

강우에 의한 지하수위 변동 예측모델의 개발 및 적용

박 은 규*

경북대학교 지질학과

A Development of Groundwater Level Fluctuations Due To Precipitations and Infiltrations

Eungyu Park*

Department of Geology, Kyungpook National University

ABSTRACT

In this study, a semi-analytical model to address groundwater level fluctuations in response to precipitations and its infiltration is developed through mathematical modeling based on water balance equation. The developed model is applied to a prediction of groundwater level fluctuations in Hongcheon area. The developed model is calibrated through a non-linear parameter estimator by using daily precipitation rates and groundwater fluctuations data of a same year 2003. The calibrated input parameters are directly applied to the prediction of groundwater fluctuations of year 2004 and the simulated curve successfully mimics the observed. The developed model is also applied to practical problems such as a prediction of a effect of reduced recharge due to surface coverage change and a induced water level reduction. Through this study, we found that recharge to precipitation ratio is not a constant and may be a function of a precipitation pattern.

Key words : Groundwater level fluctuations, Recharge, Precipitation, Water budget

요 약 문

본 연구에서는 수학적 모델링을 통해 강우에 기인하는 지하수위 변동예측 준-해석학적 모델을 개발하였다. 개발된 모델은 홍천 지역의 지하수위 변동을 예측에 적용되었으며 이를 위하여 지하수 변동 관측자료 및 강우자료가 이용되었다. 개발된 모델은 비선형 파라미터 예측 코드를 활용하여 2003년 지하수위 변동을 예측하도록 적용되었으며 이렇게 최적화에 이용된 입력 파라미터는 그 다음해인 2004년 지하수위 변동을 예측하는데 활용되었다. 강우자료에 기초한 2004년 지하수위 변동 예측은 RMS 오차가 0.18 m로 관측지하수위의 표준편차가 0.44 m인 것으로 미루어 보았을 때 대체로 양호한 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 개발된 모델을 이용하여 지표 피복의 변화에 기인하는 함양율 감소 시 발생하는 지하수위 변동 예측 및 양수에 의한 인공적인 지하수위 강하를 모사하는데 적용하였다. 본 연구의 결과는 보다 정확한 지하수위 변동 예측을 위해서는 지하수 함양율을 상수로 적용하는 것이 적절치 않으며 강우 패턴의 함수로 결정되어야 함을 보인다.

주제어 : 지하수위 변동, 지하수위 예측, 지하수 함양, 강우, 물수지

1. 서 론

강우 및 함양으로 인하여 발생하는 지하수위 변동에 대한 예측은 산간 및 농촌 지역의 지하수 개발, 건설 현장

에서의 지하수 수위조절, 오염된 비포화대가 지하수에 미치는 위해성 파악, 홍수예측 등의 문제에 적용될 수 있다. 일반적으로 국내 대부분의 지역에서 강우량 자료에 대한 접근성은 비교적 용이하나 지하수위 변동에 대한 자료는

*Corresponding author : egpark@knu.ac.kr

원고접수일 : 2006. 3. 29 게재승인일 : 2006. 10. 17

질의 및 토의 : 2007. 10. 31 까지

관측정의 설치 및 측정장비의 설비를 포함한 제반 소요비용이 국내 관련 예산에 비하여 과다함으로 인하여 매우 제한적으로 시행되고 있다. 현재 2005년 기준으로 전국에 총 320개의 관측망이 운영되고 있으며 이를 통하여 제한적인 지역의 정보만이 얻어지고 있는 실정이다. 따라서 국내 대부분의 지역에 걸쳐 보았을 때 수년 이상의 지하수위 변동을 기록한 케이스는 매우 한정되어 있다.

현재까지 강우에 의한 지하수위 변동을 예측하기 위한 다양한 모델이 제시된 바 있으나(Rasmussen and Andreassen, 1959; Sophocleous, 1991; Rai and Singh, 1995; Bierkens, 1998; Rai and Manglik, 1999; Knotters and Bierkens, 2000) 이러한 모델들은 비포화대의 수분 증감에 기초한 모델로 수분의 대수층 유출 및 대수층 물성과의 관계 등을 체계적으로 설명하지 못하거나(Rasmussen and Andreassen, 1959; Bierkens, 1998; Knotters and Bierkens, 2000) 실제 지하수위 변동을 예측하는데 있어 손쉬운 적용이 어려워 실용적이지 않은 것이 대부분이었다(Rai and Singh, 1995; Rai and Manglik, 1999).

따라서 본 연구에서는 강우 자료를 기초하여 시간에 따른 지하수위 변동을 예측하는 수학적 모델을 개발하고자 한다. 이를 위하여, 우선, 물 수지 방정식을 지하수위에 기초하도록 변환하고 해를 구하며 개발된 모델이 물리적으로 합리적임을 입증하기 위하여 자유면 대수층에서의 1차원 지하수 흐름 방정식인 Boussinesq 식으로의 수렴성을 보일 것이다. 또한 입력자료의 구분적 연속 상수함수 특성을 활용하여 지하수위 예측 알고리즘을 개발할 것이며 알고리즘을 통해 개발된 전산코드를 활용하여 장기 지하수위 변동을 예측하고 두 가지의 실용적 문제에 적용할 것이다.

2. 실험 방법

2.1. 모델 개발

어떤 대수층 구간에서 자유량의 변화는 가상으로 설정된 구간 내로 유입되는 지표함양량, 인근 대수층 구간으로부터 유입되는 지하수 유량 및 유출되는 유량의 합으로 표현된다. 이를 물 수지 방정식으로 표현한 것은 다음의 식 (1)과 같다.

$$\frac{dv}{dt} = I - O - fp(t), \tag{1}$$

여기서 I 와 O 는 각각 대수층의 두께를 통해 소유역 내로 유입 및 유출되는 유량의 시간-중속 함수이며, 좌변의 v 는 소유역으로부터 주변 지역으로 배출될 수 있는 잠재

배출량[L³]이다. 따라서 본 연구에서는 강우에 의한 함양을 제외한 모든 잠재배출량에 영향을 줄 수 있는 제반 유입출량을 무시할 수 있다고 가정하였다.

이러한 잠재 배출량은 야외에서 손쉬운 측정이 불가능하며 다음의 식 (2)를 이용하여 변환을 시도할 수 있다(최병수, 안중기, 1998).

$$v = a \times n \times h \tag{2}$$

여기서, a 는 가상으로 설정한 대수층 구간의 총 면적[L²]이며, n 은 대수층의 유효공극률에서 수분함량을 제외한 값 [-]으로 비포화대 REV(representative elementary volume)의 전체 부피, v_T 와 고체, v_S 와 수분, v_W 이 차지하는 부피를 뺀 나머지 부피의 비 $(1 - (v_S + v_W) / V_T)$ 이다. 또한 $h = H - h_{min}$ 이며 H 는 지하수의 수위[L], 그리고 h_{min} 은 대수층 기저 고도[L]를 의미한다. 여기서, 어느 대수층 구간에서 시간에 따른 잠재배출량의 시간에 따른 변화는 잠재배출량에 비례한다고 가정하면 다음의 식 (3)과 같이 식을 구성할 수 있다.

$$I - O = -kv \tag{3}$$

여기서 우변의 k 는 시간에 따른 잠재배출량의 변화가 잠재배출량 자체에 비례한다고 하였을 경우의 비례상수[T⁻¹]이다. 위의 식 (3)의 물리적인 의미는 다음과 같다. 그림 1에서와 같이 관측정이 위치한 대수층 구간의 동수구배가 선형이며 수리전도도, K , 가 상수가 되도록 충분히 작게 설정하면 다음과 같이 식을 구성할 수 있다.

$$I - O = -K \left| \frac{\Delta h}{\Delta x} \right| h_1 + K \left| \frac{\Delta h}{\Delta x} \right| h_2 \tag{4}$$

여기서 $\Delta h / \Delta x$ 는 구간의 경계에서의 동수구배를 의미하며, h_1 과 h_2 는 각각 구간 경계에서의 수두를 의미한다. 또한 대수층 구간이 가진 총 물의 부피는 다음의 식 (5)로 주어진다.

$$v = n \frac{h_1 + h_2}{2} L \tag{5}$$

여기서 L 은 유향을 따른 구간의 너비를 한다. 식(3)의 좌변에 식 (4)를 우변에 식 (5)를 대입하면,

$$-K \frac{\Delta h}{\Delta x} iL = knbL \tag{6}$$

이며 여기서 $i = (h_1 - h_2) / L$ 은 대수층 구간의 평균 동수구배 그리고 $b = (h_1 + h_2) / 2$ 는 대수층 구간의 평균두께를 의

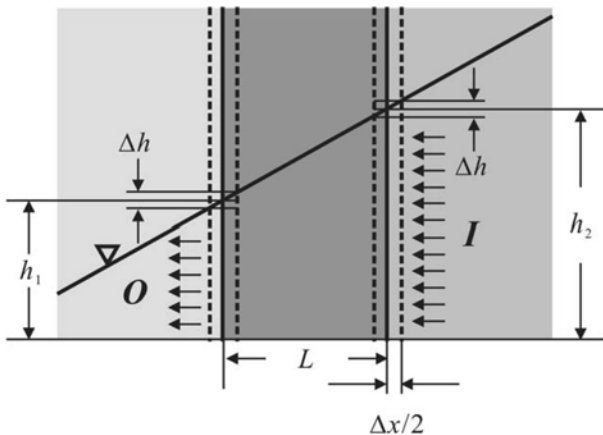


Fig. 1. Schematic drawing of groundwater flow and head change (darker region is the domain of our consideration).

미한다. 만약 지하수위의 변동이 대수층의 평균두께에 비하여 매우 작으며 대수층 구간이 충분히 작아 구간 내에서 동수구배가 상수임을 가정하면 비례상수, k 는 다음과 같이 주어진다.

$$k = -\frac{Ki^2}{nb} \tag{7}$$

위의 식 (7)은 비례상수, k 는 음의 값을 가지며, 시간에 따른 지하수위의 감소는 대수층의 수리전도도에 비례하며, 대수층의 동수구배의 제곱에 비례하며, 대수층의 유효 공극률에 반비례하며, 대수층의 두께에 반비례함을 의미한다. 즉, 일반적으로 지형구배가 큰 산간지역은 강우에 의해 상승된 수위의 강하가 지형구배가 작은 하천 유역에 비하여 매우 빠른 속도로 이루어짐을 의미한다. 위의 비례상수, k 를 이용하여 식 (1), (2), (3) 및 (5)가 자유면 대수층에서의 1차원 지하수 흐름식인 Boussinesq 식으로 수렴함을 다음과 같은 유한차분근사를 통해 알 수 있다.

$$\frac{dh}{dt} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{K}{n} \frac{\Delta h}{\Delta x} \frac{h_1 - h_2}{L} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{K}{n} \frac{h_1 \Delta h - h_2 \Delta h}{\Delta x^2} = \frac{K}{n} \frac{d}{dx} \left(h \frac{dh}{dx} \right) \tag{8}$$

식 (2)에서 나타나는 관계를 이용한 식 (1)의 변환식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{dh}{dt} = kh + \frac{fp(t)}{n}, \quad h(0) = h_0 \tag{9}$$

식 (9)는 라플라스 변환에 의해 다음과 같은 형태로 전개된다.

$$h = h_0 \exp(kt) + \frac{f}{n} \int_0^t p(t-\tau) \exp(k\tau) d\tau \tag{10}$$

여기서 τ 는 적분변수를 의미한다. 실질적으로, $fp(t)$ 의 라플라스 도메인 상에서의 함수를 구하는 것은 불가능하며 보간법을 적용하여 수치적분을 실시한다 하여도 진동하는 형태의 함수이기 때문에 기존의 수학적 방법으로는 안정적인 해를 구하는 것이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 강우자료가 갖는 구간적 연속 상수함수 특성을 활용하여 강우가 상수로 주어지는 일개 구간 내에서의 해를 구하였으며 이는 다음의 식 (11)과 같다.

$$H = h_0 \exp(kt) + \frac{fp}{kn} [\exp(kt) - 1] + h_{min} \tag{11}$$

본 연구에서는 위의 식 (11)을 이용하여 간단한 FORTRAN 95 코드가 개발되었으며 활용되었다.

3. 결과 및 고찰

개발된 모델의 적용을 위하여 2003-4년 강원도 홍천지역 강우자료(기상청, 2003-4)가 이용되었으며 국가지하수 관측망의 2003-4년 홍천관측소의 수위관측자료(국가지하수정보센터, 2003-2004)를 활용하여 입력인자의 적정(calibration)을 시도하였다. 입력인자의 적정을 위해서는 비선형 파라미터 예측 코드인 PEST(Doherty, 2004)가 활용되었다.

본 연구를 통해 개발된 EGLPAR 및 파라미터 예측 프로그램 PEST를 활용하여 얻은 2003년 수위변동 최적 곡선 및 이에 이용된 강우자료는 Fig. 2와 같다. 최적 곡선과 관측치 사이의 RMS 오차는 0.17 m이며 관측 수위의 평균값은 119.81 m이고 표준편차는 0.46 m로 나타나 상당히 양호한 예측이 이루어졌음을 보인다. 모사결과의 적정을 통한 최적 곡선의 입력 파라미터 및 상대민감도는 Table 1과 같다. 예측된 값인 지하수위 감쇠상수는 -0.17 day^{-1} 로 상당히 높게 예측되었으며 이는 관측치에서 보이는 빠른 수위 감쇠를 반영하며 소유역이 포함하는 대수층의 수리확산계수(hydraulic diffusivity)가 상당히 크음을 의미한다. 또한 지하수 함양율 대 비산출율의 비는 10.54의 높은 것으로 나타났으며 이는 대수층이 포함하는 암반의 공극률 및 비산출율이 매우 낮은 값을 지시한다. 일반적으로 파쇄암반의 공극률은 1% 내외로 산정함을 미루어 볼 때 10.54의 함양율 대 비산출율의 비는 강우 중 지하수로 함양되는 물의 양이 대략 10% 내외의 값을 가짐을 의미한다. 기저수위인 119.48 m는 이 지역의 고도 및 인근 하천의 수위를 반영하는 것으로 보인다. Fig. 2에서 지하수위 관측치를 살펴보면 초기의 건기 동안 소량 강우에 의한 지하수 함양 효과는 상당히 미미하거나 없는 것

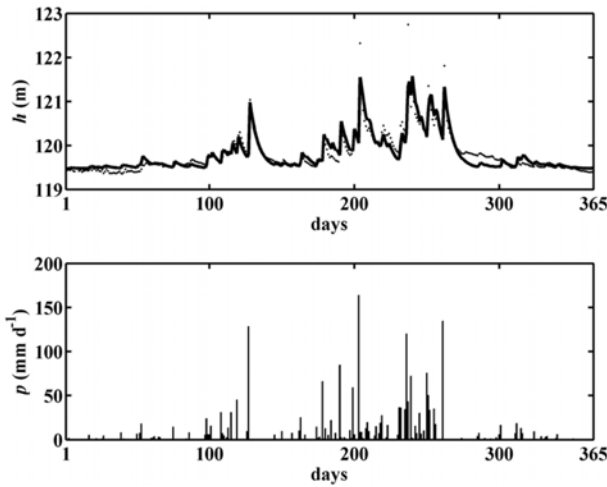


Fig. 2. Calibrated groundwater level fluctuations and observed fluctuation of year 2003, Hongcheon area (upper) and input precipitation rate (lower)

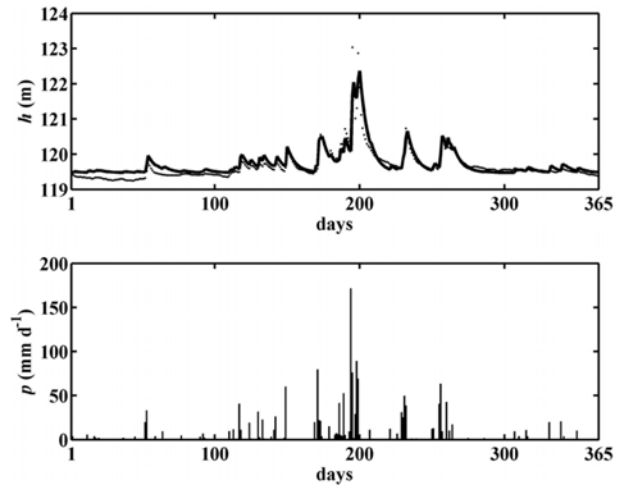


Fig. 3. Simulated groundwater level fluctuations and observed fluctuation of year 2004, Hongcheon area (upper) and input precipitation rate (lower)

Table 1. Fitting parameters for optimized curve and the relative sensitivities

Fitting Parameter	Value	Relative Sensitivity
k (day^{-1})	-0.17	0.026
fn (-)	10.54	0.029
h_{min} (m)	119.48	6.25

을 보여준다(약 50일 근방). 그러나 모사된 지하수위에서는 상수의 함양율을 적용하였으며 이로 인하여 일정한 영향이 있는 것으로 예측 되었다. 이는 불포화대의 침투수 포화능의 시간에 따른 변화를 고려하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 건기 동안 불포화대의 침투수 포화능은 최고치에 달하게 되며 이는 지하수 함양 보다는 증발산에 의해 소모된다. 또한 약 150일로부터 200일 근방까지의 잦은 강우는 토양의 침투수 포화능을 극대화 하기 때문에 그 이후의 강우 중 많은 부분은 지하수로 함양되나 본 모사에서 이용한 상수값의 함양율에 의해 이러한 추가적 지하수 함양이 고려되지 못하였으며 실제 지하수위 관측치 보다 낮게 예측하는 경향(약 200에서 270일 근방)을 보인다. 따라서 지하수 함양율은 강우 패턴에 의해 일정 부분 영향을 받을 수 있다. 이러한 효과를 상쇄하기 위해서는 불포화대의 특성 및 증발산 효과를 고려한 모델이 개발되어야 한다. 보다 손쉬운 접근 방법으로는 이동평균(moving average)을 지하수 함양률인 f 의 가중치로 이용하여 강우 패턴을 감지하는 방법을 고려할 수 있다. 그러나 이동평균을 가중치에 이용할 경우 지하수위 변동 예측을 지나치게 평활화 할 수 있으며 이동평균에 이용될 기간 역시 심한 계절적 영향을 받게 된다. 또 다른 방법

으로 고려될 수 있는 기법은 계절별로 fn 를 달리 얻는 것이나 본 연구에서는 시도되어지지 않았다. 상대 민감도의 경우 k 및 fn 는 유사한 값을 가지며 h_{min} 의 변화에 의한 효과가 가장 큰 것으로 나타났다.

모델 예측값과 실제 지하수위 변동 간의 차이는 다양한 요소에 의하여 나타날 수 있다. 모델을 통한 모사 시 상수로 가정된 k , h_{min} , fn 은 실제 대수층 상황 및 선행강우 패턴에 따라 변화할 수 있으며 그 변화는 다음과 같을 수 있다. 우선 관측 위치 인근에 하천이 위치할 경우 하천 수위 변동에 의해 대수층 수위변동은 증속될 수 있으며 인근 대수층의 동수구배 역시 하천 수위에 의해 변화할 수 있다. 식(7)에 의하면 비례상수 k 는 인근 하천의 수위가 상승하여 동수구배가 감소하였을 경우 감소할 수 있으며 수분 함량은 시간에 따라 변화 가능하므로 n 역시 시간에 따라 변화하는 값이다. 본 모델에서는 이러한 값들이 시간에 따라 변화하지 않음을 가정하였으며 이에 따른 오차가 발생할 수 있다.

2003년 강우 및 지하수위 변동자료를 이용하여 적정-모사하여 얻은 입력 파라미터와 2004년 강우자료(기상청, 2004)를 입력인자로 하여 모사한 결과는 Fig. 3과 같다. 연초의 모사된 지하수위의 값이 실측된 값보다 높게 예측이 된 이유는 연 별 강우량의 차이 및 하천의 수위 차에 기인하는 것으로 예상되며 이는 일정한 값의 오차를 갖는다. 약 150일 이후의 모사치는 관측치와 상당히 근접한 것을 보여준다(Fig. 3). 연평균 RMS 오차는 0.18 m이며 관측 수위의 평균값은 119.67 m이고 표준편차는 0.44 m인 것으로 나타나 모사에 의한 예측이 실측치에 상당히

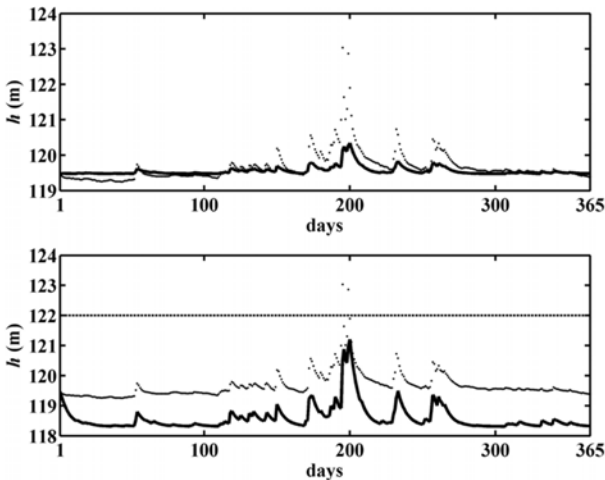


Fig. 4. Simulated groundwater level fluctuations of reduced recharge rate due to surface coverage change (upper) and Simulated groundwater level fluctuations of induced groundwater level reduction by applying groundwater pumping (lower)

가까운 것으로 나타났다.

Fig. 4는 개발된 모델을 실용적 문제에 적용한 단순모사이다. Fig. 4 상단의 케이스는 지표 피복 변화에 의한 함양율 변화를 fn 의 70% 감소를 통해 모사한 것이다. 단, 본 모사에서는 고려 대상인 소유역과 주변유역의 상호작용을 고려하지 않은 단순모형으로 만약 주변유역과의 상호작용을 고려했을 경우 k 값의 변화가 있을 것으로 미루어 짐작할 수 있으며 이는 수위의 변동폭 및 감쇠 경향 모두에 영향을 준다. 지표 피복의 변화로 인하여 70%의 함양율 감소가 있을 경우 최대 지하수 수위는 121.21 m로 감소하게 되며 지하수위 최대 변동폭 또한 0.87 m로 감소한다. Fig. 4 하단의 두 번째 케이스는 지하수 양수를 통한 지하수 수위 유도 강하를 모사한 것이며 이에 이용된 양수량은 단위면적 당 0.002 m day^{-1} 이며 모사기간 동안 일정하게 적용되었다. 이는 터널이나 공사현장의 수위조절 및 오염된 비포화대와 지하수면 접촉으로 인하여 발생할 수 있는 위해성 저감 등의 문제에 응용될 수 있을 것이다. 모사결과는 목표 수위가 122 m로 설정되었을 경우 단위면적 당 0.002 m day^{-1} 의 지하수 양수가 목표한 122 m 이하로 수위를 유지하는데 유효하다는 것을 보여준다. 지하수 양수를 통한 지하수위 유도 강하에 의하면 최대 지하수 수위는 118.31 m로 감소하게 되나 지하수위 변동폭은 양수에 의하여 변하지 않는 것으로 모사되었다. 그러나 만약 양수에 의한 k 값의 변화를 고려하면 최대 지하수위는 물론 지하수위 변동폭 역시 일정 부분 영향을 받을 것이다.

이러한 지하수 수위 변동에 대한 예측 모델은 지하수위

의 변동을 유발하는 외부요인으로 오직 강우에 의한 지하수 함양만을 고려하였으며 앞에서 언급하였던 지하수 이용, 증발산, 비포화대의 침투수 포획 등을 고려하지 않았는데 그 한계가 있으며 이러한 효과를 고려한 지하수 수위 변동 예측모델의 추가적인 개발이 요구된다.

4. 결 론

본 연구를 통해 강우자료를 이용하여 장기 지하수위 변동을 예측하는 준-해석학적 모델이 개발되었다.

개발된 모델은 2003년 홍천 지역 지하수위 변동 예측에 적용되었으며 자동-적정 코드인 PEST를 이용하여 최적화된 입력 파라미터를 도출하였다. 이를 위하여 지하수 변동 자료 및 강우 자료가 이용되었다. 이를 이용한 2004년 홍천 지역 지하수위 변동은 대체로 성공적이었으며 부분적인 예측 오류는 개발된 모델의, 강우 영향에 의해서만 지하수위의 변동이 나타난다는 기본가정에서 오는 오류로 판단된다. 또한 정확한 예측을 위해서는 상수의 k , h_{min} , 및 fn 를 적용하는 것은 적절치 못하며 하천 수위의 변화 및 강우 패턴을 고려한 시간종속의 함수가 이용되어야 할 것으로 예상된다. 이는 대수층 내 동수구배나 비포화대 내 함수비의 변화가 시간에 따른 강우의 빈도나 강도와 같은 선행강우 패턴에 종속되기 때문이다.

개발된 모델의 활용성을 보기 위하여 첫째, 지표피복 변화에 기인하는 함양율 변화 및 이에 의한 지하수위 변동 변화가 모사되었으며, 둘째, 지하수 양수를 통한 지하수위의 유도 강하가 모사되었다. 두 가지 모사 결과는 개발된 모델이 실용적인 문제 해결에 유용하게 이용될 수 있을 것임을 보여준다.

개발된 지하수 수위 변동에 대한 예측 모델은 지하수위의 변동을 유발하는 외부요인으로 오직 강우에 의한 지하수 함양만을 고려하였으며 보다 정확한 예측을 위해서는 지하수 이용, 증발산, 비포화대의 침투수 포획 등의 고려가 요구된다.

사 사

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국과학기술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-015-C00513)

참 고 문 헌

국가지하수정보센터, 2003, 홍천관측소 관측연보, <http://>

www.gims.go.kr/.

국가지하수정보센터, 2004, 홍천관측소 관측연보, <http://www.gims.go.kr/>.

기상청, 2003, 홍천 기상연보, <http://www.kma.go.kr/>.

기상청, 2004, 홍천 기상연보, <http://www.kma.go.kr/>.

최병수, 안중기, 1998, 지역단위 지하수 자연함양율 산정방법 연구, *지하수환경*, **5**(2), 57-65.

Bierkens, M.F.P., 1998, Modeling water table fluctuations by means of a stochastic differential equation, *Water Resources Research*, **34**(10), 2485-2499.

Doherty, J., 2002, PEST: Model Independent Parameter Estimation, Watermark Numerical Computing.

Knotters, M. and Bierkens, M.F.P., 2000, Physical basis of time series models for water table depths, *Water Resour. Res.*, **36**(1),

181-188.

Rai, S.N. and Singh, R.N., 1995, Two-dimensional modelling of water table fluctuation in response to localized transient recharge, *Journal of Hydrology*, **167**, 167-174.

Rai, S.N. and Manglik, A., 1999, Modelling of water table variation in response to timevarying recharge from multiple basins using the linearised Boussinesq equation, *Journal of Hydrology*, **220**, 141-148.

Rasmussen, W.C. and Andreasen, G.E., 1959, Hydrologic Budget of the Beaverdam Creek Basin, Maryland: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1472, 106 p.

Sophocleous, M., 1991, Combining the soil water balance and water level fluctuation method to estimate natural groundwater recharge: Practical aspects, *J. Hydrol.*, **124**, 229-241.