

지반 및 수문특성을 고려한 하천인근 지역의 지하수위 변동 영향인자 분석 Influencing Factor Analysis on Groundwater Level Fluctuation Near River

김인철 · 이준환*

연세대학교 사회환경시스템공학과

Incheol Kim and Junhwan Lee*

School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

Received 19 June 2018, revised 21 June 2018, accepted 25 June 2018, published online 30 June 2018

ABSTRACT: Groundwater level (GWL) fluctuation, which can occur due to several artificial and natural reasons, causes reduction of bearing capacity of foundation structures and can lead settlement of ground. As a result, GWL fluctuation affects stability and serviceability of entire building. However, in many case, GWL is considered as fixed value that obtain from geotechnical investigations. That is reason that GWL fluctuation is considered as area of non-geotechnical engineering. In present study, factors causing GWL fluctuation were analyzed at urban and rural area as preliminary research of quantification of GWL fluctuation. GWL varies according to hydrological and geographical characteristics. Also, the influence factors are largely affected by hydrological and geographical characteristics.

KEYWORDS: Groundwater level fluctuation, Influence factors, Rural area, Urban area

요 약: 지하수위는 자연적 또는 인위적 요인들로 시·공간적 변동성을 나타내게 된다. 지반공학적 측면에서 지하수위의 변동성은 기초구조물의 지지력 감소 및 추가적인 침하 등을 발생시킴으로써 전체 구조물의 안정성 혹은 사용성에 영향을 미칠 수 있다. 설계과정에서 적용되는 지하수위는 지반조사 과정 중 현장시험을 통해 측정된 고정 수위를 기반으로 결정되나, 실질적으로 강우조건, 지반의 종류, 도심 포장을 등 다양한 영향인자에 따라 연중으로 변동하는 패턴을 보이게 된다. 본 연구에서는 대부분 인간활동의 영역이 되어 있는 하천인근 지역을 대상으로, 지하수위 변동성과 이에 대한 영향인자를 조사 분석하고자 하며, 이는 궁극적으로 보다 합리적 지반구조물 설계가 가능토록 하기 위함이다. 지하수위 변동이 크게 발생할 것으로 예상되는 도심지역과 도외지역을 대상으로 지하수위 변동에 관한 영향요소를 분석하였다. 지하수위 변동은 도심지역과 도외지역의 수문 및 지질 특성에 따라 상이한 양상을 보였으며 변동에 영향을 미치는 인자 또한 대상지역의 지질 특성에 따라 다른 것으로 나타났다.

핵심어: 지하수위변동, 영향인자, 도심지역, 도외지역

1. 서 론

기상청에서 제공하는 기후변화 시나리오 RCP4.5, RCP8.5에 의하면 2100년까지 우리나라의 평균 기온이 각각 2.5°C, 4.5°C, 강수량이 4.1%, 5.9%, 해수면이

70.6 cm, 88.5 cm까지 점진적으로 상승하며, 슈퍼태풍이나 과한 집중호우와 같은 극한기후현상의 빈도 또한 증가할 것으로 전망된다(KMA 2013). 지하수위는 기후변화의 영향을 직·간접적으로 받는 지반구성요소로서 수자원과 지반환경, 지반공학 분야 등에서 매우 중

*Corresponding author: junlee@yonsei.ac.kr, ORCID 0000-001-9653-7993

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. 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.

요한 인자로서 다뤄지고 있다 (Terzaghi et al. 1996, Kim et al. 1998, Winter 1999, Hoque et al. 2007, Lu et al. 2007, Battisti and Naylor 2009).

지반공학적 관점에서 지하수위 변화는 지반의 강도와 직접적 연관성이 있는 유효응력 (effective stress)을 변화시키며, 이는 결과적으로 지반상부에 건설되는 기초구조물의 지지력과 부등침하 등에 영향을 미쳐 전체 구조물의 안정성 (stability)과 사용성 (serviceability)에 나쁜 영향을 미칠 수 있다 (Schmertmann 1970, Ausilio and Conte 2005, Yasuhara et al. 2007, Shahriar et al. 2012, Park et al. 2017). 그러나 지하수위가 지역 수문 및 지질, 지형특성에 따라 심하게 변동할 수 있음에도 불구하고, 실무설계에서는 지반조사 당시 측정된 지하수위를 고정수위로 간주하고 기초구조물의 지지력이나 침하량 등을 산정하는 것이 일반적이다.

지하수위를 평가하고 예측하는 방법에 있어서는 이론적 (analytical), 수치해석적 (numerical), 관측된 데이터 기반의 데이터처리 (data processing) 방법 등이 있다. 이론적인 방법은 단순화된 수문인자 및 지반 모델을 산정하여 물의 흐름에 대한 물리현상을 수학적으로 풀어내는 방법이며 (Serrano and Workman 1998, Bansal and Das 2010), 수치해석적 방법은 유한요소해석 (finite element analysis)이나 유한차분해석 (finite difference analysis) 등의 기법을 기반으로 하여 입력 수문인자에 대한 지하수의 흐름을 시뮬레이션 하는 방법이며 (Pauwels et al. 2002, Chesnaux et al. 2006), 데이터처리 방법은 관측된 지하수위 변동 영향인자 데이터를 바탕으로 다중선형회기분석 (multiple linear regression)이나 인공신경망 (Artificial neural network) 등의 기법으로 학습 및 예측하는 방법이다 (Coulibaly et al. 2001, Makridakis et al. 2008, Izady et al. 2012, Sahoo and Jha 2013). 이 방법들은 기본적으로 지하수위에 영향을 미치는 인자로부터 지하수위의 변동을 평가 및 예측, 시뮬레이션 한다. 즉, 지하수위 변동을 평가하기 앞서 지하수위 변동에 영향을 미치는 인자 분석이 선행되어야 한다는 것을 나타낸다.

본 연구에서는 도심지 및 도외지 특성이 두드러지는 지역 3곳을 선정하였고, Kim et al. (2016)의 분석 방법을 바탕으로하여 대상지역의 지하수위 변동 영향인자 분석을 수행하였다. 실무 엔지니어의 접근 용이성을 위하여 간단한 Pearson correlation coefficient를 분석에

도입하였으며, 영향인자 분석을 위해 8년간 관측된 지하수위 및 수문자료들을 이용하여 대상지역의 대표 지하수위 영향인자를 산정하였다. 또한, 우리나라에서 2009년에서 2011년에 걸쳐 진행된 4대강 사업의 지하수위 영향인자에 미친 영향을 분석하기 위하여 사업 전, 사업 중 그리고 사업 후의 데이터로 나누어 분석을 수행하였다.

2. 연구 대상지역의 수문 및 지리적 특성

본 연구에서는 지하수위 변동을 평가하고 예측하기 위한 예비단계로서 지하수위 변동에 영향을 미치는 주요 인자를 분석하였다. 도심지역과 도외지역의 특성을 비교하기 위하여 서울시의 마곡동, 장위동 그리고 경기도 양평군을 대상지역으로 선정하였다. 대상지역은 모두 하천에 인접해 있으며 국가기관에서 관리하는 기상 및 수문관측소가 존재하는 지역이다. 대상지역의 위치는 Fig. 1과 같으며 이후로는 서울시 마곡동, 서울시 장위동 그리고 양평군 개군면을 각각 OR-1, OR-2 그리고 OR-3로 명시한다. OR-1과 OR-2는 도심지역에 속하며 OR-3는 도외지역에 속한다. Fig. 1의 빨간색 표시는 4대강 사업으로 건설된 이포보, 여주보 그리고 강천보의 위치를 나타내며 OR-3의 상류에 위치한다. 본 연구에 포함된 대상지역은 모두 하천인근 지역이며, 도시의 OR-1지역은 한강에 인접해 있으며 지하수위 관측소로부터 한강까지의 거리는 156 m이다. 한강의 평균하폭과 유역면적은 각각 1,155 m, 26,018 km²이며 홍수기의 평균 유량은 약 2,456 m³/s로써 규모가 매우 큰 하천이다. 반면, 같은 도심에 위치한 OR-2지역은 우이천에

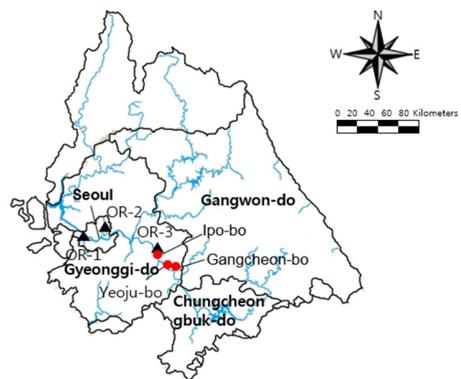


Fig. 1. Locations of study sites and weirs (bo).

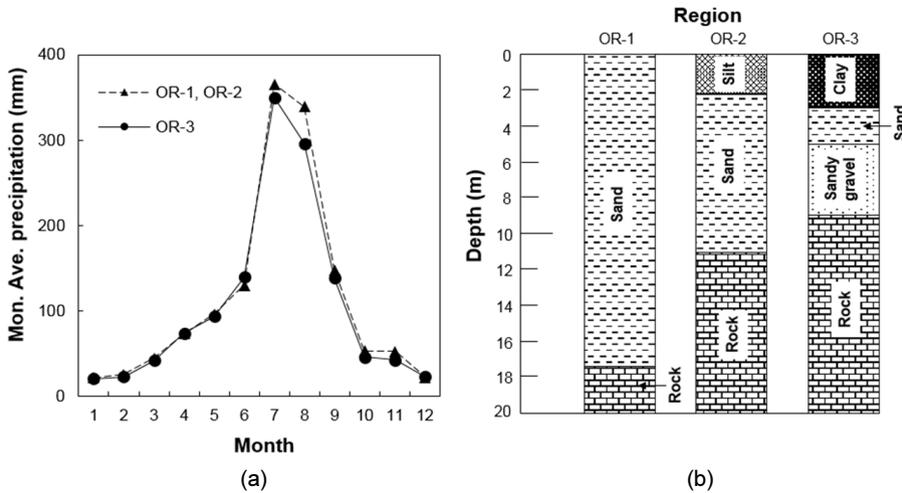


Fig. 2. Annual distributions of monthly averaged precipitation and soil profiles at study sites.

인접해 있으며 하천까지의 거리는 253 m이다. 우이천의 경우 중랑천의 지류로서 평균 하폭이 60 m이며, 유역면적은 27.4 km²로 상대적으로 매우 작은 규모의 하천이다. 도외에 위치한 OR-3지역의 경우 남한강에 인접해 있으며 하천까지 거리는 431 m이다. 남한강은 평균하폭이 309 m이며 유역면적이 12,514 km²로써 한강 유역의 약 절반에 해당하는 넓은 유역면적을 가지고 있다. 또한, 홍수기의 평균 유량이 470.8 m³/s로써 하폭에 비하여 많은 유량이 흐르고 있다.

대상지역 모두 여름철에 강우가 집중되는 강우패턴을 보인다. Fig. 2(a)는 각 대상지역의 1965년부터 2001년까지 37년간 월별 평균 강우량을 나타낸다. 대상지역 모두 유사한 월별 강우패턴을 보이며, 특히 여름철 7-8월에는 월평균 강우량 108 mm의 2배 이상의 강우량이 관측되었다 (HRBEO 2013, KMA).

도심과 도외지역은 지표면의 포장 정도에서 큰 차이를 보인다. 도심지역의 경우, 도로 및 주거지역, 상가 건물 등으로 인하여 대부분의 지표면이 불투수층으로 분류된다. OR-1과 OR-2지역의 지표면 포장 비율은 각각 97.4%, 93.7%이다. 반면 도외지역의 경우 주로 논과 밭, 과수원 등 투수층으로 분류되는 면적이 대부분을 차지하고 있으며, OR-3의 지표면 포장 비율은 각각 16.9%이다 (Kim et al. 2016, ESIS).

Fig. 2 (b)은 각 대상지역의 지질주상도를 나타낸다. OR-1지역은 지표로부터 암반층이 있는 18 m 깊이까지 투수성이 높은 모래층으로 구성되어 있으며, OR-2지역은 상부의 실트층을 제외하면 비교적 투수성이 높은

모래층으로 구성되어 있다. OR-3지역의 경우 지표면으로부터 깊이 3 m까지 투수성이 낮은 점토층이 존재한다 (GIDS, GRMA).

3. 강우 및 하천수위의 연계분석을 통한 지하수위 변동 영향인자 도출

3.1 지하수위 변동 영향인자 분석 방법

지하수위 변동의 주요 영향인자 도출을 위하여 대상 지역에서 관측된 지하수위 및 강우량, 하천수위 데이터를 분석하였다. 대상지역의 최근 수리 및 지리적 상태를 반영하기 위하여 2006년부터 2013년까지 8년간의 자료를 이용하였으며, 지하수위 관측자료는 NGIC (<https://www.gims.go.kr>)로부터, 강우량 및 하천수위 자료는 HRFco (<https://www.hrfco.go.kr>)에서 제공하는 자료를 이용하였다.

Wilhite and Glantz (1985)와 Gutmann (1999)가 가뭄지표를 산정하기 위해 사용하였으며, Park et al. (2005), Yang et al. (2011) 그리고 Kim et al. (2016)이 차용하여 지하수위 변동지표를 산정하는 등 선행강우를 고려하여 지하수위 변동을 평가 방법으로 사용하였다. 본 연구에서는 선행강우 및 강우가 지반을 통해 침투하면서 걸리는 지연시간을 고려하기 위하여 이동평균 개념을 차용하였다. 이동평균 (moving average: MA)은 특정 일로부터 과거의 어느 날까지의 총 강우량을 평균한 값을 나타내며 다음 Eq. 1로 표현된다.

$$MA_{t,n} = \frac{pre_t + pre_{t-1} + \dots + pre_{t-(n-1)}}{n} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$= \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} pre_{t-i}$$

여기서 $MA_{t,n}$ 는 t 일의 n 일간 강우이동평균 값을 나타내며, pre_t 는 t 일의 강우량을 나타낸다. 이동평균은 몇 일 (n)을 기준으로 계산하는지에 따라 값이 달라진다. 강우량을 대상으로 이동평균을 구할 경우, n 이 작을수록 이동평균-시간 곡선에 작은 변동이 많이 나타나며 n 이 커질수록 이동평균-시간 곡선이 완만해지며 장기간 강우 추세를 나타내는 데 사용할 수 있다. 본 연구에서는 최적의 n 을 찾기 위하여 2-100일 이동평균을 구하였으며, 관측된 지하수위와 가장 높은 상관관계를 가지는 일수를 선택하였다.

지하수위와 그 밖의 수문 인자들의 상관관계를 정량적으로 나타내기 위하여 통계학에서 흔히 사용되는 Pearson correlation coefficient (Eq. 2)를 사용하여 상관계수를 도출하였다. Eq. 2는 성질이 서로 다른 두 데이터의 증감을 통하여 상관관계를 도출하는 식으로써, 값의 스케일과 무관하게 값의 증가 및 감소하는 비율로

두 데이터간의 상관관계를 나타낸다. Eq. 2을 통하여 얻은 상관계수 결과 값은 1에 가까울수록 높은 상관관계를 나타내며 0에 가까울수록 낮은 상관관계를 나타낸다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{Eq. 2})$$

여기서 r 는 상관계수, x 와 y 는 변수, \bar{x} 와 \bar{y} 는 각각 x 와 y 의 평균값이다.

3.2 지하수위 변동 영향인자 분석

3.2.1 OR-1 지역

OR-1지역은 도심지역에 위치함으로써 지표면 포장률이 97.4%로 매우 높으며, 다른 지역에 비하여 규모가 큰 한강에 인접해 있다. Fig. 3는 OR-1 지역의 2006년부터 2013년까지 8년간 관측된 지하수위, 강우량, 강우이동평균 그리고 하천수위 자료를 나타낸다. OR-1지역에서 관측된 기간동안의 최저 지하수위는 2.16 El.m이며 최고수위는 2011년 여름철에 7.6 El.m이었고 변동량은

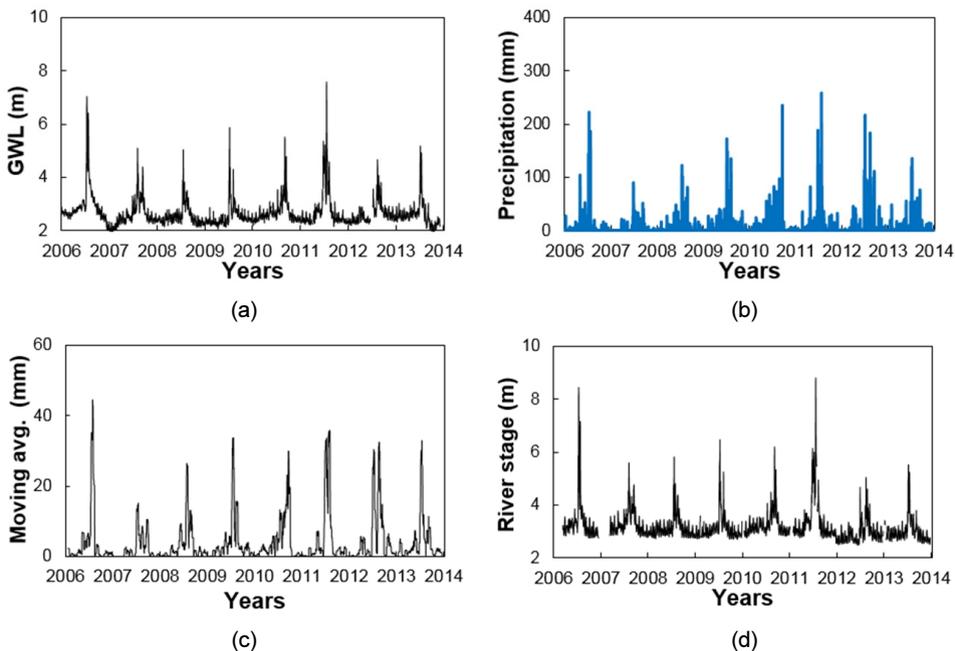


Fig. 3. Observed (a) GWL, (b) precipitation, (c) moving average, and (d) river stage for OR-1.

5.44 m이었다. 또한 지하수위 변동은 주기성을 보이며 매년 홍수기에 급상승 및 하강을 반복하고 있음을 알 수 있다. 이 지역에서 최대 강우량, 첨두 하천수위, 첨두 이동평균을 보이는 시기가 첨두 지하수위 시기와 비교적 잘 일치함을 알 수 있으며, 이들의 시간에 따른 변동 양상이 지하수위의 변동 양상과 유사함을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 OR-1 지역의 지하수위와 강우량, 이동평균, 하천수위 자료와의 상관관계 및 Eq. 2을 이용하여 구한 상관계수를 나타낸다. 지하수위와 강우량의 상관계수는 0.415으로 매우 낮으며, 선행강우를 고려하기 위하여 도입된 강우이동평균은 지하수위와의 상관계수가 0.759로써 비교적 높은 상관관계를 보인다. 하천수위의 경우 상관계수가 0.927로써 지하수위와 가장 높은 상관관계를 보인다.

OR-1의 지하수위 변동에 영향을 미치는 주요인자는 하천수위인 것으로 판단된다. 이 지역의 경우 지표면 포장률이 높아서 강우의 직접적인 침투는 어려우나, 지반이 높은 투수성의 모래로 구성되어 있어서 풍부한 유량을 가진 한강으로부터 지하수를 쉽게 공급받는 것으로 판단된다.

3.2.2 OR-2 지역

도심지역인 OR-2는 지표면 포장률이 93.7%이며, 비교적 규모가 작은 우이천에 인접해 있다. Fig. 5은 OR-2 지역의 2006년부터 2013년까지 8년간의 지하수위, 강우량, 강우이동평균 그리고 하천수위 자료를 나타낸다. OR-2 지역의 최저 지하수위는 16.26 El.m이며, 2011년

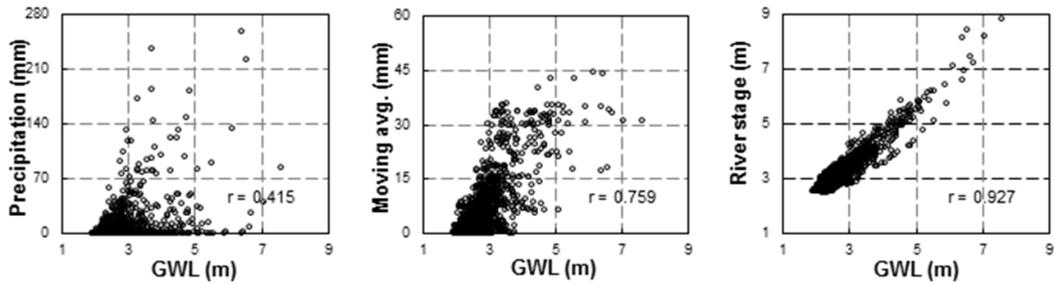


Fig. 4. The result of correlation analysis for OR-1.

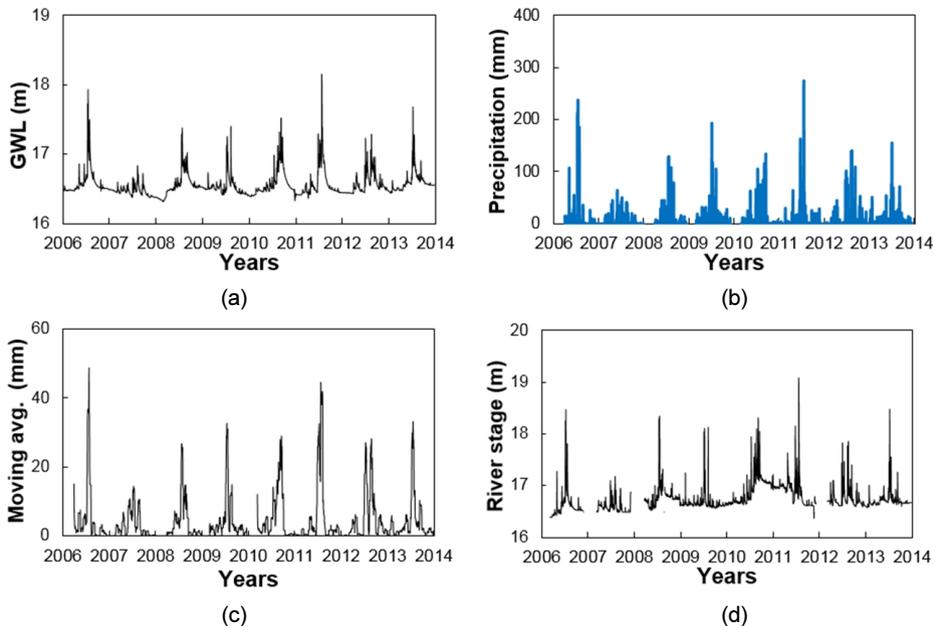


Fig. 5. Observed (a) GWL, (b) precipitation, (c) moving average, and (d) river stage for OR-2.

여름철에 최고 18.1 El.m까지 상승하여 1.84 m 변동하였다. OR-1 지역의 지하수위 변동량과 비교하면 매우 작은 수치이다. 이 지역의 지하수위 역시 주기성을 가지고 매년 홍수기에 급상승 및 하강을 반복하고 있다.

Fig. 6은 OR-2 지역의 지하수위와 강우량, 강우이동평균, 하천수위 자료와의 상관계수 및 Eq. (2)를 이용하여 계산한 상관계수를 나타낸다. 이 지역 또한 지하수위와 강우량의 상관계수가 0.536으로 매우 낮은 상관관계를 나타낸다. 선행강우를 고려한 이동평균과의 상관계수는 0.786으로 3개의 수문 자료들 중에서 가장 큰 값이다. 하천수위와의 상관계수는 0.707이며 지하수위와 비교적 높은 상관관계를 보이지만 같은 도심지인 OR-1 지역에 미치지 못한다.

OR-2의 지하수위는 하천수위 및 선행강우를 고려

한 강우이동평균과 높은 상관관계를 보인다. OR-2도 OR-1과 같이 지표면 포장률이 높기 때문에 강우가 직접 지하수에 침투하기 어려우며 주로 하천수의 유입으로부터 물을 공급받는다. 인접한 작은 규모의 하천으로부터 비홍수기시 지하수와 유량의 교류가 충분치 않으며 강우로 인하여 불어난 하천수가 지하수위 변동에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 즉, 이 지역의 지하수위 변동은 강우에 영향을 받으나 발생한 강우가 하천을 통하여 지하수에 도달하므로 선행강우를 고려된 강우이동평균과 높은 상관관계를 보인다.

3.2.3 OR-3 지역

도외에 위치한 OR-3은 지표면 포장률이 16.9%이며

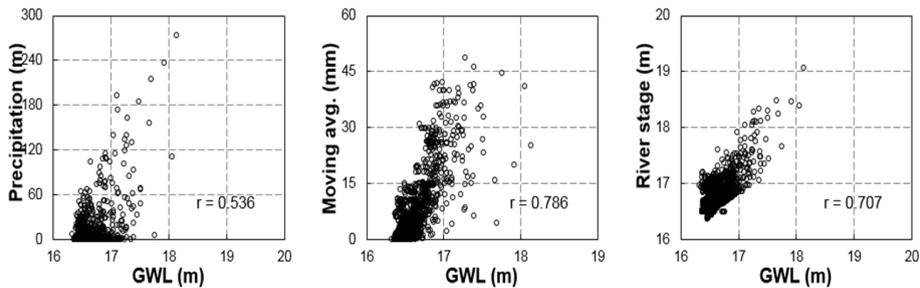


Fig. 6. The result of correlation analysis for OR-2.

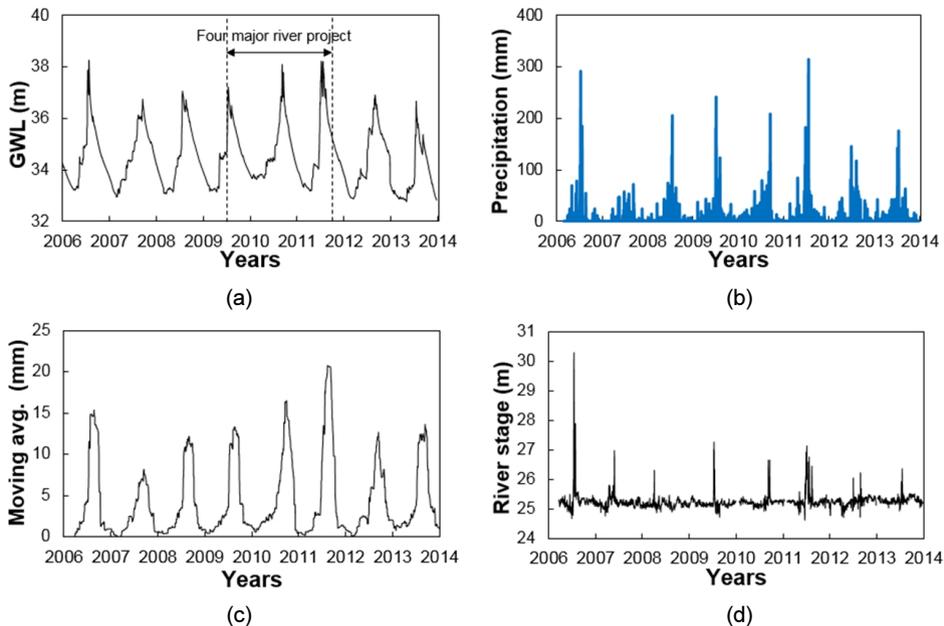


Fig. 7. Observed (a) GWL, (b) precipitation, (c) moving average, and (d) river stage for OR-3.

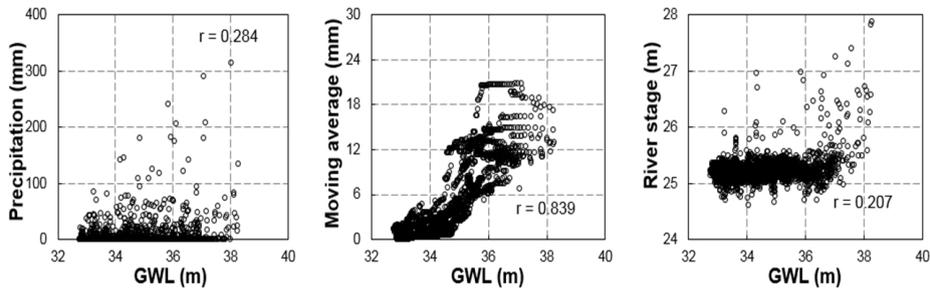


Fig. 8. The result of correlation analysis for OR-3.

비교적 규모가 큰 하천에 인접해 있다. Fig. 7은 OR-3 지역의 2006년부터 2013년까지 8년간의 지하수위, 강우량, 강우이동평균, 하천수위를 나타낸다. 이 지역은 2011년 여름철에 최고 지하수위가 관측되며 변동량은 5.07 m이다. 2011년에 다른 두 지역의 하천수위는 크게 상승하는 반면, OR-3의 하천수위 변동량이 비교적 작은 것을 확인할 수 있다. 이 지역은 도심지역인 OR-1과 OR-2와는 상이하게 지하수위가 상승하고 하강하는데 수개월이 걸리며 도심 그룹의 지하수위 자료에서 관찰되는 노이즈 성분이 비교적 적게 나타난다. 이 지역의 경우 최대강우량, 침투하천수위, 침투이동평균을 보이는 시기가 침투지하수위 시기와 수 십일의 시간차가 관찰된다.

Fig. 8는 OR-3 지역의 지하수위와 강우량, 이동평균, 하천수위 자료들의 상관관계 및 Eq. (2)을 이용하여 계산한 상관계수를 나타낸다. 이 지역의 지하수위와 강우량의 상관계수가 0.284로써 매우 낮은 상관관계를 보이는 반면, 선행강우를 고려한 강우이동평균과의 상관계수는 0.839로써 매우 높은 상관관계를 보인다. 또한, OR-3 지역의 지하수위는 하천수위와도 매우 낮은 상관관계를 보인다.

OR-3 지역의 지하수위 변동은 선행강우를 고려한 이동평균에 가장 큰 영향을 받는다. OR-3 지역의 경우, 지표면 포장률이 낮아 강우가 지표면을 직접 침투하여 충적층의 지하수까지 도달한다. 그리고 이 지역의 지표면은 투수성이 낮은 점토로 구성되어 있기 때문에 강우

에 의한 지하수위 반응이 비교적 느린 양상을 보이며 지하수위 상승 및 하강에 수개월이 걸리는 것으로 판단된다. 또한, 간헐적으로 내리는 강우로 인하여 발생할 수 있는 노이즈와 같은 지하수위 변동이 점토층을 통과함에 따라 감쇠되어 비교적 단조로운 양상을 보이는 것으로 판단된다.

3.3 지하수위 변동 영향인자 분석 결과

Table 1은 OR-1, OR-2 그리고 OR-3의 지하수위와 강우량, 강우이동평균, 하천수위의 상관계수를 나타낸다. 도심의 OR-1은 지표면 포장률이 높고 투수성이 큰 모래로 구성되어 있으며 큰 규모의 하천에 인접해 있다. OR-1 지역의 지하수위는 0.927의 상관계수로 하천수위와 가장 높은 상관관계를 보인다. OR-1 지역과 유사한 특성을 가진 지역의 지하수위 변동은 하천수위의 변동과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 같은 도심인 OR-2은 OR-1 지역과 유사한 지반 특성을 가지고 있으나, 인접한 하천의 규모가 비교적 작다. OR-2 지역의 지하수위는 선행강우를 고려한 강우이동평균과 좋은 상관관계를 보이나 높은 지표면 포장률로 인하여 물이 지표면으로 침투하기 어려우며, 강우에 의하여 불어난 하천으로부터 공급되는 것으로 판단된다. 도외의 OR-3은 지표면 포장률이 낮으며 지표면 부근에 투수성이 낮은 점토로 구성되어 있다. 또한, 비교적 큰 하천

Table 1. Coefficients of correlation for different influence components on GWL

Region	Coefficient of correlation (r)		
	Daily measured precipitation	Moving average	River stage
OR-1	0.415	0.759	0.927
OR-2	0.536	0.786	0.707
OR-3	0.284	0.839	0.207

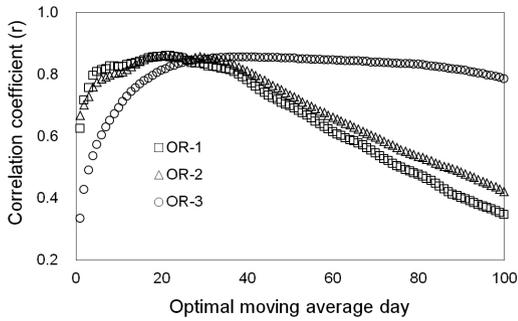


Fig. 9. Changes in correlation coefficient with moving average day.

에 인접해 있다. 이 지역은 선행강우를 고려한 이동평균과 0.839의 높은 상관계수를 가진다. OR-3 지역과 유사한 지역의 지하수위 변동은 선행강우를 고려한 강우에 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 OR-1, OR-2 그리고 OR-3에서 2011년의 강우데이터와 이동평균일수에 따른 강우이동평균과의 상관계수 변화를 나타낸다. 도심지역인 OR-1과 OR-2는 이동평균일수가 증가함에 따라 지하수위와의 상관계수도 증가하다가 약 20일 이동평균이 지하수위와 가장 높은 상관계수를 보이며 이동평균일수가 더 증가하면 상관계수는 가파르게 감소한다. 반면, 시골지역

인 OR-3의 경우, 이동평균일수가 작을 때 매우 작은 상관계수를 보이다가 일수가 증가함에 상관계수도 증가하여 약 40일에서 가장 큰 값을 보이고 이동평균일수가 더 증가하여도 OR-1과 OR-2와 같이 가파르게 감소하지 않는다. 이것은 Figs. 3 (a) and 5 (a)에서와 같이 OR-1과 OR-2의 지하수위는 비교적 빠른 시간에 상승·하강하는 반면, Fig. 7 (a)의 OR-3지역의 지하수위는 상대적으로 천천히 변동하기 때문에 이동평균일수가 커지면서 완만한 추세를 나타내주는 양상이 나타나는 것으로 판단된다. 도심지역과 도외지역에서 이런 차이가 나는 이유는 강우가 침투하여 지하수에 도달하는 역학적 과정이 서로 다르기 때문일 것으로 판단된다.

Fig. 10은 세 지역에서 지하수위와 강우량의 교차상관분석결과를 보여준다. Fig. 10 (a) and 10 (b)에서 확인할 수 있는 것처럼 OR-1과 OR-2의 교차상관계수는 Time lag가 0일 때 0.5 이상의 가장 높은 값을 가지며 0과 멀어질수록 가파르게 감소하지만, Fig. 10 (c)에서처럼 OR-3은 Time lag -34일 일 때 가장 높은 값을 보인다. 이전에 설명한 것과 같이 도심지역과 도외지역의 강우가 지하수위까지 도달하는 역학적 과정의 차이 때문에 발생하는 것으로 판단된다.

4대강 사업은 2009년 7월에서 2011년 10월에 하천

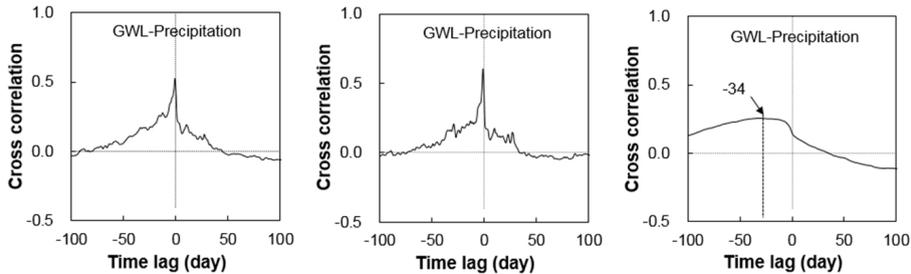


Fig. 10. Cross-correlation between GWL and precipitation: (a) OR-1, (b) OR-2 and (c) OR-3.

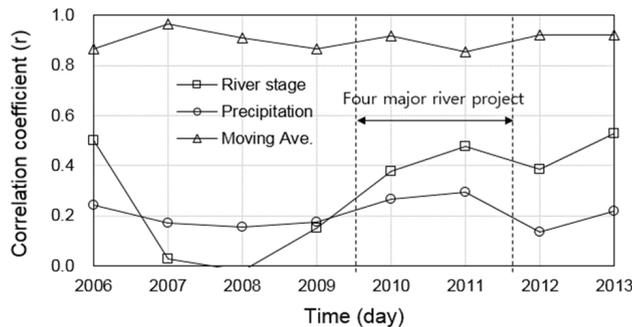


Fig. 11. Changes in coefficients of correlation with year for OR-3.

수위 조절을 목적으로 수행되었으며 한강수계에는 Fig. 1에서와 같이 OR-3의 상류에 이포보, 여주보 그리고 강천보가 건설되었다. Fig. 11는 OR-3지역의 연도별 지하수위와 강우량, 강우이동평균 그리고 하천수위의 상관계수를 보여준다. Fig. 11의 OR-3에서는 보 건설 전과 후에 하천수위에 대한 상관관계가 비교적 급변하는 모습을 보이나, 지하수위 변동의 주요 영향인자가 선행강우를 고려한 강우이동평균인 것에는 변화가 없는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

지반공학적인 측면에서 지하수위의 변동성은 기초구조물의 지지력 감소 및 추가적인 침하 등을 발생시킴으로써 전체 구조물의 안정성 혹은 사용성에 영향을 미칠 수 있다. 설계과정에서 적용되는 지하수위는 일반적으로 고정된 수위를 사용하나, 실질적으로는 강우, 지반의 종류, 지표면 포장률 등 다양한 이유로 인하여 연중으로 변동하는 패턴을 보이게 된다. 본 연구에서는 대부분 인간활동의 영역이 되어 있는 하천인근 지역을 대상으로, 지하수위 변동성과 이에 대한 영향인자를 조사 분석하였다. 도심 및 교외지역의 지하수위 변동 특성 및 영향 요소 분석 결과는 다음과 같다.

1. 도심지역 중 지표면 포장률이 높고 투수성이 좋은 흙으로 지반이 구성되어 있으며 규모가 큰 강에 근접해 있는 경우, 지하수위의 변동에 영향을 미치는 주요인자는 하천수위이며 본 연구의 대상지역에서는 하천수위의 영향으로 지하수위가 최고 5.44 m 까지 변동하였다. 또한 이 지역에서는 지하수위의 상승과 하강이 매우 빠르게 일어났으며 지하수위 변동에 노이즈 성분이 많이 포함되는 것이 관찰되었다.
2. 도심지역에 해당하여 지표면 포장률이 높고 지반의 투수성이 좋으나 규모가 작은 하천에 인접해 있는 경우, 지하수위 변동에 영향을 미치는 주요인자는 선행강우를 나타내는 이동평균과 하천수위이다. 본 연구 대상지역에서는 지표면 포장률이 높아서 강우가 직접 침투하지 못하며 강우로 인하여 불어난 하천수가 지하수위의 변동에 영향을 미치는 것으로 판단된다.
3. 도외지역에 해당하며 지표면 포장률이 낮고 지반의

투수성이 낮으며 비교적 규모가 큰 하천에 인접해 있는 경우, 지하수위 변동에 영향을 미치는 주요인자는 선행강우를 고려한 이동평균이다. 이 지역에서는 5 m 이상의 지하수위 변동이 관찰되었고 도심지역과 달리 수위의 상승·하강에 수개월이 소요되었으며, 노이즈 성분이 포함되지 않아 비교적 단조로운 변동양상을 보였다. 또한, 4대강 사업으로 연구대상지역의 상류에 보를 건설했지만 이는 지하수위 주요 영향인자에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2018년 연세대학교 대학원 재원으로 대학원 총학생회와 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0030040).

References

- Ausilio, E. and Conte, E. 2005. Influence of groundwater on the bearing capacity of shallow foundations. *Canadian Geotechnical Journal* 42: 663-672.
- Bansal, R. and Das, S. 2010. An analytical study of water table fluctuations in unconfined aquifers due to varying bed slopes and spatial location of the recharge basin. *Journal of Hydrologic Engineering* 15(11): 909-917.
- Battisti, D.S. and Naylor, R.L. 2009. Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat. *Science* 323: 240-244.
- Chesnaux, R., Chapuis, R., and Molson, J. 2006. A new method to characterize hydraulic short-circuits in defective borehole seals. *Groundwater* 44(5): 676-681.
- Coulibaly, P., Anctil, F., Aravena, R., and Bobee, B. 2001. Artificial neural network modeling of water table depth fluctuations. *Water Resources Research* 37(4): 885-896.
- ESIS (Environmental Spatial Information Service), <https://egis.me.go.kr>
- GIDS (Geotechnical Information DB System), <http://surveycp.seoul.go.kr>
- Guttman, N.B. (1999). Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association* 35(2): 311-322.
- Hoque, A.M., Hoque, M.M., and Ahmed, K.M. 2007. Declining groundwater level and aquifer dewatering in Dhaka metropolitan area, Bangladesh: causes and quantification. *Hydrogeology Journal* 15: 1523-1534.

- HRBEO (Han River Basin Environmental Office) 2013. Water environment management plan for Han River, Seoul (2008-2012), Ministry of Environment, Seoul, pp. 33-37 (in Korean)
- HRFCO (Han River Flood Control Office), <https://www.hrfco.go.kr>
- Izady, A., Davary, K., Alizadeh, A., Ghahraman, B., Sadeghi, M., and Moghaddamnia, A. 2012. Application of panel-data modeling to predict groundwater levels in the Neishaboor Plainm Iran. *Hydrogeology Journal* 20: 435-447.
- Kim, I., Park, D., Kyung, D., Kim, G., Kim, S., and Lee, J. 2016. Comparative influences of precipitation and river stage on groundwater levels in near-river areas. *Sustainability* 8(1): 1-16.
- Kim, Y.Y., Lee, K.K., and Sung, I.H. (1998). Groundwater systems in Seoul area: analysis of hydraulic properties. *The Journal of Engineering Geology* 8(1): 51-73. (in Korean)
- KMA (Korea Meteorological Administration) 2013. Climate change report in Korea Peninsular, Seoul, pp. 21-22 (in Korean)
- KMA (Korea Meteorological Administration), <https://web.kma.go.kr>
- Lu, J., Vecchi, G.A., and Reichler, T. 2007. Expansion of the Hadley cell under global warming. *Geophysical Research Letters* 34: L06805.
- Makriddakis, S. Wheelwright S.C., and Hyndman R.J., 2008. *Forecasting methods and applications*. 3rd edn. Wiley, Singapore 656 pp.
- NGIC (National Groundwater Information & Service Center), <https://www.gims.go.kr>
- Park, D., Kim, I., Kim, G., and Lee, J. 2017. Groundwater effect factors for the load-carrying behavior of footings from hydraulic chamber load tests. *Geotechnical Testing Journal* 30(3): 440-451.
- Park, J., Choi, Y., Kim, D., Park, C., and Yang, J. 2005. Development of groundwater dam operation index using daily precipitation data. Workshop of Korea Water Resources Association, 60. (in Korean)
- Pauwels V., Verhoest, N., and De Troch, F. 2002. A metahillslope model based on an analytical solution to a linearized Boussinesq equation for temporally variable recharge rates. *Water Resource Research* 38(12): 1297 (33-1-14).
- Sahoo, S. and Jha, M.K. 2013. Groundwater-level prediction using multiple linear regression and artificial neural network techniques: a comparative assessment. *Hydrogeology Journal* 21: 1865-1887.
- Schmertmann, J.H. 1970. Static cone to compute static settlement over sand. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 96(3): 1011-1043.
- Serrano S.E. and Workman, S.R. 1998. Modeling transient stream/aquifer interaction with the non-linear Boussinesq equation and its analytical solution. *Journal of Hydrology* 206: 145-255.
- Shahriar, M.A., Sivakugan, N., and Das, B.M. 2012. Settlements of shallow foundations in granular soils due to rise of water table: A critical review. *International Journal of Geotechnical Engineering* 6(4): 515-524.
- Terzaghi, K., Peck, R.B., and Mesri, G. 1996. *Soil mechanics in engineering practice*, 3rd Ed., Wiley, NewYork.
- Willhite, D.A. and Glants, M.H. 1985. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions *Water International* 10: 110-120.
- Winter, T.C. 1999. Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal* 7: 28-45.
- Yang, J. and Kim, N. 2011. The correlation between the moving average of precipitation and groundwater level in Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 31(3B), 265-276. (in Korean)
- Yasuhara, K., Murakami, S., Mimura, N., Komine, H., and Recio, J. 2007. Influence of global warming on coastal infrastructural instability. *Sustainability Science* 2: 13-25.