

## 제주 대표유역에 대한 함양지체시간의 경험식 Empirical Formula of Delay Time for Groundwater Recharge in the Representative Watersheds, Jeju Island

김 남 원\* / 나 한 나\*\* / 정 일 문\*\*\* / 김 윤 정\*\*\*\*  
Kim, Nam Won / Na, Hanna / Chung, Il-Moon / Kim, Youn Jung

### Abstract

Delay time for groundwater recharge means the travel time from the bottom of soil layer to groundwater through vadose zone after infiltration from rainfall. As it is difficult to measure delay time, we suggested an empirical formula which is derived by using linear regression between altitude and delay time. For the regression analysis, 4 major gauging watersheds were chosen (Hancheon, Kangjeongcheon, Oedocheon, Cheonmicheon) with 18 measured groundwater level stations. To verify this empirical formula, derived equation from linear reservoir theory was applied to compute delay time and to compare estimated amounts of groundwater recharge using both methods. The result showed good agreement. Furthermore, if derived empirical formula would be linked with SWAT model, the spatial time delay effect in the watershed could be reflected properly.

**keywords** : delay time for recharge, altitude, SWAT model, regression

### 요 지

함양 지체시간은 강우로부터 지표면을 지나 지하수면으로 도달하는 침투수의 통로 역할을 하는 비포화대를 통과할 때 발생하는 시간지연을 의미한다. 함양 지체시간을 직접적으로 측정하는 것은 불가능하기 때문에 본 연구는 고도와외의 단순회귀분석을 이용하여 지체시간에 대한 경험식을 유도하였다. 이를 위하여 제주도 내에 4개의 유역(한천, 강정천, 외도천, 천미천)을 선정하여 총 18개의 관측지점에 대한 지체시간을 산정하였다. 또한 제안된 회귀식을 검증하기 위하여 선형 저수지 이론으로부터 유도된 방정식을 적용하여 구한 지체시간과 본 연구에서 유도된 경험식으로부터 산정된 지체시간을 이용하여 각각 산정한 지하수 함양량을 비교한 결과 상관성이 높은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 유도한 경험식을 이용하여 SWAT모형의 지체시간 매개변수에 적용할 경우 지하수 함양의 공간적 지연효과를 잘 반영할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 함양지체시간, 고도, SWAT모형, 회귀분석

\* 한국건설기술연구원 선임연구위원 (e-mail: nwkim@kict.re.kr)

Senior Research Fellow, Korea Institute of Civil engineering and building Technology

\*\* 한국건설기술연구원 연구원 (e-mail: nhn99@nate.com)

Researcher, Korea Institute of Civil engineering and building Technology

\*\*\* 교신저자, 한국건설기술연구원 연구위원 (e-mail: imchungkict@re.kr, Tel: 82-31-910-0334)

Corresponding Author, Research Fellow, Korea Institute of Civil engineering and building Technology

\*\*\*\* 한국건설기술연구원 연구원 (e-mail: yjkim80@kict.re.kr)

Researcher, Korea Institute of Civil engineering and building Technology

## 1. 서 론

강수가 지하로 들어가는 양인 지하수 침투량과 지하수 위까지 도달하는 지하수 함양량은 지형, 강수량, 강수강도, 강수기간, 식생, 토양의 수리특성, 토양의 불균질성, 지하수면의 심도 등 다양한 요인에 의하여 달라지므로 현실적으로 정량적인 지하수 함양량을 파악하는 것은 어려운 일이다(Koo and Lee, 2002). 하지만 과학적인 복잡성 및 모호성에도 불구하고 국가 지하수자원의 지속 가능한 개발 및 효율적 관리를 위하여 다양한 방법론들이 개발되어 사용되고 있다(Cho and Park, 2008). 기존의 함양량 산정기법들은 함양량의 시공간적 변동성을 고려하지 못하는 제한점을 가진다. Koo and Kim (2003)은 비포화대에서의 시간적 변화를 모사하는 침투 모델을 개발하여 지하수 함양을 모의하였지만, 제한된 수의 입력자료가 요구되고 식생에 의한 증산이 거의 발생하지 않는 나지 지역의 평가에 국한되는 단점이 있다. 또한 Hendrickx et al. (1991)은 함양이 발생하는데 걸리는 시간과 연간 최대 함양량을 평가하기 위한 부정류 비포화 흐름 모델을 이용하였고, Wu et al. (1996)은 비포화 흐름 모델을 이용하여 강수의 유형과 연간 강수의 분포가 함양에 미치는 영향을 분석하였으며, 다양한 지하수면 심도에서의 강수량과 함양량의 관계식을 제시하였다. Park and Parker (2008)가 제시한 지하수위 변동 예측 모델은 비포화대의 수리특성이 지하수위 변동에 미치는 영향을 고려하지 못하는 한계점을 가지고 있다. 이렇듯 비포화대란 강우로 인하여 지표로부터 유입되어 지하수면으로 도달하는 침투수의 통로 역할을 하며 그 두께와 비포화 수리특성은 침투수가 지하수면에 도달하여 함양되기까지의 흐름 특성 및 도달되는 양을 결정하기 때문에 함양량 산정시 고려되어야 하는 부분이다. 이에 Kim et al. (2011)은 Boulton (1954)과 Moench (1995)가 제안한 비포화대 지연배수 모델과 Park and Parker (2008)가 개발한 지하수위 변동 모델을 통합하여 지하로 침투된 이후 비포화대에서의 플러그 및 확산의 두가지 형태로 지하수면에 도달하여 함양되는 과정을 고려한 모델을 제안하였다. 또한 고도에 따른 함양량의 차이를 나타내기 위하여 Song (2011)과 Shin (2012)은 컨벌루션 기법을 이용하여 비포화대의 두께에 따른 시간지연과 분산과정을 부정류모사를 통해 모의하였는데, 강우가 비포화대를 지나 함양되는 과정 속에서 발생하는 시간지연에 대한 변수를 고려하였다. 연구지역인 제주도는 내륙 지역에 비해 비포화대의 두께가 상당히 두꺼운 것으로 알려져 있다. 제주도 내의 지하수위 관측망 자료를 이용

하여 비포화대 두께를 분석한 결과 해안가에서 중산간 지역으로 갈수록 비포화대 두께가 두꺼워 지는 것으로 나타났다(Song, 2011). 제주도의 이러한 지형적 특징으로 인해 발생하는 함양량의 차이는 고도에 따라 다르게 나타난다. 즉, 해안지역은 비포화대가 얇아 강수의 지하수 함양과정이 짧고, 중산간지역 및 산악지역은 두꺼운 비포화대로 인해 함양되는 과정에서 시간지연(time delay)이 발생하게 된다. 이 시간지연은 지하수 함양과 같이 대수층에 가해지는 수리적 스트레스가 해소되는데 걸리는 시간을 결정지으며, 시간지연을 모의에 반영하지 않을 경우 고도에 따른 함양량의 차이를 표현하기에 제한적이기 때문에 시간지연에 대한 변수를 추정할 수 있는 방안을 제시해야 한다.

본 연구에서는 관측지점에서의 관측값으로부터 계산된 지체시간을 미계측 유역에도 적용하기 위하여 일반적인 관계식을 산정하였다. Kim et al. (2014)은 제주도 한천유역에 지체시간과 고도와의 관계를 통하여 경험식을 유도한 바 있다. 본 연구에서는 제주도 대표 계측 유역에 대하여 고도에 따른 함양지체시간의 경험식을 유도하였다. 또한 유도된 경험식이 갖고 있는 한계점과 오차에 대한 분석을 가시화하여 효용성을 고찰해 보았다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 강우로부터 지하수 함양까지의 과정

강수강도가 지표면의 침투능력보다 크면 지표면 유출이 발생하고, 그렇지 않으면 진량 지표면을 뚫고 토양층으로 침투(infiltration)한다. 침투과정을 거친 물은 토양층에서 다시 옆으로 흐르기도 하는데, 이를 측방흐름이라 하고, 아래로 흐르는 것을 침투(percolation)라고 한다. 토양층의 아래로 통과한 물은 소위 통기대(vadose zone)이라 불리는 부분을 통과하여 지하수면까지 도달하는데 이를 지하수 함양이라 한다. 이와 같은 강수로부터의 지하수 함양 또는 하천, 호소 등 다른 경로를 통한 유입, 유출로 인하여 지하수위는 변동하게 된다. Fig. 1은 지하수 함양의 과정을 개념화하여 나타낸 것으로 토양층과 통기대를 지칭하는 비포화대, 지하수를 주로 나타내는 포화대로 나누어서 나타낸 것이다.

여기서 토양층(root zone, Fig. 1(a)) 하단을 침투한 물이 비포화대 (Fig. 1(b))를 거쳐서 지하수면(Fig. 1(c)의 상단)에 도달하는데 걸리는 시간을 지체시간이라고 하며, 대체로 이 지체시간은 비포화대 및 포화대를 형성하고 있는 지질구조의 수리학적 성질과 지하수면의 깊이 등에 영향을 받는다.

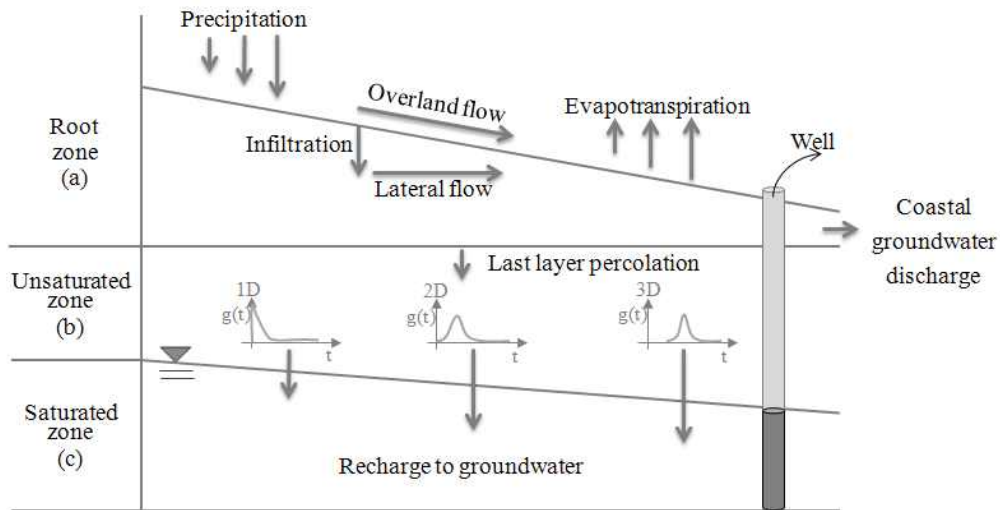


Fig. 1. Conceptualization of Groundwater Recharge (Modified from Kim et al., 2013a)

토양층 하단에서 지하수위에 까지 물이 이동하는데 걸리는 시간에 대한 해석은 지질 특성 및 깊이 등의 함수로 이루어진 물리적인 형태의 거동이 필요하나, 그 특성치들을 이용한 물리적인 해석이 쉽지 않기 때문에 주로 통계적으로, 또는 경험적인 관계로 발전하였다.

침투된 물의 지체시간에 대한 함수개발은 Venetis (1969) 의해 시도되었으며, Sangrey et al. (1984)에 의해 강우/지하수반응모형을 개발하는데 이용되었고, 이의 범용화는 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)에 준분포형 유역모형에 장착되면서 이루어졌다(Arnold et al., 1998). 이 관계는 지하수의 Darcy 법칙을 이용하고, 강우에 의한 지하수 상승을 컨벌루션 기법에 적용하여 이루어진 여러 변수를 경험식으로 재해석하여 유도한 것으로 Eq. (1)과 같다. Venetis (1969)에 의해 유도되고, Sangrey et al. (1984)에 의해서 적용된 Eq. (1)의 유도과정은 굉장히 복잡하고, 많은 경험계수들과의 관계를 가지기 때문에 여기서는 생략한다.

$$R_i = (1 - \exp[-1/t_{gw}]) \cdot Q_{seep} + \exp[-1/t_{gw}] \cdot R_{i-1} \quad (1)$$

여기서,  $R_i$ 는  $i$ 일의 대수층 함양량(L),  $t_{gw}$ 는 토양층 바닥을 통과한 침투량이 지하수면에 도달할 때까지의 지체를 모사하기 위한 지체시간(days),  $Q_{seep}$ 는  $i$ 일에 토양층의 바닥으로 빠져나가는 수량(L),  $R_{i-1}$ 는  $i-1$ 일의 대수층 함양량(L)이다. Eq. (1)의 지체시간 함수는 토양층 하단에서 지하수층까지 함양이 1일 이상인 경우에 적합한 함수이다.

그런데 이러한 함수에 대한 정리를 일반적인 수문학적 선형이론에 접목하여 토양층하단으로부터 지하수면까지 도달하는 과정을 좀 더 새롭게 정리하면 다음과 같다.

Fig. 1의 토양층 하단으로부터 침투한 물을 유입량으로 생각하고, 지하수까지에 도달한 물을 유출량으로 생각한다면, 유입량과 유출량의 변화량은 비포화대의 저류량의 크기에 따른 변화로 생각할 수 있다. 따라서 연속방정식  $dS/dt = I - O$ 과 선형 저류방정식  $S = KO$ 을 대입하면 Eq. (2)와 같으며, 이때 저류상수  $K$ 가 지체시간  $t_{gw}$ , 유입량  $I$ 가 침투량  $Q_{seep}$ , 유출량  $O$ 가 함양량  $R_i$ 이 된다.

$$K \frac{dO}{dt} = I - O \quad (2)$$

Eq. (2)의 양변을  $K$ 로 나누고  $e^{t/K}$ 를 곱하면,

$$e^{t/K} \frac{dO}{dt} + \frac{1}{K} e^{t/K} O = \frac{1}{K} e^{t/K} I \quad (3)$$

Eq. (3)의 좌변을 조합하면,

$$\frac{d}{dt} (O e^{t/K}) = \frac{1}{K} e^{t/K} I \quad (4)$$

초기조건  $t=0$ 일 때  $O = O_{(t-1)}$ 인 기존의 유입량을 이용하여 적분하면,

$$\int_{O_{(t-1),0}}^{O(t),t} d(O e^{t/K}) = \int_0^t \frac{1}{K} e^{\tau/K} I(\tau) d\tau \quad (5)$$

Eq. (5)의 좌변을 적분하면,

$$O(t) e^{t/K} - O_{(t-1)} = \int_0^t \frac{1}{K} e^{\tau/K} I(\tau) d\tau \quad (6)$$

$O(t)$ 에 관해 정리하면 Eq. (7)이 된다.



본 연구에서는 관측된 지하수위로부터 함양량을 추정하는 지하수위 변동해석모델로 분석하기 위해서는 신뢰성 높은 지하수위 시계열 자료의 확보가 요구되므로 연구지역 내 총 30개 관측지점 중 관측자료의 보유기간이 1년 미만인 지점과 관측자료의 시계열 자료의 변화가 없는 지점과 주변의 인위적인 영향으로 수위변동이 심하여 관측오류로 추정되는 지점 등(Fig. 4)을 제외하고 총 18개 지점의 자료를 중심으로 분석을 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 회귀분석을 통한 지체시간 산정

본 연구에서는 SWAT모형에 적용하기 위한 경험식을

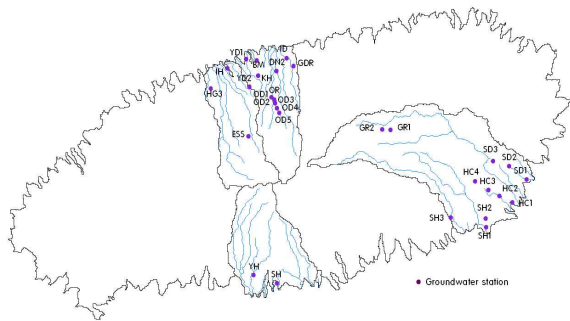


Fig. 3. Groundwater Station in 4 Watershed of Jeju

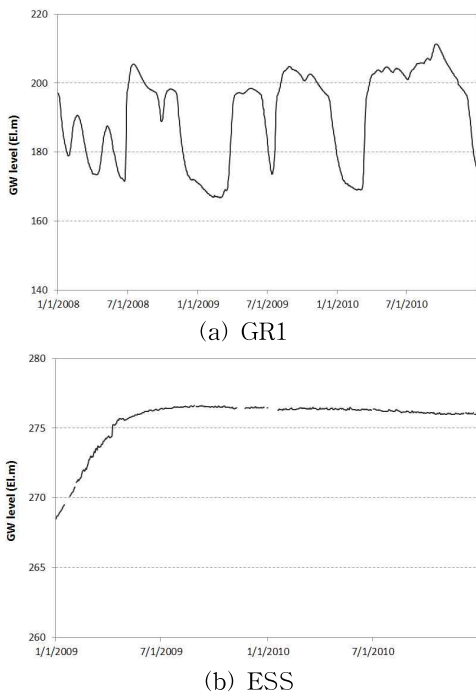


Fig. 4. Groundwater Stations with Abnormal Pattern in 4 Watershed of Jeju (GR1, ESS)

유도하기 위하여 Kim et al. (2013a,b)이 제안한 지하수위 변동 해석(Water Table Fluctuation: WTF)모델의 결과를 관측치로 가정하고 Eq. (1)을 통해 계산된 함양량과 비교해 가며 지체시간을 먼저 산정하였다. 지하수위 변동 해석모델은 지하수위 관측지점에서의 지하수위 변동을 좌우하고 지하수의 배출 형태를 설명하는 반응계수( $\alpha$ , reaction factor)와 지하수의 함양특성을 나타내는 비산출률( $\mu$ , specific yield)을 추정하여 관계식으로 표현할 수 있다(Kim et al., 2013a,b).

본 연구에서는 지체시간에 영향을 줄 인자로 고도를 선정하여 회귀분석(regression analysis)을 실시하였다. 회귀분석은 독립변수가 종속변수에 미치는 영향을 파악하는 분석방법으로 산출된 영향력을 통해 예측할 수 있는 분석이다. 제주지역 내의 4개 유역(한천, 강정천, 외도천, 천미천)을 중심으로 지체시간을 산정하여 고도와 회귀분석을 실시하였다. 그 결과 고도가 높아질수록 지체시간이 증가하는 경향성을 확인할 수 있으며, 그 상관식은 Eq. (9)이고 결정계수(coefficient of determination,  $R^2$ )는 0.71로 나타났으며, 두 인자의 95% 신뢰구간(confidence interval)을 함께 도시하였다.

본 경험식을 유도하여 고도와 함양지체시간과의 관계를 분석한 이유는 강우가 비포화대를 거쳐 지하수대로 함양되는 과정을 SWAT모형에서는 토양층을 통과하여 포화대에 도달하는 지체 매개변수로 계산하므로 이 매개변수에 고도별 지체시간을 반영, 미세측유역에 일관된 값을 적용하기 위함이다.

$$t_{gw} = 35.5 \ln(H) - 105.29 \quad (9)$$

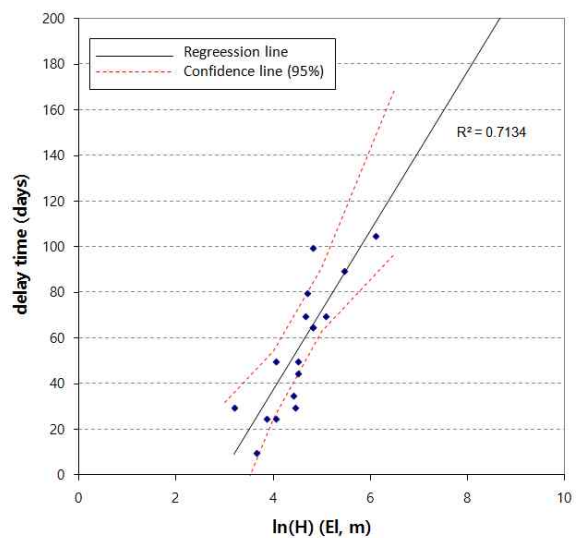


Fig. 5. Relationship between Groundwater Levels and Delay Time

회귀모델의 통계적 유의성을 검정하려면 분산분석(ANOVA: Analysis of Variance)을 통해 도출되는 여러 가지 통계량을 고려해야 한다. 대표적인 기준으로 결정계수( $R^2$ ), 수정결정계수(Adjusted  $R^2$ ), 회귀식에 의한 추정값의 표준오차(SEE: standard error of the estimate), 회귀식의 통계적 유의성(F통계량), 각 회귀계수에 대한 통계적 유의성(각 회귀계수의 t통계량) 등이 있다.

회귀분석결과 상관계수( $R^2$ )는 0.72로서 총분산에 대해 72% 정도의 설명력을 가진다고 할 수 있다(Table 1). 또한 분산분석표(Table 2)를 볼 때 F값이 37.78로 유의 수준 0.01에서 유의하다고 볼 수 있다. 회귀모형의 유의성을 검정하기 위해, 회귀식에 의해 설명된 분산과 회귀식에 의해 설명되지 못한 분산의 비율을 이용한다. F값이 크면 클수록 회귀식에 의해 설명된 분산이 크다는 것을 의미하므로 회귀모형은 그만큼 유의하게 된다. 또한 본 회귀식이 얼마나 신뢰성이 있는 여부를 판단하는데 필요한 변수 중 P값이 있는데 대부분 95%의 유의확률을 사용한다. 그러므로 그보다 낮은 값인 1.87E-05이므로 통계적으로 유의하다고 할 수 있다

### 3.2 오차 분석

오차란 모든 관측에서 필연적으로 발생하고 모든 관측값에 포함되어 있다. 그러므로 오차가 전혀 없는 완전무결한 자료를 구할 수 없기 때문에 추출한 데이터가 실제값에 가까워질수록 즉 오차를 고려하여 오차가 최소가 될 때 그 관측값은 신뢰성을 갖게 된다.

따라서 고도와 지체시간과의 경험식의 한계와 일정 범위 내에서의 오차 발생에 대한 검토를 하였다. 지체시간이 갖고 있는 오차는 여러 요인으로 분류할 수 있다. 오차 발생의 여러 요인 중 첫 번째는 관측 지하수위의 시계열 자료의 이상이다. 이는 인위적인 양수영향과 주변 자료

환경의 이상으로 주기적인 자동 관측지점의 현장점검 및 자료의 교란이나 결측 발생에 대한 빠른 대처가 필요한 요인이라 판단된다(Fig. 6). 두 번째는 지하수위 변동 해석모델에서 산정된 함양 시계열 자료가 포함하고 있는 오차이다(Fig. 7). 지하수위 변동 해석모델의 입력 자료인 관측 지하수위가 포함하고 있는 오차와 관측 지하수위 변화에 민감한 모형이 갖고 있는 오차를 포함하고 있다. 마지막으로 현재 지체시간 산정 경험식의 오차이다. 이는 Fig. 8에서 나타난 바와 같이 계산된 함양량이 지하수위

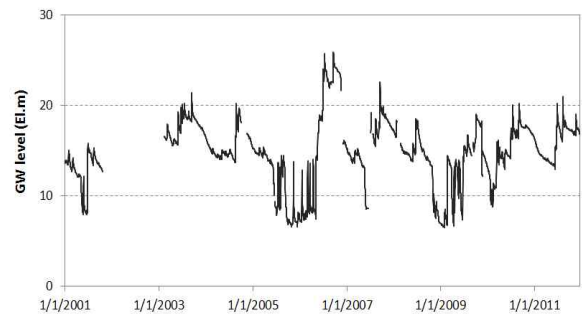


Fig. 6. Observed Groundwater Level at Iho Station (Pumping effect, data missing)

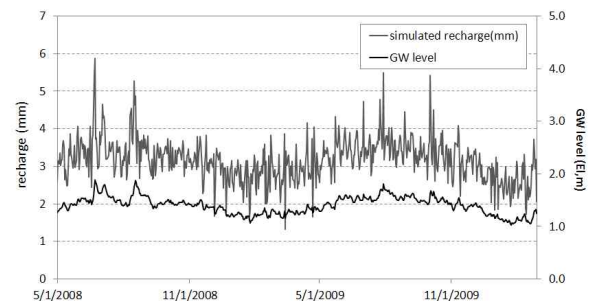


Fig. 7. Groundwater Recharge at Samdal 1 Station (by WTF method)

Table 1. Explanatory to the Linear Regressive Equation

R	R-square	Corrected R-square	Standard error
0.85	0.72	0.70	15.48

Table 2. Result of Fitness to the Regression Analysis

Contents	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-value	p-value
linear regression analysis	9051	1	9051	37.78	1.87E-05 (<0.0001)
Residual	3593	15	239		
Total	12644	16			

변동 해석 모델로 산정된 함양량의 경향성을 표현하지 못하는 것이다. 이는 본 연구에서 제시한 함양량 산정식으로 설명이 되지 않는 부분으로 향후 2차, 3차의 식을 도입하는 분석을 수행할 예정이다. 본 연구에서 함양량을 산정하기 위해 고려한 변수는 시간지연함수 한 개이고, 비포화대 두께가 더 두꺼운 고지대일수록 고려해야 할 변수가 늘어나게 된다. 이때 2개의 변수인 분산속도와 시간지연을 사용하면 2차이고, 3개는 초기 분산이 발생하는 시점의 변화까지 고려하는 것을 의미한다.

또한 생성된 지체시간에 대한 정확도를 평가하기 위하여 오차의 평균량을 대상으로 산출되는 RMSE(Root Mean Squared Error, 제곱근평균제곱오차)를 이용하였다. RMSE

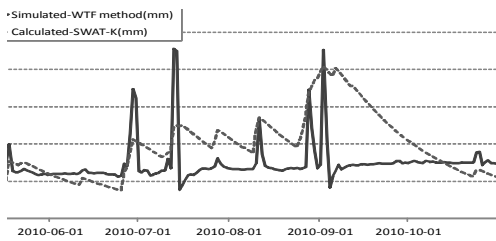


Fig. 8. Comparison of Trend of Groundwater Recharge at Iho Station

는 각각의 오차 값들이 갖는 오차의 평균량을 평가하는 일반적 방법으로 계산된 RMSE 값이 0에 가까울수록 오차가 적음을 의미한다. 본 연구에서는  $\pm$ Max error와  $\pm$ 60% error의 범위를 선정하여 회귀식에 대한 오차 분석을 수행하였다(Fig. 9). Fig. 10에서는 17개의 관측지점에 대하여 RMSE결과를 도시하여 나타내었다. 지체시간의 RMSE값은 0.01-2.01로 2.5인 허용오차 내에 포함되어 정확도에 문제가 없음을 확인 하였다.

다음은  $\pm$ Max error를 입력하여 계산한 RMSE와  $\pm$ 60% error 범위 내에 분포하는 지체시간에 대한 RMSE를 산출하여 비교해 보려고 한다(Table 3). 그 결과 -Max error일 때에 RMSE가 4.5 이상의 값이 나오므로 그 범위

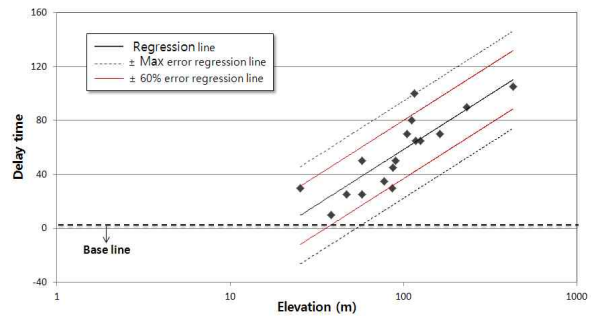


Fig. 9. Range for Error analysis of Regression Equation

Table 3. Result of Fitness to the Regression Analysis

station	El.	RMSE	RMSE (+Max error)	RMSE (-Max error)	RMSE (+60% error)	RMSE (-60% error)
HC1	25.48	2.01	2.58		2.06	
YD1	38.16	1.16	0.94		0.71	3.10
GH	47.20	0.22	0.55		0.39	1.15
ID2	57.65	0.34	0.81	4.50	0.57	1.28
SW2	57.69	1.00	1.62	4.42	1.32	1.52
SH3	77.74	0.45	0.64	1.90	0.45	0.77
DN2	86.00	1.27	0.98	2.56	0.68	1.20
HC3	87.15	0.27	0.75	1.99	0.52	0.85
SD2	90.06	0.13	0.61	1.43	0.40	0.70
YD	105.28	0.09	0.26	0.69	0.18	0.31
GDR	111.83	0.19	0.33	0.84	0.23	0.37
HG3	116.00	0.31	0.31	0.70	0.21	0.35
HC4	117.69	0.01	0.35	0.81	0.24	0.37
SD3	125.98	0.04	0.56	1.17	0.36	0.59
YD2	161.90	0.22	0.43	0.66	0.35	0.46
OR	232.84	0.01	0.18	0.34	0.12	0.17
GR2	429.46	0.16	0.67	1.05	0.44	0.54

내에 존재하는 지체시간에 대한 민감성이 더 커지는 것을 알 수 있다. 반면 +Max error와 ±60% error를 입력하였을 때는 2개 지점을 제외하고는 그 편차가 크지 않은 것으로 나타나 그 범위 내에서의 지체시간을 모형에 입력하여도 그 값의 오차가 크지 않음을 알 수 있다(Fig. 11). 또한 지체시간에 대한 기준은 명확치 않으나 지체시간이 하루(1일)는 없기 때문에 2~3일에 해당하는 것이 보편적이므로 2일 이하는 RMSE분석에서 제외시켰다.

RMSE값 중 가장 작은 값을 갖고 있는 HC4 지점에서

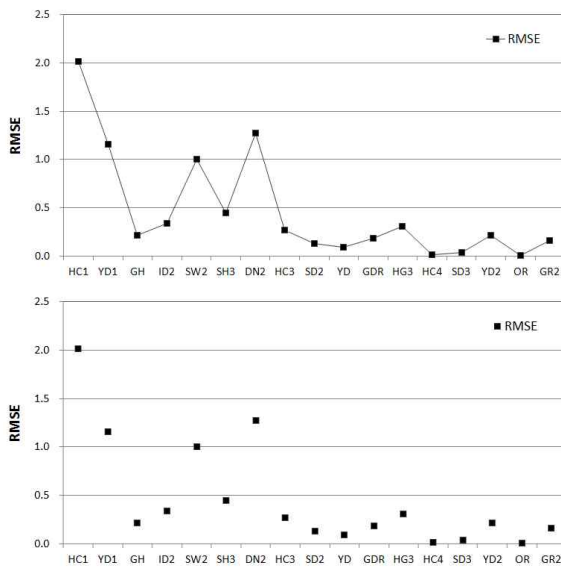


Fig. 10. RMSEs at all Stations

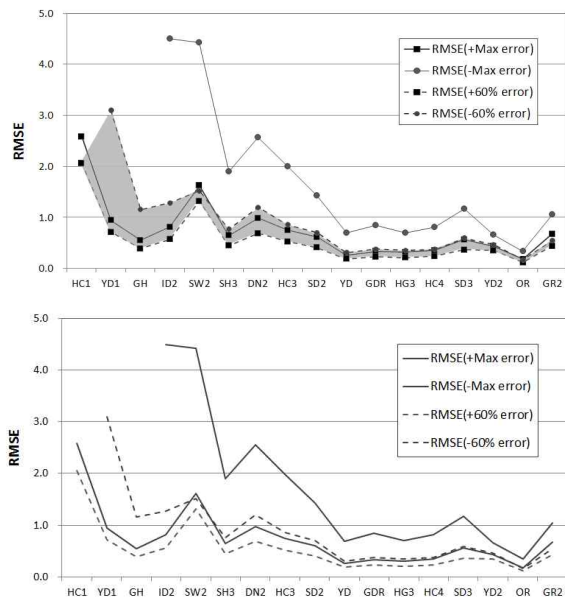


Fig. 11. Ranges of RMSE at all Stations

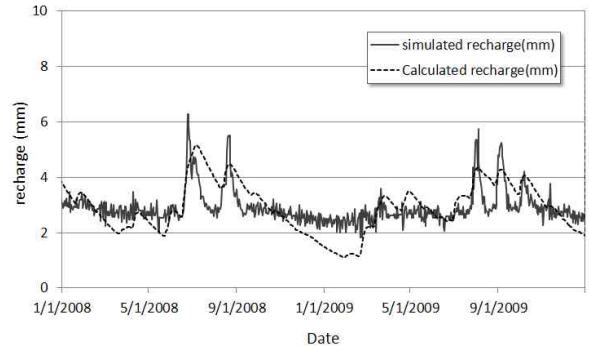


Fig. 12. Comparison of Simulated and Computed Recharge at HC4

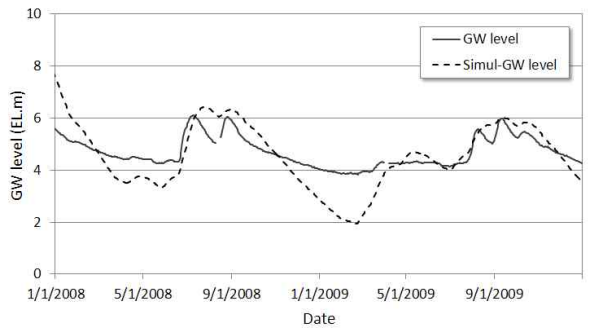


Fig. 13 Comparison of Observed GW Level and Simulated GW Level at HC4

의 모의함양량과 계산함양량을 비교하기 위하여 그래프로 도시한 것으로 모의치가 관측치에 비교적 높은 적합성 ( $R=0.67$ )을 보이는 것으로 분석되었다(Fig. 12). 또한 적합성을 역으로 검증하기 위하여 계산된 함양량을 지하수위로 환산하여 다시 관측 지하수위와 비교하였다(Fig. 13). 그 결과 추정된 지체시간을 이용하여 구한 계산함양량이 지하수위 변동모델에 의한 모의함양량과 높은 상관성( $R=0.89$ )을 갖는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

강수가 비포화대를 통과하면서 발생하는 함양의 시간 지체의 관계를 SWAT모형안에서 모의할 수 있도록 1차원적으로 고도와 지체시간에 대한 회귀분석을 수행하여 경험식을 유도하였다. 이와 같은 지체시간의 타당성을 평가하기 위해 지하수위 변동 해석모델을 통해 모의된 함양량과 추정된 지체시간을 이용하여 구한 함양량의 비교를 통하여 제주도 한천유역에 최적의 지체시간을 산정한 바 있다(Kim et al., 2014). 본 연구에서는 기 수행된 연구를 제주도 내 대표 계측유역인 4개 유역(한천, 강정천, 외도천, 천미천)을 대상으로 확대하여 적용가능한 경험식을



유도하였다. 또한 유도된 경험식이 갖고 있는 한계와 오차에 대한 검토를 수행하였다.

본 연구에서 산정한 회귀식의 검증을 위하여 산정된 지체시간을 넣어 계산된 함양량과 회귀식으로부터 산출된 지체시간을 입력하여 계산된 함양량을 비교한 결과 적합이 매우 양호하게 나타난 것을 알 수 있었다. 따라서 지체시간과 고도와의 관계를 통해 유도된 회귀식을 SWAT모형속에 탑재시켜 적용하게 되면 비포화대에서의 지연효과를 제주 전체 유역으로 확대하여 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 더 많은 양질의 관측 자료를 확보하여 계속적으로 경험식을 개선해 나갈 필요가 있다. 물론 경험식으로 표현하지 못하는 관측지점에 대해서는 모델의 한계 또는 관측 지하수위의 오차 등의 이유로 적용성의 한계가 있음을 분명히 밝힌다.

## 감사의 글

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

## References

- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R., and Williams, J.R. (1998). “Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development.” *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 34, pp. 73-89.
- Boulton, N.S. (1954). “Unsteady radial flow to a pumped well allowing for delayed yield from storage.” *Intern. Assoc. Sci. Hydrol., Rome. Publ.*, Vol. 37, pp. 472-477.
- Cho, J.W., and Park, E.G. (2008). “A study on delineation of groundwater recharge rate using water-table fluctuation and unsaturated zone soil water content model.” *Journal of Soil & Groundwater Environment*, Vol. 13, No. 1, pp. 67-76.
- Chung, I.M., Kim, N.W., Lee, J., and Sophocleous, M. (2010). “Assessing distributed groundwater recharge rate using integrated surface water-groundwater modelling: application to Mihocheon watershed, South Korea.” *Hydrogeology Journal*, Vol. 18, No. 5, pp. 1253-1264.
- Chung, I.M., Lee, J., Kim, J.T., Na, H., and Kim, N.W. (2011). “Development of threshold runoff simulation method for runoff analysis of Jeju Island.” *J. Environ. Sci.*, Vol. 20, No. 10, pp. 1347-1355.
- Hendrickx, J.M.H., Khan, A.S., Bannink, M.H., Birch, D., and Kidd, C. (1991). “Numerical analysis of groundwater recharge through stony soils using limited data.” *J. Hydrol.*, Vol. 127, pp. 173-192.
- Kim, N.W., Na, H., and Chung, I.M. (2014). “Delay time estimation of recharge in the Hancheon watershed, Jeju Island.” *Journal of environmental science international*, Vol. 23, No. 4, pp. 605-613.
- Kim, N.W., Um, M.J., Chung, I.M., and Heo, J.H. (2012). “Estimating the total precipitation amount with simulated precipitation for ungauged stations in Jeju island.” *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 45, No. 9, pp. 875-885.
- Kim, S.H., Park, E.G., Kim, Y.S., and 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*, Vol. 16, No. 3, pp. 17-27.
- Kim, N.W., Kim, Y.J., and Chung, I.M. (2013a). “Development of analyzing model of groundwater table fluctuation (I): Theory of model.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 6, pp. 2277-2284.
- Kim, N.W., Kim, Y.J., and Chung, I.M. (2013b). “Development of analyzing model of groundwater table fluctuation (II): Characteristics of recharge.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 6, pp. 2285-2291.
- Kim, N.W., Chung, I.M., and Na, H. (2013c). “A method of simulating ephemeral stream runoff characteristics in Cheonmi-cheon watershed.” *Jeju Island, Journal of Environmental Science International*, Vol. 22, No. 5, pp. 523-531.
- Koo, M.H., and 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*, Vol. 39, No. 2, pp. 249-261.
- Koo, M.H., and Lee, D.H. (2002). “A numerical analysis of the water level fluctuation method for quantifying

- groundwater recharge." *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 38, No. 3, pp. 407-420.
- Moench, A.F. (1995). "Combining the Neuman and Boulton models for flow to a well in an unconfined aquifer." *Ground Water*, Vol. 33, No. 3, pp. 378-384.
- Park, E.G., and Parker, J.C. (2008). "A simple model for water table fluctuations in response to precipitation." *Journal of Hydrology*, Vol. 356, pp. 344-349.
- Sangrey, D.A., Harrop-Williams, K.O., and Klaiber, J.A. (1984). "Predicting groundwater response to precipitation." *ASCE J. Geotech. Eng.*, Vol. 110, No. 7, pp. 957-975.
- Shin, K.H. (2012). *Analyzing effects of the unsaturated zone thickness on groundwater recharge in Jeju island: use of a convolution method*, M. S. dissertation, University of Kongju, pp. 1-3.
- Song, Y.G. (2011). *Modeling dispersive and time-delaying groundwater recharge in Jeju island*, M. S. dissertation, University of Kongju, pp. 1.
- Venetis, C. (1969). "A study of the recession of unconfined aquifers." *Bul, Int. Assoc. Sci. Hydrol*, Vol. 14, No. 4, pp. 119-125.
- Wu, J., Zhang, R., and Yang, J. (1996). "Analysis of rainfall-recharge relationships." *Journal of Hydrology*, Vol. 177, pp. 143-160.

논문번호: 14-031	접수: 2014.03.21
수정일자: 2014.08.04	심사완료: 2014.08.04