



## Development of the spatiotemporal vulnerability assessment method for groundwater resources management at mountainous regions in Korea considering surface water-groundwater interactions

Lee, Jae-Beom<sup>a</sup> · Agossou, Amos<sup>b</sup> · Kim, Geon<sup>c</sup> · Yang, Jeong-Seok<sup>d\*</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>Master's Course, Department of Civil Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea

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

Paper number: 21-060

Received: 19 July 2021; Revised: 17 August 2021; Accepted: 17 August 2021

### Abstract

In this study, assessment of vulnerability in the management of spatio-temporal groundwater resources considering the surface water-ground water interactions was conducted in administrative districts of mountainous regions in Korea. Mountainous regions were classified into four regions and spatial groundwater resources management vulnerability assessment criteria were selected to consider the surface water-ground water interactions. Paju in the central mountainous region, Gapyeong in the mountains region, Gurye in the southwestern mountainous region, and Yangsan in the southeastern mountainous region were selected as a result of the selection of vulnerable area for groundwater resources management. Assessment of the Monthly vulnerability to groundwater resource management due to changes in groundwater levels and infiltration was carried out in the selected areas. As a result of monthly vulnerability to groundwater resources management, December ~ February was assessed as vulnerable to groundwater resource management. The results of this study are expected to contribute to the more efficient groundwater resource management measures by administrative district

**Keywords:** Groundwater resources management, Surface-groundwater interactions, Spatio-temporal vulnerability assessment, Inland and mountainous region

## 지표수-지하수 연계를 고려한 국내 내륙산간지역 시공간적 지하수자원 관리 취약성 평가 기법 개발

이재범<sup>a</sup> · 아거썬아모스<sup>b</sup> · 김건<sup>c</sup> · 양정석<sup>d\*</sup>

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

<sup>d</sup>국민대학교 건설시스템공학과 교수

### 요 지

본 연구에서는 국내 내륙산간지역의 행정구역을 대상으로 지표수-지하수연계를 고려한 시공간적 지하수자원 관리 취약성 평가를 수행하였다. 내륙산간지역을 4개 산지권역으로 구분하고 지표수-지하수 연계를 고려할 수 있는 공간적 지하수자원 관리 취약성 평가 지표를 선정하였다. 지하수 자원 관리 취약지역 선정 결과 중부산야권역의 파주시, 산악권역의 가평군, 남서산야권역의 구례군, 남동산야권역의 양산시가 선정되었다. 선정된 지역에 대하여 지하수위 및 침투량의 변동에 따른 월 단위 지하수자원 관리 취약 시기 평가를 수행하였다. 월 단위 지하수자원 관리 취약시기 평가 결과 12 ~ 2월이 지하수자원 관리에 취약한 시기로 평가되었다. 본 연구의 결과는 지하수자원 관리 취약 지역과 취약 시기 평가 기법 및 결과를 제 공함으로써 행정구역 별 보다 효율적인 지하수자원 관리 방안 도출에 기여할 것으로 기대된다.

**핵심용어:** 지하수자원 관리, 지표수-지하수 연계, 시공간적 취약성 평가, 내륙 산간지역

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-910-4289

E-mail: jyang@kookmin.ac.kr (J.-S. Yang)

## 1. 서론

기후변화의 영향을 피할 수 없는 현 상황에서, 전 세계적으로 자연적인 영향 뿐만 아니라 인구, 경제규모, 산업구조의 다양화 등 다양한 사회·경제적 요인으로 인하여 각종 용수의 수요량 및 이용량이 증가하고 있다(IPCC, 2013). 국내의 수자원 확보 부분에 있어 기존의 하천, 호소 등 지표수자원에 집중되어 있었으나, 이러한 취수 형태는 최근 기후변화로 인한 수문 사상의 변화와 수문순환 불균형으로 인한 극단적인 수자원 환경의 변화에서 지속가능한 수량 확보에 있어 취약할 수 있음이 나타났다. 이러한 상황에서 기존의 지표수자원 위주의 취수에서 지하수자원 이용을 통해 가뭄·홍수 등과 같은 수재해 상황 뿐만 아니라 평상시에도 안정적인 수량을 확보할 수 있는 다양한 기술 연구 및 사업이 진행되고 있는 상황이다(Lee *et al.*, 2020).

국내의 경우 최근 2000년대 이후 주로 생활용수 및 농업용수 확보의 목적으로 지하수의 개발과 이용이 증가하고 있는 추세이고, 2001 ~ 2017년 동안의 지하수 개발 및 이용 시설은 111만 공에서 169만공으로 약 1.5배 증가한 것으로 조사되었다(Kim, 2019). 미래에도 안정적인 지하수 개발 및 이용을 위하여 지하수자원의 지속가능성 확보 목적의 지하수자원 관리에 대한 필요성이 증가하고 있다. 이를 위한 지하수자원 관련 연구가 증가하고 있는데, 지하수 분야의 연구는 크게 지하수 유동 특성 분석 및 지하수자원 평가 관련 연구로 수행되었다. 지하수 유동 및 흐름 해석 관련 연구는 주로 해석모형을 통한 지하수 흐름과 지하수 내 오염물 거동과 같은 연구가 수행되었고(Doherty and Simmons, 2011; Asher *et al.*, 2015), 지하수자원 변동 특성 관련 연구는 지하수자원을 대표할 수 있는 인자로 지하수위를 선정한 후 지하수위에 영향을 미치는 다양한 지표들을 통해 지하수자원 대표 인자의 변동 특성에 따른 취약성 평가 기법 개발 및 적용과 관련한 연구가 수행되었다(Wu *et al.*, 2014; Sadeghfam *et al.*, 2016).

유역 단위에서 발생하는 자연재해에 대한 잠재적인 피해량 또는 대응할 수 있는 능력으로 정의되는 취약성의 개념(IPCC, 2007)은 국내외에서 지하수자원 특성 평가를 위하여 다양하게 적용되었다. 지하수자원 관련 취약성 평가 관련 기존의 연구는 공간적인 단위의 취약성 평가 연구가 수행되었다. 연구 지역의 지하수자원의 공간 특성을 대표할 수 있는 인자를 선택하고, 지표의 공간적인 차이에 따라 나타나는 취약성을 평가하는 연구가 진행되었다(Cai *et al.*, 2017). 또한 공간적인 단위의 지하수자원 취약성 평가 관련 연구는 지하수자원의 오염 취약성 관련 연구가 수행되었다(Leal *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2017). 지하수자원의 효율적인 운영 및 관리를 위해서

는 취약 지역 뿐만 아니라 취약 시기에 대한 평가가 이루어져야 하는데 기존의 연구에서는 공간적인 단위의 취약성 평가 연구가 수행되었다. 최근 기존의 공간적인 단위의 취약성 평가에 더하여 시간적인 변화에 따른 지하수자원 관리 취약 시기를 평가하는 연구가 수행되고 있다(Kim *et al.*, 2018; Lee *et al.*, 2019).

최근 지표수-지하수 연계를 고려한 수자원 관리에 대한 관심이 높아짐에 따라 이번 연구에서는 기존의 연구와 달리 지표수-지하수 상호 영향을 고려할 수 있는 평가 기준을 선정하였다. 지하수자원 관리 취약성 평가 시 기존의 지하수자원을 대표할 수 있는 지하수위 뿐만 아니라, 하천과의 물 교환, 강수에 의한 유출 및 지하대수층 충전(Recharge) 등을 고려할 수 있는 평가 기준을 선정하여 지표수-지하수 연계를 고려할 수 있는 취약성 평가를 실시하였다. 또한 연구지역의 선정에 있어 국내 내륙산간지역으로 선정하여 기후변화의 영향으로 미래 수자원 관리에 취약할 수 있는 지역을 평가하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 연구순서

지표수와 지하수 연계를 고려한 지하수자원 관리 취약성 평가를 수행하기 위하여 평가 기준의 선정은 매우 중요한 과정이다. 지하수위 또는 지하수자원 관리 취약성 평가 관련 기존의 연구에서는 지하수위 또는 지하수자원에 영향을 미칠 수 있는 사회적·경제적 지표와 수문순환 요소 등 자연적 지표들을 선정하고, 각 지역에 대한 대푯값을 산정하여 취약성 평가를 수행하였다(Yang *et al.*, 2017). 이후 내륙 지역의 공간적 취약성 평가 결과에 따라 각 권역 별 지하수자원 관리 취약지역에 대하여 면적 평균 강수량 추세와 지하수위 추세를 이용하여 지하수자원 관리 취약 시기를 평가하였다.

기존의 연구는 지하수 등과 같이 수문순환 요소 중 단일 요소만의 변동에 초점을 두고 수행되었는데 이를 개선하여 연구 대상 지역의 다양한 수문순환 요소를 고려하고자 이번 연구에서는 지표수와 지하수 연계 및 상호 영향을 고려한 평가 기준을 선정하였다. 선정한 평가 기준으로 행정구역 내 지하수자원 관리에 직접적인 평가가 가능한 지하수위 추세를 선정하였고, 지하수위의 변동에 영향을 미치는 중권역 단위의 면적 평균 강수량 추세와 같은 수문순환 요소의 변동추세를 선정하였다. 또한 강수의 지표수를 통한 직접 유출에 영향을 미치는 중권역 단위 유역 평균경사도와 유출과 토양을 통한 지하대수층으로의 흐름에 영향을 미치는 중권역 평균 유출곡선지수를

선정하였고, 지표수와 지하수 간 물 교환 및 상호 영향을 평가하기 위하여 지표수-지하수 물 교환의 공간적 범위를 나타내는 중권역 단위 유역 수계 밀도를 선정하였다.

첫 번째 단계로 공간적 취약성 평가를 수행하였다. 연구지역으로 국내 내륙 산간지역에 해당하는 행정구역을 선정하고, 내륙 산간지역을 지역 특성의 연속성과 유사성이 나타날 수 있도록 5개 권역으로 구분하였다. 행정구역 별 각 평가기준의 대푯값은 수자원단위지도의 중권역 단위로 수행되었기 때문에 각 행정구역 내 중권역의 면적비에 따라 수집된 자료를 이용하여 산정되었다. 다기준의사결정 기법 중 TOPSIS 기법을 이용하여 국내 내륙 지역을 대상으로 지하수자원 관리 취약 지역을 선정하였고, 다기준의사결정 기법에서 중요한 가중치 산정은 엔트로피 가중치 산정 기법을 이용하였다. 선정된 지하수자원 관리 취약지역의 최근 11년간의 면적 평균 강수량 변동추세와 지하수위 변동 추세를 바탕으로 월 단위의 지하수자원 관리 취약 시기를 평가하였다. 취약 시기 평가 방법은 취약 지역 평가와 마찬가지로 TOPSIS 기법과 엔트로피 가중치 산정 기법을 적용하였다.

Fig. 1은 연구 순서를 나타내고 있다.

**2.2 평가 지표 선정 및 자료 수집**

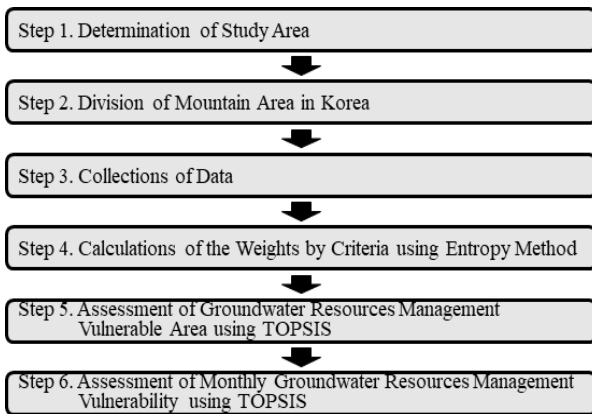
국내 내륙지역의 지하수자원 관리 취약 지역 및 시기 평가에 있어 다기준의사결정 기법을 적용하였다. 다기준의사결정 기법을 이용한 다양한 연구가 진행되었는데, 이와 관련된 연구에서 중요한 부분은 평가 지표를 선정하는 것으로 볼 수 있다. 이번 연구에서 지하수자원 관리 취약 지역 평가 지표로는 지표수-지하수 연계를 고려하기 위하여 최근 11년간의 면적평균강수량 추세와 지하수위 추세, 유역 평균경사도, 유역 평균 유출곡선지수, 수계밀도가 선정되었다. 지하수자원 관리 취약 시기 평가 시 평가 지표로는 최근 11년간(R11), 최근

5년간(R5), 과거 6년대비 최근 5년간(R5 vs. P6)의 지하수위 (Groundwater Level, GWL)와 유출곡선지수를 바탕으로 산정된 침투량(Infiltration, IF)의 변동 추세가 선정되었다.

Table 1은 이번 연구에서 선정된 취약성 평가 지표 및 자료의 수집 범위, 출처를 나타내고 있다.

**Table 1.** Lists and descriptions of selected criteria for this study

Assessment of Groundwater Resources Management Vulnerable Area		
Selected Criteria	Description	Reference
Trend of Area Average Precipitation (AP)	Trends in the average area precipitation fluctuations by administrative district for 2009 ~ 2019	WAMIS
Trend of Groundwater Level (GWL)	Trends in the average groundwater level fluctuations by administrative district for 2009 ~ 2019	
Average Curve Number (CN)	Average curve number in administrative district affecting the discharge and recharge of groundwater aquifer by precipitation	
Average Slope (AS)	Average Slope (%) in administrative district affecting direct runoff by precipitation	
Drainage Density (DD)	River length per unit watershed area considering surface-groundwater interaction	
Assessment of Groundwater Resources Management Vulnerable Month		
Selected Criteria	Description	Reference
R11_GWL Avg. R5_GWL Avg.	Monthly average groundwater level fluctuations in the recent 11 years, the recent 5 years, the difference from the recent 5 years and the past 6 years by administrative districts	GIMS
R5 vs. P6_GWL Avg.		
R11_GWL Trend R5_GWL Trend	Monthly average groundwater level fluctuation trends in the recent 11 years, the recent 5 years, the difference from the recent 5 years and the past 6 years by administrative districts	
R5 vs. P6_GWL Trend		
R11_IF Avg. R5_IF Avg.	Monthly average amount of infiltration in the recent 11 years, the recent 5 years, the difference from the recent 5 years and the past 6 years by administrative districts	WAMIS
R5 vs. P6_IF Avg.		
R11_IF Trend R5_IF Trend	Monthly trend of average infiltration fluctuation trends in the recent 11 years, the recent 5 years, the difference from the recent 5 years and the past 6 years by administrative districts	
R5 vs. P6_IF Trend		



**Fig. 1.** Procedure of the study

**2.3 TOPSIS**

사회적·자연적으로 발생할 수 있는 다양한 문제에 대한 취약성 평가를 수행할 때, 하나의 기준만으로 어떠한 현상을 평가하기 어려운 경우 다기준 의사결정 기법을 적용한다. 다양한 다기준 의사 결정 기법이 선행 연구에 적용되었는데, 이번 연구에서는 다기준 의사 결정 기법 중 TOPSIS를 적용하였다. TOPSIS는 Hwang and Yoon (1981)에 의하여 소개되었는데, TOPSIS는 양의 이상적인 해(Positive Ideal Solution)와 부의 이상적인 해(Negative Ideal Solution)의 거리를 통해 대안을 선정하는 기법으로 대안 별 거리를 산정하고, 산정된 거리를 통하여 어떠한 문제에 대한 취약성을 평가하는 방법이다. Fig. 2는 TOPSIS의 적용 순서를 나타내고 있다.

**2.4 표준화 방법**

이번 연구와 같이 국내 내륙지역 지하수자원 관리 취약성 평가에는 지하수자원에 영향을 미칠 수 있는 다양한 평가 기준을 선정하였다. 평가 기준 별로 자료의 편차, 단위, 크기 등 자료의 특성이 상이하기 때문에 이를 해결하기 위하여 각 기준의 표준화를 수행한다. 연구에 적용하는 다기준 의사 결정

기법에 따라 다양한 표준화 방법이 적용되는데, 본 연구에서는 평가 지표의 범위를 기반으로 하는 범위 표준화 방법을 이용하였고, 범위 표준화 방법은 아래와 같다(Nardo *et al.*, 2005).

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

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

여기서,  $i$ 는 지하수자원 관리 취약성을 평가하는 각각의 대안이고,  $j$ 는 평가 대상이며, 본 연구에서는 Eq. (1a)은 각 평가 대상 값이 작을수록 취약성을 나타낼 때, Eq. (1b)는 각 평가 대상 값이 클수록 취약성을 나타낼 때 사용하였다.

**2.5 엔트로피 방법**

다기준 의사 결정 기법의 적용에서 평가 기준 선정 뿐만 아니라 각 평가 기준의 가중치 결정이 필수적이다. 이번 연구는 월 단위 국내 내륙지역 행정구역을 대상으로 지하수자원 관리

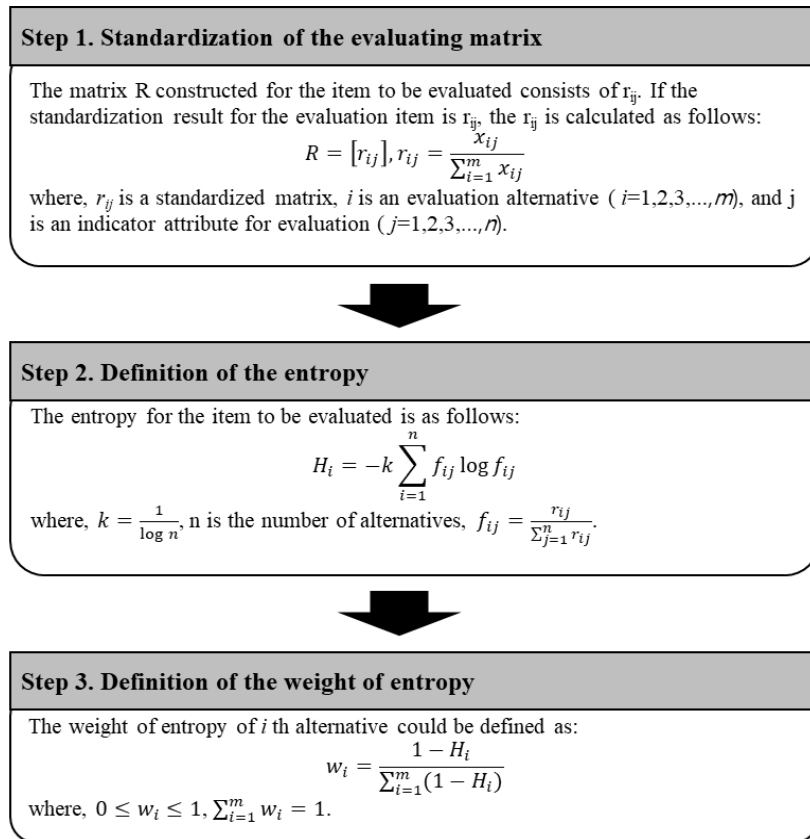


Fig. 2. Procedure of TOPSIS (Hwang and Yoon (1981))

취약성 평가를 수행하고자 Entropy 가중치 산정 기법을 이용하여 각 평가 기준의 가중치를 산정하였다. 기존의 월 단위 지하수자원 관리 취약성 평가 시 설문지를 통한 가중치 산정의 경우 평가자의 개인적인 전공분야, 직업, 배경 지식 등 주관적인 판단의 차이에 가중치 산정이 어려운 경우가 있었다. 이를 개선하기 위하여 Kim *et al.* (2018)은 자료의 편차를 이용한 엔트로피 방법을 적용하여 가중치를 산정하였다. 본 연구에서 첫 번째 단계의 지하수자원 관리 취약지역 선정에 따른 평가 기준의 가중치와 두 번째 단계의 월 단위 지하수자원 관리 취약 시기 평가에 대한 평가 기준에 엔트로피 방법을 적용하여 가중치를 산정하였다.

Fig. 3은 엔트로피 방법의 적용 순서를 나타내고 있다.

### 2.6 침투량 산정

본 연구의 연구지역은 내륙 산간지역으로 강우의 손실 및 유출에 영향을 미치는 경사도를 고려하기 위하여  $CN_3$ 을 Eq. (2)를 통하여 산정하였고, Eq. (3)을 이용하여 경사도 보정을 실시하였다(Walker *et al.*, 2002).

$$CN_3 = \frac{23CN_2}{10 + 0.13CN_2} \quad (2)$$

$$CN_{2S} = \frac{(CN_3 - CN_2)}{3} [1 - 2\exp(-13.89slope[\%])] + CN_2 \quad (3)$$

NRCS-CN모형은 Eq. (4)와 같이 강수량으로부터 유효우량을 추정한다(USDA-NRCS, 2004).

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a - S}, P > I_a, \text{ else } Q = 0 \quad (4)$$

여기서,

$I_a$  = Initial abstraction (mm),

$P$  = Precipitation (mm),

$P_e$  = Effective rainfall depts. (mm),

$S$  = Potential maximum retention (mm).

초기손실량  $I_a$ 는 Eq. (5)와 같으며  $CN$ 과  $S$ 는 SI단위계의 경우 Eq. (6)의 관계를 갖는다.

$$I_a = \lambda S \quad (5)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (6)$$

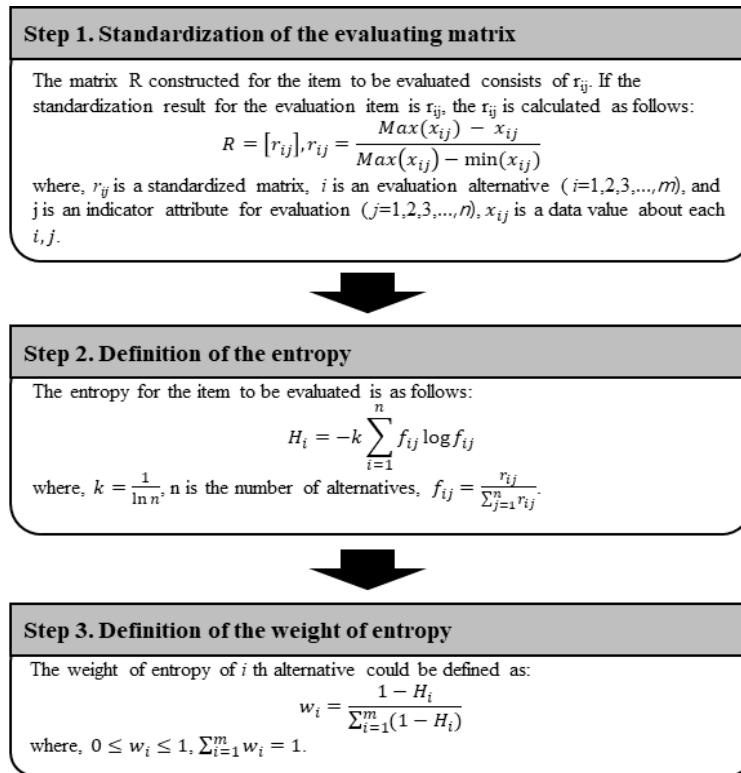


Fig. 3. Procedure of entropy method (Berry *et al.*, 1999)

NRCS는 소규모 농업구역에 적용하기 위해서  $\lambda=0.2$ 를 권장하였으나, 본 연구에서는 Woodward *et al.* (2003)가 제시한  $\lambda=0.05$ 를 적용하였다. 따라서 본 연구에서 적용한 수정된 NRCS-CN 방법은 Eq. (7)와 같고, Eq. (8)와 같이 침투량  $F_a$ 를 산정하였다.

$$P_c = \frac{(P-0.05S)^2}{P+0.95S}, P > 0.05S, \text{ else } Q=0 \quad (7)$$

$$F_a = P - P_c - I_a \quad (8)$$

### 3. 연구지역

이번 연구의 목적은 국내 행정구역을 대상으로 내륙 산간 지역의 지하수자원 관리의 시공간적 취약성 평가이다. 국내 특별시·광역시·시·군 단위의 행정구역의 내륙 산간지역의 행정구역을 대상으로 지하수자원 관리 취약성 평가를 수행하기에는 연안지역을 제외하고 108개 행정구역이 해당되기 때문에 동일한 평가 지표 가중치 적용 및 자료 분석, 취약성 평가를 수행하는 데에는 무리가 있어, 권역 별로 구분하여 지하수자원 관리 취약성 평가를 수행하였다. NIFOS (2009)에 의하면 자연환경을 고려하기 위하여 지형·지리적인 기후반응이 동일한 지역을 설정한 후 생태적 계통성과 연계성이 확보되는 유역을 1차적인 경계로 구분하고, 인문환경을 고려할 수 있고, 행정조직과 연계될 수 있도록 시·군 경계로 구분하여 국내 산림 경관 및 생태 권역은 5개 권역으로 구분되었다. 연구 목적에 부합할 수 있도록 바다에 연한 해안도서권역을 제외하고, 본 연구의 연구지역은 산악권역, 중부산야권역, 남동산야권역, 남서산야권역 등 4개 권역의 107개 행정구역으로 선정하

였다. 선정된 연구지역에 대하여 중권역 단위의 면적평균강수량, 유출곡선지수, 유역 평균 경사도, 수계밀도 자료를 수집하였고, 행정구역 별 국가지하수관측망의 지하수위 관측자료를 수집하였다.

Fig. 4는 중부산야권역, 산악권역, 남서산야권역, 남동산야권역을 나타내고 있고, Table 2는 4개 권역 별 행정구역의 목록을 나타내고 있다.

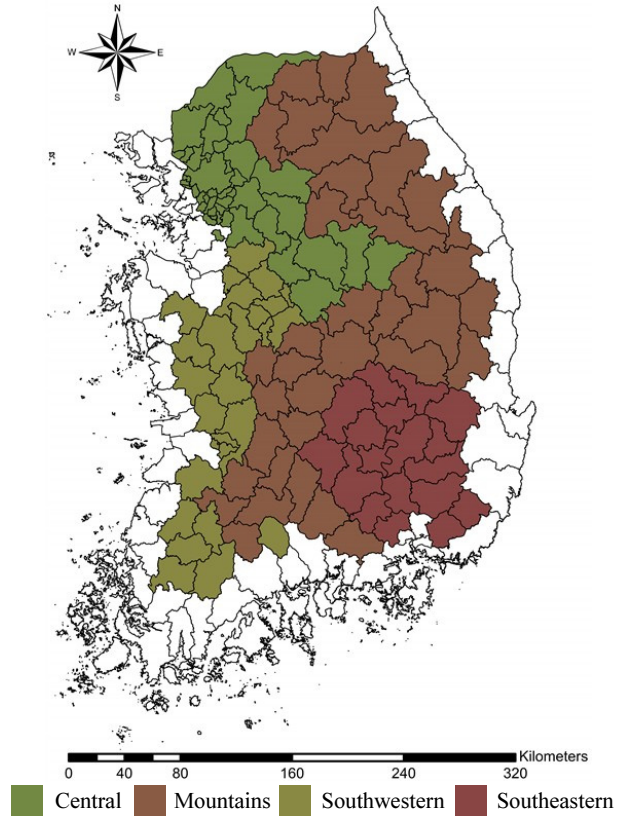


Fig. 4. Study area (NIFOS, 2009)

Table 2. Lists of administrative districts by mountainous regions (NIFOS, 2009)

Mountainous Region	Administrative District
Central Mountainous Region (31)	Anyang, Bucheon, Cheolwon, Chungju, Danyang, Dongducheon, Eumseong, Goesan, Goyang, Gunpo, Guri, Gwacheon, Gwangju (Gyeonggi-do), Gwangmyeong, Hanam, Icheon, Jecheon, Namyangju, Osan, Paju, Pocheon, Seongnam, Seoul, Suwon, Uijeongbu, Uiwang, Yangju, Yangpyeong, Yeosu, Yeoncheon, Yongin
Mountains Region (36)	Andong, Boeun, Bonghwa, Cheongsong, Chuncheon, Daejeon, Gapyeong, Geumsan, Gokseong, Hamyang, Hoengseong, Hongcheon, Hwacheon, Imsil, Inje, Jangsu, Jeongseon, Jinan, Jinju, Muju, Mungyeong, Namwon, Okcheon, Pyeongchang, Sancheong, Sangju, Sunchang, Taebaek, Uiseong, Wonju, Yanggu, Yecheon, Yeongdong, Yeongju, Yeongwol, Yeongyang
Southwestern Mountainous Region (22)	Anseong, Buyeo, Cheonan, Cheongju, Cheongyang, Damyang, Gongju, Gurye, Gwangju, Gyeryong, Hwasan, Iksan, Jangseong, Jeongeup, Jeonju, Jeungpyeong, Jincheon, Naju, Nonsan, Sejong, Wanju, Yesan
Southeastern Mountainous Region (18)	Changnyeong, Cheongdo, Chilgok, Daegu, Geochang, Gimcheon, Gimhae, Goryeong, Gumi, Gunwi, Gyeongsan, Haman, Hapcheon, Miryang, Seongju, Uiryeong, Yangsan, Yeongcheon



## 4. 연구결과

### 4.1 국내 산지 권역 별 지하수자원 관리 취약 지역 평가 결과

내륙 산간지역의 행정구역 별 지하수자원 관리 취약지역 평가는 국내 산간 지역의 자연적·인문적 연결성을 고려하기 위하여 4개 산지권역 각각에 대하여 수행하였고, 공간적 취약성 평가 지수가 가장 높게 나타난 4개 산지 권역 별 1개 행정구역을 시간적 지하수자원 관리 취약성 평가 대상 지역으로 선정하였다. Table 3은 4개 산지 권역 별 지하수자원 관리 취약성 평가 기준의 가중치를 나타내고 있다.

중부산야권역의 경우 32개 행정구역 중 파주시, 하남시, 안양시의 순서로 공간적 취약성 지수가 높게 산정되었다. 파주시의 경우 유역 경사, 지하수위 변동 추세의 지표에서 비교적 낮은 취약성이 나타났으나, 면적 대비 낮은 하천 연장, 평균 유출곡선지수 분포 분석 결과 유출곡선지수가 약 74.4로 비교적 높게 나타나 강우 발생 시 높은 유출율을 보이고 있으며, 강수량의 변동 추세 분석 결과 중부산야권역 내 행정구역 중 가장 큰 감소세를 나타내고 있어 지하수자원 관리 취약성 지수가 가장 높게 산정되었다.

Table 4는 중부산야권역 내 행정구역 별 공간적 취약성 평가 결과이다.

산악권역의 경우 36개 행정구역 중 가평군, 임실군, 춘천시의 순서로 공간적 취약성 지수가 높게 산정되었다. 가평군의 경우 강수량 변동 추세 분석 결과 최근 11년 간 가장 큰 감소세를 보이고 있고, 면적 당 하천 연장인 수계밀도 지표에서 양구군에 이어 두 번째로 가장 높은 취약성을 보이고 있으며, 유역 경사, 유출곡선지수, 지하수위의 지표에서 산악 권역 행정구역 평균보다 높은 취약성을 나타내고 있어 산악 권역 행정구역 중 지하수자원 관리에 가장 취약한 지역으로 나타났다. Table 5는 중부산야권역 내 행정구역 별 공간적 취약성 평가 결과이다.

남서산야권역의 경우 22개 행정구역 중 구례군, 담양군, 나주시의 순서로 공간적 취약성 지수가 높게 산정되었다. 구례

군의 경우 남서산야권역 내 행정구역 중 강수량 변동 추세, 평균 유출곡선지수 분포 지표에서 평균보다 낮거나 유사한 범위의 취약성을 보이고 있지만 유역 평균 경사도가 가장 높게 나타나 강우 발생 시 지하대수층으로의 흐름 보다 지표면 유출율이 가장 높은 것으로 나타나 지하대수층 충전이 어려울 것으로 예상된다. 또한 구례군 면적 대비 하천연장이 짧고, 지하수위의 감소 추세가 높게 나타나 추가적인 지하수자원 관리 방안이 미비할 경우 지하수자원의 지속적이고 안정적인 관리가 어려울 것으로 나타났다. Table 6은 남서산야권역의 행정구역 별 공간적 취약성 지수 산정 결과와 권역 내 취약성 지수 순위를 나타내고 있다.

**Table 4.** TOPSIS results for assessment of groundwater resources management vulnerable administrative district (AD) in central mountainous region

Name of AD	Rank	Name of AD	Rank	Name of AD	Rank
Anyang	3	Gwacheon	9	Seoul	8
Bucheon	5	Gwangju (Gyeonggi-do)	25	Suwon	20
Cheolwon	19	Gwangmyeong	13	Uijeongbu	12
Chungju	30	Hanam	2	Uiwang	17
Danyang	26	Icheon	27	Yangju	10
Dongducheon	16	Jecheon	24	Yangpyeong	22
Eumseong	31	Namyangju	6	Yeosu	28
Goesan	29	Osan	21	Yeoncheon	15
Goyang	4	Paju	1	Yongin	23
Gunpo	14	Pocheon	18		
Guri	11	Seongnam	7		

**Table 5.** TOPSIS results for assessment of groundwater resources management vulnerable administrative district (AD) in mountains region

Name of AD	Rank	Name of AD	Rank	Name of AD	Rank
Andong	23	Hwacheon	6	Sancheong	27
Boeun	33	Imsil	2	Sangju	34
Bonghwa	25	Inje	5	Sunchang	11
Cheongsong	19	Jangsu	21	Taebaek	20
Chuncheon	3	Jeongseon	10	Uiseong	29
Daejeon	31	Jinan	14	Wonju	16
Gapyeong	1	Jinju	17	Yanggu	7
Geumsan	32	Muju	12	Yecheon	36
Gokseong	15	Mungyeong	28	Yeongdong	24
Hamyang	26	Namwon	22	Yeongju	35
Hoengseong	13	Okcheon	30	Yeongwol	8
Hongcheon	4	Pyeongchang	9	Yeongyang	18

**Table 3.** Weight calculation results for assessment of groundwater resources management vulnerable administrative district by mountainous region using entropy method

Criteria	Central	Mountains	Southwestern	Southeastern
AP	0.245	0.176	0.120	0.201
GWL	0.166	0.181	0.242	0.240
CN	0.211	0.215	0.214	0.196
AS	0.165	0.212	0.186	0.140
DD	0.213	0.216	0.238	0.223

남동산야권역의 경우 18개 행정구역 중 양산시, 밀양시, 함안군의 순서로 공간적 취약성 지수가 높게 산정되었다. 양산시의 경우 낙동강 권역의 하류에 위치하였기 때문에 비교적 평탄한 지형으로 평균 경사도 지표에서 낮은 취약성을 나타내고 있지만 높은 강수량 감소 추세, 지하수위 하강 추세와 함께 면적 대비 낮은 하천 분포, 높은 유출곡선지수 분포를 보이고

있어 남동산야권역 행정구역 중 가장 지하수자원 관리에 취약할 것으로 나타났다.

Table 7은 남동산야권역의 행정구역 별 공간적 취약성 지수 산정 결과와 권역 내 취약성 지수 순위를 나타내고 있다.

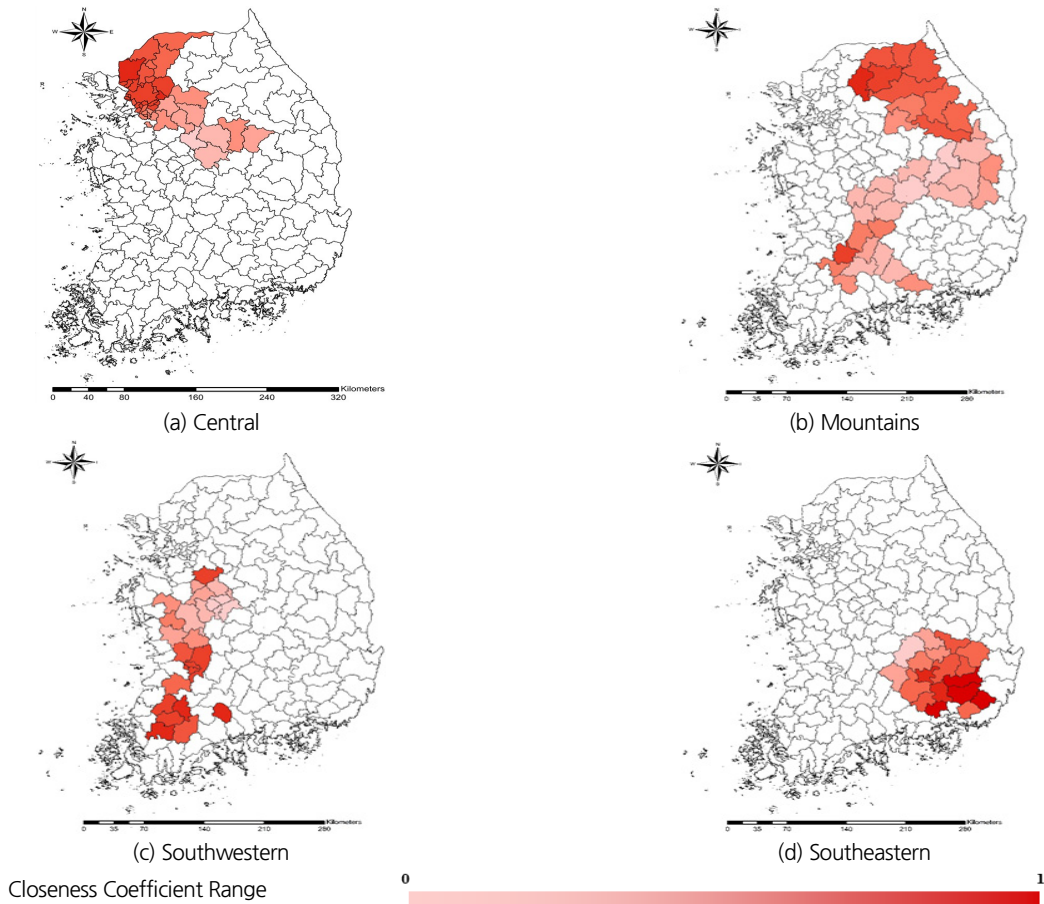
Fig. 5는 국내 내륙산간지역 중 중부산야권역, 산악권역, 남서산야권역, 남동산야권역의 공간적 취약성 평가 결과를 나타내고 있다.

**Table 6.** TOPSIS results for assessment of groundwater resources management vulnerable administrative district (AD) in southwestern mountainous region

Name of AD	Rank	Name of AD	Rank	Name of AD	Rank
Anseong	8	Gwangju	4	Jincheon	19
Buyeo	16	Gyeryong	21	Naju	3
Cheonan	15	Hwasun	9	Nonsan	13
Cheongju	22	Iksan	10	Sejong	17
Cheongyang	12	Jangseong	7	Wanju	5
Damyang	2	Jeongeup	11	Yesan	14
Gongju	18	Jeonju	6		
Gurye	1	Jeungpyeong	20		

**Table 7.** TOPSIS results for assessment of groundwater resources management vulnerable administrative district (AD) in southeastern mountainous region

Name of AD	Rank	Name of AD	Rank	Name of AD	Rank
Changnyeong	5	Gimhae	13	Hapcheon	11
Cheongdo	4	Goryeong	6	Miryang	2
Chilgok	15	Gumi	17	Seongju	14
Daegu	10	Gunwi	9	Uiryeong	8
Geochang	16	Gyeongsan	7	Yangsan	1
Gimcheon	18	Haman	3	Yeongcheon	12



**Fig. 5.** TOPSIS results by mountainous region in Korea



#### 4.2 지하수자원 관리 취약 지역 대상 월 단위 시간적 취약성 평가 결과

앞서 국내 내륙 산간지역의 행정구역을 대상으로 공간적 지하수자원 관리 취약성 평가를 수행하였다. 공간적 취약성 평가 결과 취약성 지수가 가장 높게 산정된 중부산야권역의 파주시, 산악권역의 가평군, 남서산야권역의 구례군, 남동산야권역의 양산시를 시간적 지하수자원 관리 취약성 평가 대상 지역으로 선정하였다.

각 산지권역 별로 선정된 행정구역을 대상으로 시간적 취약성 평가를 위하여 평가 기준으로 2009~2019년 동안 11년간의 월 별 지하수위와 유출곡선지수로부터 산정한 침투량의 변동량 및 변동 추세를 선정하였다. 월 단위 지하수위와 침투량에 대하여 기후변화로 인한 강수사상의 변화를 고려하기 위하여 11년 전체, 최근 5년간, 최근 5년대비 과거 6년간의 변동량 및 변동추세를 평가 기준으로 선정하고, 분석하였다. 선정된 4개 산지 권역 별 지하수자원 관리 취약 지역을 대상으로 지하수자원 관리 취약시기를 평가하기 위하여 TOPSIS를 이용하였고, TOPSIS를 이용한 평가를 위하여 엔트로피 가중치 산정 기법을 이용하여 가중치를 산정하였다. 지하수자원 관리 취약 시기 평가 시 침투량과 지하수위 간의 물리적 연결성을 고려하기 위하여 산정된 월 단위 침투량과 월 단위 지하수위 간의 상관관계 계수를 엔트로피 가중치 산정 기법에 따라 산정된 가중치에 적용하여 평가 기준 별 최종 가중치를 산정하였다.

Table 8은 각 연구 대상 행정구역 별 지하수자원 취약 시기 평가 기준의 가중치를 나타내고 있다.

중부산야권역의 파주시의 경우 1, 2, 3월 순으로 시간적 취약성 평가 결과가 높게 나타났다. 1월과 2월이 유사하게 취약성 지수가 높게 나타났는데, 이는 지하수위 변동의 측면에서 최근 5년간의 지하수위가 급격하게 하강하고, 지하수위 변동 폭이 분석 최근 11년과 최근 5년에서 1월과 2월이 증가하고

있는 추세로 나타났기 때문으로 보인다. 또한 월 단위 산정된 침투량의 분석 결과 1월의 경우 최근 11년간, 최근 5년간의 지표에서 가장 취약한 것으로 나타났고, 최근 11년간의 침투량 추세 대비 최근 5년간의 침투량 감소 추세가 크게 나타났다.

산악권역의 가평군의 경우 2월, 1월, 3월 순으로 시간적 취약성 평가 결과가 높게 나타났다. 가평군의 지하수위 분석 결과 최근 5년간의 지하수위 하강 폭이 연중 2월과 1월에 가장 크게 나타났고, 2월과 1월의 평균 지하수위가 연 중 가장 낮게 관측되었기 때문으로 보인다. 침투량 관련 지표에 대한 분석 결과 1월의 경우 최근 5년간의 추세, 최근 11년간의 평균 침투량, 최근 5년간의 평균 침투량 지표에서 취약성 지수가 높게 산정되었으나, 2월의 경우 모든 평가 지표에서 취약성 지수가 높게 산정되어 2월이 근소하게 월 단위 지하수자원 취약성 지수가 1월보다 더 높게 산정되었다.

남서산야권역의 구례군의 경우 시간적 취약성 평가 결과 12월, 1월, 2월 순으로 평가 결과가 높게 나타났다. 지하수위 관련 지표의 경우 구례군은 최근 11년간 지하수위가 12월에 가장 많이 하강한 것으로 나타났고, 타 지역과 달리 최근 5년간의 지하수위 변동 추세 지표의 취약성이 낮게 나타났는데, 12월의 평균 지하수위가 타 월 보다 다소 낮게 형성되어 추세 지표와는 달리 평균 지하수위 지표에서 취약성이 높게 나타났다. 침투량의 경우 1월이 최근 11년간, 최근 5년간의 평균 침투량이 가장 높은 취약성을 보이는 것으로 나타난 반면, 침투량 변동 추세관련 지표에서 낮은 취약성을 보여 전반적으로 높은 취약성 지수가 산정된 12월이 가장 취약한 월로 나타났다.

남동산야권역의 양산시의 경우 월 단위 시간적 취약성 평가 결과 2월, 5월, 3월의 순으로 취약성 지수가 높게 나타났다. 지하수위 관련 평가 지표 분석 결과 최근 5년간 지하수위의 하강 추세가 크게 나타났고, 특히 과거 6년 대비 최근 5년간의 지하수위 하강 폭이 더욱 커졌기 때문인 것으로 나타났다. 또

**Table 8.** Weight calculation results for assessment of groundwater resources management vulnerable month by mountainous region using entropy method

Mountainous Region (City)	Criteria	R11 Trend	R5 Trend	R5 vs. P6 Trend	R11 Average	R5 Average	R5 vs. P6 Average
Central (Paju)	GWL	0.081	0.205	0.122	0.147	0.130	0.090
	IF	0.035	0.037	0.030	0.040	0.040	0.043
Mountains (Gapyeong)	GWL	0.078	0.130	0.150	0.148	0.102	0.121
	IF	0.039	0.043	0.035	0.053	0.054	0.047
Southwestern (Gurye)	GWL	0.147	0.155	0.084	0.152	0.159	0.126
	IF	0.039	0.011	0.027	0.035	0.026	0.041
Southeastern (Yangsan)	GWL	0.142	0.126	0.133	0.108	0.106	0.119
	IF	0.053	0.042	0.046	0.047	0.028	0.049

**Table 9.** TOPSIS results for assessment of groundwater resources management vulnerable month by mountainous region

Month	Central (Paju)		Mountains (Gapyeong)		Southwestern (Gurye)		Southeastern (Yangsan)	
	TOPSIS Result	Rank	TOPSIS Result	Rank	TOPSIS Result	Rank	TOPSIS Result	Rank
1	0.710	1	0.637	2	0.692	2	0.575	5
2	0.709	2	0.649	1	0.667	3	0.670	1
3	0.682	3	0.604	3	0.511	7	0.606	3
4	0.618	5	0.524	5	0.499	8	0.560	6
5	0.598	7	0.472	8	0.653	5	0.654	2
6	0.631	4	0.573	4	0.649	6	0.580	4
7	0.549	8	0.507	7	0.429	10	0.468	10
8	0.453	10	0.445	10	0.495	9	0.523	7
9	0.375	12	0.430	11	0.239	12	0.265	11
10	0.376	11	0.412	12	0.278	11	0.156	12
11	0.534	9	0.454	9	0.658	4	0.478	9
12	0.608	6	0.507	6	0.726	1	0.486	8

한 최근 11년간 및 최근 5년간의 평균 지하수위가 2월에 가장 낮게 관측되어 해당 평가 지표의 취약성 지수가 높게 산정되었다. 침투량 관련 지표 분석 결과 침투량의 경우 2월이 모든 평가 지표에서 취약성 지수가 높게 나타난 11월 보다는 낮게 나타났는데, 1~12월 대하여 모든 평가 지표의 취약성 지수가 평가 기준 별 상위 3개 월에 포함되어 취약성 지수가 높게 나타난 것으로 보인다.

Table 9는 연구 대상 행정구역 별 월 단위 지하수자원 관리 취약성 평가 결과와 1~12월 중 취약성 지수 순위를 나타내고 있다.

## 5. 결론

대규모 하천이 비교적 적은 내륙 산간지역의 지하수자원 관리의 필요성을 역설하고, 효율적인 지하수자원 관리 방안 도출의 근거 마련을 위하여 국내 내륙 산간지역의 행정구역 별 시공간적 지하수자원 관리 취약성 평가 기법 개발 연구를 수행하였다. 지표수-지하수 연계를 고려한 내륙 산간지역의 행정구역 별 시공간적 지하수자원 관리 취약성 평가 기법을 개발하기 위하여 본 연구는 두 단계로 나누어 연구를 수행하였다. 첫 번째 단계로 국내 내륙 산간지역을 자연적·인문적 연속성을 기반으로 4개 권역으로 구분하고, 지표수-지하수 연계를 고려하기 위하여 지하수위 변동추세, 강수량 변동추세와 함께 강수에 의한 유출을 고려하기 위한 지표로써 유역 평균경사도를 선정하였으며 강수에 의한 유출과 지하대수층 영향을 함께 고려하기 위한 지표로써 유역 평균 유출곡선지수

분포를 선정하였다. 또한, 지표수와 지하수의 직접적인 상호 영향을 고려하기 위한 지표로써 수계밀도를 취약지역 선정을 위한 평가 지표로 선정하였다. 각 평가 지표의 가중치는 엔트로피 방법을 이용하였고, 취약성 평가를 위하여 다기준의사 결정 기법인 TOPSIS를 이용하여 4개 권역 각각에 대한 지하수자원 관리 취약 지역 선정 평가를 수행하였다. 취약 지역 선정 결과 중부산야권역의 파주시, 산악권역의 가평군, 남서산야권역의 구례군, 남동산야권역의 양산시와 각 산지권역 별 지하수자원 관리에 취약한 행정구역으로 선정되었다. 두 번째 단계로 선정된 행정구역에 대하여 지하수자원 관리 취약 시기를 평가하였다. 유출곡선지수로부터 산정된 월 단위 평균 침투량과 월 단위 평균 지하수위의 변동을 최근 11년간의 변동에 대해서 평가하기 위한 평가 지표를 선정하였고, 지하수자원 관리 취약 시기 평가를 위한 가중치 산정과 평가 기법의 적용은 앞선 첫 번째 단계와 동일하게 적용하였다. 지하수자원 관리 취약 시기 평가 결과 파주시, 가평군, 구례군, 양산시 모두 12~2월이 대체로 가장 취약한 시기로 평가되었는데, 이는 내륙 산간지역의 경우 하천이 충분히 분포되어 있지 않고, 강수의 지하대수층 충전보다 유출이 지배적으로 나타나며, 기후변화로 인한 강수량이 감소하고 있는 추세와 지하수위의 하강이 그 원인인 것으로 분석되었다. 양산시의 경우 특히 5월의 취약성 지수가 높게 나타났는데, 타 지역에 비하여 비교적 평탄한 지형임에도 취약성 지수가 높게 나타난 것은 농업활동 등의 영향으로 보이는데 이는 수자원 이용 패턴 등 추가적인 분석이 필요할 것으로 보인다.

이번 연구의 결과는 가뭄 등 물 부족 상황에서 더 큰 피해가 발생할 것으로 예상되는 내륙 산간지역의 지하수자원 관리

취약 지역 및 시기 평가 기법과 결과를 제공함으로써 지속적인 수문요소 관측자료의 축적을 통해 추후 발생할 수 있는 지하수자원 관리 위험 지역 및 시기를 판단할 수 있는 과학적 근거 자료로서의 역할이 기대된다. 또한, 국내 내륙 산간지역의 행정구역을 대상으로 지하수자원 관리 취약 지역 및 시기 평가 기법을 적용하고 결과를 제공함으로써 지방자치단체 내 물 담당 기관 및 공무원 등의 지하수자원 관리 방안 도출의 정책적 근거가 될 수 있을 것으로 기대된다. 추후 연구에서는 지표수-지하수 연계를 고려할 수 있는 현 단계의 연구 결과보다 구체적이고 세부적인 평가 지표 개발을 통해 고도화된 지표수-지하수 연계를 고려한 시공간적 지하수자원 관리 기술을 개발할 수 있는 연구를 수행할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 환경산업기술원(KEITI)의 수요대응형, 물공급사업 연구사업의 지원(#2018002650004)으로 수행된 연구입니다.

## References

- Asher, M.J., Croke, B.F., Jakeman, A.J., and Peeters, L.J. (2015). "A review of surrogate models and their application to groundwater modeling." *Water Resources Research*, Vol. 51, No. 8, pp. 5957-5973.
- Berry, M.W., Drmac, Z., and Jessup, E.R. (1999). "Matrices, vector spaces, and information retrieval." *SIAM Review*, Vol. 41, No. 2, pp. 335-362.
- 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.
- Doherty, J., and Simmons, S.C. (2011). "Use of paired simple and complex models to reduce predictive bias and quantify uncertainty." *Water Resources Research*, Vol. 47, No. 12, W12534.
- Hwang, C.L., and Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making an introduction*. Sage Publications, Thousand Oaks London New Delhi, pp. 38-45.
- 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.
- 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.
- Kim, J.S. (2019). *The utilization of sustainable groundwater a management plan*. Legislation-Policy Report Vol. 31, NARS Publication No. 31-9735026-001607-14, National Assembly Research Services, pp. 55-70.
- 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, No. 8, pp. 2257-2271.
- Lee, J.-B., Kim, I.-H., and Yang, J.-S. (2019). "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." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 3, pp. 195-206.
- Lee, J.-B., Kim, J.-S., and Yang, J.-S. (2020). "A proposal for regional customization and optimal operation management of groundwater resources through analysis of water resources research trends in Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 53, No. spc1, pp. 743-753.
- 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." *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, Vol. 28, No. 1, PP. 67-81.
- 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.
- National Institute of Forest Science (NIFOS) (2009). *Forest landscape and ecosystem management region in Korea*.
- Sadeghfam, S., Hassanzadeh, Y., Nadiri, A.A., and Zarghami, M. (2016). "Localization of groundwater vulnerability assessment using catastrophe theory." *Water Resources Management*, Vol. 30, No. 13, pp. 4585-4601.
- USDA-Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS) (2004). "Part 630 Hydrology, Chapter 10: Estimation of direct runoff from storm rainfall." *National Engineering Handbook*, Washington DC.
- Walker, G.R., Zhang, L., Ellis, T.W., Hatton, T.J., and Petheram, C. (2002). "Estimating impacts of changed land use on recharge: review of modelling and other approaches appropriate for management of dryland salinity." *Hydrogeology Journal*, Vol. 10, pp. 68-90.
- Woodward, D.E., Hawkins, R.H., Jiang, R., Hjelmfelt, A.T., van Mullem, J.A., and Quan, Q.D. (2003). "Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio." *In World Water & Environmental Resources Congress 2003*, ASCE, Philadelphia, Pennsylvania, U.S., pp. 1-10.
- Wu, W., Yin, S., Liu, H., and Chen, H. (2014). "Groundwater vulnerability assessment and feasibility mapping under reclaimed water irrigation by a modified DRASTIC model." *Water Resources Management*, Vol. 28, No. 5, pp. 1219-1234.
- Yang, J.-S., Lee, J.-B., and Kim, I.-H. (2017). "Assessment of the vulnerability of groundwater level management in Nakdong River basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 12, pp. 815-825.