

지하수위 변동 해석모델 개발(I): 모델의 이론

김남원* · 김윤정** · 정일문***

Kim, Nam Won*, Kim, Youn Jung**, Chung, Il-Moon***

Development of Analyzing Model of Groundwater Table Fluctuation(I): Theory of Model

ABSTRACT

In this study, a groundwater table fluctuation method is suggested to predict groundwater level by means of groundwater table fluctuation due to recharge and discharge under unsteady condition. This model analyzes groundwater variation characteristics by using reaction factor related with groundwater flow and specific yield related with recharge. For the test of this model, measured groundwater level at JD Yongdam 1 and JW Konghang for 5 years (2006-2010) were used. At JD Yongdam 1, the estimated specific yield was 0.023, and the estimated reaction factor was 0.039. At JW Konghang, the estimated specific yield was 0.009 and the estimated reaction factor was 0.028, respectively. This model can estimate recharge and saturated parameters, thus it is expected that this model would be the proper tool for checking the parameter of hydrologic model and percolation features.

Key words : Groundwater level, Reaction factor, Specific yield, Groundwater recharge

초록

본 연구에서 개발하고자 하는 지하수위 변동 해석모델은 지하수의 흐름과 관련된 반응계수 및 함양형태와 관련된 비산출율을 매개변수로 하여 부정류상태에서의 지하수위 변동특성을 해석한다. 모델의 시험적용을 위해 제주도 한천지역의 JD 용담1과 JW 공항지점의 5년(2006-2010)간의 지하수위 관측자료를 이용하였다. 매개변수 산정결과, JD 용담1지점에서는 비산출율 0.023, 반응계수 0.039로 추정되었고, JW 공항지점에서는 각각 0.009와 0.028로 추정되었다. 본 연구에서 개발한 모델을 이용하면, 지하수위에 의한 함양량 및 포화대에서의 매개변수를 추정할 수 있어 수문모형의 매개변수 및 비포화대에서의 침투특성을 확인하는 수단으로 활용되기를 기대한다.

검색어 : 지하수위, 반응계수, 비산출율, 지하수 함양

1. 서론

지하수위는 지하수 시스템의 변화를 지시하는 기초적인 자료로 지하수의 물리적 상태를 나타내는 값이며 대수층으로의 유입 및 함양과 배출, 대수층의 특성에 따라 변동하여 나타난다. 따라서 지하수위의 상승과 하강은 지하수의 함양과 배출을 대변한다고 할 수 있다. 지하수 함양은 수문순환의 한 과정으로써 토양으로 침투한 강수가 토양층과 비포화대를 거쳐 대수층으로 유입되는 과정으로 기상(강우, 온도, 습도, 풍속 등), 토양과 토지이용 특성, 지형, 지하지질 등의 수리지질학적 영향을 받는다. 따라서 같은 지역이라도 국지적으로 다양한 값을 가지므로 지하수 함양량을 산정하기 위해서는 사공간적 가변성을 고려하여 규명되어야 한다(Memon, 1995).

* 정희원 · 한국건설기술연구원 선임연구위원 (nwkim@kict.re.kr)

** 교신저자 · 한국건설기술연구원 연구위원 (Corresponding Author · Korea Institute of Construction Technology · yjkim80@kict.re.kr)

*** 정희원 · 한국건설기술연구원 연구위원 (imchung@kict.re.kr)

Received July 12, 2013/ revised August 7, 2013/ accepted September 25, 2013

이와같이 지하수위는 포화대 상부로의 함양과 직접유출 등이 모두 반영된 자료(Choi and Ahn, 1998)이므로 지하수위의 변동에 대해 분석함으로써 대수층의 특성 및 함양을 규명할 수 있다.

지하수위 변동자료를 이용하여 함양량을 분석하는 방법은 적용하는 개념과 방법에 따라 지하수위 변동법, 지하수위 강하법, 누적지하수위 강하법 등의 다양한 명칭으로 사용되고 있다. 이런 방법들은 특정 상승 또는 하강구간에 대하여 함양을 산정하여 전 구간에 적용하므로 함양량 추정에 있어 과추정의 우려와 단기간의 함양량을 산정할 수 없다는 한계가 있다. 지하수위 변동법은 강수시 발생하는 지하수위의 변화량에 대수층의 비산출률을 곱하여 지하수 함양량을 산출하는 것으로 국내외적으로 적용되는 가장 기본적인 형태로 1920년대부터 이용되고 있다(Choi et al., 2011; Healy and Cook, 2002). 그러나 비산출율의 정확성의 한계로 인해 실제 적용상의 어려움이 있다(Kim et al., 2010). 지하수위 강하법은 지하수위 강하자료를 이용하여 지하수위 월강하량과 최대강하량의 비에 비례하는 지하수 함양량을 산정하는 방법(Choi and Ahn, 1998; Kim et al., 2010)이다. 그러나 모든 매질에 대해 동일한 값을 적용하는 등의 논리적 오류와 비산출율을 이용하지 않기 위해 많은 가정을 하고 있어 논리적, 수학적으론 많은 문제점이 있다(Cho and Park, 2008). 누적지하수위 강하법은 지하수위를 변동시키는 일정기간동안의 누적강수량과 비산출율을 이용하여 함양을 산정하는 방법이다(Moon and Woo, 2001; Kim et al., 2004). 그러나 일정기간 동안의 누적 강수량을 이용할 경우, 지하수의 측면흐름과 배출에 대한 고려를 하지 않는다는 점에서 한계가 드러난다. Cho and Park (2008)에 의해 제시된 대수층의 물수지 방정식에 기초하는 지하수위 변동 모델은 지하수 함양에 기인하는 지하수위 변동폭과 기존 방법에서 이용되는 비산출율 대신에 충전공극율을 이용하여 함양량을 산정하는 방법이다. 제안한 식은 이론적, 논리적 근거를

충분히 제시하고 있으나 매개변수 산정시 정밀한 토양조사 및 실의실험이 필요하다는 단점이 있다. 상기에 기술한 바와 같이 함양량 추정에 대한 많은 연구가 진행되고 있으나 각 산정법들은 수식상의 오류와 적용상의 한계를 지닌다.

이에 본 연구에서는 함양에 의해 변동하는 지하수위 자료를 이용하여 국지적 규모의 단위시간별 지하수위 변동 해석모델을 개발하고자 한다. 개발된 해석모델을 적용하기 위해, 천층 대수층에 대한 관측자료가 비교적 정교한 제주도지역의 한천하류지점을 선정하였으며 제주특별자치도 수자원본부에서 운영 중인 JD 용담1과 JW 공항지점의 지하수위 자료를 이용하였다. 이를 이용하여 각 관측지점의 지하수위의 변동을 좌우하는 매개변수인 반응계수 (reaction factor)와 비산출율(specific yield)을 추정하고 부정류 상태에서의 수위변동 특성에 대하여 해석하였다.

2. 지하수위 변동 해석모델

지하수의 함양량은 기상조건과 토양 및 대수층의 특성 및 지형과 식생분포 및 토지이용과도 관련되어 시공간적으로 변동하며 나타난다(Memon, 1995). 이에 함양량은 토양층과 비포화대를 이동하는 메커니즘에 의해 발생하며 비포화대의 특성에 의해 함양의 양과 형태가 시공간적으로 달라진다. 포화대의 지하수를 포함하는 수문순환과정을 모식화하여 나타내면 Fig. 1과 같으며, (A) 부분은 토양층 부분을, (B)는 토양층 아래의 비포화대 부분을, (C)는 포화대 부분을 나타낸 것이다. 일반적으로 (A), (B) 부분은 지하수 흐름 측면에서 비포화대라고도 하나, 실제 수문순환체계에서는 엄밀히 구분하고 있다(Sustainable Water Resources Research Center, 2010). Fig. 1의 (A) 부분은 Horton (1940)의 가정과 같이 강우강도가 토양층의 침투능보다 크면 표면류가 생기고 침투능보

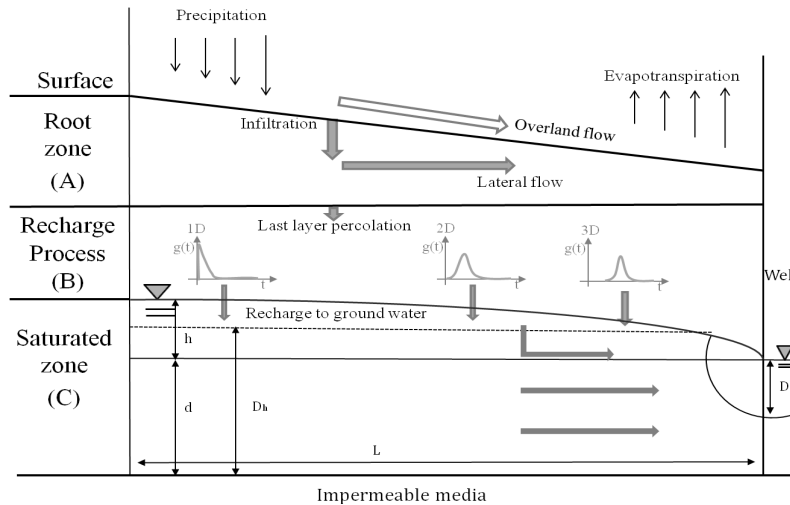


Fig. 1. Conceptualization of Groundwater Table Fluctuation

다 작으면 토양층으로 침투되는 과정을 나타낸 것이다. 이 침투량의 일부는 토양층의 경사면에 따라 유출되고 나머지 일부는 하부 토양층으로 침투된다. 증발산 역시 이 부분에서 활발하게 일어나게 된다. 토양층에서 최종적인 침투는 순수비포화대인 Fig. 1의 (B) 부분을 거치면서 시간적인 지체 및 공간적인 확산을 거쳐 Fig. 1의 지하수면(C)에 도달하게 되는데 이를 함양이라고 한다. 이런 시공간적인 변동성을 지닌 함양시계열로 인해 대수층의 저류량이 달라지므로 이에 따라 지하수위가 상승 또는 하강하게 된다. 따라서 지하수위 자료를 분석하면 대수층의 함양 또는 배출 특성을 파악할 수 있으며 이를 토대로 지하수의 함양량도 규명할 수 있다.

De Zeeuw and Hellinga (1958)는 Hooghoudt (1940)의 지하수 배출 및 배수에 관한 식을 접목한 부정류상태의 지하수위 변동식을 제안한 바 있다. Fig. 1의 (C)를 보면, 상부층에서 유입되는 함양량에 의해 상승한 지하수위는 대수층내에 존재하는 우물 또는 배수로에 의해 지하수가 배출되면서 다시 하강한다. 따라서 지하수위 변동은 지하수의 함양과 배출에 의한 대수층의 특성 및 저류량의 변화에 따라 발생한다. Hooghoudt (1940)는 침투된 지하수가 함양되면 지하수의 주 흐름방향으로 이동하고 우물 또는 배수로 인근에서는 방사형흐름이 형성되면서 유출된다는 개념을 이용하여 정류상태에서의 지하수의 수두손실을 설명하였다.

여기서 수두 손실은 수평과 방사상흐름으로 구분되며 Eq. (1)과 같이 나타낸다. Eq. (1)에서 우변의 선항은 지하수의 수평흐름을, 후항은 방사상흐름을 설명한다.

$$h = \frac{qL^2}{8KD_h} + q \frac{L}{\pi K} \ln \frac{aDr}{u} \quad (1)$$

여기서 h는 지하수위(L), q는 유출량(L²/T), L은 배수로까지의 길이(L), K는 대수층 수리전도도(L/T), D_h는 평균수두(L), aDr은 indicative geometric parameter로, 형상계수를 지시하는 인자이며 u는 wet entry perimeter로, 배수로 입구에서의 윤변을 나타낸다. 이 때, aDr은 다양한 값을 가지나 흔히 Fig. 1의 d와 같이 적용되며, u는 20~25(cm)폭의 트렌치에서 0.3~0.4의 값을 적용한다. 그러나 Hooghoudt (1940)는 방사상으로 흐르는 지하수는 모두 우물 또는 배수로로 배출된다고 가정하여 Eq. (1)의 우변의 후항인 방사상흐름을 무시하고 수평흐름에 의한 수두손실만 고려하여 Eq. (1)을 Eq. (2)와 같이 간소화하였다.

$$h = \frac{qL^2}{8KD_h} \quad (2)$$

여기서 Dh=d+h/2 와 같이 평균 수두로 적용할 경우, Eq. (2)는 Eq. (3)과 같이 구분된다.

$$q = \frac{8Kdh}{L^2} + \frac{4Kh^2}{L^2} \quad (3)$$

여기서 우변의 선항은 배수면 아래의 흐름을, 후항은 배수면 위의 흐름을 나타내는데, 일반적으로 후항을 무시하고 식을 간소화하여 simple Hooghoudt equation (Eq. (4))로 이용되는데, De Zeeuw and Hellinga (1958)는 이를 이용하였다.

$$q = \frac{8Kdh}{L^2} \quad (4)$$

한편, 부정류상태의 지하수위 변동은 지하수 함양 또는 다른 유역에서의 유입량(R_c)과 배출되는 양(q)의 변화에 따라 지하수위가 변동한다. De Zeeuw and Hellinga (1958)는 이를 비산출율과 보정계수를 이용하여 Eq. (5)와 같이 표현하였다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{R_c - q}{C\mu} = \frac{R_c - q}{0.8\mu} \quad (5)$$

여기서, μ는 대수층의 비산출율을 나타내며, C는 곡선형태의 지하수위 변화율을 직선으로 가정할 때, 발생하는 오차를 보정하는 계수로써 통상적으로 0.8로 나타낸다. 지하수의 흐름이 지하수위의 변화율에 대해 선형관계라고 가정하여 Eq. (5)를 Eq. (4)에 대입하면 Eq. (6)과 같이 부정류상태에서의 지하수 함양과 배출에 관한 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial q}{\partial t} = 10 \frac{Kd}{\mu L^2} (R_c - q) = \alpha (R_c - q) \quad (6)$$

여기서, α는 반응계수(reaction factor)를 나타내며 Eq. (7)과 같이 수리전도도, 비산출율 및 대수층의 특성에 대한 식으로 표현된다.

$$\alpha = 10 \frac{Kd}{\mu L^2} \quad (7)$$

단위시간(Δt)동안의 함양량(R_d)이 일정하다고 가정하여 식을 적분하고 Eq. (4)를 대입하여 h에 대해 정리하면, Eq. (8)와 같이 표현된다.

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

여기서 h_i 는 i 일에서의 지하수위(L), h_{i-1} 는 $i-1$ 일에서의 지하수위(L), Δt 는 단위시간(T), $R_{\Delta t}$ 는 단위시간에서의 대수층 함양량(L)이다.

De Zeeuw and Hellinga (1958)가 제안하는 지하수위 변동식은 Eq. (8)에서 볼 수 있듯 지하수의 변동을 전 지하수위(h_{i-1})와 반응계수, 함양량 그리고 대수층의 비산출율의 관계식으로 표현한다. 이 관계식은 Cho and Park (2008)이 제시한 지하수위 변동 해석모델과 기본 형태는 매우 유사하나, $R_{\Delta t}$ 인 단위시간동안의 함양량을 총강수량의 일정한 비율로 가정하지 않는 것이 다르다. 본 연구에서는 이 식을 지하수위 변동 해석모델의 기본으로 설정하였다.

2.1 반응계수 산정방법

본 연구에서 채택하고 있는 Eq. (8)의 부정류 지하수위 변동 해석모델에는 두 개의 매개변수가 있는데 그 중의 하나가 반응계수(α , reaction factor)로, 대수층에서 지하수의 배출형태를 설명하는 인자이다. Smedema and Rycroft (1983)에 따르면, 반응계수는 함양량의 변화에 따른 지하수 흐름의 직접적인 지표가 되기도 하는데 토양층의 구성형태에 따라 값이 달라진다. 함양에 대한 반응이 느린 토양의 경우 0.1-0.3의 값을 가지며, 반응이 빠른 토양에 대해서는 0.9-1.0의 값을 가지기도 한다.

만약, 함양이 없다고 가정할 때 지하수가 배출됨에 따라 지하수위는 하강하게 되는데, 이때의 감수곡선을 이용하여 반응계수를 산정한다. 다시 말해 Eq. (8)은 함양이 없는 경우($R_{\Delta t}=0$ 일 경우)에 Eq. (9)와 같이 표현되며 지하수위 자료만을 이용하여 반응계수를 산정할 수 있게 된다.

$$h_i = h_{i-1} \exp[-\alpha \Delta t] \quad (9)$$

여기서 단위시간 Δt 를 1 day라 하면 Eq. (10)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\alpha = \ln\left(\frac{h_{i-1}}{h_i}\right) \quad (10)$$

Eq. (10)은 지하수위 감수곡선에서 대수변환된 지하수위의 차가 일정한 선형관계임을 나타낸다. 이것은 무함양기간에서의 실제 지하수위가 Fig. 2의 (a)와 같은 형태로 나타나며 수위를 대수변환하면 Fig. 2의 (b)와 같아지는데 그 경사를 반응계수로 표현한 것이다.

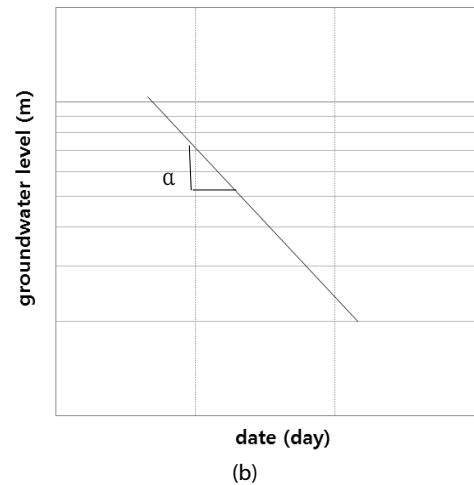
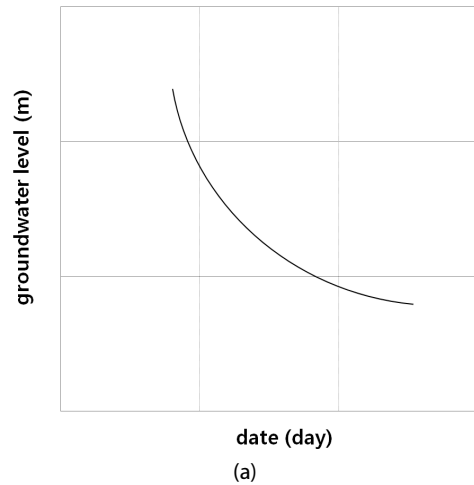


Fig. 2. Concept of Reaction Factor

2.2 비산출율 산정방법

모델의 두 번째 매개변수는 비산출율(μ , specific yield)로, 이는 지하수의 함양특성을 나타내는 주요인자이다. 현재 국내외 많은 연구자들(Brakensiek et al, 1984; Nachabe, 2002; Duke, 1972; Kim et al., 2010; Choi and Lee, 2010)에 의해 비산출율 산정에 대한 연구가 진행되었다. 비산출율을 산정하는 방법으로는 시험에 의한 산정법, 경험식에 의한 방법 그리고 강우 대비 수위 상승폭에 대한 비를 이용하여 산정하는 방법 등이 있다(Kim et al., 2010).

실내시험에 의한 방법은 양수시험을 실시하여 volume-balance method를 이용하여 산정할 수 있다. 그러나 매번 시험을 하기에는 경제성이 떨어지며 조사자나 현장여건에 따라 산정 결과가 크게 좌우된다. 또 샘플코어에서의 잔류수분량을 이용하여 비산출율을 산정하는 방법이 있으나 자연상태에서는 완전 배수상태가 거의 없으므로 오차가 발생할 수 있다(Kim et al., 2010). 경험식에 의한 방법에는 유효토양함수비를 이용한 Nachabe (2002)의 경험

식, 토양별 포장 용수량과 위조점을 이용한 Brakensiek et al. (1984)의 경험식, 심도에 따른 토양수분량을 이용한 Duke (1972)의 경험식 등이 있다. 이들 방법들은 초기 조건에 대한 가정을 포함하고 있으며 개략적인 값으로 표현되는 한계가 있다(Nachabe, 2002; Duke, 1972; Kim et al., 2010). 강우 대비 수위 상승폭에 대한 비를 이용하는 방법은 가장 간단한 방법으로, 수위변동법에 이용된다(Choi and Lee, 2010; Healy and Cook, 2002). 이는 강우 발생 후 지하수위가 상승하는 것은 매질의 공극과 관련이 있다고 보고 강우 대비 상승량을 이용하여 비산출율을 산정하는 방법이다. 그러나 이런 방법은 발생한 강우가 토양층과 비포화대를 통해 이동하는 메커니즘을 설명할 수 없어 비산출율이 과소 또는 과다 산정될 우려가 있다(Kim et al., 2010).

본 연구에서는 Eq. (8)을 이용하여 산정하였는데, 비산출율을 중점으로 정리하면 Eq. (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu = \frac{R_{\Delta t}(1 - \exp[-\alpha \Delta t])}{800\alpha(h_i - h_{i-1}\exp[-\alpha \Delta t])} \quad (11)$$

그러나 Eq. (11)의 비산출율은 반응계수와 함양량을 미리 알아야 하기 때문에 직접 산정할 수 없다. 이에 지하수의 함양에 의해 발생하는 지하수위 상승구간에 대해 유역수문모형(Sustainable Water Resources Research Center, 2010)에서의 마지막 토양층에서의 침투량을 함양량으로 이용하여 산정한 비산출율을 초기치(μ')로 적용하였다.

3. 해석모델의 시험적용

3.1 연구지역

대수층에 대한 특성치 및 관측자료가 비교적 정교한 제주도의 한천유역을 연구지역으로 선정하였으며 지하수위 자료는 제주특별자치도 수자원본부(www.jeuwater.go.kr)에서 운영 중인 JD

용담1, JW 공항지점의 관측자료를 이용하였다(Fig. 3). 본 해석모델은 지하수위 변동 해석모델로, 지하수위 자료를 이용하여 매개변수와 함양량을 산정하기 때문에 실측자료에 대한 의존도가 매우 높다. 따라서 해석모델의 적용성을 파악하기 위해 강우에 대한 수위 변화가 잘 나타나는 관측지점을 선정하였다.

Fig. 4는 JD 용담1과 JW공항지점의 실측 지하수위와 강수량 자료를 나타낸 것이다. 지하수위는 각 지점에서 5년간(2006-2010) 관측한 자료이며 강수량자료는 2007년에서 2010년까지는 제주도 기상청의 AWS (Auto Weather Station)의 제주공항지점의 자료를 이용하였으며 자료가 없는 2006년은 인근의 제주관측소 자료를 이용하였다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 두 지점 모두 강우에 대한 수위 상승 반응이 빠른 것으로 나타났다. Fig. 4의 (a)와 같이 일부 측정자료가 없는 구간이 있으나 본 연구의 목적은 모델의 적용성에 대한 것이므로, 해당구간에 대해서는 선형관계로 가정하

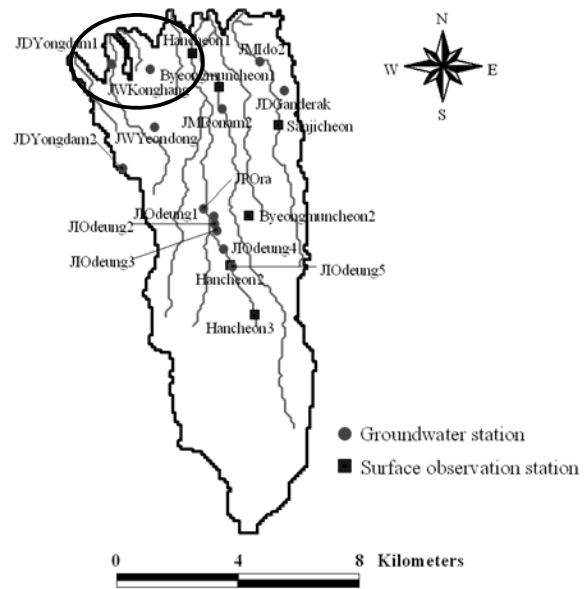


Fig. 3. Location of Groundwater Monitoring Wells in Jeju Island

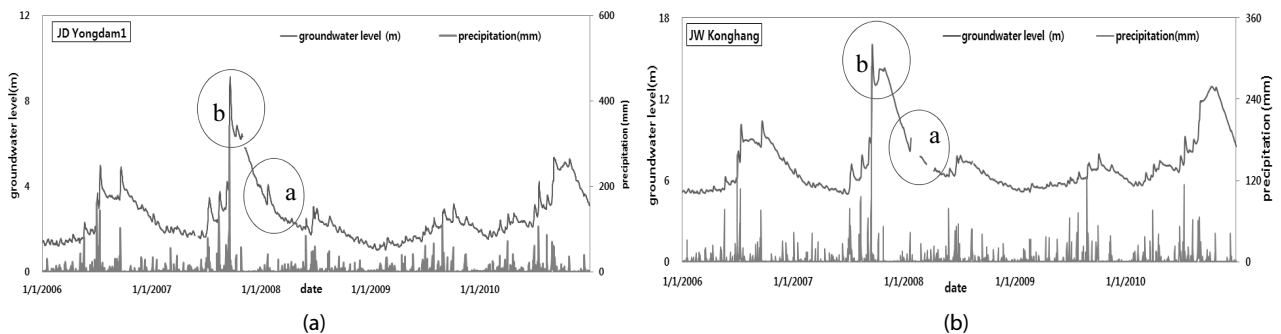


Fig. 4. Observed Rainfall and Groundwater Level at JD Yongdam1(a) and JW Konghang(b)

고 보간하여 분석하였다. Fig. 4의 (b)는 단기간에 강수량이 급증함으로서 타 기간과는 달리 지하수위의 상승부가 첨두형태로 매우 급경사를 이루고 있다. 이 기간에는 단기간에 내린 다량의 강수로 인해 발생한 지하수 상승과 관측정에 강수가 직접적으로 유입됨으로서 과측정되어 나타난 결과로 판단된다. 지형적으로 인접한 두 관측지점은 강수와 지하수위 변동 형태가 유사하여 관측기간 중 2006년과 2007년 강우량의 급증으로 인해 야기된 지하수위의 상승 형태도 비교적 유사하게 나타났다.

3.2 매개변수 산정

본 절에서는 지하수위 변동 해석모델의 두 매개변수에 대한 추정과정을 기술하고자 한다. Fig. 5는 매개변수의 추정과정을 개략적인 모식도로 나타낸 것이다. 무강우기간과 함양기간을 선정하여 매개변수의 초기치를 산정한다. 이를 지하수위 변동 해석모델을 통해 산정한 함양량을 수문모형의 침투량과 비교·검정하여 최적의 매개변수를 추정한다.

3.2.1 반응계수의 초기치(α') 산정

지표하로 침투된 강우는 침투나 우회흐름(bypass flow)에 의해 최하부 토양층으로 이동하며 비포화대를 거치는 동안 토양층내 존재하는 시간과 대수층으로 흘러가는 시간사이의 지체시간(lag time)이 발생하는데 이는 지하수면의 깊이와 비포화대와 지하의 지질구조의 수리특성에 따라 좌우된다(Sustainable Water Resources Research Center, 2010).

반응계수 산정시 함양이 없는 기간의 지하수위 감수곡선을 이용한다. 그러나 상기에 기술한 비와 같이 강우는 토양층과 비포화대를 이동하는 매커니즘에 의해 일련의 함양 시계열로 지하수에 유입되므로 무강우기간이 무함양기간과 같다고는 단정하기는 어렵다. 그러나 정확한 무함양기간을 선정하는데는 어려움이 있어 무강우기간이 무함양기간이라는 가정하에 Eq. (10)을 이용하여 반응계수의 초기치(α')를 추정하였다. Fig. 6을 보면, 초기치(α')는 반응계수

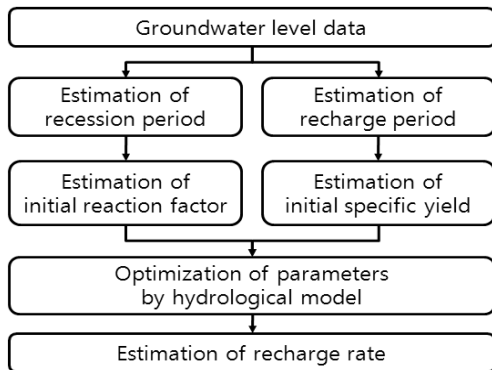


Fig. 5. Procedure for Estimating Parameters

의 최소값으로, 지하수위 감수곡선이 지체된 함양에 의해 지하수위 변동폭이 작아지므로 실제 반응계수(α)는 그와 같거나 큰 값으로 나타날 것이다.

지하수위 관측자료 중 무강우기간을 선정하고 그 기간에서의 반응계수를 추정하여야 한다. 본 연구에 서는 강우 후 연속적인 수위강하가 일어나는 구간을 설정하여 함양이 아닌 타 영향으로 인해 수위가 유지되거나 상승하는 구간은 선정에서 제외하였다.

3.2.2 비산출율의 초기치(μ') 산정

비산출율은 암석 또는 토양의 체적에 대한 중력배수에 의해 암석 또는 토양이 배출할 수 있는 물의 체적의 비율을 의미한다(Fetter, 2000). 일반적으로 지하수위는 강우 작용에 대한 결과로써 강우 후 매질내의 공극을 채우면서 지하수위가 상승하게 되므로 강우 대비 수위 상승량은 비산출율을 의미하게 된다(Kim et al., 2010). Fig. 7을 살펴보면, 지하수의 배출에 의해 하강하던 지하수위가 함양에 의해 단위시간(Δt)동안 Δh 만큼 상승하게 된다. 이때의 상승폭(Δh) 중 일부인 Δdw 는 지하수의 배출특성인 반응계수의 영향에 따라 그 변동폭이 결정된다. 다시 말해 반응계수가 커지면 감수곡선이 급경사를 이루면서 Δdw 가 커지게 되는데 이는 반응계수가 비산출율에 영향을 준다는 것을 의미하며 Eq. (12)에서도 비산출율이 함양량과 반응계수에 대한 함수라는 것을 알 수 있다.

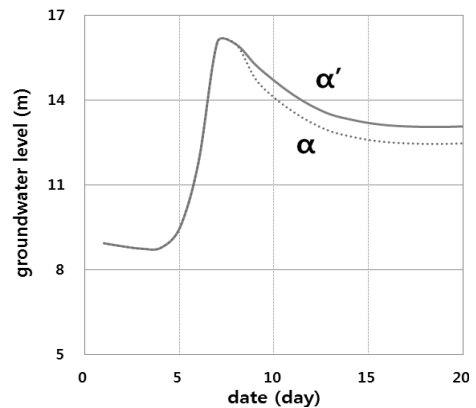


Fig. 6. Estimation of Reaction Factor

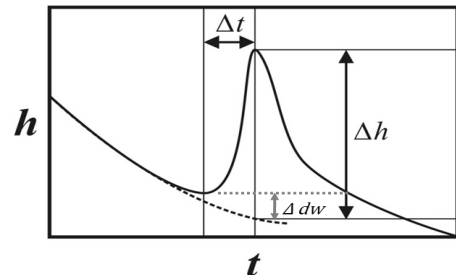


Fig. 7. Estimation of Specific Yield

앞서 기술한 바와 같이 마지막 토양층의 침투량이 지하수로 함양된다는 가정 하에 수문모형의 침투량을 적용하여 비산출율의 초기치(μ')을 산정하였다. 여기서 사용된 수문모형은 SWAT-K (Sustainable Water Resources Research Center, 2010)로써 한천 유역에 기적용된 침투량(Chung et al., 2011)을 이용하였고 앞서 계산된 반응계수 초기치를 이용하여 비산출율을 계산하였다. 이렇게 계산된 비산출율을 초기치로 가정하는 것은 수문모형에서 추정된 침투량 역시 임의성을 가지므로 이를 통해 정확한 매개변수를 산정하기 어렵다. 따라서 산정된 비산출율의 초기치는 구간별 지하수 위 변동 자료와 수문모형의 침투량을 이용하여 보정을 거쳐 지하수 위 변동 해석모델에 적용하여야 한다.

3.2.3 반응계수와 비산출율의 결정

제주도 한천유역의 JD 용담1, JW 공항 관측지점에서의 지하수 위 자료를 이용하여 산정한 최적 매개변수 값을 Table 1에 나타내었다. 추정된 비산출율을 살펴보면 JD 용담1지점에서 0.023, JW 공항지점에서 0.009로 나타났다. 비산출율이 강우로 인해 발생한 함양에 대한 인자라는 것을 감안할 때 강수량에 대한 지하수의 함양량의 부피가 다르다는 것을 나타낸다. 두 관측지점은 서로 인접한 지역에 위치하고 있으나 대수층의 매질에 따라 침투되는 시계열이 달라지므로 지하수의 함양도 달라진다는 것을 나타낸다. 반응계수는 지하수위 감수곡선에서 초기값을 선정하고 시행착오법(trial and error)을 이용하여 매개변수를 최적화하였으며 그 결과, JD 용담1지점에서는 0.039, JW 공항지점에서는 0.028로 분석되었는데 이는 JW 공항지점보다 JD 용담1지점이 함양된 지하수의 배출이 빠르다는 것을 나타낸다. Fig. 4에서도 강우로 인해 발생한 함양으로 상승한 지하수위가 하강할 때 JD 용담1지점이 JW 공항에 비해 더 급경사를 보이는 것으로 알 수 있다. 이것은 부근의 지점이라도 유동형태에 따라 함양된 지하수가 다른 형태로 배출될 수 있음을 나타낸다. 그러나 이와 같은 비슷한 지점에서 다른 배출형태가 나타나는 것이 이 지역에서의 국한적인 현상인지 대수층의 일반적인 현상인지에 대해서는 분명치 않다.

4. 해석모델의 효율성 및 재현성

Fig 8은 두 지점(JD 용담1과 JW 공항)에서 재현한 모의 지하수위를 실측자료와 함께 도시한 결과이다. 전반적인 관측기간에서

Table 1. Finalized Parameters

location	reaction factor (α)	specific yield (μ)
JD Yongdam1	0.039	0.023
JW Konghang	0.028	0.009

실측자료에 가까운 지하수위 재현이 가능하다. 그러나 Fig. 8의 a부분을 살펴보면 모의치와 실측치가 다소 차이를 보이는데 이는 실측자료가 있는 지점에서는 추정된 함양량이 적용되어 모의치가 실측치와 유사하게 재현되었으나 자료가 없는 지점에서는 함양량이 '0'으로 추정됨으로써 재현한 모의 지하수위가 실측치와 비교적인 차이를 보였다. 이는 지하수위 자료에 대한 의존도가 높은 변동 해석모델이 결측된 기간에서 누락된 함양량에 의해 재현성이 떨어진 것으로 판단된다.

누락된 함양량이 모델에 미치는 영향을 줄이기 위해 JW 공항지점의 지하수위 관측자료를 선형보간하여 분석하였다. Fig. 9는 보간된 지하수위 자료를 이용하여 지하수위를 재현한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 8의 a와 Fig. 9의 a를 비교하면 결측자료를 그대로 이용할 경우보다 보간된 자료를 이용할 때, 실측치에 더 가까운 모사가 가능하였다. 이는 개발한 지하수위 변동 해석모델이 지하수위 변동자료에 크게 의존하므로 자료의 신뢰성이 매우 중요한 요소라는 것을 말해준다.

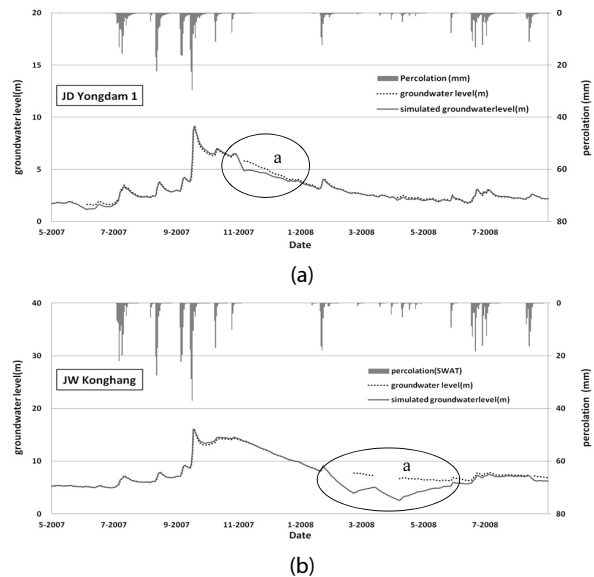


Fig. 8. Observed and Simulated Groundwater Levels at JD Yongdam1(a) and JW Konghang(b)

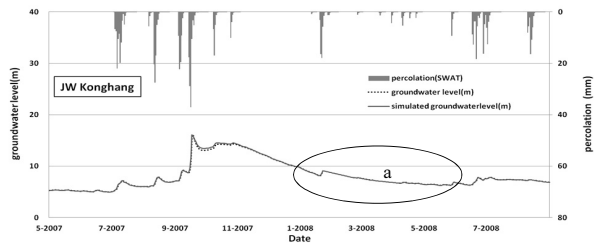


Fig. 9. Interpolated and Simulated Groundwater Levels at JW Konghang

5. 요약 및 결론

본 연구는 부정류상태에서의 지하수 함양과 배출에 따른 지하수위 변동 및 함양을 예측하는 지하수위 변동 해석모델(groundwater table fluctuation model)을 개발하고자 하였으며 이는 De Zeeuw and Hellinga (1958)가 제안한 함양과 배수에 의한 지하수위 변동식을 토대하였다. 모델에 적용되는 매개변수는 지하수의 배출형태를 지시하는 인자인 반응계수와 지하수의 함양형태를 나타내는 비산출율로 구성되어있다. 개발한 모델과 관련된 매개변수 추정적 적용성을 평가하기 위해 비교적 강수에 대한 반응이 양호한 제주도 한천지역의 지하수 관측망인 JW 공항, JD 용담1지점의 지하수위 관측 자료(2006-2010)를 이용하였다. 매개변수인 비산출율과 반응계수는 수리지질학적 특성에 따라 시공간적으로 변동성을 가지는 값으로 지하수위의 변동에 의해 표현되며 함양량을 좌우한다. 따라서 JW 공항과 JD 용담1지역의 지하수위 자료의 상승부와 하강부를 이용하여 매개변수를 추정하였으며 수문모형의 결과를 이용하여 보정하였다. 산정한 결과, JD 용담1지점의 반응계수는 0.039, 비산출율은 0.023이며 JW 공항지점은 각각 0.009와 0.028로 비산출율과 반응계수는 다소 차이를 보였다. 이는 두 지점이 인접하여 위치하더라도 침투된 지하수가 함양 및 배출되는 형태는 다를 수 있다는 것을 보여준다. 본 연구의 결과는 지하수위에 의한 함양량 및 포화대에서의 매개변수 추정뿐만 아니라 수문모형의 매개변수 및 비포화대에서의 침투특성을 확인하는 수단으로도 활용되기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업의 연구비 지원(10지역기술혁신B02, 제주수자원연구단)에 의해 수행되었습니다.

References

- Brakensiek, D. L., Rawls, W. J. and Stephenson, G. R. (1984). *Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils*, ASAE, Paper No. PNR- 84-203, St. Joseph, Mich.
- Cho, J. W. and Park, E. G. (2008). "A study on delineation of groundwater recharge rate using water-Table fluctuation and unsaturate zone soil water content model." *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, Vol. 13, No. 1, pp. 67-76 (in Korean).
- Choi, B. S. and Ahn, J. G. (1998). "A study on the estimation of regional groundwater recharge ra." *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, Vol. 5, No. 2, pp. 57-65 (in Korean).
- Choi, H. M. and Lee, J. Y. (2010). "Groundwater level distribution and rainfall response characteristics in haean basin of yangu." *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, Vol. 15, No. 6, pp. 1-8 (in Korean).
- Choi, H. M., Lee, J. Y., Ha, K. C. and Kim, G. P. (2011). "The study on time series analysis of groundwater data and groundwater recharge in Jeju island." *Journal of Engineering Geology*, Vol. 21, No. 4, pp. 337-348 (in Korean).
- Chung, I. M., Na, H. N., Lee, D. S., Kim, N. W., Lee, J. W. and Lee, J. M. (2011). "Spatio-temporal variations in groundwater recharge in the Jincheon region." *Journal of Engineering Geology*, Vol. 21, No. 4, pp. 1347-1355 (in Korean).
- De Zeeuw, J. and Hellinga, W. F. (1958). "Precipitation and drain." *Agricultural Magazine*, Vol. 70, pp. 405-421 (in Korean).
- Duke, H. R. (1972). "Capillary properties of soils-Influence upon specific yield." *Transaction of the ASAE*, Vol. 15, pp. 688-691.
- Fetter, C. W. (2000). *Applied Hydrogeology*, Prentice-Hall press.
- Healy, R. W. and Cook, P. G. (2002). "Using groundwater levels to estimate recharge." *Hydrogeology Journal*, Vol. 10, No. 1, pp. 91-109.
- 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).
- Horton, R. E. (1940). "An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity." *Soil Science Society of America Proceedings*, Vol. 5, pp. 399-417.
- Kim, G. B., Choi, D. H. and Jeong, J. H. (2010). "Considerations on the specific yield estimation using the relationship between rainfall and groundwater level variations." *Journal of Engineering Geology*, Vol. 20, No. 1, pp. 61-70 (in Korean).
- Kim, G. B., Yi, M. J., Kim, J. W., Lee, J. Y. and Lee, K. K. (2004). "Evaluation of estimating groundwater recharge using waterlevel data obtained from the national groundwater monitoring stations." *Journal of Engineering Geology*, Vol. 14, No. 3, pp. 313-323 (in Korean).
- Memon, B. A. (1995). "Quantitative analysis of springs." *Environmental Geology*, Vol. 26, pp. 111-120.
- Moon, S. K. and Woo, N. C. (2001). "Estimation of groundwater recharge ratio using cumulative precipitation and water-level change." *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, Vol. 6, No. 1, pp. 33-43 (in Korean).
- Nachabe, M. H. (2002). "Analytical expressions for transient specific yield and shallow water table drainage." *Water resources research*, Vol. 38, No. 11, pp. 11-1-11-7.
- Richard W. H. (2010). *Estimating groundwater recharge*, Cambridge university press.
- Smedema, L. K. and Rycroft, D. W. (1983). *Land drainage-planning and design of agricultural*, Drainage Systems, Cornel University Press, Ithaca, NY.
- Sustainable Water Resources Research Center (2010). *Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model report*.
- Sustainable Water Resources Research Center (2010). *Main structure of Korean watershed hydrologic model SWAT-K report*.