

지하수위 변동 해석모델을 이용한 제주지역의 수리지질 매개변수 민감도 분석

김남원* · 김윤정** · 정일문***

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

Sensitivity Analysis of Hydrogeologic Parameters by Groundwater Table Fluctuation Model in Jeju Island

ABSTRACT

In this work, we have carried out a sensitivity analysis of hydrogeologic parameters such as reaction factor and drainable pore space in groundwater table fluctuation model and have found characteristics of parameter distribution according to the altitude. We found that drainable pore space which is hydrogeologic parameter of aquifer didn't show any trend with altitude while reaction factor which is groundwater flow characteristic showed clear trend with altitude. To find a sensitivity of parameters, we compared RMSE of estimated groundwater recharges by using the mean value and linear relationship of parameters. As results, the linear equation derived for entire watersheds could be applied to estimate parameters for ungauged watershed. Furthermore, the features of parameter distribution can be used to predict hydrogeologic parameter in ungauged watersheds and it is expected that those features could be used for a basic data for groundwater modeling.

Key words : Groundwater level, Recharge, Sensitivity analysis, Groundwater table fluctuation model

초록

지하수위 변동 해석모델을 이용하여 제주지역의 대수층 수리지질 매개변수인 반응계수와 배수가능공극을 추정하고 고도에 따른 분포특성 및 민감도분석을 실시하였다. 대수층 매질의 특성치인 배수가능공극은 고도에 대해 일정한 경향성을 보이지 않으며 지하수의 흐름 특성치인 반응계수는 고도가 높아질수록 낮아지는 뚜렷한 경향성을 보였다. 매개변수들에 대한 민감도를 알아보기 위해 매개변수의 평균 및 관계식을 이용하여 추정합양량을 비교한 결과, 전 유역(강정천, 외도천, 천미천, 한천)에 대한 매개변수 관계식을 적용하여도 미계측 유역내 매개변수의 추정이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구의 결과를 통해 대표적인 수리지질 매개변수의 분포특성을 파악하여 미계측지역에서 매개변수를 추정함으로써 지하수모델링의 기초자료로도 활용 가능할 것으로 기대한다.

검색어 : 지하수위, 지하수 함양, 민감도 분석, 지하수위 변동 해석모델

1. 서론

제주도는 여러 화산활동으로 인해 생성된 화산섬으로 우리나라 다우지역 중의 하나임에도 불구하고 한라산을 중심으로 급경사를 형성하는 지형특성과 투수성이 높은 매질의 지질특성 등으로 인해 건천상태의 하천이 발달하였다. 또한 제주지역은 내륙과는 달리

* 정희원 · 한국건설기술연구원 선임연구위원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · nwkim@kict.re.kr)

** 교신저자 · 한국건설기술연구원 연구원 (Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · yjkim80@kict.re.kr)

*** 정희원 · 한국건설기술연구원 연구위원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · imchung@kict.re.kr)

Received March 24, 2014/ revised April 19, 2014/ accepted July 15, 2014

유출률은 낮은 반면 함양율은 높은 특징을 보인다(Sustainable Water Resources Research Center, 2010; Kim et al., 2013b). 이에 제주지역은 지하수에 대한 의존율이 높아 지하수 이용 및 관리를 위한 함양량 추정이 매우 중요하다.

지하수의 함양량을 추정하는 방법에는 하천의 유량자료에서 기저유출을 분리하여 추정하는 기저유출분리법, 질량보존법칙을 기초하여 각 수문성분값을 추정하여 함양량을 추정하는 수문성분 분리법, 삼중수소와 같은 동위원소를 추적자로 이용하여 함양을 추정하는 환경/추적자 활용법이 있다. 이외에도 지하수위 자료를 활용하여 함양량을 산정하는 지하수위 변동법이 있다. 지하수위 변동법은 적용범위가 넓고 개념적으로 단순하여 흔히 이용되나 적용하는 개념과 방법에 따라 지하수위 강하법, 지하수위 변동법, 지하수위 변동 해석모델 등 다양하게 분류된다(Choi and Ahn, 1998; Healy and Cook, 2002; Cho and Park, 2008; Yun et al., 2009; Kim et al., 2013b; Kim et al., 2013c). 상기의 지하수위 변동법 중 Kim et al. (2013b; c)이 제안한 지하수위 변동 해석모델은 지하수위 관측자료와 수문모형의 침투량을 이용하여 매개변수인 반응계수와 배수가능공극을 직접 추정할 수 있으며 지하수의 함양시계열을 재현할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 해당

모델을 이용하여 수리지질학적 매개변수(반응계수, 배수가능공극)를 추정하고 지역적인 분포특성을 분석하여 미계측구역의 매개변수 예측에 활용하고자 한다. 추정한 매개변수의 적용하였을 때, 모델의 신뢰도를 판단하기 위해 매개변수 변화에 대한 추정 함양량의 민감도를 분석하였다.

해석모델의 매개변수에 대한 지역적인 특성분석은 Kim et al. (2014)에 의해 이미 검토된 바 있으나 그 적용 대상이 한천유역으로 국한되었다. 이에 본 연구에서는 기개발된 해석모델을 제주도 중부 및 동부지역과 같이 비교적 넓은 유역에 적용함으로써 수리지질학적 매개변수 추정방법을 점검하고 매개변수의 지역적인 특성에 대한 일반성을 구하고자 하였다. 또 수리인자들의 분포특성과 각 매개변수에 따른 추정함양량을 이용하여 미계측지역에 대한 예측 가능성을 파악하고자 하였다. 예측한 매개변수는 향후 지하수 해석에 필요한 모델링의 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 연구 지역

제주도의 중부 및 동부지역에 해당하는 강정천, 의도천, 천미천, 한천유역에 위치하는 관측정에서 일별 지하수위 관측자료를 수집

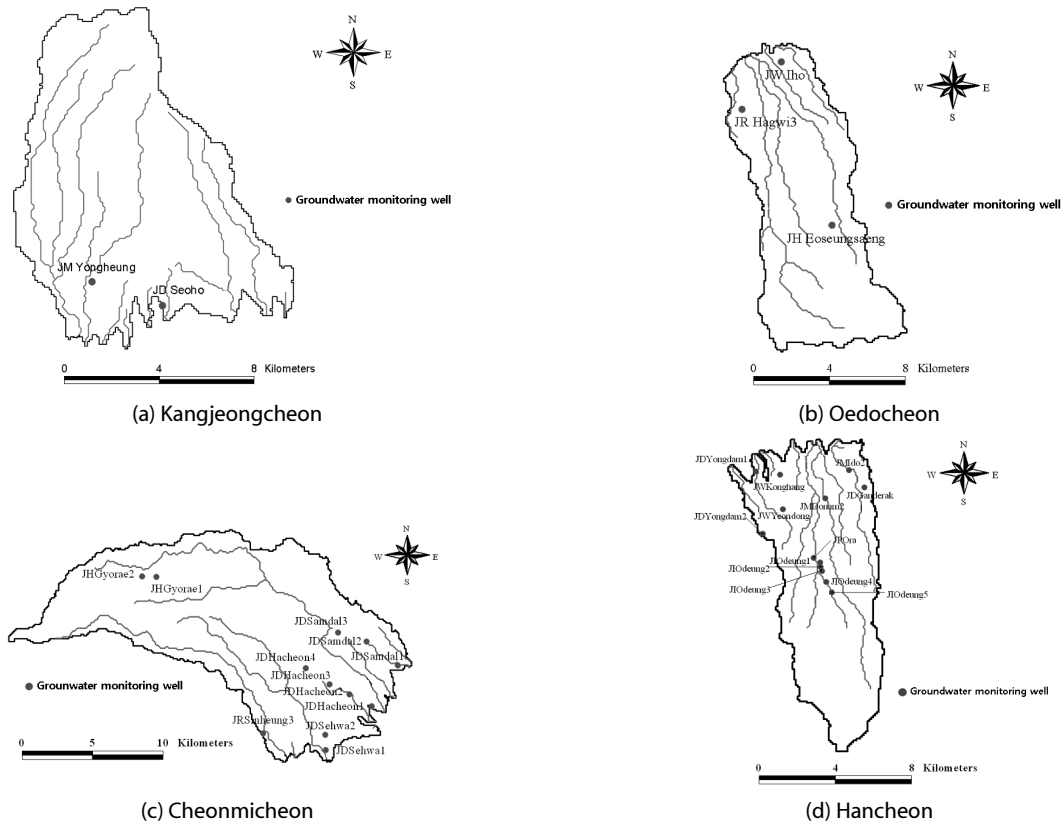


Fig. 1. Location of Groundwater Monitoring Wells in Study Area

Table 1. Summary of Groundwater Monitoring Wells

Station	Basin	Elevation(m)
JM Yongheung	Kangjeongcheon	128.49
JW Iho	Oedocheon	35.43
JR Hagwi3		115.63
JH Gyorae2	Cheonmicheon	438.99
JD Sehwa1		23.31
JD Sehwa2		58.10
JD Samdal1		27.96
JD Samdal2		90.21
JD Samdal3		126.13
JR Sinheung3		80.55
JD Hacheon1		25.78
JD Hacheon3		87.45
JD Hacheon4		117.99
JD Yongdam1		38.46
JW Konghang		47.43
JM Ido2		58.07
JM Donam2	Hancheon	86.00
JW Yeondong		105.14
JD Ganderak		112.18
JD Yongdam2		162.20
JP Ora		233.09

하였다(Fig. 1). 관측정은 제주도특별자치도 수자원본부에서 운영 중이며 해수침투 및 지하수위 관측정 등으로 활용되고 있다. 본 연구에서 적용하는 지하수위 변동 해석모델은 일단위의 지하수위 변동양상을 이용하여 대수층에 대한 매개변수를 산정하므로 지하수위자료에 대한 의존도가 높다. 수집한 2006년부터 2010년까지의 지하수위 관측자료(해수면기준) 중 자료가 없는 기간이 길거나 지하수위의 양상을 예측하기 어려운 구간에서 결측이 발생한 관측 자료는 매개변수 추정시 분석에서 제외하였다. 또 자료의 관측기간이 1년 미만이며 지하수위 변동이 없어 매개변수 추정이 어려운 관측지점도 제외하여 관측자료에 대한 신뢰도를 높이고자 하였다.

Table 1은 연구지역내에 위치하는 지하수위 관측정 중 분석에 적용된 지점에 대한 제원을 나타낸 것이다. 한천유역에는 13개 지점의 지하수위 관측정이 있으나 관측자료가 충분하고 지하수위 변동이 자연적인 함양에 의한 것이라 판단되는 8개 지점만 분석에 적용하였다(Kim et al., 2014). 강정천유역의 JD 서호지점과 외도천유역의 JH 아승생지점은 2009년부터 관측이 시작되었으나 관측 기간동안 강우 발생에 의한 지하수위 변동양상이라고 명확히 규명하기 어려워 분석에서 제외하였으며 결측구간이 많아 지하수위 변동 추세를 판단하기 어려운 천미천유역의 JD 하천2 지점과 지하수

위 변동 형태가 자연적 함양에 의한 것이라 보기 어려운 JH 교래지점도 제외하였다. 선정된 지점(관측정)들의 위치를 살펴보면 강정천과 외도천유역의 관측정은 유역 하류에 위치하며 한천과 천미천은 각 유역의 상류에도 일부지점이 위치하고 있다.

지하수위 변동 해석모델은 연속적인 지하수위 관측자료를 이용하여 매개변수를 추정하는 모형으로, Kim et al. (2013b)에 따르면 지하수위 변화양상이 예측 가능한 기간에서는 결측된 지하수위를 보간하여 추정하는 것이 함양시계열 신뢰성을 높일 수 있다. 이에 분석에 적용한 관측지점에서 발생한 일부 결측자료는 지하수 변동 추세에 맞도록 선형보간(linear interpolation)하였다.

3. 분석방법

3.1 지하수위 변동 해석모델

(groundwater table fluctuation model)

Bouwer and Schilfgaard (1963)에 따르면 함양이 없는 경우의 지하수 배출량은 지하수위의 감소율과 관련이 있다. 지하수 함양이 없는 경우, 대수층에서의 유입(Q_{in}) 및 유출량(Q_{out})의 차에 의해 저유량(ΔQ)이 변화하여 지하수위가 일정하게 유지되거나 하강하게 된다. 또 지하수의 함양(R)이 발생하는 경우, 대수층으로의 유입량($R+Q_{in}$)이 늘어남으로써 대수층에서 배출되는 양(Q_{out})과 함께 저유량(ΔQ)도 증가하여 지하수위가 상승하게 된다. 지하수 함양이 다시 감소하면 유출량과 지하수위 역시 감소한다는 개념을 토대로 지하수위 변동 해석하고자 한다.

지하수위 변동 해석모델은 지하수위 변동자료를 해석하여 대수층의 수리지질학적 매개변수인 배수가능공극(drainable pore space, -)과 반응계수(reaction factor, $days^{-1}$)를 추정하는 방법으로 지하수의 변동은 지하수의 함양에 의해서만 발생한다는 가정하였 으며 모델에 적용한 함양량은 통합수문모형을 이용하여 최하부 토양층의 침투량을 이용하였다. 본 해석모델은 배수시설 설계시 지하수의 함양에 의해 상승 및 하강하는 지하수위를 고려하여 배수관으로 배출되는 지하수의 양을 조절하기위해 고안되었는데 본 연구에서는 대수층에서의 함양과 배출에 의한 지하수위 변동을 해석하기위해 적용하였다(Eq. (1)).

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

여기서 h_i 는 i 일에서의 지하수위(L), h_{i-1} 은 $i-1$ 일에서의 지하수위 (L), Δt 는 단위시간(T), $R_{\Delta t}$ 는 단위시간에서의 대수층 함양량(L), α 는 반응계수(T^{-1}), μ 는 배수가능공극(-)을 나타낸다.

배수가능공극은 강우의 유무에 의해 토양층에서의 침투량이 변화함에 따라 지하수위가 변동하면서 충전 또는 배출되는 공극의

부피를 의미하는데 선행강우조건이나 토양의 상태에 따라 시공간적으로 다양하게 나타난다(Sustainable Water Resources Research Center, 2010). 전술한 바와 같이 지하수위 변화는 강우에 의한 침투량의 변화만으로 발생한다고 가정하여 강우사상의 발생으로 야기되는 토양 침투량과 지하수위 상승폭을 이용하여 매개변수를 추정하였다. 반응계수는 함양에 의해 상승한 지하수위가 하강하면서 배출되는 지하수의 변화율을 나타내는 인자로 강우에 의한 침투량이 없거나 줄어들어 지하수위가 감소하는 구간에서의 변화량을 이용하여 산정한다(Kim et al., 2013b). 연구에 적용된 수문모형인 SWAT-K는 동일한 토양형 및 토지피복을 가지는 수문응답단 위인 HRU (Hydrologic Response Unit)별로 강수차단, 지표유출, 침투, 증발 및 증산, 중간유출을 비롯하여 토양 수분 변화량에 따른 물수지를 계산함으로써 토양층에서의 침투량을 추정할 수 있다(Kim et al., 2009; Sustainable Water Resources Research Center, 2010; Chung et al., 2011; Kim et al., 2013a; Kim et al., 2013d). 이에 추정된 모델의 매개변수들은 수문모형의 침투량을 이용하여 보정하여 최적화하였다.

지하수위 관측자료를 이용하여 지하수의 함양특성과 매개변수의 분포특성을 파악하는 시도는 Kim et al. (2014)에 의해 한천유역에 제한적으로 적용된 바 있다. 이번 연구에서는 모델의 적용범위를 제주도 중부 및 동부지역으로 확장하여 유역별 수리지질학적 매개변수의 특성을 규명하고 미세측 지역에 대한 매개변수의 추정가능성에 대해 논하고자 한다.

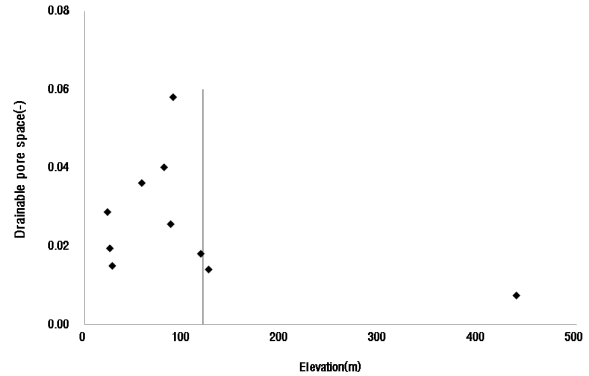
4. 분석결과

4.1 배수가능공극(drainable pore space)

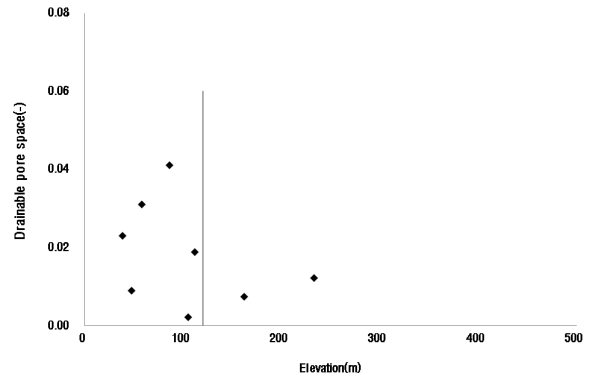
모델의 매개변수 중 하나인 배수가능공극은 매질의 공극이 지하수의 함양에 의해 지하수로 포화되면서 지하수위가 상승하거나 지하수가 배출되면서 하강할 수 있는 공극의 부피를 말하며 토양의 구조나 상태, 지하수면의 위치 및 대수층의 매질에 따라 다양한 범위의 값을 가진다(Smedema and Rycroft, 1983). 일반적으로 지하수의 함양이나 배출에 대해 지하수면의 변동폭이 클수록 배수가능공극은 작아진다. 이는 토양내 공극의 부피가 작아서 비교적 적은 함양량으로도 지하수위를 상승시킬 수 있기 때문이다. 배수가능공극은 토양(또는 암석)의 체적에 대한 중력배수 가능한 지하수의 체적의 비를 나타내는 비산출율과 그 개념이 유사하여 동일한 의미로 해석하기도 하며(Fetter, 2000; Kim et al., 2013b) 본 연구에서도 동일한 의미로 적용하고 있다.

제주도는 한라산을 중심으로 방사형의 지형구조를 보이는데 지하수면은 지형구조에 대한 상관성이 매우 높아 지형과 유사한 형태로 나타난다. 이에 지하수위 관측지점에서 산정한 배수가능공

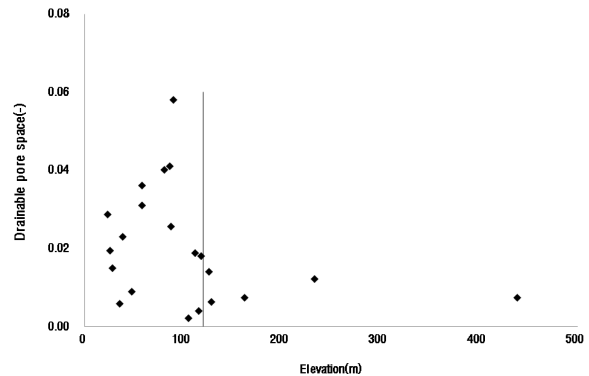
극을 전 유역(4개 유역) 및 각 유역별로 고도에 따라 도시하여 분포특성을 파악하였다(Fig. 2). 타 유역에 비해 비교적 분석 자료의 수가 적은 강정천과 외도천유역에 대해서는 구분하여 도시하지 않았다. 배수가능공극은 해발고도 120 m 이하의 비교적 낮은 고도에서는 특정한 경향성을 보이지 않으며 매개변수의 변동폭도 크게 나타났다. 자료의 수가 충분치 않아 명확히 구분할 수는 없으나



(a) Cheonmicheon



(b) Hancheon



(c) 4 basins

(Kangjeongcheon, Oedocheon, Cheonmicheon, Hancheon)

Fig. 2. Distribution of Drainable Pore Spaces According to Altitude

Fig. 2의 수직경계선으로 표기된 120 m 이상으로 고도가 높아지면 배수가능공극의 값은 작아지는 것을 알 수 있다. 물론 120 m 라는 기준은 이 지역에 국한되거나 기준에 대한 모호성이 존재하나 자료를 더 확보하거나 타지역에 적용하는 등의 추가 연구가 진행된다면 좀 더 구체적인 해석이 가능할 것으로 판단된다.

또, Smedema and Rycroft (1983)는 배수가능공극과 수리전도도는 모두 토양 공극의 구조에 의해 결정되므로 서로간의 연관성이 존재한다고 하였다. 따라서 배수가능공극의 분포특성을 규명하기 위해서는 매질의 특성인 지질, 지질구조 및 대수층의 수리인자들과의 상관성도 파악해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다.

4.2 반응계수(reaction factor)

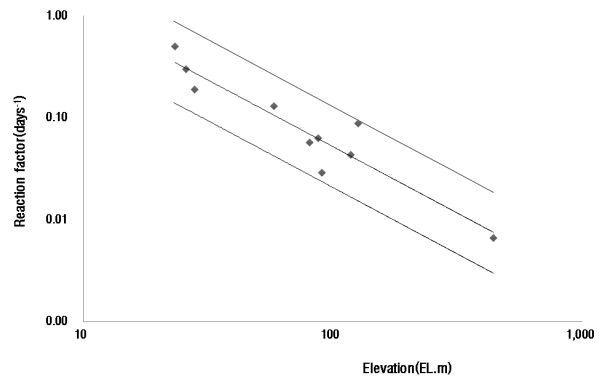
해석모델의 매개변수 중 하나인 반응계수는 함양(또는 침투)에 의해 나타나는 지하수 배출의 반응형태를 직접적으로 나타내는 지표이며 지하수 함양에 의해 상승된 지하수위가 배출되면서 나타나는 지하수위 감수곡선의 기울기로 표현할 수 있다(Smedema and Rycroft, 1983, Kim et al., 2013b). 따라서 Eq. (1)에서 함양이 없다고 가정한다면 지하수위 감수기간에서의 관측자료를 이용하여 반응계수를 산정할 수 있다(Eq. (2)).

$$\alpha = \ln\left(\frac{h_{i-1}}{h_i}\right) \quad (2)$$

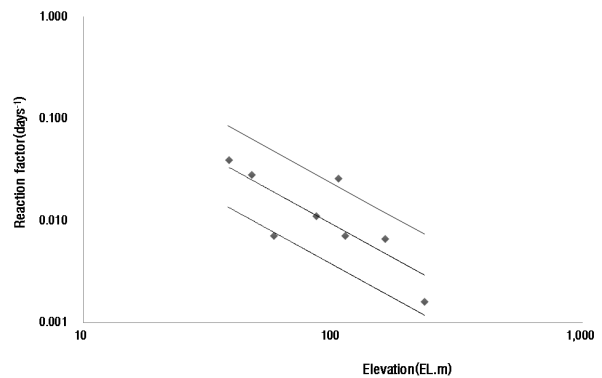
흔히 함양에 대한 반응이 느린 토양이나 유역에서는 0.1~0.3 (day⁻¹)정도이며 반응이 빠른 토양에서는 0.9~1.0 (day⁻¹)까지도 나타난다(Sustainable Water Resources Research Center, 2010). 그러나 이 반응계수의 범위는 배수시설 설계시 배수로와 인접한 대수층에서의 지하수 배출형태를 표현하는 것으로, 자연적인 지하수의 이동 및 변동에 적용한다면 함양에 대해 지하수의 배출반응은 더 느리게 나타나며 반응계수도 작아질 것으로 사료된다. 또한 반응계수는 Eq. (2)에서 알 수 있듯 지하수위가 감소하는 동안의 지하수위차를 이용하여 산정하므로 지하수위의 절대값에 영향을 받는다. 이는 함양에 의해 발생한 지하수가 변동하는 범위의 기준을 어디에 두느냐에 따라 달라진다. 다시 말해 지하수면을 대상지역의 지질학적 불투수층의 상부면, 해수면 또는 관정의 심도 등 기준을 정하는 것에 따라 반응계수가 달라질 수 있다는 것을 의미한다. 지하수면의 기준면에 대한 영향분석 및 선정기준에 대한 추가연구도 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 3은 천미천과 한천유역, 전 유역을 구분하여 각 유역내 위치하는 관측지점의 반응계수를 고도별로 도시(로그 스케일)하고 분포에 대한 추세선과 추세선에 대한 ±40%의 한계구간을 임의로 선정하여 반응계수의 상하한의 경계선을 도시한 것이다. 상하한

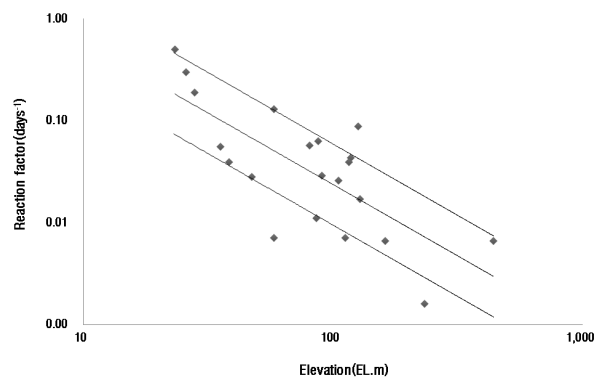
경계선에 대해서는 민감도분석 시 상세히 기술하도록 하겠다. 각 유역별 추세선은 Eq. (3)와 같은 형태를 보이며 천미천유역에서는 b가 1.31, C는 21.56 이며 한천유역에서는 각각 1.35와 4.62로 분석되었다. 추세식은 천미천유역은 멱함수(power function), 한천유역은 지수함수(exponential function)이며 결정계수(R²)는 각각 0.9와 0.7로 비교적 높게 나타났다. 그러나 천미천과 전 유역에서의 추세식이 모두 멱함수로 분석되어 타 지역과 동일한 조건으로



(a) Cheonmicheon



(b) Hancheon



(c) 4 basins

Fig. 3. Distribution of Reaction Factors According to Altrtude

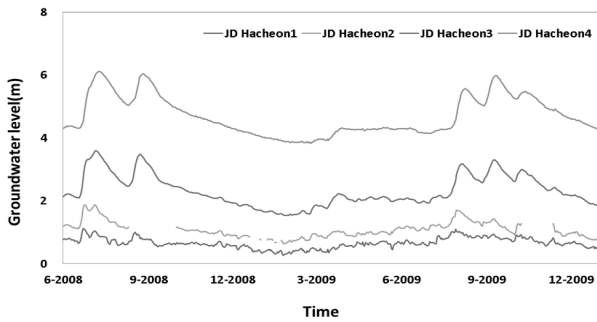


Fig. 4. Fluctuation of Groundwater Level According to Altitude at JD Hacheon 1 ~ 4

비교하기 위해 한천유역은 결정계수가 0.6으로 다소 낮은 멱함수를 채택하였다. 강정천과 외도천유역은 배수가능공극의 경우와 마찬가지로 적은 자료수로 인해 상관성을 파악하기 어려워 유역별로 도시하지 않았다. 전 유역내 위치하는 모든 관측점의 반응계수를 도시한 결과, 추세식의 b는 1.41, C는 15.22로 나타났으며 결정계수는 0.5로 유역별로 분석한 경우에 비해 다소 낮아지는데 이는 분석면적의 증가로 인해 불확실성이 높아졌기 때문으로 판단된다. 그러나 Fig. 3(c)에서 볼 수 있듯 전반적인 경향성은 충분히 파악할 수 있는 것으로 나타났다.

$$\alpha = Cz^{-b} \tag{3}$$

여기서, z는 관측지점의 고도(L)이며, b와 C는 비례상수를 나타낸다. Fig. 4는 천미천 유역내 해안에서 한라산 방향으로 일직선상으로 분포하는 고도가 다른 JD 하천 1~4의 지하수위 변동양상을 도시한 그래프이다. 4개 관측지점에서 지하수위의 상승(또는 하강) 시기 및 기간을 살펴보면 전반적인 변동추세가 유사하게 나타난다. 또 관측지점의 고도가 증가함에 따라 지하수위는 높아지며 지하수위의 진동폭이 작아져 전체적으로 부드러운 곡선형태로 나타나며 지하수위의 상승 및 하강 기간도 고도가 상승함에 따라 길어지는 것을 알 수 있다. 관측지점 중 지하수위 변동 추세를 판단기 어려운 구간에서 결측이 발생한 JD 하천2 지점을 제외하고 나머지 지점들

(JD 하천1, JD 하천3, JD 하천4)에 대한 반응계수를 추정한 결과, 0.30, 0.06, 0.04로 각각 분석되었으며 각 지점의 고도가 25.78 m, 87.45 m, 117.99 m로 높아질수록 낮아지는 경향을 따르고 있었다. 이러한 현상들은 대수층의 매질의 차이에 의한 것일 수도 있으나 같은 유역에서 고도가 높을수록 비포화대의 수직적 길이도 커지므로 침투된 유량이 이를 통과하는 동안 지연시간이 발생하여 지하수의 함양과 배출속도를 늦추는 효과를 주었기 때문이라고 사료된다. 이처럼 지하수위 변동이 다르다는 것은 지하수의 함양 시계열 역시 각 고도별로 달라지며 매개변수도 달리 적용하여야 한다는 것을 의미한다.

5. 모델의 민감도 분석

지하수위 변동 해석모델의 매개변수는 배수가능공극과 반응계수이며 이 인자들에 따라 지하수 함양시계열의 양상이 결정된다 (Kim et al., 2013c). 따라서 해석모델 적용시 매개변수 산정에 있어 신중을 기해야 한다. 본 절에서는 각 매개변수의 변화가 모델의 추정 함양량 및 함양시계열에 미치는 영향정도를 파악하기 위해 민감도 분석을 실시하였다.

Table 2는 민감도 분석에 적용한 배수가능공극에 대한 범위를 나타낸 것이다. Fig. 2에 도시한 바와 같이 전 유역(4개 유역)내 위치하는 21개 지점에서 추정된 최적배수가능공극을 이용하여 민감도 분석에 적용할 상한치와 하한치를 정하고 그에 따른 함양량의 변화정도를 살펴보았다. 자료수가 타 유역에 비해 많은 천미천과 한천유역은 유역별로 별도로 구분하여 적용·분석하였다. 전술한 바와 같이 배수가능공극의 추정치를 살펴보면 지형고도 120 m를 경계로 분포형태가 다소 차이를 보인다. 비교적 낮은 지역에서는 무작위한 분포를, 높은 고도에서는 배수가능공극의 값이 작아지는 것을 알 수 있었다. 이에 본 연구에서는 배수가능공극의 민감도 분석시 고도 120 m 이하의 지점에 대해서는 평균값과 상하한값을 모두 적용하였으며 120m 초과인 지점에 대해서는 자료의 수가 적어 분석결과를 정의하기 어려워 민감도 분석에서 제외하였다. 그러나 Fig. 2에서 볼 수 있듯 120 m 이하 지역에서 타 지점과

Table 2. Range of Drainable Pore Spaces

Basin	Group	Minimum	Mean	Maximum	$\Delta\mu$
Cheonmicheon	below El. 120m	0.015	0.026	0.040	0.025
	over El. 120m	0.007	0.011	0.014	0.007
Hancheon	below El. 120m	0.009	0.025	0.041	0.032
	over El. 120m	0.007	0.010	0.012	0.005
4 basins	below El. 120m	0.009	0.025	0.041	0.032
	over El. 120m	0.006	0.009	0.014	0.008

비교하여 일부지점이 분포형태에서 크게 벗어나고 있다. 이에 매개 변수의 범위 산정시 이상치에 대한 영향을 줄이고자 배수가능공극이 0.002~0.006 사이로, 매우 작게 나타난 강정천과 외도천유역의 JW 이호, JR 하귀3 지점과 한천유역의 JW 연동지점은 제외하고 범위를 결정하였다. 강정천과 외도천유역의 경우, 추정값이 작아 배수가능공극의 민감도 분석에서는 제외되었다. 또, 천미천유역의 JD 삼달2 지점 역시 배수가능공극의 추정값이 0.058로, 타 지점들에 비해 현저히 높아 범위 선정시 제외하였다.

앞서 지하수위의 변동에 영향을 미치는 인자는 강우에 의해 발생된 침투량이라고 가정하였기 때문에 통합수문모형인 SWAT-K를 이용하여 산정한 침투량을 적용·보정하여 각 지점의 최적 매개변수를 산정한 바 있다(Fig. 2). 모델의 적정성 및 매개변수에 대한 민감도를 알아보기 위해 각 유역에서의 배수가능공극의 상하한값 및 평균을 이용하여 추정함양량간의 오차를 분석하였다. Eq. (1)에서와 같이 배수가능공극은 함양량에 비례하므로 지하수함양의 총량에 직접적인 영향을 미치나 고도와의 상관성은 비교적 낮은

것으로 나타났다. 이에 대수층의 매질과 구조에 대한 영향인자와 연관성을 고려해 볼 필요가 있다. 따라서 지하수위 변화구간에서의 대수층의 지질조건에 대한 자료를 수집하여 그에 대한 분석을 한다면 미세측지역의 매개변수를 추정하는데 도움이 될 것이라 판단된다. 그러나 본 연구에서는 현재 배수가능공극에 대한 적절한 상관성을 규명할 수 없어 차선으로 평균값을 적용하여 분석하였다.

오차 추정식은 모델의 정밀도를 확인하는데 흔히 사용되는 RMSE (root mean square error)를 적용하였다. RMSE를 이용하여 실제모델에서 최적 매개변수를 적용하여 추정한 함양량과 각 최소 및 최대, 평균(추세값)을 적용한 경우의 추정함양량의 오차를 이용하여 매개변수의 변화에 따른 모델의 민감도를 알아보고자 하였다(Eq. (4)). 적용기간은 분석기간 중 최근 1년을 기준하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (P_s - P_a)^2}{n}} \quad (4)$$

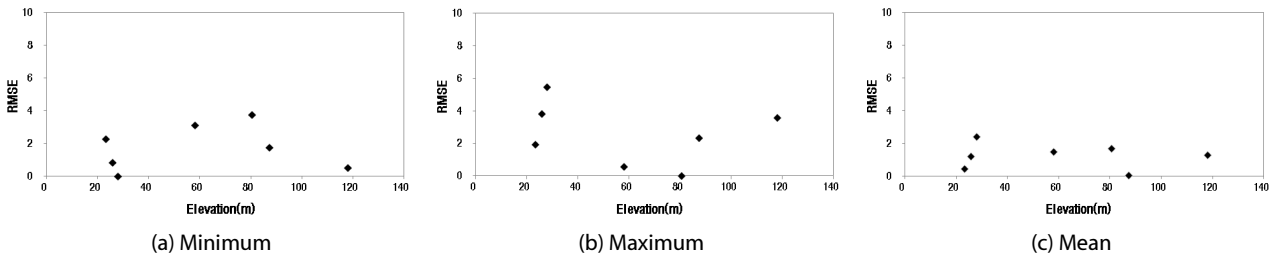


Fig. 5. Range of RMSE for Drainable Pore Spaces in Cheonmicheon

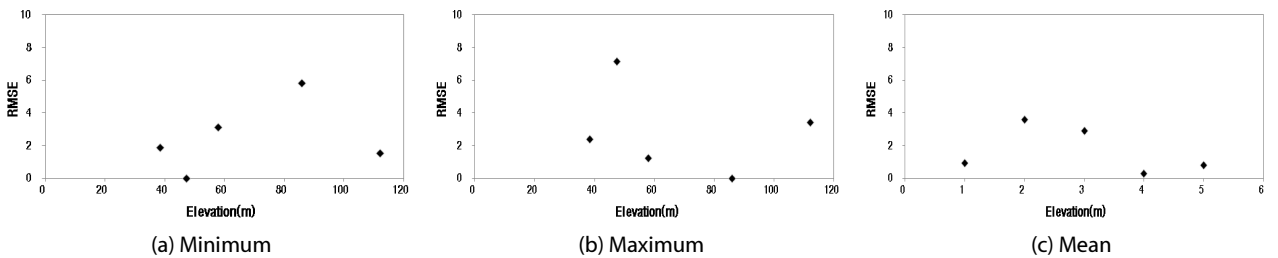


Fig. 6. Range of RMSE for Drainable Pore Spaces in Hancheon

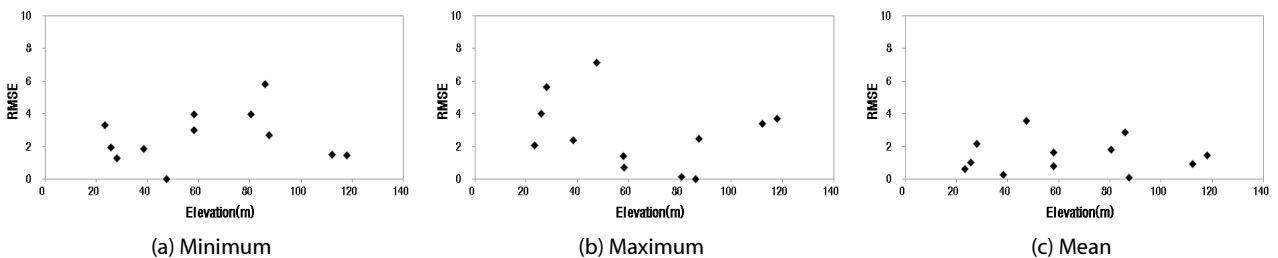


Fig. 7. Range of RMSE for Drainable Pore Spaces in 4 basins

여기서 P_c 는 최적 매개변수를 적용하였을 때의 추정 함양량(mm), P_a 는 유역내 배수가능공극의 상하한값 또는 평균을 적용하였을 때의 추정 함양량(mm)이며 일별 함양량간의 편차를 이용하여 유역별 매개변수 변화에 따른 RMSE를 산정하였다. Figs. 5~7은 유역별로 구분하여 평균 배수가능공극을 적용한 경우와 상하한값을 적용하였을 때의 RMSE를 도시한 것이다. 천미천, 한천유역 및 전 유역에서 상한 또는 하한값을 적용한 경우에 비해 평균값을 적용하였을 때 오차가 크게 감소하였다. 이 결과, 미계측 유역의 배수가능공극을 추정하기 어려운 경우, 유역의 평균값을 적용하는 것도 하나의 대안이 될 것으로 판단된다. 또 고지대일수록 배수가능공극의 추정치가 작게 나타나는 현상이 일반적이라면 고지대의 미계측 유역에서의 고도별로 구분하여 평균값을 산정하는 등 추정 방법을 구체화하는데 활용이 가능할 것으로 사료된다. 그러나 현재 분석된 자료만으로 판단하기에서 다소 무리가 있어 추후 자료가 더 확보하여 논의할 필요가 있다.

반응계수는 배수가능공극과는 달리 경향성을 보이므로 민감도

분석시 관계식을 적용하여 모든 관측지점에서의 함양량 변화를 살펴보고자 한다. 앞서 기술한 바와 같이 전 유역이외의 유역별 민감도 분석은 천미천과 한천유역에 대해서만 적용하였다. Fig. 3은 각 유역별 산정된 추세선에 대한 $\pm 40\%$ 의 한계구간을 임의로 선정하여 반응계수의 상하한의 경계선을 도시한 것이다. 이들 경계선(추세식)을 이용한 상하한 값에 대한 함양량의 변화 및 RMSE를 분석함으로써 모델의 민감도를 살펴보았다(Figs. 8~10). 먼저 Fig. 3을 살펴보면, 한천과 천미천 유역에서는 신뢰구간내 거의 모든 점이 포함되며 4개 유역에서는 신뢰구간에서 벗어나는 세 지점을 제외하고 모든 지점이 선정한 한계구간에 속하는 것을 알 수 있다. 벗어나는 3 지점은 한천 유역의 JM 이도2, JP 오라지점과 천미천 유역의 JD 삼달3 지점이 이에 속한다. 이들 지점은 대수층의 국지적인 이질성으로 인한 것이거나 초기 매개변수를 산정시 오류로 인한 것으로 판단된다.

Figs. 8~10은 앞서 반응계수의 추세선에 대한 오차와 더불어 상하한 경계선을 적용하였을 때의 천미천, 한천, 전 유역(4개 유역)

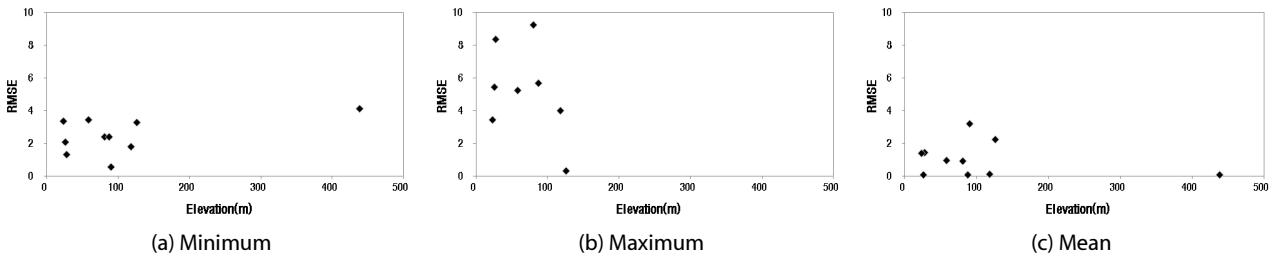


Fig. 8. Range of RMSE for Reaction Factors in Cheonmicheon

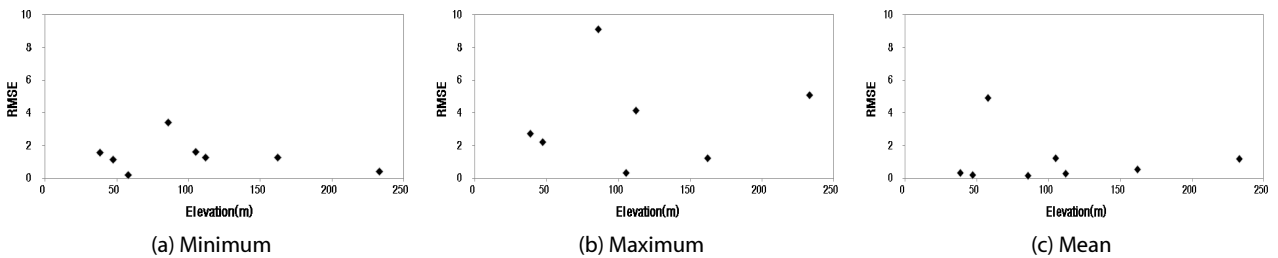


Fig. 9. Range of RMSE for Reaction Factors in Hancheon

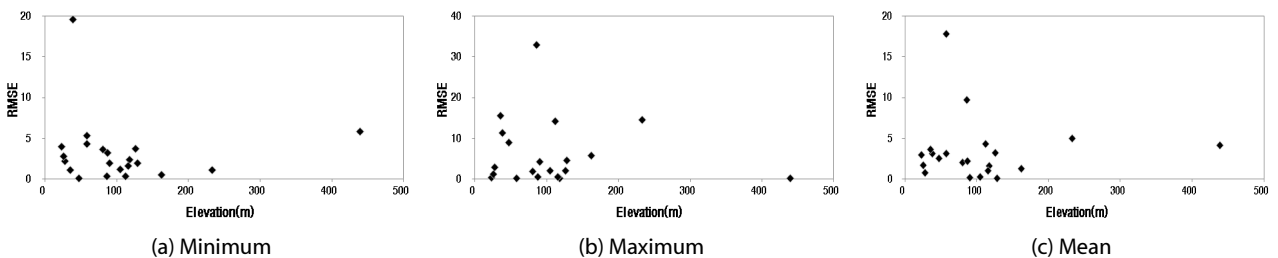


Fig. 10. Range of RMSE for Reaction Factors in 4 basins

에서의 RMSE를 도사한 것이다. 천미천유역은 관계식의 결정계수가 0.89로 매우 높아 추세식을 적용한 경우, 전체적인 오차가 낮게 분포하고 있다. 또한 상하한 경계값을 적용한 경우를 보면 상한값보다 하한값을 적용하였을 때가 오차가 다소 낮은 것으로 나타났다. 한천 유역에서도 RMSE의 변동양상이 유사하며(Fig. 9) 전 유역에서도 고도와의 관계식을 적용한 경우(Fig. 10(c))를 보면 한천유역의 JM 이도2, JM 도남지점이 높게 나타나 전반적인 RMSE는 낮게 나타났다. 오차가 높게 나타난 2개 지점은 지하수위 관측기간이 비교적 짧아 해당지점을 대표하는 초기 반응계수의 추정오류에 의한 것으로 사료된다. 이는 실제 가장 크게 벗어나는 JM 이도2 지점을 제외하고 한천유역의 관계식을 산정할 경우, 결정계수가 0.80으로 높아지며 4개 유역의 추정식 역시 결정계수가 기존 0.54에서 0.62로 높아지는 것을 알 수 있었다. 이는 연구자에 의한 초기 매개변수 산정의 중요성을 말해주는 것으로, JM 이도2 지점은 지하수위 관측자료를 추가 수집하여 초기 매개변수의 재검토가

필요할 것으로 판단된다.

4개 유역의 추정식을 적용한 결과를 보면 유역별로 적용하였을 때에 비해 넓게 분산되어 분포하나 전반적인 경향성은 뚜렷하게 나타난다. 유역내 지하수위 자료가 있어 매개변수를 산정가능한 관측지점이 있는 경우에는 각 유역별 관계식을 산정하여 반응계수를 추정할 수 있으나 지하수위 관측자료가 없거나 매개변수의 추정이 어려운 경우, 유역전체에 대한 관계식을 이용하여 미계측지역의 반응계수를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 11은 분석지점 중 하나인 JD 하천3 지점에서의 배수가능공극의 평균 및 상하한치를 적용하였을 때의 함양시계열과 지하수위를 비교한 것이다. 적용한 배수가능공극의 값은 최적치(simulated value)인 0.036과 Table 2에 나타난 4개 유역의 범위값인 최소값(minimum value) 0.009, 최대값(maximum value) 0.041 및 평균(mean) 0.025이다. Fig. 11(b)의 배수가능공극에 대한 지하수위의 재현성을 보면 매개변수의 평균값을 적용한 경우에 실측 지하수위

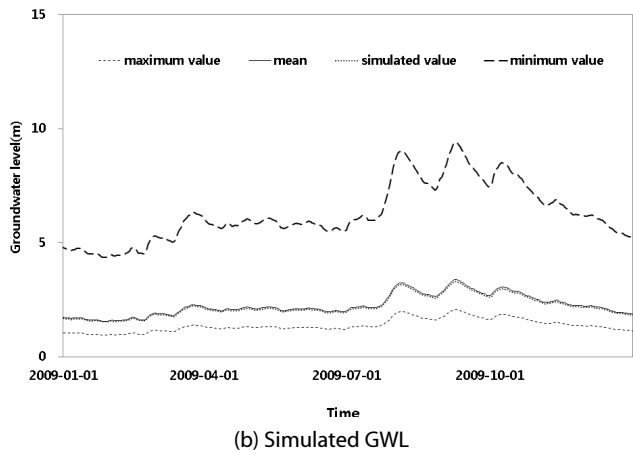
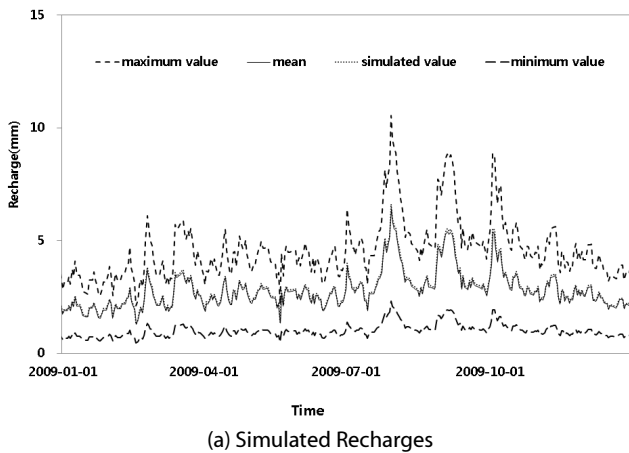


Fig. 11. Comparison of Simulation Recharges and GWL with the Drainable Pore Spacs : JD Hacheon3

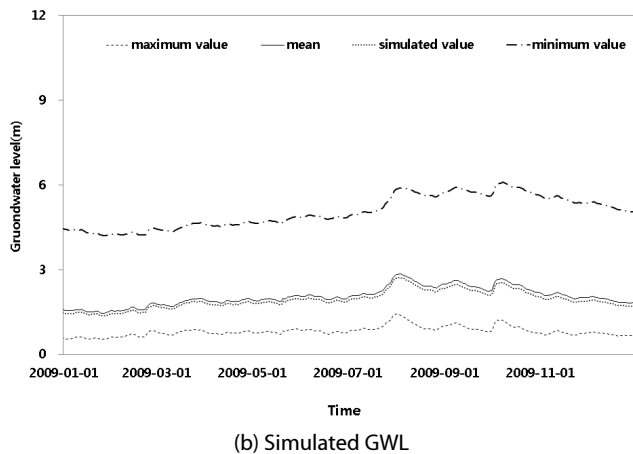
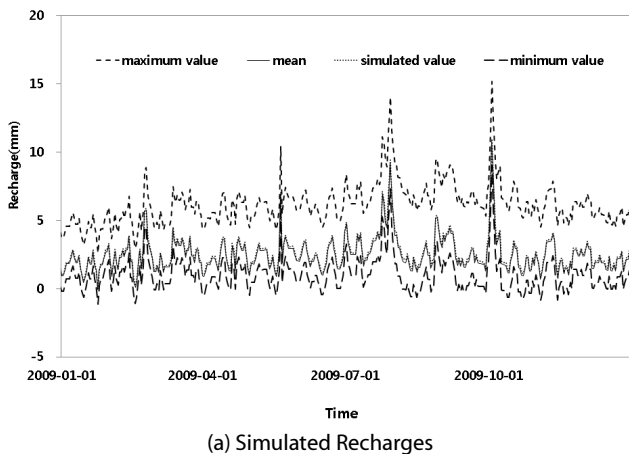


Fig. 12. Comparison of Simulation Recharges and GWL with the Reaction Factors : JD Samdal2

와의 유사성이 높은 것으로 나타나는데 이는 JD 하천3 지점의 평균값인 0.025가 최적치인 0.026에 근접하기 때문이다. 배수가능 공극은 전술한 바와 같이 함양량의 비례상수로서, 0.041에서 0.009로 값이 작아질수록 함양량 역시 적어지며 함양의 변동도 줄어들어 함양시계열의 양상이 평이하게 나타난다.

Fig. 12는 분석지점 중 하나인 JD 삼달2 지점에서의 반응계수 추세값 및 상하한치를 적용하였을 때의 함양시계열과 지하수위를 비교한 것이다. 반응계수는 최적치인 0.029와 전 유역의 추세식을 이용한 추정치(mean) 0.027과 상하한치를 이용한 산정한 경계값인 0.068과 0.011을 적용하였다. 반응계수가 상한치인 0.068에서 하한치인 0.011로 감소하면 함양량 역시 줄어들며 상승 및 하강의 폭도 감소한다. 이는 반응계수 또한 지하수 함양에 의한 배출정도를

결정함으로써 함양량에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 또 반응계수에 대한 지하수위 재현성을 보면(Fig. 12(b)) 최적 매개변수와 관계식을 이용한 추정치를 이용한 경우, 지하수위가 거의 동일하게 나타났다. 이는 반응계수의 관계식을 추정할 때 매개변수의 범위가 실제 범위에 근접하고 있음을 나타낸다. 다시 말해, 해당 대수층의 매질 또는 지형 및 지질 조건 등의 분포특성을 이용한 반응계수의 추정이 가능하다는 것을 나타낸다.

앞서 각 매개변수 변화에 따른 지하수위 변동 해석모델의 추정함양량에 대한 RMSE를 분석하였다. 이번에는 두 매개변수의 상호작용에 대한 모델의 민감도를 분석해보고자 고도의 차이가 있으면서 비교적 지하수위 변동양상은 유사한 Fig. 4의 JD 하천 1-4 지점(JD 하천2 지점은 제외)을 이용하여 추정 함양량에 대한 RMSE를

Table 3. RMSE and $\alpha \cdot \mu \cdot 10^3$ of Drainable Pore Spaces and Reaction Factors

JD Hacheon1		Drainable pore space(μ)			$\alpha \cdot \mu \cdot 10^3 = 5.84$		
		Minimum	Mean	Maximum	Minimum	Mean	Maximum
Reaction factor(α)	Minimum	3.22	2.58	2.12	0.57	1.59	2.61
	Mean	2.70	1.15	0.95	1.43	3.97	6.51
	Maximum	1.44	2.49	6.38	3.57	9.93	16.28
JD Hacheon3		Minimum	Mean	Maximum	$\alpha \cdot \mu \cdot 10^3 = 1.62$		
					Minimum	Mean	Maximum
Reaction factor(α)	Minimum	3.80	3.27	2.93	0.10	0.29	0.47
	Mean	3.41	2.17	1.28	0.26	0.71	1.17
	Maximum	2.53	0.39	3.26	0.64	1.79	2.93
JD Hacheon4		Minimum	Mean	Maximum	$\alpha \cdot \mu \cdot 10^3 = 0.78$		
					Minimum	Mean	Maximum
Reaction factor(α)	Minimum	2.64	2.16	1.78	0.07	0.19	0.31
	Mean	2.28	1.16	0.62	0.17	0.47	0.77
	Maximum	1.37	1.43	4.22	0.42	1.17	1.92

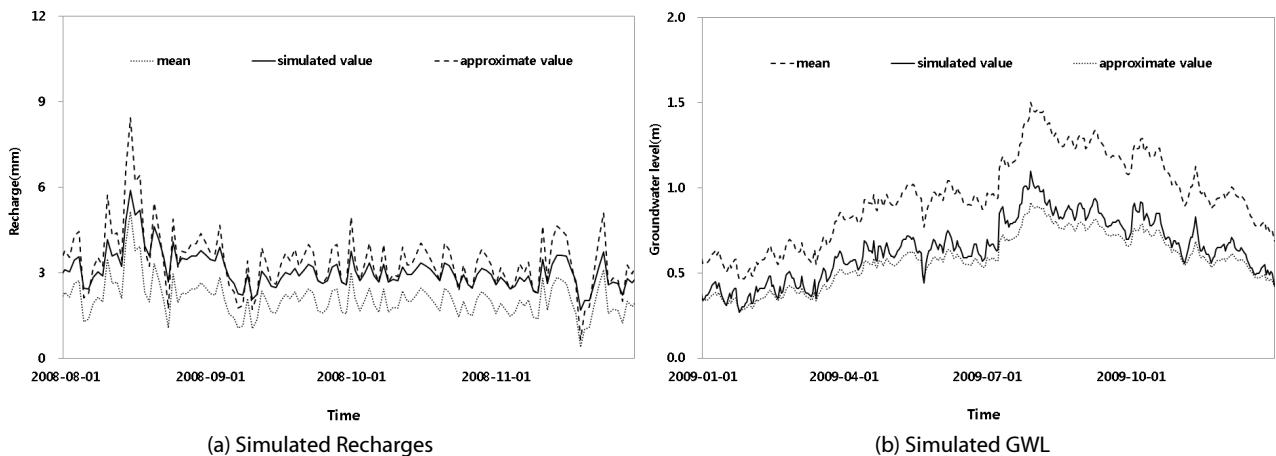


Fig. 13. Comparison of Simulation Recharges and GWL with the Reaction Factors : JD Hacheon4

분석하였다. 각 지점에서 추정된 최적매개변수는 배수가능공극이 각각 0.019, 0.026, 0.018이며 반응계수는 0.300, 0.063, 0.043으로 분석되었으며 반응계수는 고도에 높아짐에 따라 감소하는 경향성이 뚜렷하게 나타나고 있다. 두 매개변수간의 민감도 분석에 적용한 매개변수 경계값은 전 유역에서 산정한 최대 및 최소값, 평균(추세값)으로 각 경계값에 대해 교차 분석하였다. Table 3의 RMSE를 분석한 결과, 배수가능공극과 반응계수의 평균을 적용한 경우, 타 분석치보다 오차가 낮아지나 최소값으로 나타나지는 않았다. 이런 현상이 나타나는 원인을 분석하기 위해 두 매개변수의 곱을 비교한 결과, 오차가 최소가 되는 경우는 매개변수 경계값의 곱이 최적매개변수의 곱에 근사할수록 추정합양량의 오차가 줄어드는 것을 알 수 있다. 이런 매개변수의 상관성을 이용한다면 경향성이 없는 배수가능공극(비산출율)에 대한 추정에 활용할 수 있을 것으로 판단되며 현재 이에 대한 연구가 진행 중에 있다.

Fig. 13은 교차분석 지점 중 하나인 JD 하천 1 지점에서의 두 매개변수의 평균치와 매개변수간의 곱의 근사치(approximate value)를 적용하였을 때의 함양시계열과 지하수위를 비교한 것이다. 근사치를 적용한 경우가 최적합양량을 이용한 재현지하수위와 실제 지하수위와 유사하게 나타났으며 추정합양량 시계열 역시 동일하게 나타났다. 각 매개변수의 값이 최적치와 차이가 있더라도 두 매개변수의 곱이 최적치와 유사한 경우에 모델의 정확도가 높아지는 것을 알 수 있었다. 이런 현상이 다른 유역 및 지역에도 적용가능하다면 미계측 유역의 매개변수의 특성을 규명하는데 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결론

지하수위 변동 해석모델을 이용하여 제주도의 4개 유역(강정천, 의도천, 천미천, 한천)내 총 21개 지점에서의 매개변수(반응계수, 배수가능공극)를 추정하고 그 특성에 대해 분석하였다. 추정된 21개의 매개변수를 적용하여 고도에 따른 분포특성을 살펴보면, 배수가능공극은 비교적 낮은 고도(해발고도 약 120 m 이하)에서는 고도에 따른 경향성을 보이지 않았으며 매개변수의 변동폭도 크게 나타났다. 그러나 비교적 높은 고도(해발고도 약 120 m 이상)에서는 자료수가 적어 명확히 규명할 수 없으나 매개변수의 추정값이 작아지는 것을 알 수 있었다. 배수가능공극에 대한 해석모델의 영향성을 파악하기 위해 유역별, 전 유역(4개 유역)별 상하한 값과 평균을 이용하여 추정합양량의 변화를 분석한 결과를 보면 평균을 적용한 경우, 전반적으로 오차범위가 낮게 나타났으며 상하한값보다는 하한값을 적용한 경우가 오차가 비교적 작게 나타났다. 그러나 추정 합양량의 차이가 크게 나타나는 지점도 일부 존재하는데 이는 배수가능공극이 고도에 대한 상관성이 비교적 낮다는 것을

의미한다. 따라서 배수가능공극의 영향인자인 매질의 특성 및 구조, 대수층의 수리인자들에 대한 분석을 병행한다면 특성을 규명하는데 도움이 될 것이라 판단된다.

반응계수는 고도가 증가함에 따라 작아지는 뚜렷한 경향성을 보이며 추세식에 대한 결정계수도 높게 나타났다. 이는 고도가 증가할수록 침투된 유량이 지연 및 분산되어 지하수에 함양되고 이에 의해 지하수위 변동양상이 완만한 형태로 나타나 반응계수 역시 낮아지게 된다. 또 반응계수에 대한 모델의 민감도를 파악하기 위해 유역별 추세값 및 경계값을 이용하여 추정합양량을 비교한 결과, 일부지점이 기준선에서 벗어나 대부분의 지점의 매개변수가 전반적인 경향성을 따른다. 따라서 관측자료가 없는 유역에 대해서는 반응계수의 관계식을 이용하여 반응계수를 추정할 수 있다.

두 매개변수에 대해 교차분석을 실시한 결과, 각각의 매개변수 추정치가 최적매개변수와 유사한 경우보다 두 매개변수의 곱이 유사할수록 모델의 정확도가 높아지는 것으로 나타났다. 이런 매개변수의 상관성을 이용한다면 경향성이 없는 배수가능공극에 대한 추정에 활용이 가능할 것이다.

본 연구는 수리지질학적 매개변수 추정의 방법론적인 점검방법으로 활용하는 동시에 미계측지역에 대한 수리인자를 예측하여 지하수 해석에 필요한 모델링의 기초자료로도 활용하고자 한다.

감사의 글

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

References

- Bouwer, H. and J. Van Schilfgaarde. (1962). "Simplified prediction method for rainfall of the watertable in drained land." American Society of Agricultural Engineers winter meeting.
- 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 the Korean Society of Groundwater Environment*, Vol. 13, No. 1, pp. 67-76.
- Choi, B. S. and Ahn, J. G. (1998). "A study on the estimation of regional groundwater recharge rate." *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, Vol. 5, No. 2, pp. 57-65.
- Chung, I. M., Lee, J. W., Kim, J. T., Na, H. N. and Kim, N. W. (2011). "Development of threshold runoff simulation method for runoff analysis of Jeju Island." *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 20, No. 10, pp. 1347-1355.
- 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, pp. 91-109.
- 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.
- Kim, N. W., Chung, I. M. and Na, H. N. (2013a). “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.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Yoo, S. Y., Lee, J. W. and Yang, S. K. (2009). “Integrated surface-groundwater analysis in Jeju island.” *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 18, No. 9, pp. 1017-1026.
- Kim, N. W., Kim, Y. J. and Chung, I. M. (2013b). “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. (2013c). “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., Kim, Y. J. and Chung, I. M. (2014). “A study on the characteristics of parameters in groundwater table fluctuation model.” *Journal of Environmental Science International*, Vol. 23, No. 4, pp. 615-623.
- Kim, N. W., Na, H. N. and Chung, I. M. (2013d). “Simulation of groundwater variation characteristics of hancheon watershed in Jeju island using integrated hydrologic modeling.” *Journal of Environmental Science International*, Vol. 22, No. 5, pp. 515-522.
- Smedema, L. K. and Rycroft, D. W. (1983). “Land drainage-planning and design of agricultural.” *Drainage Systems*, Cornell University Press, Ithaca, NY.
- Sustainable Water Resources Research Center (2010). *Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model report*.
- Yun, S. W., Jo, Y. J. and Lee, J. Y. (2009). “Comparison of groundwater recharges estimated by waterlevel fluctuation and hydrograph separation in haean basin of Yanggu.” *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 45, No. 4, pp. 391-404.