

감조 구역의 지하수 수위 거동에 관한 연구

이 재형¹⁾ 김 민환²⁾

1. 서론

해안지역에서 조석의 영향을 받는 하천 수위는 조위에 따라 상승 혹은 하강된다. 하천 수위의 변화에 따라서 하천 주변의 지하수 수위도 변화가 예상된다. 수위가 주기적으로 변화하는 해안지역에서 지하수를 이용하거나 구조물을 시공하는 경우에 지하수 수위가 일정한 경우와는 다르게 취급되어 져야한다. 이와 같이 조석의 영향을 받는 지하수의 경우에 하천 수위 변동이 지하수 수위 변동을 어느 정도 야기 시키고 양수시 어떤 영향을 미치는지는 흥미로운 연구 대상이다.

해안지역에서 지하수의 이용은 급속도로 증가할 것이기 때문에 조석의 영향을 받는 대수층의 지하수 수위 거동의 평가는 의미가 있다. 조석의 영향을 받는 1차원 수치 모형을 구성하여 해석해(Todd, 1980)와 비교하고 지하수 수위에 영향을 미치는 변수와 양수시 어떤 변화가 나타나는가를 고찰한다.

2. 조석 영향을 받는 지하수의 지배 방정식

조석의 영향을 받는 하천 수위가 간단한 조화운동(harmonic motion)을 한다면 사인과 열(train)이 대수층의 내부로 전달된다. 흐름이 1차원일 때 지하수의 수두를 간단히 그림 2-1에 나타냈다. 흐름의 상태가 비정상이고, 양수나 주수가 있는 경우의 피압대수층에 대한 2차원 지배방정식은 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{W}{T} \tag{2-1}$$

여기서 h는 평균 수면에 대한 피조메터의 상승 혹은 하강 수두이고 x는 조석의 영향을 받는 수면과 내륙과의 경계로부터 내륙쪽으로의 거리이다. S는 저류계수, T는 전달계수, t는 시간, W는 양수량, 혹은 주수량이다. 그림2-1에서 조석의 진폭이 h₀일 때 경계 조건은 다음과 같다.

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

조석의 주기가 t₀ 일 때 각속도는 다음과 같다.

$$\omega = \frac{2\pi}{t_0} \tag{2-3}$$

피압대수층에 대한 지배방정식(2-1)과 경계 조건식(2-2)를 적용한 해석해는 다음과 같다.

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

1) 전북대학교 토목공학과 교수
2) 호남대학교 토목공학과 조교수

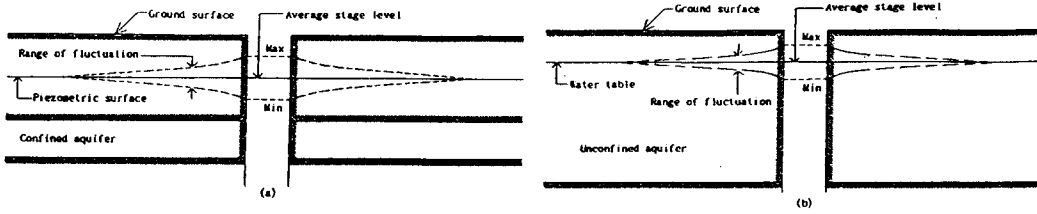


그림 2-1 조석의 영향을 받는 대수층의 개념도

이 해(Todd, 1980)는 지체시간에 따라서 조석의 변동이 사인파로 형성되고 해안으로부터의 거리에 따라서 진폭이 지수적으로 감소하기 때문에 이(조석 효율)에 비례함을 보여 주고 있다. 즉 이들의 크기와 파장은 다음과 같다(Erskine, 1991).

$$\text{시간지체(time lag)} = x\sqrt{t_0 S / 4\pi T} \quad (2-5)$$

$$\text{조석 효율 계수(tidal efficiency factor)} = \exp(-x\sqrt{\pi S / t_0 T}) \quad (2-6)$$

$$\text{파장(wave length)} = \sqrt{(4\pi t_0 T) / S} \quad (2-7)$$

이상의 식들은 비피압대수층에서 수위 변동성분이 대수층의 포화두께에 비해서 작다면 수정없이 그대로 적용하여도 양호한 결과를 얻을 수 있다(Todd, 1980). Erskine(1991)와 Serfes(1991)는 관측된 자료를 이용하여 위의 식들과의 관계로 접근시켰다. 조석의 영향을 받고 있는 수위 변동이 식(2-4)와 같이 주어질 때 이에 대한 유속은 식(2-4)를 x 에 관해 미분하여 투수계수 K 를 곱하고 유효공극을 n_e 로 나누어 주면 구할 수 있다(Chan, 1992).

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

여기서, $\beta = \sqrt{(\pi S) / (t_0 T)}$

조석의 영향을 받고 있는 지하수의 총 유속장은 지역의 지하수 흐름(regional ground-water flow)의 유속과 조석의 영향으로 인한 변동 유속을 합하면 된다.

3. 수치실험 및 고찰

본 절에서는 우선 수치해와 해석해와 비교하기 위해 지배방정식(2-1)을 1차원의 양해 유한 차분법을 적용하였다. 대상영역은 그림 2-1에 나타난 바와 같이 1차원으로서 길이를 L , 길이의 간격을 Δx , 시간 간격을 Δt 라고 할 때 평균수두에 대한 수두 변동은 다음과 같다.

$$h_i^{n+1} = h_i^n + \frac{T \cdot \Delta t}{S} \left[\left(\frac{h_{i+1}^n - 2h_i^n + h_{i-1}^n}{\Delta x^2} \right) - \frac{W_i^n}{T} \right] \quad (3-1)$$

여기에서 n 은 시간 단계를 나타내는 첨자이다. 모형 실험을 위해 사용되는 변수 값은 표3-1에 제시된 값을 사용한다. 수치해의 안정 여부를 해석해와 비교하고 지배방정식에 관련된 제 변수(투

수계수, 진폭 등)와 조석과의 관계, 이 지역에서 양수하는 경우에 대해서 실험한다.

3-1. 수치해와 해석해의 비교

그림 2-1의 경계($x=0m$)에서 평균 수위가 15m일 때 식(3-1)에 식(2-2)의 경계 조건을 적용하고 초기 조건으로는 $t=0$ 일 때 전 구간에 대해 수두가 15m로 일정하다고 가정하였다. 식(3-1)에 의해 수행된 수치해에 대한 결과와 식(2-4)에서 제시한 해석해를 프로그래밍하여 얻은 결과를 그림 3-1에 도시하였다($x=20m$). 그리고 $x=20m$ 지점에서 시간에 대한 유속을 고찰하기 위해 식(2-8)을 적용해 본 결과, 수두가 큰 곳에서 유속이 작고, 반대로 수두가 작은 곳에서 유속이 크게 나타났다.

3-2. 지하수의 수리 경사가 있는 경우

본 절에서는 수리 경사가 존재하고 조석의 영향을 받는 지하수의 수두 변화에 대해서 고찰한다. 영역 내부의 수리 경사는 0.01(초기 조건)로 가정하여 수치실험을 수행한다. 이 모형의 수치실험에 사용될 경계 조건은 2가지로 구분하였는데 첫번째의 경계 조건으로 $x=0m$ 지점에서 조석의 영향이 없이 수두가 15m로 일정한 경우에 대해 적용하였다. 이 결과, $x=20m$ 지점에서 $t=0$ 일 때 수두는 15.2m인데 $t=29.9$ day일 때 경계에서의 수두인 15.00m로 되었다. 또한 약 36.44day일 때 전 구간의 수두가 경계에서의 수두인 15.00m로 정상상태가 되었다. $x=20m$ 지점에서 수두의 변화를 시간에 따라서 감소되는 과정을 그림 3-2에 도시하였다. 두번째는 경계 조건으로 조석의 영향을 받는 식(2-2)를 적용하여 수행하여 살펴 보았다. 조석의 영향을 받고 있는 수두는 첫번째의 경계조건인 경우의 수두를 중심으로 사인파를 형성하면서 변화함을 알 수 있다.

3-3 진폭과 투수계수가 수두에 미치는 영향

조석의 진폭이 내부 영역의 지점에 전달되는 상황을 알아 보기 위해 $x=20, 28, 36m$ 를 선택하여 시간에 따라 수두 변화를 계산하여 그림 3-3에 나타냈는데 경계에서 멀어질 수록 수두 변동 폭이 달라지며 전달 시간이 지체됨을 알 수 있다. 수두의 최대 크기가 지점에 따라서 다른데 수두의 크기에 영향을 주는 요소인 조석의 진폭과 투수계수를 선택하여 실험을 수행한다. (1) 투수계수($K=1.5m/day$)가 일정할 때 조석의 진폭을 변경하여 각 지점에서의 수두의 변동과 (2) 조석의 진폭($h_0=0.5m$)이 일정할 때 투수계수를 변화시켜 수치실험을 수행하였다. 2경우에 대해 각각

표 3-1 모형에 사용된 변수 값

변 수		값
조석의 진폭		$h_0 = 0.5m$
조석의 주기		$t_0 = 0.52days$
대수층의 성질	β	$\beta = 0.0898 m^{-1}$
	투수계수	$K = 1.5m/day$
	대수층 두께	$D = 10m$
	저류계수	$S = 0.02$
유효공극율		$n_e = 0.20$
대상영역		$L = 100m$
		$\Delta x = 4m$
시간 간격		$\Delta t = 0.01day$

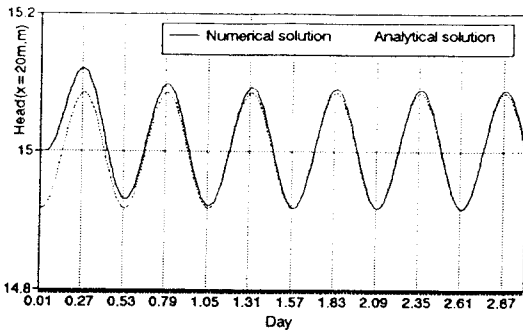


그림 3-1 조석 영향하의 수두 변화(x=20m)

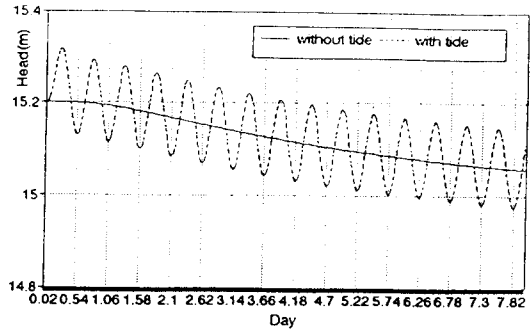


그림 3-2 지하수의 수리경사가 있는 경우의 수두 변화(x=20m)

$x=20, 24, 28, 32, 36\text{m}$ 지점에서 수치실험에 의해서 얻어진 각각의 최대 수두의 크기는 지수함수식을 만족해야 한다. 수두의 크기를 거리에 대한 지수함수식으로 나타내면 $h=ab^x$ 인데 결정된 계수 a 와 b 를 표 3-2에 제시하였다.

$x=20\text{m}$ 지점에서 투수계수와 조석의 진폭을 변화했을 때 수두를 시간에 대해 고찰하였다. 투수계수가 일정할 때 조석의 진폭이 다른 경우에 $x=20\text{m}$ 지점에서 수두의 크기는 조석의 진폭에 비례함을 알 수 있다. 그리고 조석의 진폭이 일정하고 투수계수가 1.5m/day 에서 1.0m/day 로 달라지면 수두는 작아지고 전달 시간이 지체됨을 알 수 있다. 동일한 대수층에서 조석의 진폭 변화는 각 지점에서 수두의 크기에만 비례하여 반응하며 투수계수가 크면 클 수록 수두의 크기는 선형으로 비례하여 커진다. 최대 수두와 투수계수와의 관계는 $h_{\max}(m)=0.0620K(m/day)$ 이었다.

3-4 거리에 따른 수두 변화

본 절에서는 조석의 진폭이 0.5m 이고 투수계수가 1.5m/day 일 때 선택된 시간에 대해서 거리에 따른 수두 변화를 고찰하기 위해 $1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0\text{day}$ 일 때, 거리에 대한 수두 변화를 그림 3-4에 도시하였다. 이 경우에 영향을 받는 거리는 약 60m 이상이면 거의 변화가 없다. 이와 같은 조건에서 임의의 시간(6day)에 대해 조석의 변화와 투수계수의 변화에 어떻게 영향을 미치는가를 살펴보기 위해 우선 조석의 진폭에 따라서 수두의 변화를 조석의 진폭별로 약 $x=12\text{m}$ 지점에서 최대 수두를 나타내고 있으나 역시 60m 지점 이상부터는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 이번에는 투수계수를 변화시켜 거리에 따른 수두의 변화에 대해서는 단지 거리에 따라 지체시간의 변화만 약간 가져올 뿐 진폭의 크기에 있어서 차이는 없다. 그리고 거리에 따라서 역시 60m 이상부터는 변화가 미소하다. 식(2-7)은 파장에 관한 식인데 투수계수와의 제곱근에 비례하지

표 3-2 조석의 진폭과 투수계수에 대한 수두

	조석 진폭(m)	수두 변화 ($a * b^x$)	잔차의 제곱 합
투수계수 = 1.5m/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	$99.65827 * 0.91584^x$	$0.50336 * 10^{-1}$
조석 진폭 = 0.5m	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	$50.11755 * 0.92537^x$	$0.32025 * 10^{-1}$

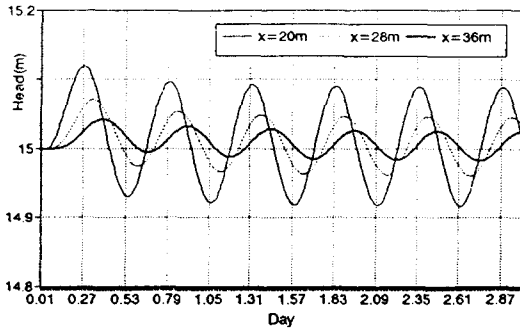


그림 3-3 $x=20m$, $x=28m$, $x=36m$ 지점에 대한 시간별 수두 변화

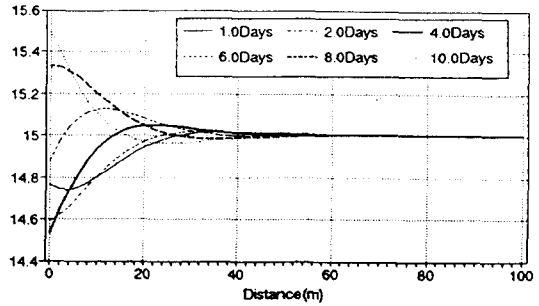


그림 3-4 임의의 시간에서 수두와 거리

만 60m이상에서 진폭이 미소하기 때문에 투수계수도 큰 변화를 가져 오지 못함을 알 수 있다. 표 3-1에서 제시된 변수값을 이용하여 식(2-7)의 파장식에 대입하면 확인할 수 있다.

3-5 조석의 영향이 양수에 미치는 영향

조석의 영향을 받는 대수층에서 양수하는 경우에 수두의 변화량을 고찰한다. 대상영역은 그림 2-1과 같으나 $\Delta x=2m$, $\Delta t=0.002day$, $h_0=1.0m$, $K=2.0m/day$ 로 하였다. 그리고 양수 지점은 $x=20m$ 지점에서 $3m^3/day$ 로 부과하였다. 이 수치실험은 조석에 의한 영향을 고찰하기 위해 3가지의 경우로 구분하여 수행한다. (1)조석의 영향이 없고 전 구간에 걸쳐 초기 수두를 15m라 하였을 때 양수하는 경우, (2) 조석의 영향하에서 양수하는 경우, (3) 양수없이 오직 조석의 영향만 받고 있는 경우의 수두 변화에 대해 실험한다. 시간 $t=1.0day$ 일 때 이 결과를 그림 3-5에 도시하였다. 이 그림은 시간 1.0day에서 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, 1.0day일 때 수두의 변화 양상을 파악하기 위해 수치실험하였다. 양수지점에서 0.6day에서 보다 0.8day에서 조석의 영향으로 수두가 약간 높게 나타나 있는데 이는 조석의 영향으로 수위 변동이 시간에 따라서 역전된다. 그리고 양수지점에서 조석의 영향이 있는 경우와 없는 경우를 구분하여 실험하였다. 이 결과를 그림 3-6에 도시하였는데 조석의 영향이 없는 경우를 중심으로 사인파를 형성하고 있다. 시간 간격을 0.01day에서 1.16day까지 0.01day (14.4min) 간격으로 각 수두의 합을 계산하였다.

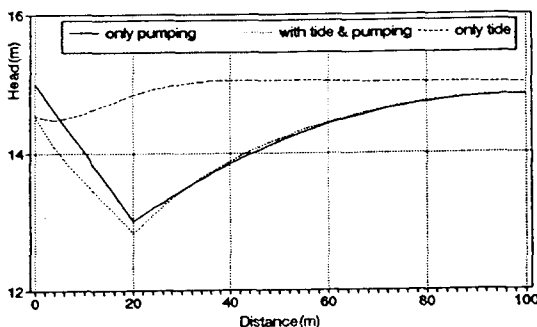


그림 3-5 조석의 영향이 있을 때와 없을 때, 양수하는 경우($x=20m$ 지점)의 수두 변화

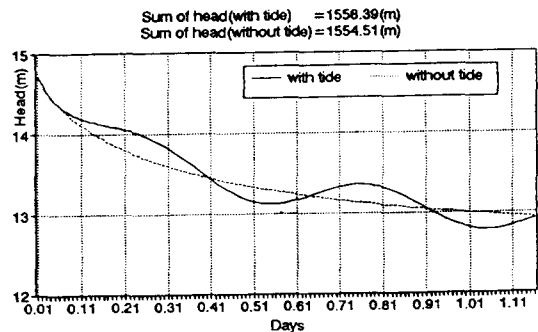


그림 3-6 양수지점($x=20m$)에서 수두 변화

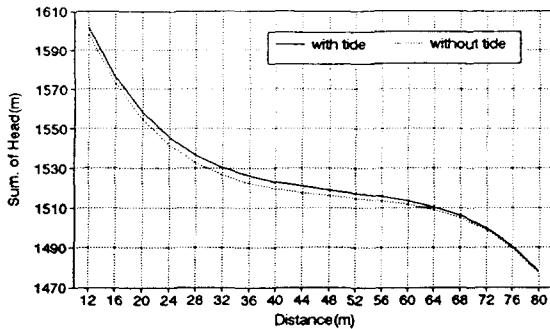


그림 3-7 양수지점에 따른 수두의 합

조석의 영향이 있는 경우에 수두의 합은 1558.39m이고 조석의 영향이 없는 경우의 수두 합은 1554.51m이다. 이 차이는 3.88m인데 조석이 있는 경우와 없는 경우에 수두의 차이가 있음을 보여 주고 있다. 양수지점에 따라서 조석이 미치는 영향을 평가하기 위해 양수지점을 x=20m지점에서 80m지점까지 이동하면서 3m³/day로 양수하였다. 각 양수지점에서 0.01-1.16 day까지 0.01day 간격으로 수두의 합을 계산하여 그림 3-7에 도시하였다. 조석이 있는 경우와 없는 경우의 차이는 약 40m지점까지는 3-4m이다. 그러나 조석의 영향이 작은 60m지점 이상부터는 수두차가 작아지고 수두의 합도 급강하하기 시작한다. 조석의 영향을 받는 지역에서 양수지점의 선택은 동력비에 영향을 주기 때문에 양수지점의 선택은 중요하다.

4. 결론

조석의 영향을 받는 대수층에서 조석의 진폭이 대수층의 특성과 어떻게 반응하고 이 지역에서 지하수를 양수하는 경우에 나타나는 반응을 수치실험에 의해서 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 제시된 1차원 수치해는 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 연구에서 채택한 대수층의 경우에 조석의 영향은 약 60m이상에서 미약하게 나타났다.

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

5. 참고문헌

- 1) Todd, D.K.(1980), Ground Water Hydrology, 2nd ed. John Wiley and Sons Inc., New York, pp.242-247.
- 2) Serfes, M.E.(1991), "Determining the Mean Hydraulic Gradient of Ground Water Affected by Tidal Fluctuations", Ground Water, Vol.29, No.4, pp.549-555.
- 3) Erskine A.D.(1991), "The Effect of Tidal Fluctuation on a Coastal Aquifer in the UK", Ground Water, Vol.29, No.4, pp.556-562.
- 4) Ichirou Kono(김남형의 공역)(1994), 地下水工學, 歐美書館, pp.37-39.