

ORIGINAL ARTICLE

컨벌루션 기법을 이용한 제주도 지하수 함양량의 시공간적 변화 분석

신경희 · 구민호^{1)*} · 정일문²⁾ · 김남원²⁾ · 김기표³⁾

K-water연구원, ¹⁾공주대학교 지질환경과학과, ²⁾한국건설기술연구원 수자원연구실, ³⁾제주특별자치도 수자원본부

Analyzing Spatio-Temporal Variation of Groundwater Recharge in Jeju Island by using a Convolution Method

Kyung-Hee Shin, Min-Ho Koo^{1)*}, Il-Moon Chung²⁾, Nam-Won Kim²⁾, Gi-Pyo Kim³⁾

K-water Research Institute, Daejeon 305-730, Korea

¹⁾*Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea*

²⁾*Water Resources Research Dept., Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea*

³⁾*Water Resources Office, Jeju 2651-2, Korea*

Abstract

Temporal variation of groundwater levels in Jeju Island reveals time-delaying and dispersive process of recharge, mainly caused by the hydrogeological feature that thickness of the unsaturated zone is highly variable. Most groundwater flow models have limitations on delineating temporal variation of recharge, although it is a major component of the groundwater flow system. A new mathematical model was developed to generate time series of recharge from precipitation data. The model uses a convolution technique to simulate the time-delaying and dispersive process of recharge. The vertical velocity and the dispersivity are two parameters determining the time series of recharge for a given thickness of the unsaturated zone. The model determines two parameters by correlating the generated recharge time series with measured groundwater levels. The model was applied to observation wells of Jeju Island, and revealed distinctive variations of recharge depending on location of wells. The suggested model demonstrated capability of the convolution method in dealing with recharge undergoing the time-delaying and dispersive process. Therefore, it can be used in many groundwater flow models for generating a time series of recharge.

Key words : Jeju island, Groundwater recharge, Unsaturated zone, Convolution method

1. 서론

제주도는 투수성이 매우 좋은 화산암으로 덮여 있어 지하수 함양율이 매우 높은 것으로 알려져 있다. 제주도는 대부분의 수자원을 지하수에 의존하므로 지하수 개발가능량의 주요 지표가 되는 함양량 평가에 대

한 연구가 매우 중요하다. 일찍이 Hahn 등(1994)은 물수지 분석을 통하여 제주도 지하수 함양율이 연 강수량의 44% 정도일 것으로 추정할 바 있다. 최근 국내에 자동계측기의 보급으로 양질의 지하수위 변동자료가 축적되면서 지하수위 변동법을 이용한 함양량 산정에 대한 연구가 활발하다(Moon 등, 2002; Koo와 Lee,

Received 16 December, 2013; Revised 21 February, 2014;

Accepted 2 April, 2014

*Corresponding author : Min-Ho Koo, Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea
Phone: +82-41-850-8515
E-mail: koo@kongju.ac.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.

2002; Yun 등, 2009; Yun 등, 2013; Koo 등, 2013). Choi 등(2011)은 지하수위 변동법을 이용하여 제주도 지역의 지하수 함양율을 산정한 바 있다.

최근 Park 등(2013)은 GIS 기반의 물수지 분석 모델인 WetSpass를 이용하여 제주도 지하수 함양량의 공간적 변화를 분석하였다. Park 등(2013)에 의하면 제주도의 평균 지하수 함양량은 연강수량 대비 41.8%를 차지하며 전체 함양량의 69%가 해발고도 200 m 이상에서 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 함양량의 공간분포를 보면 주로 강수량이 높은 제주도 중앙부의 고지대 및 남부와 동부에서 높은 함양량을 보이며 서부지역이 상대적으로 낮은 함양량을 나타내는 것으로 분석되었다.

한편, 지하수 함양량을 산정하는 기존의 연구 방법은 대부분 함양량의 시간적 변화(transient recharge)를 고려하지 못하는 제한점을 가진다. 강수에 의한 지하수 함양은 지하수 흐름계를 결정하는 가장 중요한 변수이지만, 다양한 산정기법이 사용되고 있음에도 불구하고 여전히 불확실성이 매우 높으며, 특히 함양량의 시간적 변화에 대한 연구는 아직도 초보적인 수준에 머물러 있다. 따라서 지하수의 흐름을 재현하고, 예측하여 지하수자원의 효율적인 관리를 위한 도구로 널리 이용되는 지하수 모델에서도 지하수 함양량이 매우 중요한 입력 변수이지만 함양량의 시간적 변화를 실질적으로 고려하는 모델은 흔하지 않다.

함양량의 시간적 변화는 비포화대(unsaturated zone) 흐름 모델을 통하여 모의될 수 있으나(Koo와 Kim, 2003) 많은 모델 입력 변수에 대한 정보가 필요하며 유역단위 규모에서 적용하기에 적합하지 않다. Kim 등(2006)은 최근 SWAT 모형을 통해 유역단위에서 함양량의 시공간적 변화를 정량적으로 추정할 수 있는 방법을 제시한 바 있다. SWAT 모형의 경우 유역 출구점에서 실측된 유출량 자료를 모델 보정에 이용하므로 유역단위의 물수지 성분의 시간적 변화를 효과적으로 모의할 수 있다. Park(2007)은 물수지 방정식을 변환하여 강우 시계열 자료에 따른 지하수위 변동 예측 모델을 제안하였으나, 비포화대 특성이 지하수위 변동에 미치는 영향을 고려하지 않아 지하수위 예측에 있어 한계점을 가진다. 한편, 최근에는 Boulton (1954)과 Moench(1995)에 의해 제안된 비포화대 지

연배수 모델과 Park(2007) 및 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.

본 연구에서는 컨벌루션 기법을 이용하여 강수의 비포화대에서의 시간지연과 분산과정이 반영된 새로운 지하수 함양 모델을 개발하였으며, 모델을 이용하여 제주도의 지하수 함양량의 계절적 변화가 유역별, 고도별로 어떻게 달라지는지 분석하였다.

2. 연구방법

2.1. 컨벌루션을 이용한 지하수 함양모델

두 함수 $f(t)$ 와 $g(t)$ 의 컨벌루션, 즉 $f(t) \times g(t)$ 은 다음 식과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} R(t) &= f(t) \times g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \cdot g(t-\tau) d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t-\tau) \cdot g(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (1)$$

즉, 컨벌루션은 두 함수 가운데 하나의 함수를 반전시킨 후 평행이동시킨 다음, 다른 하나의 함수와 곱한 결과를 적분하는 것을 의미한다. 합성곱이라고 하는 컨벌루션의 계산과정은 상호상관과 밀접한 관계를 가지며, 자료 처리에 응용되는 모든 선형필터링(Linear filtering) 연산자는 컨벌루션으로 표시할 수 있다.

컨벌루션 기법을 이용하여 아래와 같이 지하수 함양시계열을 생성하였다. 먼저 입력함수인 $f(t)$ 는 강수량 시계열(P)에 함양률(β)을 곱한 값을 사용하였다.

$$f(t) = \beta \times P(t) \quad (2)$$

강수량의 일정비율로 주어지는 입력함수 $f(t)$ 와 컨벌루션의 결과로 계산되는 지하수 함양 시계열 $R(t)$ 의 적분값, 즉 함양량이 같기 위해서는 필터함수 $g(t)$ 는 다음 식을 만족해야 한다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(t) dt = 1 \quad (3)$$

필터함수로 사용한 $g(t)$ 는 시간지연과 분산과정을 잘 표현하는 1차원 추적자 주입 모델의 해(Bear, 1979)를 이용하였다.

$$C(x, t) = \frac{M}{n} \cdot \frac{1}{\sqrt{4\pi\alpha vt}} \cdot \exp\left[-\frac{(x-vt)^2}{4\alpha vt}\right] \quad (4)$$

여기서 x 는 거리, t 는 시간, M 은 주입된 용질의 총 질량, n 은 유효공극률, α 는 분산지수, v 는 용질의 이류속도를 나타낸다. 새로운 독립변수 $x' = x - vt$ 를 도입하면 주입된 용질의 양은

$$M = \int_{-\infty}^{\infty} nC(x', t) dx' \quad (5)$$

또는

$$M = \int_{-\infty}^{\infty} nC(x', t) dt \quad (6)$$

와 같이 나타낼 수 있으며 식 (4)와 (6)으로부터 다음 식이 유도된다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{v}{\sqrt{4\pi\alpha vt}} \exp\left[-\frac{(x-vt)^2}{4\alpha vt}\right] dt = 1 \quad (7)$$

따라서 위 식의 적분항에 포함된 식을 필터함수 $g(t)$ 로 이용하면 비포화대를 통과하면서 발생하는 시간지연과 분산을 고려하면서 강수량의 일량비율 β 가 함양되는 함양시계열 자료를 생성할 수 있다.

$$g(t) = \frac{v}{\sqrt{4\pi\alpha vt}} \exp\left[-\frac{(x_0-vt)^2}{4\alpha vt}\right] \quad (8)$$

여기서 지하수 함양의 관점에서 필터함수를 해석하면 x_0 는 비포화대 두께, v 는 비포화대 투과속도(이하, 함양속도)를 나타낸다. 한편, 위 식에서 시간(t)을 고정하고, x_0 을 거리(x)로 간주하면, 식 (8)은 가우스 분포함수인 아래 식과 동일한 형태이다.

$$h(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (9)$$

따라서 필터함수 $g(t)$ 는 $\sigma = \sqrt{2\alpha t}/v$ 인 가우스분포함수라 할 수 있다.

2.2. 함양 시계열 자료 생성 사례 및 최적 필터 선정 방법

전술한 컨벌루션 기법을 실제 제주도에서 관측된 강수량 시계열 자료에 적용하여 함양 시계열 자료를 생성하였으며, 비포화대의 두께, 비포화대의 분산지수 및 강수의 함양속도가 달라짐에 따라 함양 시계열 자료가 어떻게 변화하는지 분석하였다. Fig. 1은 컨벌루션 기법을 이용하여 생성한 지하수 함양 시계열 자료의 예이다. 모델의 입력값인 강수량 시계열 자료는 제주도 수산관측소에서 2006년도에 측정된 일 자료를 이용하였으며, 필터함수의 입력변수인 함양속도와 분산지수, 비포화대 두께를 변화시키면서 지하수 함양 시계열 자료를 생성하였다.

Fig. 1a는 비포화대 두께를 10 m, 함양속도를 5 m/day로 고정시킨 후 분산지수를 10, 100 m로 변화시키며 함양 시계열 자료를 생성한 결과이다. 분산지수가 커질수록 분산효과에 의하여 개별 강수 사상(event)이 퍼지면서 함양량의 변동 폭이 점차 작아지는 것을 볼 수 있다. Fig. 1b는 비포화대 두께를 10 m, 분산지수를 100 m로 고정시킨 후 함양속도를 1, 5 m/day로 변화시키면서 함양 시계열 자료를 생성한 결과이다. 함양속도가 5 m/day일 경우 개별강수에 의한 함양량의 증가가 뚜렷하게 나타나는 반면, 함양속도가 1 m/day일 경우에는 시간지연에 의하여 강수 사상이 퍼지면서 함양율의 변화가 크지 않은 시계열 결과를 나타냈다. Fig. 1c는 분산지수와 함양속도를 고정시킨 후 비포화대 두께를 10, 100, 1000 m로 변화시키면서 함양 시계열 자료를 생성한 결과이다. 비포화대 두께가 두꺼워질수록 개별 강수 사상에 의한 영향이 중첩되면서 함양량의 변동폭이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 비포화대 두께가 1000 m일 경우 시간지연과 분산으로 인해 강수패턴과는 상관없이 연중 비교적 일정한 양의 지하수가 함양되며 지하수 함양은 강수가 집중적으로 발생하는 여름철에 가장 많이 함양되는 것이 아니라 오히려 건기에 함양량이 다소 증가하는 것을 볼 수 있다.

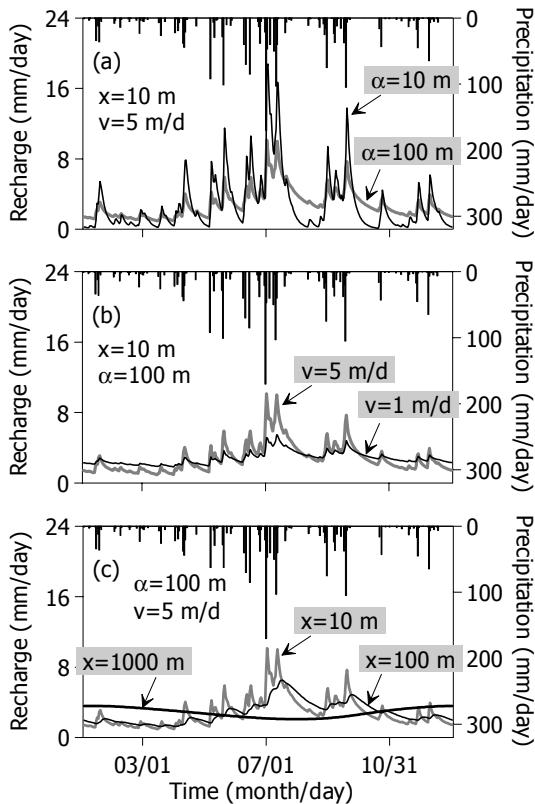


Fig. 1. Generated recharge time series using the convolution method with varying (a) dispersivity, (b) recharge velocity, and (c) thickness of the unsaturated zone.

지하수 함양량의 변동 패턴은 비포화대의 두께 및 강수를 투과시키는 필터적 특성, 즉 분산지수, 함양속도에 따라 크게 달라지는 것을 확인하였다. 함양량의 시간적 변화는 비포화대의 두께가 얇을수록, 분산지수가 작을수록, 함양속도가 빠를수록 개별강수 사상의 시계열적 변화와 유사한 경향을 보이며 강수에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

특정 지역 비포화대의 필터적 특성, 즉 필터 함수의 두 입력 변수인 분산지수와 함양속도를 추정하기 위하여 생성된 지하수 함양 시계열 자료와 지하수위 변동 시계열 자료와의 상관분석을 수행하였다. 즉, 각 지역의 비포화대 특성을 고려한 필터의 생성을 위하여 입력 변수인 함양속도와 분산지수 값을 변화시키면서 다양한 필터를 생성하였고, 이때 각 필터에 의해 생성

된 지하수 함양 시계열 자료와 실제 지하수위 변동 시계열 자료의 상관분석을 실시하였다. 그 결과 함양속도와 분산지수의 변화에 따른 상관계수 값을 구할 수 있었으며, 상관계수가 가장 높게 나타나는 필터의 함양속도와 분산지수 값을 이 지역 비포화대의 특성을 나타내는 대푯값으로 산정하였다.

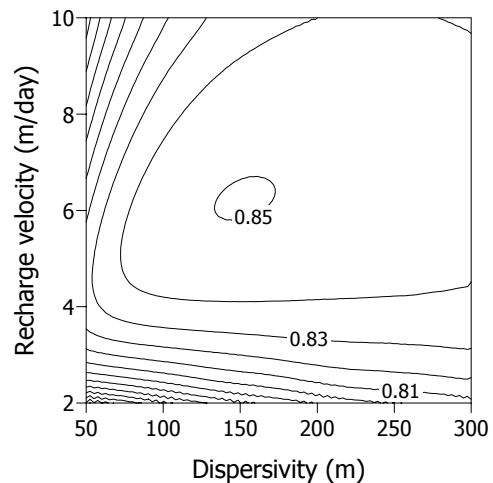


Fig. 2. Variation of the correlation coefficient between recharge time series and measured groundwater recharge levels over a range of two model parameters.

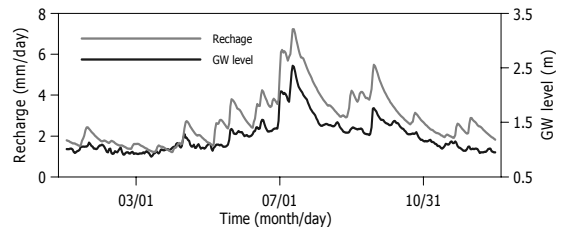


Fig. 3. Comparison of recharge time series generated from the convolution method with groundwater levels measured at a monitoring well in Soosan, Jeju.

Fig. 2는 제주도 수산관측소의 강수량 자료와 수산 2관정의 지하수위 자료를 이용하여 함양속도와 분산지수 변화에 따른 상관계수 값의 변화를 도시한 것이다. 동부지역에 위치한 수산2관정은 고도가 70.6 m, 비포화대 두께가 69.3 m이며, 그림과 같이 상관분석 결과 함양속도와 분산지수가 각각 6.2 m/day, 151 m 일 때 지하수 함양 시계열 자료와 실제 지하수위 변동

자료의 상관성이 가장 높게 나타났다(Fig. 3). 이와 같이 컨벌루션 필터의 특성, 즉 함양속도와 분산지수의 값을 순차적으로 변화시키면서 생성된 함양량 시계열 자료와 지하수위 관측 시계열 자료와의 상관계수를 계산하여 상관계수가 가장 크게 나타나는 함양속도와 분산지수를 해당 지역 비포화대의 최적 필터값으로 산정하였다.

3. 컨벌루션 모델 적용

3.1. 모델 적용

제주도는 고투수성의 지질 특성에 기인하여 지하수면의 구배가 매우 완만하며 내륙 지역에 비해 비포화대가 상당히 두꺼운 것으로 알려져 있다. Fig. 4a는 제주특별자치도 수자원본부의 지하수 관측망 자료를 이용하여 관측소의 고도별 비포화대 두께(또는 지하수면의 심도) 변화를 도시한 것으로 해안가에서 중산간 지역으로 갈수록 비포화대 두께가 두꺼워지는 것을 볼 수 있다. 관측소 고도와 비포화대 두께와의 상관성은 그림과 같이 동부지역에서 가장 높으며, 남부지역이 상대적으로 낮게 나타났다. 제주도 동부지역 지하수위 관측망 자료를 이용하여 비포화대 두께가 강수 시 지하수위 상승 기간에 미치는 영향을 알아보았다(Fig. 4b). 지하수위 상승 기간은 강수 시 지하수 함양이 발생할 때 비포화대에서의 분산 정도를 나타내는 것으로 비포화대의 두께에 큰 영향을 받는다. Fig. 4b와 같이 동부지역 대부분의 관측소에서는 비포화대 두께가 두꺼워질수록 강수 함양의 시간지연이 발생하

면서 지하수위 상승 기간도 길어지는 변동 특성이 잘 나타났다.

제주도에서 고도가 높은 지역의 경우 지표면을 침투한 강수는 두꺼운 비포화대를 통과하면서 지하수면까지 도달하는데 시간지연이 발생하며, 동시에 비포화대의 필터적 특성에 의하여 강수 사상 본래의 시계열 특성과 상이한 함양과정이 나타날 것으로 예상된다. 따라서 제주도는 시간지연과 분산을 고려하여 지하수 함양 시계열을 생성하는 컨벌루션 모델을 적용하는데 매우 적합한 지역이라고 할 수 있다.

제주도에서 측정된 2006년 강수량 자료와 지하수위 자료를 이용하여 지하수 관측소의 지점별 비포화대 특성에 따른 지하수 함양 시계열 자료를 생성하였다. 재난안전 대책본부의 강수량 관측망 자료 32개와 제주특별자치도 수자원본부의 지하수위 관측망 자료 75개를 사용하였으며, 조석에 의해 발생한 지하수위 변동 성분을 제거하기 위하여 일평균 지하수위 변동 자료를 이용하였다. 분석에 이용된 강수량 관측소와 지하수위 관측소의 위치는 Fig. 5와 같으며, 컨벌루션 모델의 입력변수인 비포화대 두께는 관정이 위치한 지역의 고도와 연평균 지하수위 값의 차이를 이용하여 산정하였다. 제주도 지하수 함양의 지역적 특성을 알아보기 위하여 제주도 수자원종합개발 계획 수립보고서(Jeju Province와 K-water, 1993)를 참고하여 제주도 전 지역을 16개 구역으로 구분하였으며, 16개 구역은 동부지역(표선, 성산, 구좌, 조천구역), 북부지역(동제주, 중제주, 서제주, 애월구역), 서부지역(한림,

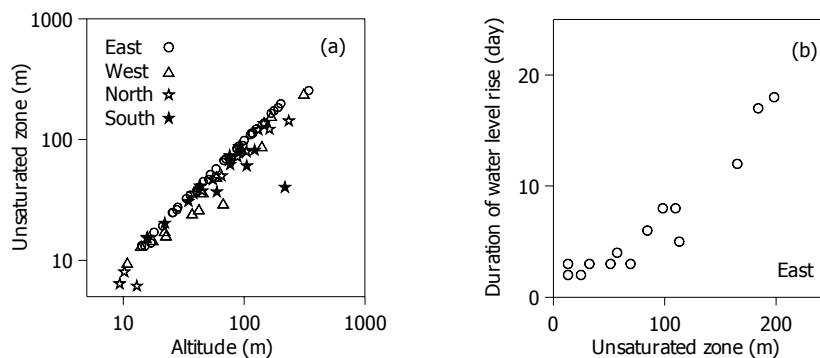


Fig. 4. Thickness of the unsaturated zone in Jeju: (a) spatial distribution and (b) its impact on response of groundwater level to precipitation recharge.

한경, 대정, 안덕유역), 남부지역(동서귀, 중서귀, 서서귀, 남원유역)의 4개 권역으로 구분하였다(Fig. 5).

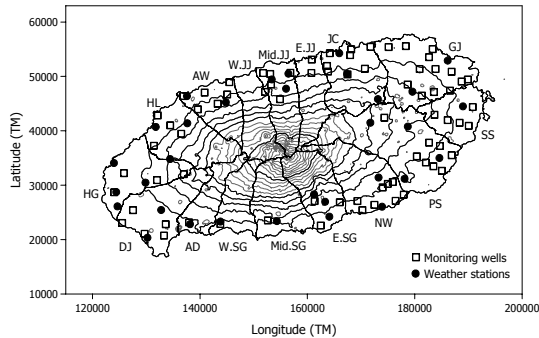


Fig. 5. Location of monitoring wells and weather stations.

3.2. 모델 적용 결과

Fig. 6은 컨벌루션 모델을 각 관측소(Fig. 5)의 지하수위 관측 자료에 적용하여 산정된 분산지수와 함양속도를 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 비포화대의 필터적 특성인 함양속도와 분산지수를 순차적으로 변화시키면서 함양 시계열 자료를 생성하였으며, 생성된 함양 시계열과 지하수위 관측자료와의 상관분석을 통하여 최적의 값을 산정하였다. 산정된 분산지수는 동부지역과 서부지역에서 상대적으로 큰 값을 보이며(Fig. 6a), 함양속도는 동부지역에서 특징적으로 크게 나타났다(Fig. 6b). 분산지수의 경우 서부에 위치한 무릉1관정에서 8 m로 가장 작게 산정되었고, 동부에 위치한 고성관정에서 241 m로 가장 크게 나타났으며, 평균 분산지수는 81.2 m이다. 함양속도의 경우 남부

에 위치한 하귀1, 삼양1관정에서 0.1 m/day로 가장 느리게 산정되었고, 동부에 위치한 삼달3관정에서 11.1 m/day로 가장 빠르게 나타났으며, 평균 함양속도는 2.4 m/day이다.

분산지수와 함양속도의 지역적 변화를 살펴보면, 동부지역의 경우 분산지수는 9-241 m의 값을 가지며 평균값은 89.4 m이고, 함양속도는 0.8-11.1 m/day의 값을 가지며 평균값은 3.9 m/day로 가장 빠르게 나타났다. 서부지역의 분산지수는 8-233 m, 평균값은 79.6 m이고, 함양속도는 0.4-4.5 m/day, 평균값은 1.8 m/day이다. 남부지역의 분산지수는 12-124 m, 평균값은 59.7 m이고, 함양속도는 0.4-2.2 m/day, 평균값은 1.1 m/day이다. 북부지역의 분산지수는 15-177 m, 평균값은 83 m이며, 함양속도는 0.1-1.8 m/day, 평균값은 0.8 m/day로 가장 느리게 나타났다.

함양속도는 고도가 높아질수록 다소 증가하는 경향을 보였으며, 이러한 특징적 변화는 동부지역에서 잘 나타났다. Fig. 7은 비포화대 두께가 50 m 내외인 하천2(동부), 한림2(서부), 남원(남부), 신업(북부)관정의 실제 지하수위 관측값과 모델을 통해 계산된 함양 시계열 자료를 도시한 것이다. 네 관정 모두 비포화대 두께가 비슷하지만 지역에 따라 지하수위 변동 패턴이 매우 다른 양상을 보인다. 컨벌루션 모델을 통해 계산된 함양속도와 분산지수는 하천2관정에서 3.5 m/day와 54 m, 한림2에서 0.6 m/day와 10 m, 남원에서 1 m/day와 72 m, 신업에서 0.6 m/day와 15 m이다. 함양속도가 가장 큰 하천2의 경우 시간지연과 분산의 영향이 가장 작아 지하수 함양이 개별강수에 즉각적

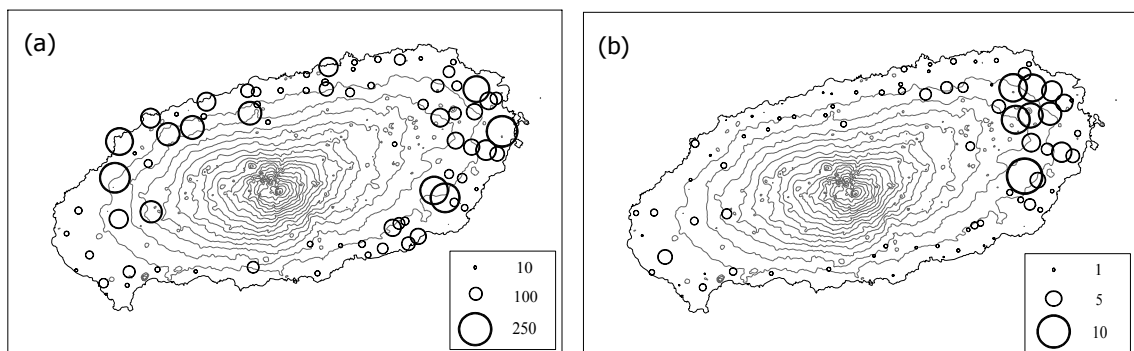


Fig. 6. Spatial variation of (a) dispersivity and (b) recharge velocity determined from the convolution model.

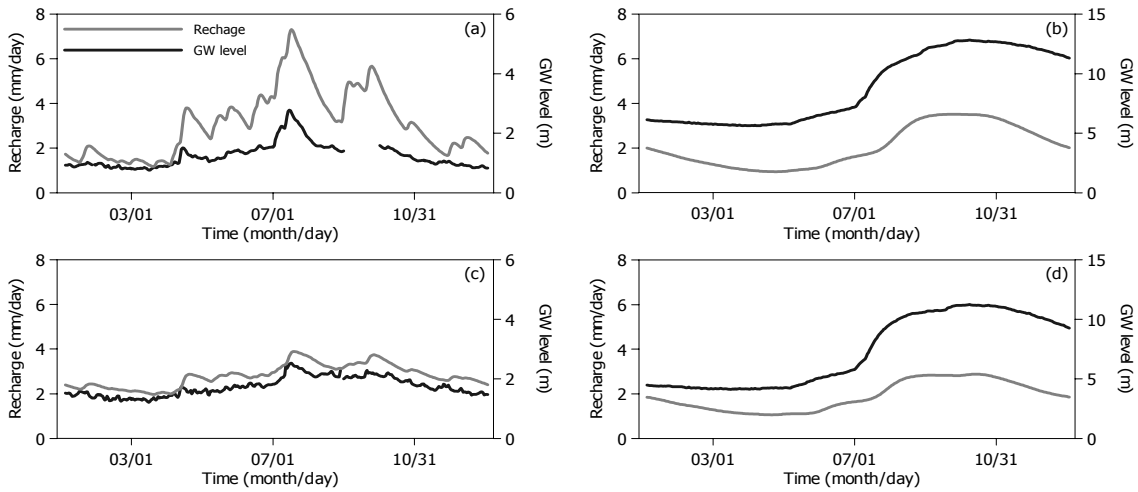


Fig. 7. Comparison of recharge time series generated from the convolution model with groundwater levels measured at (a) Hacheon2, (b) Hallim2, (c) Namwon, and (d) Sinum monitoring wells: the unsaturated zone of these wells is about the same (50 m).

으로 반응하는 것을 볼 수 있다. 반면, 함양속도가 가장 작은 한림2와 신업의 경우 시간지연과 분산의 영향으로 함양량 및 지하수위 변동이 매우 완만하게 나타났다. 이와 같이 지하수위 변동은 비포화대의 두께뿐만 아니라 관정이 위치한 지역의 비포화대의 필터적 특성에 따라 매우 다른 패턴을 보였으며, 컨벌루션 모델을 통하여 이러한 비포화대의 특성을 정량적으로 산정할 수 있었다.

3.3. 유역 및 고도에 따른 함양 시계열 자료 생성

제주도의 16개 유역(Fig. 5)을 다시 고도별로 세분하여 유역별, 고도별 각 영역에서의 지하수 함양 시계열을 생성하였다. 고도별 영역은 0-500 m 구간에서는 100 m 간격으로 구분하였고, 500 m 이상의 고지대는 고도가 높아짐에 따라 면적이 줄어드는 것을 고려하여 500-1000 m와 1000 m 이상 구간으로 나누어 총 7개의 영역으로 구분하였다. 대정 및 조천 유역의 경우

Table 1. Areas of subdivided drainage basins with altitude

Basin	0-100 m	100-200 m	200-300 m	300-400 m	400-500 m	500-1000 m	1000 m<	Total(km ²)
E	Pyoseon	60.9	49.2	40.1	31.6	23.7	31.2	236.8
	Seongsan	57.2	26.0	5.7				89.0
	Gujwa	95.1	46.4	26.0	3.3			170.9
	Jocheon	44.1	22.5	19.9	23.5	16.5		126.6
N	E. Jeju	15.4	13.8	9.3	7.0	6.4	25.2	77.1
	Mid. Jeju	25.2	13.9	9.5	6.5	6.8	17.1	91.2
	W. Jeju	14.8	8.8	8.3	5.3	4.8	30.4	90.2
	Aewel	28.5	17.4	12.5	7.8	6.2	11.3	83.6
W	Hallim	37.6	24.5	19.0	16.5	11.0	25.6	134.0
	Hangyeong	76.6	21.4	7.9	6.7			112.6
	Daejeong	81.1	24.3	11.3	7.4	7.7		131.9
	Andeok	12.0	18.4	10.3	6.7	5.2	17.7	70.3
S	W. Seogwi	15.3	12.2	8.2	5.8	5.7	27.6	74.9
	Mid. Seogwi	24.2	14.4	12.8	9.6	8.0	26.1	109.6
	E. Seogwi	19.8	18.0	12.0	7.3	5.9	24.2	108.7
	Namwon	37.3	27.3	19.3	13.2	13.2	21.6	131.9
Total	645.1	358.6	232.2	158.3	119.7	259.6	65.8	1839.4

500-1000 m 구간의 면적이 매우 작아 400-500 m 영역에 포함시켰으며, 표선, 남원, 동제주, 안덕, 서서귀 유역의 경우 1000 m 이상의 구간 면적이 작아 500-1000 m 영역에 포함시켰다. 각 유역별, 고도별 면적 분포는 Table 1과 같다.

컨벌루션 모델을 이용하여 유역별, 고도별로 구분된 각 소영역에 대한 지하수 함양 시계열을 생성하였다. 모델의 입력 자료인 강수량의 경우 제주도 내 기상대, 자동기상관측소, 재난안전 대책본부의 강수량 관측소에서 관측된 64개 자료를 이용하였다. 2006년 강수량 자료를 이용하여 크리깅을 통해 강수량 분포도를 작성한 후(Fig. 8a) 이를 이용하여 유역별, 고도별로 구분된 각 소영역의 평균 강수량을 계산하였다. 강수의 지하수 함양 비율은 제주도 수문지질 및 지하수 자원 종합보고서(Jeju Province와 K-water, 2003)에서 제시한 46.1%를 적용하였으며, 강수 시계열 자료에 컨벌루션 모델을 적용하여 각 소영역의 지하수 함양 시계열을 생성하였다. 컨벌루션 모델의 입력 자료인 비포화대의 두께의 경우 1970년부터 2006년까지 제주도에에서 개발된 969개 공공 관정의 지하수위 자료를 크리깅하여(Fig. 8b) 구하였으며, 각 소영역에 대한 평균 두께를 사용하였다. 고도 500 m 이상의 고지대의 경우 지하수 관정이 거의 설치되어 있지 않아 비포화대의 두께에 대한 추정치는 불확실성이 매우 높다. 한편, 모델의 입력 자료인 함양속도와 분산지수는 75개 관정에 대한 각 유역별 산정 결과의 평균값을 이용하였다(Table 2). 분산지수의 경우 유역에 따라 25-176 m사이의 범위를 보이며, 남부지역에서 다소 작은 값을 나타냈다.

함양속도는 0.65-5.02 m/day 사이의 범위를 보이며, 동부지역에서 가장 크며 남부 및 북부지역에서 가장 작은 값을 보여 지역적인 차이가 뚜렷하게 나타났다.

Table 2. Dispersivity and recharge velocity determined from the convolution model for 16 drainage basins

Basin	Dispersivity (m)	Recharge velocity (m/day)
E	Pyoseon	85.3
	Seongsan	146.2
	Gujwa	90.0
	Jocheon	56.9
N	E. Jeju	33.5
	Mid. Jeju	48.4
	W. Jeju	176.0
W	Aewel	112.8
	Hallim	125.3
	Hangyeong	92.5
	Daejeong	43.4
S	Andeok	26.0
	W. Seogwi	12.0
	Mid. Seogwi	80.0
	E. Seogwi	25.0
	Namwon	76.1

Fig. 9는 조천(동부), 한림(서부), 남원(남부), 애월(북부) 유역의 0-100 m 구간에서의 함양량 시계열의 변화를 비교한 것이다. 조천 유역의 경우 컨벌루션 모델에 의해 계산된 함양속도가 2.03 m/day로 다른 유역에 비하여 상대적으로 크고, 분산지수는 56.9 m로 작은 값을 보여 지하수 함양량의 변동 폭이 가장 크게 나타났다. 반면 남원 및 한림 유역의 경우 함양속도와

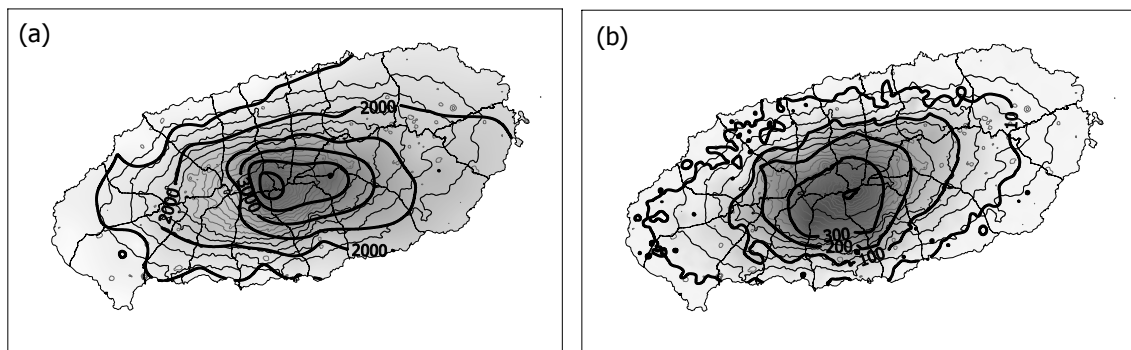


Fig. 8. Spatial distribution of (a) 2006 annual precipitation and (b) groundwater level in Jeju.

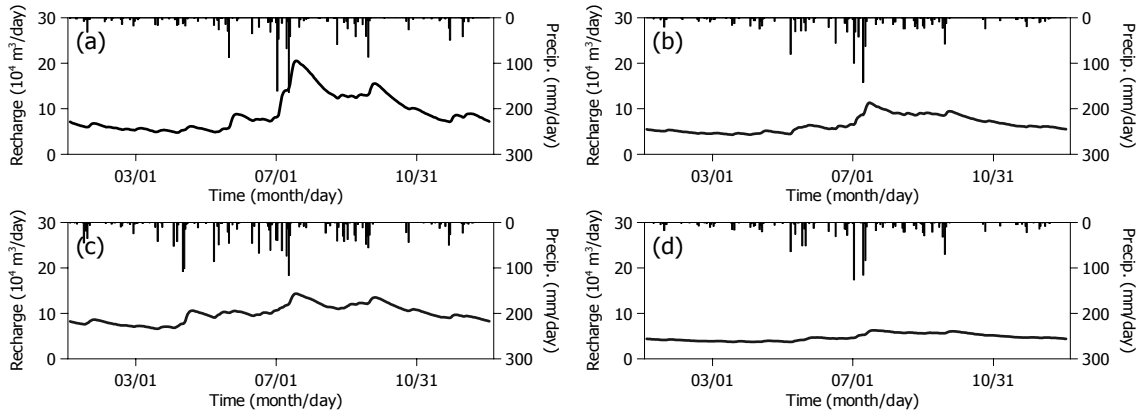


Fig. 9. Recharge time series generated from the convolution model for 0-100 m altitude regions: (a) Jocheon, (b) Hallim, (c) Namwon, and (d) Aewel.

분산지수가 각각 1.43 m/day, 125.3 m 과 1.09 m/day, 76.1 m로 함양속도는 작은 값을, 분산지수는 큰 값을 보여 함양량의 시간적 변화가 상대적으로 작게 나타난 것을 볼 수 있다. 북부 애월의 경우 분산지수는 크고(112.8 m), 함양속도는 매우 작아(0.65 m/day) 함양량의 시간적 변화가 가장 작은 것으로 나타났다. 네 지역 모두 비포화대 두께가 가장 얇은 0-100 m구간이지만 비포화대의 필터 특성이 달라 시간지연과 분산 정도에 따라 지하수 함양 패턴이 상이하게 발생하는 것으로 모의되었다.

위와 같이 유역별, 고도별로 구분된 각 소영역에 대하여 컨벌루션 모델을 이용하여 함양 시계열을 생성하였으며, 이를 고도별로 합하여 제주도 16개 유역의 지하수 함양량 시계열 변화를 계산하였다. 동부지역이 다른 지역에 비하여 함양량의 계절적 변동성이 강하게 나타났으며, 특히 구좌 유역의 경우(Fig. 10a) 함양량의 변화가 0.2-1.0 m³/day로 건기와 우기의 함양량이 5배까지 차이가 나는 것으로 산정되었다. 북부지역은 함양량의 계절적 변동성이 가장 약하게 나타나는 지역으로 4개 유역 모두 연중 거의 일정한 함양량

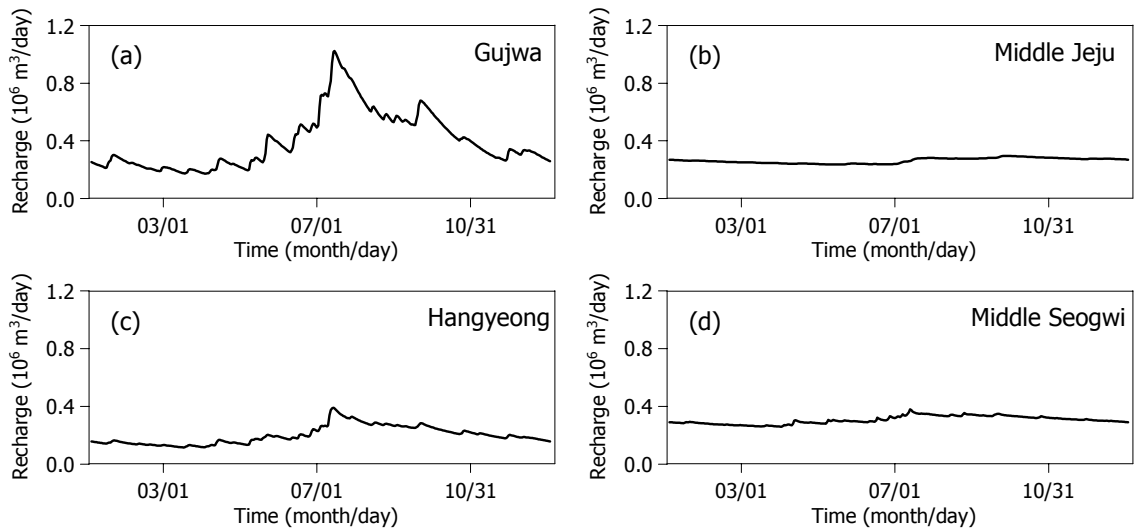


Fig. 10. Recharge time series of drainage basins in Jeju: (a) Gujwa, (b) Middle Jeju, (c) Hangyeong, and (d) Middle Seogwi.

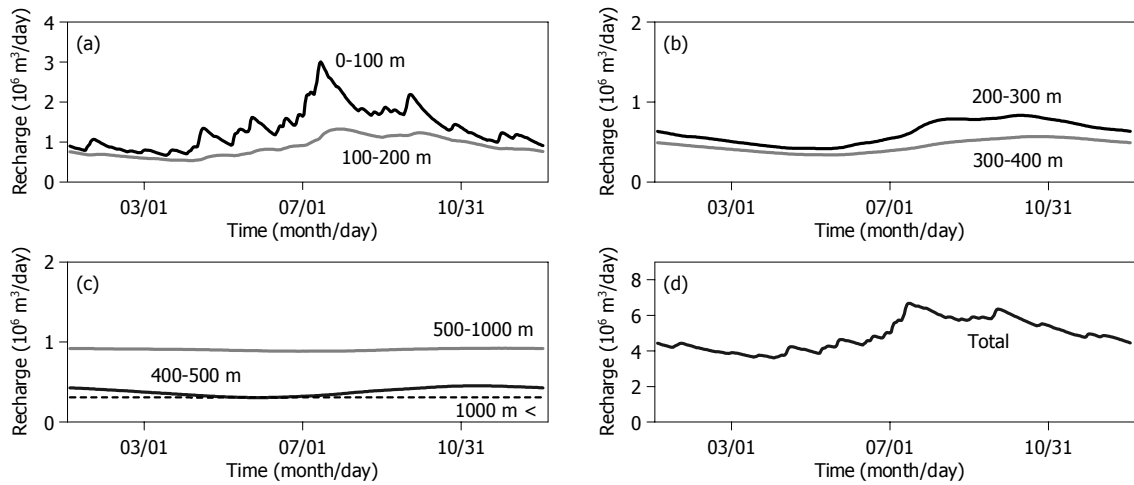


Fig. 11. Variation of recharge time series with altitude: (a) 0-100 and 100-200 m, (b) 200-300 and 300-400 m, (c) 400-500, 500-1000 and higher than 1000 m, and (d) total recharge.

을 보인다(Fig. 10b). 북부지역 시계열 자료에 나타난 함양량의 미약한 변화는 대부분 비포화대의 두께가 얇은 100 m 이내 해안 지역에서의 함양량 변화에 기인한다. 서부지역(Fig. 10c)과 남부지역(Fig. 10d)은 함양량의 계절적 변동성 측면에서 동부지역과 북부지역의 중간적 특징을 보인다.

Fig. 11은 16개 유역별 자료를 고도별로 합하여 제주도 전지역의 함양량 변화를 고도별로 도시한 것이다. 비포화대 두께가 얇은 0-100 m구간의 경우 강수에 의한 반응이 비교적 뚜렷하게 나타났으며, 이러한 변동 특성은 고도가 높아짐에 따라 점차 약해지는 경향을 보였다. 비포화대가 두꺼워지면서 시간지연으로 인해 지하수 함양이 가장 크게 발생하는 시기가 여름에서 겨울로 이동하는 것을 볼 수 있으며, 동시에 분산에 의하여 함양량의 변동성이 약해져서 고도 500 m 이상의 지역에서는 연중 거의 일정한 함양량을 가지는 것으로 나타났다. Fig. 11d는 제주도 전역에서의 지하수 함양량의 시간적 변화를 도시한 것으로 연중 400만 m^3/day 정도의 지하수가 상시 함양되며 풍수기에는 집중 강수의 영향으로 약 700만 m^3/day 까지 증가하는 것으로 산정되었다. 즉, 강수량의 계절적 변화와 관계없이 연중 일정하게 유지되는 400만 m^3/day 의 최소 함양량은 시간지연과 분산을 일으키는 비포화대의 필터적 기능에 의하여 발생하였으며, 그 위에 중첩

된 300만 m^3/day 정도의 변화는 주로 고도 200 m 이내 지역에서 발생한 함양량의 계절적 변화에 기인한다.

4. 결론

제주도는 비포화대가 두껍게 형성된 지역으로 강수에 의한 지하수 함양이 즉각적으로 발생하지 않고 비포화대를 통과하면서 시간지연과 분산이 일어난다. 지하수 함양량은 지하수 모델에서 가장 중요한 입력 변수이지만 기존의 지하수 모델들은 함양의 시간적 변화를 모사하는데 한계를 가진다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고자 비포화대 두께를 고려하여 함양량의 시간적 변화를 모의할 수 있는 모델을 개발하였다. 제시된 모델은 컨벌루션기법을 이용하며 비포화대 두께, 함양속도, 분산지수를 입력 자료로 사용한다. 이 모델을 통해 획득한 지하수 함양 시계열 자료는 실제 관측된 지하수위 변동 패턴과 매우 유사한 시간적 변화가 나타났다. 본 모델은 제주도와 같이 비포화대의 두께변화에 따라 고도별로 특징적인 지하수 함양 패턴을 보이는 지역에 잘 적용될 수 있으며, 지하수 흐름 모델 개발 시 함양 시계열 자료를 생성하는 모듈로 활용될 수 있다. 하지만 지하수위 변동 자료로부터 필터의 특성 값을 구하는 방법은 대수층의 수리상수 및 비포화대의 두께에 따라 신뢰도가 크게 달라질 수 있으므로 이에 대한 검증이 필요하며 실제 지하수

모델에 적용 시 이를 고려하여 함양 시계열 자료를 생성하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 ‘제주형 물순환 해석 및 수자원 관리기반 구축’ 연구단의 제2세부과제 ‘제주형 지표수-지하수 통합수문해석 모형 개발’의 연구결과로서 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Bear, J., 1979, *Hydraulics of groundwater*, McGraw-Hill, pp. 569.
- 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.
- Choi, H., Lee, J., Ha, K., Kim, G., 2011, The study on time series analysis of groundwater data and groundwater recharge in Jeju Island, *The Journal of Engineering Geology*, 21(4), 337-348.
- Hahn, J., Hahn, K., Kim, C., Kim, N., Hahn, C., 1994, Sustainable yield of groundwater resources of the Cheju Island, *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, 1(1), 33-50.
- Jeju Province, K-water, 1993, *Comprehensive planning on development of water resources in Jeju Island*.
- Jeju Province, K-water, 2003, *Comprehensive hydrogeological investigations and groundwater resources in Jeju Island (III)*.
- Kim, N., Chung, I., Won, Y., Lee, J., Lee, B., 2006, The estimation of groundwater recharge with spatial-temporal variability at the Musimcheon catchment, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 11(5), 9-19.
- Kim, S., Park, E., Kim, Y., Kim, N., 2011, A modification of water table fluctuation model considering delayed drainage effect of unsaturated zone, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 16(1), 17-27.
- Koo, M., Kim, T., Kim, S., Chung, S., Kang, I., Lee, C., Kim, Y., 2013, Estimating groundwater recharge using the water-table fluctuation method: effect of stream-aquifer interactions, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 18(5), 65-76.
- Koo, M., Kim, Y., 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), 249-261.
- Koo, M., Lee, D., 2002, A numerical analysis of the water level fluctuation method for quantifying groundwater recharge, *Journal of the Geological Society of Korea*, 38(3), 407-420.
- 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.
- Moon, S., Woo, N., Lee, K., 2002, A study on the relationship between types and recharges of groundwater: Analysis on National Groundwater Monitoring Network data, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 7, 45-59.
- Park, C., Seo, J., Lee, J., Ha, K., Koo, M., 2013, A distributed water balance approach to groundwater recharge estimation for Jeju Volcanic Island, Korea, *Geosciences J.*, DOI 10.1007/s12303-013-0063-6.
- Park, E., Parker, J.C., 2008, A simple model for water fluctuations in response to precipitations, *J. Hydrol.*, 356, 344-349.
- Park, E., 2007, A development of groundwater fluctuations due to precipitations and infiltrations, *Journal of Soil and Groundwater environment*, 12(4), 51-56.
- Yun, S., Jo, Y., Lee, J., 2009, Comparison of groundwater recharges estimated by waterlevel fluctuation and hydrograph separation in Haeon basin of Yanggu, *Journal of the Geological Society of Korea*, 45(4), 391-404.
- Yun, S., Kim, Y., Kim, D., Kim, H., Shin, M., Park, J., Kim, H., Lee, J., 2013, Comparative study on waterlevel fluctuation and recharge characteristic in groundwaters of urban and rural areas in Gangwon Province, *Journal of the Geological Society of Korea*, 49(4), 503-516.