

ORIGINAL ARTICLE

제주도 한천유역의 함양 지체시간 산정

김남원 · 나한나* · 정일문

한국건설기술연구원 수자원연구실

Delay Time Estimation of Recharge in the Hancheon Watershed, Jeju Island

Nam-Won Kim, Hanna Na*, Il-Moon Chung

Water Resources Research Dept., Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

Abstract

In this work, the delay time for groundwater recharge was estimated by comparing simulated recharges by means of SWAT(Soil and Water Assessment Tool) model and WTF(Water Table Fluctuation) method. The delay time for groundwater recharge means that the time when the water from rainfall travelled through vadose zone just after getting out of soil zone bottom. As measuring this delay time is almost impossible, we used to compare the estimated values from modeling(SWAT) and analytic method(WTF). The test site is Hancheon watershed which has 8 groundwater measurement stations. The results show that the altitude has a linear relationship with the estimated delay time values. To validate these results, we conducted correlation analysis between transformed groundwater levels and observed ones. The results showed that computed groundwater levels have good correlation($R^2=0.97, 0.87$, respectively). The estimated delay time would be used for the groundwater behaviour characteristics in vadose zone. As recharge rates vary according to the height, the delay time is thought to be an import variable for the proper groundwater recharge estimation.

Key words : Recharge, Water table fluctuation method, Vadose zone, Delay time

1. 서론

지하수 흐름에 가장 큰 영향을 주는 변수인 지하수 함양은 물수지분석에 의한 방법, 지하수위 변동법, 염소이온농도에 의한 방법 등 국내외적으로 다양한 방법들이 개발되어 사용되고 있으나, 관측이 되지 않기 때문에 불확실성이 매우 높은 입력자료이다 (Healy, 2010). 지하수 함양은 매우 복잡한 수문학적 과정으로 강우의 빈도, 강도, 지속시간 뿐 아니라 온도, 습도, 풍

속과 지하수위 상부에 존재하는 토양 및 암반층의 특성과 깊이, 지표의 지형과 식생분포 및 토지이용과도 관련되므로 전체적인 물순환의 틀 속에서 검토되어야 한다(Kim 등, 2006; Memon, 1995). 또한 기존의 함양량 산정기법들은 대부분 함양량의 시간적 변화를 실질적으로 고려하지 못하는 제한점을 가진다. 함양량의 시간적 변화는 비포화대 흐름 모델을 통하여 모의될 수 있으나(Koo와 Kim, 2003) 많은 모델 입력 변수에 대한 정보가 필요하며 유역단위 규모에서 적용하

Received 10 December, 2013; Revised 7 March, 2014;

Accepted 1 April, 2014

*Corresponding author: Hanna Na, Water Resources Research Dept., Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea
Phone: +82-31-9100-594
E-mail: hydromama@kict.re.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기에 적합하지 않다(Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, 2012). Kim 등(2010)은 최근 SWAT 모형을 통해 유역단위에서 함양량의 시공간적 변화를 정량적으로 추정할 수 있는 방법을 제시한 바 있다. SWAT 모형의 경우 유역출구점에서 실측된 유출량 자료를 모델 보정에 이용하므로 유역단위의 물수지 성분의 시간적 변화를 효과적으로 모의할 수 있다. Park과 Parker(2008)에 의해 제안된 강우 시계열 자료에 따른 지하수위 변동 예측 모델은 비포화대의 수리특성이 지하수위 변동에 미치는 영향을 고려하지 못하는 한계점을 가지고 있다. 한편, 최근에는 Boulton(1954)과 Moench(1995)에 의해 제안된 비포화대 지연배수 모델과 Park과 Parker(2008)에 의해 개발된 지하수위 변동 모델을 결합하여 비포화대를 통과하는 강수의 지연-배수가 고려된 지하수위 변동 모델이 개발되기도 하였는데(Kim 등, 2011), 지하수 함양의 시간적 변화가 반영된 모델이라 할 수 있다(Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, 2013).

제주도는 내륙 지역에 비해 비포화대가 두꺼운 지역으로 알려져 있다. 제주도의 비포화대 두께는 한라산 정상부에서 해안가로 갈수록 얇아지는 특징을 나타내는데, 이러한 지형적 특징으로 인해 제주도의 지하수 함양은 고도별로 다르게 발생하게 된다. 비포화대가 얇은 해안지역의 경우 강수의 지하수 함양 과정이 짧고, 비포화대 특성의 영향을 적게 받아 즉각적인 함양을 보이지만, 중간간지역 및 산악지역의 경우 지하수 함양은 강수가 발생하였을 때 두꺼운 비포화대로 인해 시간지연(time delay)이 발생하게 된다. 지체시간은 지하수 함양과 같이 대수층에 가해진 수리적 스트레스가 해소되는데 걸리는 시간을 결정한다. 지체시간을 반영하지 않고 모의를 수행할 경우 고도가 높은 지역에 대해 산정된 함양량은 오류를 포함하고 있기 때문에 본 연구에서는 관측할 수 없는 지체시간을 지하수위 변동 해석모형을 통해 모의된 함양량과 SWAT 모형내 선형저수지법을 이용하여 계산된 함양량을 비교해가며 제주도 한천유역에 적용하여 산정된 지체시간의 신뢰성을 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1. 이론적 배경

2.1.1. SWAT 모형내 비포화대에서의 지체시간

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)모형(Arnold와 Fohrer, 2005)내에서 토양층 최하단부를 통과한 물이 얇은 대수층까지 도달하는 지하수 함양량은 시간적 지체, 감쇠를 고려하여 Eq. (1)과 같이 지수형 감쇠가중함수(exponential decay weighting function)로 표현된 전일 함양량과 금일 침투량의 가중합으로 계산된다.

$$w_{rchrg,i} = (1 - \exp[-1/\delta_{gw}]) \cdot w_{seep} + \exp[-1/\delta_{gw}] \cdot w_{rchrg,i-1} \quad (1)$$

여기서, $w_{rchrg,i}$ 는 i 일의 대수층 함양량(L), δ_{gw} 는 토양층 바닥을 통과한 침투량이 지하수면에 도달할 때까지의 지체를 모사하기 위한 지체시간(days), w_{seep} 는 i 일에 토양층의 바닥으로 빠져나가는 수량(L), $w_{rchrg,i-1}$ 는 $i-1$ 일의 대수층 함양량(L)이다.

Eq. (1)은 토양대 아래 비포화대를 하나의 선형저수지로 간주하여 유도된 식이다.

2.1.2. 지하수위 변동 해석모형을 이용한 함양량 계산

De Zeeuw and Hellinga(1958)는 Hooghoudt (1940)의 정류상태 지하수의 수두손실량을 구하는 식으로부터 부정류 상태에서의 지하수 변동을 통해 함양량을 산정하는 방법을 제안하였다(Eq. 2).

$$q = \frac{8Kdh}{L^2} \quad (2)$$

여기서, q 는 유출량, Kd 는 수리전도도, L 은 배수로까지의 거리, h 는 지하수위다.

한편 부정류 상태에서 지하수 함양량 및 대수층으로 유입되는 지하수 유입량(R_c)과 유출량(q)의 변화에 따라 지하수위의 변동이 발생한다(Eq. 3).

$$\frac{dh}{dt} = \frac{R_c - q}{0.8\mu} \quad (3)$$

여기서, μ 는 비산출률을 나타낸다. 유출량은 지하수위의 변화율에 비례관계라고 가정하여 Eq. (3)을 Eq. (2)에 대입하면 Eq. (4)와 같이 부정류상태에서의 지하수 함양과 배출에 관한 식으로 표현된다.

$$\frac{dq}{dt} = 10 \frac{Kd}{\mu L^2} (R_c - q) = \alpha (R_c - q) \quad (4)$$

여기서, α 는 반응계수(reaction factor)이고, 단위시간동안의 함양량이 일정하다고 가정하여 적분한 후 Eq. (4)를 대입, h 에 대해 정리하면 Eq. (5)와 같다.

$$h_i = h_{i-1} \exp[-\alpha \Delta t] + \frac{R_{\Delta t} (1 - \exp[-\alpha \Delta t])}{800 \mu \alpha} \quad (5)$$

h_i 는 i 일에서의 지하수위(L), h_{i-1} 는 $i-1$ 에서의 지하수위(L), $R_{\Delta t}$ 는 단위시간별 함양량(L)이다. 연속적인 지하수위 관측자료를 획득한다면 h_i , h_{i-1} 에서의 지하수위 값을 이용하여 매개변수인 반응계수와 비산출률을 추정함으로써 부정류상태에서의 단위시간별 함양량($R_{\Delta t}$)을 산정할 수 있다.

2.2. 대상유역

연구대상 지역은 한천을 중심으로 표준유역 경계까지 확장한 구간이다. 한천은 한라산 해발 1,950 m

고지에서 발원하여 용담동 해안으로 유입되는 하천으로 유로연장 19.8 km이고 유역면적은 약 86.2 km²이며, 유역의 형상은 지류가 거의 없는 수지상에 가까운 하천형태를 보이고 있다(Jeju special self-governing province, 2001). SWAT 모형을 적용하기 위하여 하천도, 유역도, 환경부에서 제공하는 중분류 토지이용도(2007), 수치고도모형(DEM), 농업진흥청 국립농업과학원의 1/25,000 정밀토양도(2007) 등의 GIS자료를 구축하였다. 강수자료는 다중선형회귀분석을 통해 미세측 유역의 자료를 생성하였고, PRISM기법을 이용하여 공간분포된 자료(Kim 등, 2012)를 활용하였으며, 기상(온도, 습도, 풍속, 일사량)자료는 제주 기상대의 관측값을 이용하여 모형에 적용하였다(Fig. 1).

한천은 제주도내에 분포하고 있는 간헐하천 중 하나로 유출량 검증을 위해 한계유출 모의 기법(Chung 등, 2011)을 통해 보정을 수행하였고, 지하수위 관측 자료를 이용하여 공간분포시킨 등수위도와의 적합과정을 통해 지하수위 보정도 수행하였다. 이는 유역전체의 통합 물수지 측면에서 강수, 유출 및 지하수위까지 검증되어 모형의 타당성을 증명한 것으로 판단된다(Kim 등, 2013a).

본 연구지역인 한천은 제주특별자치도 수자원본부에서 관리하고 있는 124개의 지하수위 관측정 중 13개 지점(용담1, 용담2, 공항, 연동, 오동1, 오동2, 오동3, 오동4, 오동5, 도남2, 이도2, 간드락, 오라)이 위치하고 있다(Fig. 2). 그 중 최소 2년 이상의 관측 지하수

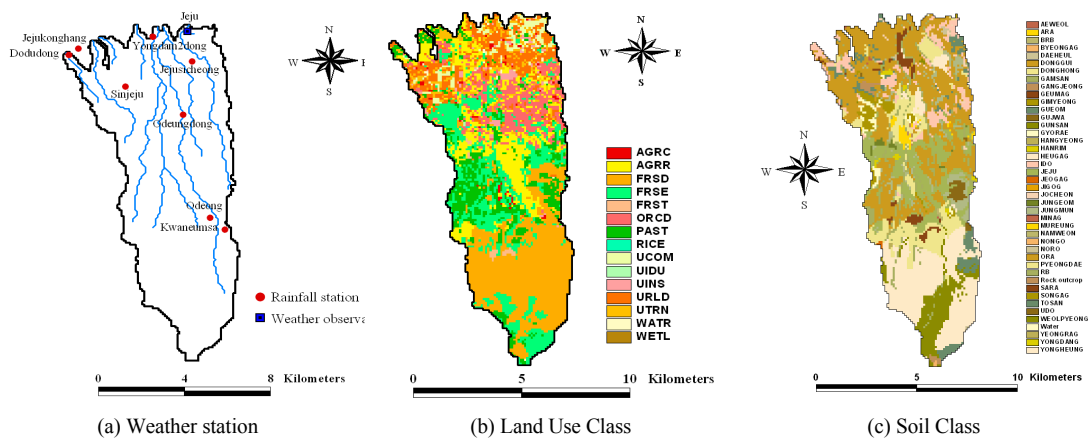


Fig. 1. Maps of (a)Weather station, (b)land use, and (c)soil classes of the study area.

위를 보유하고 있는 8개 지점의 자료를 중심으로 분석을 수행하였다.

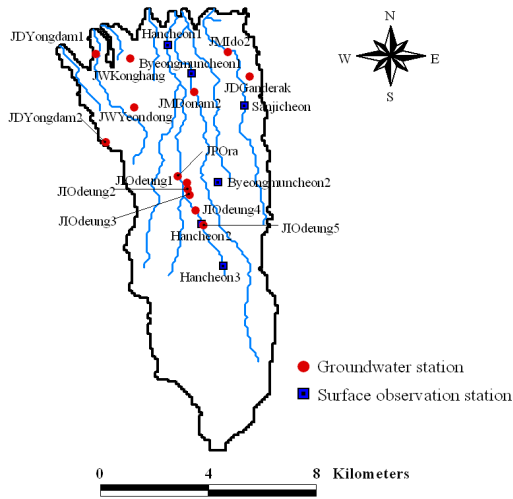


Fig. 2. Groundwater station in Hancheon watershed.

3. 결과 및 고찰

3.1. 한천유역의 지체시간 산정

토양층의 바닥을 통과한 침투량이 비포화대를 거치면서 지체·감쇠된 후 얇은 대수층으로의 함양이 이루어진다. 토양층 내 물이 존재하는 시간과 얇은 대수층으로 흘러가는 시간 사이의 지체시간(delay time; δ_{gw})은 지하수면의 깊이와 비포화대의 두께 및 지질구조의 수리특성에 따라 좌우된다. 이러한 비포화대 내에서의 지체 시간을 설명하기 위해 SWAT 모형에서는 Venetis(1969)에 의해 제안되고, Sangrey 등(1984)에 의해 사용된 토양대 아래 비포화대를 하나의 선형저수지로 간주하여 지수감소 가중함수(exponential decay weighting function)로 표현된 함양량과 침투량 간의 관계식으로 나타내고 있다(Eq. (1), Kim 등, 2010)). 본 연구에서는 Kim 등(2013b, 2013c)이 제안한 지하수위 변동 해석모형을 통해 모의된 일함양량을 관측치로 가정하고, Eq. (1)을 통해 계산된 함양량과의 최적화 기법을 통해 지체시간을 산정하였다.

Kim 등(2013b, 2013c)이 제안한 지하수위 변동 해석모형은 지하수위 관측지점에서의 지하수위 변동을

좌우하는 반응계수(α , reaction factor)와 비산출률(μ , specific yield)을 추정하여 부정류 상태에서의 함양량을 계산하는 모델이다. 두 개의 매개변수는 De Zeeuw와 Hellinga(1958)이 제안하는 지하수위 변동식(Eq. 5)를 변형하여 대수층에서 지하수의 배출 형태를 설명하는 반응계수(α)와 지하수의 함양특성을 나타내는 비산출률(μ)의 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\alpha = \ln\left(\frac{h_{i-1}}{h_i}\right) \quad (6)$$

$$\mu = \frac{R_{\Delta t}(1 - \exp[-\alpha \Delta t])}{800\alpha(h_i - h_{i-1}\exp[-\alpha \Delta t])} \quad (7)$$

매개변수를 산정한 후 함양량을 계산하기 위해 지하수위 변동식을 정리하면 다음과 같다.

$$R_{\Delta t} = \frac{(h_i - h_{i-1}\exp[-\alpha \Delta t]) \cdot 800\mu\alpha}{1 - \exp[-\alpha \Delta t]} \quad (8)$$

연속적인 지하수위 관측자료를 획득한다면 h_i , h_{i-1} 에서의 지하수위 값을 이용하여 매개변수인 반응계수와 비산출률을 추정함으로써 부정류상태에서의 단위시간별 함양량($R_{\Delta t}$)을 산정할 수 있다.

본 연구에서는 또한 지체시간과 고도와의 관계를 규명하고자 한다. 지체시간에 영향을 미치는 요인으로 언급한 비포화대 두께는 일반적으로 지하수위 관측소 표고와 그 관측소 평균 지하수위와의 차를 이용하여 산정하는데 이는 정확한 관측값으로 정의하기 어렵기 때문에 비포화대 두께 대신 관측소의 표고를 고려하기로 했다.

한천유역 내 8개의 지하수위 관측지점의 지체시간은 모형의 초기 구동 시 기본적으로 설정되어 있는 초기값(initial value)을 기준으로 지하수위 변동 해석모형을 이용하여 모의된 함양량과 Eq. (1)에 의해 계산된 함양량의 비교를 통해 시행착오법을 이용하여 최적의 지체시간을 산정하였다(Table 1). Fig. 3은 관측지점에서의 고도와 지체시간과의 관계를 도시한 것으로 고도가 높아질수록 지체시간이 선형적으로 증가하

는 것으로 나타났다. 이는 고도와 지체시간과의 상관성이 있음을 시사하고 있다. 그러나 한천유역에서 오라 관측지점이 고도 232.8 m로 가장 높게 위치하고 있는 관측지점이다. 이 이상의 고도에서는 지하수위가 관측되고 있지 않기 때문에 신뢰도가 떨어질 수밖에 없다. 때문에 고도가 높은 관측소의 관측자료가 필요하다. 산정된 지체시간을 입력하여 지하수위 변동 해석모형을 이용하여 모의된 함양량과 Eq. (1)에 의해 계산된 함양량을 그래프로 도시한 것으로 실선은 모의 함양량, 점선은 계산 함양량을 나타낸 것이다.(Fig. 4). 도남2, 간드락 관측지점에서의 모형의 타당성을 정량적으로 평가하기 위하여 결정계수(coefficient of determination, R^2)를 산정한 결과 0.87, 0.69로 계산되어 모의치가 관측치에 높은 적합성을 보이는 것으로 분석되었다.

Table 1. Estimated delay time at 8 groundwater stations in Hancheon watershed

Station	Elevation(H)	delay time(day)
YD1	38.2	10
GH	47.2	25
ID2	57.6	50
DN2	86.0	30
YD	105.3	70
GDR	111.8	80
YD2	161.9	70
OR	232.8	90

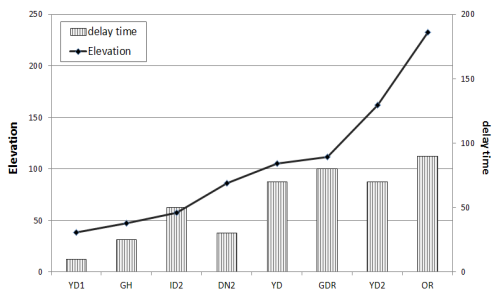


Fig. 3. Relationship between elevation of groundwater stations and delay time.

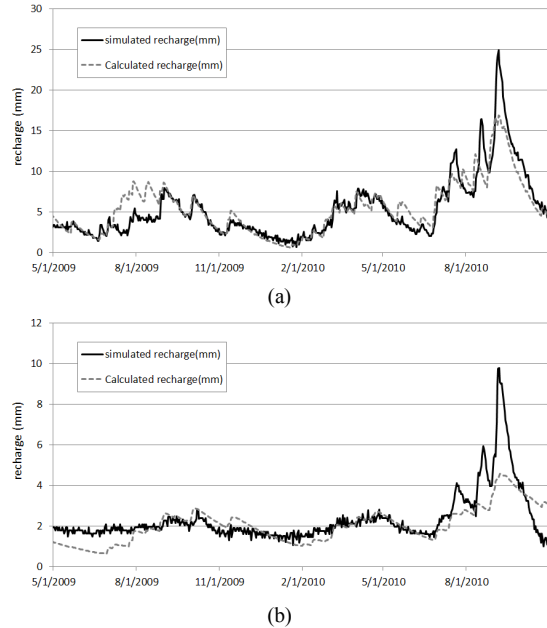


Fig. 4. Comparison of simulated and computed recharge ((a)DN2, (b)GDR).

한천유역에서 산정된 지체시간과 고도와는 선형의 상관성을 갖고 있는 것으로 나타났으며(Fig. 5) 이를 SWAT모형에 적용하기 위하여 고도와 지체시간간의 상관관계식을 유도하였다(Eq. 9). 이는 고도에 따라 강우에서 비포화대를 거쳐 지하수대로 함양되기 까지 발생하는 지연효과를 모형에 반영하기 위한 방법이다.

$$\delta_{gw} = 41.5 \ln(H) - 133.4 \quad (9)$$

Table 2에서 나타낸바와 같이 각 관측지점에서 산정된 지체시간과 상관관계식을 통해 계산된 지체시간의 상대오차를 분석하였다(Fig. 6). 이 상대오차가 크게 발생한다면 모형에 적용하였을 때 신뢰성이 부족한 결과를 도출하게 될 것이다. 상대오차가 비교적 크게 산정된 YD1과 DN2 중 DN2 관측지점에서 상관관계식을 통해 계산된 지체시간을 예측값으로, 함양량간의 비교를 통해 산정된 지체시간을 실제값으로 가정하여 실제값-모의값, 예측값-모의값을 그래프로 도시하였으며(Fig. 7), 상관식의 유효성을 평가하기 위

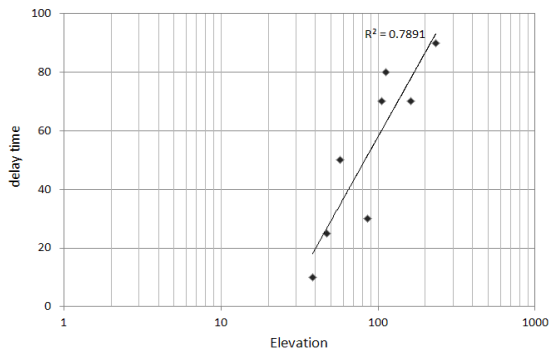


Fig. 5. Relationship between elevation of groundwater stations and delay time.

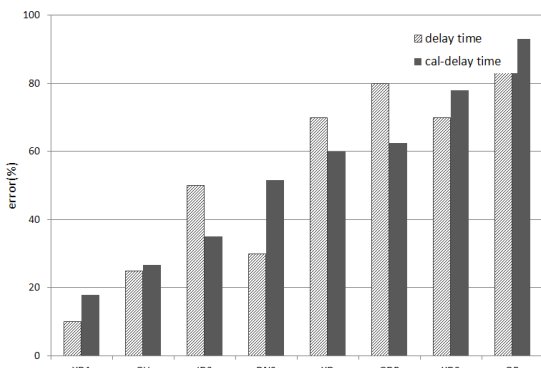


Fig. 6. Comparison of errors between estimated and predicted delay times.

Table 2. Relationship between estimated delay time and predicted delay time

Station	Elevation	delay time	cal-delay time	error(%)
YD1	38.2	10	17.9	179
GH	47.2	25	26.7	107
ID2	57.6	50	35.1	70
DN2	86.0	30	51.7	172
YD	105.3	70	60.1	86
GDR	111.8	80	62.6	78
YD2	161.9	70	77.9	11
OR	232.8	90	93.1	103

해서 결정계수를 산정하였다. 결정계수는 0.81로 동일하게 산정되었는데 이는 DN2 지점에서의 지체시간은 실제값인 30을 넣었을 때와 예측값 51.7를 넣었을 때의 함양량의 차이가 크게 발생하지 않는 것을 알 수 있으며 이는 지체시간 민감성이 어느 범위내에서는 크지 않다는 사실을 시사하고 있다. 이는 향후 지체시간 민감도 분석을 통하여 좀 더 구체적으로 다루어야 할 것이다.

3.2. 지체시간의 검증

Eq. (12)를 통해 지체시간을 입력하여 계산된 함양량과 지하수위 변동 해석모델을 통해 산정된 매개변수인 α, μ 를 알고 있으므로 지하수위로 환산할 수 있다. 본 연구에서는 환산된 지하수위와 관측 지하수위

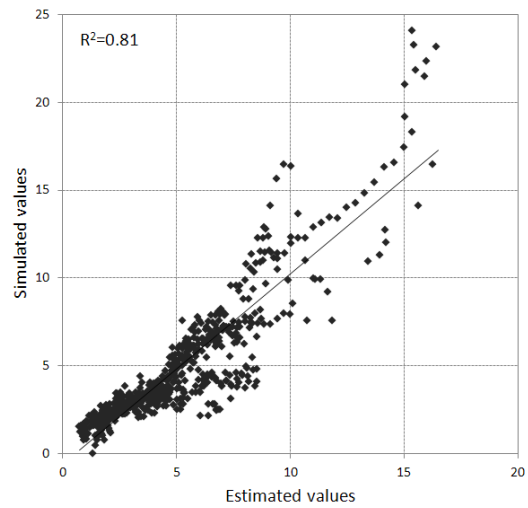
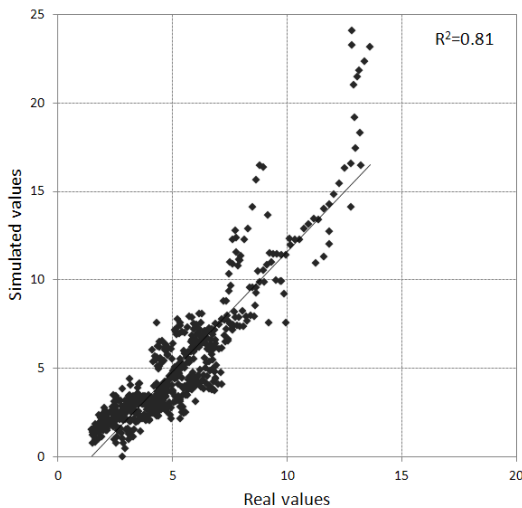


Fig. 7. Comparison of real values-simulated values, estimated values-simulated values at DN2.

를 비교함으로써 계산된 지체시간이 일함양량을 계산하는데 잘 적용되었는지에 대한 적합성을 역으로 검증하고자 한다. 모의함양과 계산함양을 비교했던 관측 지점인 DN2와 GDR에 대해서 그래프를 나타낸 것으로 상관분석 결과 각각 0.97, 0.87로 지체시간의 예측 정확성이 비교적 높은 상관관계를 갖는 것으로 분석되었다(Fig. 8). 따라서 본 연구에서 제안한 지하수위의 변동 해석모델로 모의된 함양량과 SWAT 모형내 선형저수지법을 이용하여 계산한 함양량의 비교로부터 지하수 함양 지체시간을 산정하는 방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 지표면에 떨어진 강수량 중 일부가

지표로 유출되고, 일부가 지하로 침투하여 비포화대를 침투한 양 중 포화지대인 지하수위에 직접 기여하기까지의 함양 과정 중 비포화대에서의 함양지체시간에 대하여 분석을 실시하였다. 이를 위하여 먼저 선행 연구되었던 지하수위 변동 해석모델을 통하여 모의된 함양량과 순간단위도를 이용한 함양량 계산식에 의해 산정된 함양량의 비교를 통해 최적의 지체시간을 구하였다. 한천유역에서 산정된 지체시간과 고도와는 선형의 상관성을 갖고 있으며 이를 SWAT모형에 적용하기 위하여 상관관계식을 유도하였다. 또한 지체시간의 실제값과 예측값에 대한 상대오차를 계산한 결과 일정 범위내에서의 지체시간 차이는 함양량 산정에 민감하게 반응하지 않는 것으로 나타났다. 그리고 지체시간 검증을 하기 위해 함양량을 역으로 지하수위로 환산하였다. 환산된 지하수위와 관측 지하수

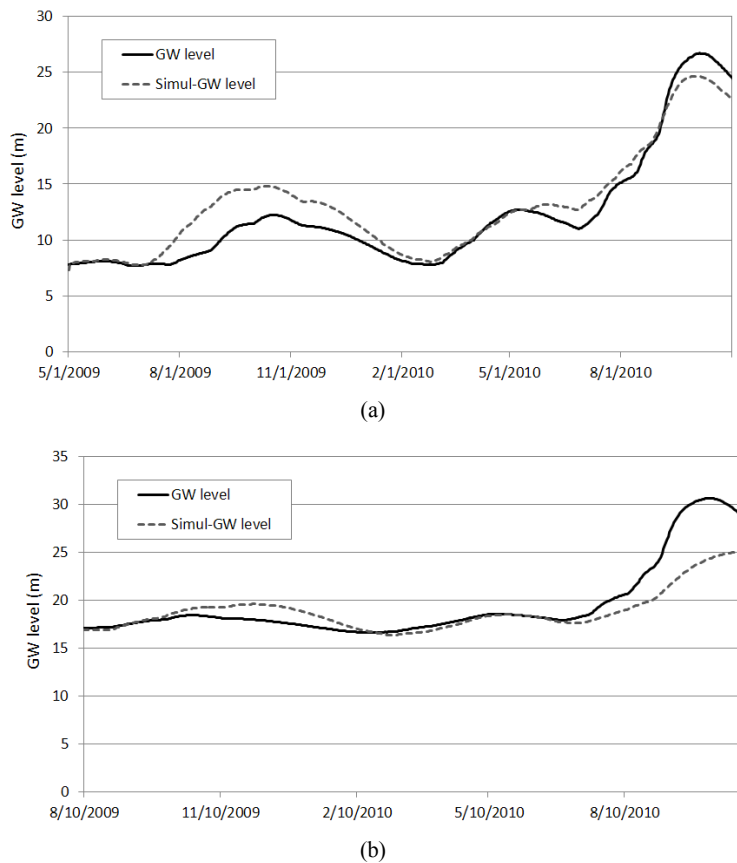


Fig. 8. Comparison of observed GW level and simulated GW level((a)DN2, (b)GDR).

위와의 비교를 통하여 산정된 지체시간의 신뢰성 여부를 평가할 수 있었다. 이로써 지체시간은 고도에 따른 함양량의 산정에 있어 중요하게 고려해야 하는 요소임을 알 수 있다.

하지만 본 연구에서 사용된 관측지점은 한천유역에 국한된 것이고 그 중에서도 지하수위 관측값에 오류를 동반하고 있는 관측점은 제외한 8개 지점의 관측값으로만 분석한 것이기 때문에 고도와 지체시간의 상관성이 제주 전체 유역에 적용 가능한지는 불확실하다. 또한 0.79의 높은 상관성을 갖고 있으나 같은 지체시간이더라도 고도의 차이가 발생하고 있기 때문에 지체시간에 영향을 주는 또 다른 인자인 제주도의 지질 및 지형 특성, 수리지질 특성등을 고려하여 좀 더 다양한 관점에서의 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 그리고 유도한 상관식은 향후 지하수 함양 지체시간의 공간분포를 결정함에 있어 참고값으로 반영될 수 있을 것이며, 제주 전역으로 자료를 확대하였을 때 매개변수 지역화가 가능할 것으로 판단된다. 또한 분포형 수문모형과 연계시킬 경우 통합모델링에 적절하게 반영될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업 “제주 수자원 연구단(10지역기술혁신B02)”의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Arnold, J. G., Fohrer, N., 2005, SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrol. Process.* 19(3), 563-572.
- Boulton, N. S., 1954, Unsteady radial flow to a pumped well allowing for delayed yield from storage, *Intern. Assoc. Sci. Hydrol., Rome. Publ.*, 37, 472-477.
- Chung, I. M., Lee, J., Kim, J. T., Na, H., Kim, N. W., 2011, Development of threshold runoff simulation method for runoff analysis of Jeju Island, *J. Environ. Sci.*, 20(10), 1347-1355.
- De Zeeuw, J., Hellinga, W. F., 1958, "Precipitation and drain", *Agricultural Magazine*, Vol. 70, pp. 405-421 (in Dutch).
- Healy, R., 2010, *Estimating Groundwater Recharge*. Cambridge University Press, 256p.
- Hooghoudt, S. B., 1940, "General consideration of the problem of field drainage by parallel drains, ditches, watercourses, and channels", *Reports of Agricultural Research*, Vol. 46 No. 8, pp. 515-707 (in Dutch).
- Jeju special self-governing province, 2001, Report on basic plan for river maintenance, 17-19.
- Kim, N. W., Um, M. J., Chung, I. M., Heo, J. H., 2012, Estimating the total precipitation amount with simulated precipitation for ungauged stations in Jeju island, *J. Korea Water Resour. Assoc.* 45(9), 875-885.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Lee, J. W., Kim, C. G., Kim, J. T., Lee, J. E., Shin, A. H., Na, H. N., 2010, Main structure of Korean watershed hydrologic model SWAT-K, *SWRRC*, pp. 22-23.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S., Lee, J. W., Lee, B. J., 2006, The estimation of groundwater recharge with spatial-temporal variability at the Musimcheon catchment, *Journal of Korean society of soil and groundwater environment*, 11(5), pp. 9-19.
- Kim, S. H., Park, E. G., Kim, Y. S., Kim, N. J., 2011, A modification of water table fluctuation model considering delayed drainage effect of unsaturated zone, *Journal of Korean society of soil and groundwater environment*, 16(3), pp.17-27.
- Kim, N. W., Na, H. N., Chung, I. M., 2013a, Simulation of groundwater variation characteristics of Hancheon watershed in Jeju Island using integrated hydrologic modeling, *J. Environ. Sci.*, 22(5), 515-522.
- Kim, N. W., Kim, Y. J., Chung, I. M., 2013b, Development of analyzing model of groundwater table fluctuation (I) : theory of model, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 33(6), 2277-2284.
- Kim, N. W., Kim, Y. J., Chung, I. M., 2013c, Development of analyzing model of groundwater table fluctuation (II) : characteristics of recharge, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 33(6), 2285-2291.
- Koo, M. H., Kim, Y. J., 2003, Use of an infiltration model for analyzing temporal variation of precipitation recharge in the climatological environment of Korea, *Journal of the Geological society of Korea*, 39(2), pp. 249-261.

- Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, 2012, Development of the integrated surface-groundwater hydrologic analysis technique in Jeju island report, pp.158-185.
- Moench, A. F., 1995, Combining the Neuman and Boulton models for flow to a well in an unconfined aquifer, *Ground Water*, 33(3), 378-384.
- Memon, B. A., 1995, Quantitative analysis of springs, *Environmental Geology* 26, pp. 111-120.
- Park, E. G., Parker, J. C., 2008, A simple model for water table fluctuations in response to precipitation, *Journal of Hydrology*, 356, pp. 344-349.
- Sangrey, D. A., Harrop-Williams, K.O., Klaiber, J. A., 1984, Predicting groundwater response to precipitation, *ASCE J. Geotech. Eng.*, 110(7), pp. 957-975.
- Venetis, C., 1969, A study of the recession of unconfined aquifers. *Bul, Int. Assoc. Sci. Hydrol*, 14(4), pp. 119-125.