 cm를 나타내고 있으며 약 56 m지점 이상에서 수두의 변화가 1.00 cm미만으로 계산되었다. 이와 같이 수두의 최대 크기가 지점에 따라서 다른데 수두의 크기에 영향을 주는 요소로 조석의 특성인 조석의 진폭과 대수층의 특성인 투수계수를 선택하여 실험을 수행한다. (1) 투수계수($K=1.5$ m/day)가 일정할 때 조석의 진폭을 변경하여 각 지점에서의 수두의 변동과 (2) 조석의 진폭($h_0=0.5$ m)이 일정할 때 투수계수를 변화시켜 수두의 변화 양상을 살펴 보기 위해 수치실험을 수행하였다. 2경우에 대해 각각 $x=20, 24, 28, 32, 36$ m 지점에서 수치실험에 의해서 얻어진 최대 수두의 크기를 지수함수로 피팅하여 Figure 6과 7에 도시하였다. 이 관계는 지수함수식을 만족해야 한다. 수두의 크기를 거리에 대한 지수함수식으로 나타내면 $h=ab^x$ 이다. 수치실험에 의해 얻어진 결과를 이 식에 적용하여 결정된 계수 a와 b를 Table 2에 제시하였다. Table 2에서 보는 바와 같이 투수계수가 일정할 때 조석의 진폭에 따라서 a의 변화는 다소 크지만 b의 변화는 미소함을 알 수 있다. 이는 조석의 진폭에 따라 수두가 선형으로 비례함을 알 수 있다. 그리

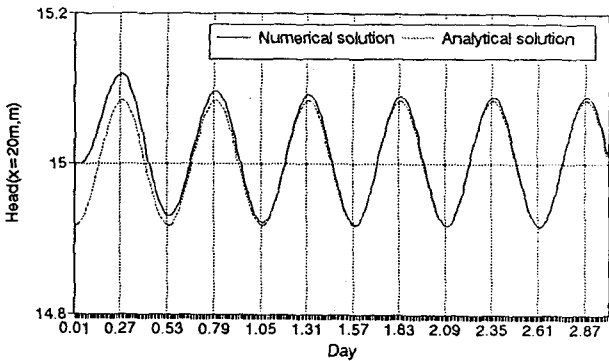


Figure 2. Comparison of analytical and numerical solutions at $x=20$ m.

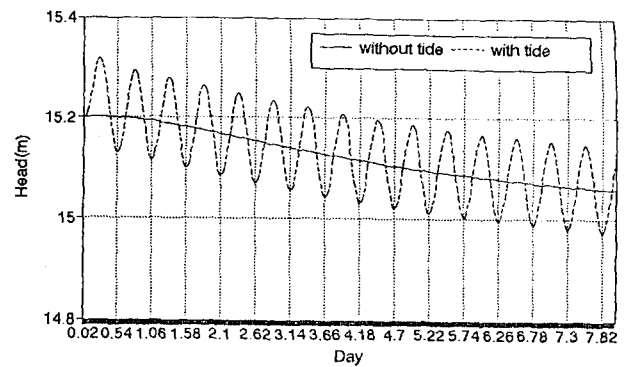


Figure 3. Velocity variation of groundwater flow at $x=20$ m.

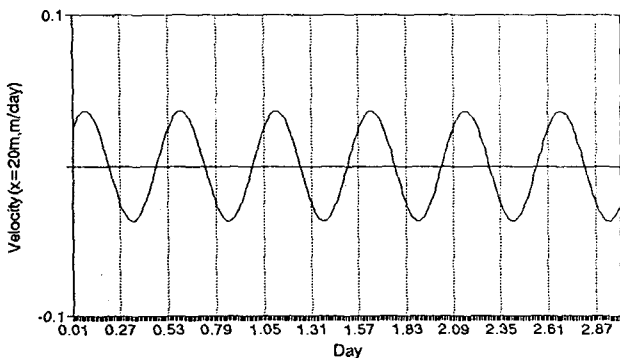


Figure 4. Head variation with regional groundwater gradient at $x=20$ m.

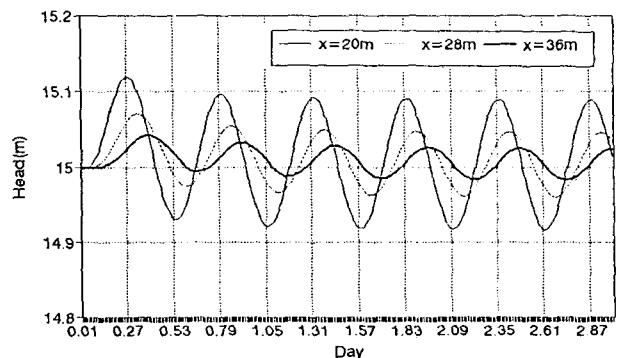


Figure 5. Head variations for time at $x=20$ m, $x=28$ m, $x=36$ m.

고 조석의 진폭이 일정할 때 투수계수에 따라서 a와 b의 변화가 모두 미소함을 나타내고 있다. 또 수치실험에 의해서 얻어진 수두의 크기와 피팅에 의해서 계산된 수두 값에서 잔차의 제곱 합은 아주 작음을 알 수 있다. 즉, 얻어진 결과는 지수함수식을 만족한다. 수치실험에 의해서 조석의 진폭은 영역 내부에서 수두의 크기에 비례하여 반응을 한다. 그러나 투수계수는 수두의 크기와 지체시간에 영향을 미치는데 그리 크지 않다는 사실을 알 수 있다. 대수층의 특성을 알면 조석의 진폭에 따라 내륙의 여러 지점에서 수두의 변화를 계산할 수 있다.

$x = 20$ m 지점에서 투수계수와 조석의 진폭을 변화시켰을 때, 수두를 시간에 대해 Figure 8에 도시하였다. 투수계수가 일정할 때 조석의 진폭이 다른 경우에 $x = 20$ m 지점에서 수두의 크기는 조석의 진폭에 비례함을 알 수 있다. 그리고 조석의 진

폭이 일정하고 투수계수가 1.5 m/day에서 1.0 m/day로 달라지면 수두는 작아지고 전달 시간이 지체됨을 알 수 있다. 이와 같이 투수계수의 변화는 지점에서의 수두의 크기와 지체시간에 영향을 주지만 동일한 조건에서 오직 조석의 변화는 지점에서 수두의 크기에만 영향을 준다. 즉, 동일한 대수층에서 조석의 진폭 변화는 각 지점에서 수두의 크기에만 비례하여 반응하며 투수계수가 크면 클 수록 수두의 크기는 선형으로 비례하여 커진다. 이 관계를 구체적으로 살펴 보기 위해 이 조건에서 투수계수를 0.5 m/day에서 1.5 m/day까지 0.2씩 증가시켰을 때 최대 수두와 투수계수의 관계는 $h_{max}(m) = 0.0620K(m/day)$ 로 선형이다.

거리에 따른 수두 변화

본 절에서는 조석이 대수층의 어느 부분까지 영향을 미치는가를 수치실험한다. 조석의 진폭이 0.5m이고 투수계수가 1.5m/

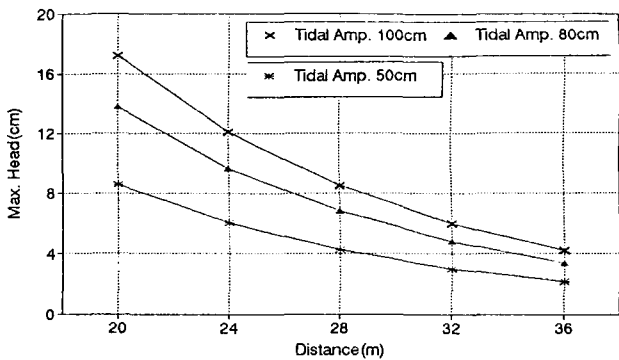


Figure 6. Relationship of max. head and distance for various tidal amplitude.

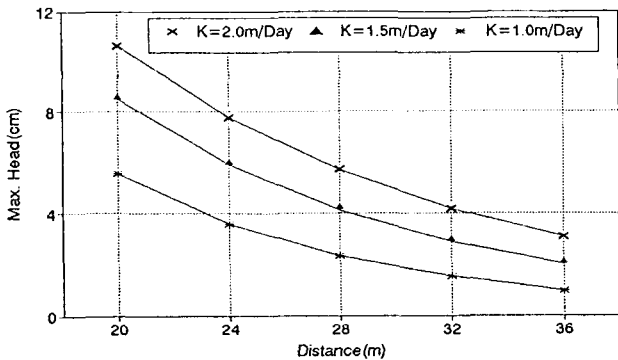


Figure 7. Relationship of max. head and distance for various hydraulic conductivity.

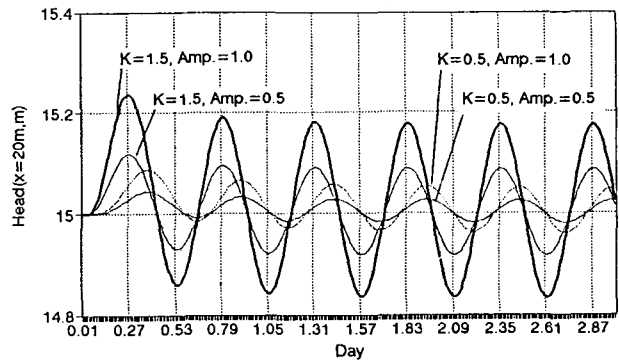


Figure 8. Head variation for various hydraulic conductivity and tidal amplitude.

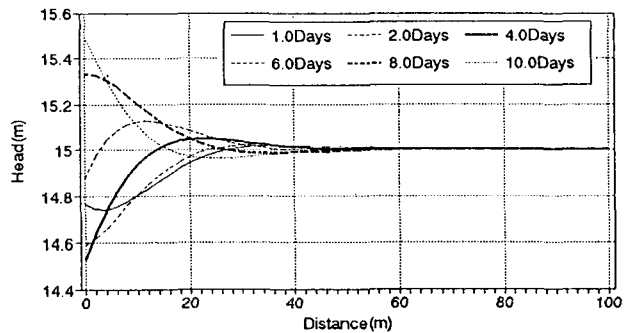


Figure 9. Relationship of head and distance for time.

Table 2. Head variation with varying hydraulic conductivity and tidal amplitude.

	조석 진폭 (m)	수두 변화 (a * b ^x)	잔차의 제곱 합
투수계수 = 1.5 m/day	0.5	50.03914 * 0.91570 ^x	0.21012 * 10 ⁻¹
	0.8	79.67930 * 0.91588 ^x	0.28267 * 10 ⁻¹
	1.0	99.65827 * 0.91584 ^x	0.50336 * 10 ⁻¹
조석진폭 = 0.5 m	투수계수 (m/day)	수두 변화 (a * b ^x)	잔차의 제곱 합
	1.0	49.23280 * 0.89662 ^x	0.42413 * 10 ⁻¹
	1.5	50.03914 * 0.91570 ^x	0.21012 * 10 ⁻¹
	2.0	50.11755 * 0.92537 ^x	0.32025 * 10 ⁻¹

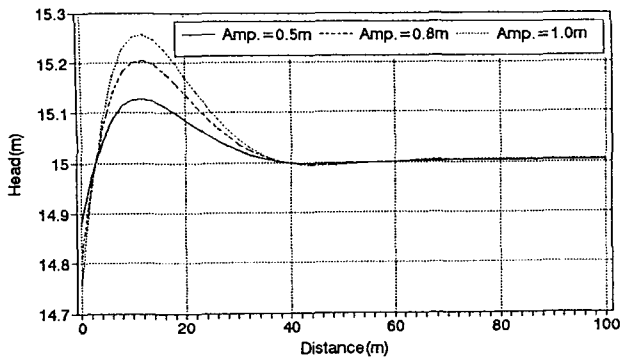


Figure 10. Relationship of head and distance for various tidal amplitude.

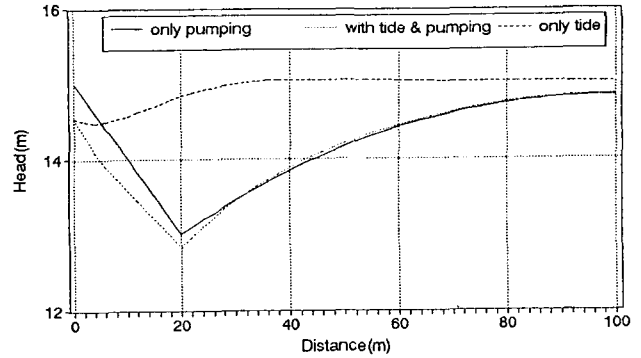


Figure 12. Head variation by only pumping, pumping with tide, or only tide(at x=20 m).

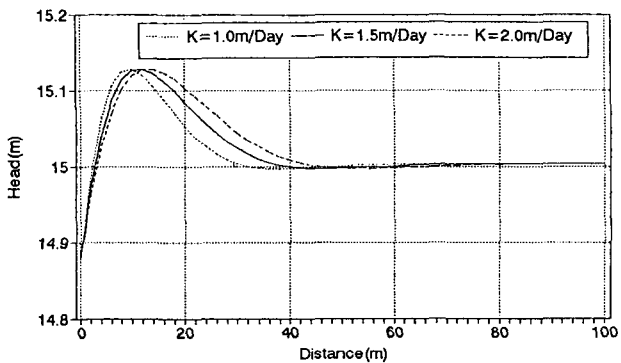


Figure 11. Relationship of head and distance for various hydraulic conductivity.

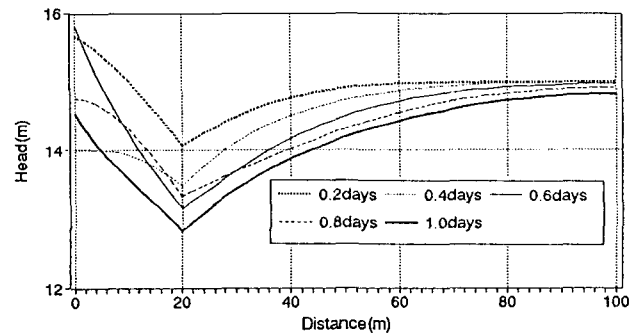


Figure 13. Head variation by pumping with tide(at x=20 m).

day일 때 선택된 시간에 대해서 거리에 따른 수두 변화를 고찰하기 위해 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 day일 때, 거리에 대한 수두 변화를 Figure 9에 도시하였다. Figure 9에서 보는 바와 같이 이 경우에 영향을 받는 거리는 약 60m 이상이면 거의 변화가 없다. 이와 같은 조건에서 임의의 시간(6day)에 대해 진폭의 변화와 투수계수의 변화에 어떻게 영향을 미치는가를 살펴보기 위해 우선 조석의 진폭에 따라서 수두의 변화를 Figure 10에 도시하였다. Figure 10에서 보는 바와 같이 조석의 진폭별로 약 $x = 12$ m 지점에서 최대 수두를 나타내고 있으나 역시 60 m 지점 이상부터는 변화가 없음을 알 수 있다. 이번에는 투수계수를 변화시켜 거리에 따른 수두의 변화를 Figure 11에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 투수계수의 변화에 대해서는 단지 거리에 따라 지체시간의 변화만 약간 가져올 뿐 진폭의 크기에 있어서 차이는 없다. 그리고 거리에 따라서 역시 60 m 이상부터는 변화가 거의 미소하다. 식(7)은 조석의 영향 때문에 대수층 내부로 전달되는 파장에 관한 식인데 투수계수와는 제공근에 비례하지만 60 m 이상에서 진폭이 미소하기 때문에 투수계수도 큰 변화를 가져 오지 못함을 알 수 있다. Table 1에서 제시된 변수값을 이용하여 식(7)의 파장식에 대입하면 파장은 약 70 m가 되며 변동하는 진폭은 거리에 따라 지수적으로 감소하기 때문에 70 m 이상부터는 변화가 없는 것으로 간주할 수 있다.

조석의 영향이 양수에 미치는 영향

조석의 영향을 받는 대수층에서 양수하는 경우에 수두의 변화량을 본 질에서 고찰한다. 대상영역은 Figure 1과 같으나 $\Delta x = 2$ m, $\Delta t = 0.002$ day, $h_0 = 1.0$ m, $K = 2.0$ m/day 로 하였다. 변수값의 변화는 양수에 의한 수두의 변화를 상세히 관찰하기 위해 Δx 를 작게 하였는데 이에 따라 다른 변수도 수치해의 안정 조건(Rushton, K.R., 1979, Wang, F.H, 1981)을 만족하도록 조정하였다. 그리고 양수 지점은 $x = 20$ m 지점에서 $3 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 부과하였다. 이 수치실험은 조석에 의한 영향을 고찰하기 위해 3가지의 경우로 구분하여 수행한다. (1) 조석의 영향이 없고 전 구간에 걸쳐 초기 수두를 15 m라 하였을 때 양수하는 경우, (2) 조석의 영향하에서 양수하는 경우, (3) 양수 없이 오직 조석의 영향만 받고 있는 경우의 수두 변화에 대해 실험한다. 시간 $t = 1.0$ day일 때 이 결과를 Figure 12에 도시하였다. 양수지점을 중심으로 조석의 영향을 받는 경우가 조석 이 없는 경우 보다 다소 수두가 아래에 있음으로서 수두 차가 발생하는데 이는 조석의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 양수 지점에서 다소 차이를 알 수 있지만 양수 지점을 30 m 이상으로 이동한 경우에 그 지점에서 수두 차는 작아진다. 즉 경계에서 멀리 떨어진 곳에서 양수할수록 조석의 영향이 양수 지점에서 작아진다. Figure 12는 시간 1.0 day에서 전 구간에 대한 수두의 양상이기 때문에 양수 지점에서 조석의 영향을 파악하기가 어렵다. 그러므로 전 구간에 대해 시간 0.2, 0.4, 0.6, 0.8,

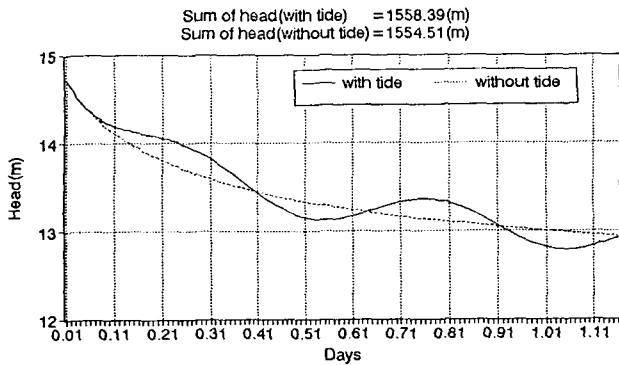


Figure 14. Summation of head for time by pumping with or without tide at $x=20$ m.

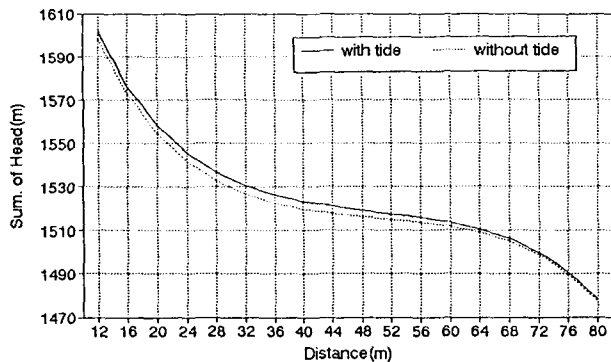


Figure 15. Summation of head for distance by pumping with or without tide.

1.0 day일 때 수두의 변화 양상을 파악하기 위해 수치실험한 결과를 Figure 13에 도시하였다. 양수지점에서 0.6 day에서 보다 0.8 day에서 조석의 영향으로 수두가 약간 높게 나타나 있는데 이는 조석의 영향으로 수위 변동이 시간에 따라서 역전되는 경우를 나타내고 있다. 그리고 양수지점에서의 수두가 시간에 따라서 어떻게 변화하는가를 살펴 보기 위해 경계에서 조석의 영향이 있는 경우와 없는 경우를 구분하여 실험하였다. 이 결과를 Figure 14에 도시하였는데 조석의 영향이 없는 경우를 중심으로 사인파를 형성하고 있다. 시간 간격을 0.01 day에서 1.16 day 까지 0.01 day (14.4 min) 간격으로 각 수두의 합을 계산하였다. 조석의 영향이 있는 경우에 수두의 합은 1558.39 m이고 조석의 영향이 없는 경우의 수두 합은 1554.51 m이다. 이 차이는 3.88 m인데 조석이 있는 경우와 없는 경우에 양정고의 차이를 보인다. 즉, 동력비의 차이가 있음을 시사하고 있다. 양수지점에 따라서 조석이 미치는 영향을 평가하기 위해 양수지점을 $x=12$ m지점에서 80 m지점까지 이동하면서 $3 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 양수하였다. 각 양수지점에서 0.01-1.16 day까지 0.01 day 간격으로 수두의 합을 계산하여 Figure 15에 도시하였다. Figure 15에서 보는 바와 같이 조석이 있는 경우와 없는 경우의 차이는 약 40 m지점까지는 3-4 m이다. 이 값은 조석의 영향을 평가하기 위해 단순히 0.01 day간격에서 수두의 합이다. 그러나 조석의 영향이 작은 60 m지점 이상부터는 수두차가 작아지고 수두의 합도 급강하하

기 시작하는데 60 m지점 이후에는 조석의 영향이 미약함을 나타내고 있다. 조석의 영향을 받는 지역에서 양수지점의 선택은 동력비에 영향을 주기 때문에 영향권 내에서 양수지점을 선택하면 동력비를 절감할 수 있다.

이상과 같이 조석의 영향을 받는 대수층에서 대수층의 특성 변수와 조석과의 관계를 고찰하였다. 조석의 영향을 받는 지역에서 양수를 할 때, 양수지점의 위치와 양수시간의 선택에 따라 양정고가 다르기 때문에 양수지점의 선택은 동력비에 영향을 주므로 이에 대한 연구가 후속되어야 할 것이다. 그리고 본 논문에서는 논의되지 않았지만 구조물을 시공하는 경우에 조석의 영향을 받는 관련된 변수를 이용하여 지하수의 수두를 고려하여 안전성과 안정성을 고려해야 한다.

결론

조석의 영향을 받는 대수층에서 지하수의 수위가 시간과 거리에 따라서 변동된다. 이 지역에서 지하수를 이용하거나 구조물을 시공하는 경우에 효율성이나 안전성의 검토를 위해 지하수의 수두 변화를 파악해야 한다. 본 논문에서는 조석의 진폭과 대수층의 특성이 지하수의 수두 변동에 미치는 영향과 이 지역에서 지하수를 양수하는 경우에 나타나는 반응을 수치실험에 의해서 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1 본 논문에서 제시된 1차원 수치해는 양수가 없는 경우에 해석해와 비교해 본 결과, 양호하게 일치하였다.

2 거리에 대해 조석의 진폭은 지하수 수두의 크기에만 비례하여 반응하고 투수계수는 시간지체를 유발시킬 뿐 대상 영역에서 수두의 크기는 일정하다. 시간에 대해 조석의 진폭은 지하수 수두의 변화에 비례하여 반응하지만 투수계수는 임의의 지점에서 수두의 크기와 시간지체에 영향을 준다.

3 대수층의 특성에 따라 조석의 영향권을 설정하여야 한다. 본 논문에서 채택한 대수층의 경우에 조석의 영향은 약 60 m 이상에서 미약하게 나타났다. 즉, 수두는 한 파장이내에서 변동한다.

4 조석의 영향을 받는 대수층에서 양수하는 경우가 영향을 받지 않는 곳에서 보다 수두의 합이 크며 양수지점을 고려하면 동력비를 절감할 수 있다.

이상과 같이 조석의 영향을 받는 대수층에서 대수층의 특성과 조석의 진폭에 대한 반응을 고찰하였지만 대수층의 특성에 관련된 변수가 많기 때문에 이들의 관계를 정확히 구체적으로 규명하지는 못했다. 그러나 조석의 영향을 받는 지역에서 지하수의 변동을 고려할 것인가를 판단할 수 있는 초보적인 연구 성과를 제시하였다. 향후의 연구 과제로는 조석의 영향권 내에서 양수하는 경우에 양수 지점의 선택에 따라 동력비의 절감을 가져오므로 이 지역에서 지하수의 효율적인 운영 관리에 대한 연구가 필요하다. 그리고 지하수의 흐름은 조석의 영향을 직접적으로 받기 때문에 오염원의 유입되었을 경우에 이의 추적 문제도 다루어 져야 할 것이다.

참고문헌

김남형의 공역, 1994, 地下水工學, 歐美書館, p.37-39.

- 선우중호, 1991, 수문학, 동명사, p.102-103.
- Erskine, A.D., 1991, The effect of tidal fluctuation on a coastal aquifer in the UK, Ground Water, Vol.29, No.4, p.556-562.
- Rushton, K.R., 1979, Seepage and groundwater flow, John Wiley and Sons Inc., New York, p.180.
- Serfes, M.E., 1991, Determining the mean hydraulic gradient of ground water affected by tidal fluctuations, Ground Water, Vol. 29, No.4, p.549-555.
- Todd, D.K., 1980, Ground water hydrology, 2nd ed. John Wiley and Sons Inc., New York, p.242-247.
- Wang, F.H., 1981, Introduction to groundwater modeling, Freeman, p.67-88.
- Yim, C.S., and Mohsen, M.F.N., 1992, Simulation of tidal effects on contaminant transport in porous media, Ground Water, Vol.30, No.1, p.78-86.