

구조방정식모형과 베이지안 네트워크를 활용한 가뭄 영향인자의 민감도 분석

김지은* · 김민지** · 유지영*** · 정성원**** · 김태웅*****

Kim, Ji Eun*, Kim, Minji**, Yoo, Jiyoung***, Jung, Sungwon****, Kim, Tae-Woong*****

Sensitivity Analysis of Drought Impact Factors Using a Structural Equation Model and Bayesian Networks

ABSTRACT

Drought occurs extensively over a long period and causes great socio-economic damage. Since drought risk consists of social, environmental, physical, and economic factors along with meteorological and hydrological factors, it is important to quantitatively identify their impacts on drought risk. This study investigated the relationship among drought hazard, vulnerability, response capacity, and risk in Chungcheongbuk-do using a structural equation model and evaluated their impacts on drought risk using Bayesian networks. We also performed sensitivity analysis to investigate how the factors change drought risk. Overall results showed that Chungju-si had the highest risk of drought. The risk was calculated as the largest even when the hazard and response capacity were changed. However, when the vulnerability was changed, Eumseong-gun had the greatest risk. The sensitivity analysis showed that Jeungpyeong-gun had the highest sensitivity, and Jecheon-si, Eumseong-gun, and Okcheon-gun had highest individual sensitivities with hazard, vulnerability, and response capacity, respectively. This study concluded that it is possible to identify impact factors on drought risk using regional characteristics, and to prepare appropriate drought countermeasures considering regional drought risk.

Key words : Structural equation model, Bayesian network, Drought risk, Drought impact, Sensitivity analysis

초 록

가뭄은 장기간에 걸쳐 광범위하게 발생하며, 사회·경제적으로도 큰 피해를 발생시킨다. 가뭄 위험도는 기상학적 및 수문학적 요소와 더불어 사회적, 환경적, 물리적 및 경제적 요소로 이루어져 있기 때문에, 가뭄 위험도에 대한 영향을 정량적으로 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 충청북도를 대상으로 구조방정식모형을 이용하여 가뭄 노출성, 취약성, 대응능력 및 위험도 사이의 영향 관계를 파악하고, 베이지안 네트워크를 적용하여 가뭄 위험도에 대한 영향을 평가하였다. 또한, 가뭄 위험도 평가 인자별 민감도 분석을 통해 가뭄 위험도의 변화 정도를 분석하였다. 그 결과 과거 가뭄 위험도가 가장 큰 지역은 충주시로, 노출성 및 대응능력을 변화시켰을 때에도 가장 크게 산정되었다. 다만, 취약성을 변화시켰을 때에는 음성군이 위험도가 가장 큰 것으로 나타났다. 위험도에 대한 영향인자들의 민감도 분석을 실시한 결과 중평군이 민감도가 가장 컸으며, 노출성, 취약성 및 대응능력에서 제천시, 음성군, 옥천군이 민감도가 크게 나타났다. 이러한 결과를 통해 가뭄 위험도 및 가뭄 위험도에 대한 영향인자를 확인하였으며, 영향인자별 지역의 특성을 고려한 가뭄 대책 마련이 가능하다.

검색어 : 구조방정식모형, 베이지안 네트워크, 가뭄 위험도, 가뭄 영향, 민감도 분석

* 정희원 · 한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 석박사과정 (Hanyang University · helloje2@hanyang.ac.kr)

** 정희원 · 한양대학교 대학원 스마트시티공학과 석박사과정 (Hanyang University · stylus97@hanyang.ac.kr)

*** 정희원 · 한양대학교(ERICA) 공학기술연구소 연구교수 (Hanyang University (ERICA) · jyyoo84@gmail.com)

**** 한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 연구위원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · swjung@kict.re.kr)

***** 종신회원 · 교신저자 · 한양대학교(ERICA) 건설환경공학과 교수 (Corresponding Author · Hanyang University (ERICA) · twkim72@hanyang.ac.kr)

Received November 22, 2021/ revised December 7, 2021/ accepted December 28, 2021

1. 서론

일반적으로 가뭄이란 강수량 부족에 따른 물부족 현상으로 정의되며, 자연 생태계와 물리적 및 사회적 요소로 구성된 복잡한 현상을 의미한다. 가뭄은 원인 및 피해 유형에 따라 기상학적, 농업적, 수문학적 및 사회경제적 가뭄으로 구분되며, 한가지 형태로 발생하기도 하지만 자연적 및 사회적 요소와 결합되어 복합적으로 발생하기도 한다. 또한, 가뭄은 장기간에 걸쳐 광범위하게 발생하는 특성으로 인해 자연재해뿐만 아니라 사회경제적으로도 큰 피해를 야기한다. 게다가 비슷한 기상학적 가뭄이 발생하더라도 지역적 특성 또는 가뭄에 대한 지역의 대처 능력에 따라 가뭄으로 인한 영향 및 피해정도가 달라진다. 실제로 2017년 남부지방에서는 가뭄이 지속됨에 따라 심각단계가 발령되었고, 밀양댐의 수위가 경제단계로 내려가면서 제한급수가 실시되었다. 밀양시는 미급수율이 높아 그 피해가 매우 심각하였다. 하지만, 부산 기장군의 경우 낙동강 및 관할 저수지에서 용수를 공급받고 있으며, 상수도 보급률 등 가뭄에 대한 지역의 대응능력이 좋아 피해가 거의 없었다.

가뭄이 이미 발생하였을 때에는 그 피해가 크게 발생한다. 따라서, 가뭄에 대한 위험 및 원인을 미리 파악하여 사회경제에 미치는 피해를 줄이는 위험관리 관점에서의 가뭄 대책이 필요하다. 가뭄 위험도를 평가하는 것은 가뭄 발생 예방 및 피해 저감을 위해서 매우 중요하다. UNCCD(2019)에서도 가뭄재해 위험 저감을 위하여 가뭄 취약성 및 위험도 평가의 중요성을 언급하였다.

가뭄 위험도에 대한 평가를 수행하기에 앞서 가뭄 위험도에 대한 개념을 정립할 필요가 있다. 가뭄 위험도와 관련 항목들은 연구목적에 따라 다양하게 정의되고 있지만, 본 연구에서는 가뭄 위험도를 다음과 같이 정의하였다. 1) 가뭄 위험도는 특정지역에서 가뭄에 의해 발생할 수 있는 잠재적인 피해 규모이며, 2) 가뭄 노출성은 기상학적 요소를 고려한 잠재적인 가뭄 발생 확률, 3) 가뭄 취약성은 가뭄 발생시 부정적인 영향을 받는 지역의 사회·경제적 민감한 정도, 4) 가뭄 대응능력은 가뭄 영향을 완화할 수 있는 지역사회의 용수공급능력이다.

가뭄 위험도에 대한 평가는 국내·외에서 많이 진행되고 있다. 대부분의 선행연구에서 가뭄 위험도에 대한 영향인자들은 연구자의 주관적 판단에 따라 선정되었다. 하지만, 최근에는 영향인자에 대한 객관성을 확보하고 평가인자들의 영향력을 파악하기 위해 주성분분석, 구조방정식모형 및 머신러닝 기법 등이 많이 활용된다. Jung et al.(2021)은 랜덤포레스트를 이용하여 낙동강 8개 보 지점별 남조류 발생 주요 영향인자에 대하여 분석하였으며, Kim et al.(2019)은 주성분분석을 이용하여 가뭄 취약성 지수를 산정하기 위해 1차 평가인자 중 상관성이 높은 최종 평가인자를 선정하였다. Kim et al.(2021)은 경기도의 산불에 대한 기상 및 수문인자의

영향정도를 파악하기 위하여 구조방정식 모형을 활용하였다.

가뭄 위험도는 다양한 인자들의 특성이 반영된 복합적인 성격을 가지고 있으며, 노출성, 취약성 및 대응능력과 같이 다양한 잠재변수들로 이루어져 있어 불확실성이 크다. 따라서, 여러 인자들을 통합하는데 주관적인 요인을 배제하고 불확실성을 줄이기 위하여 확률-통계적인 기법을 적용하고 있다. Mun et al.(2021)은 농업가뭄재해 취약성 평가를 위한 가중치 산정방법으로 계층화분석 및 엔트로피 방법을 적용하였다. Lee et al.(2020)은 기상 및 영농 투입재 비용 요인, 양과 단수 사이의 상호관계를 파악하고 특정 변수 관련 최적 자원 배분 및 조합에 대한 방안을 제시하기 위해 베이지안 네트워크 모형을 활용하였다. Mihunov and Lam(2020)은 농업, 사회경제적, 수자원 및 에너지 관련 인자들을 가뭄레질리언스 지수로 통합하기 위하여 베이지안 네트워크 모형을 활용하였다. 최근에는 다양한 확률-통계적 기법 중 많은 인자들 간의 복잡한 인과관계를 비교적 간단하게 계산할 수 있는 베이지안 네트워크 모형이 많이 사용된다.

또한, 이제는 단순히 가뭄 위험도를 평가하는 것뿐만 아니라 가뭄 영향인자에 따라 가뭄 위험도 변화 및 이로 인한 영향이 무엇인지 파악하는 것이 필요하다. 이때 많이 사용되는 기법이 민감도 분석으로, Ye et al.(2009)은 기후변화 시나리오에 따른 대상 지역의 유출 및 유사량 변화를 평가하기 위하여 기후인자의 변화에 따른 민감도 평가를 수행하였다. Yoo et al.(2014)은 정상강 우비율의 절단수준에 따른 SPI 시간 단위(30, 90 및 180일)의 영향을 파악하기 위해 민감도 분석을 실시하였으며, Sahana et al.(2021)은 관개지수, 수역비율 및 지하수 가용성이 가뭄 취약성에 미치는 중요성을 민감도 분석으로 확인하였다.

가뭄 위험도는 기상학적 요소뿐만 아니라 가뭄을 겪는 지역사회 의 취약성 및 대응능력에 따라 결정되기 때문에, 본 연구에서는 노출성, 취약성, 대응능력을 모두 고려하여 종합적인 가뭄 위험도 평가를 수행하였다. 이 때, 평가인자 선정 및 통합 과정에서 주관적 요소를 배제하고 가뭄 영향인자 및 위험도가 가지는 불확실성을 줄이기 위하여 구조방정식 모형 및 베이지안 네트워크 모형을 활용하였다. 또한, 가뭄 위험도에 대한 민감도 분석을 통해 평가인자 간 영향관계 및 위험도 변화를 확인하였다.

2. 연구 지역 및 자료

2.1 연구 지역

본 연구는 지역별 가뭄 위험도에 대한 영향인자를 파악하고 각 인자별 영향정도를 정량화하는 것을 목적으로 한다. 따라서, 가뭄 위험도 영향인자를 파악하기 위해 지역별 특성이 다양하고 최근 여러차례 가뭄으로 인한 피해가 심각했던 충청북도 11개

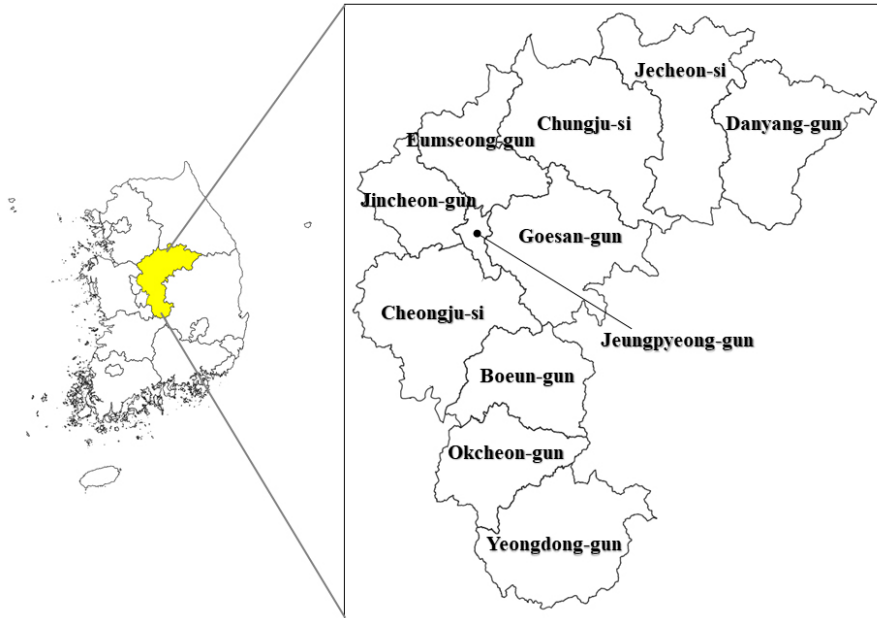


Fig. 1. Map of the Study Areas

사·군·구를 연구지역으로 선정하였다. 충청북도는 우리나라 중부지역에 위치하며, 각 사·군·구의 위치는 Fig. 1과 같다. 또한, 우리나라에서 바다에 접하지 않은 유일한 내륙으로 여름은 고온다습하고 겨울은 한랭건조한 온대몬순기후를 가진다. 충청북도는 금강유역과 한강유역 2개 유역에 걸쳐서 위치해 있으며, 2개의 다목적댐을 가진다. 2021년 기준 인구수는 1,597,501명이며, 총 면적은 7,407 km²이다.

2.2 연구 자료

구조방정식모형의 측정변수를 구축하기 위하여 가뭄 영향인자 및 위험도에 대한 평가인자를 도출할 필요가 있다. 본 연구에서는 국내·외 사례 및 문헌을 조사하여 가뭄 노출성, 취약성, 대응능력 및 위험도의 개념과 부합하는 평가인자들을 선정하였다. 가뭄 노출성에 대한 평가를 위해 기상청 일강수량 자료를 통해 가뭄의 발생확률을 산정하였으며, 가뭄 취약성의 평가를 위해서는 가뭄 피해에 부정적인 영향을 미치는 사회·경제적 자료를 수집하였다. 가뭄 대응능력의 평가를 위해서는 가뭄 피해를 완화할 수 있는 지역의 용수공급능력과 관련된 자료를 수집했으며, 가뭄 위험도의 평가를 위해서는 가뭄 피해 자료를 수집하였다. 각 자료에 대한 코드, 단위 및 출처는 Table 1과 같다. 선정된 평가인자들의 시간 및 공간스케일과 공통된 자료기간 등을 고려하여 연구의 사·공간적 범위를 사·군·구별 2001년부터 2019년에 대해 연단위로 설정하였다.

가뭄 노출성의 경우 수집된 인자들의 원자료를 그대로 사용하는 다른 영향인자 및 위험도와 다르게 가뭄지수를 활용하여 가뭄의 발생

확률을 산정해야 한다. 표준강수지수(standardized precipitation index, SPI)는 가뭄의 시작과 끝을 명확히 제시하기 때문에 가뭄의 발생확률을 계산하는데 편리하며, 어떠한 장소 및 시점에서의 가뭄을 일관성 있게 정량화 할 수 있다. 또한, 지체시간에 따라 기상, 농업 및 수문학적 특성을 반영하기 때문에 다양한 가뭄을 모니터링 할 수 있다. 본 연구에서는 30일, 60일, 90일, 180일, 270일 및 360일 지체시킨 일단위 SPI를 적용하였으며, SPI가 -1.0보다 낮은 기간을 가뭄사상으로 정의하고 가뭄 지속기간 및 심도를 산정하였다. Kolmogorov-Smirnov 검증을 수행하여 지속기간 및 심도의 최적 주변확률분포를 산정하고, Eq. (1)에 명시된 아רכ메디안 코플라 함수를 적용하여 가뭄사상의 발생확률을 계산하였다. 연도별 가뭄 발생확률을 산정하기 위하여 해당 년도에 발생한 가뭄사상의 발생확률을 평균하였다. 산정된 연도별 평균 가뭄 발생확률을 가뭄 노출성의 평가인자로 사용하였다.

$$F(x,y) = C(u,v) = C(F_X(x), F_Y(y)) \quad (1)$$

여기서, $F_X(x) = u$ 및 $F_Y(y) = v$ 는 각각 지속기간 및 심도의 주변확률분포함수이다.

3. 구조방정식모형을 통한 가뭄 위험도에 대한 영향 관계 도출

3.1 구조방정식모형 개념

일반적으로 다양한 인자간의 영향관계를 추론하기 위해서는

Table 1. Characteristics and Sources of Evaluation Factors

Code	Factors	Unit	Sources
Drought hazard			
h1	Daily SPI-30		Korea Meteorological Administration
h2	Daily SPI-60		Korea Meteorological Administration
h3	Daily SPI-90		Korea Meteorological Administration
h4	Daily SPI-180		Korea Meteorological Administration
h5	Daily SPI-270		Korea Meteorological Administration
h6	Daily SPI-360		Korea Meteorological Administration
Drought vulnerability			
v1	Population	Person	National Statistical Office
v2	Number of solitary senior citizen	Person	National Statistical Office
v3	Number of recipient of basic living	Person	National Statistical Office
v4	Farm population	Person	National Statistical Office
v5	Population density	Person/km ²	National Statistical Office
v6	District area	km ²	National Statistical Office
v7	Agricultural land area	ha	National Statistical Office
v8	Area of industrial complex	10 ³ m ²	Industrial Land Information System
v9	Water leakage ratio	%	Statistics of Waterworks
v10	Amount of domestic water usage	10 ³ m ³ /year	Statistics of Waterworks
v11	Amount of industrial water usage	10 ³ m ³ /year	Statistics of Waterworks
v12	Amount of agricultural water usage	10 ³ m ³ /year	Statistics of Waterworks
v13	Amount of groundwater usage	10 ³ m ³ /year	Groundwater Annual Report
Drought response capacity			
c1	Storage of dam	10 ⁶ m ³	National Statistical Office
c2	Storage of reservoir	10 ³ m ³	Korea Rural Community Corporation
c3	Groundwater level	El.m	Groundwater Annual Report
c4	Volume of exploitable groundwater	10 ³ m ³ /year	Groundwater Annual Report
c5	Water intake	10 ³ m ³ /year	Statistics of Waterworks
c6	Water supply ratio	%	National Statistical Office
c7	Sewage ratio	%	National Statistical Office
c8	Daily water supply per capita	L	National Statistical Office
c9	Sewage reuse ratio	%	Statistics of Sewage
c10	Annual amount of rainwater	10 ³ m ³ /year	Statistics of Sewage
c11	Number of staff of water works part	Person	Statistics of Waterworks
Drought risk			
r1	Restrict/ Transportation water supply	Number of events	Number
r2		Number of impacted population	Person
r3		Number of damage days	Day
r4	Number of damage articles		Number
			National Drought Information Portal
			National Drought Information Portal

주성분분석, 회귀분석, 요인분석 등의 다양한 통계적 기법을 활용한 다(Barbero et al., 2014; Marin et al., 2018; Nogueira et al., 2017; Urbietta et al., 2015; Yoo et al., 2021). 구조방정식모형 (structural equation modeling, SEM)은 주성분분석, 회귀분석 및 요인분석이 모두 결합된 기법으로, 변수들 간의 구조적인 관계를 선형 방정식 형태로 나타낸 것이다. 구조방정식모형은 공분산 기반 구조방정식모형(covariance based-structural equation modelling,

CB-SEM)과 부분최소제곱 구조방정식모형(partial least squares-structural equation modelling, PLS-SEM)으로 구분된다. 최근에는 자료 크기에 덜 민감하고 추론에 있어서 분포형의 가정이 자유로우며, 탐색적인 연구와 이론의 개발에 유리한 PLS-SEM이 많이 활용되고 있다(Kim and Lee, 2015).

구조방정식모형은 측정변수 및 잠재변수 등의 관계를 동시에 고려하여 변수들 간의 인과관계를 추정하는 방법이다. SEM에서

측정변수는 직접 관측되는 변수로 잠재변수를 측정하기 위한 변수를 의미하고, 잠재변수는 직접 측정 및 관측되지 않는 변수로 측정변수를 통해 간접적으로 측정되는 변수이다. SEM은 측정이 불가능하거나 중요한 설명변수들이 관측이 되지 않는 경우 잠재변수의 개념을 도입하여 이러한 문제를 해결할 수 있으며, 잠재변수들 간의 또는 잠재변수와 측정변수간의 상호관계를 파악할 수 있다 (Kim et al., 2021). PLS-SEM의 일반적인 개념도는 Fig. 2와 같으며, 크게 측정모형(measurement model)과 구조모형(structural model)으로 구성된다. 측정모형은 잠재변수를 설명하는 측정변수와의 관계를 나타내며, 구조모형은 잠재변수들 사이의 관계를 나타낸다. 변수들 간의 인과관계는 단일방향 화살표로 표시하며, 경로계수를 통해 인과관계의 방향 및 정도를 파악할 수 있다.

PLS-SEM은 측정모형과 구조모형으로 구분하여 모형 및 변수들 사이의 인과관계를 평가할 수 있다. 일반적으로 내적일관성 신뢰도(internal consistency reliability), 집중타당도(convergent validity)

및 판별타당도(discriminant validity)를 통해 측정변수들이 잠재변수를 얼마나 잘 나타내는지 평가하며, 다중공선성(multicollinearity), 결정계수(coefficient of determination, R^2) 및 모형적합도(model's goodness-of-fit)를 통해 잠재변수들 사이의 인과관계의 타당성을 평가한다(Yoo et al., 2021). PLS-SEM의 평가항목 및 평가항목별 수용기준은 Table 2와 같다. 본 연구에서는 베이지안 네트워크 모형을 구축하기 위해 PLS-SEM을 통해 가뭄 위험도 영향 인자들 간의 관계, 방향 및 최적 분포 등을 설정하였으며, 다양한 평가기준을 활용하여 PLS-SEM의 적합도를 검증하였다.

3.2 구조방정식모형을 활용한 가뭄 위험도에 대한 영향 관계 도출

본 연구에서는 가뭄 노출성, 취약성, 대응능력 및 위험도의 개념과 각 평가인자들의 정의를 통해 인자들 간의 관계를 설정하여 초기 구조방정식모형을 구축하고 모형 평가를 수행하였다. PLS-SEM 분석이

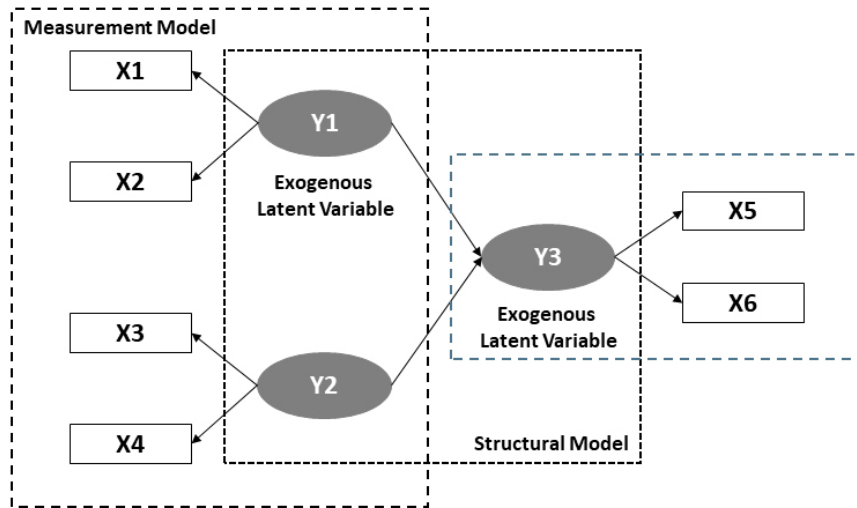


Fig. 2. Concept of PLS-SEM

Table 2. List and Criteria of Evaluation for PLS-SEM

Model	List of evaluation		Criteria of evaluation		
Measurement Model	Internal Consistency Reliability	Cronbach's alpha	Cronbach's alpha ≥ 0.6		
	Convergent Validity	AVE	AVE > 0.5		
	Discriminant Validity	Fornell-Larcker	$\sqrt{AVE} > \text{Max (Correlation coefficient)}$		
		Cross loading	Outer loading $>$ Cross loading		
Structural Model	Multi-collinearity	Inner VIF	Inner VIF < 5.0		
	Model's Goodness-of-fit	R^2	High: $R^2 > 0.26$	$0.13 \leq R^2 < 0.26$	Low: $R^2 < 0.13$
		f^2	High: $f^2 > 0.26$	$0.13 \leq f^2 < 0.26$	Low: $f^2 < 0.13$
		Predictive relevance	Predictive relevance ≥ 0.6		
		Goodness-of-fit	High: > 0.36	$0.25 \sim 0.36$	Low: $0.10 \sim 0.6$

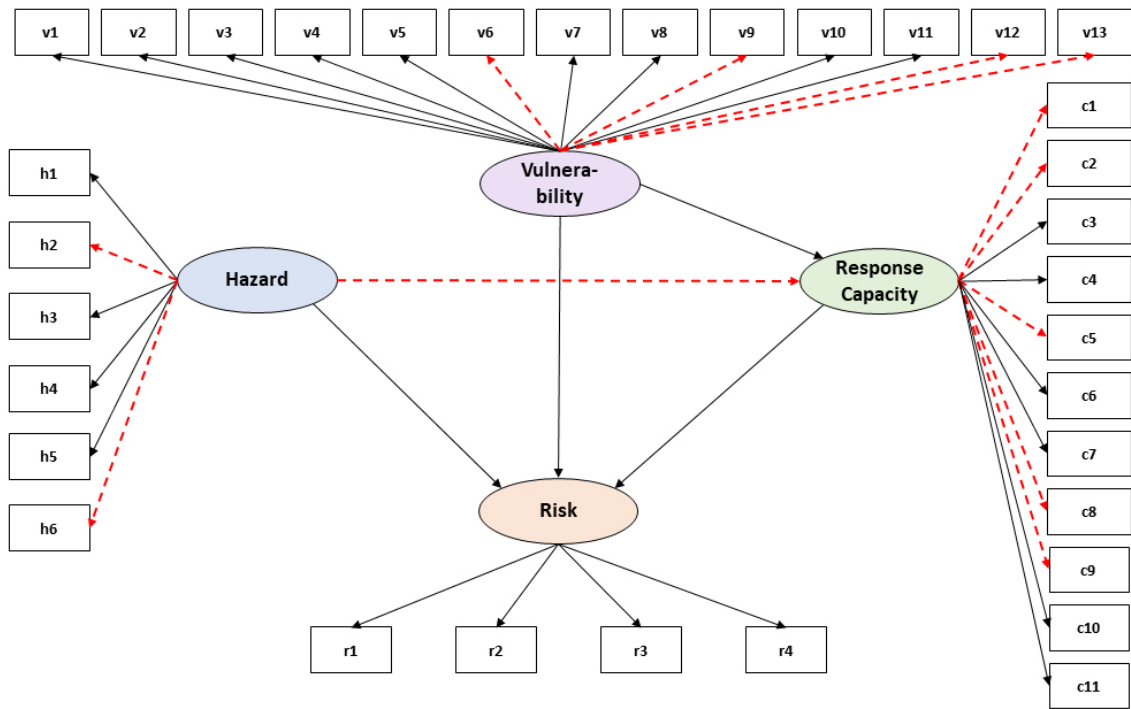


Fig. 3. Model Structure for Drought Risk Assessment Using PLS-SEM

용이한 상용 소프트웨어인 SmartPLS를 활용하여 PLS-SEM의 측정모형 및 구조모형에 대해 여러 조합으로 모형 평가를 수행한 결과 Fig. 3과 같이 가뭄 위험도 평가 모형을 구축하였다. 실선은 평가 기준을 통과한 인자들 간의 관계이며, 점선은 평가 기준을 충족하지 못하여 평가 모형에서는 제외된 인자들 간의 관계이다.

모형의 적합성은 크게 측정모형과 구조모형으로 구분하여 평가하였다. 먼저, 측정모형의 신뢰도 및 타당도를 평가하기 위하여 내적일관성 신뢰도, 집중타당도 및 판별타당도를 검토하였다. 잠재변수를 구성하는 측정변수들이 실제로 일관성이 있는지를 판단하는 내적일관성 신뢰도는 크론바흐 알파(Cronbach's alpha)로 평가하였다. 노출성, 취약성, 대응능력 및 위험도의 크론바흐 알파는 각각 0.76, 0.98, 0.69, 0.83으로 모두 0.6 이상을 통과함에 따라 각 잠재변수를 구성하는 평가인자들이 일관성을 가지는 것을 확인하였다. 측정변수가 해당 잠재변수와 관련된 정도를 판단하는 집중타당도는 평균분산추출(average variance extracted, AVE)을 통해 평가하며, 4개의 잠재변수는 각각 0.54, 0.87, 0.41, 0.67로 산정되었다. 이 중 대응능력은 기준치에 약간 미달하였다. 측정변수가 다른 잠재변수와 관련성을 가지지 않았는지를 판단하는 판별타당도는 Fornell-Larcker 기준 및 교차적재치(cross loading)를 통해 평가하며, 결과는 Tables 3 and 4와 같다. Fornell-Larcker 기준은 각 잠재변수의 AVE의 제곱근이 잠재변수들 간의 상관관계 중 가장 큰 값보다 모두 초과하는 값으로 산정되었으며, 교차적재치

Table 3. Result of Fornell-Larcker Criteria

	Hazard	Vulnerability	Response capacity	Risk
Hazard	0.73			
Vulnerability	-0.05	0.93		
Response capacity	-0.01	0.84	0.64	
Risk	0.11	0.19	0.39	0.82

는 대응능력의 지하수량이 위험도의 교차적재치보다 작은 값을, 상수도분야 직원수가 취약성의 교차적재치보다 작은 값을 나타냈다. 이러한 결과를 통해 대부분의 측정변수들이 잠재변수를 잘 설명하고 있으나, 대응능력의 측정변수들이 다른 잠재변수와 약간의 관련성을 가지는 성격을 띄고 있어 집중타당도에서도 기준치를 통과하지 못한 것으로 판단된다.

다음으로, 구조모형의 적합도를 평가하기 위하여 다중공선성, 결정계수 및 모형적합도를 검토하였다. 내생잠재변수 간 강한 상관관계가 나타나는지에 대한 여부를 확인하기 위한 다중공선성은 내부 분산팽창계수(variance inflation factor, VIF)를 이용하며, 위험도에 대한 노출성, 취약성 및 대응능력은 각각 1.01, 3.34, 3.33이며, 대응능력에 대한 취약성은 1.00으로 모두 5.0 미만의 기준을 통과하였다. 구조모형의 예측력에 대한 척도로 실제값과 예측값 간의 제곱 상관관계로 계산되는 결정계수는 0.46으로 매우

Table 4. Result of Cross Loading Criteria

	Hazard	Vulnerability	Response capacity	Risk
h1	0.878	-0.092	-0.011	0.122
h3	0.518	0.250	0.235	0.036
h4	0.673	-0.076	-0.075	0.017
h5	0.809	-0.084	-0.095	0.083
v1	-0.062	0.989	0.828	0.167
v2	-0.017	0.989	0.890	0.228
v3	-0.021	0.981	0.885	0.261
v4	-0.092	0.949	0.848	0.018
v5	-0.06	0.853	0.648	0.106
v7	-0.075	0.795	0.694	0.147
v8	-0.031	0.968	0.725	0.126
v10	-0.052	0.967	0.731	0.115
v11	-0.023	0.862	0.684	0.193
c3	-0.029	0.109	0.402	0.458
c4	-0.017	0.583	0.714	0.229
c6	-0.015	0.379	0.507	0.238
c7	0.060	0.295	0.525	0.259
c10	0.073	0.446	0.637	0.107
c11	-0.052	0.955	0.918	0.321
r1	0.035	0.270	0.396	0.911
r2	0.054	0.087	0.256	0.883
r3	0.120	0.109	0.277	0.637
r4	0.153	0.129	0.314	0.806

높게 산정되었으며, 외생잠재변수들이 내생잠재변수의 결정계수에 기여하는 정도를 의미하는 효과크기(effect size, f^2)는 대응능력에 대한 취약성이 2.32로 높은 효과를, 위험도에 대한 대응능력이 0.22로 중간 효과를, 위험도에 대한 노출성 및 취약성이 각각 0.13, 0.08로 낮은 효과를 보였다. 하지만 모두 기준치는 초과하였다. 마지막으로, 구조모형이 내생잠재변수에 대해 예측적 적합성을 가지고 있는지의 여부를 판단하는 기준인 예측적합도(predictive relevance)는 0.18로 예측적합도가 있는 것으로 확인되었다. 이러한 결과를 토대로 PLS-SEM의 전반적인 적합도(goodness-of-fit)는 0.45로 높은 적합도를 가진다.

이러한 평가 결과를 통해 노출성에서는 DSPI-60 및 -360이, 취약성에서는 인구밀도, 상수도 누수율, 공업용수 이용량 및 지하수 이용량, 대응능력에서는 댐 저수량, 저수지 저수량, 취수량, 단위 급수량 및 하수 재이용률이 제외되었다. 본 연구에서는 PLS-SEM을 활용하여 객관적이고 정량적으로 가뭄 위험도에 대한 영향 관계를 도출하였으며, 베이지안 네트워크 모형을 구축하는데 있어 신뢰성과 타당성을 제공하였다.

4. 베이지안 네트워크를 활용한 민감도 분석

4.1 베이지안 네트워크 개념

베이지안 네트워크는 베이즈 이론에 기초하여 인자들 간의 확률론적 의존 관계를 표현하며, 그래프 이론과 확률 이론을 결합한 확률 그래프 모형이다. 베이지안 네트워크는 불확실하고 복잡한 현상을 모델링하는 방법으로, 다양한 분야에서 발생하는 불확실성 하에서의 위험도 평가 및 의사결정 지원 도구로 널리 사용되고 있다(Hosseini and Barker, 2016). 즉, 위험요소들의 분류와 규명, 위험요소들 간의 인과관계, 위험요소들의 발생확률 산정 등을 통해 각각 위험요소의 발생경로와 발생확률 등을 체계적으로 추정할 수 있어 널리 이용되고 있다(Yoo et al., 2014). 또한, 변수들 간의 의존관계를 활용하여 네트워크 전체를 시뮬레이션 할 수 있는 방법으로, 변수들 간의 영향 정도 및 변화량을 추론하여 정량화가 가능하다.

베이지안 네트워크는 일반적으로 Fig. 4와 같이 변수들의 관계성을 바탕으로 수렴형, 분산형 및 선형으로 구분되며, X_i 는 부모노드로서 독립변수를 의미하고 Y_i 는 자식노드로서 종속변수를 의미한다. 여기서 베이지안 네트워크 모형은 다양한 변수를 표현하는 노드(node) X, Y, Z 와 변수들 사이의 의존 관계를 표현하는 호(arc)인 방향을 가진 선으로 구성되며, 노드들 사이의 인과관계는 확률 정보로 표현된다. 이러한 인과관계에 대한 확률 정보는 베이즈 정리(Bayes' theorem)를 통해 파악할 수 있으며, Eq. (2)와 같이 사건 A, B에 대하여 사전확률(prior probability)과 사후확률(posterior probability)의 관계로 표현한다. 여기서, $P(A)$ 는 사건 A의 사전확률이고, $P(B|A)$ 는 사건 A가 발생하였을 때 사건 B가 발생할 확률을 의미하는 조건부확률로 우도함수(likelihood function)라고 한다. $P(A|B)$ 는 사건 B가 발생하였을 때 사건 A가 발생할 확률을 의미하는 사후확률로서, 베이즈 정리에 의해 간단하게 사전 확률과 우도함수의 곱에 비례한다고 표현할 수 있다.

$$P(A|B) = \frac{P(A, B)}{P(B)} = \frac{P(A)P(B|A)}{P(B)} \propto P(A)P(B|A) \quad (2)$$

본 연구에서는, 구조방정식모형에서의 잠재변수인 가뭄 노출성, 취약성 및 대응능력을 부모노드(독립변수), 가뭄 위험도를 자식노드(종속변수)로 설정하여 측정변수와 함께 베이지안 네트워크 모형을 Fig. 5와 같이 구축하였다. 이 때 사용된 베이지안 네트워크 소프트웨어는 베이즈 서버(Bayes Server)를 이용하였다. 구축된 베이지안 네트워크 모형을 통해 과거 가뭄 위험도에 대한 영향을 평가하고, 잠재변수들의 확률에 대해 민감도 분석을 실시하여 가뭄 위험도 변화를 분석하였다.

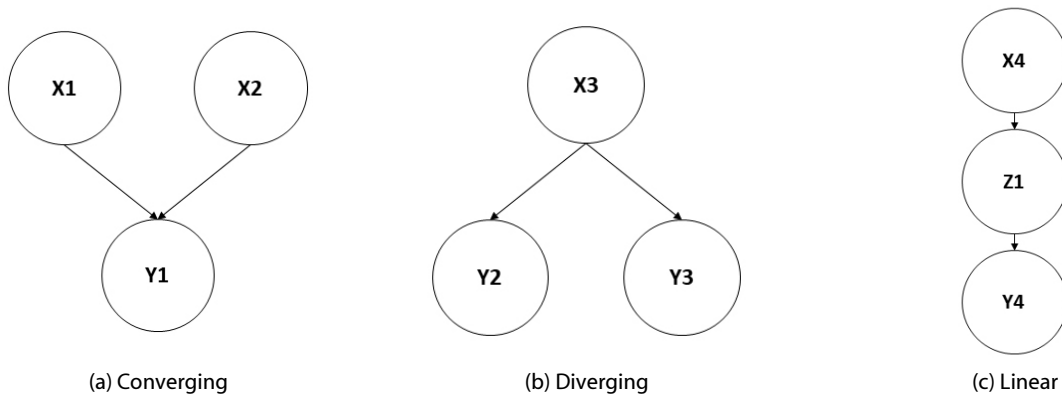


Fig. 4. Connection Types of Bayesian Networks

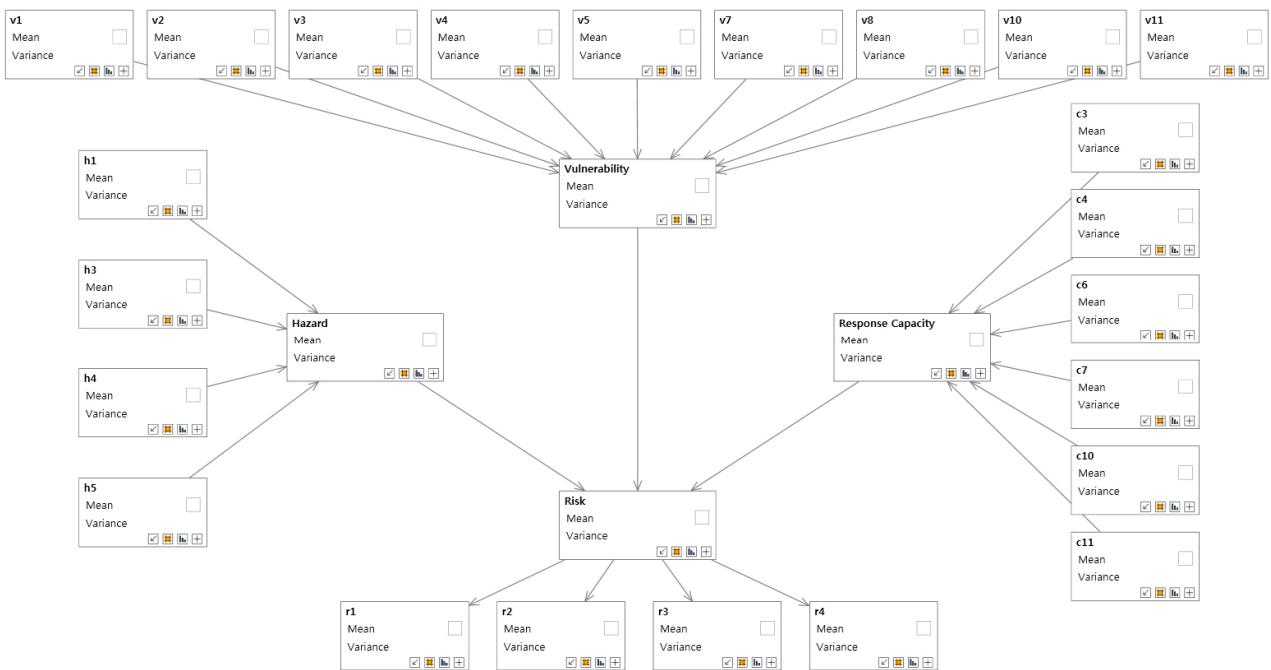


Fig. 5. Bayesian Network Model Using Bayes Server

4.2 베이지안 네트워크 모형을 활용한 민감도 분석

본 연구에서 사용된 베이지안 네트워크 모형에서 독립변수와 종속변수간의 인과관계 분석을 통하여 가상(what-if) 분석을 수행하였다. 베이스 정리를 바탕으로 사전확률과 사후확률의 변화를 통해 특정 독립변수가 복잡한 인과관계를 통하여 종속변수에 얼마나 영향을 주는지를 판단하기 위한 민감도 분석을 실시하였다(Sun, 2015). 즉, 가뭄 영향인자에 따라 가뭄 위험도가 어떻게 변하며, 이로 인한 영향이 무엇인지 파악하기 위하여 가뭄 노출성, 취약성 및 대응능력 값을 변화시켜가며 민감도를 분석하였다.

본 연구에서의 목적은 지역별 과거 가뭄 위험도를 비교하고 가뭄 노출성, 취약성 및 대응능력에 따라 변화하는 가뭄 위험도

및 가뭄 위험도 영향인자를 비교 분석하는 것이다. 하지만, 베이지안 네트워크 분석시 평가인자들이 0~1 사이의 값을 갖더라도 확률 기반으로 다양한 평가인자가 결합되기 때문에 그 결과가 항상 0~1 사이의 값을 갖진 않는다. 따라서, 평가인자별 및 지역별 비교가 용이하도록 축척재조정(re-scaling) 기법을 통해 베이지안 네트워크 분석결과를 표준화하였다. 축척재조정 기법은 평가인자의 범위를 고려하여 인자 값이 모두 0~1 사이의 동일한 범위 내에 존재하도록 하는 방법이며, 평가인자 내에서 값의 순위에 따라 정렬되므로 상대적인 크기 비교가 가능하다(Kim et al., 2019). 각 인자들의 값이 0에 가까울수록 위험하지 않음을 의미하며, 1에 가까울수록 위험이 크다는 것을 의미한다.

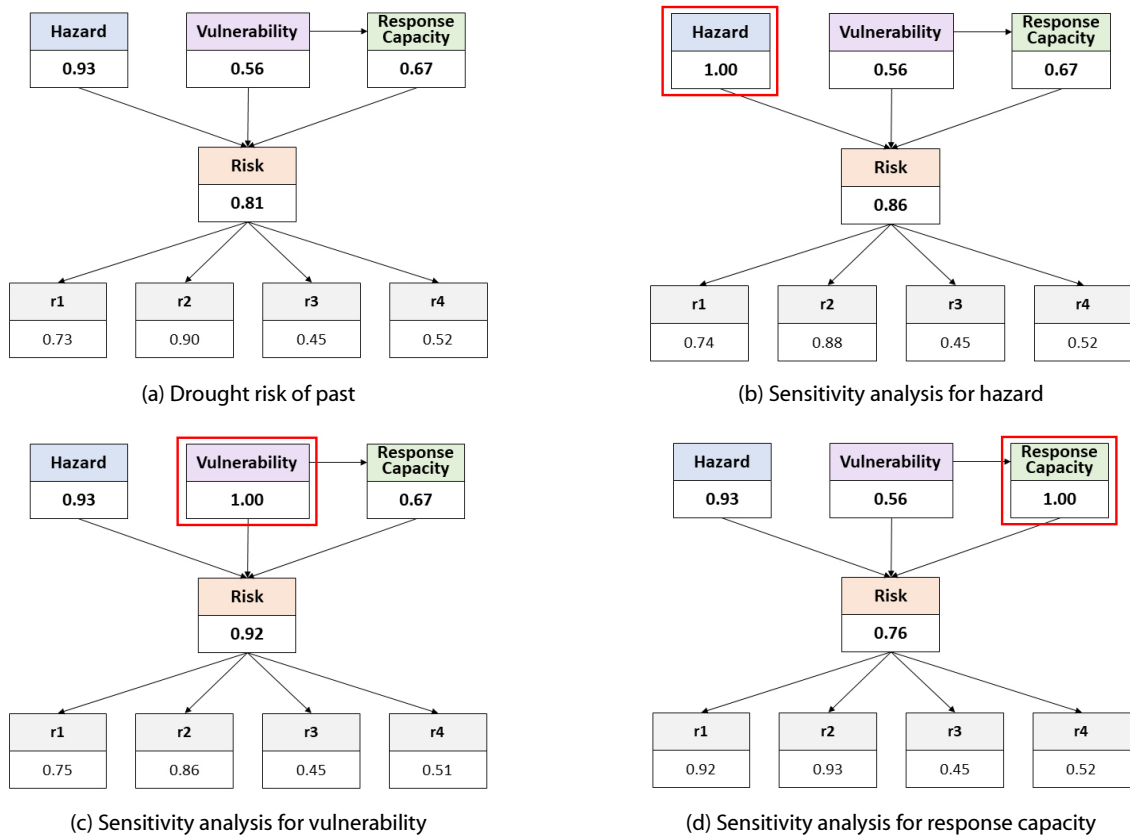


Fig. 6. Drought Risk Assessment and Sensitivity Analysis for Cheongju-si

Fig. 6에서 청주시의 가뭄 위험도 평가 결과와 함께 노출성, 취약성 및 대응능력을 변화시켜 가뭄 영향인자의 위험도에 대한 민감도 분석 결과를 확인할 수 있다. 민감도 분석은 각 영향인자들을 가장 위험한 상태인 1.00으로 변화시키며 위험도의 변화를 분석하였다. 단, 평가인자의 개수가 매우 많아 가독성을 높이기 위하여 잠재변수 및 가뭄 위험도의 측정변수만을 표현하였다. 청주시의 과거 가뭄 위험도는 0.81로 매우 큰 값이 나왔으며, 이때 노출성, 취약성 및 대응능력은 0.93, 0.56, 0.67로 나타났다. 이러한 잠재변수들의 영향으로 인해 가뭄 피해 인구수가 0.90으로 가장 크게 산정되었다. 가뭄 영향인자의 위험도에 대한 민감도 분석을 실시한 결과 노출성을 변화시켰을 때는 위험도가 0.86으로 6% 증가하였으며, 발생건수와 피해인구수의 발생확률이 약간 증가하였다. 취약성을 변화시켰을 때는 위험도가 0.92로 13% 증가하였으며, 발생건수의 발생확률이 증가하고 피해인구수 및 피해기사가 약간 감소하였다. 마지막으로 대응능력을 변화시켰을 때는 위험도가 0.76으로 6% 감소하였으나, 발생건수와 피해인구수의 발생확률이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로 대응능력은 위험도는 약간 감소시키거나 그로인한 피해는 크게 증가시키는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 지역별로 가뭄 위험도를 도식화 한 것이다. Fig. 7(a)는

과거 가뭄 위험도로 청주시가 가장 높게 나왔으며, 평균이 가장 낮게 나타났다. Figs. 7(b)~(d)는 노출성, 취약성 및 대응능력을 변화시킨 민감도 분석결과로서, 가뭄 위험도에 대한 변화를 쉽게 파악하고 지역별 비교가 용이하다. 모든 지역의 노출성을 1.00으로 설정하여 위험도에 대한 노출성의 영향을 분석한 결과 평균 및 제천시가 과거에 비해 위험도가 크게 변하여 민감도가 가장 크게 나타났으며, 노출성을 변화시켰을 때 위험도는 청주시가 가장 큰 것으로 나타났다. 모든 지역의 취약성을 1.00으로 설정하여 위험도에 대한 취약성의 영향을 분석한 결과 평균 및 음성군이 과거에 비해 위험도가 크게 변하여 민감도가 가장 크게 나타났으며, 취약성을 변화시켰을 때 위험도는 음성군이 가장 큰 것으로 나타났다. 마지막으로, 모든 지역의 대응능력을 1.00으로 설정하여 위험도에 대한 대응능력의 영향을 분석한 결과 평균 및 옥천군이 과거에 비해 위험도가 크게 변하여 민감도가 가장 크게 나타났으며, 대응능력을 변화시켰을 때 위험도는 청주시가 가장 큰 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 확률 및 통계적 기법을 적용하여 충청북도 11개

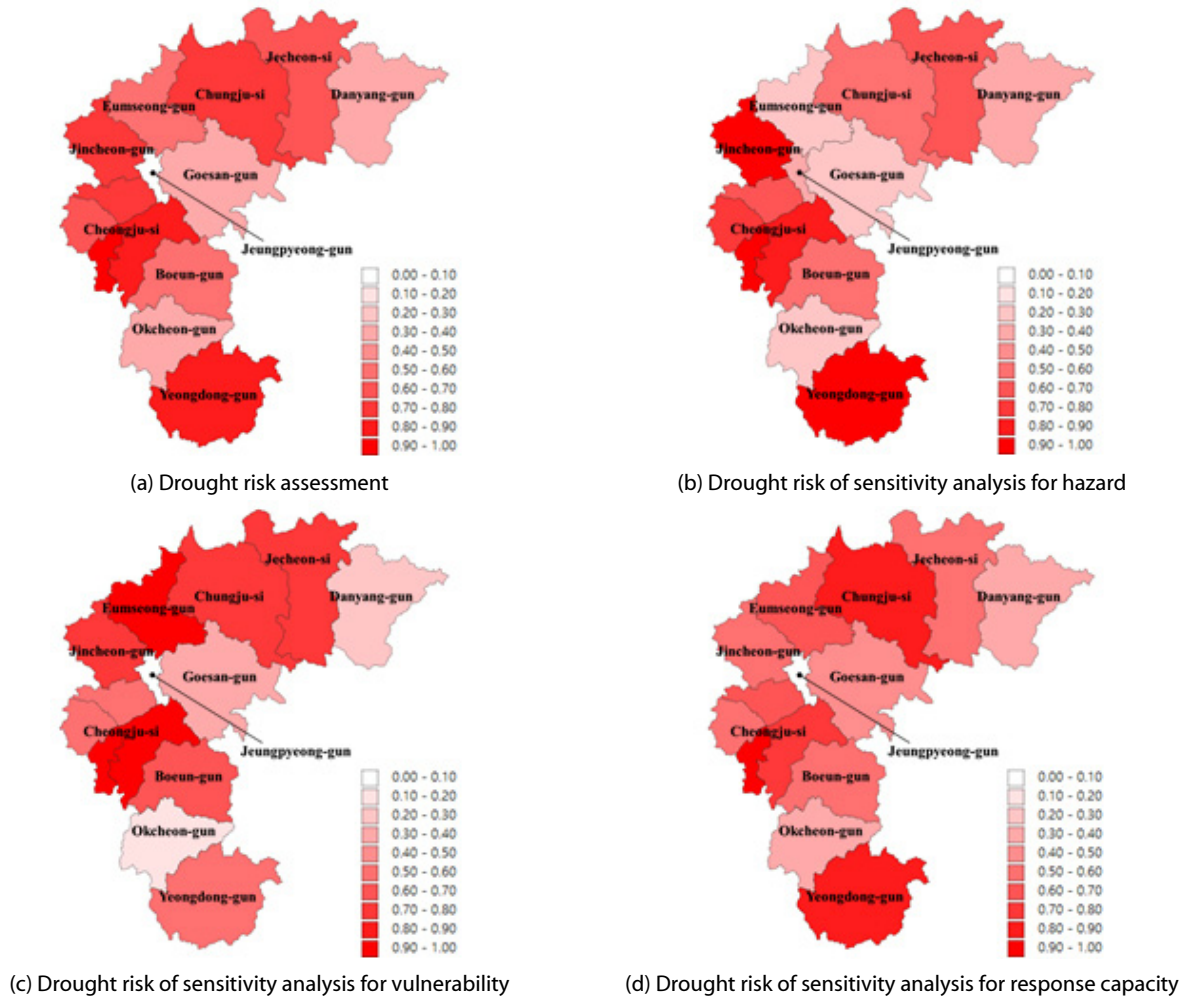


Fig. 7. Sensitivity Analysis for Drought Risk of Impact Factors

시군구에 대해 가뭄 위험도 평가 모형을 구축하고 위험도에 대한 가뭄 영향을 분석하였다. PLS-SEM의 평가를 통하여 충청북도내에 대한 동일한 모형 인자를 설정하고, 베이지안 네트워크 모형을 통해 각 지역에 적합한 가뭄 위험도 평가를 수행하였다. 그 결과 청주시는 노출성에서 민감도가 가장 크게 나타났으며, 이는 운반제한급수 발생건수를 증가시킬 것으로 예상된다. 즉, 청주시의 경우는 노출성, 취약성 및 대응능력이 변화함에 따라 발생건수 및 피해인구수에 영향을 미치며, 본 연구모형을 통해 지역에 따른 가뭄 피해 영향을 확인할 수 있다. 또한, 과거 가뭄위험도는 청주시가 제일 크게 나타났으며, 평균이 가장 작게 산정되었다. 이러한 결과를 역대 가뭄 피해와 비교하였을 때 청주시의 피해가 제일 크고 평균은 가뭄 피해가 발생하지 않은 것으로 보아 적절한 결과가 산정된 것으로 판단된다. 마지막으로 노출성, 취약성 및 대응능력이 변화함에 따른 민감도가 가장 큰 지역을 살펴본 결과 평균으로 나타나 가뭄 영향인자가 변화하였을 때 현재에 비해 크게 달라지기 때문에

피해가 클 것으로 예상된다. 또한, 각 영향인자들이 변화하였을 때 가장 위험도가 큰 지역은 충주시 및 음성군으로 가뭄 대책 마련시 우선순위로 반영되어야 한다. 이를 통해 각 지역마다 가뭄 위험도에 가장 큰 영향을 미치는 항목 및 인자를 확인하였으며, 이를 활용하여 각 인자별 특성에 따른 지역에 적합한 가뭄 대책 마련이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2020R1A2C1012919) 및 행정안전부 극한재난대응기반기술개발사업(2020-MOIS33-006)의 지원을 받아 수행되었습니다.

본 논문은 2021 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

References

- Barbero, R., Abatzoglou, J. T., Steel, E. A. and Larkin, N. K. (2014). "Modeling very large-fire occurrences over the continental United States from weather and climate forcing." *Environmental Research Letters*, Vol. 9, No. 12, 124009.
- Hosseini, S. and Barker, K. (2016). "A bayesian network model for resilience-based supplier selection." *International Journal of Production Economics*, Vol. 180, pp. 68-87.
- Jung, W. S., Kim, S. E. and Kim, Y. D. (2021). "Analysis of influential factors of cyanobacteria in the mainstream of Nakdong river using random forest." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 23, No. 1, pp. 27-34 (in Korean).
- Kim, D. W., Yoo, J. Y., Son, H. J. and Kim, T. W. (2021). "Evaluating meteorological and hydrological impacts on forest fire occurrences using partial least squares-structural equation modeling: a case of Gyeonggi-do." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 54, No. 3, pp. 145-156 (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*, KWRA, Vol. 52, No. 6, pp. 441-449 (in Korean).
- Kim, Y. T. and Lee, S. J. (2015). "Utilization of R program for the partial least square model: Comparison of SmartPLS and R." *Journal of Digital Convergence*, Vol. 13, No. 12, pp. 117-124 (in Korean).
- Lee, S. I., Son, C. S. and Lee, H. R. (2020). "Impact of meteorological and farm input cost factors for onion yield: focusing on Panel regression analysis and Bayesian network model." *Journal of Rural Development*, Vol. 43, No. 2, pp. 1-28 (in Korean).
- Marin, P. G., Julio, C. J., Arturo, R. T. D. and Jose, V. N. D. (2018). "Drought and spatiotemporal variability of forest fires across Mexico." *Chinese Geographical Science*, Vol. 28, pp. 25-37.
- Mihunov, V. V. and Lam, N. S. (2020). "Modeling the dynamics of drought resilience in South-Central United States using a Bayesian Network." *Applied Geography*, Vol. 120, 102224.
- Mun, Y. S., Nam, W. H., Yang, M. H., Shin, J. H., Jeon, M. G., Kim, T. G., Lee, S. Y. and Lee, K. Y. (2021). "Evaluation of agricultural drought disaster vulnerability using analytic hierarchy process (AHP) and entropy weighting method." *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 63, No. 3, pp. 13-26 (in Korean).
- Nogueira, J. M. P., Rambal, S., Barbosa, J. P. R. A. D. and Mouillot, F. (2017). "Spatial pattern of the seasonal drought/burned area relationship across Brazilian biomes: Sensitivity to drought metrics and global remote-sensing fire products." *Climate*, Vol. 5, No. 2, 42.
- Sahana, V., Mondal, A. and Sreekumar, P. (2021). "Drought vulnerability and risk assessment in India: Sensitivity analysis and comparison of aggregation techniques." *Journal of Environmental Management*, Vol. 299, 113689.
- Sun, E. J. (2015). "A study on calling pattern according to major among university students using Bayesian Network." *Business Management Research*, Vol. 8, No. 1, pp. 41-56 (in Korean).
- United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) (2019). *Drought resilience, adaptation and management policy framework: supporting technical guidelines*. UNCCD, Bonn, Germany.
- Urbieto, I. R., Zavala, G., Bedia, J., Gutierrez, J. M., San Miguel-Ayanz, J., Camia, A., Keeley, J. E. and Moreno, J. M. (2015). "Fire activity as a function of fire-weather seasonal severity and antecedent climate across spatial scales in southern Europe and pacific western USA." *Environmental Research Letters*, Vol. 10, 114013.
- Ye, L., Chung, S. W., Lee, H. S., Yoon, S. W. and Jeong, H. Y. (2009). "Sensitivity analysis of climate factors on runoff and soil losses in Daecheong reservoir watershed using SWAT." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 25, No. 1, pp. 7-17 (in Korean).
- Yoo, J. Y., Kim, J. G., Han, J. W. and Kim, T. W. (2021). "Impact assessment between heatwave and drought based on PLS-SEM." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, KSCE, Vol. 41, No. 2, pp. 113-121 (in Korean).
- Yoo, J. Y., Kim, J. Y., Kwon, H. H. and Kim, T. W. (2014). "Sensitivity assessment of meteorological drought index using Bayesian network." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 34, No. 6, pp. 1787-1796 (in Korean).