

가우시안 프로세스 회귀분석을 이용한 지하수위 추세분석 및 장기예측 연구

김효건¹ · 박은규^{1*} · 정진아¹ · 한원식² · 김구영³

¹경북대학교 지질학과

²연세대학교 지구시스템과학과

³한국지질자원연구원

Groundwater Level Trend Analysis for Long-term Prediction Based on Gaussian Process Regression

Hyo Geon Kim¹ · Eungyu Park^{1*} · Jina Jeong¹ · Weon Shik Han² · Kue-Young Kim³

¹Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu, Korea

²Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

³Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, South Korea

ABSTRACT

The amount of groundwater related data is drastically increasing domestically from various sources since 2000. To justify the more expansive continuation of the data acquisition and to derive valuable implications from the data, continued employments of sophisticated and state-of-the-arts statistical tools in the analyses and predictions are important issue. In the present study, we employed a well established machine learning technique of Gaussian Process Regression (GPR) model in the trend analyses of groundwater level for the long-term change. The major benefit of GPR model is that the model provide not only the future predictions but also the associated uncertainty. In the study, the long-term predictions of groundwater level from the stations of National Groundwater Monitoring Network located within Han River Basin were exemplified as prediction cases based on the GPR model. In addition, a few types of groundwater change patterns were delineated (i.e., increasing, decreasing, and no trend) on the basis of the statistics acquired from GPR analyses. From the study, it was found that the majority of the monitoring stations has decreasing trend while small portion shows increasing or no trend. To further analyze the causes of the trend, the corresponding precipitation data were jointly analyzed by the same method (i.e., GPR). Based on the analyses, the major cause of decreasing trend of groundwater level is attributed to reduction of precipitation rate whereas a few of the stations show weak relationship between the pattern of groundwater level changes and precipitation.

Key words : Gaussian process regression (GPR), Machine learning, Groundwater level trend analysis, National Groundwater Monitoring Network (NGMN), Han River basin

1. 서 론

근래 들어 전 지구적 기후변화의 영향으로 발생하는 지속적 가뭄은 국내 수자원 환경에 큰 영향을 미치고 있다. 1990년대 이후 빈발하는 지역적 가뭄은 국지적 물 부족 현상을 초래하여 사회·경제적 피해를 발생시키고 있다. 가뭄에 의한 경제적 손실은 수치적 측면에서 홍수보다 큰 것으로 보고된 바 있으며(Kim et al., 2011), 물 부족 해

소를 위한 대응책 마련과 체계적인 물 관리 및 선제적 대비를 위한 다양한 연구들이 수행되고 있는 상황이다 (Kim et al., 2012; Park et al., 2012; Kim et al., 2013; Kim and Park, 2015). 지하수 분야에서도 가뭄 극복을 위한 지하수의 활용 또는 가뭄의 평가 및 예측에 있어 지하수 자료의 활용 방안 등 다양한 관련 연구들이 수행되고 있다(Kwon and Kim, 2007; Cha et al., 2007; Kim and Lee, 2012; Yang et al., 2012; Lee et al., 2014).

*Corresponding author : egpark@knu.ac.kr

Received : 2016. 1. 22 Reviewed : 2016. 2. 12 Accepted : 2016. 7. 6

Discussion until : 2016. 10. 31

지하수의 무계획적 개발·이용은 지하수계에 심각한 교란을 발생시킬 수 있으며, 지속 가능한 지하수자원 활용을 위해서는 보다 체계적인 모니터링 및 관리가 필요하다. 국내의 경우 국가지하수관측망(총 374개소) 및 보조지하수 관측망(총 1,808개소)을 포함한 전국적 지하수 관측이 이루어지고 있으며(MOLIT, 2014), 이를 통해 수집되는 자료는 가용 지하수자원의 변화를 집계하고 예측하는데 매우 유용하게 활용될 수 있다. 가뭄에 대비한 지하수 가뭄 개념을 도입하기 위해서는 가뭄 인지를 위한 지하수 가뭄 지수 그리고 지역적인 특성을 고려한 지하수 관리수위의 설정 등과 같은 정량적 기준이 우선적으로 설정되어야 한다. 이와 같은 정량적 평가 기준을 설정하기 위해서는 축적된 지하수 관측 자료 및 지하수위 변동에 영향을 미치는 자연적(e.g., 계절별 강수량, 증발산량 등) 또는 인위적 영향 인자(e.g., 양수, 지표수위 변화 등)들에 대한 종합적 검토가 필요하다.

국내에서는 1990년대 중반 지하수정보관리사업과 함께 태동된 지하수정보 관리시스템의 구축과 급속도로 확산되고 있는 전국적 측정망 및 지하수·대수층 관측기술의 발전으로 인하여 방대한 양의 지하수 정보가 매년 집적되고 있는 상황이다. 이에 따라, 효율적 지하수자원 관리를 위한 정보 활용 측면에서 집약적 자료로부터 보다 의미 있는 결론을 도출하는 방안에 대한 관심이 점차 고조되고 있으며, 국가지하수관측망의 장기관측 자료를 활용한 다양한 연구가 활발히 수행되고 있다(Yi et al., 2004; Kim et al., 2006; Lee et al., 2006; Kim and Yum, 2007; Park and Parker, 2008; Jeong et al., 2010; Kim et al., 2011; Park, 2012; Lee et al., 2014; Jang et al., 2015). 국토교통부에서는 전국을 4개 권역으로 구분하고 '08년 한강권역을 시작으로 국가지하수관측망 장기관측 자료에 대한 분석을 시행하고 있다. 주요 분석 방법으로는 일평균 관측자료의 시계열도 작성을 통한 시계열 분석, 월평균 관측자료의 시계열도 작성을 통한 지하수위의 변동 유형 분류, 선형회귀분석을 통한 관측자료의 변동추세 분석 및 연간 변동률 산정 등이 있다(MOLIT, 2011).

시계열도를 바탕으로 한 시계열분석은 전반적인 변동 양상을 파악하고 선형회귀분석에 의한 연간 변동률 파악에 활용할 수 있으나, 장기적 예측에 따른 불확실성을 파악할 수 없다는 제한성을 가진다. 따라서 추세와 함께 추세 예측의 불확실성을 동시에 파악하여 장기 예측의 신뢰성을 제고할 필요가 있다. 가우시안 프로세스 회귀분석(Gaussian process regression, GPR) 모델은 추세를 통한 장기적인 예측뿐만 아니라 예측의 질 또는 예측의 불확실

성을 동시에 제공하므로, 앞서 언급된 선형회귀분석의 제한성을 극복할 수 있다(Rasmussen, 2004; Rasmussen and Williams, 2006). 수리학 분야에서는 아직까지 많은 활용 사례는 없는 상황이나 하천유량의 예측(Sun et al., 2014), 하천 녹조류 변화 예측(Bazi et al., 2012), 하천 온도변화 예측(Grbiet al., 2013) 등에 점차적으로 이용되는 상황이다.

빠른 속도로 집적되는 방대한 양의 지하수 정보를 객관적으로 해석하기 위해서는 빅데이터 및 인공지능 기술의 도입이 요구되나 구체적인 방법론, 적용 대상, 장기적 계획 등은 미비한 실정이다. 빅데이터 혹은 인공지능 기술의 지하수 수자원 분야 적용을 위하여, 본 연구에서는 GPR 기법을 채택하여 지하수위 추세분석 및 변동유형 분류에 활용하였다. GPR 기법의 활용성을 검토하기 위하여 국가지하수정보센터(National Groundwater Information Management and Service Center, GIMS)에서 관리 및 제공하는 지하수 관측자료 중 한강권역에 위치하고 있는 국가지하수관측망의 지하수위 자료를 이용하여 분석에 적용하였다. 이러한 적용을 통하여 빅데이터 기법의 지하수 자료 적용에의 다양한 시사점을 도출하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. GPR의 이론적 기반

시간 t_o 동안 관측된 특정 지하수위 시계열 자료를 \mathbf{X}_o , 그리고 시간 t_p 동안 예측하여야 할 특정 지하수위 시계열 자료를 \mathbf{X}_p 라 하였을 때 이 자료들의 합을 \mathbf{X} 라 표현할 수 있으며 각 시간에서의 기댓값인 μ 와 함께 각각 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_o \\ \mathbf{X}_p \end{bmatrix} \quad \text{및} \quad \mu = \begin{bmatrix} \mu_o \\ \mu_p \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 자료의 공분산 \mathbf{C} 는 $(\mathbf{X} - \mu)^T(\mathbf{X} - \mu)$ 이며 따라서 분할된 분산 행렬은

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{oo} & C_{op} \\ C_{po} & C_{pp} \end{bmatrix} \quad (2)$$

와 같이 쓸 수 있다. 여기서 분석을 실시할 시계열 자료를 $\mathbf{Y}_o = \mathbf{X}_o - \mu_o$, 그리고 $\mathbf{Y}_p = \mathbf{X}_p - \mu_p$ 라 정의하고 각각이 가우시안 분포를 따른다고 가정하면, 동시확률분포는

$$p(\mathbf{Y}_o, \mathbf{Y}_p) \propto \exp\left(-\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_o \\ \mathbf{Y}_p \end{bmatrix}^T \mathbf{C}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_o \\ \mathbf{Y}_p \end{bmatrix}\right) \quad (3)$$

와 같이 주어진다. 따라서 베이(Bayes)의 정리 $p(\mathbf{Y}_a, \mathbf{Y}_b) = p(\mathbf{Y}_a|\mathbf{Y}_b)p(\mathbf{Y}_b)$ 에 의해

$$p(\mathbf{Y}_o|\mathbf{Y}_p) \propto \exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{Y}_o - \mathbf{Y}_p \mathbf{C}_{pp}^{-1} \mathbf{C}_{po})^T (\mathbf{C}_{oo} - \mathbf{C}_{op} \mathbf{C}_{pp}^{-1} \mathbf{C}_{po})^{-1} (\mathbf{Y}_o - \mathbf{C}_{op} \mathbf{C}_{pp}^{-1} \mathbf{Y}_p)\right] \quad (4)$$

와 같이 쓸 수 있다.

위의 식 (4)는 정규분포 함수의 형태를 가지며, 다변량 가우시안 정리(multivariate Gaussian theorem)인 $p(\mathbf{Y}_o|\mathbf{Y}_p) = N(\mathbf{m}, \mathbf{D})$ 을 통해

$$\mathbf{m} = \mu_o - \mathbf{C}_{op} \mathbf{C}_{pp}^{-1} (\mathbf{X}_p - \mu_p) \quad (5-1)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{C}_{oo} - \mathbf{C}_{op} \mathbf{C}_{pp}^{-1} \mathbf{C}_{po} \quad (5-2)$$

를 얻을 수 있다(Rasmussen and Williams, 2006). 관찰에 의해 수정된 평균 \mathbf{m} 및 분산 \mathbf{D} 는 공분산을 모델화하는 커널함수(kernel function) 및 초기 예측으로부터 반복적 연산에 의해 (5-1)과 (5-2)를 얻을 수 있다.

커널함수는 상호 떨어져 있는 자료 간의 유사성을 설명하는 함수로 t_1 과 t_2 에서 관찰된 두 자료인 Z_1 과 Z_2 의 공분산은 $\text{Cov}(Z_1, Z_2) = k(t_1, t_2) = k(|t_1 - t_2|)$ 와 같이 t_1 과 t_2 간의 거리를 유일한 변수로 하는 함수에 의해 설명할 수 있다고 가정하는 모델이다. 일반적으로 커널함수에는 방사상 기반함수(radial basis function, RBF)가 이용되며, 본 연구에서 이용된 RBF는 매우 일반적인 형태로

$$k(t_1, t_2) = \alpha \exp\left[-\frac{(t_1 - t_2)^2}{2\beta^2}\right] \quad (6)$$

와 같다. 여기서 RBF 모델 파라미터인 α 와 β 는 자료를 통하여 경험적으로 예측되어야 할 상수이며, 일반적으로 자료마다 특성적인 값의 범위를 가지고 있다.

위의 GPR 기법은 자료의 분포가 가우시안 분포를 지남을 가정한다는 측면에서 선형회귀와 유사성을 가진다. 그러나 무한차원의 특성함수를 이용할 수 있으며 예측에 따른 불확실성을 다룰 수 있다는 측면에서 기존 선형회귀 기법과 차별성을 갖는다.

2.2. 연구자료

본 연구에서는 한강권역에 위치하는 국가지하수관측망 중 최소 10년 이상의 관측자료를 확보할 수 있고 해당 관측기간 동안 1개월 이상의 연속된 결측자료가 없는 지

점을 선정하였다. 아울러 총적층과 암반층의 수위를 동시에 관측하고 있는 지점을 기준으로 하여, 총 58개 관측정의 자료(암반관측정 29개소, 총적층관측정 29개소)를 분석에 적용하였다. 또한 관측소의 설치 시점에 따라 각 관측정별 관측 기간은 서로 상이하나 동일 기간 내 지하수위 변동 추세를 상호 비교하기 위하여, 추세분석에 적용한 관측자료의 기간은 2004년부터 2013년까지로 하였다.

국가지하수정보센터(GIMS)에서 운영 중인 국가지하수 관측망 관리시스템(<http://www.gims.go.kr/monitor3/>)의 각 관측정별 일평균 지하수위 자료를 토대로 단기적 기후간섭 및 계절적 효과를 배제하기 위하여 월평균 지하수위 자료를 가공 후 추세분석에 사용하였다. 단기적으로 나타나는 결측자료의 보간은 실시하지 않았으며 월평균 지하수위의 산정 시 수 일 정도의 단기적인 결측이 있을 경우 결측일 수 만큼을 제외한 지하수위 자료의 평균을 해당 월의 대표 평균값으로 산정하였다. 이에 따라 서로 다른 연도에서 동일한 월 자료만을 추출하여 자료를 구성한 후 추세 분석을 실시하였다.

또한, 지하수위와 함께 강수량의 변동 경향을 검토하기 위하여 지하수 관측소 인근에 위치한 기상 관측소의 자료를 기초로 추세분석을 실시하였다. 분석을 위해 기상청(<http://www.kma.go.kr>)에서 제공하는 기상관측소 및 자동 기상관측시스템(AWS)의 강수 자료를 토대로 월별 누적 강수량을 사용하였다. 이에 따라 각 지하수 관측소 인근에 위치하는 총 20개 기상관측 지점을 선정하였으며, 분석에 적용한 관측 자료의 기간은 지하수위 분석 시 적용한 기간과 동일하다.

2.3. 지하수위 추세분석 및 변동유형 분류

GPR이란 종속변수가 가우시안 프로세스를 따를 경우 실시하는 회귀분석 기법의 일종이며 많은 선진 기계학습 기법들(i.e. 로지스틱 회귀분석, 인공신경망, 지지기반벡터 등)과 유사한 구조적 특성을 갖는다. 특정 지하수 수위(H^*)를 오차를 포함하는 확률변수(i.e. $H^* = H + \epsilon$)라고 가정하였을 경우, 오차를 제거한 기대 수위는 평균과 공분산의 함수로 표현될 수 있으며, 다시 공분산은 커널함수로 해석될 수 있다고 가정한다. 또한 GPR 기법은 분석에 적용할 대상 자료의 추이에 따라 상수, 선형모델, 비선형 모델 등 다양한 평균값 모델을 활용할 수 있다. 이에 따라 각 지하수 관측소에서 취득한 지하수위 관측자료의 추이에 따라 선형 또는 비선형의 평균값 모델을 적용할 수 있으며, 이러한 유연성이 GPR 기법의 가장 큰 장점이라 할 수 있다.

본 연구에서는 GPR을 이용하여 한강권역에 속하는 국가지하수관측망의 지하수위에 대한 회귀분석을 실시하고 그 적용성을 분석하였다. 분석에 이용된 지하수위 관측 자료들은 비교적 선형의 추세를 잘 따르는 것으로 판단되어 선형의 평균값 모델을 이용한 추세분석을 실시하였다. 또한, GPR 기법의 적용 결과 산정된 예측 추세선의 기울기 값, 즉 월별 지하수위 변화율을 토대로 각 관측점의 월별 지하수위 변동유형을 분류하였다.

각 관측지점에서 지하수위는 계절적 주기성에 따른 최저수위와 최고수위의 변동 폭에서 알 수 있는 것처럼 수위 변동의 특성이 다르게 나타난다. 이러한 특성을 고려하기 위해 각 관측점의 수위자료에서 분석된 월별 지하수위 변화율의 표준편차(SD)를 지하수위 변동유형의 분류 기준으로 적용하였다. 이에 따라 각 관측점의 GPR 분석 결과 산정된 1월부터 12월까지의 예측 추세선으로부터 월별 지하수위 변화율의 표준편차를 구한 후 이를 각 월의 지하수위 변화율(Monthly Rate of Change, MRC)과 비교하여 수위 변동추세의 유형을 결정하였다. 최종적으로 해당 기준에 의해 아래와 같이 지하수위 변동유형을 세 가지로 분류하였다.

- 1) $MRC > +SD$: 상승 추세(Increasing trend)
- 2) $MRC < -SD$: 하강 추세(Decreasing trend)
- 3) $+SD > MRC > -SD$: 추세 없음(No trend)

2.4. 지하수위와 강수량의 상관관계

지하수위 변동에 영향을 미치는 대표적 비-인위 요인으로 강수량에 대한 추세분석을 실시하였다. 본 연구에서는 GPR 기법을 적용하여 산정된 각 관측 지점별 지하수위와 강수량의 월별 변화율을 기초로 변동 경향을 제시하였다. 두 인자간의 상관관계를 검토하기 위하여 상관분석을 실시하였으며, 산정된 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient, r)를 토대로 아래와 같이 상관관계의 단계를 부여하였다(Evans, 1996).

- 1) $0.80 \leq r \leq 1.00$: 매우 강한 상관관계(very strong correlation)
- 2) $0.60 \leq r \leq 0.79$: 강한 상관관계(strong correlation)
- 3) $0.40 \leq r \leq 0.59$: 중간정도의 상관관계(moderate correlation)
- 4) $0.20 \leq r \leq 0.39$: 약한 상관관계(weak correlation)
- 5) $0.00 \leq r \leq 0.19$: 매우 약한 상관관계(very weak correlation)

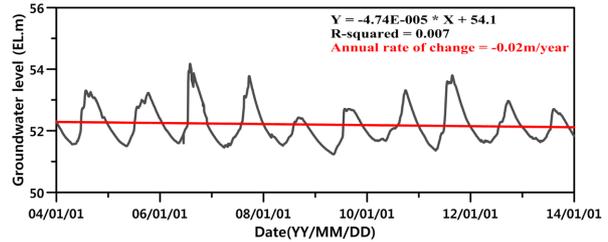


Fig. 1. Temporal changes of groundwater level obtained from Chungju-Gageum National Groundwater Monitoring Network in alluvium aquifer.

3. 결과 및 고찰

시계열도를 이용하여 각 관측소의 지하수위 변동 추세를 검토한 결과 변동 폭을 비롯한 지하수위의 변동 양상은 각기 다르게 나타났으며 분석의 예시는 Fig. 1과 같다. 그림의 시계열 그래프는 대체로 건기와 우기에 뚜렷한 수위 변동을 잘 보여주고 있으며, 특히 동절기 동안에는 매우 뚜렷한 지하수위 강하가 나타난다. 그림에서 붉은색 선은 선형회귀분석을 이용하여 산정된 추세선을 도시한 것으로 추세선의 기울기를 이용하여 연간 변동률을 산정할 수 있다. 그러나 시계열도에 기초한 선형회귀분석 기법은 추세 예측에 따른 불확실성을 판단할 수 없으며, 관측 기간 내 각 월의 변동 특성을 파악하는데 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 연-월 지하수위 평면을 도시하여 전반적인 경향성을 파악에 활용하였다. Fig. 2는 2004년부터 2013년까지 각 월의 평균 지하수위를 도시한 사례이다. 그림에서 붉은색은 높은 지하수위를 의미하며 파란색은 낮은 지하수위를 의미한다. 연중 보이는 지하수위의 경향은 6-7월을 전후로 뚜렷한 차이를 보이며, 특히 하반기의 월별 지하수위는 상반기보다 변동성이 큰 것을 알 수 있다. 이처럼 수위 평면을 이용하여 경향성 분석 및 이상 수위를 보이는 연-월을 확인하기는 용이하나, 시간에 따른 월간 경향성을 정량적으로 얻어내는 데에는 한계가 있다. 따라서 시간에 따른 월 수위의 경향성 분석을 위하여 Fig. 2에서 같은 월 즉 1-12월 각각에 대하여 GPR 기법을 적용하여 추세 분석을 시행하였다.

서로 다른 해의 동일 월에 대한 평균 지하수위 자료를 기초로 GPR 기법을 적용한 지하수위 추세 예측 사례는 Fig. 3과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 GPR 해석 결과는 선형의 예측 평균추세(실선) 뿐만 아니라 예측의 불확실성을 표현하는 신뢰구간(회색영역)을 제공한다. 선형의 평균값 모델 즉 1차식을 평균추세로 이용하였을 경우 예측된 지하수위는 시간에 따라 상승 또는 하강하는 경향을

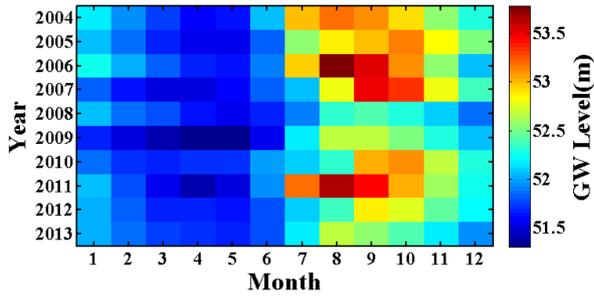


Fig. 2. An example of monthly averaged groundwater level plane obtained from Chungju-Gageum National Groundwater Monitoring Network in alluvium aquifer.

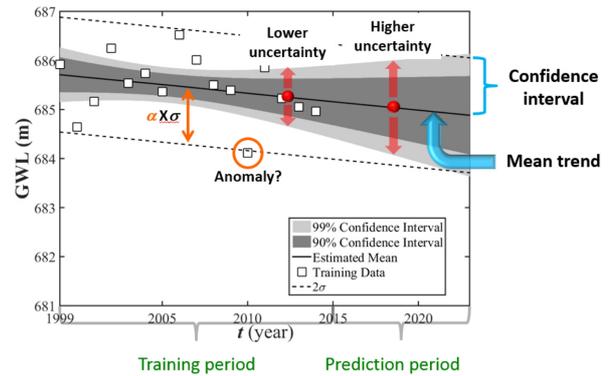


Fig. 3. An example of GPR application and the analysis.

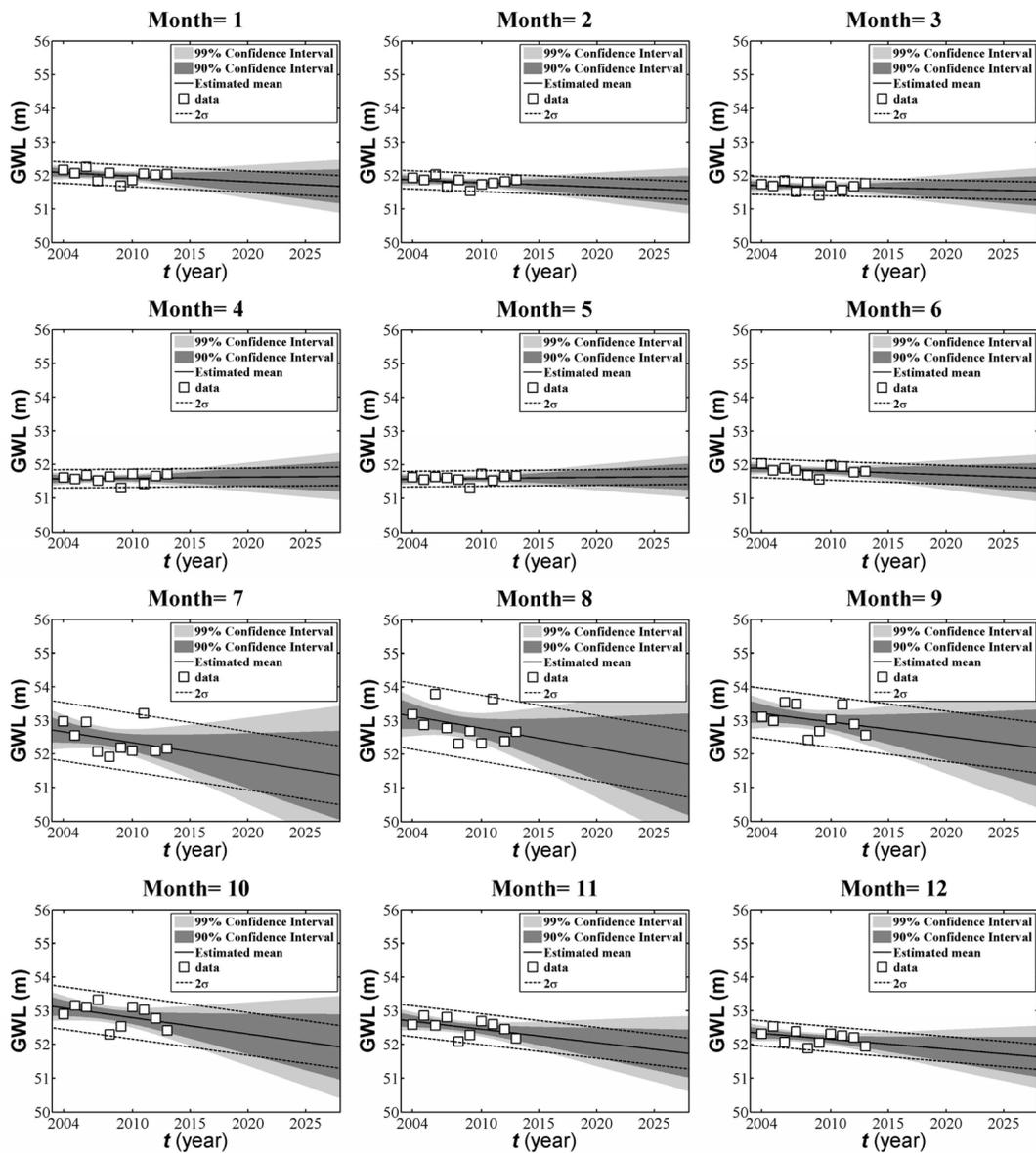


Fig. 4. Monthly averaged groundwater level trend analysis based on GPR applied to Chungju-Gageum National Groundwater Monitoring Network in alluvium aquifer.

보여준다. 따라서 예측 평균선의 기울기 즉 수위 변화율을 토대로 월별 지하수위 변동 유형을 분류할 수 있다. 그림에서 붉은색 점과 화살표는 특정 시기의 예측 지하수위와 예측의 불확실성을 의미하는 신뢰구간을 보여준다. 신뢰구간이 추세선으로부터 좁게 형성될수록 작은 불확실성을 가지는 반면, 넓어질수록 불확실성이 점차 커짐을 의미한다. 신뢰구간의 경우 해석자의 판단에 따라 다양한 신뢰계수를 적용할 수 있으나, 일반적으로 95%가 활용된다. 또한, 점선은 예측 추세선을 평균값으로 하여 각 혼련자료(실제 관측자료)로부터 얻은 표준편차(σ)의 α 배를 표현한 것이다. 배수(α)값은 자료 관리자의 장기적 수위관찰을 통하여 결정될 수 있으며 본 연구에서는 2를 적용하였다. 이를 통해 특정 해의 월평균 수위가 표준편차의 2배 범위를 벗어난 경우 이를 이상치 감지(anomaly detection)의 기준으로 활용할 수 있다.

2004-2013년 기간 동안 월평균 지하수위 자료를 분석에 적용하여 2028년까지의 월별 지하수위 추이를 예측한 사례는 Fig. 4와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 대부분 월에서 지하수위 강하가 발생하고 있음을 알 수 있으며, 평균적인 지하수위 변화율은 -0.026 m/year로 미약한 하향

추세를 보인다(Table 1). 월별 추세를 세부적으로 살펴보면 1월부터 6월까지의 매우 미약한 상향 또는 하향의 추세를 보이지만, 7월부터 12월까지는 연평균 변화율보다 큰 변화율을 가지며 뚜렷한 하향 추세가 나타난다(Fig. 4 및 Table 1). 특히 9-12월 분석 결과를 보면 2008년 지하수위는 예측 추세선 하방 표준편차의 2배에 근접하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 4). 2008년 9월부터 12월까지 누적강수량이 2007년에 비해 약 73% 감소한 것으로부터 판단하여 볼 때 기후적 요인이 지하수위 하강에 크게 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

앞서 시계열도(Fig. 1)와 같이 지하수위는 계절적 주기성의 변동 양상을 보이며 대체로 건기와 우기에 뚜렷한 수위 변동을 잘 보여준다. 또한, 우리나라의 강우 특성상 특정 기간에 집중되는 호우 또는 가뭄이 빈발하는 점을 고려할 때 지하수위를 체계적으로 관리하기 위한 일련의 기준이 필요하다. 이에 본 연구에서는 GPR 기법을 토대로 산정한 월별 지하수위 변화율의 표준편차를 이용하여 수위 변동 유형의 분류 기준을 앞서 2.3절에 제시한 바 있다. 이러한 기준을 국가지하수관측망 총주기급 관측소 GPR 결과에 적용하기 위하여 Fig. 5를 통한 분석이 이루어

Table 1. Changing rate of monthly averaged groundwater level estimated by GPR by applying to Chungju-Gageum National Groundwater Monitoring Network in alluvium aquifer (Unit: m/year)

Month	1	2	3	4	5	6	7
Rate of change	-0.017	-0.013	-0.007	0.003	0.003	-0.012	-0.054
Month	8	9	10	11	12	Avg.	SD
Rate of change	-0.060	-0.043	-0.048	-0.040	-0.029	-0.026	0.022

Table 2. Summarized trend classifications of the National Groundwater Monitoring Network within Han River Basin (shadings are dominant trends of the corresponding month) (Unit: number of wells)

GWL trend	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.
Increasing trend	12 (21%)	12 (21%)	17 (29%)	23 (40%)	16 (28%)	15 (26%)
Decreasing trend	26 (45%)	16 (28%)	14 (24%)	15 (26%)	20 (34%)	22 (38%)
No trend	20 (34%)	30 (52%)	27 (47%)	20 (34%)	22 (38%)	21 (36%)
GWL trend	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Increasing trend	18 (31%)	20 (34%)	20 (34%)	11 (19%)	16 (28%)	15 (26%)
Decreasing trend	19 (33%)	22 (38%)	25 (43%)	34 (59%)	24 (41%)	16 (28%)
No trend	21 (36%)	16 (28%)	13 (22%)	13 (22%)	18 (31%)	27 (47%)

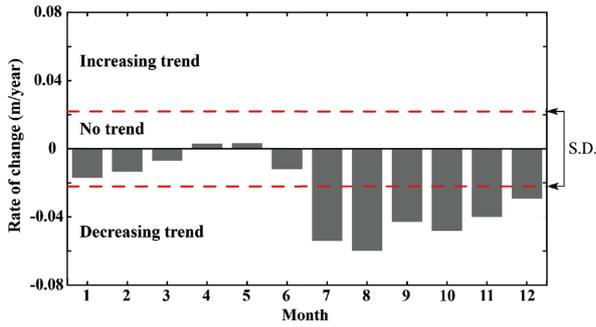


Fig. 5. Statistical analysis on monthly averaged groundwater level changing rates for different months of Chungju-Gageum National Groundwater Monitoring Network in alluvium aquifer.

어졌다. 그림에서 붉은색 점선은 월별 지하수위 변화율의 단위 표준편차 범위를 의미하며, 이를 통해 수위 변화율이 하방의 단위 표준편차 범위를 벗어나는 7-12월은 하강 추세로 분류할 수 있다. 추세 없음으로 분류된 1-6월의 경우 양(+) 또는 음(-)의 지하수위 변화율을 가지나 상대적으로 매우 미약한 변동 경향을 보인다(Fig. 4).

GPR 기법 및 수위 변동 유형의 분류 기준(2.3절 참조)을 토대로 한강권역에 위치하는 국가지하수관측망 29개소(관측정 58개소)에 대하여 월별 지하수위 변동 유형을 분류하였다(Table 2). 표에서 회색 음영으로 처리한 부분은 각각의 월에서 우세한 변동 유형을 표시한 것으로, 이를

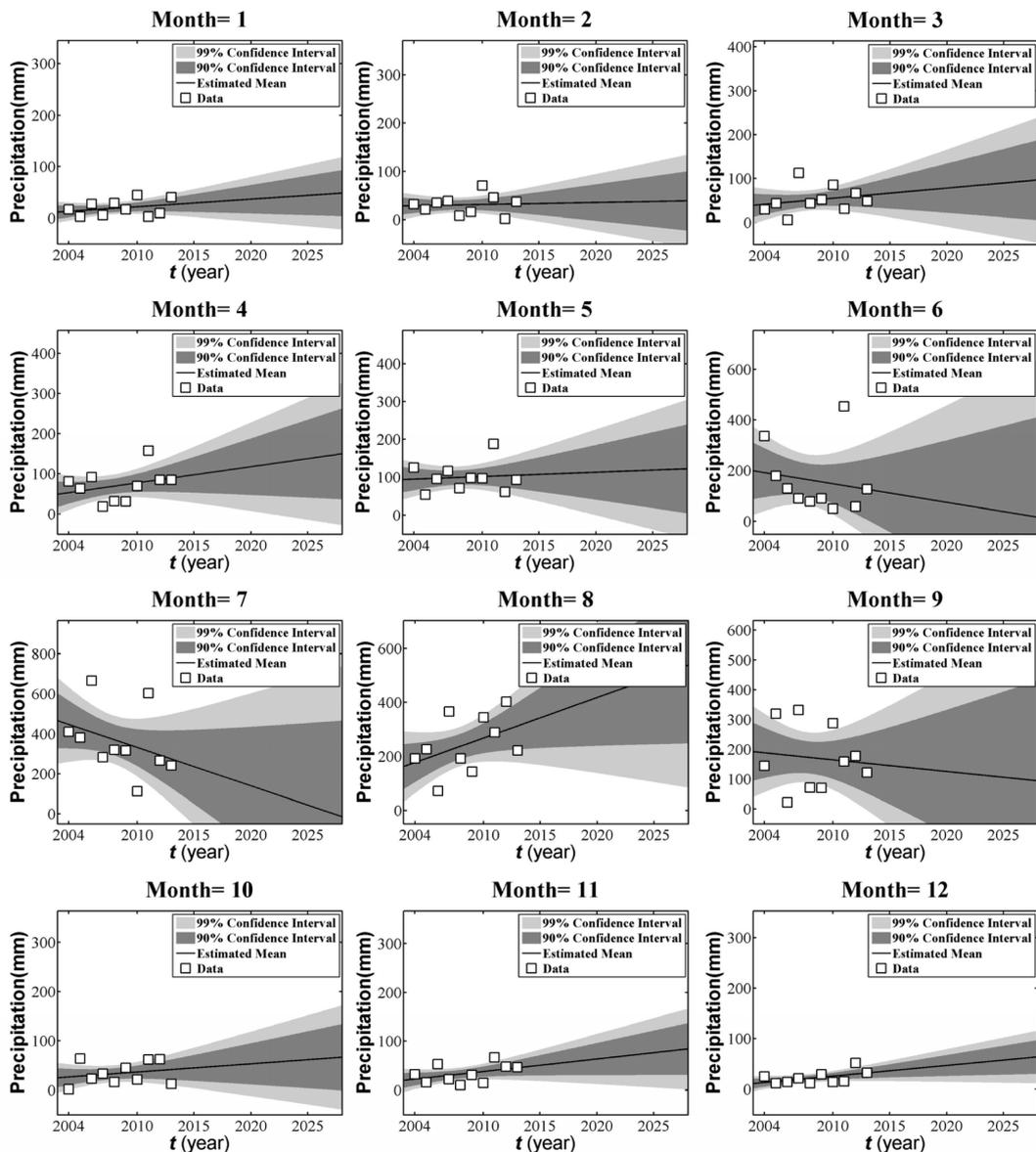


Fig. 6. Monthly averaged precipitation trend analysis based on GPR applied to Chungju weather station.

통해 2004-2013년 기간 동안 한강권역의 수위 변동 유형은 전반적으로 하강 추세가 우세하다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 변동 유형의 분류를 통하여 상승 또는 하강의 지하수위 변동 추세가 뚜렷할 경우, 그 기작에 대한 분석이 수반될 수 있다. 특히, 지속가능한 지하수 이용·관리 측면에서 하강 추세가 지속되는 지점에 대해서는 이와 같은 분석에 기초한 체계적인 관리가 이루어져야 한다.

따라서 본 연구에서는 대표적 비-인위 요인으로 시간에 따른 강수량의 변화를 고려하고, 이에 대한 GPR 분석을 실시하여 그 결과를 지하수 변동 패턴과 비교·분석하였다. 국가지하수관측망 인근 기상관측소의 2004-2013년 기간 동안 월별 강수량 자료에 기초하여 추세분석을 실시하였으며, 이에 따른 강수량 변화 예측 사례는 Fig. 6과 같다. 분석 결과를 보면 6월, 7월 및 9월의 경우 예측에 따른 불확실성은 다소 크지만, 그 변화율은 각각 -7.3 mm/year, -19.2 mm/year, -3.9 mm/year로 상대적으로 큰

감소율을 보인다(Fig. 6 및 Table 3). 지하수 함양의 대부분이 우기 동안 이루어지는 국내 특성을 고려하여 볼 때, 이러한 큰 폭의 감소는 지하수 함양량 감소에 상당한 영향을 미칠 수 있으며 지하수위 저하에도 적지 않은 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

GPR 분석으로 산정된 월별 평균 변화율을 이용하여 Fig. 7과 같이 강수량 변화와 지하수위 변동 양상을 비교·분석하였다. 그림에서 월별 평균 변화율이 음(-)의 값을 가지는 경우 하향 추세를, 양(+)의 값은 상향 추세를 의미한다. Fig. 7(a)의 분석 사례에서 지하수위의 경우 전반적으로 하향 추세가 뚜렷하게 나타나지만, 강수량 변화는 우기의 일부 기간을 제외하면 상향 추세가 우세한 것으로 나타난다. 반면 Fig. 7(b)의 분석 사례에서 지하수위는 연중 하향 추세가 나타나며 강수량의 변화 역시 전반적으로 하향 추세가 우세하게 나타난다. 이를 통해 강수량이 지하수위 변동에 영향을 미치는 정도는 각 관측 지

Table 3. Changing rate of monthly averaged precipitation estimated by GPR by applying to Chungju weather station (Unit: mm/year)

Month	1	2	3	4	5	6
Rate of change	1.48	0.42	2.31	4.04	1.14	-7.28
Month	7	8	9	10	11	12
Rate of change	-19.22	15.07	-3.92	1.67	2.56	2.10

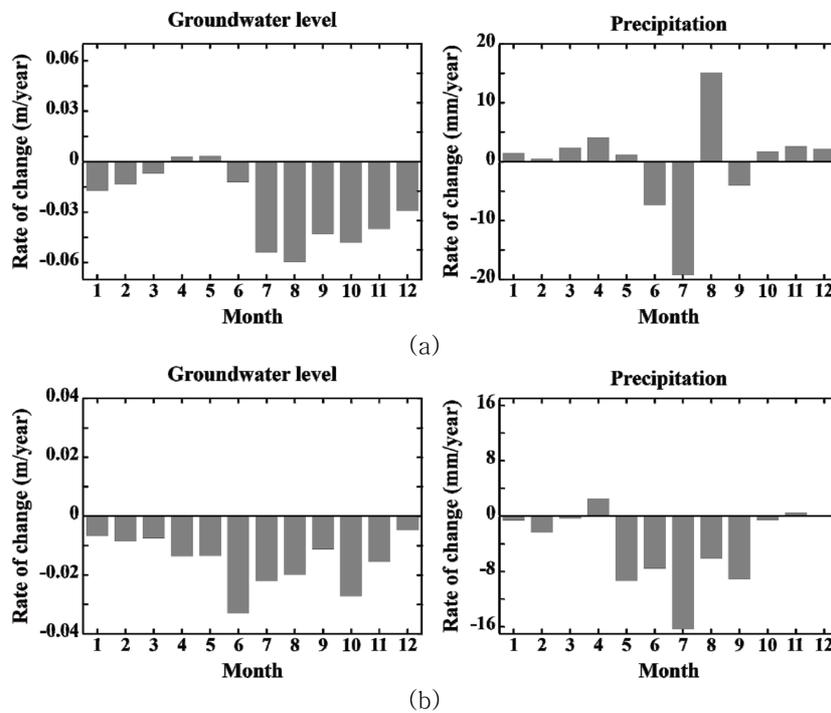


Fig. 7. The comparisons of monthly changing rate of the groundwater level and precipitation estimated from GPR applied to (a) Chungju-Gageum National Groundwater Monitoring Network in alluvium aquifer and Chungju weather station, and (b) Hongcheon-Hongcheon National Groundwater Monitoring Network in alluvium aquifer and Hongcheon weather station.

Table 4. The results of correlation analyses from the rate of groundwater level and precipitation change. Data used are the GPR analysis applied to the groundwater level of Chungju-Gageum National Groundwater Monitoring Network and the precipitation of Chungju weather station from 2004 to 2013

		Precipitation	GWL of bedrock	GWL of alluvium
Precipitation	Pearson correlation	1	.282**	.306**
	Sig.(2-tailed)		.002	.001
	N	120	120	120
GWL of bedrock	Pearson correlation	.282**	1	.965**
	Sig.(2-tailed)	.002		.000
	N	120	120	120
GWL of alluvium	Pearson correlation	.306**	.965**	1
	Sig.(2-tailed)	.001	.000	
	N	120	120	120

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Table 5. The results of correlation analyses from the rate of groundwater level and precipitation change. Data used are the GPR analysis applied to the groundwater level of Hongcheon-Hongcheon National Groundwater Monitoring Network and the precipitation of Hongcheon weather station from 2004 to 2013

		Precipitation	GWL of bedrock	GWL of alluvium
Precipitation	Pearson correlation	1	.892**	.871**
	Sig.(2-tailed)		.000	.000
	N	120	120	120
GWL of bedrock	Pearson correlation	.892**	1	.984**
	Sig.(2-tailed)	.000		.000
	N	120	120	120
GWL of alluvium	Pearson correlation	.871**	.984**	1
	Sig.(2-tailed)	.000	.000	
	N	120	120	120

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

수 간 상관관계를 검토하기 위해 GPR 분석 시 이용한 2004년부터 2013년까지 월평균 지하수위 및 강수량 자료를 기초로 상관분석을 실시하였다. 분석 결과에 의하면 Fig. 7에서 지하수위와 강수량 각각의 연중 우세한 변동 추세가 상반되게 나타난 국가지하수관측망 충주가금 관측소에서 지하수위는 강수량과 상관성이 미약한(암반상관계수: 0.282, 총적상관계수: 0.306) 것으로 나타났다(Table 4). 반면 각각의 연중 우세한 변동 추세가 비슷한 양상을 보이는 흥천흥천 관측소의 경우 지하수위는 강수량과 매우 강한 상관관계(암반상관계수: 0.892, 총적상관계수: 0.871)가 있는 것으로 확인되었다(Table 5).

이러한 상관분석 방법을 적용하여 한강권역에 위치하는 29개 국가지하수관측망(관측정 58개)과 인근 20개 기상관측소의 2004-2013년 기간 동안 월평균 관측 자료를 기초로 지하수위와 강수량의 상관관계를 파악하였다. 분석 결

과 산정된 피어슨 상관계수를 앞서 2.4절에서 언급한 5단계로 구분하여 볼 때, 지하수위와 강수량은 대체로 중간정도 이상의 상관성을 가지는 것으로 분석되었다(Table 6(a)). 월별 지하수위 변동유형 분류에 의해 연중 하강 추세가 우세한 것으로 나타난 12개 국가지하수관측망의 상관분석 결과(Table 6(b))를 보면, 지하수위와 강수량은 대체로 중간정도 이상의 상관성을 가지는 것으로 분석되었다.

지하수계 변화를 확인하기 위하여 대수층 간 수직적 수리구배 변화를 동일기간에 대하여 분석하였다. Fig. 8은 국가지하수관측망 충주가금 관측소의 암반관측정(심도 70 m)과 총적관측정(심도 14.5 m) 간의 수위차이를 도시한 것이다. 그림에서 파란색 바(Bar)는 암반층의 수두가 더 높은 경우를 의미하며, 암반층에서 총적층으로의 지하수 흐름을 지시한다. 반대로 붉은색 바는 총적층의 수두가 더 높은 것을 의미하며, 총적층에서 암반층으로의 지

Table 6. The summary of correlation coefficient analyses on the groundwater level and precipitation. The data is from National Groundwater Monitoring Network and the corresponding weather stations within Han River Basin. (Unit: number of wells)

(a) 29 National Groundwater Monitoring Network (total)

Value of r	Interpretation	GWL of bedrock and Precipitation	GWL of alluvium and Precipitation
0.80 to 1.00	very strong correlation	4	4
0.60 to 0.79	strong correlation	8	10
0.40 to 0.59	moderate correlation	12	8
0.20 to 0.39	weak correlation	3	6
0.00 to 0.19	very weak correlation	2	1

(b) 12 National Groundwater Monitoring Network (decreasing trend)

Value of r	Interpretation	GWL of bedrock and Precipitation	GWL of alluvium and Precipitation
0.80 to 1.00	very strong correlation	1	1
0.60 to 0.79	strong correlation	5	6
0.40 to 0.59	moderate correlation	4	2
0.20 to 0.39	weak correlation	1	3
0.00 to 0.19	very weak correlation	1	-

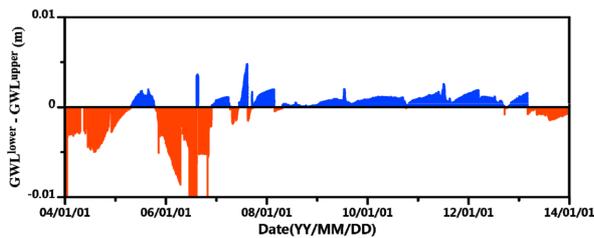


Fig. 8. The difference of hydraulic heads from the bedrock and alluvium monitoring wells at the Chungju-Gageum National Groundwater Monitoring Network.

하수 흐름을 지시한다. 그림에서 보는 바와 같이 2006년 말을 기준으로 전반기와 하반기의 지하수 흐름 방향성은 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 즉, 전반기에 보이는 지하수의 수직적 흐름이 하향 우세였던 것에 반하여 하반기에는 그 반대인 상향 우세 경향을 보여준다. 이러한 방향성의 변화는 하반기에 충전층 수위 저하로 인하여 심부의 지하수가 이 지역으로 지속 배출됨을 의미하며, 지하수의 함량이 주도적이었던 기존 환경이 배출 우세로 변화하였다는 것을 지시한다. 이와 같은 수직적 수리구배의 변화는 해당 관측소를 포함한 대수층에서 지하수 평형상태가 변화하고 있음을 지시하므로 수위 변동의 원인 분석 시 주요 정보로 활용하여야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 GPR 기법의 지하수위 관측자료 적용을

통하여 기법의 적용성 및 적용을 통한 다양한 예측 가능성을 보였다. GPR 기법은 기계학습 및 빅데이터 기술의 핵심 기법 중 하나로 다양한 자료 유형 및 추세 형태에 대하여 적용 가능한 유연성을 가진다. 따라서 국내 지하수위 관측에의 적용을 통하여 다양한 의미 있는 분석을 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 시계열도를 토대로 한 회귀분석은 전반적인 지하수위 변동 양상을 파악하고 연간 수위 변동률을 해석할 수 있으나 추세 예측에 따른 불확실성을 예측할 수 없는 한계점이 있으므로 추세의 예측과 함께 예측의 불확실성을 동시에 분석하는 등의 개선이 요구된다. GPR을 지하수위 추세 예측에 적용할 경우 장기적인 예측뿐만 아니라 예측의 질 또는 예측의 불확실성을 동시에 얻을 수 있어 보다 신뢰성 있는 분석을 할 수 있다는 점이 GPR 기법 적용의 가장 큰 장점이라고 할 수 있다.

일평균 수위자료는 극단적 기후요인과 수리간섭요인에 의한 변동성이 크므로 본 연구에서는 장기적인 평균수위를 기초로 하고자 월평균 지하수위 자료를 이용하였다. GPR 기법을 토대로 선형의 예측 평균추세와 불확실성을 의미하는 신뢰구간을 산정하였으며, 이와 함께 지하수위의 비정상 인지를 위하여 예측 평균추세에 일정 표준편차 이격선을 활용하는 방법을 제안하였다. 이때 활용되는 이격상수는 관리자 및 정책 결정자에 의해 유연성 있게 결정될 수 있으며, 본 연구에서는 표준편차의 2배를 비정상 인지 기준으로 적용하였다. 29개 국가지하수관측망(58개 관측정)의 GPR 분석 결과, 대부분의 월평균 지하수위는

예측된 지하수위에서 표준편차 2배 이내에 나타났으나 일부 자료 중 하방의 표준편차 2배 범위를 벗어나는 경우가 관찰되었다. 이처럼 특정 해의 월평균 지하수위가 기준 범위를 벗어난 경우 이를 이상치로 판단할 수 있으며, 이상치가 관측되었을 경우 이에 대한 원인 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 GPR 분석 결과 산정된 선형의 예측 추세선을 토대로 월별 지하수위 변화율의 표준편차를 활용한 변동유형의 분류 기준을 제안하였다. 해당 분류 기준을 한강권역에 위치하는 29개 국가지하수관측망(58개 관측점)에 적용하여 월별 지하수위 변동유형을 분류한 결과, 전반적으로 하강 추세가 우세하게 나타났다. 따라서 지속 가능한 지하수 이용·관리 측면에서 하강의 지하수위 변동 추세가 지속되는 지점에 대해서는 향후 그 기작에 대한 분석을 토대로 체계적인 관리가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 지하수위 변동에 영향을 미치는 대표적인 인위 요인으로 시간에 따른 강수량의 변화를 검토하였다. GPR 기법을 적용하여 산정된 지하수위와 강수량 각각의 월별 평균 변화율을 토대로 연중 변동 양상을 비교·분석한 결과, 상호 간 변동 양상은 대체로 유사하나 일부 관측지점에서 낮은 상관성을 보이는 것으로 분석되었다.

강수량 변화와 지하수위 변동 간의 관계성을 정량화하기 위해 두 인자에 대한 상관분석을 실시하였으며, 분석 결과 산정된 피어슨 상관계수를 토대로 관계성을 검토하였다. 한강권역에 위치하는 국가지하수관측망과 인근 기상관측소의 월평균 관측자료를 기초로 상관분석을 실시한 결과 지하수위와 강수량은 0.5 이상의 상관관계를 가지는 것으로 분석되었으며, 이러한 분석에 근거할 때 자연적 요인으로 강수량 변화는 다른 요인들에 비해 지하수위 변동에 더 우세한 영향을 미치는 것으로 판단해 볼 수 있다. 그러나 이와 같은 상관계수는 두 변수 간의 연관된 정도를 의미할 뿐 인과관계를 설명하는 것은 아니므로 보다 세부적인 사항은 인근 지표수계의 변화나 그 외 다양한 인위적 및 자연적 요인들과 함께 고려되어야 할 것으로 판단된다. 지하수위의 지속 강하가 나타나는 관측 지점에 대하여 서로 심도가 다른 암반관측정과 충적관측점 간 수리구배 분석을 실시한 결과, 함양 및 배출 특성의 변화가 발생하는 것을 확인하였으며, 이러한 변화는 지하수계 변화의 주요 요인 중 하나로 다루어져야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안된 방법론은 지하수위 추세 예측뿐만 아니라 가뭄 대비 지하수의 활용성 여부 검토 및 지하수 가뭄 예측에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 이와 함께 정책적으로 관측소별 관리수위(적정수위) 내지 최소 수위

가 결정될 경우 본 연구에서 이용된 GPR 기법을 통하여 해당 수위에 도달하기까지 소요되는 시간을 보다 신뢰성 있게 산정할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 위해서는 관측소별 관리수위 도출이 이루어지는 등 지하수 적정관리 작업이 선행되어야 할 것이다. 지하수의 체계적인 관리를 위해서는 축적된 관측자료 활용을 통한 지하수위 추세 예측과 함께 예측 결과에 따른 수위 변동의 원인 분석이 수반되어야 한다. 이러한 원인 분석 시 강수량 등 기상학적 요인과 함께 토지 이용 변화, 인근 하천수위의 변화, 지하수 이용 특성의 변화 등을 고려한 다각적인 접근이 유역 규모에서 이루어져야 할 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2013학년도 경북대학교 전임교원 연구년 교수 연구비 및 환경부의 이산화탄소 저장 환경관리기술개발사업에 의하여 연구되었음.

References

- Bazi, Y., Alajlan, N., and Melgani, F., 2012, Improved estimation of water chlorophyll concentration with semisupervised gaussian process regression, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **50**(7), 2733-2743.
- Cha, K., Cheong, T.S., and Ko, I., 2007, Validation of the surface-ground waters interaction and water supplying to upper region of geum river basin by optimal method for drought season, *J. Korean Soc. Civil Eng. B*, **27**(5B), 507-513.
- Evans, James D., 1996, *Straightforward statistics for the behavioral sciences*, Brooks/Cole, 600 p.
- GIMS (National Groundwater Information Management and Service Center), 2015, available at <http://www.gims.go.kr>.
- Grbić, R., Kurtagić, D., and Slišković, D., 2013, Stream water temperature prediction based on Gaussian process regression *Expert Systems with Applications*, **40**(18), 7407-7414.
- Jang, S., Hamm, S.Y., Yoon, H., Kim, G.B., Park, J.H., and Kim, M.S., 2015, Predicting long-term change of groundwater level with regional climate model in South Korea, *Geosci. J.*, **19**(3), 503-513.
- Jeong, J.M., Park, Y.C., Jo, Y.J., and Lee, J.Y., 2010, Time series analysis of groundwater level fluctuation data in Cheonjeonri, Chuncheon, Gangwon-do, *J. Geol. Soc. Korea*, **46**(2), 171-176.
- Kim, B.S., Kwon, H.H., and Kim, H.S., 2011, Impact assessment of climate change on drought risk, *J. Wetlands Res.*, **13**(1), 1-11.

- Kim, C.R., Kim, Y.O., Seo, S.B., and Choi, S.W., 2013, Water balance projection using climate change scenarios in the Korean Peninsula, *J. Korea Water Resources Association*, **46**(8), 807-819.
- Kim, G., Choi, D., and Shin, S., 2011, Characteristics of groundwater levels fluctuation and quality in Ddan-sum area, *J. Korean Geoenviron. Soc.*, **12**(2), 35-43.
- Kim, G.B. and Lee, S.H., 2012, Applicability of logistic regression model of groundwater levels to drought forecast, *J. Geological Soc.*, **48**(3), 275-284.
- Kim, G.B. and Yum, B.W., 2007, Classification and characterization for water level time series of shallow wells at the national groundwater monitoring stations, *J. Soil Groundw. Environ.*, **12**(5), 86-97.
- Kim, G.B., Yun, H.H., and Kim, D.H., 2006, Relationship between standardized precipitation index and groundwater levels: A proposal for establishment of drought index wells, *J. Soil Groundw. Environ.*, **11**(3), 31-42.
- Kim, T.W. and Park, D.H., 2015, Extreme drought response and improvement - Focusing on 2015 drought, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, **63**(9), 25-35.
- Kim, Y.K., Yoo, J.A., and Chung, E.S., 2012, Water management vulnerability assessment considering climate change in Korea, *J. Clim. Change Res.*, **3**(1), 1-12.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2015, available at <http://www.kma.go.kr>.
- Kwon, H.J. and Kim, S.J., 2007, Methodology of drought assessment using national groundwater monitoring network data, *J. Korean Soc. Civil Eng. B*, **27**(2B), 193-199.
- Lee, B., Hamm, S.Y., Jang, S., Cheong, J.Y., and Kim, G.B., 2014, Relationship between groundwater and climate change in South Korea, *Geosci. J.*, **18**(2), 209-218.
- Lee, B.S., Kim, Y.I., Choi, K.J., Song, S.H., Kim, J.H., Woo, D.K., Seol, M.K., and Park, K.Y., 2014, Rural groundwater monitoring network in Korea, *J. Soil Ground. Environ.*, **19**(4), 1-11.
- Lee, J.Y., Yi, M.J., Lee, J.M., Ahn, K.H., Won, J.H., Moon, S.H., and Cho, M., 2006, Parametric and non-parametric trend analysis of groundwater data obtained from national groundwater monitoring stations, *J. Soil Groundw. Environ.*, **11**(2), 56-67.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), 2011, Analysis report for long-term measured data from the national groundwater monitoring network in the Yeongsan and Seomjin River Basins, 211 p.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), 2014, Annual report for national groundwater monitoring network in Korea, 738 p.
- Park, E., 2012, Delineation of recharge rate from a hybrid water table fluctuation method, *Water Resources Research*, **48**(7), W07503.
- Park, E. and Parker, J.C., 2008, A simple model for water table fluctuations in response to precipitation, *J. Hydrol.*, **365**(3-4), 344-349.
- Park, J.Y., Yoo, J.Y., Lee, M., and Kim, T.W., 2012, Assessment of drought risk in Korea: Focused on data-based drought risk map, *J. Korean Soc. Civil Eng. B*, **32**(4B), 203-211.
- Rasmussen, C.E., 2004, Gaussian processes in machine learning. In: Bousquet, O., von Luxburg, U. and Ratsch, G. (eds.), *Adv. Lect. Mach. Learn.*, Springer, Berlin, p. 63-71.
- Rasmussen, C.E. and Williams, C.K.I., 2006, Gaussian Processes for Machine Learning, The MIT Press, Cambridge, 266 p.
- Sun, A.Y., Wang, D., and Xu, X., 2014, Monthly streamflow forecasting using Gaussian Process Regression, *J. Hydrol.*, **511**, 72-81.
- Yang, J.S., Park, J.H., and Kim, N.K., 2012, Development of drought vulnerability index using trend analysis, *J. Korean Soc. Civil Eng. B*, **32**(3), 185-192.
- Yi, M.J., Kim, G.B., Sohn, Y.C., Lee, J.Y., and Lee, K.K., 2004, Time series analysis of groundwater level data obtained from national groundwater monitoring stations, *J. Geol. Soc. Korea*, **40**(3), 305-329.