

단열암반 대수층에서 조석분석법을 이용한 수리상수 추정

심병완^{1*} · 정상용²

¹한국지질자원연구원 지하수지열연구부, ²부경대학교 환경지질과학과

Hydrogeologic Parameter Estimation by Using Tidal Method in a Fractured Rock Aquifer

Byoung Ohan Shim^{1*} · Sang Yong Chung²

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University

ABSTRACT

The oceanic tides have an effect on groundwater levels in coastal fractured rock aquifers. The observed groundwater table fluctuations caused by the effective stress through an aquifer are shown as sine curves similar with tidal fluctuation. To estimate a hydrogeologic parameter, tidal method is utilized with groundwater level fluctuations of two monitoring wells. Cross correlation function is used to calculate time lags between observed groundwater levels and tide, and the deeper well shows longer time lag. The storage coefficients calculated by using tidal efficiency and time lag show large differences. The storage coefficients obtained by using time lags are close to the result of slug test, and that of the deeper well shows closer value by slug test. The tidal efficiency is unsatisfied to apply in the tidal method because of an effect of phreatic aquifer and the vertical flow of groundwater through fractured confining bed. This tidal method can be an economical and effective way to define the parameter by considering the location of observation well and hydrogeologic characteristics of a coastal aquifer.

Key words : tidal method, storage coefficient, time lag, tidal efficiency, fractured rock aquifer

요 약 문

해안가에 발달된 단열암반 대수층에서 수리지질 인자를 추정하기 위하여 조석에 의한 지하수위 변동 현상을 이용하는 조석분석법을 적용하였다. 두 관측정의 지하수위 시계열 자료는 조석에 의한 대수층내 유효응력 전달에 의해 조수위 변동과 비슷한 사인곡선 형태로 나타났다. 교차상관함수를 이용하여 조석과 두 관측정의 지하수위 변동 사이의 개략적인 시간지연을 계산하였으며, 그 결과 심도가 깊은 공의 시간지연이 크게 나타났다. 그리고 조석효율과 시간지연을 계산하여 이로부터 각각의 저류계수를 추정한 결과 큰 차이를 나타내었다. 본 연구지역에서 실시된 순간층격 시험에 의하여 측정된 저류계수는 조석분석법에서 시간지연을 이용하여 계산한 값과 유사하게 나타나며, 심도가 깊은 공에서 보다 비슷한 값을 나타내고 있다. 조석효율은 피압층에 발달된 균열로 인한 자유면대수층의 영향과 수직적인 지하수 유동에 의해 대수층의 수리상수를 추정하는데 한계가 있는 것으로 사료된다. 따라서 조석분석법은 해안대수층의 수리지질인자를 추정하는데 지하수공의 위치나 대수층의 수리지질적 특성을 고려하여 해석한다면 경제적이고 유용한 방법으로 판단된다.

주제어 : 조석분석법, 저류계수, 시간지연, 조석효율, 단열암반 대수층

*Corresponding author : boshim@kigam.re.kr

원고접수일 : 2004. 1. 7 게재승인일 : 2004. 6. 26

질의 및 토의 : 2004. 12. 30 까지

1. 서 론

조석분석법은 수리전도도나 저류계수와 같은 대수층의 수리적 특성을 결정하기 위하여 해수면 변화에 대한 우물이나 피압정에서의 수위변화를 분석하는 기술이다. 조석에 의한 해안대수층내 유효응력 변화는 대수층을 구성하는 매질과 대수층내 지하수에 분산되므로 내륙으로 갈수록 지하수위 변화는 조석의 변화보다 작게 나타난다¹⁾. 이러한 현상에 대하여 조석분석법을 적용하면 수리인자를 추정할 수 있으므로 양수시험에 의한 경비나 시간을 절약할 수 있으며, 양수시험을 해석하는데 따르는 복잡한 경계조건 설정 등의 어려움을 줄일 수 있다²⁾. 특히 해안대수층에서 대수성시험을 실시하는데 여러 가지 어려움이 따르고, 일반적인 시험방법들을 통하여 정확한 대수층의 특성을 파악하기 어려우므로 여러 가지 대수층 형태에 대하여 조석분석법을 이용한 다양한 연구가 진행되어 오고 있다³⁻⁷⁾. 본 연구에서는 단열암반 대수층에서 조석분석법을 적용하여 저류계수를 결정하고 기존에 조사된 수리지질자료와 비교하여 조석분석법에 의한 결과의 타당성을 검토하는데 목적이 있다.

2. 연구지역

본 연구지역은 부산 동남해안에 위치한 부경대학교 일

원으로서 직접적인 해수침입을 받고 있으며, 상부는 매립층이며 하부는 화산암복합체로 구성되어 있다^{8,9)}(Fig. 1). 본 지역은 매립퇴적층, 풍화토층, 풍화각력층, 기반암 순으로 나타나며, 부분적으로 풍화토와 풍화각력이 교호하며 나타나는 경우도 있다. 매립퇴적층의 두께는 전반적으로 6m 이하이며 지역적으로 동쪽으로 가면서 증가하는 양상을 보인다. 그리고 풍화토층은 대체적으로 지표하 10~30m 심도까지 발달되어 있고, 풍화정도에 따라 두 개의 층으로 나눌 수 있다. 풍화각력층은 약 18~52m 심도에 발달되어 대부분 30m 내외의 심도까지 나타내며 남측으로 갈수록 알아지는 경향을 보인다. 매립퇴적물의 두께가 연구지역 서쪽은 대부분 5m 이하이나 동쪽 및 남동부지역은 10m 내외의 두께이다. 이와 같은 양상은 매립 이전의 과거지형이 대체적으로 동쪽방향으로 경사지여 있었기 때문이다. 연구지역은 동남해안가에 위치하여 동쪽으로는 광안리 해수욕장 근처의 바다에 인접하고 있으며, 인근지역의 수계분수령(watershed boundary)을 고려하면 지하수 유동방향은 동쪽으로 추정된다^{10,11)}.

12개의 시추공에서 순간층경 시험에 의해 산출된 수리전도도들의 평균값을 조석분석법에 적용하였으며, 이 시추공들 가운데 1개의 공에서만 극히 낮은 값을 나타내었으나 나머지 공들에서는 1 order 내외의 낮은 편차를 나타내었다. 수리전도도 범위는 $5.93 \times 10^{-8} \sim 5.02 \times 10^{-6}$ m/s 이지만, 수압시험에서 암반층의 수리전도도는 1.51×10^{-7}

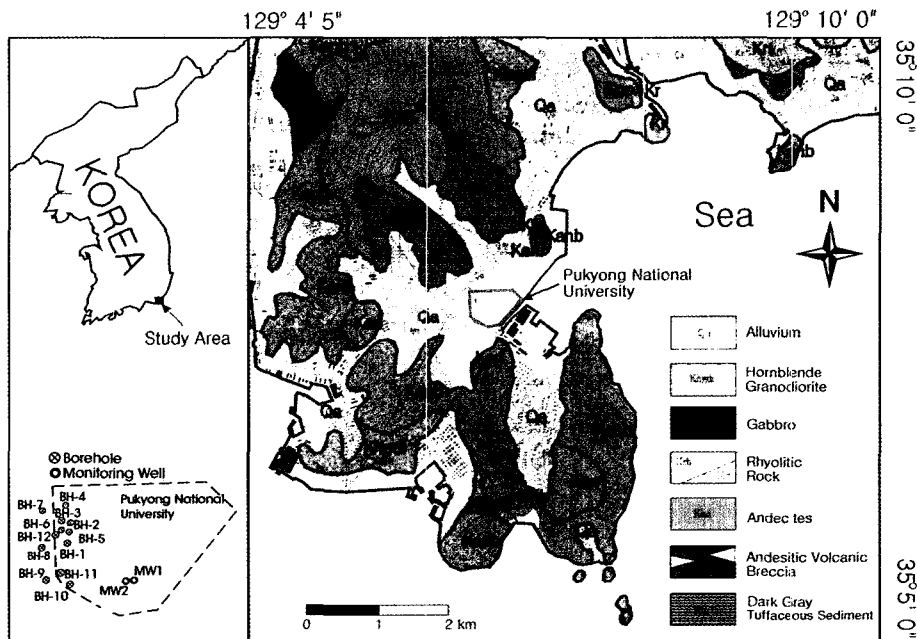


Fig. 1. Borehole and Monitoring well locations and geological map of study site⁸⁾.

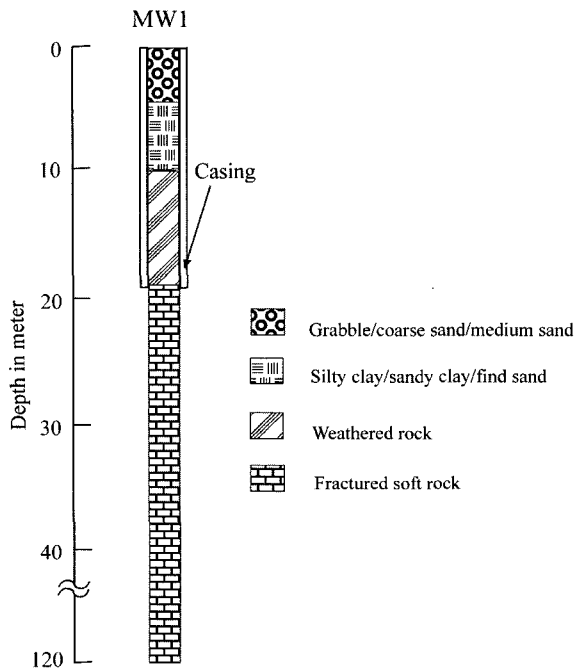


Fig. 2. Borehole logging of MW1 monitoring well. 19~120 m below ground level is mainly consisted of fractured tuffaceous sedimentary rock.

$\sim 3.86 \times 10^{-9}$ m/s의 낮은 투수성을 나타낸다. 지하수위 조사에 의한 전체적인 평균수리경사는 0.006~0.008이며, 순간충격 시험에 의한 저류계수는 0.000025이다. 풍화대는 지표하 19 m 정도까지 발달되어 있으며, 지표하 20 m 이하는 대부분 균열이 발달된 피압대수층으로 나타났다¹²⁾.

두 개의 관측정 MW1과 MW2는 해안에서 약 180 m 지점에 위치하며, 동서방향으로 약 8.1 m 떨어져 있다. 관측정의 공경은 8 inch이며, 개발 심도는 각각 120 m, 45 m 이다. 시추조사에 의하면 약 15 m 까지 매립토와 해안퇴적물(자갈, 모래, 실트, 점토, 조개껍질)로 구성되어 있고, 풍화대는 19 m 정도까지 발달되어 있다. 그 이하는 응회질암석이 분포되어 있으며, 공내 케이싱은 모두 지표하 19 m 까지 설치되어 있다(Fig. 2).

3. 연구방법

3.1. 조석분석법(tidal method)

조석의 영향을 받는 대수층의 지하수위 변동은 다음과 같은 1차원 부정류의 지하수 유동 방정식으로 표현된다.

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

여기서 h 는 담수의 피압수두(L), x 는 해안에서 관측공까

지의 거리(L), t 는 시간(T), S 는 저류계수, T 는 투수량계수(L^2/T)이다. 이 형태는 지하수가 수평적인 흐름이며 Darcy의 법칙을 따르는 것을 가정한다. 이러한 가정들은 해안선이 직선이며, 조석범위에 비하여 대수층이 두꺼울 때 잘 일치된다¹³⁾. Ferris¹³⁾는 식 (1)이 균질한 피압대수층에서 압력이 사인곡선 형태로 다음과 같은 식에 의하여 대수층 내에서 전달된다는 것을 보여주었다.

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

h 는 평균해면에서의 지하수위(L), x 는 해안으로부터의 거리(L), t 는 시간(T), t_0 는 조석변동주기(L/T), h_0 는 조석의 진폭(L), T 는 대수층의 투수량계수(L^2/T)와 S 는 저류계수이다. 이 해는 조석변화가 시간지연에 따라 사인곡선 형태로 나타내며, 해안으로부터의 거리에 따라 진폭이 지수적으로 감소한다는 것을 보여준다. 위 식에 나타난 바와 같이 조수위 변동과 관측공의 지하수위 변동 사이에는 시간지연(time lag; t_l)이 발생하며, 이를 이용하여 다음과 같이 대수층의 수리전도도와 비저류계수의 비 또는 투수량계수(T)와 저류계수(S)의 비를 산정할 수 있다.

$$\frac{K}{S_s} \left(\text{or } \frac{T}{S} \right) = \frac{t_0 x^2}{4\pi t_l^2} \quad (3)$$

그리고 식 (2)에서 시간지연과 조석효율(tidal efficiency)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

$$\text{Tidal efficiency} = \exp(-x \sqrt{\pi S / t_0 T}) \quad (5)$$

본 연구지역의 관측정에서 시간지연과 조석효율은 심도가 다른 2개의 관측정으로부터 계산되었다. 위에서 주어진 시간지연과 조석효율은 관측정의 깊이와 형태 그리고 관측정과 교차되는 지하구조 등의 여러 가지 다른 요인들에 의하여 영향을 받고 있다. 그리고 본 연구지역의 대수층이 불균질하고 균열이 발달하여 심도에 따른 유효용력 변화가 나타날 가능성이 크므로 조석효율과 시간지연을 각각 계산하여 분석하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

3.2. 상관성 분석

관측정에서 측정된 지하수위와 조석에 의한 조수위 자료는 시계열 자료(time series data)로서, 이들의 상관성을 분석하기 위하여 교차상관 분석을 실시하였다. 교차상관

성의 일반적 이론은 다음과 같다.

3.1.1 자기상관(Autocorrelation)

시계열 자료 Z_t 와 시차(time lag) k 를 갖는 시계열자료 Z_{t+k} 사이의 공분산(covariance)은 시차 k 에서의 자기공분산이라고 하며, 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma_k = COV[Z_t, Z_{t+k}] = E[(Z_t - \mu)(Z_{t+k} - \mu)] \quad (6)$$

여기서, μ 는 평균값이며, 시차 k 에서의 자기상관계수는

$$\rho_k = \frac{\gamma_k}{\sigma_z^2} = \frac{E[(Z_t - \mu)(Z_{t+k} - \mu)]}{\sqrt{E[(Z_t - \mu)^2](Z_{t+k} - \mu)^2}} \quad (7)$$

이다. 시계열이 정상과정(stationary process)인 경우 시간 t 와 $t+k$ 에서의 분산은 모두 $\sigma_z^2 = \gamma_0$ 이다. 따라서 시차 k 에서의 자기상관계수는

$$\rho_k = \frac{\gamma_k}{\sigma_z^2} \quad (8)$$

이다. $k=0$ 일 때, 자기상관계수 $\rho_0 = 1$ 이다.

3.1.2 교차상관(Cross correlation)

2개의 시계열 X_t 와 Y_t 의 시차 k 에서의 공분산은

$$\gamma_{xy}(k) = E[(X_t - \mu_x)(Y_{t+k} - \mu_y)] \quad (9)$$

그리고 시계열 X_t 와 Y_t 의 시차 k 에서의 공분산은

$$\gamma_{yx}(k) = E[(Y_t - \mu_y)(X_{t+k} - \mu_x)] \quad (10)$$

일반적으로 $\gamma_{xy}(k)$ 와 $\gamma_{yx}(k)$ 는 같지 않다. 그러나 $\gamma_{xy}(k)$ 와 $\gamma_{yx}(-k)$ 는 같다. 2개의 시계열 X 와 Y 의 시차 k 에서의 교차상관계수는

$$\rho_{xy}(k) = \frac{\gamma_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (11)$$

이다. 여기서 σ_x , σ_y 는 시계열 X 와 Y 의 표준편차이다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 현장자료 획득 및 분석

MW1 관측정에서 전기전도도는 약 24 m 심도부터 급

격히 증가하는데 이것은 해수와 담수의 경계면에 의한 영향으로 해석할 수 있으며, 30~120 m 사이의 전기전도도는 약 23,000~28,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위로 나타났다(Fig. 3). 30 m 심도 이하의 전기전도도가 다소 불규칙한 형태를 나타내는 것은 대수층내로 유입되는 담수와 침투하는 해수의 유량이 지반의 불균질성에 의해 심도에 따라 일정하지 않기 때문이다. MW1 관측정에서 2001년 12월에 측정된 전기전도도도 검층에 의하면, 1999년에 측정된 값에 비하여 다소 증가한 것으로 나타나고 있으며 계절적인 영향도 받고 있는 것으로 나타났다¹⁴⁾.

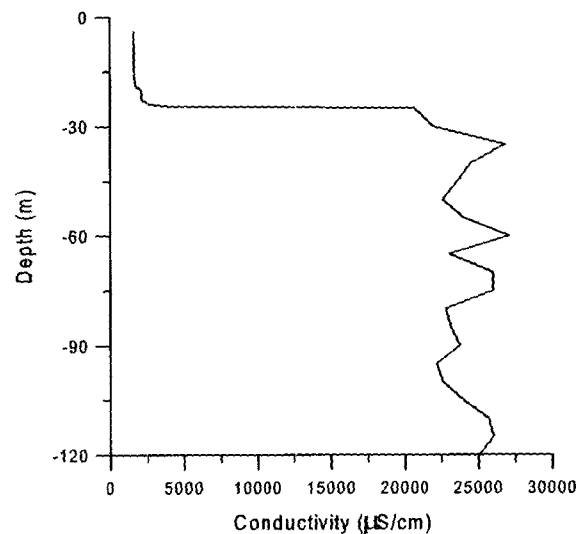


Fig. 3. An electrical conductivity log in the MW1 monitoring well in December, 2001.

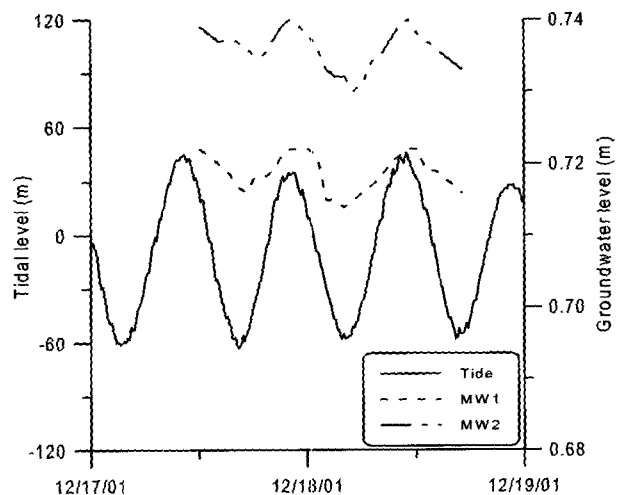


Fig. 4. Comparison of tidal level and groundwater level fluctuations in monitoring wells. The groundwater table was measured hourly.

본 연구에서는 해수면에 대한 대기압과 바람의 영향을 제외한 조석에 의한 영향만을 고려하였다¹⁰⁾. 관측정 MW1과 MW2의 지하수위를 시간단위로 31회 측정하였으며, 각 측정 시점에서 MW1이 MW2 보다 지하수위가 약 2 cm 낮게 나타났다. 조석자료는 국립해양조사원에서 부산항의 조석높이를 10분 간격으로 측정된 값을 이용하였다. Fig. 4는 조석과 지하수위 변동을 비교한 것으로, 조석은 12시간 25분 주기의 사인곡선 형태로 나타났다. 지하수위는 조석주기와 거의 비슷한 형태의 사인 곡선 형태를 나타내고 있으나 1시간 간격으로 측정되어 다소 불규칙한 모양을 나타낸다. 그러나 지하수위 변화는 매우 완만하여 1시간에 약 1~2 mm 내외로서 분단위로 측정하는 것은 큰 의미가 없다. 만약 해안과 매우 가까운 거리에 관측공이 설치되어 지하수위가 큰 진폭을 나타낼 때나 하천과 인접한 공의 지하수위 및 하천수위 또는 강우량간의 시계열 자료를 정밀하게 해석하기 위해서는 측정 간격을 좁게 설정할 필요가 있다.

4.2. 교차상관성 분석에 의한 시간지연 측정

측정된 지하수위 변동폭이 1 cm 이하로 매우 작아 조석과 같은 10분 간격에서는 지하수위 변화가 0.1 mm 단위로 변동하여 정확한 측정치를 나타내는 것은 어렵다. 따라서 조석의 측정 빈도인 10분 단위의 측정치와 비교하기 위하여 1시간 단위의 지하수위 측정결과를 10분 단위로 내삽하여 조석과의 교차상관함수를 계산하였다. 교차상관함수를 이용하여 관측정의 개략적인 시간지연을 계산한 결과, 관측정 MW1에서는 약 60분, MW2에서는 약 50분에 최대교차상관계수를 나타내었다(Fig. 5). MW1의 시간지연이 크게 나타나는 것은 MW2와의 심도차이와 대수층 하부의 수리지질적 특성에 의한 영향으로 추정된다. 이것은 공의 심도가 깊을수록 대수층내 유효용력은 상부보다 비교적 투수성이 낮은 대수층 하부를 통과하면서 시간지연이 크게 나타나는 것으로 판단되며, Erskine¹⁵⁾의 연구에서도 비슷한 현상을 나타내었다.

4.3. 저류계수

조석분석법에 이용된 평균수리전도도(K)는 0.164 m/day이며, 두 관측정에서 계산된 저류계수는 Table 1과 같다. 시간지연을 이용하여 두 관측정에서 계산된 저류계수는 0.000020과 0.000006으로서 연구지역에서 순간충격 시험에 의한 저류계수 0.000025¹⁶⁾와 유사한 값을 나타내었다. 그리고 심도가 깊은 공에서 보다 비슷한 값을 나타내고 있으며, 이것은 식 (1)이 조석범위에 비하여 대수층의 두

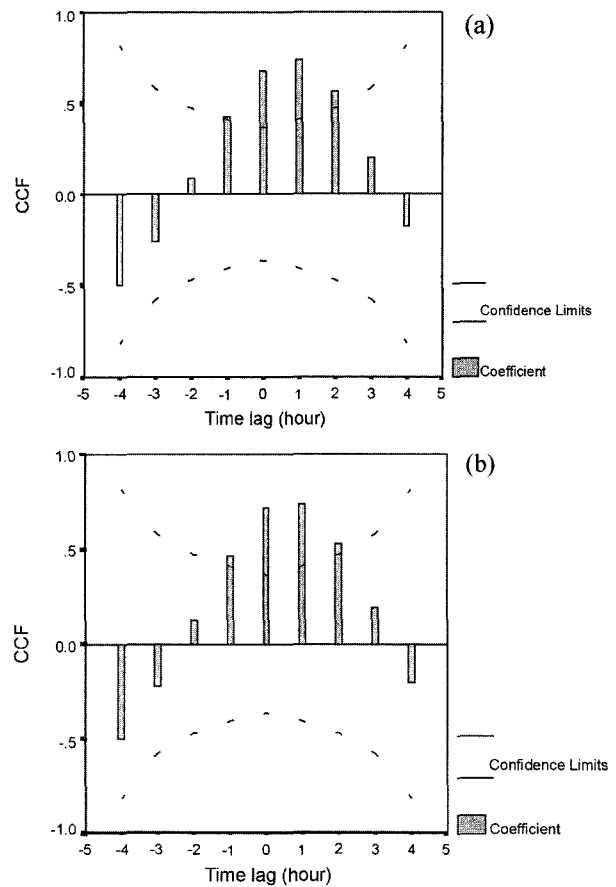


Fig. 5. CCF(Cross Correlation Function) of tidal level versus groundwater level at the MW1 (a) and MW2 (b) monitoring wells.

Table 1. Storage coefficients obtained by tidal efficiency and time lag in tidal method

Monitoring well	Depth (m)	Storage coefficient (Tidal efficiency)	Storage coefficient (Time lag)
MW1	120	0.0020	0.000020
MW2	45	0.0008	0.000006

께가 두꺼울 때 잘 일치된다는 Ferris¹³⁾의 가정과 부합된다. 그러나 조석효율을 이용한 경우, 저류계수가 시간지연을 이용한 것보다 2 order 정도 크게 나타나는 것은 자유면대수층과 피압대수층의 저류계수 범위 사이에 있는 것을 나타낸다. 이런 결과는 대수층이 완전한 피압 또는 자유면대수층이 아닌 경우이거나 두 대수층 형태가 복합된 것으로 볼 수 있다. 이것은 Erskine¹⁵⁾과 Reynolds¹⁷⁾의 연구에서도 유사한 경향을 나타내었으며, 조석효율 현상을 분석하여 구한 저류계수보다 시간지연 현상을 분석하여 계산된 저류계수가 실제 대수층에 더 적합한 것으로 나타났다.

따라서 본 연구지역에서 조석효율과 시간지연을 이용하여 구한 저류계수가 큰 차이가 나는 것은 피압층에 발달된 균열에 의하여 조석의 영향이 분산되어 대수층내 유효용력이 감소하고, 지하수가 수직적인 유동을 나타내기 때문이다. 그러므로 Ferris¹³⁾의 식에서 조석효율을 이용하여 자유면대수층의 영향을 받는 해안대수층의 수리인자를 추정하는데는 한계가 있는 것으로 판단된다.

5. 결 론

조석에 의한 영향으로 대수층내 유효용력이 전달되는 현상을 파악하기 위하여 두 관측정의 지하수위를 관측하였으며, 지하수위 시계열 자료가 조석변동과 유사한 시인 곡선 형태를 나타내어 조석분석법을 이용하여 수리인자를 추정하였다. 교차상관 함수를 이용하여 관측정과 조석간의 개략적인 시간지연을 계산한 결과, 관측정 MW1에서는 약 60분, MW2에서는 약 50분에 최대교차상관계수를 나타내었다. MW1에서 시간지연이 크게 나타나는 것은 MW2와의 심도차이에 의한 영향으로 추정되며, 공의 심도가 깊을수록 대수층내 유효용력은 상부보다 비교적 투수성이 낮은 대수층 하부를 통과하면서 시간지연이 크게 나타난 것으로 판단된다. 조석효율에 의해 측정된 저류계수는 시간지연을 이용하여 계산한 것보다 약 2 order 이상 큰 값을 나타내었는데, 이것은 피압층에 발달된 균열에 의하여 자유면대수층의 영향을 받은 것으로 판단된다. 연구지역에서 실시된 순간충격 시험에 의하여 계산된 저류계수가 시간지연을 이용하여 구한 값과 유사하게 나타나며, 심도가 깊은 공에서 보다 유사한 값을 나타내고 있다. 따라서 대상지역의 지하수공 위치와 수리지질적 특성을 고려하여 해석한다면 조석분석법은 해안대수층의 수리지질인자를 추정하는데 유용한 방법으로 판단된다.

사 사

본 연구는 부경대학교 환경지질연구소(Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University)와 일본 농업공학연구소(National Institute for Rural Engineering, Japan)의 공동연구협약의 일환으로 수행되었으며, 논문을 세심히 검토하여 주신 익명의 심사자들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 한국수자원공사, 낙동강권역 광역 지하수조사 연구 (2000).
2. Carr, P.A., and Van Der Kamp, G.S., Determining aquifer characteristics by the tidal method, *Water Resources Research*, **5**(5), pp. 1023-1031 (1969).
3. Ataie-Ashtiani, B., Volker, R.E., and Lockington, Tidal effects on sea water intrusion in unconfined aquifers, *Journal of Hydrogeology*, **216**, pp. 17-31 (1999).
4. Dominick, T.F., and Jr. Bert, W., Mathematical model for beach groundwater fluctuations, *Water Resources Research*, **7**(6), pp. 1626-1635 (1971).
5. Li, H., and Jiao, J.J., Analytical studies of groundwater-head fluctuation in a coastal confined aquifer overlain by a semi-permeable layer with storage, *Advances in Water Resources*, **24**, pp. 565-573 (2001).
6. Sun, H., A two-dimensional analytical solution of groundwater response to tidal loading in an estuary, *Water Resources Research*, **33**(6), pp. 1429-1435 (1997).
7. Nielsen, P., Tidal dynamics of the water table in beaches, *Water Resources Research*, **26**(9), pp. 2127-2134 (1990).
8. 심병완, 부산 동남해안 지역의 수리동역학적 해수침투 특성 연구, 부경대학교 이학박사 학위논문 (2003).
9. 김동학, 황재하, 박기화, 송교영, 1:250000 부산지질도폭, 한국자원연구소 (1998).
10. 심병완, 정상용, 김희준, 성익환, 김병우, 지구물리 탐사자료의 지구통계학적 분석에 의한 부산 동남해안 지역의 해수침투 특성, *지하수토양환경*, **7**(3), pp. 3-17 (2002a).
11. 심병완, 정상용, 김희준, 성익환, 수리동역학적 모델링에서 분산지수에 따른 해수침투 범위의 변화, *지하수토양환경*, **7**(4), pp. 1-9 (2002b).
12. 부경대학교, 대연 전화국 연결 통신구 공사로 인한 부경대학교 시설물 피해영향조사 연구(4/4) (1997).
13. Ferris, J.G., Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility, *International Assoc. of Scientific Hydrology. Publ.*, **33**, pp. 48-155 (1951).
14. 한국자원연구소, 지하수 염수침입 경로규명을 위한 현장관측 및 분석연구 (1999).
15. Erskine, A.D., The effect of tidal fluctuation on a coastal aquifer in the UK, *Ground Water*, **29**(4), pp. 556-562 (1991).
16. Cho, B.W., Hydrogeological Characteristics of the Groundwater Resources in the Busan Area, Korea, Ph.D. dissertation, Kyungpook National Univ. (2001).
17. Reynolds, R.J., Diffusivity of a glacial-outwash aquifer by the floodwave-response technique, *Ground Water*, **25**(3), pp. 290-299 (1987).