

제주도 동부지역 해안대수층의 조석에 의한 수리경사 변화 연구

김구영^{1*} · 심병완¹ · 박기화¹ · 김태희¹ · 성현정¹ · 박윤석² · 고기원² · 우남철³

¹한국지질자원연구원 지하수지열연구부, ²제주도광역수자원관리본부 수자원연구실

³연세대학교 지구시스템과학과

Analysis of Hydraulic Gradient at Coastal Aquifers in Eastern Part of Jeju Island

Kue-Young Kim^{1*}, Byoung-Ohan Shim¹, Ki-Hwa Park¹, Taehee Kim¹, Hyeonjeong Seong¹, Yun-Seok Park², Gi-Won Koh² and Nam-Chil Woo³

¹Groundwater & Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources Daejeon 305-350, Korea

²Water Resources Research section, Jeju Provincial Water Resources Management Office, Jeju 695-811, Korea

³Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

Groundwater level changes in coastal aquifers occur due to oceanic tides, where the properties of oceanic tides can be applied to estimate hydraulic parameters. Hydraulic parameters of coastal aquifers located in eastern part of Jeju island were estimated using the tidal response technique. Groundwater level data from a saltwater intrusion monitoring well system was used which showed tidal effects from 3 to 5 km. The hydraulic gradient was assessed by utilizing the filtering method from 71 consecutive hourly water-level observations. Calculated hydraulic diffusivity ranged from $2.94 \times 10^7 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$ to $4.36 \times 10^7 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$. The hydraulic gradient of the coastal aquifer area was found to be $\sim 10^{-4}$, whereas the gradient of the area between wells Handong-1 and 2 was found to be $\sim 10^{-6}$, which is very low comparatively. Analysis of groundwater monitoring data showed that groundwater levels are periodically higher near coastal areas compared to that of inner land areas due to oceanic tide influences. When assessing groundwater flow direction in coastal aquifers it is important to consider tidal fluctuation.

Key words : Jeju island, coastal aquifer, hydraulic gradient, hydraulic diffusivity

해안대수층은 조석의 영향을 받아 지하수위가 주기적으로 변동하는 곳이 많으며, 이러한 특성을 이용하여 대수층의 수리지질학적 특성을 평가할 수 있다. 본 연구에서는 제주도 동부 해안대수층에 구축되어 있는 해수침투 감시 관측망에서 관측된 자료를 이용하여 조석의 영향에 의한 지하수위의 변동 특성을 분석하였다. 그리고 대수층의 수리인자를 추정하고 지하수위의 평균수리경사 산정 및 시간에 따른 수리경사 변화를 정량적으로 분석하였다. 제주도 동부지역의 경우 조석이 지하수위에 영향을 미치는 범위는 해안으로부터 3~5 km 사이이며, 수리확산계수는 $2.94 \times 10^7 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1} \sim 4.36 \times 10^7 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$ 의 범위를 가진다. 71시간 모니터링한 연속자료에 대해 이동평균법을 이용하여 주기적으로 변동하는 지하수위의 수리경사를 산정한 결과, 수리경사는 대체로 $\sim 10^{-4}$ 내외의 범위를 보인다. 한동-1, 2호공 구간의 수리경사는 $\sim 10^{-6}$ 으로 수리경사가 0에 가까우며, 해안으로부터의 거리 차이에 의해 지하수위의 변동폭이 다르게 나타난다. 그 결과 조석의 간·만조에 따라 두 관측공에서의 지하수위는 역전되는 현상이 나타나며, 지하수의 유동방향도 달라진다. 따라서 해안대수층에서의 지하수 유동방향을 해석할 때에는 반드시 조석에 의한 영향을 고려해야 할 것이다.

주요어 : 제주도, 해안대수층, 수리경사, 수리확산계수

1. 서 언

제주도는 사면이 바다로 둘러싸인 도서지역으로서 지하수 함양량이 제한되어 있다. 따라서 지하수의 과다개발 또는 갈수기의 함양량 감소로 인해 지하수위가 과다하게 하강할 경우 해수침투에 의한 지하수의 염수화 위험성은 증가하게 된다. 특히 제주도 동부지역 지하수에는 오래전부터 다량의 염분이 함유되어 있어 지하수 이용에 제한을 받고 있는 지역이다(박윤석 등, 2002). 제주도에서는 지역별 지하지질구조와 지하수 부존형태와의 관계를 파악하고 해수침투 감시를 위해 2001년부터 제주도 일원에 담·염수 경계면을 관통시킨 관측정을 설치하고 담·염수 경계면의 수축 및 확장범위를 지속적으로 관측하고 있다.

제주도 지하수 연구와 관련하여 1990년대 이후 국내 학자들에 의해 활발한 연구가 이루어져 왔다. 지하수의 수질과 관련하여 오윤근 등(1997)과 송영철 등(1999)은 질소안정동위원소를 이용하여 제주도 지하수 중의 질산염 오염원을 조사하였으며, 이성복 등(1997)은 제주도 삼양 3수원지의 염소이온농도 상승원인에 관한 연구를 수행하였다. 이용두(2001)는 물리, 화학적 특성과 통계분석을 통하여 고도에 따른 제주도 지하수의 수질특성을 분석하였으며, 우남철 등(2001)은 제주도 남서부 지역에서 지하수 수질과 오염의 시·공간적 변화 특성을 규명하였다.

제주도 해안대수층에서의 담·염수 상호작용에 관한 연구로 고기원 등(1998)은 제주도 해안지역에서 담·염수 혼합대 하부에 발달된 담수 대수층에 관한 사례를 발표하였으며, 부성안 등(2000)은 제주도 동부권역 담 지하수 대수층에서의 염수침투에 관한 사례연구를 수행하였다. 박원배 등(2003)은 제주도 동부지역 지하수의 담·염수 경계면의 분포와 변화에 대한 연구를 수행하였으며, 윤정수 등(2003)은 제주도 동부 한동리지역 고염분 지하수에 대한 수리지질학적 연구를 수행하였다.

대수층의 수리인자 산정과 관련하여 한정상 등(1994)은 제주도에 분포하는 기존관정의 자료를 전산처리하여 지역별 대수성 수리특성을 규명하고 제주도 지하수 자원의 최적 개발 가능량을 산정하였으며, 최병수(1999)는 우물의 비양수량자료를 이용하여 대수층상수를 결정하였다. 박남식 등(1995; 1997)은 제주도 중심부 수리지질변수의 불확실성이 해안지역 지하수 흐름에 미치는 영향에 대한 분석 및 제주도 중·동 수역에서의 해수침투에 대한 수치실험 연구를 실시하였다.

지하수자원의 개발 및 관리를 위해서는 함양과 배출

시스템을 고려한 복잡한 문제를 해결해야 하는데, 모델링은 이러한 지하수 시스템을 관리하는데 매우 중요한 역할을 한다. 대수층의 수리적 특성을 결정하는 투수량계수, 저류계수, 수리전도도, 비산출량, 누수계수 등의 수리인자는 지하수 모델링시 필수적이다. 대수층의 수리인자를 산정하는 전통적인 방법으로는 양수시험, 순간충격시험 등의 수리시험이 있으며, 현장에서의 수리시험은 대수층의 시험범위에 대한 평균 수리인자를 제공한다. 그러나 제주도과 같이 투수성이 큰 대수층이 발달된 지역에서 양수시험을 통해 수리인자를 산정하기 위해서는 충분히 수위강하를 시켜야 한다. 이를 위해 대용량의 펌프를 사용해야 하는 어려움이 있으며, 양수한 물을 처리해야 하는 점, 양수시험 비용 등 고려해야 할 사항이 많다. 특히 해안 대수층에서는 수리인자 산정을 위한 양수시험이 추천되고 있지 않다(Millham and Howes, 1995).

해안대수층에서는 지하수위가 조석의 영향을 받는 특성을 이용하여 조석반응 분석법(tidal response technique)을 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. 심병완과 정상용(2004)은 해안가에 발달된 단일암반 대수층에서 조석반응 분석법을 이용하여 대수층의 수리인자를 추정한 바 있다.

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. 이 론

2.1. 조석반응 분석법

해안대수층의 지하수는 조석의 영향으로 상승과 하강을 반복하게 되는데, 이러한 지하수위 변동은 조석 변화에 의한 압력파(pressure wave)의 전달에 의해 생성된다. 자유면대수층의 경우 압력파는 대수층 공극내에 물이 채워지거나 빠지는 현상에 의한 저유량의 변화에 의해 생성되는 반면, 피압 대수층의 경우는 유체압(fluid pressure)의 변화에 의해 생성된다. 이러한 압력파의 속도, 진폭, 파장 및 감쇠는 조석의 주기, 진폭, 대수층의 투수량계수, 저류계수, 그리고 해안으로부터의 거리 등에 의한 영향을 받는다(Ferris, 1951).

압력파가 내륙으로 전달됨에 따라 지하수위가 변동하는 이러한 해안지역에서는 일시적인 지하수위 측정으로는 지하수 유동을 정확히 분석할 수 없으며, 지하수위의 연속적인 측정을 통한 분석이 필수적이다.

조석변화에 의한 지하수위변화 분석을 위해 이와 유사한 고체에서의 열전달 모델이 이용되며 다음 식과 같다 (Jacob, 1950; Ferris, 1951; Werner and Noren, 1951).

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

위 식에서 h 는 지하수위, h_{msl} 은 평균 해수위[L], A 는 조석의 진폭[L], x 는 해안으로부터의 거리[L], T 는 대수층의 투수량계수[L²T⁻¹], s 는 저류계수[무차원], ω 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.

조석의 진폭을 H_0 , 지하수위의 진폭을 H_x 로 표현하면, 식(1)에 의해 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$H_x = H_0(-px), \quad p = \sqrt{2T/(\omega S)} \quad (2)$$

또한 조석의 영향에 의한 지하수위 변동의 지연시간은 다음과 같다.

$$t_r = \frac{xS}{2pT} \quad (3)$$

위의 식(1)-(3)은 피압대수층에서 적용되지만, 지하수위의 변동폭과 대수층의 두께의 비가 0.02보다 작을 경우 자유면대수층에서도 적용이 가능하다(Roscoe Moss, 1990).

시연시간을 측정하기 위해서는 교차상관분석(cross-correlation analysis)을 이용할 수 있으며, 일반적으로 교차상관분석은 입력자료 x_t 와 출력자료 y_t 와의 상관성을 분석할 때 이용된다. 교차상관함수는 비대칭 $[r_{xy}(k) \neq r_{yx}(k)]$ 이며, $k > 0$ 일 때 $r_{xy}(k) > 0$ 이면 입력자료가 출력자료에 영향을 미치며, $k < 0$ 일 때 $r_{xy}(k) > 0$ 이면 출력자료가 입력자료에 영향을 미친다. 지연(delay)은 $k=0$ 과 최대 $r_{xy}(k)$ 값 사이의 시차로 정의된다. 일반적으로 지연이 짧을수록 전달이 빠르다고 해석할 수 있다.

$$k > 0 \text{ 일 때,} \\ r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4)$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y}) \quad (5)$$

위 식에서 $C_{xy}(k)$ 는 교차상관도표(cross-correlogram)이며, σ_x 와 σ_y 는 시계열자료의 표준편차이다.

2.2. 수리경사 산정법

일반적으로 해안대수층에서는 조석의 효과에 의해 지하수위와 수리경사(hydraulic gradient)가 계속해서 변동하며, 따라서 일시적인 지하수위 측정만으로 지하수 유동특성을 분석할 수 없다.

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

식 (1)을 거리 x 에 대해 편미분하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} h(x, t) = \left(-\sqrt{\frac{\omega S}{2T}}\right) \cdot A \cdot \exp\left(-x \sqrt{\frac{\omega S}{2T}}\right) \cdot \left(\sin\left(\omega t - x \sqrt{\frac{\omega S}{2T}}\right) + \cos\left(\omega t - x \sqrt{\frac{\omega S}{2T}}\right)\right) \quad (6)$$

이렇게 주기적으로 변동하는 지하수위의 평균 수리경사값을 산정하기 위해서는 조석에 의한 효과를 제거해야 한다. 조석은 달과 태양의 다양한 인력의 힘에 의해 나타나며, 조석의 파형(wave form)은 달과 태양의 많은 주파수로 이루어져 단순한 하나의 사인형태의 파가 아닌 복잡한 형태로 이루어져있다. 달의 조석 인력은 태양의 영향에 비해 약 50% 정도 더 크며, 조석의 주기는 약 24시간 50분으로써 지구의 자전과 달의 공전에 의해 결정된다.

식 (1)을 통해 조석에 의한 압력파는 내륙으로 이동함에 따라 단주기의 주파수는 장주기의 주파수에 비해 빨리 감쇠하게 된다. 따라서 조석에 의한 압력파가 생성될 초기에 존재하던 조화상수들이 내륙으로 갈수록 사라진다. 이러한 주파수가 존재하지 않는 지역에서는 필터링이 필요하지 않기 때문에 평균지하수위를 결정하기가 간편하다.

본 연구에서 적용한 필터링 방법은 Godin(1966)에 의해 제안된 방법으로써, 71개 또는 72개의 연속된 시간별 지하수위 자료를 이용하여 달과 태양의 일일(diurnal)과 반일(semidiurnal) 조화함수를 제거하는데 효과적이다. 이 필터링 방법은 71개의 연속된 시간별 수위자료가 필요하며, 평균이동법(moving average method)을 사용하여 71시간의 중앙값에 대한 평균수위를 산정할 수 있다. 먼저 24개의 관측자료에 대해 평균값을 구하여 총 48개 평균값을 구한 후, 이들 자료를 이용하여 24개 관측자료에 대해 평균값을 구하여 총 25개 평균값을 구한다. 마지막으로 25개 자료에 대한 평균값을 구하게 된다.

이 방법을 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

매 시간 측정된 지하수위 값을 $O(1)$, $O(2)$, $O(3)$, ..., $O(71)$ 이라 하면,

1단계 평균값(X_i)는

$$X_i = \sum_{k=0}^{23} \frac{O(k+i)}{24}, \quad i=1, 2, 3, \dots, 48; \quad (7)$$

2단계 평균값(Y_i)는

$$Y_i = \sum_{k=0}^{23} \frac{X_{k+i}}{24}, \quad i=1, 2, 3, \dots, 25; \quad (8)$$

평균값 M 은

$$M = \sum_{j=1}^{25} \frac{Y_j}{25} \quad (9)$$

3. 연구방법

제주도에서는 2001년부터 해수침투감시 모니터링 시스템 구축사업을 시작하여 2003년까지 구좌, 성산, 표선지역에 19개소를 설치하였고, 2004년도에는 제주시 4개, 북제주군 2개, 남제주군에 4개 등 총 10개가 추가로 구축되었다(Fig. 1). 본 연구에서는 현재 운영중인 19개 해수침투감시관측망 중 제주도 동부에 설치되어 있는 한동-2호공(HD-2), 종달-1호공(JD-1), 수산-1호공(SS-1) 등 3개 관측정의 지하수위 자료를 중심으로 조석반응 분석법을 이용하여 해안대수층의 수리인자를 산정하였다.

조석반응 분석법을 위해서는 관측정에서의 지하수위 자료 이외에 조수위 자료가 필요하다. 현재 제주도에 설치되어 있는 검조소(tide station)는 제주, 서귀포, 성산포, 모슬포 네 지점이다(Fig. 1). 국립해양조사원에서는 조석자료 제공 시스템(Tide Data Total Service System)을 통해 1시간 간격으로 조수위(height of tide) 자료가 제공되고 있다. 일반적으로 검조소는 1년 이상의 자료를 조화분해 하여 1년 주기의 각종 상수들을 추출하여 조석예보를 시행하며, 이 조화상수를 이용하여 기준면을 설정하고 그 기준면을 기초로 실제 조석의 높이를 관측하게 된다. 그러나 성산포와 모슬포 검조소는 현재 관측을 시작하지 1년이 지나지 않아 기준면이 아직 설정되지 않은 상태이므로 현재 제주도에서 가용한 조수위 자료는 제주와 서귀포 두 지점이다.

본 연구에서는 제주도 동부지역에서의 조수위 자료 획득을 위해 종달지역에 자동수위기록계를 설치하여 2004년 5월부터 30분 간격으로, 7월부터는 5분 간격으로 조수위 변화를 관측하였다. 제주도에서 가용한 조석자료인 제주, 서귀포 검조소의 조수위 자료와 종달 지점에서 관측된 조수위 변화를 비교 검토하였다.

제주 검조소에서의 관측결과 6월 고고조는 EL+0.61 m~+1.61 m, 고저조는 EL-1.31 m~-0.16 m, 저고조는 EL+0.42~+0.94 m, 저저조는 EL-0.58~+0.03 m의 범위를 나타낸다. 조차는 최소 0.67m, 최대 2.92m의 차이를 보였다. 서귀포 검조소에서의 관측결과 6월 고고조는 EL+0.56 m~+1.70 m, 고저조는 EL-1.49

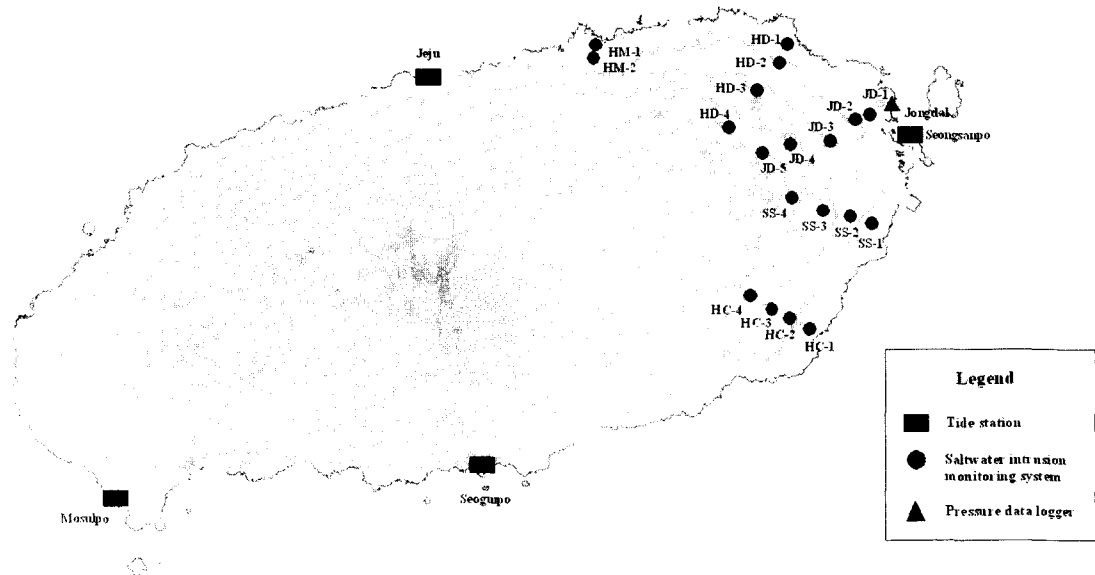


Fig. 1. Locations of tide station and salt water intrusion monitoring well system in Jeju island.

m~-0.38 m, 저고조는 EL+0.42~ +1.02 m, 저저조는 EL-0.6~-0.07 m의 범위를 나타낸다. 조차는 최소 0.74 m, 최대 3.19 m의 차이를 보였다. 종달지역에서의 관측결과 6월 고고조는 EL+0.18 m~+0.71 m, 고저조는 EL-0.90 m~-0.31 m, 저고조는 EL+0.08~ +0.43 m, 저저조는 EL-0.42~+0.01 m의 범위를 나타낸다. 조차는 최소 0.35 m, 최대 1.61 m의 차이를 보였다. 6월 한달 동안 세 지점에서의 조수위 변화를 비교해보면 서귀포 지역에서 조차가 가장 컸으며 종달 지역에서 가장 작게 나타났다. 세 지점에서 조석의 위상변화를 살펴보기 위해 6월 1일부터 5일간의 조수위 자료를 이용하여 지연시간을 계산한 결과, 제주 지점과 종달 지점에서의 조석이 서귀포 지점에서의 조석에 비해 약 1시간 느리게 변동하고 있음을 알 수 있다.

4. 결과 및 해석

4.1. 해안대수층에서 조석효과를 이용한 수리인자 산정

해안대수층에서는 조석의 주기적인 변동으로 인해 지하수위가 상승과 하강을 반복하며, 조석의 영향은 대수층의 저류계수 값에 따라 미치는 영향범위가 다르다. 일반적으로 자유면대수층의 비산출률(S_y)은 0.01~0.3 내외의 값을(Freeze and Cherry, 1979), 피압대수층의 경우 저류계수 값이 10^{-3} ~ 10^{-5} 의 범위를 보인다(Driscoll, 1986). 자유면대수층에서의 조석의 압력파는 높은 저류계수 값으로 인해 빨리 감쇠하며(Erskine, 1991), 이러한 현상은 많은 연구진들에 의해 관측되어졌다(White and Roberts, 1994; Millham and Howes, 1995; Chen and Jiao, 1998). White와 Robert(1994)는 다수의 연구결과를 통해 피압대수층의 경우 조석의 영향이 수백 미터 혹은 그 이상에 이르는 반면, 자유면대수층에서는 수십 미터에서 감쇠된다고 하였다.

제주도는 수회에 걸친 화산활동으로 형성된 화산도이기 때문에 지역적으로 지질분포의 차이가 많고 대수층의 분포가 불규칙적이다(한규언 등, 1977). 따라서 대수층 상부의 저투수성 퇴적층 분포에 따라 국부적으로 피압 또는 누수대수층이 존재할 수 있으며, 제주도 동부 해안대수층을 단순히 자유면대수층 혹은 피압대수층으로 분류하기는 어렵다.

본 연구에서는 단일 대수층의 단순한 개념모델을 적용한 해석학적인 방법(analytical solution)을 이용하여 수리확산계수(hydraulic diffusivity)를 산정하였다. 분석에 사용한 자료는 동부 종달지역의 조석자료, HD-2호

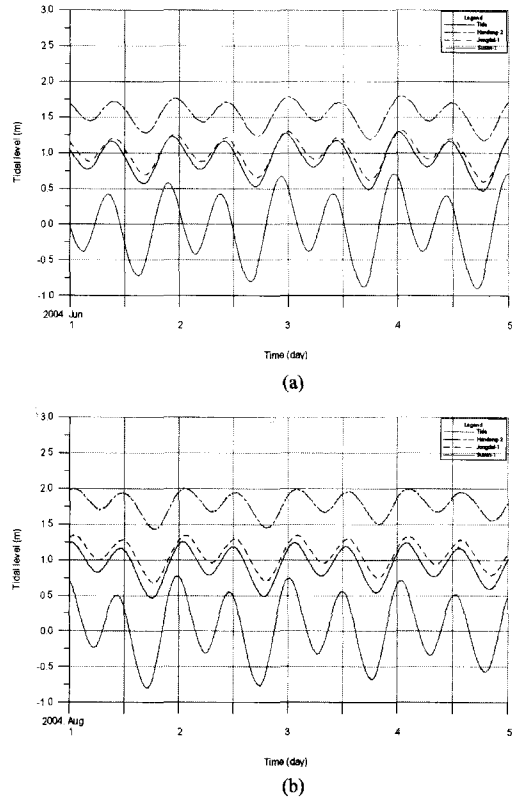


Fig. 2. Tide and groundwater level fluctuations at three observation wells. (a) Observed data at every 30 minutes from Jun. 1 to 5, (b) observed data at every 5 minutes from Aug. 1 to 5.

공, JD-1호공, SS-1호공의 수위자료이다. 경제적인 측정간격을 설정하기 위해 5~6월에는 30분 간격, 7~8월에는 5분 간격으로 조석 및 지하수위 자료를 측정하였으며 이들 자료를 이용하여 수리인자를 산정하였다.

Fig. 2(a)는 2004년 6월 1일부터 5일간 30분 간격으로 측정된 조석 및 지하수위 자료이며, (b)는 8월 1일부터 5일간 5분 간격으로 측정된 조석 및 지하수위 자료이다. 조석의 변동에 의해 내륙에 설치되어 있는 관측망에서의 지하수위가 변화하는데, 지연시간을 산정하기 위해 교차상관 분석을 실시하였다. Fig. 3(a)는 HD-2호공에서 6월 1일부터 5일간 30분 간격으로 측정된 지하수위의 교차상관분석 결과이며, 지연시간은 90분이다. Fig. 3(b)는 동일 공에서 8월 1일부터 5일간 5분 간격으로 측정된 지하수위의 교차상관분석 결과이며, 지연시간은 95분이다.

JD-1호공의 경우 30분 간격으로 측정된 결과 지연시간은 90분이며, 5분 간격으로 측정된 결과 지연시간은 85분이다. SS-1호공의 경우 30분 간격으로 측정된 결

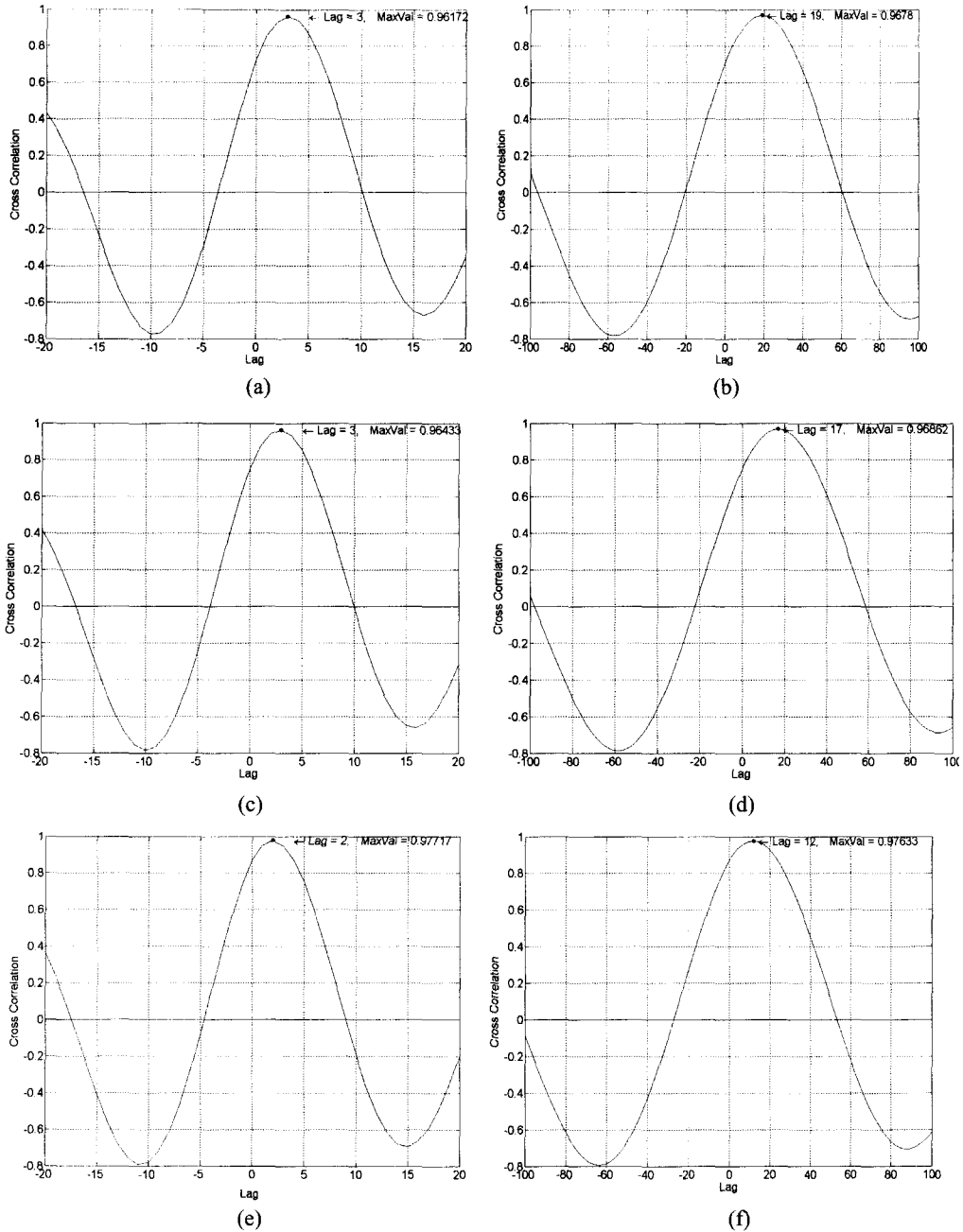


Fig. 3. Cross-correlation functions of groundwater level fluctuations at HD-2, JD-1, and SS-1 as output and tide fluctuations as input.

과 지연시간은 60분이며, 5분 간격으로 측정된 결과 역시 지연시간은 60분으로 나타났다(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. 식 (2)와

(3)을 이용하여 수리확산계수를 계산하면 $T/S \approx 4.36 \times 10^7 \text{m}^2\text{d}^{-1}$ 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 각

각 그 높이가 다른데, 그 차이를 제외하면 두 곡선은 비교적 잘 일치하고 있다. 5분 간격으로 측정된 8월의

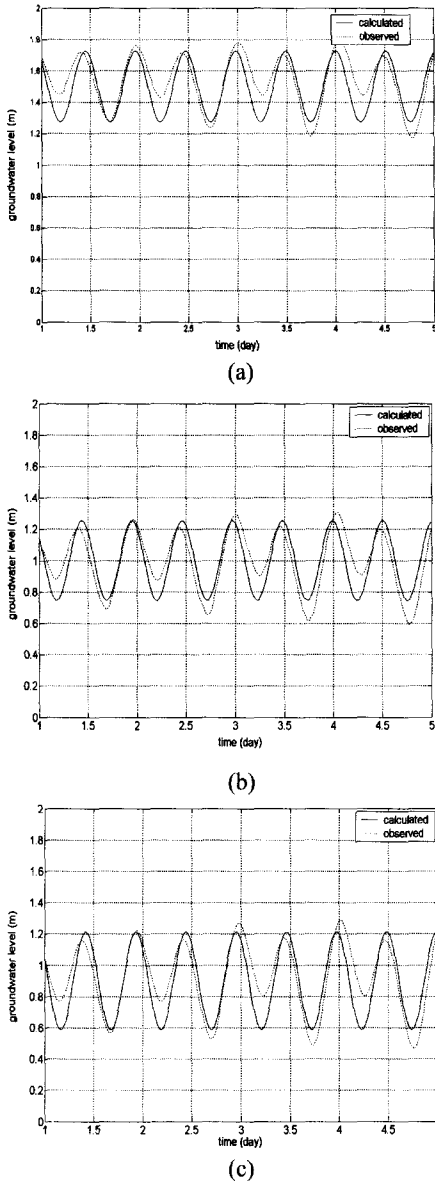


Fig. 4. Observed and calculated head fluctuations at (a) HD-2, (b) JD-1, (c) SS-1.

자료의 경우 지연시간은 95분이며 이를 이용하여 수리확산계수를 계산하면 $T/S \approx 4.14 \times 10^7 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$ 이며, 지연시간이 5분 증가함에 따라 수리확산계수는 약 5% 감소하였다. 즉, 전체 대수층의 평균값을 추정하는 의미로 본다면 이 차이는 작으며 조석 및 지하수위의 측정 간격인 30분은 무리가 없는 것으로 판단된다.

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 $t_r = 90 \text{ min}$ 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 $t_r = 60 \text{ min}$ 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/S의 비율로 나타나므로 두 인자를 각각 구하기 위해서는 다른 방법이 추가되어야 한다. 일반적으로 자유면대수층의 경우 저류계수 값은 0.01~0.3의 범위를 가지는데(Freeze and Cherry, 1979), 이 값을 적용하면 HD-2호공의 경우 투수량계수 값은 436,000~13,080,000 $\text{m}^2 \text{ d}^{-1}$, JD-1호공의 경우 294,000~8,820,000 $\text{m}^2 \text{ d}^{-1}$, SS-1호공의 경우 420,000~12,600,000 $\text{m}^2 \text{ d}^{-1}$ 의 범위를 가진다. 반면 피압대수층에서 저류계수 값은 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 의 범위를 가지는데(Driscoll, 1986), 이 값을 적용하면 HD-2호공의 경우 투수량계수 값은 436~43,600 $\text{m}^2 \text{ d}^{-1}$, JD-1호공의 경우 294~29,400 $\text{m}^2 \text{ d}^{-1}$, SS-1호공의 경우 420~42,000 $\text{m}^2 \text{ d}^{-1}$ 의 범위를 가진다 (Table 1). 이는 한정상 등(1994)가 동부지역인 조천, 구좌, 성산, 표선 및 남원의 5개 수역에 설치된 109개 관정을 분석한 결과인 20~76,600 $\text{m}^2 \text{ d}^{-1}$ 의 값과 제주도(2003)가 광역상수도 및 해수침투감시관측망 88개공의 자료를 토대로 기본 통계분석을 실시하여 산정한 434~17,573 $\text{m}^2 \text{ d}^{-1}$ 의 값과 유사한 값을 보이고 있다.

또한 본 연구지역에서 해수침투 감시관측망에서의 수위관측 결과를 살펴보면 조석에 의한 영향이 3~5 km에 이르며, 따라서 제주도 동부지역에서의 해안대수층은 피압대수층의 특성을 가진다고 볼 수 있다. 그러

Table 1. Amplitude and time lag of groundwater fluctuations and calculated hydraulic parameters.

Borehole No.	H_x [m]	t_r [min]	T/S [$\text{m}^2 \text{ d}^{-1}$]	T [$\text{m}^2 \text{ d}^{-1}$]	S [dimensionless]
HD-2	0.20	90	4.36 ~ 107	436 ~ 43,600	$10^{-3} \sim 10^{-5}$
JD-1	0.24	90	2.94 ~ 107	294 ~ 29,400	$10^{-3} \sim 10^{-5}$
SS-1	0.28	60	4.20 ~ 107	420 ~ 42,000	$10^{-3} \sim 10^{-5}$

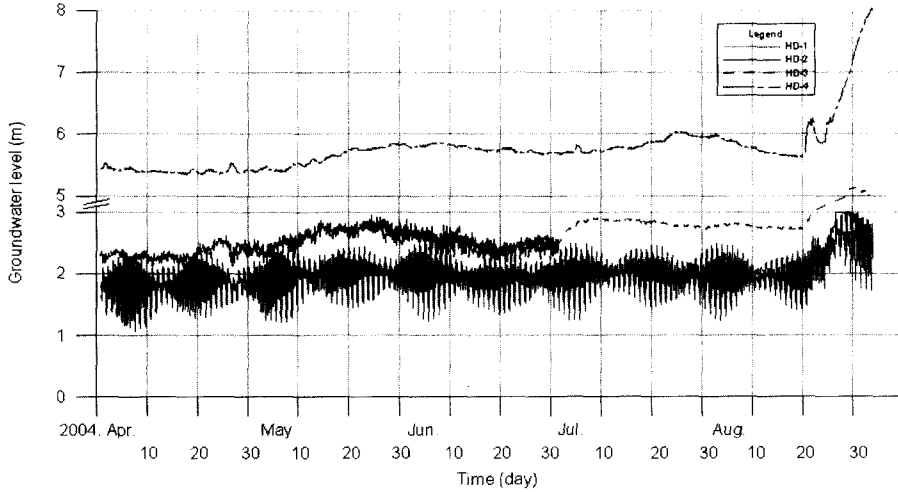


Fig. 5. Groundwater level observed at Handong district.

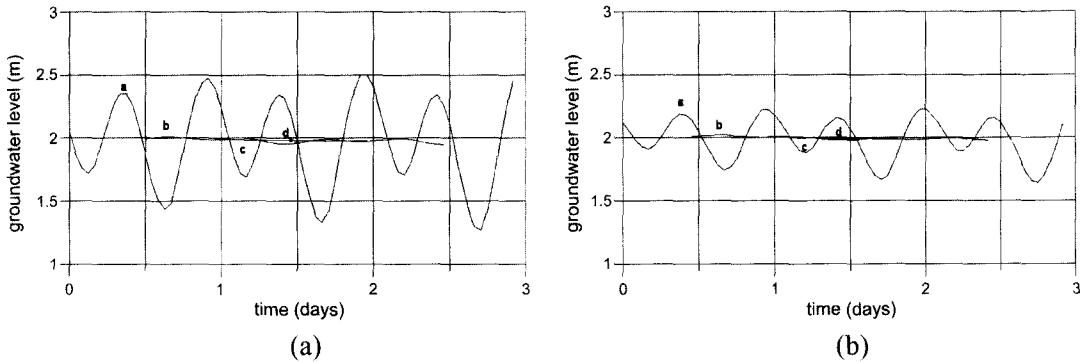


Fig. 6. Hydrographs showing the 71-hour filtering process using groundwater data at HD-1(a) and HD-2(b) during 2004/06/01~6/3. a: 71 consecutive hourly water elevations; b: 48 means from moving average of 24 hourly elevations over the 71 hours; c: 25 means from moving average of 24 means over the 48; d: mean elevation at hour 36.

나 이는 동부지역의 대수층을 하나의 수리지층으로 가정하고 조석의 영향이 미치는 범위를 통해 살펴본 결과이며, 앞에서 언급한 바와 같이 대수층 상부의 저투수성 퇴적층 분포에 따라 국부적으로 피압 또는 누수 대수층이 존재할 수 있으며, 제주도 동부 해안대수층을 단순히 자유면대수층 혹은 피압대수층으로 분류하기는 어렵다.

4.2. 해양조석에 의해 변동하는 지하수위를 이용한 수리경사 산정

해안대수층에서는 조석의 효과에 의해 지하수위와 수리경사가 계속해서 변동하므로 일시적인 지하수위 측정만으로 지하수 유동특성을 분석할 수 없다. 본 연구 지역인 제주 동부지역 중 한동지구의 경우 2004년도 4월부터 8월까지 5개월간의 지하수위를 살펴보면 Fig.

5와 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 한동-1, 2(HD-1, 2), 종달-1, 2(JD-1, 2), 수산-1, 2(SS-1, 2)호공에 대해 필터링을 실시하였다. 필터링에 사용한 수위자료는 모두 2004년 6월 1일부터 3일까지 71시간 연속자료를 이용하였으며, 그 결과 HD-1호공은 1.98 m, HD-2호공은 1.99 m, JD-1호공은 0.96 m, JD-2호공은 1.28 m, SS-1호공은 0.91 m, SS-2호공은 1.38 m이다(Fig. 6).

Table 2. Mean groundwater level and hydraulic gradient at saltwater intrusion monitoring well system during June 2004.

Borehole No.	ground level [m]	Distance from coastline [km]	groundwater level [m]	hydraulic gradient
HD-1	14.79	0.9	1.98	2.2×10^{-3}
HD-2	42.22	2.5	1.99	6.3×10^{-6}
HD-3	112.25	5.2	2.65	2.4×10^{-4}
HD-4	190.49	8.8	5.80	8.8×10^{-4}
JD-1	14.18	1.7	0.96	5.7×10^{-4}
JD-2	52.49	2.9	1.28	2.7×10^{-4}
JD-3	100.17	5.5	1.96	2.6×10^{-4}
JD-4	167.25	8.4	2.45	1.7×10^{-4}
JD-5	202.00	10.8	2.85	1.7×10^{-4}
SS-1	33.14	1.4	0.91	6.5×10^{-4}
SS-2	70.62	3.2	1.38	2.6×10^{-4}
SS-3	115.15	5.4	2.12	3.3×10^{-4}
SS-4	176.16	8.1	3.13	3.7×10^{-4}

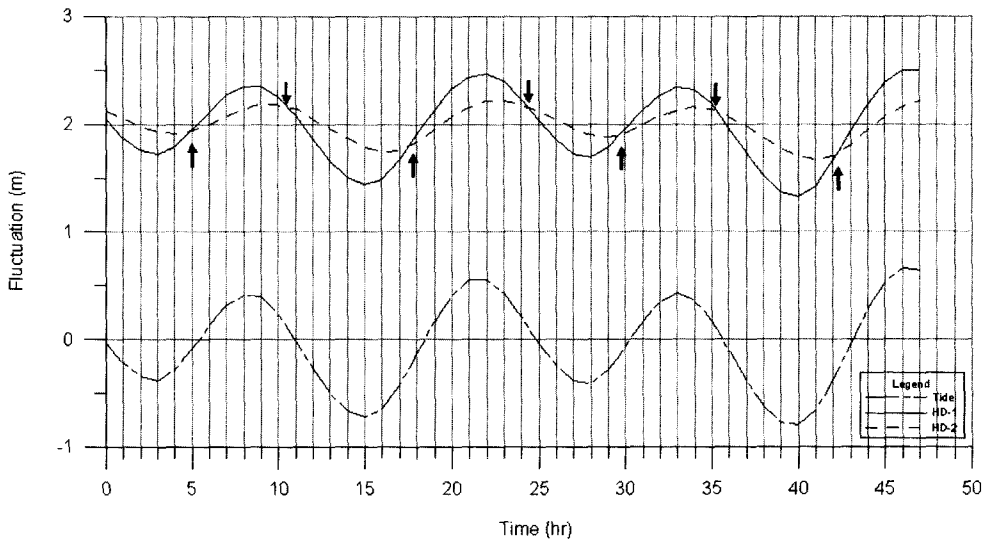


Fig. 7. Groundwater head fluctuations at HD-1 and HD-2 during 2004. 6.1~6.3.

조석의 영향을 받지 않는 관정에서의 평균수위자료는 같은 기간동안의 수위자료의 평균값과 필터링을 이용한 결과의 차이가 없었다. 관측망에서의 평균 수위값을 정리하면 Table 2와 같다. 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. 7은 2004년 6월 1일 0시부터 48

시간동안에 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. 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

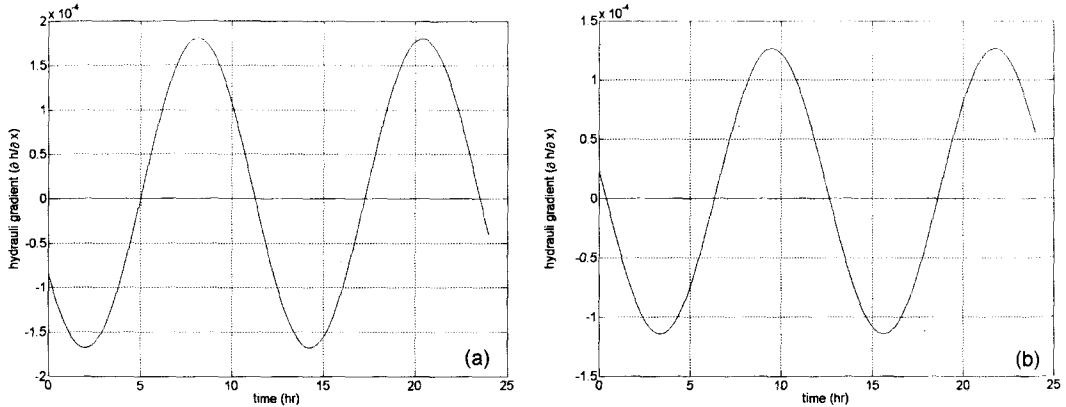


Fig. 8. Change in during a tidal cycle for HD-1 (a) and HD-2 (b).

수위차는 0.35 미이다.

HD-1, 2호공에서의 수리경사를 살펴보기 위해 수리 확산계수 값을 식 (6)에 대입하고 두 관정에서의 수리 경사값인 6.3×10^{-6} 을 더하면 각 관정에서의 시간에 따른 수리경사는 Fig. 8과 같이 나타난다. Fig. 8에서 양 (+)의 값은 해안쪽에서의 유동방향을 나타내며, 음(-)의 값은 내륙쪽에서의 유동방향을 나타낸다. HD-1호공의 경우 해안에 더 가까이 위치해 있는 관계로 2호공에 비해 지하수위 변동폭이 상대적으로 더 크며, 따라서 최대 수리경사값도 1.8×10^{-4} 으로 2호공의 1.3×10^{-4} 에 비해 크게 나타난다.

일반적으로 지하수가 유동하는 거리는 다시의 법칙(Darcy's law)에 의해 식 (10)과 같이 나타난다.

$$x = \frac{KIt^*}{\phi} \tag{10}$$

즉, 거리는 지하수의 유동속도와 시간(t^*)의 곱으로 나타난다. 위 식에서 K는 수리전도도, I는 동수구배, t^* 는 조석의 한 사이클(cycle)동안 걸리는 시간, ϕ 는 공극률이다. 한동지구에서 해안쪽에서의 유동거리는 Fig. 8에서 양(+)의 값을 가지는 수리경사곡선의 면적에 수리전도도를 곱하고 공극률로 나눈 값이다. 같은 방식으로 내륙쪽에서의 유동거리는 음(-)의 값을 가지는 수리경사곡선의 면적에 수리전도도를 곱하고 공극률로 나눈 값이다. 이 두 값의 차이가 한 사이클동안 지하수가 실제로 유동한 거리가 되며, 결국 평균수리경사값으로 이용할 수 있다(Serfes, 1991). 한동지구에서의 평균수리경사는 6.3×10^{-6} 으로써, 양의 값으로써 해안 쪽으로 유동하며, 이 지역의 수리전도도와 공극률을 이용하면 지하수의 유동거리를 산정할 수 있다.

5. 결 언

제주도에 구축되어 있는 해수침투 감시관측망 중 동부의 한동, 종달, 수산지구 관측공을 대상으로 지하수위의 변동 특성을 분석하여 대수층의 수리인자를 산정하였다. 동부지역에서의 조수위자료 획득을 위해 종달 지역에 자동수위기록계를 설치하여 조수위변화를 관측하였으며, 제주와 서귀포 검조소와의 조차 및 위상변화를 비교하였다. 조차는 서귀포 지역에서 가장 크고 종달 지점에서 가장 작게 나타나며, 위상변화 분석결과 제주 검조소와 종달 지점에서의 조차가 서귀포 검조소에서의 조차에 비해 약 1시간 느리게 변동하고 있음을 알 수 있다.

해양조석의 영향으로 인해 지하수위가 변동하는 관정은 HD-1, 2, JD-1, 2, SS-1, 2호공이었으며, 제주도 동부지역에서 조석이 영향을 미치는 범위는 해안으로부터 3~5 km 사이인 것으로 판단된다. HD-2, JD-1, SS-1호공에서의 지하수위 변동 자료를 조석반응 분석법을 이용하여 수리인자를 산정한 결과 HD-2호공, JD-1호공, SS-1호공의 수리확산계수는 각각 $4.36 \times 10^7 \text{ m}^2\text{d}^{-1}$, $2.94 \times 10^7 \text{ m}^2\text{d}^{-1}$, $4.2 \times 10^7 \text{ m}^2\text{d}^{-1}$ 이다. 제주도 동부지역에서의 조석 및 지하수위의 경제적인 측정간격 설정을 위하여 5분 간격과 30분 간격 자료를 이용하여 지연시간을 산정한 결과 5분여의 차이가 있었다. 지연시간이 5분 증가함에 따라 수리확산계수는 약 5% 감소하였으며, 전체 대수층의 평균값을 추정하는 의미로 본다면 이 차이는 작으며, 따라서 30분은 조석 및 이에 반응하는 지하수위 분석에 있어 경제적인 측정간격으로 판단된다.

제주도 동부지역의 수리경사 산정을 위해 71시간 연

속자료에 대해 이동평균법을 이용하였다. 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 나타나며, 그 결과 지하수의 유동 방향이 달라진다. 따라서 해안대수층에서의 지하수 유동방향을 해석할 때에는 반드시 조석에 의한 영향을 고려해야 할 것이다.

사 사

본 연구는 “제주도 지하수 부존특성에 대한 지구과학적 연구” 과제의 일환으로 수행되었으며, 논문의 세심한 검토를 해주신 박원배 박사님과 함세영 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

고기원, 문영석, 강봉래, 송시태, 박윤석 (1998) 제주도 해안지역에서 담·염수 혼합대 하부에 발달한 담수 대수층에 관한 사례 연구. 대한자연환경지질학회·(사)대한지하수환경학회 공동학술발표회 발표논문 요약집, p. 155-156.

박남식, 이용두 (1995) 제주도 중심부 수리지질변수의 불확실성이 해안지역 지하수 흐름에 대한 수치실험결과에 미치는 영향에 대한 연구. 대한지하수환경학회 1995년도 정기총회 및 춘계학술발표회, p. 35.

박남식, 이용두 (1997) 중·동 제주 수역의 지하수 개발로 인한 해수침투. 지하수환경, v. 4, p. 5-13.

박원배, 박윤석, 고기원, 문덕철 (2003) 제주도 동부지역 지하수의 담·염수 경계면 분포와 변화. 한국지하수도양환경학회 춘계학술대회, p. 55-58.

박윤석, 고기원, 강봉래, 박원배 (2002) 제주도 해수침투 감시관측망 구축사업 성과-북제주군 구좌읍 한동리-송당리 지역-. 제10회 세계 물의날 기념 학술세미나, ‘제주도의 물·세계의 물, 도민의 자산’, p. 73-113.

부성안, 정교철 (2000) 제주도 동부권역 담지하수 대수층에서의 염수침입. 지질공학, 10권, p. 115-130.

송영철, 고용구, 유장길 (1999) $\delta^{15}\text{N}$ 을 이용한 제주도 지하수층의 질산성질소 오염원 조사. 지하수환경, 6권, p. 107-110.

심병완, 정상용 (2004) 단열압반 대수층에서 조석분석법을 이용한 수리상수 추정. 한국지하수도양환경학회지, 9권, p. 27-32.

오윤근, 현익현 (1997) $\delta^{15}\text{N}$ 값을 이용한 제주도 지하수층의 질산성질소 오염원 추정에 관한 연구. 지하수환경, 4권, p. 1-4.

우남철, 김형돈, 이광식, 박원배, 고기원, 문영석 (2001)

지하수 수질 관측에 의한 제주도 대정수역의 지하수계 및 오염특성 분석. 자연환경지질, 34권, p. 485-498.

윤정수, 김기표, 정차연 (2003) 제주도 동부 한동리지역 고염분 지하수에 대한 수리지질학적 연구. 지질학회지, 39권, p. 115-131.

이성복, 김구영, 한소라, 한정상 (1997) 제주도 삼양 3수원지의 염소이온농도 상승 원인에 관한 연구. 지하수환경, 4권, p. 85-94.

이용두 (2001) 고도에 따른 제주도 지하수의 수질특성. 한국토양환경학회지, 5권, p. 65-75.

제주도 (2003) 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사 (III). 425p.

최병수 (1999) 제주도 지하수의 우물 비양수량자료를 이용한 대수층상수 결정방법. 지하수환경, 6권, p. 180-187.

한규언, 이문원 (1977) 제주도의 지질과 지하수와의 관계 연구. 제주대학교 논문집 제9집.

한정상, 한규상, 김창길, 김남종, 한찬 (1994) 제주도 지하수자원의 최적 개발가능량. 지하수환경, 1권, p. 33-50.

Chen, C.X. and Jiao, J. (1999) Numerical simulation of pumping tests in multilayer wells with non-darcian flow in the wellbore. Ground Water, v. 37, p. 465-474.

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.

Freeze, R.A., and Cherry, J.A. (1979) Groundwater. Prentice Hall, 604p.

Driscoll, F.G. (1986) Groundwater and Wells. Johnson Division, 1089p.

Erskine, A.D. (1991) The effect of tidal fluctuation on a coastal aquifer in the U.K. Ground Water, v. 29, p. 556-562.

Godin, G. (1966) Daily mean sea level and short-period seiches. Intl. Hydrographic Review. v.43, p. 75-89.

Jacob, C.E. (1950) Flow of groundwater. In: Engineering hydraulics. H. Rouse, ed. John Wiley and Sons Inc., New York. p. 321-386.

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.

Millham, N.P. and Howes, B.L. (1995) A comparison of methods to determine K in a shallow coastal aquifer, Ground Water, v. 33, p. 49-57.

Roscoe Moss. (1990) Handbook of Ground Water Development. John Wiley & Sons, New York, p. 276-312.

Serfes, M.E. (1991) Determining the mean hydraulic gradient of groundwater affected by tidal fluctuations. Ground Water, v. 29, p. 549-555.

Werner, P.W. and Noren, D. (1951) Progressive waves in nonartesian aquifers. Trans. Amer. Geophysical Union. v. 32, p. 238-244.

White, J.K. and Roberts, T.O.L. (1994) The significance of groundwater tidal fluctuations, in Groundwater Problems in Urban Areas: Proceeding of the International Conference Organized by the Institution of Civil Engineers and Held in London, 2-3 June 1993, edited by W.B. Wilkinson, p. 31-42, Thomas Telford, London.