



## Development of the vulnerable period assessment method for the weekly groundwater resources management in Yeongsan river basin considering the critical infiltration concept and the correlation between hydrological data sets

Lee, Jae-Beom<sup>a</sup> · Kim, Il-Hwan<sup>b</sup> · Yang, Jeong-Seok<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea

<sup>b</sup>Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea

<sup>c</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea

Paper number: 18-114

Received: 31 December 2018; Revised: 24 January 2019; Accepted: 24 January 2019

### Abstract

In this study, the vulnerable period assessment method for weekly groundwater resources management was developed considering correlation between data of groundwater level, river level, precipitation applying critical infiltration concept. The vulnerable periods of 3 case study were assessed using data of groundwater, precipitation, river level, and results were compared. The weights for between observation stations were calculated using correlation of groundwater, precipitation, river level data, and weights that could be considered recently trend of data for each observation station. The vulnerable period was assessed using final calculated weights and multi criteria decision method, compared result for each case study. The developed method can be a quantitative basis for the establishment of efficient groundwater resources management and the decision of specific countermeasure applment.

**Keywords:** Groundwater resources management, Vulnerable period assessment, Critical infiltration, Yeongsan river basin

## 한계침투량 개념과 수문자료 간 상관관계를 고려한 영산강 유역의 주 단위 지하수자원 관리 취약 시기 평가 방법 개발

이재범<sup>a</sup> · 김일환<sup>b</sup> · 양정석<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>국민대학교 건설시스템공학과 박사과정, <sup>b</sup>국민대학교 건설시스템공학과 박사과정, <sup>c</sup>국민대학교 건설시스템공학과 교수

### 요 지

본 연구에서는 주 단위 지하수자원 관리 취약시기 평가 방법을 개발하였다. 강수의 지하수위에 대한 영향을 고려하기 위하여 한계 침투량을 고려한 강우이동평균 방법을 통해 지하수위와의 상관계수를 산정하였다. 취약 시기 평가 기준을 개발하고 평가 기준에 대한 가중치를 엔트로피 방법을 이용하여 산정하였다. 강수와 상관계수와 산정된 가중치를 이용한 주 단위 지하수자원 관리 취약시기 평가 방법을 개발하였으며, 개발한 방법을 통하여 소규모 행정구역을 대상으로 취약시기를 평가하였다. 본 연구에서 개발된 방법은 지역적일뿐만 아니라 계절적인 지하수자원의 효율적 관리 대책 수립의 근거가 될 수 있을 것이다.

**핵심용어:** 지하수자원 관리, 취약시기 평가, 한계침투량, 영산강 유역

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-910-4289  
E-mail: jyang@kookmin.ac.kr (J.-S. Yang)

## 1. 서론

최근 국내외로 인구의 증가, 산업활동 증가 등의 이유로 물 수요량이 증가하고 있다. IPCC (2013)은 전 세계적으로 기후 변화 현상을 피할 수 없다고 발표하였다. 국내 또한 기후변화에 따른 강우사상의 변화로 기존의 지표수 위주의 취수 형태는 늘어나는 물 수요량에 대한 대응이 점차 어려울 것으로 예상된다. 이에 따라 지속가능한 물 이용에 대한 관심과 함께 지하수 자원의 이용에 대한 관심 또한 높아지고 있고 지하수 이용량 또한 증가하는 추세에 있다. 국내의 수자원장기종합계획(MOLIT, 2016)에 따르면 우리나라의 수자원 총량은 약 760억 $m^3$ 이며 이 중 약 48.9%에 해당하는 372억 $m^3$ 이 실제 이용되는 수자원 양으로 조사되었다. 2017 지하수조사연보(MOLIT, 2017a)은 2016년 기준 국내 지하수 이용량이 약 41억 $m^3$ 으로 조사 이후 점차 증가하고 있는 것으로 발표하였다.

선진국에 비하여 소규모 유역 또는 하위의 행정구역을 대표하는 지하수위 관측소가 미비한 국내 상황에서 강우관측자료와 지하수위 자료의 상관관계를 규명함으로써 지하수위 변동을 예측하기 위한 연구가 수행되었다(Yang and Ahn, 2007). 또한 지하수위 변동 인자의 데이터를 바탕으로 인공신경망 등의 기법으로 학습 및 예측하는 방법 개발 연구가 진행되어 왔다(Izady *et al.*, 2012; Sahoo and Jha, 2013). 최근 지하수위를 예측하기 위한 연구 이외에도 지하수를 포함하는 수자원의 이용 및 관리에 대하여 취약성의 개념을 적용한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 취약성이란 유역 단위에서 발생하는 자연재해에 대한 잠재적인 피해량 또는 대응할 수 있는 능력이라고 정의된다(IPCC, 2007). 국외에서 수자원 이용 및 관리에 대한 취약성을 평가하기 위해서 수자원에 기여하는 수문 환경과 관련된 지표뿐만 아니라 인문 사회적 지표를 선정하여 취약성을 평가하는 연구가 진행되었다(Jose *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2017; Cai *et al.*, 2017). 국내 역시 수자원 중 지표수 자원 취약성 평가 기법 개발에 관련한 연구가 진행되어왔다(Chung *et al.*, 2011; Kang *et al.*, 2013; Park *et al.*, 2016). 전 세계적 인 물 부족 문제가 가시 화 됨에 따라 지표수 자원 뿐만 아니라 지하수 자원에 관련한 연구가 활발히 진행되고 있다. 지하수의 수질적인 측면에서의 취약성 평가 기법 개발 연구는 기후변화로 인한 해수면 상승효과에 따라 해안지역의 해수침투가 지하수 대수층으로 유입되어 지하수 오염을 발생시키는데 이를 수치모델을 통하여 취약성을 평가하고 대응 방안을 제시하는 연구가 진행되었다(Abd-Elhamid *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2018). 지하수의 수량적인 측면에서는 지하수위, 대수층 매질특성, 투수계수, 함양량 등을 영향 인자로 선정하고 해당 연

구지역의 지하수자원 취약성 평가 기법을 개발하는 연구가 진행되었다(Dennis and Dennis, 2016; Luoma and Okkonen, 2014; Seeboonruang, 2016). 기존에 수행된 연구에서는 지하수 자원 관리 취약성 평가 기법 개발을 위하여 해당 지역을 대표할 수 있는 인자를 평가 기준으로 선정하고 취약성 지수를 산정하는 연구가 진행되었다. 또한 GIS를 기본으로 한 공간정보 데이터를 바탕으로 지하수 자원의 수량 또는 수질 취약성을 평가하는 연구가 진행되었다. 공간에 따른 지하수 자원의 취약성 평가 기법과 관련한 연구는 활발히 진행되고 있으나 시간에 따른 지하수 자원 취약성 평가 기법과 관련한 연구는 최근에 이르러서야 수행되었다. Kim *et al.* (2018)은 객관적 가치치 산정 방법을 통한 낙동강 유역의 공간적 지하수 자원 관리 취약성 평가를 실시하고 월 단위 지하수 자원 관리 취약성 평가를 통하여 지하수 자원 관리 취약 기간 평가 기법을 제시하였다.

지하수 자원의 중요성이 대두됨에 따라 지하수의 수위 및 수질 변동을 파악하고 규명하기 위하여 국토교통부(MOLIT)는 1995년부터 전국단위의 국가지하수관측망 관측시설을 설치하고 2016년 기준 412개소의 지하수위 관측을 실시하고 있다(MOLIT, 2017b). 전국의 국가지하수관측망 지하수위 관측소의 관측자료는 설치일에 따라 자료의 길이가 상이하고, 관측기기의 고장 또는 교체, 관측정 위치 수정 등의 외부적인 이유로 자료의 관리가 아직 미비한 실정이다. 또한 영산·섬진강 권역에는 72개소의 관측소가 있으나 실제로 행정구역 별로 1~5개의 관측소가 설치·운영되고 있어 하위 행정구역을 대표할 수 있는 지하수위 관측이 어렵다. 이러한 상황에서 지속가능한 물 이용과 무분별한 지하수 자원 이용을 지양하고 건전한 물 순환을 위한 지하수 자원 운영 및 관리를 위하여 기존의 공간적인 지하수 자원 취약성 분석과 시간적인 취약성 평가를 통한 지하수 자원 운영 지침이 필요하다. 이를 위하여 본 연구는 지하수 자원의 시간적인 취약성 평가를 위하여 지하수위와 침투가능량을 고려한 강우, 하천의 수위 변동 특성을 함께 고려한 주단위의 지하수 자원 취약 시기 평가 방법을 개발하고 제시하고자 한다. 본 연구의 결과는 기존의 공간적인 지하수 자원 취약성 지역과 함께 지하수 자원의 취약 시기를 제시함으로써 보다 구체적인 지하수 자원 운영 및 관리 정책 수립의 정량적 근거로 활용될 것으로 기대된다. 지하수 자원 취약 시기를 평가하기 위하여 지하수위, 강수량, 하천 수위의 주 단위 자료를 이용하였으며, 선정 유역의 지하수, 강수, 하천수 관측소 간의 상관성을 고려하고 각 관측소 관측 자료의 추세를 이용하여 주 별 지하수 자원 취약 시기를 평가하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 연구순서

국내 지하수위 관측자료 특성 상 자료의 길이가 짧고 결측 기간이 길기 때문에 지하수위 자료만을 이용한 분석 결과와 취약 시기 평가 방법은 신뢰도를 확보하기 어렵다. 또한 시·군 행정구역의 하위 행정구역이나 소하천 유역을 대표하는 지하수위 관측소가 부재한 상황에서 선정된 연구지역 내의 국가 지하수 관측망 지하수위 관측 자료만을 이용한 자료의 분석 결과는 해당 지역의 지하수 변동 특성을 대표할 수 있다고 보기 어렵다. 물 순환에 있어 지하수, 강수, 하천수는 각각의 변동 특성에 주요한 영향을 미치는 인자이다. 따라서 본 연구는 지하수위(Groundwater Level, GWL) 관측자료 보다 비교적 분석 가능한 자료가 풍부한 강수량(Precipitation, P), 하천수위(River Level, RL) 관측 자료와 함께 연구지역의 배후지하수위를 고려하기 위하여 연구지역 인근의 지하수위 관측소 관측 자료를 수집하였고, 다음과 같이 주 단위 지하수자원 관리 취약 시기 평가 세 가지 Case를 구성하였고 각 Case는 아래 Table 1 과 같이 구성된다.

강수량과 하천수위는 지하수위에 비하여 관측자료의 변동성이 크다. 강수가 지하수 대수층에 영향을 미치는 데 소요되는 시간과 관측지역의 지형, 토지이용 등의 상황을 고려하기 위하여 한계침투량 개념을 적용한 강우이동평균 방법을 통해 지하수위와의 상관관계 분석을 실시하였다. 하천수와 지하수 대수층과의 상관관계와 영향을 미치는 데 소요되는 시간을 확인하기 위하여 이동평균 방법을 적용한 하천수위 관측 자료와 지하수위 자료의 상관관계 분석을 실시하였다. 또한 선정된 연구지역 주변의 지하수가 연구지역 내의 지하수위에 대한 영향을 고려하기 위하여 연구지역 인근의 지하수위 관측 자료를 수집하고 연구지역 내의 지하수위 자료와의 상관관계를 확인하였다.

지하수위, 강수량, 하천수위 관측 자료를 함께 고려한 지하수자원 관리 취약 시기를 평가하기 위해서는 가중치 산정이 매우 중요한 절차이다. 연구지역 내의 지하수위 관측소를 기준으로 지하수위, 하천수위, 강수량 관측소 간의 상관관계를 이용한 가중치를 산정하였다. 또한 자료의 편차를 이용한 엔트로피 방법을 통하여 각 관측소의 주 단위 관측자료의 기간 별 추세에 대한 가중치를 산정하였다.

가중치 산정 이후, 선형회귀분석 방법을 적용한 관측 자료의 추세 분석을 통해 평가 기준 별 주 단위 지수를 산정하였으며 취약시기 평가 기준으로 선정된 연구지역 내 각 지하수위 관측소에 대하여 세 가지 Case의 취약 시기 평가를 실시하였다. 위의 세 가지 Case의 최종 지하수자원 관리 취약 시기를 각각 결정하고 결과를 비교하였다.

본 연구의 순서는 Fig. 1과 같다.

### 2.2 한계침투량(Critical Infiltration)

물 순환 내에서의 강수와 지하수위에 대한 물리적 타당성을 확보하고 선정된 연구지역의 지형적 조건, 토양 피복 상태 등을 고려하기 위하여 한계침투량 개념을 적용하였다. 한계 침투량이란 강우사상이 발생한 후 지하수위에 영향을 미치는 침투량 중 총 강수량에서 지표면 흐름인 직접유출을 제외한 기저유출에 기여하는 요소이다(Yang *et al.*, 2005). 본 연구에서는 주 단위 지하수자원 취약성 평가를 진행하였기 때문에 자료를 수집한 강우관측소 별 주 단위 한계침투량을 산정하기 위하여 먼저 강우 관측소의 관측 자료를 수집한 후 각 연도에 대한 주 별 합계 강수량을 확인하였다. 주 별 합계 강수량 중 0 mm를 초과하는 주 단위 합계 강수량에 통계적 구간에 해당하는 총 12개의 값을 선정하였다. 선정된 값은 주 단위 한계침투량을 산정하는 각 Case의 기준 최대값으로 이용되었고, 각각의 Case는 주 단위 합계 강수량이 기준 최대값 보다 클 경우

Table 1. Study case configuration for groundwater resources management vulnerability

Case	Impact factor to groundwater resources management vulnerability		
1	Precipitation	Groundwater level gauge station in study area	Groundwater level gauge station around study area
2	River Level		
3	Precipitation (Considering correlation with river level)		

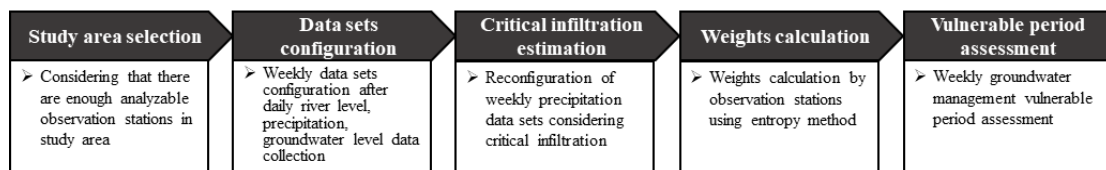


Fig. 1. Procedure of this study

주 단위 합계 강수량을 기준 최대값을 초과하지 않도록 자료를 수정하고 강우이동평균 기법을 적용하여 상관관계를 분석한다. 상관계수가 가장 크게 나타난 Case 별 기준 최대값을 해당 관측 지역의 한계침투량으로 결정하고, 결정된 한계침투량에 해당하는 강우이동평균 기간을 해당 관측 지역의 강수가 지하수 대수층에 영향을 미치는 시간으로 결정한다.

**2.3 다기준 의사 결정 방법**

다기준 의사 결정 방법은 평가 대상이 하나의 기준만을 이용하여 평가하기 어려울 경우 다양한 기준을 이용하여 대상을 평가하는 방법으로 평가하고자 하는 대상에 따라 다양한 방법이 이용되고 있다. 본 연구에서는 다기준 의사 결정 방법 중 단순가중치법(Simple Additive Weighting, SAW)을 이용하여 주 단위 지하수자원 관리 취약 시기를 평가하였다. 단순가중치법은 아래 Eq. (1)과 같이 지하수자원 관리 취약 시기를 평가 할 수 있다.

$$F_j = \sum_{i=1}^n w_i r_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

여기서,  $i$ 는 지하수자원 취약 시기를 평가하는 각각의 대안이고,  $j$ 는 평가 대상이며,  $r_{ij}$ 는  $i, j$ 에 대한 표준화된 값을 의미한다.

**2.4 표준화 방법**

취약성 평가에 있어 다양한 분야의 평가 기준을 설정하게 된다. 각각의 기준에 적용되는 자료의 종류에 따라 단위나 자료 특성이 상이하기 때문에 취약성 평가 시 자료를 표준화하여야 한다. 적용하는 다기준 의사 결정 방법에 따라 표준화 방법이 다양하게 적용되는데 본 연구에서는 지표의 범위를 기반으로 하는 범위 표준화 방법을 이용하였다. 범위 표준화 방법은 아래와 같다(Nardo *et al.*, 2005).

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i(x_{ij})}{\max_i(x_{ij}) - \min_i(x_{ij})}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j \in \text{Ideal} \quad (2a)$$

$$r_{ij} = \frac{\max_i(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_i(x_{ij}) - \min_i(x_{ij})}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j \in \text{Worst} \quad (2b)$$

여기서,  $i$ 는 지하수자원 취약 시기를 평가하는 각각의 대안이고,  $j$ 는 평가 대상이며, 본 연구에서는 Eq. (2a)은 각 평가 대상 값이 작을수록 취약성을 나타낼 때, Eq. (2b)는 각 대안의 값이 평가 대상 값이 클수록 취약성을 나타낼 때 이용하였다.

<p><b>Step 1. Standardization of the evaluating matrix</b></p> <p>The matrix R constructed for the item to be evaluated consists of <math>r_{ij}</math>. If the standardization result for the evaluation item is <math>r_{ij}</math>, the <math>r_{ij}</math> is calculated as follows:</p> $R = [r_{ij}], r_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}$ <p>where, <math>r_{ij}</math> is a standardized matrix, <math>i</math> is an evaluation alternative (<math>i=1,2,3,\dots,m</math>), and <math>j</math> is an indicator attribute for evaluation (<math>j=1,2,3,\dots,n</math>). <math>x_{ij}</math> is a data value about each <math>i, j</math>.</p>
<p><b>Step 2. Definition of the entropy</b></p> <p>The entropy for the item to be evaluated is as follows:</p> $H_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \log f_{ij}$ <p>where, <math>k = \frac{1}{\ln n}</math>, <math>n</math> is the number of alternatives, <math>f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}}</math></p>
<p><b>Step 3. Definition of the weight of entropy</b></p> <p>The weight of entropy of <math>i</math>th alternative could be defined as:</p> $w_i = \frac{1 - H_i}{\sum_{i=1}^m (1 - H_i)}$ <p>where, <math>0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^m w_i = 1</math></p>

Fig. 2. Procedure of entropy method

**2.5 가중치 산정**

**2.5.1 엔트로피 방법**

다기준 의사 결정 방법을 이용하여 대안 간의 평가를 위해서 각각의 가중치 산정이 필요하다. 본 연구는 주 단위 지하수 자원 관리 취약 시기 평가를 목적으로 하나 기존의 가중치 결정 방법을 통해 관측소 별로 각각의 주에 대한 가중치 산정이 사실상 불가능하다고 판단하였다. Kim *et al.* (2018)이 진행한 월 단위 지역 별 지하수자원 관리 취약성 평가에 대한 연구 역시 기존의 설문 방법을 이용한 가중치 산정 방법의 어려움으로 객관적 가중치 결정 방법 중 자료의 편차를 이용하여 가중치를 산정하는 엔트로피 방법을 적용하여 평가 항목 별 가중치를 결정하였다. 본 연구에서 각각의 주에 대한 가중치 결정에 있어 엔트로피 방법을 이용하여 관측소 별 관측 기간에 따른 추세에 대한 가중치를 결정하였다. 엔트로피 방법의 적용은 Fig. 2와 같다(Shannon and Weaver, 1949).

**2.5.2 관측소 간 상관관계를 이용한 가중치 산정**

취약시기 평가를 위한 각 Case에서 연구지역 내의 지하수위 관측소를 기준으로 하여 하천수위, 강수량, 연구지역 인근의 지하수위 관측소 간의 상관계수를 산정한다. 이후 각 Case에서 기준이 되는 연구지역 내의 지하수위 관측소와 각 관측소 간의 상관계수의 상대적인 크기를 나타내는 값을 가중치로 적용하기 위해 범위 표준화 방법을 이용하고, 표준화 방법을 통해 0~1의 범위로 산정되는 값을 해당 관측소의 관측소 간 가중치 값으로 결정한다.

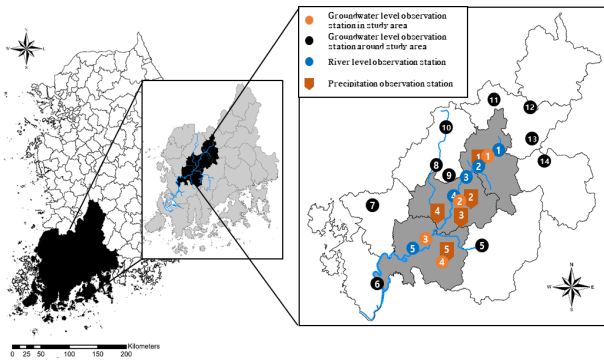


Fig. 3. Study area

### 3. 연구지역

본 연구에서 선정한 연구지역은 영산강 권역 중 영산강 본류가 흐르는 상류로부터 담양군, 광주광역시, 나주시 3개 행정구역을 선정하였다. 본 연구는 지하수위와 강수량, 하천수위, 연구지역 주변의 지하수위의 상관관계를 이용한 주 단위 지하수자원 관리 취약 시기 평가를 위하여 영산강 권역 국가지하수관측망 관측소 중 1~4번의 지하수위 관측소를 선정하였고, 연구지역 내의 지하수위에 영향을 줄 수 있는 연구지역 인근의 국가지하수관측망 관측소 5~14번의 지하수위 관측소를 선정하여 자료를 수집하였다. 강수량 관측소는 기상청에서 운영하는 관측소 1 개소, 국토교통부에서 운영하는 관측소 4 개소의 자료를 수집하였고, 하천수위 관측소는 국토교통부에서 운영하는 5개 관측소의 자료를 수집하였다. Fig. 3 은 연구지역 및 분석 관측소 위치를 나타내고 있고, Table 2는 본 연구에서 선정된 강수량, 하천수위, 강수량 관측소 목록이다.

### 4. 연구결과

#### 4.1 한계침투량 및 상관계수 산정 결과

연구지역의 지하수자원 관리 취약 시기를 평가를 위해 지하수위뿐만 아니라 강수량과 하천수위 자료를 이용하여 연구지역의 다양한 수문요소를 고려한 평가 방법을 개발하였다. 강수량과 지하수위와의 상관관계를 이용하고 강수량 자료를 통하여 연구지역의 지형적 구조, 토지 피복 상황 등을 고려할 수 있도록 한계침투량 개념을 적용하여 지하수위와의 상관관계를 분석하였다.

강수와 지하수위의 상관성을 규명하고 지하수자원 취약 시기를 평가하기 위하여 연구지역 내의 담양담양, 광주유덕, 나주봉황, 나주삼도 등 4개 지하수위 관측소를 기준으로 연구지역 내의 삼지, 광주, 이장, 동곡, 봉황 등 5개 강우관측소

Table 2. Lists of selected observation station  
(a) Precipitation observation station

No.	Precipitation observation station	Data length (year)	Reference
1	Samji	2005-2016	Korea Annual Hydrological Report
2	Gwangju		
3	Ijang		
4	Donggok		
5	Bonghwang		

(b) River level observation station

No.	River level gauge station	Data length (year)	Reference
1	Geumwol	2005-2016	Korea Annual Hydrological Report
2	Samji		
3	Gwangju		
4	Yudeok		
5	Hoejin		

(c) Groundwater level observation station

No.	Groundwater level gauge station	Data length (year)	Reference
1	Damyang Damyang	2006-2016	National Groundwater Monitoring Network in Korea Annual Report
2	Gwangju Yudeok		
3	Naju Samdo		
4	Naju Bonghwang		
5	Hwasun Neungju		
6	Muan Mongtan		
7	Hampyeong Singwang		
8	Jangseong Hwangryong		
9	Jangseong Nammyeon		
10	Jangseong Bukyi		
11	Sunchang Ssangchi		
12	Imsil Deokchi		
13	Sunchang Sunchang		
14	Gokseong Ipmyeon		

의 관측자료를 수집하였다. 수집된 강우량 관측자료는 각 관측소 별 한계침투량 개념을 적용한 강우이동평균을 실시하였고 이는 연구지역 내의 5개 지하수위 관측소 관측자료와 각각 한계침투량 및 상관계수, 지체시간을 파악하는데 이용되었다. 산정된 한계침투량, 상관계수, 지체시간은 Table 3 과 같고, Table 내의 CV는 산정된 상관계수 값(Correlation vaule), LT는 산정된 지체 시간(Lag time), CI는 산정된 한계침투량(Critical infiltration), GWL OS는 지하수위 관측소(Groundwater observation station)을 의미한다. 산정 결과에 따르면 나주삼도, 나주봉황에 비하여 영산강 본류의 상류에 해당하는 담양담양과 광주유덕의 지하수위 변동은 강수량의

**Table 3.** Results of critical infiltration, lag time, correlation value estimation

GWL OS	CI-PMA	Samji	Gwangju	Ijang	Donggok	Bonghwang
Damyang Damyang	CV	0.725	0.751	0.699	0.712	0.722
	LT	9 W	10 W	9 W	9 W	9 W
	CI	83.2mm	50.0mm	78.2mm	83.2mm	46.4mm
Gwangju Yudeok	CV	0.741	0.780	0.707	0.741	0.694
	LT	15 W	15 W	15 W	15 W	15 W
	CI	293.0mm	293.0mm	365.0mm	293.0mm	319.0mm
Naju Samdo	CV	0.317	0.377	0.295	0.326	0.306
	LT	10 W	10 W	9 W	10 W	9 W
	CI	293.0mm	293.0mm	78.2mm	83.2mm	319.0mm
Naju Bonghwang	CV	0.529	0.522	0.551	0.557	0.546
	LT	13 W	13 W	13 W	13 W	14 W
	CI	16.0mm	16.0mm	15.0mm	16.0mm	11.0mm

변동 특성과 상관성이 있는 것으로 나타났고, 강수가 지하수 위에 영향을 미치는데 소요되는 시간이 담양담양의 경우 9~10주, 광주유덕이 15주 인 것으로 나타났다. 반면 나주삼도와 나주봉황 지하수위 관측소를 기준으로 연구지역 내 강우관측소의 상관성은 다소 떨어지는 것으로 보이는데 이는 나주시의 지하수위는 강수보다는 하천수위, 수공구조물 등 외부적인 요인에 기인하는 것으로 보인다.

**4.2 관측소 간 가중치 산정 결과**

지하수와 강수, 하천수의 변동 특성을 고려한 지하수자원 관리 취약 시기 평가를 위해 총 세 가지 Case로 나누어 취약 시기 평가를 진행하였고 각 Case에 따른 취약 시기 평가 결과를 비교 하였다. 각 Case에 대한 취약 시기 평가를 위하여 연구지역 내의 4개 지하수위 관측소를 기준으로 연구지역 내 5개 강우관측소, 5개 하천수위 관측소, 연구지역 인근 10개 지하수위 관측소 간 상관계수를 분석하고 가중치를 산정하였다. 지하수위와 하천수위를 고려한 강수량을 이용한 취약 시기 평가를 위하여 연구지역 내의 5개 강우관측소를 기준으로 연구지역 내의 5개 하천수위 관측소에 대한 상관계수 및 가중치 산정을 별도로 진행하였다.

연구지역 내 지하수위 관측소 담양담양, 광주유덕, 나주봉황, 나주삼도 관측소를 기준으로 한 관측소 간 상관계수 산정 결과는 Table 4와 같고, 연구지역 내 삼지, 광주, 이장, 동곡, 봉황 강우관측소를 기준으로 5개 하천수위 관측소와의 관측소 간 상관계수 산정 결과는 Table 5와 같다. Tables 4 and 5의 GWL은 지하수위, P는 강수, RL은 하천수위를 의미한다.

관측소 간 상관계수를 산정한 후 Case 별 취약 시기 평가에 있어 산정된 상관계수의 상대적인 크기를 최종 취약 시기 평가 지수에 적용하기 위하여, 각 Case 별 상관계수를 범위 표준화 하여 0에서 1의 값이 나타나도록 하였다. 이를 통해 최종 지수

**Table 4.** Calculated result of correlation value with each observation station (a) Correlation value for groundwater level observation stations in study area

Name of Observation Stations	Damyang Damyang	Gwangju Yudeok	Naju Bonghwang	Naju Samdo	
GWL	Damyang Damyang	1.000	0.639	0.384	0.345
	Gwangju Yudeok	0.639	1.000	0.687	0.223
	Naju Bonghwang	0.384	0.687	1.000	0.110
	Naju Samdo	0.345	0.223	0.110	1.000
	Jangseong Nammyeon	0.061	0.086	0.125	0.113
	Jangseong Bugi	0.456	0.237	0.100	0.357
	Jangseong Hwangnyong	0.580	0.307	0.185	0.651
	Hampyeong Singwang	0.048	0.059	0.116	0.101
	Muan Mongtan	0.611	0.742	0.754	0.049
	Sunchang Ssangchi	0.219	0.092	0.120	0.327
	Sunchang Sunchang	0.658	0.380	0.317	0.233
	Hwasun Neungju	0.062	0.078	0.124	0.117
	Imsil Deokchi	0.185	0.271	0.560	0.175
	Gokseong Ipmyeon	0.097	0.105	0.175	0.115
	P	Samji	0.725	0.741	0.317
Gwangju		0.751	0.780	0.377	0.522
Ijang		0.699	0.707	0.295	0.551
Donggok		0.712	0.741	0.326	0.557
Bonghwang		0.722	0.694	0.306	0.546
RL	Geumwol	0.584	0.722	0.695	0.125
	Samji	0.655	0.733	0.616	0.266
	Gwangju	0.666	0.814	0.453	0.411
	Yudeok	0.366	0.523	0.626	0.101
Hoejin	0.113	0.031	0.036	0.619	

(b) Correlation value for precipitation observation stations in study area

Name of Observation Stations	Samji	Gwangju	Ijang	Donggok	Bonghwang	
P	Samji	1.000	0.865	0.834	0.841	0.804
	Gwangju	0.865	1.000	0.933	0.947	0.877
	Ijang	0.834	0.933	1.000	0.950	0.933
	Donggok	0.841	0.947	0.950	1.000	0.895
	Bonghwang	0.804	0.877	0.933	0.895	1.000
RL	Geumwol	0.566	0.564	0.516	0.540	0.489
	Samji	0.702	0.681	0.618	0.642	0.590
	Gwangju	0.779	0.801	0.756	0.749	0.739
	Yudeok	0.309	0.352	0.292	0.318	0.271
	Hoejin	0.081	0.086	0.109	0.116	0.107

**Table 5.** Calculated result of weight for each assessment case  
(a) Case 1. GWL-P

Name of Observation Stations	Damyang Damyang	Gwangju Yudeok	Naju Bonghwang	Naju Samdo	
GWL	Damyang Damyang	1.000	0.616	0.315	0.311
	Gwangju Yudeok	0.621	1.000	0.652	0.183
	Naju Bonghwang	0.353	0.668	1.000	0.065
	Naju Samdo	0.312	0.175	0.011	1.000
	Jangseong Nammyeon	0.014	0.029	0.028	0.067
	Jangseong Bugi	0.429	0.189	0.000	0.324
	Jangseong Hwangnyong	0.559	0.264	0.095	0.634
	Hampyeong Singwang	0.000	0.000	0.018	0.055
	Muan Mongtan	0.592	0.726	0.727	0.000
	Sunchang Ssangchi	0.180	0.035	0.022	0.292
	Sunchang Sunchang	0.641	0.341	0.241	0.194
	Hwasun Neungju	0.014	0.020	0.027	0.072
	Imsil Deokchi	0.144	0.226	0.511	0.133
	Gokseong Ipmyeon	0.052	0.049	0.083	0.070
P	Samji	0.712	0.724	0.241	0.505
	Gwangju	0.739	0.767	0.308	0.497
	Ijang	0.684	0.689	0.217	0.528
	Donggok	0.697	0.725	0.251	0.534
	Bonghwang	0.708	0.675	0.229	0.522

**Table 5.** Calculated result of weight for each assessment case (Continue)  
(b) Case 2. GWL-RL

Name of Observation Stations	Damyang Damyang	Gwangju Yudeok	Naju Bonghwang	Naju Samdo	
GWL	Damyang Damyang	1.000	0.627	0.361	0.311
	Gwangju Yudeok	0.621	1.000	0.675	0.183
	Naju Bonghwang	0.353	0.677	1.000	0.065
	Naju Samdo	0.312	0.199	0.077	1.000
	Jangseong Nammyeon	0.014	0.057	0.092	0.067
	Jangseong Bugi	0.429	0.213	0.066	0.324
	Jangseong Hwangnyong	0.559	0.285	0.155	0.634
	Hampyeong Singwang	0.000	0.029	0.083	0.055
	Muan Mongtan	0.592	0.734	0.745	0.000
	Sunchang Ssangchi	0.180	0.063	0.086	0.292
	Sunchang Sunchang	0.641	0.361	0.292	0.194
	Hwasun Neungju	0.014	0.049	0.092	0.072
	Imsil Deokchi	0.144	0.248	0.543	0.133
	Gokseong Ipmyeon	0.052	0.077	0.144	0.070
RL	Geumwol	0.563	0.714	0.683	0.081
	Samji	0.637	0.725	0.601	0.228
	Gwangju	0.649	0.808	0.432	0.381
	Yudeok	0.334	0.508	0.612	0.056
	Hoejin	0.069	0.000	0.000	0.599

가 0~19 사이의 값으로 산정되도록 하였다. Table 5는 지하수자원 취약 시기 평가를 위한 각 Case 별 가중치 산정 결과이다. (a)은 지하수위와 강우량을 이용한 취약 시기 평가 Case에 대한 관측소 별 가중치 산정 결과, (b)는 지하수위와 하천수위를 이용한 취약 시기 평가 Case에 대한 관측소 별 가중치 산정 결과, (c)는 지하수위와 하천수위를 고려한 강우량을 이용하여 취약 시기 평가를 위한 강우관측소와 하천수위 관측소 간 가중치 산정 결과이다.

**4.3 관측소 별 평가기준에 대한 가중치 산정 결과**

관측소 간 상관계수를 통한 가중치 산정과 함께 각 관측소 자료의 추세를 이용한 지수를 산정하여 최종 지하수자원 관리

(c) Case 3. GWL-P(considering RL)

Name of Observation Stations	Samji	Gwangju	Ijang	Donggok	Bonghwang	
P	Samji	1.000	0.853	0.814	0.820	0.780
	Gwangju	0.854	1.000	0.924	0.940	0.862
	Ijang	0.820	0.926	1.000	0.943	0.925
	Donggok	0.827	0.942	0.943	1.000	0.883
	Bonghwang	0.786	0.866	0.925	0.882	1.000
RL	Geumwol	0.528	0.523	0.457	0.479	0.428
	Samji	0.676	0.651	0.571	0.595	0.541
	Gwangju	0.760	0.783	0.726	0.716	0.708
	Yudeok	0.248	0.291	0.205	0.229	0.184
	Hoejin	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

취약 시기를 평가하였다. 자료의 추세를 이용한 평가 기준을 마련하여 각 관측소 관측 자료의 변동특성을 확인하고 취약 시기 평가에 이용하고자 하였다. 주 단위 취약 시기를 평가하기 위해 지하수위와 하천수위는 주 평균 수위, 강수량은 주 합계 강수량을 이용하여 각 관측소의 주 별 최근 11년 추세(2006-2016년, T), 최근 5년 추세(2012-2016년, R5), 최근 5년(2012-2016년) 추세와 과거 6년(2006-2011년)추세의 차이(R5 vs. P6), 최근 3년(2014-2016년) 추세와 과거 8년(2006-2013년)추세의 차이(R3 vs. P8)를 평가 기준으로 선정하였다. 선정된 평가기준에 대한 가중치 산정을 위해 엔트로피 방법을 이용하여 각 관측소의 주 별 평가기준에 대한 가중치를 산정

하였다. 아래의 Table 6은 주 단위 취약 시기를 평가하기 위한 평가 기준에 대한 설명과 각 관측소의 평가 기준별 가중치 산정 결과이다. (a)는 지하수위 관측소의 관측자료에 대한 주 별 평가기준에 대한 가중치 산정 결과 이고, (b)는 강수량, (c)는 하천수위에 대한 주 별 평가기준에 대한 가중치 산정 결과이다.

#### 4.4 지하수자원 관리 취약 시기 평가 결과

##### 4.4.1 지하수위와 강우량을 이용한 주 단위 지하수자원 관리 취약 시기 평가 결과

지하수자원 관리 취약 시기를 평가하기 위한 첫 번째 Case 로 지하수위와 강우량을 이용한 취약 시기 평가를 실시하였

**Table 6.** Weight results of observation stations  
(a) Groundwater level observation stations

Criteria (year)	Weight						
	Damyang Damyang	Gwangju Yudeok	Naju Bonghwang	Naju Samdo	Jangseong Nammyeon	Jangseong Bugi	Jangseong Hwangnyong
T	0.253	0.250	0.240	0.226	0.044	0.212	0.263
R5	0.253	0.236	0.246	0.259	0.263	0.261	0.242
R5 vs P6	0.250	0.248	0.252	0.254	0.347	0.263	0.263
R3 vs P8	0.244	0.266	0.262	0.262	0.346	0.264	0.231
Criteria (year)	Hampyeong Singwang	Muan Mongtan	Sunchang Ssangchi	Sunchang Sunchang	Hwasun Neungju	Imsil Deokchi	Gokseong Ipmyeon
T	0.035	0.114	0.258	0.168	0.020	0.272	0.036
R5	0.278	0.242	0.253	0.226	0.264	0.293	0.295
R5 vs P6	0.344	0.323	0.262	0.304	0.357	0.150	0.334
R3 vs P8	0.343	0.321	0.226	0.302	0.359	0.285	0.335

(b) Precipitation observation stations

Criteria (year)	Description	Weight				
		Samji	Gwangju	Ijang	Donggok	Naju
T	GWL trend (2006-2016)	0.238	0.245	0.257	0.251	0.265
R5	GWL trend (2012-2016)	0.249	0.242	0.243	0.230	0.250
R5 vs P6	GWL trend (2012-2016) vs. GWL trend (2012-2016)	0.248	0.256	0.251	0.265	0.260
R3 vs P8	GWL trend (2014-2016) vs. GWL trend (2006-2013)	0.266	0.257	0.250	0.254	0.225

(c) River level observation stations

Criteria (year)	Description	Weight				
		Geumwol	Samji	Yudeok	Gwangju	Hoejin
T	GWL trend (2006-2016)	0.033	0.217	0.040	0.228	0.040
R5	GWL trend (2012-2016)	0.286	0.210	0.255	0.240	0.307
R5 vs P6	GWL trend (2012-2016) vs. GWL trend (2012-2016)	0.341	0.288	0.353	0.269	0.327
R3 vs P8	GWL trend (2014-2016) vs. GWL trend (2006-2013)	0.340	0.285	0.352	0.263	0.326



**Table 7.** Groundwater resources management vulnerable period assessment results for case 1 (GLW-P)

GWL OS	Analysis Period	Rank 1		Rank 2		Rank 3	
		Week (W)	WVI	Week	WVI	Week	WVI
Damyang	1 W	36	17.771	35	17.165	29	14.195
Damyang	3 W	34-36	48.559	35-37	46.401	33-35	44.158
Gwangju Yudeok	1 W	36	17.417	35	15.938	34	12.415
Gwangju Yudeok	3 W	34-36	45.770	35-37	45.010	33-35	40.296
Naju Bonghwang	1 W	36	11.144	35	9.759	37	9.285
Naju Bonghwang	3 W	35-37	30.188	36-38	29.233	34-36	28.943
Naju Samdo	1 W	36	13.052	35	12.906	29	11.013
Naju Samdo	3 W	34-36	36.366	35-37	33.979	33-35	33.403

다. 연구지역의 지하수와 강우의 상관성을 이용하고 관측 자료로부터 강수가 지하수위에 영향을 미칠 수 있는 조건을 고려하기 위하여 한계침투량 개념을 적용한 강우 데이터를 이용한 주단위 취약 시기 평가를 실시하였다. 평가 결과는 1주 단위와 연속 3주 단위의 취약성 지수에 대하여 상위 1, 2, 3위의 취약성 지수와 해당 주차를 확인하였다. Table 7은 연구지역 내 기준 지하수위 관측소(Groundwater Level Observation Station, GWL OS) 별 지하수위와 강우량을 이용한 지하수 자원 취약 시기 평가 결과이고 Table 7에서 WVI는 주 단위 지하수자원 관리 취약성 지수(Weekly Vulnerability Index)를 의미하고 1주 단위와 연속 3주 단위에 대해서는 분석기간(Analysis Period) 항목으로 구분하였다. 1주 단위의 취약성 지수는 0~19, 3주 단위의 취약성 지수는 0~57의 범위를 갖는다.

1주 단위로 산정된 주 단위 취약성 지수 산정 결과 네 지하수 관측소 일대에서의 지하수자원 관리 취약 시기가 1순위로 36주, 2순위로 35주로 동일하게 나타났고, 3순위에서 담양담양, 나주삼도 관측소 일대에서 29주로 1순위로 나타난 36주와 7주의 차이가 나타났다. 3주 단위로 산정된 주 단위 취약성 지수 산정 결과는 1주 단위의 취약 시기 결과를 포함하는 주 차에서 취약성 지수가 높은 것으로 산정 되었으나 29주차가 3순위로 산정된 담양담양, 나주삼도 관측소 일대에서는 타 관측소와 비슷하게 33주에서 35주차 사이가 취약성 지수가 가장 높게 산정되었다. 이는 각각 담양담양, 나주삼도 관측소에서 29주차에 해당하는 지하수위가 하강하는 추세에 대한 지수가 가장 높게 산정되었기 때문에 1주 단위에서는 29주차가 가장 취약한 것으로 나타났으나, 33~35주차에 해당하는 기간에 타 지하수위 관측소와 강우관측소에서 지수가 높게 산정되어 3주 단위의 분석 결과가 다르게 나타난 것으로 보인다.

**Table 8.** Groundwater resources management vulnerable period assessment results for case 2 (GLW-RL)

GWL OS	Analysis Period	Rank 1		Rank 2		Rank 3	
		Week (W)	WVI	Week	WVI	Week	WVI
Damyang	1 W	35	16.980	36	16.884	37	14.746
Damyang	3 W	35-37	48.610	34-36	48.129	36-38	45.696
Gwangju Yudeok	1 W	36	18.431	35	17.689	37	16.536
Gwangju Yudeok	3 W	35-37	52.656	34-36	50.766	36-38	50.410
Naju Bonghwang	1 W	36	16.546	35	15.457	37	15.213
Naju Bonghwang	3 W	35-37	47.216	36-38	46.112	34-36	45.007
Naju Samdo	1 W	35	11.898	36	11.504	34	10.572
Naju Samdo	3 W	34-36	33.975	35-37	33.371	33-35	32.504

4.4.2 지하수위와 하천수위를 이용한 주 단위 지하수자원 관리 취약 시기 평가 결과

지하수자원 관리 취약 시기 평가를 위한 두 번째 Case로 지하수위와 하천수위를 이용한 지하수자원 관리 취약 시기를 평가하였다. 연구지역의 지하수와 하천수의 상관성을 이용하고 관측 자료로부터 하천수가 지하수위에 영향을 미칠 수 있는 조건을 고려하였다. 하천수위의 변동이 지하수위보다 크기 때문에 하천수위에 이동평균을 적용한 데이터를 이용하여 주 단위 취약 시기 평가를 실시하였다. 평가 결과는 1주 단위와 연속 3주 단위의 취약성 지수에 대하여 상위 1, 2, 3위의 취약성 지수와 해당 주차를 확인하였다. 연구 지역내 기준 지하수위 관측소 별 최종 산정된 취약성 지수 결과는 Table 8과 같다.

지하수위와 하천수위를 이용한 주 단위 지하수자원 관리 취약 시기 평가 결과 네 곳의 지하수위 관측소 일대에서는 35주에서 37주차 동안의 취약성 지수가 가장 높게 나타났다. 강우 데이터를 적용한 평가 결과와 달리 하천수위를 적용한 평가 방법에서는 1, 2, 3 순위의 취약성 지수가 대체로 비슷한 시기로 나타났다. 주 별 취약성 지수 산정 결과를 분석하였을 때, 지하수위 관측소의 지수 산정 결과와 하천수위 관측소의 지수 산정 결과의 상관계수가 0.846으로 지하수위와 하천수위에 해당하는 지수의 변화가 비슷하게 나타남을 알 수 있었다. 지하수위 자료와의 상관계수 자체는 강우량 자료가 하천수위 자료보다 높게 산정되나 하천수위 관측소의 선정에 따라 지하수위에 대한 취약 시기 평가에 미치는 영향이 강수량 보다 비교적 크게 나타날 것으로 판단된다.

4.4.3 하천수위를 고려한 강우량과 지하수위를 이용한 주 단위 지하수자원 관리 취약시기 평가결과

지하수자원 관리 취약 시기 평가를 위한 두 번째 Case로 지

**Table 9.** Groundwater resources management vulnerable period assessment results for case 3 (GLW-P (considering RL))

GWL OS	Analysis Period	Rank 1		Rank 2		Rank 3	
		Week (W)	WVI	Week	WVI	Week	WVI
Damyang Damyang	1 W	36	14.667	35	14.398	34	11.728
	3 W	34-36	40.793	35-37	40.325	33-35	37.370
Gwangju Yudeok	1 W	36	14.296	35	13.152	37	11.465
	3 W	35-37	38.913	34-36	37.951	36-38	36.458
Naju Bonghwang	1 W	36	10.068	37	9.227	35	8.786
	3 W	35-37	28.081	36-38	28.046	34-36	26.218
Naju Samdo	1 W	35	10.895	36	10.776	34	9.054
	3 W	34-36	30.725	35-37	29.534	33-35	28.510

하수위와 하천수위를 이용한 지하수자원 관리 취약 시기를 평가하였다. 첫 번째 Case와 같이 연구지역의 지하수와 강수의 상관성을 이용하되 하천수와 강수의 상관성을 고려한 주 단위 지하수자원 취약성 평가를 실시하였다. 하천수의 변동 특성을 고려하기 위하여 강수와 하천수를 이용한 취약성 지수를 산정한 후 지수의 크기를 상대적으로 고려하기 위하여 산정된 지수를 표준화 하고 지하수위와 강우관측소 간 분석 시 강우관측소의 지수에 앞서 산정된 지수 값을 적용하였다. 앞의 Case와 마찬가지로 1주 단위와 연속 3주 단위의 취약성 지수에 대하여 상위 1, 2, 3위의 취약성 지수와 해당 주치를 확인하였다. 취약성 지수 산정 결과는 Table 9와 같다.

하천수위를 고려한 강수량과 지하수위를 이용한 주 단위 취약 시기 평가 결과 네 곳의 지하수위 관측소에서 35주, 36주 차에 해당하는 기간이 가장 취약한 것으로 나타났다. 3순위의 평가 결과 역시 단순히 지하수위와 강수량을 이용한 취약 시기 평가 결과와 달리 1순위 결과로 나타난 주차와 크게 차이난 결과가 나타나지 않았다. 이는 하천수위를 고려하였기 때문에 강수량만을 이용한 결과보다 취약 시기 산정 결과의 시기 편차가 줄어든 것으로 판단된다.

## 5. 결론

건전한 물순환과 보다 효율적인 지하수자원 관리를 위하여 기존의 공간적인 취약성 평가와 함께 시간적인 변화에 따른 취약성 평가가 필요하다. 본 연구는 주 단위 지하수자원 취약 시기 평가를 위하여 지하수위 뿐만 아니라 지하수위에 영향을 줄 수 있는 수문 요소인 하천수위와 강수량을 고려하였다. 지하수위 관측소와 하천수위, 강수량 관측소 간의 상관계수를 각각 산정하고 이를 표준화 하여 관측소 간 가중치를 결

정하였다. 또한 관측 자료의 최근 변동 특성을 고려하기 위하여 관측 자료에 대한 평가 기준을 마련하고 평가 기준 별 가중치를 엔트로피 방법을 통해 결정하였다. 평가 방법을 지하수위와 강수량, 지하수위와 하천수위, 하천수위를 고려한 강수량과 지하수위 세 가지 방법으로 나누어 각각 1주 단위와 연속된 3주 단위의 취약 시기 평가를 실시하였다. 평가 결과로 나타난 취약 시기를 비교하고 분석하였다. 첫 번째로 지하수위와 강수량을 이용한 주 단위 취약 시기 평가 결과 평가 1주 단위에서는 기준으로 선정한 담양담양, 광주유덕, 나주봉황, 나주삼도 관측소에서 36주차에 해당하는 시기에 가장 취약한 것으로 나타났고, 연속 3주 단위에서는 34주에서 36주차에 해당하는 시기에 가장 취약한 것으로 나타났다. 두 번째로 지하수위와 하천수위를 이용한 취약 시기 평가 결과는 1주 단위에서 담양담양, 나주삼도 관측소에서 35주차로 나타났고, 광주유덕, 나주봉황 관측소에서 36주차로 나타나 취약 시기 평가 결과의 시간적인 차이가 근접하게 나타났다. 연속된 3주 단위의 결과는 나주삼도 관측소의 34~36주차의 결과를 제외하고 세 관측소에서 35~37주차로 나타나 1주 단위의 결과와 마찬가지로 결과의 차이가 근접하게 나타났다. 하천수위를 이용한 취약성 평가 결과는 강수량을 이용한 취약성 평가 결과와 달리 모든 경우에서 34주에서 37주차에 해당하는 시기에 취약성 지수가 높게 나타났고 지하수위에 해당하는 지수의 시간적인 변화와 하천수위에 해당하는 지수의 시간적인 변화가 비슷하게 나타났다. 마지막 세 번째로 하천수위를 고려한 강수량과 지하수위를 이용한 주 단위 취약 시기 평가 결과는 1주 단위에서 나주삼도의 35주차를 제외한 나머지 세 관측소에서 36주차로 동일하게 나타났고, 연속된 3주 단위의 결과 역시 담양담양, 나주삼도 관측소에서 34~36주차, 광주유덕, 나주봉황 관측소에서 35~37주차로 평가 결과가 근접하게 나타났다. 지하수위와 강수량을 이용한 취약 시기 평가 방법에서

3순위의 값에 해당하는 주차가 1, 2순위와 큰 차이를 나타내는 것과 달리 하천수위를 적용할 경우 1, 2, 3순위에 해당하는 취약 시기 평가 결과의 차이가 줄어들을 알 수 있었다.

본 연구에서는 기존에 개발된 지하수자원 관리 취약성에 대한 공간적인 평가 방법과 달리 자료만을 이용한 시간에 따른 취약 시기 평가 방법을 개발하였고 기존의 연구에서 선정된 지하수에 영향을 미칠 수 있는 인자들이 제외되었다. 이번 연구에서는 취약 시기 평가 항목으로 하천수위, 강수량 자료와 같은 자연적 자료의 변동만을 이용하였지만 지하수이용량, 인구, 토지피복도 등 인문사회적인 자료의 변동 역시 시간에 따른 지하수자원 관리 취약 시기 평가에 이용될 수 있다. 이후 연구에서는 연구지역의 수문요소에 대한 관측자료 뿐만 아니라 해당 지역의 사회·경제를 포함한 자료를 평가 항목으로 선정하여 연구지역의 지하수자원에 영향을 줄 수 있는 다양한 평가 항목을 적용한 지하수자원 취약 시기 평가 방법을 제시하고자 한다. 기존의 공간적인 지하수자원 관리 취약성 평가 방법과 함께 본 연구에서 제시된 평가 방법을 이용할 경우 지하수자원 관리가 필요한 지역을 선정하고 지역 별로 어떤 시기에 지하수자원 관리 대책을 적용할지 보다 구체적인 정책적 판단의 정량적 근거가 될 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단 중견연구자지원사업 중견연구지원비(NRF-2017R1A2B4005435)를 지원받아 수행된 연구입니다.

## References

- Abd-elhamid, H. F., Abd-elaty, I., and Ramadan, E. M. (2016). "The impact of climate change and population growth on groundwater resources in the Eastern Nile Delta Aquifer, Egypt." *The International Conference of Engineering Sciences and Applications*, Aswan, Egypt, January, pp. 29-31.
- Cai, J., Varis, O., and Yin, H. (2017). "China's water resources vulnerability: A spatio-temporal analysis during 2003-2013." *Journal of cleaner production*, Vol. 142, pp. 2901-2910.
- Chung, E. S., Hong, W. P., Lee, K. S., and Burian, S. J. (2011). "Integrated use of a continuous simulation model and multi-attribute decision making for ranking urban watershed management alternatives." *Water Resources Management*, Vol. 25, No. 2, pp. 641-659.
- Dennis, I., and Dennis, R. (2012). "Climate change vulnerability index for South African aquifers." *Proceedings International Conference on Groundwater Special Edition 2012*, Water South Africa, Vol. 38, No. 3, pp. 417-426.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). *Climate change 2007: The physical science synthesis report*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013). *Climate change 2013: The physical science basis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Izady, A., Davary, K., Alizadeh, A., Ghahraman, B., Sadeghi, M., and Moghaddamia, A. (2012). "Application of panel-data modeling to predict groundwater levels in the Neishaboor Plain Iran." *Hydrogeology Journal*, Vol. 20, No. 3, pp. 435-447.
- Kang, B. S., Lee, J. H., Chung, E. S., Kim, D. S., and Kim, Y. D. (2013). "A sensitivity analysis approach of multi-attribute decision making technique to rank flood mitigation projects." *Journal of Korea Society Civil Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 1529-1539.
- Kim, I.-H., Lee, J.-B., and Yang, J.-S. (2018). "Development of vulnerability period assessment method for efficient groundwater resources management in upstream of Nakdong river basin using entropy method." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 9, pp. 761-768.
- Leal, J. A. R., Silva, F. O. T., and Montes, I. S. (2012). "Analysis of aquifer vulnerability and water quality using SINTACS and geographic weighted regression." *Environmental Earth Sciences*, Vol. 66, Issue 8, pp. 2257-2271.
- Li, M. H., Tseng, K. J., Tung, C. P., Shih, D. S., and Liu, T. M. (2017). "Assessing water resources vulnerability and resilience of southern Taiwan to climate change." *TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, Vol. 28, No. 1, pp. 67-81.
- Luoma, S., and Okkonen, J. (2014). "Impacts of future climate change and Baltic Sea level rise on groundwater recharge, groundwater levels, and surface leakage in the Hanko Aquifer in southern Finland." *Water*, Vol. 6, No. 12, pp. 3671-3700.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT) (2016). *Water Resources Plan (2001-2020) : the 3rd revision plan*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT) (2017a). *2017 Groundwater Annual Report*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT) (2017b). *National Ground Water Monitoring Network in Korea Annual Report 2017*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., and Tarantola, S. (2005). *Tools for composite indicators building*. European Commission, EUR 21682 EN. Institute for the Protection and Security of the Citizen, Joint Research Centre Ispra, Italy.
- Park, H. S., Kim, J. B., Um, M. J., and Kim, Y. J. (2016). "Assessment of water use vulnerability in the unit watersheds using TOPSIS approach with subjective and objective weights." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 8, pp. 685-392.
- Sahoo, S., and Jha, M. K. (2013). "Groundwater-level prediction

- using multiple linear regression and artificial neural network techniques: a comparative assessment." *Hydrogeology Journal*, Vol. 21, No. 8, pp. 1865-1887.
- Seeboonruang, U. (2016). "Impact assessment of climate change on groundwater and vulnerability to drought of areas in Eastern Thailand." *Environmental Earth Sciences*. Vol. 75, No. 1.
- Shannon, C. E., and Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press, London and New York.
- Yang, J.-S., and Ahn, T. Y. (2007). "The correlation between groundwater level and moving average of precipitation in Nakdong River watershed." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 17, No. 4, pp. 507-510.
- Yang, J.-S., Lee, J.-B., and Kim, I.-H.(2018). "Analysis of the effects of the seawater intrusion countermeasures considering future sea level rise in Yeosu region using SEAWAT." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 6, pp. 515-521.
- Yang, J.-S., Lim, C. H., Park, J. H., Park, C. K., and Jeong, G. C. (2005). "The correlation between the precipitation considering critical infiltration and groundwater level in Ssangchun watershed." *The journal of Engineering Geology*, Vol. 15, No. 3, pp. 303-307.