



# Development of vulnerable period assessment method for efficient groundwater resources management in upstream of Nakdong river basin using entropy method

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

<sup>a</sup>School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University

Paper number: 18-035

Received: 1 June 2018; Revised: 21 July 2018; Accepted: 21 July 2018

## Abstract

Groundwater resources are becoming depleted due to climate change factors and non climate change factors. In order to effectively groundwater resources management, we developed a method for evaluating vulnerable periods of groundwater resource management in watershed areas. The watershed based vulnerability assessment was conducted independently of the evaluation of vulnerable areas and vulnerable periods for sub watersheds. The vulnerable area evaluation index was standardized and applied to the independent vulnerable period index each region. It was applied to Bonghwa-gun, Andong-si, Yecheon-gun, Mungyeong-si and Sangju-si in the upstream of the Nakdong river basin. As a result, the Sangju-si's August was the most vulnerable at 0.278, and Andong-si was assessed to be vulnerable to groundwater resource management during 8 months of the year in study area. Using the developed method, we can find efficient management method considering the time and regional of groundwater resources.

**Keywords:** Upstream of Nakdong river basin, Groundwater resources management, Vulnerable period assessment, Entropy method

## 엔트로피 방법을 이용한 낙동강 상류 지역의 지하수자원 관리 취약시기 평가 방법 개발

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

<sup>a</sup>국민대학교 건설시스템공학부

## 요 지

기후변화와 기후변화 외적인 요인으로 인해 지하수자원은 고갈되어가고 있다. 지하수자원의 효율적인 관리를 위해 유역 단위의 지하수자원 관리 취약시기 평가 방법을 개발하였다. 유역 단위의 취약시기 평가는 취약 지역 평가와 소유역에 대한 취약시기 평가를 독립적으로 진행하여 각각의 지수를 산정하였다. 취약 지역 평가 지수를 표준화하여 독립적으로 진행한 취약시기 평가 지수에 적용하여 유역 단위의 취약시기 평가 방법을 개발하였으며, 개발한 방법을 낙동강 상류 지역인 봉화군, 안동시, 예천군, 문경시, 상주시에 적용하였다. 그 결과 상주의 8월이 0.278로 가장 취약한 것으로 나타났으며, 안동시는 1년 중 8개월간 5개 지역 중 지하수자원 관리에 취약한 것으로 나타났다. 개발된 방법을 이용하여 지하수자원의 시공간을 고려한 효율적인 관리방안을 모색할 수 있을 것이다.

**핵심용어:** 낙동강 상류 지역, 지하수자원 관리, 취약시기 평가, 엔트로피 방법

## 1. 서 론

수자원의 지속 가능한 사용을 위해서는 지표수자원의 계획적인 활용도 중요하지만, 지하수자원 또한 중요한 수자원

구성요소이다. 전 세계적으로 전체 취수량의 약 1/3을 지하수자원을 통해 공급하고 있으며(Kumar and Shah, 2006), 전 세계 인구 중 약 25억 명의 인구가 지하수자원을 음용수로 이용하고 있다(World Health Organization, 2014). 가뭄 및 갈수기의 지표수는 하천, 저수지 등 수위의 저하로 이어지지만, 지하수위가 지속해서 유지가 된다면 지표수자원의 고갈도 늦춰주는 역할도 할 수 있다. 기후변화, 산업의 활동으로 인해 지하수

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

자원은 수량과 수질 측면에서 위험성이 증가하고 있다. 기후 변화 중 강우는 지하수자원의 유지에 있어서 직접 영향을 주고 있다. 연간 내리는 총 강우량은 증가하고 있으며 무강우일 수도 또한 증가하고 있다. 강우의 강도가 증가하여 지하수계로 함양되는 수자원은 감소하고 있으며(Okkonen and Klove, 2011), 직접 유출로 인해 하천으로 인해 바다로 빠져나가는 수자원은 증가하고 있다. 원활한 수문 순환이 유지되기 위해서는 하천, 저수지 등의 지표수의 유지도 중요하지만 지하수계로 함양된 지하수위의 유지도 매우 중요하다. 산업의 발달로 지표면의 불투수 면적이 증가하여 불균형적인 수문 순환으로 인해 지하수자원은 점차 줄어들고 있다. 지하수자원에 대한 위험성은 일차적으로는 지하수위의 하강으로 인하여 가용 지하수자원의 양이 줄어들는 문제점이 있다. 이차적으로는 지하수위의 하강으로 하천 건천화의 가속화와 지반침하가 발생하고 있으며, 연안/도서 지역에서는 담수 지하수위의 하강과 더불어 해수면 상승으로 인해 해수 침투의 영역이 점차 내륙으로 가속화되어 농작물의 염수 피해, 연안 생태계의 교란 등 큰 피해가 발생하고 있다. 지하수자원의 잠재적인 피해를 줄이고 유역의 관리를 위해서는 대응할 수 있는 능력을 평가하고 지역 특성을 고려한 대책 마련이 필요하다.

IPCC (2007)는 취약성에 대해서 유역 단위에서 발생하는 자연재해에 대한 잠재적인 피해량 혹은 대응할 수 있는 능력이라고 정의하였다. 취약성의 개념이 발표된 이후 지표수자원 관리를 위한 취약성 지수 개발은 최근까지 활발히 진행되고 있다(Chung *et al.*, 2011; Son *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2013; Kang *et al.*, 2013; Kim and Chung, 2015). 지하수자원 취약성 지수 개발도 수량과 수질 측면에서 활발히 진행되고 있다(Yang and Kim, 2013). 수질 측면에서는 연안 지역을 대상으로 하여 해수 침투로 인해 지하수자원의 염해에 대해서 수치 모델을 통해 해수면 상승에 대해서 예측하

여 취약성 평가하는 연구가 진행되었다(Abd-Elhamid *et al.*, 2016; Chang *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2018). 지하수자원의 수량 측면에서는 지하수위, 유역을 대표하는 지층 매개변수인 투수계수, 대수층의 매질 등과 기후변화에 영향을 받는 함양량 등을 선정하여 취약성을 평가하는 연구가 진행되었다(Seeboonruang, 2016; Dennis and Dennis, 2012). 기존의 연구에서는 지하수자원의 취약성을 평가하는 인자로 지역을 대표하는 매개변수를 추정하여 사용하였다. 공간적인 차이에 대한 지하수자원의 취약성 평가는 많은 기법이 개발되고 있으나 시간 차이에서 나타나는 지하수자원 취약성 평가 기법은 국내외로 전무한 실정이다. 본 연구는 Yang *et al.* (2017)에 발표한 낙동강 유역 지하수위 관리 취약성 평가의 후속 연구로 지하수자원의 취약시기 평가 지수를 개발하였다. 취약시기에 대한 평가는 월 단위 자료를 활용하였으며, 선정 유역에서 가장 취약한 지역 및 취약한 시기를 평가하고, 각 월에 따라 가장 취약한 지역을 평가하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 연구절차

가장 취약한 지역을 월별로 평가하기 위해 취약 지역과 취약시기에 대한 평가를 독립적으로 진행해야 한다. 취약 지역을 평가하기 위해 과거의 관측 자료를 분석하여 앞으로의 추세를 예측하였다. 지하수자원 관리 취약성 지수를 평가하는데 있어 지하수위 자료가 포함되어 적용할 수 있는 분석기법이 제한되어 있다. 지하수위 자료의 특성상 결측이 많고 우리나라의 지하수위 관측 시기가 짧으므로 직관적인 추세를 산정할 수 있는 선형 회귀분석을 통해 최근 추세를 산정하였다. 각각의 취약성을 평가하기 위해서는 가중치 산정이 매우 중요한

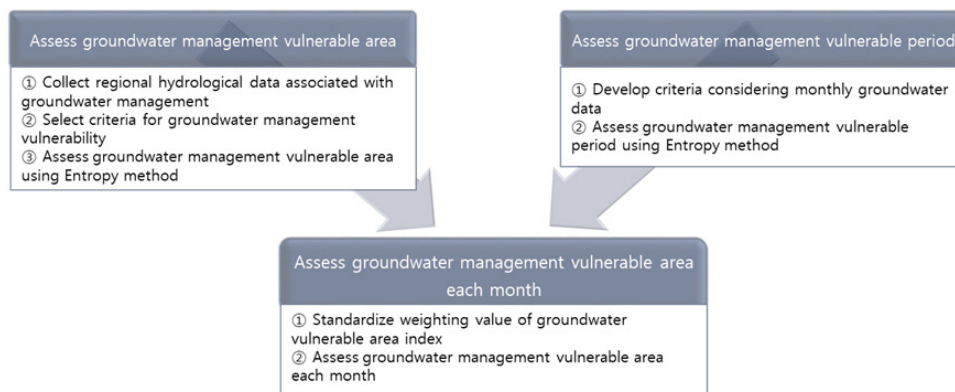


Fig. 1. Procedure used in this study

과정이다. 본 연구에서는 가중치 선정 방법에 있어 다기준 의사결정기법 중 주어진 자료의 차이를 이용하여 가중치를 산정하는 방법인 엔트로피 방법을 이용하였다. 취약시기를 결정하기 위해 각 월에 대한 자료 간의 차이를 이용하여 가중치를 결정하였다.

연구의 순서는 먼저 지하수자원 관리 취약 지역 평가를 진행한다. 지하수자원 취약 지역 평가를 위해 지하수자원 관리와 연관된 자료를 수집하였다. 수집된 자료를 분석하여 지하수자원 관리 평가 기준을 개발하고 평가 기준을 결정한다. 각각의 평가 기준에 대해 엔트로피 방법으로 결정된 가중치를 적용하여 취약 지역을 평가하였다. 취약 지역 평가와는 독립적으로 취약시기 평가를 실시한다. 1~12월에 따른 취약시기를 평가하기 위해서 지하수자원 관리 상태를 나타낼 수 있는 기준을 개발하고, 엔트로피 방법을 이용하여 취약시기를 평가하였다. 최종 결과를 나타내기 위해 취약 지역 평가 지수를 표준화하여 각 지역에 대한 취약시기 평가 지수에 적용하고 각 월에 따른 취약 지역을 평가하였다. 연구의 순서는 Fig. 1과 같다.

**2.2 엔트로피 방법**

다기준 의사결정 방법을 이용하여 대안 간의 평가를 위해서는 다양한 기준에 대해서 각각의 가중치를 결정해야 한다. 각각의 평가 기준에 대해서 가중치를 선정하는 전통적인 방법에는 계층화 분석 방법, 델파이 방법 등이 있다. 본 연구에서 개발하고자 하는 취약시기를 결정하기 위해서는 각각의 월에

대한 가중치를 산정해야 하는데 각 지역에 대해서 각 월에 대한 자료를 모두 분석하고 판단하는 것은 현실적으로 불가능에 가깝다. 이에 본 연구에서는 주어진 자료 간의 차이를 나타내는 엔트로피 방법을 이용하여 가중치를 산정하였다. Fig. 2는 엔트로피 방법을 통해 가중치를 결정하는 순서를 나타냈다 (Shannon and Weaver, 1949).

**2.3 표준화 방법**

선택된 평가 기준들은 각각의 범위 및 단위가 달라 가중치를 적용하기 이전에 각 평가 기준들은 자료에 대해서 표준화를 실시하여야 한다. 본 연구에서 적용한 표준화 방법은 스케일 재조정방법으로 지표의 범위를 기반으로 하는 표준화 방법이다. 각 평가 기준에 따라 편차가 있고 정규분포를 만족하지 않는 자료들이 많아 스케일 재조정방법을 통해 자료들에 대해서 표준화를 실시하였다. 중간 값을 이용하여 정규화를 실시하여 지표들이 모두 같은 범위를 갖도록 만든다(Nardo et al., 2005). 스케일 재조정 표준화 방법은 다음과 같다.

$$S_j^i = \frac{x_{ij} - \min_i(x_{ij})}{\max_i(x_{ij}) - \min_i(x_{ij})}, i = 1, 2, \dots, n, j \in N_{ideal} \quad (1)$$

$$S_j^i = \frac{\max_i(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_i(x_{ij}) - \min_i(x_{ij})}, i = 1, 2, \dots, n, j \in N_{worst} \quad (2)$$

위의 식에서  $i$ 는 대안을 나타내고  $j$ 는 평가 기준을 나타낸다. 평가치에 대한 값이 커질수록 1에 가까운 값을 나타내는 것을 이상적인 해로 가정하고, 평가치에 대한 값이 작아질수록 1에 가까운 값을 나타내는 것을 부이상적인 해로 가정한다. 본 연구에서는 평가치가 커질수록 취약한 평가 기준은 Eq. (1)의 식을 사용하고, 평가치가 작아질수록 취약한 평가 기준은 Eq. (2)의 식을 사용하였다.

**3. 연구지역**

연구지역은 우리나라의 4대강 유역 중 낙동강 중 Yang et al. (2017)에서 수행하였던 지역 중 첫 번째와 두 번째 취약 지역으로 평가된 상주시와 안동시가 포함된 상류 지역을 대상으로 진행하였다. 상류에서부터 봉화군, 안동시, 예천군, 문경시, 상주시가 있으며 행정구역 단위로 자료를 수집하였으며, 지하수위, 지하수 이용량, 함양량은 국가 지하수 관측망의 자료를 수집하였고, 하천수위 및 수자원 이용량은 국가수자원

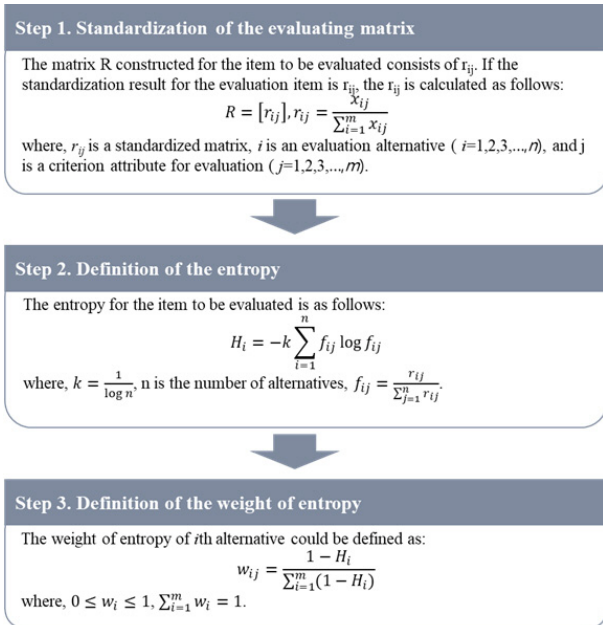


Fig. 2. Procedure of entropy method

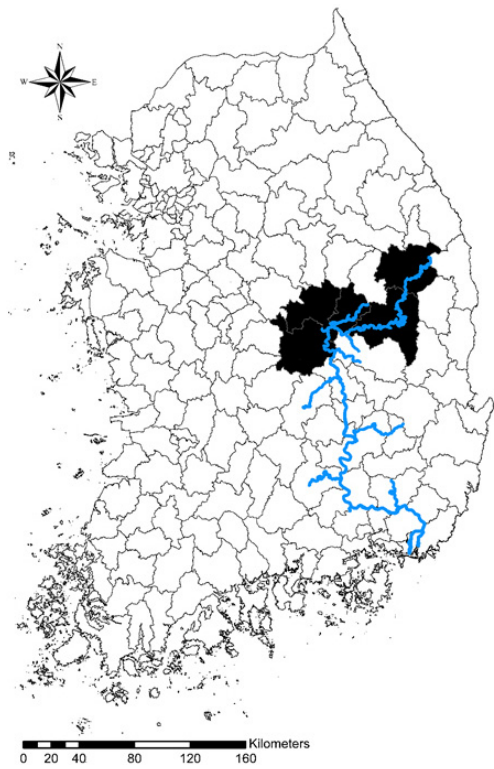


Fig. 3. Study area

관리 종합정보시스템의 자료, 강우는 기상청의 자료를 수집하였다. Fig. 3에는 연구지역의 위치와 낙동강 본류의 위치를 나타냈다.

## 4. 연구결과

### 4.1 지하수자원 관리 취약 지역 평가

#### 4.1.1 지하수자원 관리 취약 지역 평가 기준과 가중치

지하수자원 관리 취약 지역 평가 기준을 결정을 위해 지하수자원 관리와 관련된 자료를 수집하였다. 지하수자원 관리 취약 지역 평가 기준에 사용된 자료는 연평균 자료의 추세를 활용하였다. 관측된 연평균 자료의 선형회귀 분석을 통해 현재까지의 추세를 산정하였다. 수집된 자료로는 연 총 강우량, 지하수위, 함양량, 지하수 이용량, 수자원 이용량, 수자원 이용량 중 지하수 이용량 비율, 하천수위, 불투수 면적 비율 등이 있었다. 이 중 연 총 강우량은 지하수자원의 공급원으로 함양량과 중복되어 삭제되었으며, 수자원 이용량은 지하수자원과 직접적으로 연관성을 찾기 어려워 제외하였다. 그러나 수자원 이용량 중 지하수 이용량 비율은 지하수자원에 대한 지역별 의존도를 평가할 수 있어 포함하였다. 하천수위와 지하

Table 1. Description of groundwater resources management vulnerable area criteria and their weights

Criteria	Description	Weights
GWLT	Groundwater level trend	0.305
RcT	Recharge trend	0.279
GWUT	Groundwater usage trend	0.187
RGWUT	Ratio of groundwater usage in water resource usage trend	0.229

수위의 유동 속도는 많은 차이가 나타난다. 하천수위의 변동과 지하수위의 변동이 명확히 구명되지 않은 상태에서 지하수자원을 평가하는 항목에서 하천수위를 포함하는 것은 신뢰성을 떨어뜨릴 수 있어 제외하였다. 최종적으로 선택된 평가 기준은 네 가지이며, 엔트로피 방법을 적용하여 나타난 각 평가 기준의 가중치는 Table 1에 나타내었다. 각 평가 기준의 가중치는 지하수위 추세에서 가장 높게 나타났으며, 두 번째로 함양량 추세로 나타났다.

#### 4.1.2 지하수자원 관리 취약 지역 평가 결과

Table 2는 지하수자원 관리 취약 지역 평가 기준들에 대한 표준화 결과이다. 표준화 진행 후 안동시에서는 지하수 이용량 추세가 최근 15년간 2,770,373 m<sup>3</sup>씩 상승하는 추세를 보이고 있어 5개 지역 중 가장 높게 나타났고, 수자원 이용량 중 지하수 이용량 추세에서는 0.019% 비율로 상승하고 있어 가장 높은 지수를 나타내고 있다. 상주시에서는 함양량 추세가 1,356,077 m<sup>3</sup>씩 하강하고 있어 가장 높은 지수를 나타냈으며, 예천군에서는 지하수위 추세가 연간 15.1 cm씩 하강하고 있어 5개 지역 중 가장 높은 지수를 나타냈다. 지하수자원 관리 취약 지역 평가 결과 봉화군, 안동시, 예천군, 문경시, 상주시 중 가장 취약한 지역은 상주시로 나타났다. 상주시는 함양량 추세에서 가장 취약함을 드러내고 있으며, 지하수위 추세, 지하수 이용량 추세, 수자원 이용량 중 지하수 이용량 비율 추세에서도 다른 지역과 비교하여 취약함을 나타내 가장 취약한 지역으로 선정되었다. 두 번째 취약 지역인 안동시는 함양량 추세를 제외하고 지하수 이용량 추세와 수자원 이용량 중 지

Table 2. Standardization value of study area

Name	GWLT	RcT	GWUT	RGWUT
Bonghwa-gun	0.454	0.435	0.000	0.000
Andong-si	0.592	0.236	1.000	1.000
Yecheon-gun	1.000	0.000	0.296	0.245
Mungyeong-si	0.000	0.254	0.182	0.254
Sangju-si	0.547	1.000	0.878	0.589

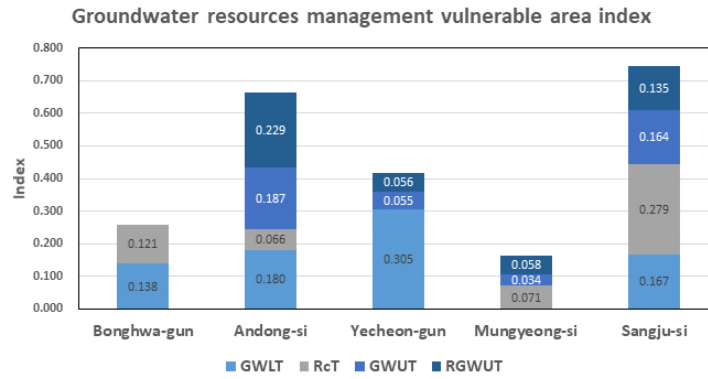


Fig. 4. Groundwater resources management vulnerable area index

하수 이용량 비율 추세에서 가장 취약함을 나타내고 있다. 세 번째인 예천군은 지하수위 추세에서 가장 취약함을 나타내고 있어 장기적으로 주의가 필요할 것으로 판단된다. Table 2는 취약지역 평가를 수행한 연구지역의 각 평가 기준의 표준화한 값들이고, Fig. 4는 지하수자원 관리 취약 지역을 평가한 지수를 나타냈다.

#### 4.2 지하수자원 관리 취약시기 평가

4.2.1 지하수자원 관리 취약시기 평가 기준 개발과 가중치 산정  
 지하수자원 관리 취약시기를 평가하기 위해 일반적인 지표로는 월 단위의 평가 기준을 결정하기 어렵다. 앞서 취약 지역 평가를 진행하는 데 하천수위 변동과 지하수위 변동의 상관관계에 대해서 규명하지 못하면 취약시기를 결정하는 데 있어서 신뢰성을 낮추게 된다. 따라서 본 연구에서는 관측된 지하수위 자료만을 이용하여 취약시기를 평가하였다. 월평균 지하수위를 이용하여 최근 2007~2016년의 추세, 2012~2016년의 추세, 2012~2016년 추세와 2007~2012년 추세의 차이, 2007~2016년의 평균, 2012~2016년의 평균, 2012~2016년 평균과 2007~2012년 평균의 차이로 과거 관측 자료와의 비교를 통해 지하수자원 관리 취약시기를 평가하였다. 지역별 월간 지하수위 분석자료의 차이로 가중치는 각각 산정하였다.

상주시, 안동시, 예천군, 문경시에서는 2007~2016년의 평균이 가장 가중치가 높게 나타났으며, 봉화군에서는 2012~2016년의 평균이 가장 높은 가중치를 나타냈다. Table 3은 지하수 자원 관리 취약 시기 평가를 위한 평가 기준에 대한 설명 및 가중치를 나타냈다.

#### 4.2.2 지하수자원 관리 취약시기 평가

지하수자원 관리 취약시기 평가 결과 상주시와 예천군에서는 8월이, 봉화군과 문경시에서는 6월이, 안동시에서는 2월이 가장 취약한 시기로 나타났다. 상주시에서는 2007~2016년의 추세, 2012~2016년의 추세, 2012~2016년의 평균에서 높은 지수를 나타냈다. 봉화군에서는 2012~2016년 추세와 2007~2012년 추세의 차이, 2012~2016년의 평균이 높게 나타났으며, 안동시에서는 2012~2016년의 추세, 2007~2016년의 평균이 높게 나타났다. 예천군에서는 2007~2016년의 추세, 2012~2016년 평균과 2007~2012년 평균의 차이에서 높은 취약성을 나타냈다. 문경시는 2012~2016년의 평균, 2012~2016년 평균과 2007~2012년 평균의 차이가 높게 나타나 6월이 가장 취약한 시기로 나타났다. 일반적으로 우리나라의 6~8월은 풍수기로 1년 중 강우가 가장 많이 내리는 시기로 지하수자원 관리의 취약성이 나타나지 않을 시기로 보이지만,

Table 3. Description of groundwater resources management vulnerable period criteria and their weights

Criteria	Description	Weights				
		Sangju-si	Bonghw-gun	Andong-si	Yecheon-gun	Mungyeong-si
S10	GWL slope (2007~2016)	0.169	0.144	0.161	0.170	0.167
S5	GWL slope (2012~2016)	0.147	0.172	0.171	0.173	0.148
S5 vs	GWL slope (2012~2016) vs. slope (2007~2011)	0.142	0.157	0.166	0.166	0.148
A10	GWL ave (2007~2016)	0.184	0.185	0.172	0.175	0.182
A5	GWL ave (2012~2016)	0.180	0.186	0.161	0.164	0.178
A5 vs	GWL ave (2012~2016) vs. ave (2007~2011)	0.178	0.156	0.169	0.151	0.178



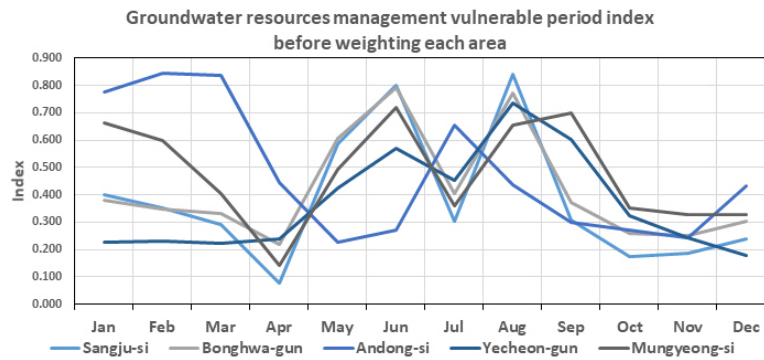


Fig. 5. Groundwater resources management vulnerable period index before weighting each area

각 월의 연간 자료를 비교하게 되면 최근 풍수기의 지하수위 평균과 추세가 급격히 하강하고 있는 것으로 나타났다. 선정된 유역에서 안동시를 제외한 지역에서는 풍수기의 지하수자원 관리가 더욱 취약한 것으로 나타났다. Fig. 5는 각 지역에 대해 독립적으로 취약시기 평가한 결과에 대해서 나타낸 것이다.

### 4.3 월별 지하수자원 관리 취약 지역 평가

최종적으로 월별 지하수자원 관리 취약 지역 평가를 하였다. 각 지역에 대한 가중치는 4.1에서 평가한 지역별 취약지수를 표준화하여 적용하였다. 낙동강 상류 5개 지역에서 월별로 지하수자원 관리 취약시기는 상주의 8월로 나타났다. 상주는 지역별 가중치에서 가장 취약한 지역으로 나타났으며, 8월의 지하수위는 지난 10년간 7.3 cm/year로 하강하였으며, 최근 5년간 12.1 cm/year로 하강하였다. 또한, 과거(2007~2011)와 최근(2012~2016)의 평균 지하수위 비교에서 40 cm가 하강하여 매우 취약한 시기로 나타났다. 두 번째로 취약한 시기

는 안동시의 2월로 나타났다. 안동시는 지역별 가중치에서 두 번째로 취약한 지역으로 선정되었으며, 안동의 지하수위는 2010년을 기준으로 회복하고 있지만, 2월은 최근 5년간 4.7 cm/year로 하강하고 있다. 세 번째는 상주와 같은 달인 예천군의 8월로 나타났다. 예천군은 지역별 가중치에서 세 번째로 취약한 지역으로 나타났으며, 8월에는 최근 5년간 29.2 cm/year로 하강하고 있으며, 과거(2007~2011) 대비하여 최근(2012~2016)에 약 161.8 cm가 하강하여 매우 취약한 시기로 나타났다. 월별로 나타냈을 때 1~4월까지의 안동시가 가장 취약한 것으로 나타났고, 5~6월까지는 상주시, 7월은 안동시, 8월은 상주시, 9월은 예천군, 10~12월은 안동시로 나타났다. 월별로 가장 취약한 지역이 많은 지역은 안동시로 1년 중 8개월간 가장 취약한 지역으로 나타났으며, 뒤를 이어 상주시가 3개월로 나타났다. Table 4는 지역별로 지하수자원 관리 취약시기 평가한 지수와 각 지역의 가중치를 나타냈으며, Fig. 6은 월별 지하수자원 관리 취약 지수를 도시화하였다.

Table 4. Groundwater resources management vulnerable period index at each area and their weights

Name	Sangju-si	Bonghwa-gun	Andong-si	Yecheon-gun	Mungyeong-si
Weights	<b>0.332</b>	<b>0.116</b>	<b>0.295</b>	<b>0.185</b>	<b>0.073</b>
Jan	0.133	0.044	0.229	0.042	0.048
Feb	0.116	0.040	0.249	0.043	0.044
Mar	0.097	0.038	0.247	0.041	0.029
Apr	0.026	0.025	0.131	0.044	0.010
May	0.195	0.070	0.067	0.078	0.036
Jun	0.265	0.091	0.081	0.106	0.052
Jul	0.101	0.047	0.193	0.084	0.026
Aug	0.278	0.089	0.129	0.136	0.048
Sep	0.102	0.043	0.088	0.112	0.051
Oct	0.058	0.030	0.080	0.060	0.025
Nov	0.062	0.029	0.071	0.045	0.024
Dec	0.080	0.035	0.127	0.033	0.024

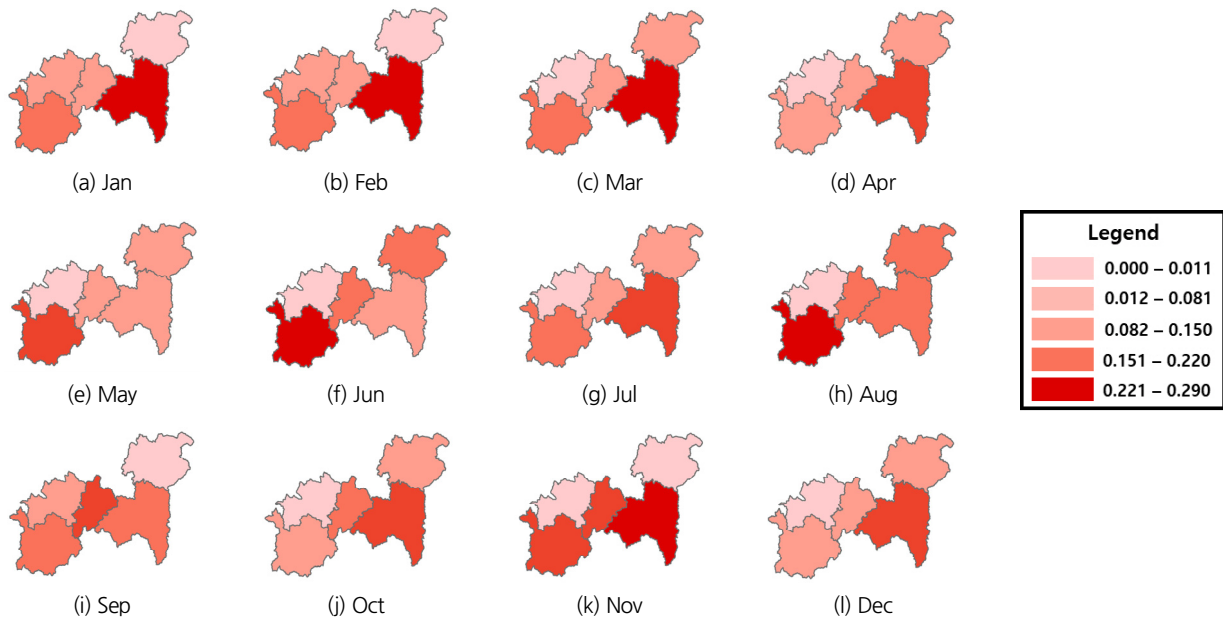


Fig. 6. Groundwater resources management vulnerable index at each month

## 5. 결론

기후변화와 기후변화 외적인 요인으로 인해 지하수자원의 고갈로 인한 위험성이 점차 심각해지고 있다. 기존의 연구에서는 기후변화를 고려하기 위해 지역 단위의 취약성 평가를 진행하고 있다. 지하수자원의 효율적인 관리를 위해서는 공간에 대한 유기적인 관리뿐만 아니라 시간적으로도 관리가 필요하다. 이에 본 연구에서는 취약시기 평가 기법을 개발하였다. 취약 지역 평가와 취약시기 평가에 대해서 독립적으로 진행 후 취약 지역 평가한 지수를 이용하여 지역별 가중치를 결정하였다. 지역별 가중치를 취약시기에 적용하여 행정구역 단위의 취약시기 평가를 진행하였다. 취약시기를 평가하는데 결정해야 하는 가중치의 개수는 지역에 따라 월에 따라 12개씩 증가한다. 각 시기에 대한 가중치를 계층화 분석기법의 쌍대비교 혹은 델파이 방법의 설문을 이용해 가중치를 결정하기 위해서는 많은 정보의 양을 제공해야 하며 일관성 있는 가중치 결정을 위해서는 많은 시행착오가 필요하다. 이를 해결하기 위해 자료의 엔트로피 척도에 의한 가중치 산정방법을 적용하였다. 특정 시기에 대해 특정 지역의 취약성을 나타내기 위해 지역을 나타내는 취약성 지수 계층의 하위 속성으로 취약시기에 대한 평가 기준을 배치하였다. 개발된 방법론을 통해 낙동강 상류 5개 행정구역 중 봉화군, 안동시, 예천군, 문경시, 상주시에 적용한 결과 8월의 상주시가 가장 취약한 것으로 나타났다. 월별로 취약한 지역이 가장 많이 나타난 곳

은 안동시로 나타났으며, 연구지역 중 1년간 8개월간 가장 취약한 지역으로 나타났다. 개발된 기법은 시/공간적인 지하수 자원 관리 취약성을 나타낼 수 있다. 본 연구를 통해 개발된 방법을 이용하여 전체 유역에 대해서 각 취약시기를 결정하여 지표수와 혼합하여 통합 수자원 관리 정책을 시행한다면 수자원의 능동적인 활용이 가능할 것이다. 지표수가 풍부한 시기에 지하수자원의 함양을 적극적으로 유도할 수 있는 인공 주입 혹은 함양지를 활용하고, 지표수가 취약한 시기에 적극적으로 지하수 양수를 통해 부족한 수자원을 보충하는 등의 방안을 활용하면 효율적인 수자원 활용을 도모할 수 있을 것이다.

연구를 진행하면서 지하수자원 관리에 영향을 미치는 다양한 평가 기준을 제외하였다. 하천수위 및 강우에 대한 자료들은 지하수위에 영향을 미치는 평가항목이지만, 강우 혹은 하천수위가 지하수위에 직접 영향을 미치지 못하고 주변의 지질특성에 따라 지연시간이 존재한다. 추후 연구에서는 각 수문요소에 대해서 시간 단위를 세분화하여 각각에 미치는 영향에 대해서 고려하여 지하수자원 관리 취약시기를 결정할 수 있는 기법을 개발할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업 연구지원비(13A WMP-B066761-05)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." *Proceedings The International Conference of Engineering Sciences and Applications*, Aswan, Egypt, January, 29-31.
- Chang, S. W., Nemecek, K., Kalin, L., and Clement, T. P. (2016). "Impacts of climate change and urbanization on groundwater resources in a Barrier Island." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 142, No. 12.
- 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.
- IPCC (2007). *Climate change 2007: The physical science synthesis report*. Cambridge University Press, Cambridge.
- 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, Y., and Chung, E. S. (2015). "Robust prioritization of climate change adaptation using the VIKOR method with objective weights." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 51, No. 5, pp. 1167-1182.
- Kim, Y., Chung, E. S., Jeon, S., and Kim, S. U. (2013). "Prioritizing the best sites for treated wastewater use in an urban watershed using fuzzy TOPSIS." *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 73, pp. 23-32.
- Kumar, D. M., and Shah, T. (2006). "Groundwater pollution and contamination in India: the emerging challenge." *IWMI-TATA Water Policy Program Draft Paper-1*, p. 14.
- 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.
- Okkonen, J., and Kløve, B. (2011). "A sequential modeling approach to assess groundwater surface water resources in a snow dominated region of Finland." *Journal of Hydrology*, Vol. 411, No. 1-2, pp. 91-107.
- 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. 42.
- Shannon, C. E., and Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press, London and New York.
- Son, M. W., Sung, J. Y., Chung, E. S., and Jun, K. S. (2011). "Development of flood vulnerability index considering climate change." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 3, pp. 231-248.
- WHO (World Health Organization) (2014). "Guidelines for drinking water quality: Fourth edition." Geneva, Switzerland, WHO. *Progress on Drinking Water and Sanitation: 2014 Update*. WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme for Water Supply and Sanitation, New York.
- Yang, J. S., and Kim, I. H. (2012). "Development of drought vulnerability index using delphi method considering climate change and trend analysis in Nakdong river basin" *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 33, No. 6, pp. 2245-2254.
- Yang, J. S., Kim, S. U., Chung, E. S., and Kim, T. W. (2012). "Prioritization of water management under climate change and urbanization using multi-criteria decision making methods." *Hydrology and Earth System Science*, Vol. 16, No. 3, pp. 801-814.
- 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.
- Yang, J. S., Lee, J. B., and Kim, I. H. (2018). "Analysis of the effect 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.