



# Drought risk assessment considering regional socio-economic factors and water supply system

Kim, Ji Eun<sup>a</sup> · Kim, Min Ji<sup>b</sup> · Choi, Sijung<sup>c</sup> · Lee, Joo-Heon<sup>d</sup> · Kim, Tae-Woong<sup>e\*</sup>

<sup>a</sup>Ph.D. Student, Department of Civil and Environmental System Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

<sup>b</sup>Graduate Student, Department of Smart City Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

<sup>c</sup>Senior Researcher, Department of Water Resources and River Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

<sup>d</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Joongbu University, Goyang, Korea

<sup>e</sup>Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University (ERICA), Ansan, Korea

Paper number: 22-033

Received: 8 May 2022; Revised: 7 July 2022; Accepted: 8 July 2022

## Abstract

Although drought is a natural phenomenon, its damage occurs in combination with regional physical and social factors. Especially, related to the supply and demand of various waters, drought causes great socio-economic damage. Even meteorological droughts occur with similar severity, its impact varies depending on the regional characteristics and water supply system. Therefore, this study assessed regional drought risk considering regional socio-economic factors and water supply system. Drought hazard was assessed by grading the joint drought management index (JDMI) which represents water shortage. Drought vulnerability was assessed by weighted averaging 10 socio-economic factors using Entropy, Principal Component Analysis (PCA), and Gaussian Mixture Model (GMM). Drought response capacity that represents regional water supply factors was assessed by employing Bayesian networks. Drought risk was determined by multiplying a cubic root of the hazard, vulnerability, and response capacity. For the drought hazard meaning the possibility of failure to supply water, Goesan-gun was the highest at 0.81. For the drought vulnerability, Daejeon was most vulnerable at 0.61. Considering the regional water supply system, Sejong had the lowest drought response capacity. Finally, the drought risk was the highest in Cheongju-si. This study identified the regional drought risk and vulnerable causes of drought, which is useful in preparing drought mitigation policy considering the regional characteristics in the future.

**Keywords:** Joint drought management index, Bayesian network, Water supply system, Drought risk

## 지역의 사회·경제적 인자와 용수공급체계를 고려한 가뭄 위험도 평가

김지은<sup>a</sup> · 김민지<sup>b</sup> · 최시중<sup>c</sup> · 이주현<sup>d</sup> · 김태웅<sup>e\*</sup>

<sup>a</sup>한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 박사과정, <sup>b</sup>한양대학교 대학원 스마트시티공학과 석사과정,

<sup>c</sup>한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 수석연구원, <sup>d</sup>중부대학교 건축토목공학부 교수, <sup>e</sup>한양대학교(ERICA) 건설환경공학과 교수

## 요지

가뭄은 자연적 현상이지만, 지역의 물리적 및 사회적 요소와 결합되어 피해가 발생한다. 특히, 각종 용수 공급 및 수요와 연관되어 사회경제적으로 큰 피해를 야기시킨다. 비슷한 심도의 기상학적 가뭄에도 지역의 특성과 용수공급체계에 따라 실제로 발생하는 가뭄 피해는 다르다. 본 연구에서는 지역의 사회·경제적 인자와 용수공급체계를 고려하여 가뭄 위험도를 평가하였다. 노출성은 용수공급 과부족량을 나타내는 결합가뭄관리지수(JDMI)를 등급화하여 평가하였다. 취약성은 가뭄에 영향을 받는 10개의 사회·경제적 인자에 엔트로피, PCA 및 GMM를 적용하여 가중평균하여 평가하였다. 대응능력은 지역의 용수능력을 나타내는 인자들을 베이지안 네트워크에 적용하여 평가하였다. 위험도는 노출성, 취약성 및 대응능력을 통합하여 결정하였다. 용수공급 실패 사상의 발생 가능성을 의미하는 가뭄 노출성을 평가한 결과, 괴산군이 0.81로 가장 높게 나타났다. 가뭄 취약성의 경우, 대전광역시 0.61로 매우 취약한 것으로 나타났다. 지역의 용수공급체계가 고려된 가뭄 대응능력을 평가한 결과, 세종시가 가뭄 대응능력이 가장 낮은 것으로 나타났다. 마지막으로 위험도를 평가한 결과, 청주시가 가장 높게 나타났다. 이러한 결과를 통해 가뭄에 대한 위험 및 취약 인인을 파악하였으며, 향후 지역의 특성을 고려한 가뭄 피해 저감 정책 마련이 가능하다.

**핵심용어:** 결합가뭄관리지수, 베이지안 네트워크, 용수공급체계, 가뭄 위험도

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-400-5184

E-mail: twkim72@hanyang.ac.kr (Kim, Tae-Woong)

## 1. 서론

일반적으로 가뭄이란 강수량 부족이 지속됨에 따라 물이 부족한 현상으로 정의되며, 가뭄의 원인 및 피해 유형에 따라 기상학적, 농업적, 수문학적 및 사회경제적 가뭄으로 분류된다. 이러한 가뭄의 종류는 한가지 형태로 발생하기도 하지만, 자연적, 생태학적, 물리적 및 사회적 요소와 결합되어 복합적으로 발생하기도 한다. 여러 가지 가뭄 유형 중에서 용수와 관련된 가뭄은 인간이 직접적으로 느낄 수 있으며, 용수로 인한 가뭄 피해는 강수량 부족에 의한 물리적인 현상과 용수 공급 및 수요간의 상호작용으로 인해 발생한다. 즉, 용수에 대한 가뭄은 자연현상뿐만 아니라 사회·경제적으로도 큰 피해를 야기하기 때문에 매우 치명적이다. 따라서, 용수와 관련된 가뭄 현상 및 위험을 미리 파악할 수 있는 위험도 평가가 필요하다.

가뭄 위험도 평가에 관한 연구는 국내·외에서 많이 진행되고 있다. 대부분 물리적인 현상의 발생 확률을 의미하는 가뭄 노출성과 지역 시스템의 사회·경제적 민감도를 의미하는 가뭄 취약성을 결합하여 평가하고 있다. 하지만, 가뭄 위험도는 노출성 및 취약성 외에도 가뭄이 발생하였을 때 대응 및 회복할 수 있는 지역의 능력에 따라서도 달라진다. 지금까지 가뭄 대응능력은 인자 선정 및 분석에 어려움이 있어서 가뭄 위험도 평가에서 제외되거나, 취약성과 비슷한 지역의 수자원량 또는 사회·경제적 인자를 산술평균하여 산정되고 있다. 예를 들어, Vargas and Paneque (2017)는 국민참여도, 유효저수량 및 가뭄 위험 인식 등을 평균하여 가뭄적응능력을 산정하였으며, Choi (2018)은 1인당 개인소득, 공무원수, 상수도 보급률 및 유효저수량 등을 평균하여 가뭄대응능력부족지수를 산정하였다. 하지만, 이러한 인자만으로는 가뭄 영향을 완화할 수 있는 지역의 용수공급능력을 평가하기 어렵기 때문에, 용수 공급 및 수요와 관련된 전반적인 상황을 파악할 수 있는 가뭄 대응능력 산정이 필요하다.

이처럼, 용수 공급 및 수요와 관련된 요소는 인간에게 큰 영향을 미치지만, 용수공급능력을 고려한 가뭄 위험도 평가에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 지금까지 용수공급능력과 관련된 대부분의 연구는 댐 또는 저수지의 저수량 추정을 통한 용수공급능력을 파악하는 것이었다. 하지만, 용수 공급 및 수요와 관련된 가뭄 대응능력만으로는 가뭄의 발생 확률 및 지역 시스템의 취약 정도를 고려할 수 없기 때문에 지역의 가뭄 위험도를 정확히 파악하기 어렵다. 따라서, 용수공급능력을 파악할 수 있는 가뭄 대응능력과 함께 가뭄 노출성 및 취약성이 모두 고려된 가뭄 위험도 평가가 필요하다.

용수공급능력은 일반적으로 Soil and Water Assessment

Tool (SWAT) 및 Modified SIMYLD (MODSIM)과 같은 모델을 통해 산정된다. Berhe *et al.* (2013)은 에티오피아 와슈강 유역에 대해 MODSIM을 활용하여 용수 수요 시나리오에 따른 물 공급 능력을 파악하였으며, Ahn *et al.* (2016)은 SWAT 및 MODSIM을 통합하여 기후변화에 따른 농업용수 공급 능력 산정 기법을 개발하였다. 그러나, 이러한 모델링을 통한 대응능력을 산정하는 방법은 자료 구축이 어려우며, 직관적인 이해가 어려워 다양한 기법과의 연계 및 활용에 한계가 있다. 따라서, 지역의 용수공급 네트워크 및 관련 수자원 인자들을 고려하여 지수화를 한다면, 산정이 간단명료하고 이해가 쉽기 때문에 가뭄 노출성 및 취약성과 연계하기에 효율적이다. Kang and Lee (2012)는 댐 용수공급능력에 영향을 미치는 유입량, 유효저수량, 생·농·공업용수 사용량 등을 다중회귀모형을 통해 댐의 용수공급능력을 추정하였으며, Qin and Zhang (2018)은 용수공급량, 지표유출량, 지하수량 등에 일인당 국내총생산을 통해 산정한 가중치를 적용하여 용수이용률을 산정하는 공식을 개발하였다. 이와 같은 방법을 차용하여 본 연구에서는 용수공급량, 지하수량, 용수이용률 등이 고려된 지역별 용수공급체계기반의 용수공급능력 및 대응능력을 산정하는 방법을 개발하였다.

본 연구에서는 지역의 용수공급체계가 고려된 가뭄 노출성, 가뭄 취약성 및 가뭄 대응능력을 통합하는 가뭄 위험도 평가 방법을 개발하는 것이 목적이다. 특히, 인간사회와 밀접한 관계를 갖고 있으며, 가뭄에 큰 영향을 미치는 지역별 용수공급체계를 반영한 가뭄 대응능력 평가 방법을 개발하고자 하였다. 이때, Yu *et al.* (2018)이 개발한 결합가뭄관리지수(Joint Drought Management Index, JDMI)를 통해 용수공급 실패 사상의 발생확률을 정의하고 가뭄 노출성을 정량화하였으며, 다양한 객관적인 가중치 산정방법을 통합하여 가뭄 취약성을 평가하였다. 본 연구에서 수행된 가뭄 위험도 평가를 통해 산정된 결과는 Kim *et al.* (2021)의 가뭄 노출성 및 취약성만 고려된 가뭄 위험도 평가 결과와의 비교를 통하여 적용성을 검토하였다.

## 2. 연구지역 및 자료

본 연구는 지역별 용수공급 특성 및 피해가 다양하게 발생한 충청도 지역을 연구지역으로 선정하였다. 충청도는 2015년 극심한 가뭄으로 인하여 수문기상학적 문제뿐만 아니라 용수부족이 발생하여 다양한 사회·경제적 문제를 겪었다. 그러므로 가뭄 관리 및 계획 관점에서 충청도 지역에 대한 가뭄

위험도 평가는 매우 중요하다. 충청도는 우리나라 중서부에 위치해 있으며, Fig. 1과 같이 충청북도 11개 지역, 충청남도 15개 지역, 대전광역시 및 세종특별자치시로 구성되어 있다. 면적은 약 16,657 km<sup>2</sup>, 인구는 약 5,540 천명이다. 또한, 금강 및 한강 유역에 걸쳐서 위치해 있으며, 3개의 다목적댐을 가진다. 충청도의 기후는 온대몬순기후의 영향을 받아 여름은 고온다습하고 겨울은 한랭건조하다.

가뭄 위험도 평가인자를 구축하기에 앞서 가뭄 위험도 관련 용어 및 개념을 구체적으로 정립할 필요가 있다. 본 연구에서는 각종 논문 및 보고서 등의 사례 조사(Ahmadalipour, 2017; Fan

*et al.*, 2017; Sam *et al.*, 2017; Vargas and Paneque, 2017)를 통해 본 연구의 목적에 부합하도록 다음과 같이 가뭄 노출성, 취약성, 대응능력 및 위험도를 정의하였다. 1) 가뭄 노출성은 용수공급 부족의 발생 가능성을 나타내며, 2) 가뭄 취약성은 가뭄 발생 시 부정적인 영향을 받는 지역 시스템의 사회·경제적 민감한 정도를 나타내며, 3) 가뭄 대응능력은 가뭄 발생 시 영향을 완화할 수 있는 지역 시스템의 용수공급능력을 나타내며, 4) 가뭄 위험도는 특정 지역에서 가뭄에 의해 발생할 수 있는 용수 공급 및 수요와 관련된 잠재적인 영향 정도이다. 이러한 정의를 토대로 가뭄 위험도는 가뭄 위험도 지수(Drought Risk



Fig. 1. Study area

Table 1. Indicators for drought risk assessment

Indicators		Unit	Source
Drought Hazard			
H1	Streamflow	cms	Water Environment Information System
Drought Vulnerability			
V1	Population	persons	National Statistical Office
V2	Farm population	persons	National Statistical Office
V3	Recipients of basic living	persons	National Statistical Office
V4	Solitary senior citizen	persons	National Statistical Office
V5	Total area of district	km <sup>2</sup>	National Statistical Office
V6	Agricultural area	km <sup>2</sup>	National Statistical Office
V7	Area of industrial complex	km <sup>2</sup>	National Statistical Office
V8	Ratio of water leakage	%	Water Statistics
V9	Daily water supply per capita	L/persons/day	Water Statistics
V10	Water supply ratio	%	Water Statistics

Table 1. Indicators for drought risk assessment (Continue)

Indicators		Unit	Source
Drought Response Capacity			
C1	Water resources retention	Dam	1000 m <sup>3</sup> /year
C2		River	1000 m <sup>3</sup> /year
C3		Reservoir	1000 m <sup>3</sup> /year
C4		Groundwater	1000 m <sup>3</sup> /year
C5	Intake	Regional dam	1000 m <sup>3</sup> /year
C6		Local dam	1000 m <sup>3</sup> /year
C7		Surface water	1000 m <sup>3</sup> /year
C8		Subsurface water	1000 m <sup>3</sup> /year
C9		Reservoir	1000 m <sup>3</sup> /year
C10		Groundwater	1000 m <sup>3</sup> /year
C11	Amount of domestic water usage		1000 m <sup>3</sup> /year
C12	Amount of industrial water usage		1000 m <sup>3</sup> /year
C13	Amount of agricultural water usage		1000 m <sup>3</sup> /year
C14	Amount of groundwater usage		1000 m <sup>3</sup> /year
C15	Potential groundwater development		1000 m <sup>3</sup> /year
C16	Ratio of sewage reuse		%
C17	Amount of sewage treatment		1000 m <sup>3</sup> /year
C18	Amount of rainwater reusing		1000 m <sup>3</sup> /year
C19	Effluents of sewage treatment		1000 m <sup>3</sup> /year
C20	Amount of sewage inflow		1000 m <sup>3</sup> /year
C21	Area		km <sup>2</sup>
C22	Annual precipitation		mm
C23	Population		Persons
C24	Water supply ratio		%

Index, DRI)를 통해 정량화될 수 있으며, 이는 가뭄 노출성 지수(Drought Hazard Index, DHI), 가뭄 취약성 지수(Drought Vulnerability Index, DVI) 및 가뭄 대응능력 지수(Drought Response Capacity Index, DCI)를 통합하여 산정할 수 있다.

정의된 가뭄 위험도 및 구성요소들의 개념 및 선행연구들을 바탕으로 이에 부합하는 영향인자들을 Table 1과 같이 선정하였다(Ahmadalipour, 2017; Vargas and Paneque, 2017; Blauhut *et al.*, 2016). 선정된 평가인자들 중 구축이 불가능하거나 중복성을 가지는 인자들을 제외하고, 자료들의 시공간적 규모, 기간 및 갱신주기 등을 확인하여 가뭄 위험도 및 인자들의 시공간적 해상도를 설정하였다. 모든 자료는 동일한 시공간적 해상도를 가져야 하기 때문에, 시·군·구별 2001~2019년으로 설정하고 1년 단위로 구축하였다. 이러한 인자들은 기상청, 통계청, 국가수자원관리종합정보시스템, 물환경정보시스템, 상수도 통계 및 지하수조사연보 등을 통해 수집 및 구축되었다.

### 3. 연구방법

#### 3.1 결합가뭄관리지수를 활용한 가뭄 노출성 지수 산정

본 연구에서는 가뭄 노출성을 가뭄의 발생확률, 즉 용수공급 실패 사상의 발생 가능성으로 정의하였다. 가뭄 노출성은 일반적으로 가뭄지수를 통해 정량화되며, 본 연구에서는 Yu *et al.* (2018)에 의해 개발된 결합가뭄관리지수(JDMI)를 사용하였다. JDMI는 유역의 이수안전도를 나타내는 신뢰도와 취약도의 확률분포를 코플라 함수로 결합하여 산정되며, 용수공급 실패 사상의 확률론적 발생 가능성을 나타낸다. 가뭄 노출성을 단순히 유량자료만으로 평가하게 되면 관측지점의 유무, 유량크기 등에 대한 지역적 차이에 의해 결과가 왜곡될 수 있다. 그러나, JDMI를 통해 가뭄 노출성 지수를 산정할 경우, 동일한 범위를 가진 JDMI를 통해 지역마다 크기가 다른 유량에 상관없이 지역적 비교가 가능하다. 또한 지점별로 산정한 결과를 공간분포하여 미계측 지역에 대한 분석이 가능하다.

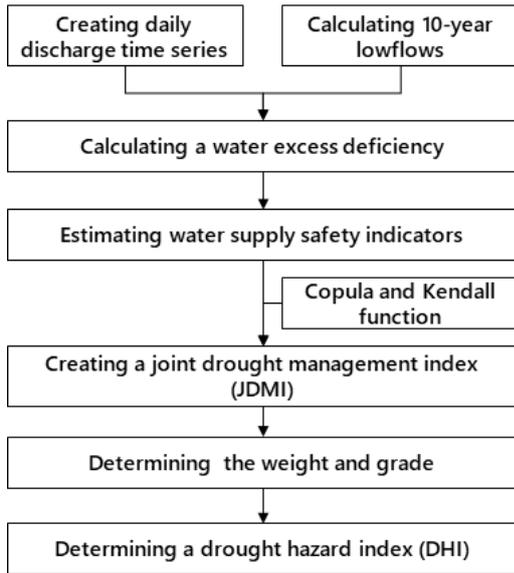


Fig. 2. Procedure of determining a drought hazard index (DHI)

JDMI를 통해 가뭄 노출성 지수를 산정하는 과정은 Fig. 2와 같다. 먼저, 용수공급 과부족량을 산정하기 위하여 지점별 일유량 자료를 바탕으로 10년 빈도 갈수량에 해당하는 기준 갈수량을 산정하고 유출량에서 기준 갈수량을 제외하여 하천 유지용수 부족량을 산정한다. 산정된 용수공급 과부족량을 가지고 가뭄 특성인 지속기간 및 심도를 산정하며, 수자원 시스템이 특정 계획기간 동안 정상적으로 용수공급을 수행할 수 있는 확률을 의미하는 신뢰도와 용수부족의 양적 위험도를 나타내는 취약도를 도출한다. 이수안전도 평가지표는 용수공급 시설의 일정 운영기간에 대하여 산정되며, 본 연구에서는 시간의 흐름에 따른 수자원 시스템의 용수공급 안전도를 파악하기 위하여 5년 이동 자료구간을 사용하여 신뢰도와 취약도를 산정하였다. 두 가지 지표를 결합하여 결합가뭄지수를 산정하기 위하여 코플라(Copula) 함수를 적용하였으며, 켄달(Kendall) 분포함수를 통해 다차원 결합확률분포함수의 정보를 1차원으로 축소하여 JDMI를 산정하였다.

가뭄 노출성 지수는 JDMI를 등급화 기법에 적용하여 산정하였다. 등급화 기법은 가뭄 심도별 가중치를 산정하고 가뭄 심도에 따른 발생확률별 등급을 적용하여 산정하므로, 가뭄 심도의 크기와 발생빈도를 모두 고려할 수 있는 방법이다(Park et al., 2012). 가중치는 정상가뭄의 경우 1, 보통가뭄의 경우 2, 심한가뭄의 경우 3, 그리고 극한가뭄의 경우 4를 부여하였다. JDMI가 0보다 큰 값을 가질 경우 가중치는 0과 같다. 마찬가지로, 등급은 각 가뭄 발생확률의 범위를 등간격으로 4분할하여 1에서 4까지 할당하였다. 따라서 가뭄 노출성 지수(Drought Hazard Index, DHI)는 Eq. (1)을 통해 산정할 수 있다.

$$DHI = (ND_r \times ND_w) + (MD_r \times MD_w) + (SD_r \times SD_w) + (ED_r \times ED_w) \quad (1)$$

여기서,  $ND$ 는 정상 가뭄,  $MD$ 는 보통 가뭄,  $SD$ 는 심한 가뭄,  $ED$ 는 극한 가뭄이며,  $r$ 은 등급,  $w$ 는 가중치이다.

### 3.2 객관적 가중치 산정방법을 적용한 가뭄 취약성 지수 산정

본 연구에서 가뭄 취약성은 가뭄 발생시 영향을 받는 지역의 사회·경제적 민감한 정도로 정의되었다. 가뭄 취약성은 사회경제적 자료들을 하나로 통합하여 정량화할 수 있다. 이때 서로 다른 단위 및 성질을 가지는 여러 인자들을 하나의 단위로 통일하는 정규화 과정이 필요하다. 정규화는 순위매기기, Z-Score 및 축척재조정 방법 등이 있으며, 본 연구에서는 지표의 범위를 알 때 가장 적합하고 음수의 값이 발생하지 않는 축척 재조정 방법을 적용하였다(Eq. (2)).

$$I = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (2)$$

여기서,  $x$ 는 평가인자의 원자료이며,  $I$ 는 표준화된 자료이다.

여러 가지 평가인자들이 하나의 단위로 정규화 되면, 이를 하나의 지수로 통합하기 위해서는 가중치를 부여하는 과정이 필요하다. 가중치를 부여하는 방식에는 주관적 방식과 객관적 방식으로 구분된다. 주관적 가중치는 사용자의 주관이 들어가기 때문에 사용자의 의견이나 능력에 따라 결과가 달라진다. 이러한 이유로 최근에는 객관적 가중치가 많이 사용되고 있다. Kim et al. (2021)은 주성분분석(Principal Component Analysis, PCA) 및 가우스혼합모델(Gaussian Mixture Model, GMM)을 통해 가뭄 취약성 지수를 산정하고, 이를 동일가중치방법의 가뭄 취약성 지수와 비교하였다. 본 연구에서는 Kim et al. (2021)의 분석방법을 바탕으로 엔트로피, PCA 및 GMM을 통해 산정된 가중치를 평균한 통합가중치를 적용하였다.

엔트로피 방법은 어떤 신호가 가지고 있는 정보용량을 기반으로 응집력이 높은 신호를 발견하여 가중치를 높게 부여하는 방법이다. 엔트로피가 크다는 것은 해당 지역에서 불확실성의 감소 정도가 크고, 동일 속성에 대한 정보를 많이 포함하고 있다는 것을 의미하므로 가중치를 높게 부여한다(Lee et al., 2011). PCA 방법은 서로 상관관계가 있는 다양한 평가인자들을 조합하여 각 인자들에 대한 정보를 가장 많이 포함하도록 하는 방법이며(Kim et al., 2019), 가장 많은 정보를 포함한 인자 및 주성분에 가중치를 높게 부여한다. 특히, 데이터의 경향을 효율적으로 인식하여 고차원의 정보를 저차원으로 줄

**Table 2.** Procedure of entropy, principal component analysis (PCA) and Gaussian mixture model (GMM) methods for determining weights

Step	Entropy	PCA	GMM
1	Creating an alternative attribute matrix	Creating a correlation matrix	Fitting each indicator into a Gaussian distribution
2	Estimating entropy for attribute information	Calculating the principal component (PC) loadings	Applying the GMM for all indicators
3	Calculating diversity degrees	Estimating the eigenvalues and eigenvectors	Performing the EM algorithm on the probability distribution
4	Determining weights for indicators	Calculating the variance explanation	Estimating the model parameters (weights) for indicators
5		Determining PC scores (weights) for indicators	

이면서 정보 손실을 최소화한다(Liu and Schisterman, 2004; Yu *et al.*, 2021). GMM 방법은 가우스 확률분포로 이루어진 각 인자들을 가우스혼합모델에 적용한 다음 해당 모델의 매개변수를 기댓값 최대화 알고리즘(Expectation-Maximization Algorithm)을 통해 추정하는 방법이다. 데이터들의 가중합으로 GMM을 구성하므로 GMM의 매개변수 추정을 통해 가중치를 부여한다(Kim *et al.*, 2021). 즉, GMM 방법은 PCA 방법과 마찬가지로 여러 개의 평가인자가 하나의 지수로 통합되는 과정에서 각 평가인자의 매개변수를 산정하며, 이 매개변수가 가중치로 적용된다.

엔트로피, PCA 및 GMM을 통해 가중치를 산정하는 과정은 Table 2와 같다. 본 연구에서는 각 3가지 방법을 통해 산정된 가중치를 산술평균하여 최종적으로 통합가중치를 산정하였다. 최종적으로 산정된 가중치는 충청도 지역의 특성을 적절히 반영한 가중치로써 충청도 내 모든 지자체에 동일하게 적용되었다.

### 3.3 베이지안 네트워크를 적용한 가뭄 대응능력 지수 산정

본 연구에서 대응능력은 가뭄 발생 시 영향을 완화시킬 수 있는 지역 수자원 시스템의 용수공급 능력으로 정의되었다. 따라서, 대응능력은 지역의 용수공급 및 보유수량과 관련된 수문학적 인자를 통해 정량화되었으며, 이를 통합하는 과정에서 베이지안 네트워크가 사용되었다. 가뭄 대응능력에 대한 평가인자는 크게 용수공급능력, 가용수자원량 및 재이용률로 구성하였다. 용수공급능력이란 지역의 용수 이용량 대비 용수공급가능량으로 정의되며, Eq. (3)과 같이 수원의 보유수량을 용수 이용량으로 나누어 용수공급가능비를 계산하고 취수 비율 및 상수도 보급률을 고려하여 산정하였다. 취수 비율과 상수도 보급률이 포함된 이유는 해당지역이 취수원 또는 상수도에 의존하는 정도를 고려하기 위해서이다.

$$WSC = \left\{ \left( \frac{WRR}{Water\ Usage} \times \int_{district} \frac{Intake}{Intake} \right) \times WSR \right. \\ \left. + \left( \frac{Groundwater}{Water\ Usage_{gw}} \times \int_{district} \frac{Intake_{gw}}{Intake_{gw}} \right) \right\} \\ \times \frac{\int_{region} Intake}{\int_{district} Intake} \quad (3)$$

여기서, *WSC*는 용수공급능력, *WRR*은 하천유량, 댐 및 저수지 저수량 등의 보유수량, *WSR*은 상수도보급률, *Water Usage*는 용수이용량, *Intake*는 보유수량 종류별 취수량이다. 이와 마찬가지로 *Groundwater*는 지하수량, *Water Usage<sub>gw</sub>*는 지하수이용량, *Intake<sub>gw</sub>*는 지하수 취수량이다.  $\int_{district} Intake$ 는 한 지역의 총 취수량,  $\int_{region} Intake$ 는 권역의 총 취수량이다.

가용수자원량이란 지역별 수자원 여건을 판단할 수 있는 척도이며, 강수량 및 지하수개발가능량을 인구로 나눈 1인당 강수량 및 1인당 지하수개발가능량을 고려하여 산정하였다. 재이용률은 방류율, 하수재이용률 및 우수재이용률을 반영하여 산정하였다.

각 평가인자들은 베이지안 네트워크를 통해 가뭄 대응능력 지수(DCI)로 통합된다. 베이지안 네트워크는 다양한 변수를 표현하는 노드와 변수들 사이의 의존관계를 표현하는 호로 구성되며, 노드들 사이의 인과관계는 확률정보로 표현된다. 베이지안 네트워크는 변수들의 관계성을 바탕으로 수렴형, 분산형, 선형으로 구분되며, 본 연구에서는 여러 개의 원인노드가 하나의 결과노드로 수렴하는 수렴형 네트워크와 하나의 결과노드가 다시 원인이 되어 다른 결과를 생산하는 선형 네트워크를 결합하였다. 베이지안 네트워크의 기본 이론인 베이즈 정리는 확률변수 *X*와 *Y*가 있을 때, 사전확률 *P(Y)*와 사후

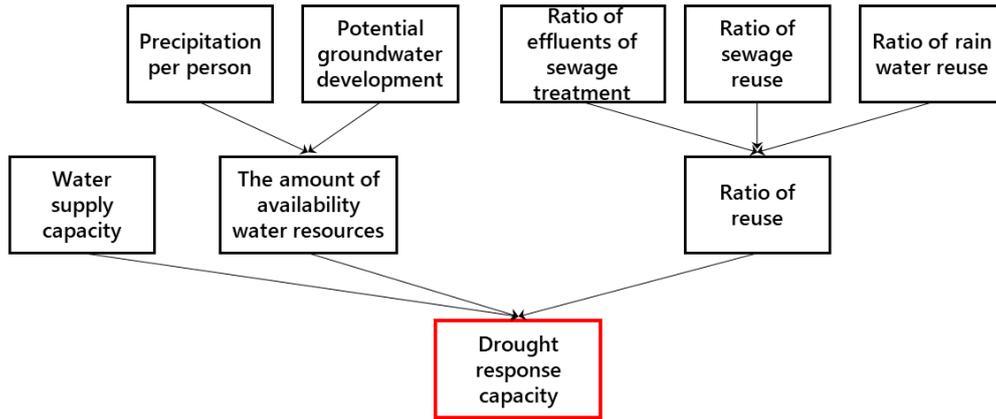


Fig. 3. Bayesian network for drought response capacity index

확률  $P(Y|X)$  사이의 관계를 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P(Y|X) = \frac{P(X|Y)P(Y)}{P(X)} \propto P(X|Y)P(Y) \quad (4)$$

여기서,  $P(X)$ 는 정규화 상수로써, 베이즈 정리에 의해 사후확률은 사전확률과 우도함수  $P(X|Y)$ 의 곱에 비례한다. 사후확률은 추론 알고리즘으로 추정하며, Likelihood Weighting, Rejection Sampling 및 Gibbs Sampling 중 적용 방법이 간단하고 노드의 형태가 연속형 확률분포에서도 사후확률분포 추정이 가능한 Likelihood Weighting 방법을 적용하였다. 즉, 수렴형 네트워크가 종속변수  $Y$ 와 독립변수  $X$ 로 구성되어 있다고 가정하면, 증거변수인  $X$ 를 고정된 채로, 비증거변수의 샘플링을 수행한다(Russell and Norvig, 2009). 여기서  $X$ 는 일반적으로 우리가 알고 있는 경험적인 값이나 관측값을 활용하여 확률분포형  $P(X)$ 로 산정된다. 따라서, 수집된 지역의 용수공급 관련 인자들을 Fig. 3와 같이 베이지안 네트워크에 적용하여 가뭄 대응능력 지수를 산정하였다.

### 3.4 가뭄 위험도 지수 산정

본 연구에서는 가뭄 위험도를 특정 지역에서 가뭄에 의해 발생할 수 있는 용수 수요·공급과 관련된 잠재적인 피해 규모로 정의하였다. 가뭄 위험도(DRI)는 가뭄 노출성(DHI), 취약성(DVI) 및 대응능력(DCI)으로 구성되었으며, 가뭄 위험도 지수는 각 지수들의 세제곱근의 곱으로 산정하였다. 다만, 본 연구에서의 가뭄 대응능력 지수는 가뭄 노출성 및 취약성과 다르게 증가할수록 가뭄 위험도를 감소시키므로, Eq. (5)와 같이 수정하였다.

$$DRI = DHI^{1/3} \times DVI^{1/3} \times (1 - DCI)^{1/3} \quad (5)$$

다른 요소가 일정하게 유지될 경우 가뭄 노출성이 증가함에 따라 가뭄 위험도는 증가한다. 다시 말하면, 가뭄 발생확률이 증가하더라도 지역의 취약성을 줄이거나 지역의 대응능력을 높임으로써 가뭄 위험을 완화할 수 있으며(Ahmadalipour, 2017), 지역 시스템이 가뭄에 취약하더라도 실제 가뭄이 발생하지 않는다면 가뭄 위험은 없다. 즉, 가뭄 위험도를 구성하는 3가지의 요소 중에서 하나의 값이 0이면 가뭄 위험도는 0이 되기 때문에 곱셈의 형태로 산정된다. 또한, 가뭄 노출성, 취약성, 대응능력 및 위험도 모두 0~1사이의 값을 가지며, 가뭄 대응능력을 제외하고는 0에 가까울수록 안전함을, 1에 가까울수록 위험함을 의미한다. 이와 반대로 가뭄 대응능력은 1에 가까울수록 안전함을, 0에 가까울수록 위험함을 의미한다.

## 4. 연구결과

### 4.1 가뭄 노출성 평가

가뭄 노출성 지수를 계산하기 위하여, 지점별 일유량에서 기준갈수량을 제외하여 용수공급과부족량을 계산하였다. 용수공급과부족량을 통해 용수부족량이 발생한 때를 시작으로 정상공급상태로 돌아오기까지의 일련의 상태를 하나의 가뭄 사상으로 정의하였다. 가뭄사상이 정의되면 지속기간 및 용수부족량을 산정하고, 이를 통해 이수안전도 지표인 신뢰도, 취약도 및 회복도를 도출할 수 있다. Table 3은 충청도의 용수공급 실패 사상 개수, 평균 지속기간 및 평균 용수부족량과 함께 신뢰도, 회복도 및 취약도의 통계치를 정리한 것이다.

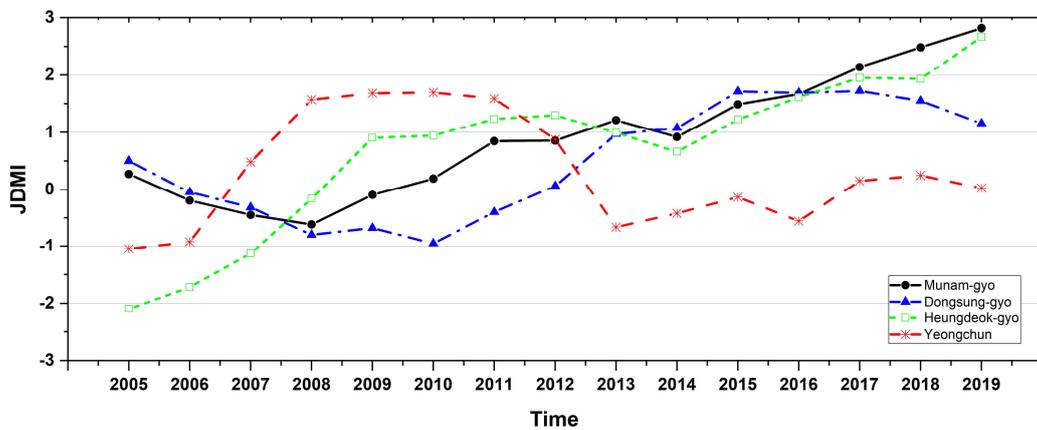
충청도에서는 실패 사상이 평균적으로 약 64건 발생하였으며, 평균 지속기간은 23일, 평균 용수부족량은 276 cms로

나타났다. 가뭄은 동성교에서 평균 발생건수의 약 2.4배인 157건이 발생하였다. 평균 가뭄 지속기간은 용춘교가 89.07일로 제일 길었으며, 평균 용수부족량은 금남교가 10,956.66 cms로 제일 심각하였다. 용수공급 실패 사상과 관련하여 충청도에서 연구기간동안 정상적으로 용수공급이 가능할 확률은 평균 0.72이며, 용수공급 실패 사상이 발생하였을 때 회복할 수 있는 능력은 평균 0.05이다.

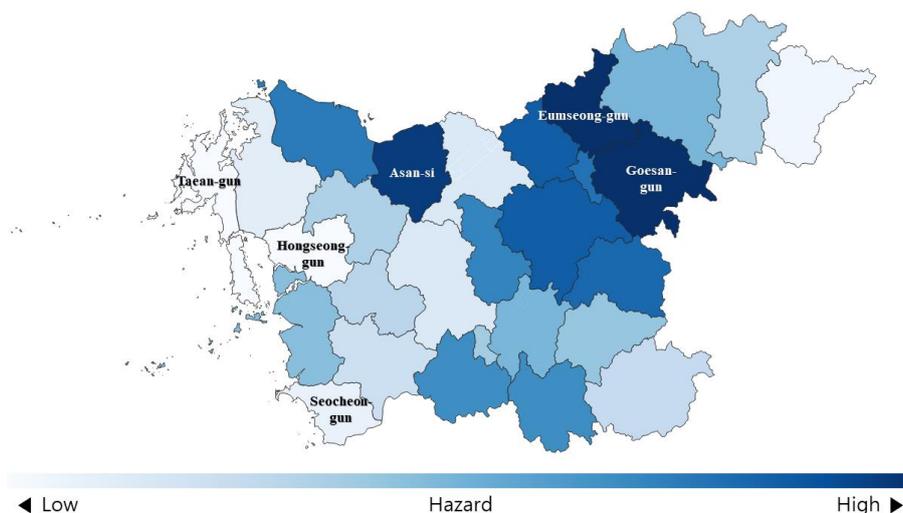
이수안전도 지표인 신뢰도와 취약도를 Copula 및 Kendall 분포함수에 적용하여 결합가뭄관리지수를 산정하였다. Fig. 4는 대표 4개 지점에 대한 JDMI 시계열 그래프이다. JDMI는 0 이상일 경우 용수공급 측면에서 가뭄상황을 의미한다. 문산교는 2010년부터, 동성교는 2012년부터, 흥덕교는 2009년부터 점차 가뭄이 심각해졌다. 이와 반대로 영춘은 2007-2012년 가뭄을 겪었으나, 2013년 이후 해소되었다.

**Table 3.** Drought characteristics and water supply safety factors

Statistics	Number of drought event	Average of drought duration	Average of water deficiency	Reliability	Resilience	Vulnerability
Maximum	157	89.07	10,956.66	0.99	0.13	5.68
Minimum	3	8.00	0.05	0.22	0.01	0.08
Mean	64.31	22.66	275.73	0.72	0.05	0.52
Standard deviation	37.88	11.11	1,326.83	0.18	0.02	0.85



**Fig. 4.** Time series of JDMI for four observed points



**Fig. 5.** Drought hazard map for Chungcheong-do

가뭄 노출성 지수를 산정하기 위하여 JDMI를 등급화 기법에 적용하였다. 지점별 가뭄 노출성 지수는 GIS를 통한 공간 분포 기법을 적용하여 지역별 가뭄 노출성 지수로 변환하였다. 그 결과는 Fig. 5와 같다. 괴산군, 음성군, 아산시가 차례로 0.81, 0.79, 0.78이며, DHI가 높게 나타나 용수공급 실패 위험이 큰 것으로 판단된다. 또한, 태안군, 홍성군, 단양군이 각각 0.20, 0.21, 0.24이며, DHI가 낮게 나타나 용수공급 실패 위험이 적은 것으로 판단된다. Kim *et al.* (2021)에서는 서천군, 괴산군, 금산군이 DHI가 높게 나타났으며, 전체적으로 본 연구에서의 결과와 매우 상이하게 나타났다. 그 이유는 강수량만을 고려한 기상학적 가뭄과 실제 용수 부족량에 대한 수문학적 가뭄은 다르기 때문으로 판단된다. Kim *et al.* (2021)에서 DHI가 높은 서천군, 괴산군, 금산군은 비가 적게 내려 가뭄이 발생할 확률이 큰 지역이며, 본 연구에서 DHI가 높은 괴산군, 음성군, 아산시는 해당 지역의 유량이 기준갈수량보다 적어지는 용수부족량이 발생할 확률이 큰 지역을 의미한다.

**4.2 가뭄 취약성 평가**

가뭄 취약성 지수를 산정하기 위하여 가뭄 취약성 평가인자들의 영향정도를 나타내는 가중치를 산정하였다. 취약성에서 가중치는 매우 중요한 요소로 각 인자가 지역에 미치는 영향을 기준으로 결정되어야 한다(Kim *et al.*, 2021; Yu *et al.*, 2021). 따라서, 본 연구에서는 Table 1에서 제시한 10개의 가뭄 취약성 평가인자에 객관적인 가중치 산정방법인 엔트로피, PCA 및 GMM을 적용하였다. Table 2에 설명된 방법을 통해 산정된 3가지의 가중치 및 통합가중치는 Table 4와 같다.

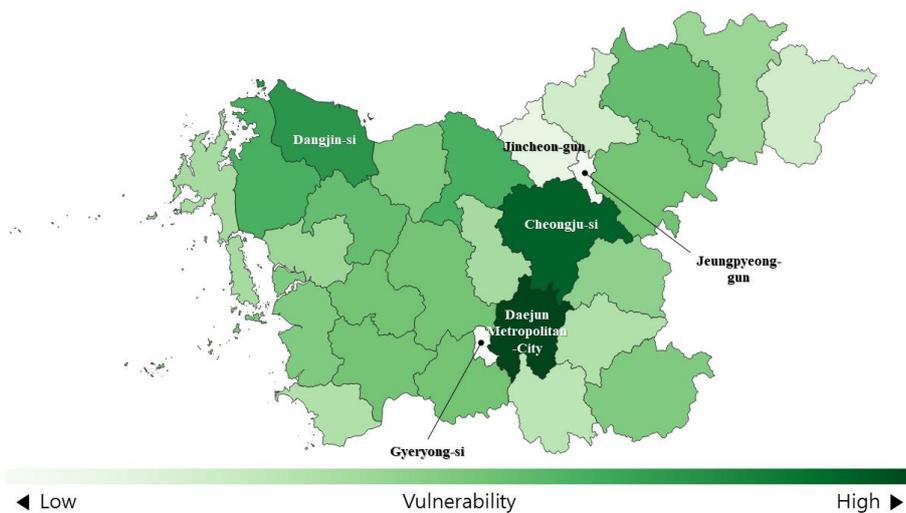
먼저, 엔트로피 방법은 각 속성별 엔트로피에 대한 다양성

의 정도를 고려하여 평가인자들의 가중치를 산정하였다. 그 결과 농가인구 및 농경지 면적의 가중치가 매우 높게 산정되었다. 또 다른 가중치 산정방법인 PCA를 적용한 결과 3가지 주성분 구성 요소가 각각 45%, 20%, 13%로 전체 변동의 75% 이상을 설명하였다. PC1의 포함되는 지표는 인구수, 기초생활수급자수, 독거노인인구 및 산업단지면적으로, 인구와 관련된 사회적 요소가 주를 이루며, PC2는 농가인구, 농경지면적과 지자채면적으로 농업관련 요소를 의미한다. PC3는 누수율, 단위급수량, 보급률로 용수관련 인자가 선정되었다. PC 적재량을 살펴보면 인구수와 산업단지면적의 가중치가 크게 산정되었다. 마지막으로 GMM을 적용한 가중치는 인구수와 상수도보급률의 가중치가 크게 산정되었다.

각 방법들은 중요도를 부여하는 방식에서 차이가 있기 때

**Table 4.** Weights of indicators using entropy, PCA and GMM methods

Indicators		Entropy	PCA	GMM	Final weights
V1	Population	0.16	0.02	0.15	0.11
V2	Farm population	0.07	0.18	0.11	0.12
V3	Recipients of basic living	0.14	0.03	0.10	0.09
V4	Solitary senior citizen	0.15	0.07	0.14	0.12
V5	Total area of district	0.11	0.12	0.02	0.08
V6	Agricultural area	0.09	0.16	0.14	0.13
V7	Area of industrial complex	0.17	0.07	0.01	0.08
V8	Ratio of water leakage	0.04	0.14	0.05	0.08
V9	Daily water supply per capita	0.08	0.10	0.13	0.10
V10	Water supply ratio	0.03	0.12	0.15	0.10



**Fig. 6.** Drought vulnerability map for Chungcheong-do

문에 가중치가 약간 상이하게 나타났다. 이러한 요소를 종합적으로 고려할 수 있도록, Table 4와 같이 각 가중치를 평균한 통합가중치를 산정하였다. 최종적으로 농경지면적, 농가인구 및 독거노인인구수의 가중치가 크게 나타났으며, 대상지역이 농업지역임을 감안할 때 매우 유의미한 결과이다.

최종 가중치를 통해 가뭄 취약성 지수를 산정한 결과 Fig. 6과 같이 대전광역시, 청주시, 당진시는 각각 0.61, 0.56, 0.46으로 나타났으며, 해당 지역들은 농업요소가 많아 가뭄에 취약한 것으로 산정되었다. 자세히 살펴보면, 대전광역시는 산업단지면적과 독거노인수가 많으며, 청주시는 농가인구와 독거노인수가, 당진시는 대규모 농업 및 공업단지로 인하여 농경지면적과 산업단지면적이 크기 때문에 가뭄 취약성이 높게 산정되었다. 이와 반대로 계룡시, 증평군, 진천군은 땅이 좁고 인구가 적어서 취약성이 각각 0.10, 0.11, 0.16으로 낮게 산정되었다. Kim *et al.* (2021)에서는 당진시, 서산시, 아산시가 취약하게 나타났다. 4가지의 결과가 세부적으로는 다르지만 대체적으로 비슷하게 산정되었다. 기존 연구와 달리 용수이용량에 대한 취약정보는 본 연구의 취약성에서 다루지 않기 때문에 판단되며, 인자에 따라 결과가 조금 달라지지만 기본적으로 지역이 가지는 일반적인 취약 특성은 비슷하기 때문이다.

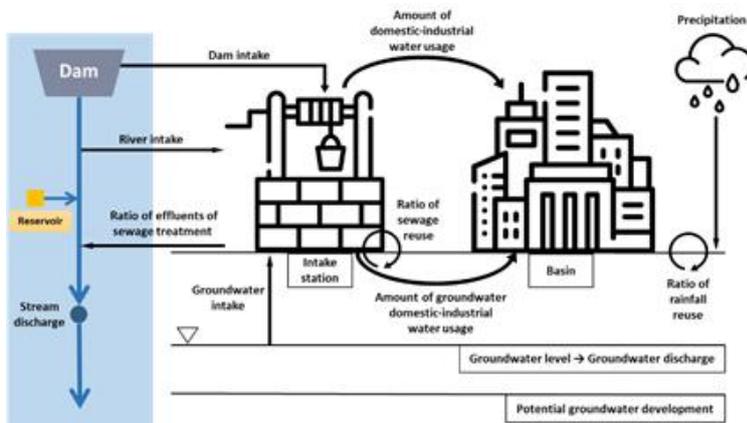
### 4.3 가뭄 대응능력 평가

용수와 관련된 가뭄 위험도 평가에서 지역별 용수공급 네트워크를 파악하고 대응능력을 판단하는 것은 매우 중요하다. 가뭄 대응능력 지수를 산정하기 위하여 지역별 용수공급 네트워크를 작성하고 평가인자를 재산정하였다. 지역별 용수공급 네트워크는 상수도 공급 계통 모식도와 하천, 댐, 저수지 등 유역현황, 기본적인 물수지 분석 등을 반영하여 용수공

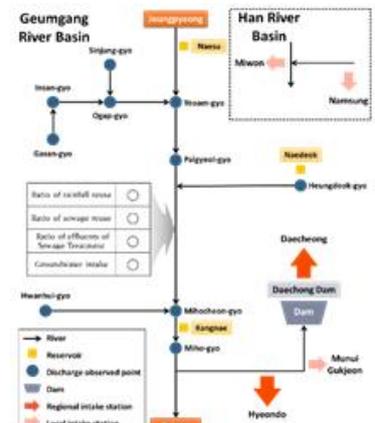
급 체계를 구축하고 지역별 특성을 반영하여 Fig. 7(a)와 같이 작성할 수 있다. Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)를 기반으로 작성된 청주시의 용수공급 네트워크이다. 지역별 용수공급 네트워크를 파악하여 취수원, 취수비율 및 상수도 보급률 등을 Eq. (3)에 적용하여 용수공급 능력을 산정하였다. Fig. 3과 같이 용수공급 능력과 함께 가용수자원량, 재이용률을 베이지안 네트워크에 적용하여 산정하였다.

베이지안 네트워크를 적용하여 평가인자들을 통합하는 과정에서 표준화가 필요하다. 베이지안 네트워크는 정규분포를 기반으로 하기 때문에, 서로 다른 단위를 가진 평가인자의 범위를 통일하기 위해 표준 정규화 방법을 적용하였다. 정확도 높은 정규화에 대한 매개변수를 산정하기 위하여 신뢰구간 99%를 초과하는 이상치를 제외한 후 정규분포의 매개변수를 산출하였다. 산정된 확률 분포를 가뭄 대응능력 지수 산정을 위한 베이지안 네트워크 모델에 적용하여 가뭄 대응능력 지수를 계산하였으며, 가뭄 위험도 계산을 위하여 가뭄 노출성 및 취약성 지수와 다르게 0에 가까울수록 대응능력이 좋지 않음을 의미하도록 표준화하였다.

Fig. 3을 통해 가뭄 대응능력 지수를 산정하는 과정을 자세히 살펴보면, 1인당 강수량 및 1인당 지하수개발가능량은 가용수자원량의 원인노드 또는 우도함수가 되며, 방류율, 하수 재이용률 및 우수재이용률은 재이용률의 원인노드, 용수공급능력, 가용수자원량 및 재이용률은 가뭄 대응능력의 원인노드가 된다. 반대로, 가뭄 대응능력은 용수공급능력, 가용수자원량 및 재이용률의 결과노드이자 사후확률이 된다. 이러한 가뭄 대응능력 평가인자들을 정규분포에 적합한 후 베이지안 네트워크에 적용하게 된다. 여기서, 대전광역시의 경우 사전확률들인 용수공급능력, 1인당 강수량, 1인당 지하수개발



(a) Diagram of water supply system



(b) Water supply network of Cheongju-si

Fig. 7. Water supply network system

가능량, 방류율, 하수재이용률 및 우수재이용률은 각각 0.83, -1.17, -1.19, 0.15, -0.92 및 0.00이며, 사후확률은 Eq. (4)와 우도가중방법을 적용하여 추정되게 된다. 여기서, 증거변수는 각 인자들의 제일 최신 자료인 2019년 자료를 적용하였다. 그 결과 사후확률인 가뭄 대응능력은 2.10으로 산정되었으며, 표준화한 결과는 0.58이다. 이러한 과정은 매트랩(Matlab) 프로그램을 활용하여 직접 개발된 모델을 통해 수행되었다.

이와 같은 방법으로 충청도 지역에 대한 가뭄 대응능력 지수를 산정한 결과 Fig. 8과 같이 세종특별자치시, 옥천군, 충주시가 0.00, 0.08, 0.13으로 대응능력이 좋지 않으며, 가뭄이 발생하였을 때 회복하기가 어려울 것으로 판단된다. 세종특별자치시의 경우 취수를 댐에서만 받기 때문에 댐의 보유수량에

의존적이다. 그로 인해 용수공급능력 및 대응능력 지수가 작게 산정되었다. 반면에 용수공급능력이 좋거나 재이용률이 높은 서천군, 증평군, 아산시는 1.00, 0.67, 0.66으로 대응능력이 높게 나타났다.

#### 4.4 가뭄 위험도 평가

본 연구에서는 가뭄 노출성, 취약성 및 대응능력을 Eq. (5)에 대입하여 가뭄 위험도 지수를 산정하였다. 가뭄에 대한 위험은 3가지 모두에 영향을 받기 때문에 이들 요소를 모두 곱하여 가뭄 위험도를 평가하였다. 그 결과는 Fig. 9와 같이 청주시, 충주시, 세종시에서 1.00, 0.92, 0.90으로 위험도가 높게 나타났으며, 서천군, 증평군, 계룡시에서 0.00, 0.45, 0.50으로 위

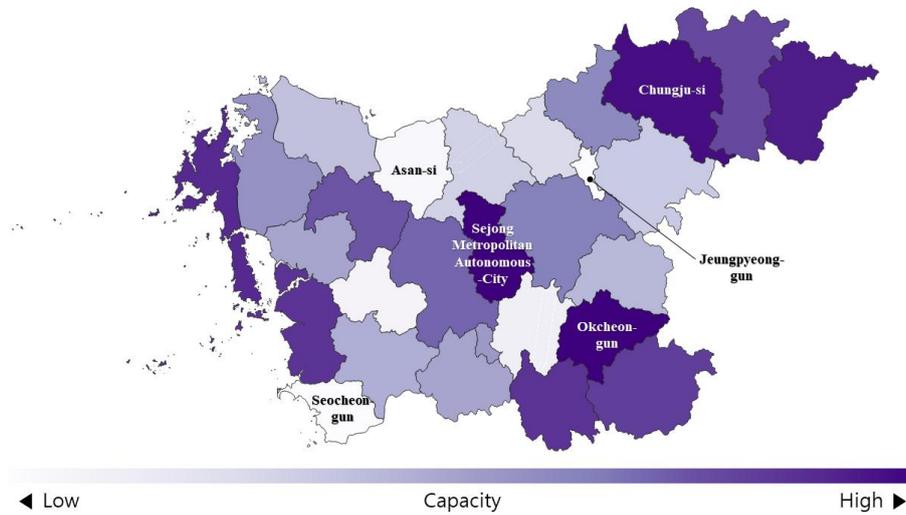


Fig. 8. Drought response capacity map for Chungcheong-do

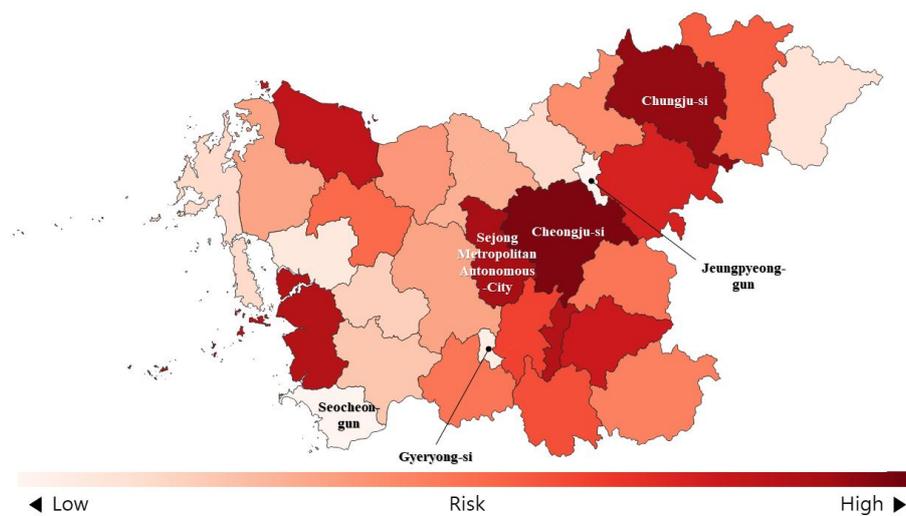


Fig. 9. Drought risk map for Chungcheong-do

험도가 낮게 나타났다. 실제로 충주시와 세종시는 용수공급 피해가 많이 발생하였으며, 이로 인한 피해일수 및 인원 수도 상당한 것으로 확인되었다. 청주시는 발생건수에 비해 피해 인원이 크게 나타났다. 또한, 위험도가 낮게 나타난 세 지역은 용수공급피해를 전혀 받지 않은 것으로 확인되었다. Kim *et al.* (2021)에서는 금산군 및 서천군과 함께 아산시 또는 괴산군에서 위험도가 높게 나타났으며, 본 연구결과와는 매우 다르게 산정되었다. 기존 연구는 오직 DHI와 DVI의 곱으로 산정하였으며, DVI는 지역마다 비슷한 값을 가지고 있어 기상학적 가뭄의 발생확률을 의미하는 DHI에 영향을 많이 받아 DRI가 계산되었다. 하지만, 본 연구에서는 DHI 및 DVI와 함께 지역의 용수공급능력을 의미하는 DCI도 고려하였으며, 지역마다 취약한 요소가 달라서 위험도가 아주 다르게 산정되었다. 이러한 결과로 기상학적 가뭄에 대한 가뭄 위험도와 용수에 대한 가뭄 위험도는 매우 다른 것을 알 수 있으며, 인간사회에 큰 영향을 미치는 용수에 대한 가뭄 위험도 평가가 수행되어야 하는 이유를 확인하였다.

## 5. 결 론

가뭄은 다양한 분야에서 발생하고 있으나, 용수와 관련된 가뭄은 인간이 직접적으로 느낄 수 있는 현상이며, 가뭄과 용수공급체계는 필연적이다. 따라서, 본 연구에서는 인간사회와 밀접한 관계를 갖고 있는 지역의 용수공급체계를 고려한 가뭄 위험도 평가를 통해 가뭄 위험도를 정량화하였다. 이 때 지역의 가뭄과 관련된 다양한 인자를 고려하여 노출성, 취약성 및 대응능력이 모두 고려된 종합적인 평가를 수행하였으며, 확률통계기법을 적용하여 객관적이고 신뢰성 있는 가뭄 위험도 평가가 가능하도록 하였다.

- 1) 지역별 실제 용수와 관련된 수문학적 가뭄 발생확률을 평가하기 위하여 JDMI를 적용한 가뭄 노출성 평가를 수행한 결과 괴산군 및 음성군이 심하게 나타났다.
- 2) 가뭄 발생시 피해를 확대시킬 수 있는 지역의 사회경제적 요소를 평가하기 위하여 엔트로피, PCA 및 GMM을 활용하여 가뭄 취약성을 평가하였으며, 그 결과 대전광역시, 청주시 및 당진시가 취약하게 나타났다. 본 연구에서는 인구와 관련된 요소가 많이 활용되어 대전광역시 및 청주시가 취약한 것으로 판단되며, 당진시는 농업요소가 영향을 많이 미치는 것으로 확인된다.
- 3) 지역별 물공급체계 및 네트워크를 고려하여 지역의 용수

및 수자원과 관련된 가뭄 대응능력을 평가한 결과, 세종시, 옥천군, 충주시가 낮게 산정되었다. 이 지역들은 가뭄 예경보가 적게 발생하였으나, 한번 발생 시 발생일수가 길게 나타나는 등 가뭄에 대한 대응능력이 떨어지는 것을 확인하였다.

- 4) 가뭄 노출성, 취약성 및 대응능력을 통합하여 가뭄 위험도를 평가한 결과, 청주시, 충주시, 세종시가 위험한 것으로 나타났다. 종합적으로 발생건수, 발생인원 및 발생일수도 두 높아 과거에 피해가 컸던 지역이므로 본 연구 결과의 정확도 높다는 것을 시사한다.
- 5) 기존 연구와 비교한 결과, 취약성은 용수와 관련 없이 사회경제적 취약정도를 의미하기 때문에 비슷하였으나, 노출성은 유량을 활용하여 용수에 대한 실패 사상을 고려하였기 때문에 표준강수지수(SPI)로 산정한 노출성과 많이 다르게 산정되었다. 특히, 위험도의 경우 본 연구에서는 용수에 대한 대응능력까지 고려하였기 때문에 매우 다른 결과가 산정되었다.

본 연구를 통해 인간생활과 밀접한 관계를 갖고 있는 용수에 대한 전반적인 위험도를 파악하였다. 본 연구에서 개발된 가뭄 위험도 평가 결과를 활용한다면, 용수 가뭄에 대한 위험 및 원인을 미리 파악할 수 있다. 또한, 이러한 결과를 통해 실제 용수 부족이 발생하기 전 사전재난관리를 수행할 수 있으며, 평시에 위험도 정보에 기초하여 장기적인 관점에서 가뭄 저감 이 가능하다. 다만, 추후 연구에서 가뭄 취약성 산정에서의 3가지 방법을 통합하는 과정 또는 가뭄 위험도 산정에서의 3가지 요소를 통합하는 과정에서도 각 방법 또는 요소들의 영향력을 고려한다면 더욱 신뢰성 높은 결과를 도출할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No. 020R1A2C1012919).

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Ahmadalipour, A. (2017). *Multi-dimensional drought risk assessment based on socio-economic vulnerabilities and hydro-climatological factors*. Ph. D. dissertation, Portland State University, Portland, OR, U.S.
- Ahn, S.R., Jeong, J.H., and Kim, S.J. (2016). "Assessing drought threats to agricultural water supplies under climate change by combining the SWAT and MODSIM models for the Geum River basin, South Korea." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 61, No. 15, pp. 2740-2753.
- Berhe, F.T., Melesse, A.M., Hailu, D., and Sileshi, Y. (2013). "MODSIM-based water allocation modeling of Awash River Basin, Ethiopia." *Catena*, Vol. 109, pp. 118-128.
- Blauhut, V., Stahl, K., Stagge, J.H., Tallaksen, L.M., De Stefano, L., and Vogt, J. (2016). "Estimating drought risk across Europe from reported drought impacts, drought indices, and vulnerability factors." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 20, No. 7, pp. 2779-2800.
- Choi, S.H. (2018). *Drought risk index development for drought risk assessment*. Master's Thesis, Seoul National University.
- Fan, G., Zhang, Y., He, Y., and Wang, K. (2017). "Risk assessment of drought in the Yangtze River Delta based on natural disaster risk theory." *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Vol. 2017, 5682180.
- Kang, M.G., and Lee, G.M. (2012). "Multiple regression equations for estimating water supply capacities of dams considering influencing factors." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, pp. 1131-1141. (in Korean)
- Kim, J.E., Park, J.Y., Lee, J.H., and Kim, T.W. (2019). "Socio-economic vulnerability assessment of drought using principal component analysis and entropy method." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, pp. 441-449. (in Korean)
- Kim, J.E., Yu, J.S., Ryu, J.H., and Kim, T.W. (2021). "Assessment of regional drought vulnerability and risk using principal component analysis and a Gaussian mixture model." *Natural Hazards*, Vol. 109, pp. 707-724.
- Lee, J.H., Jun, H.D., Park, M.J., and Jung, J.H. (2011). "Flash flood risk assessment using PROMETHEE and Entropy method." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 3, pp. 151-156. (in Korean)
- Liu, A., and Schisterman, E.F. (2004). "Principal component analysis." *Encyclopedia of biopharmaceutical statistics*, Edited by Chow S.C., CPC Press, NY, U.S.
- Park, J.Y., Yoo, J.Y., Lee, M.W., and Kim, T.W. (2012). "Assessment of drought risk in Korea: Focused on data-based drought risk map." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 4, pp. 203-211. (in Korean)
- Qin, Q.X., and Zhang, Y.B. (2018). "Evaluation and improvement of water supply capacity in the region." *Journal of Management and Sustainability*, Vol. 8, No. 4, pp. 113-124.
- Russell, S., and Norvig, P. (2009). *Artificial intelligence: A modern approach*. Prentice Hall, NJ, U.S.
- Sam, A.S., Kumar, R., Kächele, H., and Müller, K. (2017). "Quantifying household vulnerability triggered by drought: Evidence from rural India." *Climate and Development*, Vol. 9, No. 7, pp. 618-633.
- Vargas, J., and Paneque, P. (2017). "Methodology for the analysis of causes of drought vulnerability on the river basin scale." *Natural Hazards*, Vol. 89, No. 2, pp. 609-621.
- Yu, J.S., Choi, S.J., Kwon, H.H., and Kim, T.W. (2018). "Future water supply risk analysis using a joint drought management index in Nakdong river basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, pp. 1117-1126. (in Korean)
- Yu, J.S., Kim, J.E., Lee, J.H., and Kim, T.W. (2021). "Development of a PCA-based vulnerability and copula-based hazard analysis for assessing regional drought risk." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 25, pp. 1901-1908. (in Korean)