

# 제주도 동부 해안대수층에서 지하수위의 조석변동을 이용한 대수층 특성 및 수리경사 변동 연구

김구영<sup>1)</sup> · 심병완<sup>1)</sup> · 박기화<sup>1)</sup> · 김태희<sup>1)</sup> · 성현정<sup>1)</sup> · 박윤석<sup>2)</sup> · 고기원<sup>2)</sup> · 박원배<sup>3)</sup> · 우남철<sup>4)</sup>

## 1. 서 언

해안대수층에서는 지하수위가 조석의 영향을 받는 특성을 이용하여 조석반응 분석법을 통해 대수층의 수리인자를 산정할 수 있다(Jha et al., 2003). 이 방법을 이용하면 대수층의 넓은 면적에 대한 수평수리전도도를 구할 수 있으며, 추후 해안으로 배출되는 지하수량 산정에 유용한 정보를 준다. 본 연구에서는 제주도 동부 해안대수층에 구축되어 있는 해수침투 감시 관측망에서 조석의 영향을 받는 지하수위의 변동 특성을 분석하여 대수층의 수리인자를 추정하고 지하수위의 평균수리경사 산정 및 변화를 정량적으로 분석하였다.

## 2. 연구방법

해안대수층의 지하수는 조석의 영향으로 상승과 하강을 반복하게 되는데, 이러한 지하수위 변동은 조석변화에 의한 압력파(pressure wave)의 전달에 의해 생성된다. 조석변화에 의한 지하수위변화 분석을 위해 이와 유사한 고체에서의 열전달 모델이 이용되며 다음 식과 같다(Ferris, 1951).

$$h(x,t) = h_{msl} + A \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{wS}{2T}}x\right) \cdot \sin\left(\omega t - \sqrt{\frac{wS}{2T}}x + c\right) \quad (1)$$

위 식에서  $h(x,t)$ 는 지하수위[L],  $h_{msl}$ 은 평균 해수위[L],  $A$ 는 조석의 진폭[L],  $x$ 는 해안으로부터의 거리[L],  $T$ 는 대수층의 투수량계수[L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>],  $S$ 는 저류계수[무차원],  $w$ 는 조석의 속도(tidal speed)로서  $2\pi/t_0$ 와 같으며  $t_0$ 는 조석의 주기(tidal period)이다.  $t$ 는 시간[T],  $c$ 는 상변화(phase shift)이다.

식 (1)을 거리  $x$ 에 대해 편미분하고 그 특성을 분석하면, 해안으로부터의 거리  $x$  지점에서 시간  $t$ 에 따른 수리경사 변화를 통해 조석의 영향을 받는 대수층 내에서 지하수 유동특성을 분석할 수 있다(Serfes, 1991).

$$\frac{\partial}{\partial x}h(x,t) = -\sqrt{\frac{wS}{2T}} \cdot A \cdot \exp\left(-x\sqrt{\frac{wS}{2T}}\right) \cdot \left(\sin\left(\omega t - x\sqrt{\frac{wS}{2T}}\right) + \cos\left(\omega t - x\sqrt{\frac{wS}{2T}}\right)\right) \quad (2)$$

---

**주요어 :** 제주도, 해안대수층, 수리경사, 수리확산계수

1) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부 (kykim@kigam.re.kr)

2) 제주도광역수자원관리본부, 3) 제주발전연구원, 4) 연세대학교 지구시스템과학과

### 3. 결과 및 해석

#### 3.1 해안대수층에서 조석효과를 이용한 수리인자 산정

본 연구에서는 단일 대수층의 개념모델을 적용한 해석학적인 방법(analytical solution)을 이용하여 수리확산계수(hydraulic diffusivity)를 산정하였다. 분석에 사용한 자료는 동부 종달지역의 조석자료, 한동-2호공(HD-2), 종달-1호공(JD-1), 수산-1호공(SS-1)의 수위자료이다. Fig. 1은 2004년 6월 1일부터 5일간 30분 간격으로 측정된 조석 및 지하수위 자료이다. 내륙에 설치되어 있는 관측망에서의 지하수위는 조석의 변동에 의해 변화하며, 이의 지연시간을 산정하기 위해 교차상관 분석을 실시하였다. HD-2, JD-1, SS-1호공에서 6월 1일부터 5일간 30분 간격으로 측정된 지하수위의 교차상관분석 결과, 지연시간은 각각 90분, 90분, 60분이다(Fig. 3).

HD-2호공의 경우 해안으로부터의 거리  $x \approx 2500\text{m}$  이며, 조석의 평균 진폭  $H_0 \approx 0.58\text{m}$ , 지하수위의 평균 진폭  $H_x \approx 0.20\text{m}$ , 지연시간  $t_r = 90\text{분}$ 이다. 수리확산계수는  $T/S \approx 4.36 \times 10^7 \text{m}^2 \text{d}^{-1}$ 이며, 이를 식 (1)에 대입하여 시간별 수위변화 계산치와 실측자료를 비교하면 Fig. 4(a)와 같다. 일일 두 번 발생하는 오전의 만조(간조)와 오후의 만조(간조)는 일조부등(diurnal inequality) 현상에 의해 각각 그 높이가 다른데, 그 차이를 제외하면 두 곡선은 비교적 잘 일치하고 있다. JD-1호공의 경우 해안으로부터의 거리  $x \approx 1800\text{m}$  이며, 조석의 평균 진폭  $H_0 \approx 0.58\text{m}$ , 지하수위의 평균 진폭  $H_x \approx 0.24\text{m}$ , 지연시간  $t_r = 90\text{분}$ 이며, 수리확산계수는  $T/S \approx 2.94 \times 10^7 \text{m}^2 \text{d}^{-1}$ 이다. SS-1호공의 경우 해안으로부터의 거리  $x \approx 1600\text{m}$  이며, 조석의 평균 진폭  $H_0 \approx 0.58\text{m}$ , 지하수위의 평균 진폭  $H_x \approx 0.28\text{m}$ , 지연시간  $t_r = 60\text{분}$ 이다. 이를 이용하여 수리확산계수를 계산하면  $T/S \approx 4.2 \times 10^7 \text{m}^2 \text{d}^{-1}$ 이며, JD-1호공과 SS-1호공의 계산치와 실측자료를 비교하면 Fig. 4(b), (c)와 같다.

조석반응 분석법을 이용하여 수리인자를 산정할 시 수리확산계수인  $T/S$ 의 비율로 나타나므로 두 인자를 각각 구하기 위해서는 다른 방법이 추가되어야 한다. 일반적으로 피압대수층에서 저류계수  $S$  값은  $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 의 범위를 가지는데(Driscoll, 1986), 이 값을 적용하면 HD-2호공의 경우 투수량계수  $T$  값은  $436 \sim 43,600 \text{m}^2 \text{d}^{-1}$ , JD-1호공의 경우  $294 \sim 29,400 \text{m}^2 \text{d}^{-1}$ , SS-1호공의 경우  $420 \sim 42,000 \text{m}^2 \text{d}^{-1}$ 의 범위를 가진다(Table 1). 이는 한정상 외(1994)가 동부지역인 조천, 구좌, 성산, 표선 및 남원의 5개 수역에 설치된 109개 관정을 분석한 결과인  $20 \sim 76,600 \text{m}^2 \text{d}^{-1}$ 의 값과 제주도(2003)가 광역상수도 및 해수침투감시관측망 88개공의 자료를 토대로 기본 통계분석을 실시하여 산정한  $434 \sim 17,573 \text{m}^2 \text{d}^{-1}$ 의 값과 유사한 값을 보이고 있다.

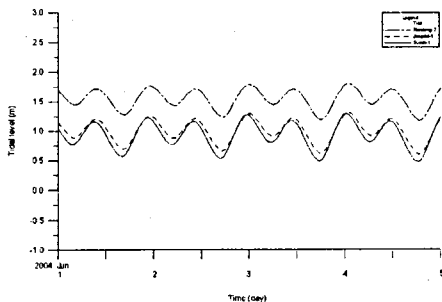


Fig. 1. Tide and groundwater level fluctuations at three observation wells.

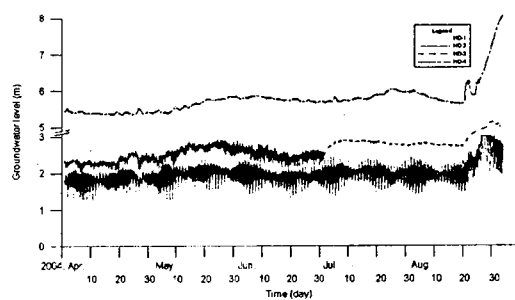


Fig. 2. Groundwater level observed at Handong district.

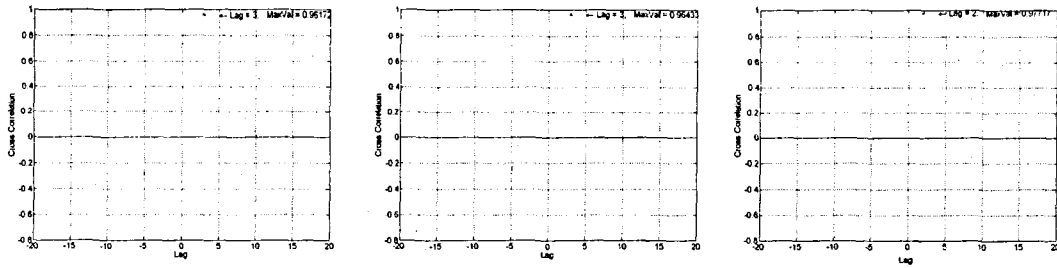


Fig. 3. Cross-correlation functions of groundwater level fluctuations at HD-2, JD-1, and SS-1 as output and tide fluctuations as input.

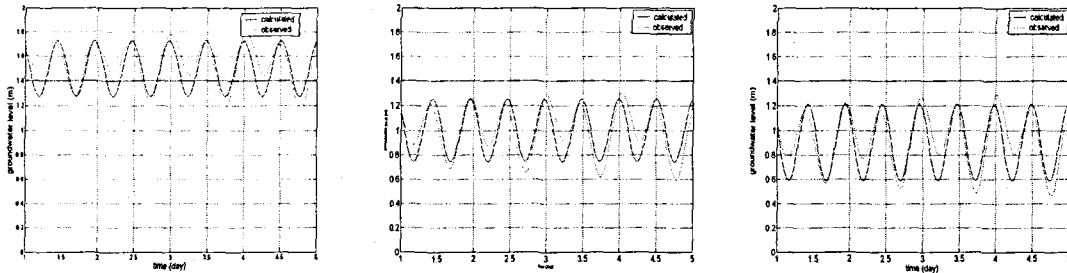


Fig. 4. Observed and calculated head fluctuations at HD-2, JD-1, and SS-1.

### 3.2 해양조석에 의해 변동하는지하수위의 수리경사 산정

해안대수층에서는 조석의 효과에 의해 지하수위와 수리경사가 계속해서 변동하므로 일시적인 지하수위 측정만으로 지하수 유동특성을 분석할 수 없다. 본 연구지역인 제주 동부지역 중 한동지구의 경우 2004년도 4월부터 8월까지 5개월간의 지하수위를 살펴보면 Fig. 2와 같다. 전체적으로 지하수위는 내륙에서 해안으로 갈수록 수위가 낮아져 지하수 유동방향이 해안쪽인 것을 알 수 있다. 그러나 HD-1호공과 HD-2호공의 경우 지하수위의 변동폭은 다르지만 평균 지하수위가 거의 비슷함을 알 수 있다. 이와 같이 조석의 영향에 의해 지하수위가 계속해서 변화하는 경우 평균 수리경사를 산정하는 일은 쉽지 않다.

제주도 동부지역에서 지하수의 수리경사를 산정하기 위해 조석의 영향을 받는 HD-1, 2, JD-1, 2, SS-1, 2호공에 대해 필터링을 실시하였다. 필터링에 사용한 수위자료는 모두 2004년 6월 1일부터 3일까지 71시간 연속자료를 이용하였으며, 그 결과 HD-1호공은 1.98m, HD-2호공은 1.99m, JD-1호공은 0.96m, JD-2호공은 1.28m, SS-1호공은 0.91m, SS-2호공은 1.38m이다.

조석의 영향을 받지 않는 관정에서의 평균수위자료는 같은 기간동안의 수위자료의 평균값과 필터링을 이용한 결과의 차이가 없었다. 전체적으로 수리경사는  $\sim 10^{-4}$  내외의 범위를 보이고 있으나, HD-1호공의 경우  $\sim 10^{-3}$ 의 값으로 수리경사가 다소 크게 나타나며, HD-2호공의 경우  $\sim 10^{-6}$ 의 값으로 수리경사가 매우 작은 값을 보이고 있다. HD-1, 2호공에서의 지하수위를 비교하면 수리경사가 0에 가까우며, 해안으로부터의 거리 차이에 의해 변동폭이 다르다. 그 결과 조석의 간·만조에 따라 두 관측공에서의 지하수위는 역전되는 현상이 나타난다. Fig. 5는 2004년 6월 1일 0시부터 48시간동안에 기록된 조석 및 HD-1, 2호공에서의 지하수위를 나타낸 그림이다. 간조에 해당하는 5시간까지는 HD-2호공의 지하수위가 1호공의 수위에 비해 높은 반면, 5시간 이후부터 10.5시간까지는 HD-1호공의 지하수위가 2호공의 수위에 비해 높게 나타난다.

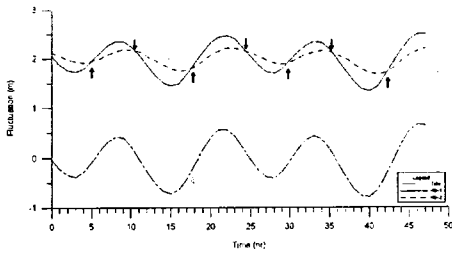


Fig. 5. Groundwater head fluctuations at HD-1 and HD-2 during 2004. 6.1~6.3.

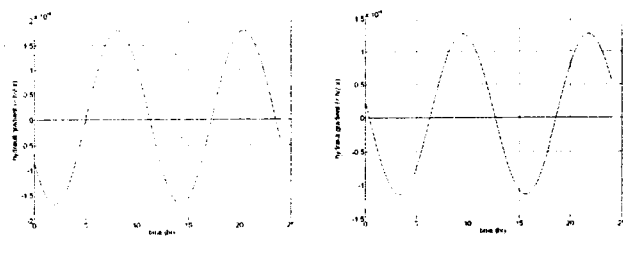


Fig. 6. Change in  $\partial h/\partial x$  during a tidal cycle for HD-1 and HD-2.

이와 같이 두 지하수 관측공 사이는 조석의 간·만조에 따라 수위가 역전되는 현상이 반복되어 나타나며, 그 결과 지하수 유동방향이 시간에 따라 다르게 나타난다. 48시간 동안의 지하수위 변화양상을 살펴보면 역전되는 시점은 5시간, 10.5시간, 17.5시간, 25.5시간, 29.8시간, 35.3시간, 42.2시간으로써, 약 5.5시간과 7시간 주기로 지하수위가 역전되어 나타나며, 두 관측공에서의 최대 수위차는 0.35m이다.

HD-1, 2호공에서의 수리경사를 살펴보기 위해 수리확산계수 값을 식 (2)에 대입하고 두 관정에서의 수리경사값인  $6.3 \times 10^{-6}$ 을 더하면 각 관정에서의 시간에 따른 수리경사는 Fig. 6과 같이 나타난다. Fig. 6에서 양(+)의 값은 해안쪽으로의 유동방향을 나타내며, 음(-)의 값은 내륙쪽으로의 유동방향을 나타낸다. HD-1호공의 경우 해안에 더 가까이 위치해 있는 관계로 2호공에 비해 지하수위 변동폭이 상대적으로 더 크며, 따라서 최대 수리경사값도  $1.8 \times 10^{-4}$ 으로 2호공의  $1.3 \times 10^{-4}$ 에 비해 크게 나타난다.

#### 참고문헌

- Ferris, J.G. (1951) Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility, International association of scientific hydrology, Publ. 33, p. 148-155.
- Jha, M.K, Kamii, Y., and Chikamori, K. (2003) On the estimation of phreatic aquifer parameters by the tidal response technique. Water Resources Management, v. 17, p. 69-88.
- Serfes, M.E. (1991) Determining the mean hydraulic gradient of groundwater affected by tidal fluctuations. Ground Water, v. 29, p. 549-555.