



Establishing meteorological drought severity considering the level of emergency water supply

Lee, Seungmin^a · Wang, Wonjoon^b · Kim, Donghyun^c · Han, Heechan^d · Kim, Soojun^e · Kim, Hung Soo^{f*}

^aMaster's Course, Program in Smart City Engineering, Inha University, Incheon, Korea

^bDoctor's Course, Program in Smart City Engineering, Inha University, Incheon, Korea

^cPost-Doctoral Researcher, Institute of Water Resources System, Inha University, Incheon, Korea

^dProfessor, Department of Civil Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea

^eProfessor, Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon, Korea

^fProfessor, Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon, Korea

Paper number: 23-043

Received: 7 August 2023; Revised: 3 October 2023; Accepted: 4 October 2023

Abstract

Recent intensification of climate change has led to an increase in damages caused by droughts. Currently, in Korea, the Standardized Precipitation Index (SPI) is used as a criterion to classify the intensity of droughts. Based on the accumulated precipitation over the past six months (SPI-6), meteorological drought intensities are classified into four categories: concern, caution, alert, and severe. However, there is a limitation in classifying drought intensity solely based on precipitation. To overcome the limitations of the meteorological drought warning criteria based on SPI, this study collected emergency water supply damage data from the National Drought Information Portal (NDIP) to classify drought intensity. Factors of SPI, such as precipitation, and factors used to calculate evapotranspiration, such as temperature and humidity, were indexed using min-max normalization. Coefficients for each factor were determined based on the Genetic Algorithm (GA). The drought intensity based on emergency water supply was used as the dependent variable, and the coefficients of each meteorological factor determined by GA were used as coefficients to derive a new Drought Severity Classification Index (DSCI). After deriving the DSCI, cumulative distribution functions were used to present intensity stage classification boundaries. It is anticipated that using the proposed DSCI in this study will allow for more accurate drought intensity classification than the traditional SPI, supporting decision-making for disaster management personnel.

Keywords: Drought severity classification index, Drought warning criteria, Meteorological drought, Genetic algorithm, Standardized precipitation index

비상급수의 규모를 고려한 기상학적 가뭄 강도 수립

이승민^a · 왕원준^b · 김동현^c · 한희찬^d · 김수준^e · 김형수^{f*}

^a인하대학교 스마트시티공학과 석사과정, ^b인하대학교 스마트시티공학과 박사과정, ^c인하대학교 수자원시스템 연구소 박사후연구원,

^d조선대학교 토목공학과 교수, ^e인하대학교 사회인프라공학과 교수, ^f인하대학교 사회인프라공학과 교수

요 지

최근 기후변화가 심화됨에 따라 가뭄으로 유발되는 피해가 증가하고 있다. 현재 국내의 가뭄 강도를 결정하기 위해 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)를 기준으로 분류를 수행하고 있다. 현재 국내에서는 최근 6개월 동안의 누적강수량을 기준(SPI-6)으로 관심, 주의, 경계, 심각의 기상학적 가뭄의 강도를 분류하고 있다. 그러나 강수량만을 기초자료로 활용하기 때문에 가뭄 강도를 분류하는 데 한계가 있다는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 SPI에 따른 국내 기상학적 가뭄 예·경보 기준의 한계점을 극복하고자 국가가뭄정보포털(National Drought Information Portal, NDIP)에서 제공하는 비상급수 피해자료를 수집하여 가뭄의 강도를 분류하였다. 그리고 SPI의 인자인 강수량과 증발산량 산정에 사용되는 인자인 온도, 습도 등을 min-max 정규화로 지수화한 후 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA) 기반으로 각 인자들에 대한 계수를 산정하였다. 비상급수에 따른 가뭄의 강도를 분류하여 종속변수로 활용하고, GA에 의한 각 기상인자들의 계수를 활용하여 새로운 가뭄 강도 분류 지수(Drought Severity Classification Index, DSCI)를 도출하고자 하였다. DSCI를 도출한 후 누적분포함수를 활용하여 분류별 경계를 강도 단계 분류 기준으로 제시하였다. 본 연구에서 제시한 DSCI를 활용하면 기존 SPI보다 가뭄 강도를 정확하게 분류할 수 있어, 재난 담당자들의 의사결정을 지원할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어: 가뭄 강도 분류 지수, 가뭄 예·경보 기준, 기상학적 가뭄, 유전 알고리즘, 표준강수지수

*Corresponding Author. Tel: +82-32-860-7572

E-mail: sookim@inha.ac.kr (Kim, Hung Soo)

1. 서론

최근 기후변화가 심화됨에 따라 가뭄으로 인한 피해가 증가하고 있다(Aon, 2021; Kim *et al.*, 2022; Mishra and Singh, 2010). 가뭄은 세계에서 가장 피해액이 많이 발생하는 재난으로 전 세계적으로 가뭄으로 인하여 연평균 60억~80억 달러의 피해가 발생하고 있다(Wilhite, 2000). 가뭄은 여러 기준에 의해 정의된다. 국내에서는 가뭄을 크게 기상학적 가뭄, 농업적 가뭄, 수문학적 가뭄, 사회경제적 가뭄으로 분류한다. 기상학적 가뭄은 주어진 기간의 강수량이나 무강수 계속일수 등 기상현상의 영향을 직접적으로 표현할 수 있는 가뭄을 의미하며, 농업적 가뭄은 농작물 생육에 직접 관계되는 토양수분 등과 같이 농업에 영향을 주는 가뭄을 의미한다. 수문학적 가뭄은 하천유량 및 저수지, 지하수 등 가용 수자원의 양으로 정의하며, 사회경제적 가뭄은 경제재(물)의 수요와 공급을 기상학적, 수문학적, 농업적 가뭄의 요소와 관련시켜 다른 측면의 가뭄을 모두 고려한 넓은 범위의 가뭄을 의미한다(Choi and Kim, 2009; Yoo *et al.*, 2010).

우리나라에서는 재난의 피해를 최소화하기 위해, 재난 및 안전관리 기본법에 의거한 4개의 단계(예방, 대비, 대응, 복구)로 분류하여 재난을 관리하고 있다. 현재 국내에 발령되고 있는 가뭄 예·경보(drought warning)는 재난 및 안전관리 기본법의 4단계 중 대응단계에 해당된다. 현재 국내에 발령되고 있는 가뭄 예·경보는 관심, 주의, 경계, 심각 총 4단계로 구성되어 있으며, 가뭄의 종류에 따라 다른 기준이 설정되어 있다(ADMS, 2023; NDIP, 2023).

현재 국내에서는 기상학적 가뭄의 강도를 분류하기 위하여 SPI-6을 사용하고 있다. SPI는 McKee *et al.* (1993)에서 강수량 부족이 물 공급원에 영향을 미치게 되어 가뭄이 발생하는 것으로 보고 개발한 지수이다. 표준강수지수는 기상학적 가뭄지수로 일정 기간(1, 3, 6, 9, 12개월 등)에 대하여 누적강수량이 평년대비 얼마나 부족한지를 지수화한 지표이다.

그러나 표준강수지수는 강수량만을 인자로 활용하고, 가뭄에 대한 여러 대응이 이루어진 현 시점의 가뭄 강도를 정확하게 분류함에 있어서는 한계가 있다. 국내에서도 가뭄피해가 발생한 기간에 산정된 SPI가 가뭄 강도 단계에 미치지 않아 가뭄 예·경보가 발령되지 않은 사례가 상당히 빈번한 실정이다. 실제로 전국적으로 비상급수의 대상인원이 가장 크게 발생한 2015년 6월 및 2018년 3월에 산정된 SPI-6을 살펴보면 대관령, 철원 등의 일부 시·군을 제외한 대부분의 지역에서 산정된 가뭄지수가 기상학적 가뭄 관심단계 기준에도 미치지 못하는 것을 확인할 수 있다.

Zhang *et al.* (2012)에서는 중국의 신장지역에 위치한 53개

강우 관측소에서 얻은 일단위 강수량 데이터를 이용하여 대상 유역에 대한 SPI의 적용성을 평가하였다. 신장지역의 SPI에 의해 정의된 가뭄의 시간 및 공간적 변화를 조사하였으며, SPI가 신장의 가뭄 변동을 분석할 때 적절한 지표임을 확인하였다. 그러나 가뭄의 저감을 위한 인간의 대책이 발전하면서 SPI로 정의된 가뭄이 실제 가뭄 발생을 완전히 재현하지 못한다는 것을 확인하였다(Zhang *et al.*, 2012).

Naresh Kumar *et al.* (2009)는 인도의 안드라프라데시주를 대상으로 39년간의 SPI를 계산하였다. SPI와 실제 강우량 및 평균 강우량의 편차를 비교한 결과 강우량이 매우 낮거나 매우 높을 때 SPI 값이 건조하거나 습한 정도를 과소추정하는 것으로 확인하였다. 실제로 대상지역에서 최악의 가뭄이 발생했던 2002년과 2006년의 SPI는 극심한 건조가 아닌 중간 건조상태로 관측되는 문제점이 발생하였다(Naresh Kumar *et al.*, 2009).

Kwon *et al.* (2015)은 SPI로 보여지는 가뭄의 심도를 활용하여 새로운 가뭄지수인 SPI-S와 SPI_B-S를 제안하였다. 가뭄의 강도 및 지속기간의 특성을 반영하는 가뭄의 심도를 활용하여 가뭄지수와 가뭄단계를 제시한다. 기존 SPI와 다양한 누적강수기간 SPI의 최솟값을 혼합하여 가뭄심도(SPI_B)를 산정하고, 이를 기반으로 SPI의 심도를 활용한 가뭄지수(SPI-S)를 제안한 후 실제 가뭄사례를 통하여 적용성을 평가한다. 최종적으로 기존의 SPI는 월단위로 계산되기 때문에 강수량의 변동이 큰 우리나라와 같은 지역에서는 활용성이 떨어진다는 문제점을 제시하였다.

Merabtene *et al.* (2002)는 가뭄이 발생했을 때 전문가들이 빠르고 신뢰할 수 있는 의사결정을 내리기 어려운 현 상황을 지적하였다. 이를 개선하기 위하여 최적화 기법중 하나인 유전 알고리즘을 사용하여 가뭄에 대한 수문학적 인자들의 가중치를 최적의 산정하였다. 물 공급 비율과 물 공급 기간을 독립변수로 활용하고, 가뭄에 대한 회복력, 취약성 등을 고려하여 새로이 정의한 지수인 DRI (Drought Risk Index)를 종속변수로 활용한다. 그러나 적절한 가중치를 산정하기 위해서는 DRI에 대한 정확한 이해가 필요하며, 종속변수 산정을 위하여 물 수요량 및 공급량, 저수지별로 물이 충분한 기간 등의 자료가 구축되지 않은 지역에 대해서는 적용하기 어렵다는 한계점이 있다. 그 밖에도 가뭄에 대한 여러 연구가 시도되고 있다(Kim *et al.*, 2011, 2014, 2015a, 2015b; Kwak *et al.*, 2014, 2015, 2016a, 2016b, 2021; Yoo *et al.*, 2016).

따라서, 본 연구에서는 강수량만을 인자로 사용하는 기존 SPI의 한계점 및 선행연구의 적용성 문제를 극복하는 가뭄 강도 분류 지수(Drought Severity Classification Index, DSCI)를 정의하고 개발하고자 하였다. 국내 가뭄 피해가 발생함도

든 지역을 대상지역으로 선정하여 국내 2007년부터 2022년 까지 발생한 모든 가뭄 피해 이력과 SPI에 활용되는 강수량, 증발산량 산정에 활용되는 기온, 풍속, 습도, 증기압, 현지기압을 인자로 사용하였다(Bae *et al.*, 2018). 조사한 가뭄 피해 이력 자료를 이용하여 가뭄의 강도를 min-max 정규화 방법으로 지수화하여 종속변수로 활용하였으며, 가뭄 사상별로 발생한 강수량, 기온, 풍속, 습도, 증기압, 현지기압을 지수화하여 독립변수로 활용하였다.

2. 연구 방법

2.1 표준강수지수

SPI-6은 6개월 단위의 누적강수량 값을 이용하여 산정하는 SPI로, -1.0 이하일 때 관심 단계, -1.5 이하일 때 주의 단계, -2.0 이하일 때 경계 단계, -2.0 상태로 장기간 지속될 것으로 예상될 때 심각 단계로 분류한다(KMA, 2023a). 현재 국내에서는 가뭄의 예·경보 기준으로 McKee *et al.* (1993)에서 제시한 SPI의 가뭄상태 기준을 그대로 활용하며, 그 기준은 Table 1과 같다 (McKee *et al.*, 1993).

Table 1. Criteria of the standardized precipitation index

Range of SPI	Moisture Status	Range of SPI	Moisture Status
2.0 or high	Extremely wet	-1.5~-1.0	Moderately dry
1.5~2.0	Very wet	-2.0~-1.5	Serverely dry
1.0~1.5	Moderately wet	-2.0 or low	Extremely dry
-1.0~1.0	Near normal	-	-

2.2 연구 방법

사상별로 입력된 종속변수와 독립변수를 입력자료로 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 이용하여 종속변수에 대한 독립변수 인자별 계수를 산정하였다. 산정한 계수를 적용하여 가뭄의 강도를 분류할 수 있는 DSCI를 정의하고, DSCI의 산정식을 제시하였다. 본 연구는 1. 대상지역 선정 및 자료수집, 2. 가뭄 피해자료를 이용한 상관분석으로 종속변수 결정, 3. 유전 알고리즘을 통한 독립변수별 계수 산정, 4. 실제 피해기간에 산정된 SPI와 비교를 통한 적용성 평가순서로 진행된다. 이러한 과정을 Fig. 1과 같이 도식화하였다.

2.3 연구 대상지역

연구 대상지역은 국내 가뭄피해 이력이 있는 시·군으로 선정하였다. 과거 대상지역에서 발생한 가뭄피해는 대표적으로 전라남도 완도군에 2018-06-11~2022-04-30, 인천광역시 용진군에 2020-11-11~2022-04-26 기간동안 비상급수가 지속된 사례가 있다.

국내 시·군에 대하여 기존 가뭄피해의 강도에 따른 분포를 확인하였다. 각 시·군별로 2007년부터 2022년까지 발생한 총 비상급수 대상인원(Target Population, TP)의 수를 조사하였

Table 2. Range of damage level

Level	Target Population Range
1	$0 < TP \leq 203$
2	$203 < TP \leq 568$
3	$568 < TP \leq 2,336$
4	$2,336 < TP$

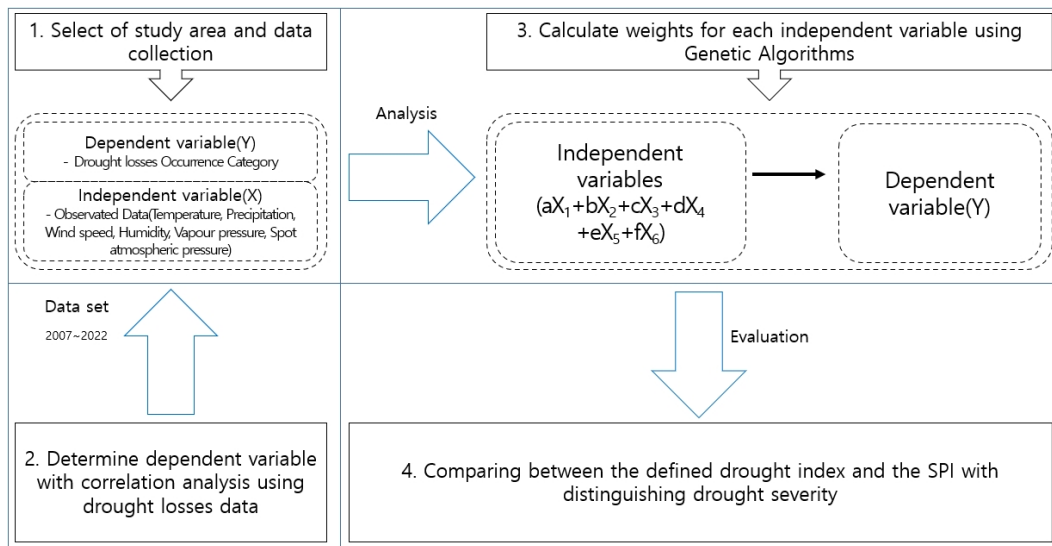


Fig. 1. Flow chart of the study

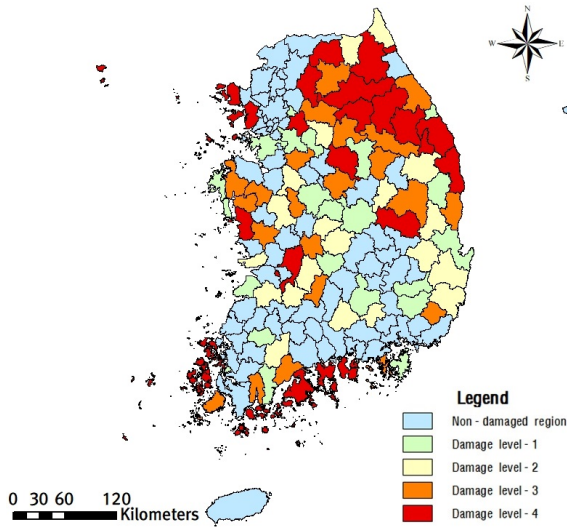


Fig. 2. Regional distribution of drought loss severity

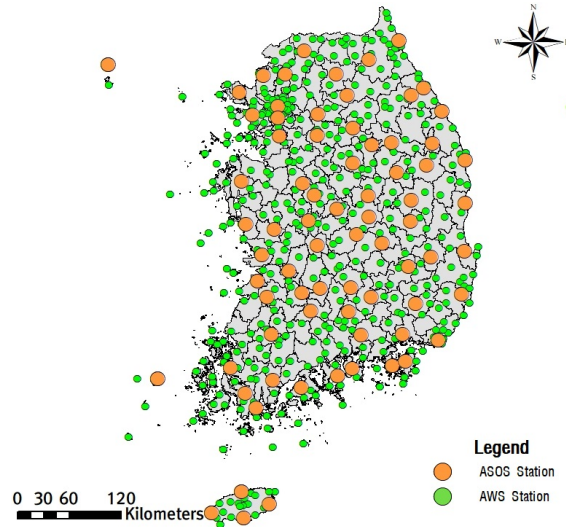


Fig. 3. Regional distribution of drought loss severity

다. 시·군별 비상급수의 대상인원 수를 4분위로 분류하여 발생한 피해의 단계를 나타내었으며, 피해 단계 분류를 위한 대상인원 수의 범위는 Table 2와 같다.

확인 결과속초시, 완도군, 태백시, 신안군 등이 기존에 가뭄 피해가 많이 발생한 것으로 확인되었다. 또한, 지역별로 발생한 총 비상급수 대상인원에 따른 강도단계별 분포를 Fig. 2와 같이 나타내었다.

2.4 자료 수집

국내의 기상관측소는 크게 지상, 해양, 고층, 항공 등 총 4가지 종류로 구분되며, 본 연구에서는 수문분야 연구시 일반적으로 사용되는 지상관측소의 자료를 사용하였다. 지상관측소는 종관기상관측소(Automated Synoptic Observing System, ASOS)와 방재기상관측소(Automatic Weather System, AWS)로 구분한다.

ASOS 관측소는 일반적으로 기상관서에 설치되며, 관할 지역의 기상자료를 실시간으로 관측하여 제공한다. 국내 103개의 지점이 있으며, 1904년에 관측을 시작하여 신뢰도가 높은 기상관측자료를 보유 및 제공하고 있다(KMA, 2023b).

AWS 관측소는 과거에 사람이 직접 관측했던 자료를 자동화한 장비로, 국내 510개의 지점에 설치되어 있다. 관측을 무인으로 진행하는 것이 특징이다. 1997년에 관측하기 시작하여 ASOS와 마찬가지로 신뢰도가 높은 기상관측자료를 보유 및 제공하고 있다.

분석에 사용할 수 없을 정도로 결측치가 많거나 관측기간이 피해자료의 기간에 해당하지 않는 등 활용이 어려운 관측소는 제외하였다. 그 결과 ASOS 관측소 75개소, AWS 관측소

442개소로 총 517개 관측소의 자료가 연구에 활용되었다. 기상관측자료의 경우 현재 가장 일반적으로 활용중인 티센다각형법(thiessen polygon method)을 활용하여 가뭄 예·경보 발령 단위인 시·군 단위로 기상관측자료를 구축하였다.

ASOS와 AWS에서 관측하는 기상인자의 종류는 서로 다르다. 때문에 온도, 강수량, 풍속 등과 같이 두 종류의 관측소에서 공통적으로 관측하는 자료에 대한 티센망과 증기압, 현지 기압 등과 같이 ASOS에서만 관측하는 자료에 대한 티센망을 따로 적용하여 지역별 독립변수를 구축하였다. 기초자료 구축에 활용된 기상관측소의 분포를 Fig. 3과 같이 나타내었다.

2.4.1 가뭄의 사상 선정

국가가뭄정보포털(National Drought Information Portal, NDIP)에서는 국내 가뭄에 대한 정보를 종합적으로 보유하고 제공한다. 본 연구에서는 최적의 DSCI를 개발하기 위하여 NDIP에서 가뭄피해자료로 비상급수의 이력자료를 수집하였다.

피해자료는 시설·마을 단위로 시행되었던 2007년부터 2022년까지 가뭄으로 인하여 시행한 비상급수의 이력이 정리되어 있다. 비상급수는 주로 가뭄이나 재난, 전쟁 등으로 공급할 물이 부족할 때 시행되는 조치이다. 수집한 피해자료에는 상수도시설이 관할하는 지구(마을 등)단위로 비상급수의 유형, 대상인원, 지속기간이 있으며, 수집한 가뭄 피해자료의 예시를 Table 3과 같이 나타내었다.

일반적으로 재해의 예·경보는 시·군 단위로 발령되므로 동일 시·군에 발생한 가뭄피해의 지속기간이 겹치는 사상을 모두 하나로 통합하였다. 최종적으로 1,529개의 시설·마을 단위 피해자료를 519개의 시·군 단위 피해자료로 통합하였다.

Table 3. Sample of drought damage data from NDIP

Province	City/County	Town/Village	Water Supply Type	Facility/Village Name	Number of Target Population	Type of Emergency Water Supply	Start Date	End Date
Gangwon	Gangneung	Gangdong	Small-scale Supply	Jangjakgol	46	Limited Supply	2015-06-01	2015-06-16
Gangwon	Gangneung	Gangdong	Village Waterworks	Origol	193	Transported Supply	2015-06-18	2015-06-26
Gangwon	Gangneung	Gujeong	Village Waterworks	Bongdong (Yangji)	193	Limited Supply	2015-05-29	2015-06-25
Gangwon	Gangneung	Yeongok	Small-scale Supply	Jangcheondong	52	Limited Supply	2015-06-01	2015-06-25
Gangwon	Gangneung	Okgye	Small-scale Supply	Eumchon	7	Limited Supply	2015-06-01	2015-06-16
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

피해자료에서 각 시·군별 발생한 비상급수의 총 대상인원의 분포를 Fig. 2와 같이 나타내었다.

2.4.2 기상관측자료 기반의 입력자료 구축

기상관측소에서 수집할 수 있는 기상학적 인자는 여러 가지가 있다. 최적의 DSCI를 개발하기 위해서는 그 중 가뭄의 발생에 영향을 있는 인자를 선별하여야 한다. 본 연구에서는 용수의 저장과 직접적인 관련이 있는 강수량과 함께 저장된 물의 증발산량을 산정할 때 사용되는 인자들을 선정하였다. 한국에서는 증발산량 산정시 증발산을 제어하는 모든 매개변수를 사용하는 FAO Penman Monteith (FAO PM) 방법을 사용하는 것이 적합하다(Bae *et al.*, 2018). 따라서 본 연구에서는 FAO PM 방법에서 사용되는 기상인자를 사용한다. FAO PM 방법에서 증발산량 산정시 사용되는 인자로는 순복사량, 지중열류, 기온, 풍속, 포화수증기압, 실제 수증기압, 대기압 등이 있다. 이 중 기상관측소에서 수집이 불가능하거나 분석에 활용하기 어려울 정도로 결측값이 많은 경우 DSCI의 인자에서 제외하였으며, 각 기상인자별 선정 여부를 Table 4와 같이 나타내었다.

가뭄을 발생시키는 인자로 국내 기상관측소에서 관측된 기온, 강수량, 풍속, 습도, 증기압, 현지기압 자료를 수집하였다. 저장된 물의 부족으로 인해 발생하는 가뭄의 특성상 증발산량은 가뭄에 있어 중요한 인자 중 하나에 해당된다. 기온, 풍속, 습도, 증기압, 현지기압은 증발산량 산정시 활용되는 주요 인자이다. 강수량은 현재 가뭄지수로써 가장 일반적으로 사용되는 SPI의 인자이며 물의 저장량과 직접적인 연관이 있다. 따라서 DSCI의 인자로 기온, 강수량, 풍속, 습도, 증기압, 현지기압을 선정하였다.

현재 국내에서는 농업적 가뭄영향에 영향을 가지는 6개월

단위의 SPI를 기준으로 가뭄의 강도를 분류하고 있다(NDMI, 2017). 그러나 SPI에 적용되는 6개월 단위를 DSCI에 그대로 적용할 경우 겨울철(12월~2월)에 발생한 가뭄 피해에 대한 독립변수를 구축할 때 장마철 및 호우·태풍 사상이 있는 기간이 포함되어 누적강수량이 과대산정되는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 독립변수 구축 시 가뭄 모니터링에 기본이 되는 3개월을 기본 단위로 사용한다(NDMI, 2017). 각 독립변수를 가뭄피해의 시점부터 3개월 이전까지의 관측자료를 사분별로 구축하였다. 이 때 기온, 풍속, 습도, 증기압, 현지기압은 3개월간의 평균값을 사용하고, 강수량은 3개월간의 누적값을 사용하였다.

최적의 DSCI를 위한 계수를 산정하기 위해서는 각 독립변수들을 min-max 정규화하여 독립변수로 활용할 필요가 있다. 일반적으로 기온 및 풍속이 높을수록 지표수의 증발이 빨라짐에 따라 가뭄의 강도가 커지며, 강수량이 높아질수록 저장할 수 있는 물의 양이 많아짐에 따라 가뭄의 강도가 작아질 수 있다. 습도의 경우 그 값의 크기를 통해 근 시일에 발생할 가뭄의 강도를 추정할 수 있으며, 습도가 커질수록 가뭄의 강도가 작아진다는 연구 결과가 있다(Farahmand *et al.*, 2015). 증기압이 높을수록 공기중의 수분함량이 높아 증발하는 물의 양이 줄어들어 가뭄의 피해가 작아질 수 있다. 현지기압이 낮아질수록 물의 증발점이 낮아지면서 가뭄의 피해가 커질 수 있다. 이를 반영하여 각 독립변수(기온, 풍속, 증기압, 현지기압)들의 min-max 정규화를 실시하고(Eq. (1)), 변수의 값이 커질수록 가뭄의 강도가 작아지는 인자(강수량, 습도)는 정규화 값을 반전화하였다(Eq. (2)).

$$X_i = \frac{X'_i - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (1)$$

Table 4. Selection of independent variables

Index	Selection	Index	Selection	Index	Selection
Temperature (°C)	○	Spot atmospheric pressure (hPa)	○	Visibility (10 m)	
Precipitation (mm)	○	Sea-level atmospheric pressure (hPa)		Minimum cloud height (100 m)	
Wind speed (m/s)	○	Sunshine (hr)		Visibility (10 m)	
Wind direction (degree)		Solar radiation (MJ/m ²)		State of ground (code)	
Humidity (%)	○	Snowfall (cm)		Phenomenon number	
Vapour pressure (%)	○	Cloud cover (decile)		Surface temperature (°C)	
Dew point temperature (°C)		Cloud shape (code)		Earth temperature (°C)	

Table 5. Pearson correlation coefficients between each independent variable and the dependent variable

Classification	Temperature X ₁	Precipitation X ₂	Wind Speed X ₃	Humidity X ₄	Vapour Pressure X ₅	Spot Atmospheric Pressure X ₆	Absolute average	Rank
TP	-0.0101	-0.0422	0.2177	-0.0380	-0.0247	-0.4442	0.1295	1
D	-0.0439	0.0117	0.0840	0.1777	0.0070	0.0905	0.0691	3
TP×D	0.0386	-0.0023	0.2234	0.0868	0.0733	-0.1532	0.0963	2

$$X_{-i} = 1 - \frac{X'_i - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (2)$$

여기서 X_i 는 정규화된 독립변수 값, X_{-i} 는 정규화 후 반전화한 독립변수 값, X'_i 는 각 독립변수의 실제 값, X 는 각 독립변수의 전체 집합을 의미한다.

2.4.3 상관분석을 통한 종속변수 결정

기상인자별 최적의 계수를 산정하기 위해서는 독립변수로 사용하는 기상인자와 상관성이 높은 피해지표를 결정할 필요가 있다. 가뭄피해 자료에서 피해의 강도를 평가할 수 있는 인자인 대상인원 및 비상급수 지속기간과 기상자간의 상관분석을 하였다.

특정 변수간의 상관성을 평가할 수 있는 상관계수는 여러가지가 있으며, 본 연구에서는 그 중 상관분석시 가장 일반적으로 사용되는 피어슨 상관계수(pearson correlation coefficient)를 활용하여 상관관계를 분석하였다.

피어슨 상관계수는 상관관계를 나타내는 여러 상관계수중 가장 널리 쓰이는 상관계수로, 측정하려는 두 변수의 상관관계가 서로 선형일 때(1차함수의 형태로 표현이 가능할 때) 유용하게 사용될 수 있다. 피어슨 상관계수는 -1~1 사이의 값을 가지며, 0에 가까울수록 상관관계가 없고 -1이나 1에 가까울수록 상관관계가 크다고 평가하는 상관계수이다(Cohen *et al.*, 2009).

수집한 피해자료에서 피해의 규모를 나타낼 수 있는 지표는

비상급수에 대한 대상인원, 지속기간이 있다. 이 중 피해의 규모를 가장 잘 나타낼 수 있는 지표를 선정해야 하며, 피해의 강도는 독립변수로 활용되는 기상인자에 따라 그 변화가 발생하여야 하기 때문에 피해지표를 선정하기 위하여 상관분석을 하였다. 상관분석을 통하여 Pearson 상관계수(p)를 산정하였으며, 그 산정식을 Eq. (3)과 같이 나타내었다.

$$p = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)s_x s_y} \quad (3)$$

여기서 x_i 는 독립변수, \bar{x} 는 독립변수에 대한 평균, y_i 는 종속변수, \bar{y} 는 종속변수에 대한 평균, s_x 와 s_y 는 각 변수들의 표준편차, n 은 관측치의 개수를 의미한다.

각 피해지표를 대상인원(Target Population, TP), 지속기간(Duration, D)로 정의하고, 기상인자인 온도, 강수량, 풍속, 습도, 증기압, 현지기압을 X₁, X₂, X₃, X₄, X₅, X₆으로 정의하였다. 이후 각 피해지표 및 기상인자간의 상관분석을 진행하여 Table 5와 같이 나타내었다.

각 피해지표와 독립변수간의 상관계수를 산정한 결과 비상급수의 대상인원만을 종속변수로 사용했을 때 독립변수로 사용하는 기상인자와의 상관관계가 가장 높은 것으로 확인되었다. 각 상관계수의 절대평균값을 기준으로 판단하였으며, 최종적으로 종속변수로 사용할 피해지표는 비상급수의 대상인원으로 선정되었다.

2.5 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 최적화 기법 중 하나로, 생물이 환경에 적응하여 진화한다는 점을 착안하여 개발된 알고리즘이다. 생명체 중 환경에 잘 적응한 개체가 많은 자손을 남길 수 있고, 세대가 지남에 따라 유전자의 변화로 환경에 적응하기 더 쉽게 진화한다는 유전자 메커니즘을 구현한 최적화 기법으로, 가장 큰 특징으로는 뉴턴법 등과 같은 기존의 고전적 최적화 기법 같이 하나의 해를 찾는 것이 아닌 여러개의 잠재적 해로 구성된 집단을 찾는다는 점이다(Holland, 1975; Kim and Kim, 2007a, 2007b).

유전 알고리즘의 구조는 유전자가 생물의 특징을 다음 세대로 전달한다는 특징을 가진다. 탐색하고자 하는 대상을 목적함수라고 하며, 탐색하고자 하는 독립변수의 계수를 유전자로 정의한다. 유전 알고리즘은 종속변수에 대한 적합도가 양호하게 평가될 때까지 지속되며, 유전 알고리즘의 구조는 Fig. 4와 같다(Kwak, 2008).

2.5.1 초기 유전자 집단 생성

유전 알고리즘은 초기 유전자 집단 생성(Initial Population)으로 시작한다. 해당 과정에서는 목적함수(objective function) 및 유전자로 활용할 초기 변수를 결정한다. 본 연구에서는 초기 유전자 집단을 생성하기 위하여 주어진 개체 수와 유전자의 수에 따른 무작위 값으로 결정되었다. 생성된 초기 유전자 집단은 알고리즘의 시작 변수로 활용되며, 이후 과정에서 개선된다.

2.5.2 적합도 계산

적합도 계산(Fitness Evaluation)은 각 개체의 성능을 평가하는 단계이다. 본 연구에서는 목적함수(Eq. (4))에 유전자(계수)를 적용하여 결과 값을 계산하고, 실제 값과의 절대오차평균(Mean Absolute Error, MAE)을 적합도로 사용하였다. 이렇게 계산된 적합도는 그 값이 작을수록 개체의 성능이 좋다는 것을 의미한다. 좋은 적합도를 가진 개체가 높은 확률로 다음 세대에 전달되며, 해당 단계는 재생산과정 이후에도 동일

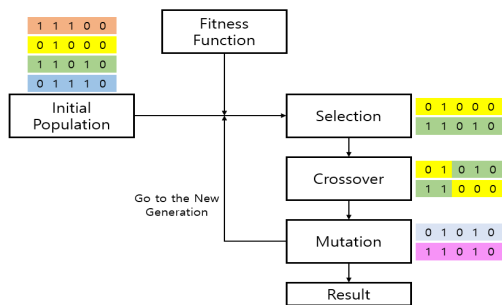


Fig. 4. Structure of genetic algorithm (Kwak, 2008)

하게 진행된다.

$$aX_1 + bX_2 + cX_3 + dX_4 + eX_5 + fX_6 = Y \quad (4)$$

여기서 a, b, c, d, e, f 는 유전 알고리즘을 통해 산정하고자 하는 각 독립변수별 계수, X_i 는 독립변수, Y 는 종속변수를 의미한다.

2.5.3 재생산

재생산(reproduction) 단계는 기존 세대의 유전자를 바탕으로 새로운 세대의 개체들을 생성하는 과정이며 선택, 교배, 돌연변이 등의 세부단계로 구성된다.

- ① 선택(selection): 적합도가 높은 개체들을 우선적으로 선택한다. 적합도를 확률로 사용하여 개체를 선택하며, 개체가 높은 적합도를 가질수록 다음 세대에 전달될 확률이 상승
- ② 교배(crossover): 두 개체의 유전자를 교차하여 새로운 개체를 생성하는 과정
- ③ 돌연변이(mutation): 개체의 유전자에 무작위 변화를 주어 다양성을 유지하는 방법으로, 주어진 돌연변이 확률에 따라 유전자의 값을 무작위로 생성

2.5.4 평가

평가(evaluation) 단계에서는 현재 세대의 최적 개체를 찾고, 종료 조건을 만족하는지 확인한다. 본 연구에서는 각 세대의 최적 개체와 그 적합도를 출력하고, 적합도의 변화를 그래프로 시각화 한 후 500세대동안 적합도의 변화가 없을 경우 알고

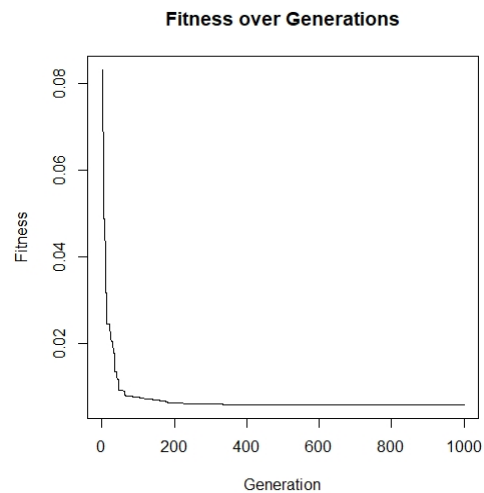


Fig. 5. Curve of fitness over generations

리즘을 종료하였다. 종료조건을 만족하지 않을 경우에는 다음 세대로 넘어가 앞의 과정을 반복하였으며, 본 연구에서 알고리즘의 구동에 따른 세대별 적합도의 변화를 Fig. 5와 같이 나타내었다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 기상인자별 최적의 가중치 선정

본 연구에서는 국내 가뭄 피해 자료를 이용하여 유전 알고리즘을 통하여 선정된 종속변수에 있어 각 독립변수가 차지하는 최적의 계수를 선정하고, 가뭄의 경향을 가장 정확하게 따라가는 최적의 선형 함수식을 찾자 하였다. 도출한 선형 함수식으로 계산되는 지수를 이용하여 기존 국내의 가뭄을 표현하던 SPI의 한계점을 개선하고, 한국에서 발생하는 기상학적 가뭄의 강도를 더욱 정확하게 표현할 수 있는 가뭄지수를 정의하고자 하였다.

2007년부터 2022년까지 발생한 피해자료를 기반으로 유전 알고리즘의 독립변수 및 종속변수를 월단위로 구축하여

Table 6. Optimal coefficients calculated by genetic algorithm

Temperature (a)	Precipitation (b)	Wind speed (c)	Humidity (d)	Vapour pressure (e)	Spot atmospheric pressure (f)
0.0005	0.0003	0.0022	0.0044	0.0022	0.0018

Table 7. Criteria of drought severity using DSCI

Classification	Criteria of severity by DSCI
Attention (Blue)	$DSCI < 0.0052$
Caution (Yellow)	$0.0052 \leq DSCI < 0.0057$
Warning (Orange)	$0.0057 \leq DSCI < 0.0062$
Serious (Red)	$0.0062 \leq DSCI$

Table 8. Comparison of normalized actual damage index and calculated DSCI

Normalized Damage Index	Class	DSCI	Class	Absolute Deference	Class Deference
0.0060	4	0.0068	4	0.0008	0
0.0031	4	0.0064	4	0.0033	0
0.0018	3	0.0064	4	0.0047	1
0.0036	4	0.0049	1	0.0013	3
0.0057	4	0.0062	4	0.0006	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

입력자료로 활용하였다. 유전 알고리즘을 통하여 산정한 기상인자별 계수는 기존에 피해가 다수 발생한 지역에 동일하게 적용할 수 있으며, 최종적으로 도출된 계수를 Table 6와 같이 나타내었다.

분석 결과 일반적으로 물의 저장량과 연결되는 누적강수량에 비해 증발산량 산정 인자인 풍속, 습도, 현지기압이 가뭄에 영향을 다른 기상인자에 비해 크게 가지는 것으로 확인되었다. 풍속, 습도, 현지기압은 물의 증발산량과 관련이 있는 인자이며, 이는 가뭄이 물의 절대적인 저장량보다는 증발산량의 영향을 크게 받는다는 것을 의미한다.

또한, 도출된 계수와 상관계수가 일관되지 않은 점을 확인하였다. 이는 상관분석과 유전 알고리즘의 목적이 다르기 때문인 것으로 판단된다. 피어슨 상관계수는 비교하고자 하는 두 변수간의 선형관계 추정함으로 써 자료 내의 패턴을 탐색할 때 주로 사용된다. 반면 유전 알고리즘은 주어진 문제의 최적의 해를 찾기 위한 휴리스틱 방법론으로, 입력자료가 비선형 관계일 때에도 가장 최적의 해를 찾는다. 해당 현상은 입력자료로 사용한 기상인자와 피해자료가 비선형성을 가진다는 의미이며, 이에 따라 상관계수와 일관되지 않은 계수가 도출된 것이다.

본 연구에서 도출한 각 기상인자별 계수는 0.01 미만의 작은 값을 가진다. 본 연구에서 사용된 종속변수는 비상급수의 대상인원을 정규한 값으로, 해당 값의 최대값과 최소값의 차이가 상당히 크고, 값의 불균형이 심하기 때문이다. 정규화된 피해자료는 일부 비상급수 사상을 제외하면 대부분 0.01 미만의 작은 값으로 구성되어 있기 때문에 기상인자별 계수 또한 이에 맞추어 작은 값이 선정된 것으로 판단된다.

3.2 DSCI를 활용한 가뭄의 강도 분류 기준 설정

현재 국내에서는 기상학적 가뭄의 강도 분류 기준에 SPI 값을 사용하여 관심, 주의, 경계, 심각 4단계로 예·경보를 발령한다. 따라서 기상인자에 따른 가뭄의 강도를 의미하는 DSCI를 4단계로 분류하기 위하여 누적 분포 함수(Cumulative Distri-

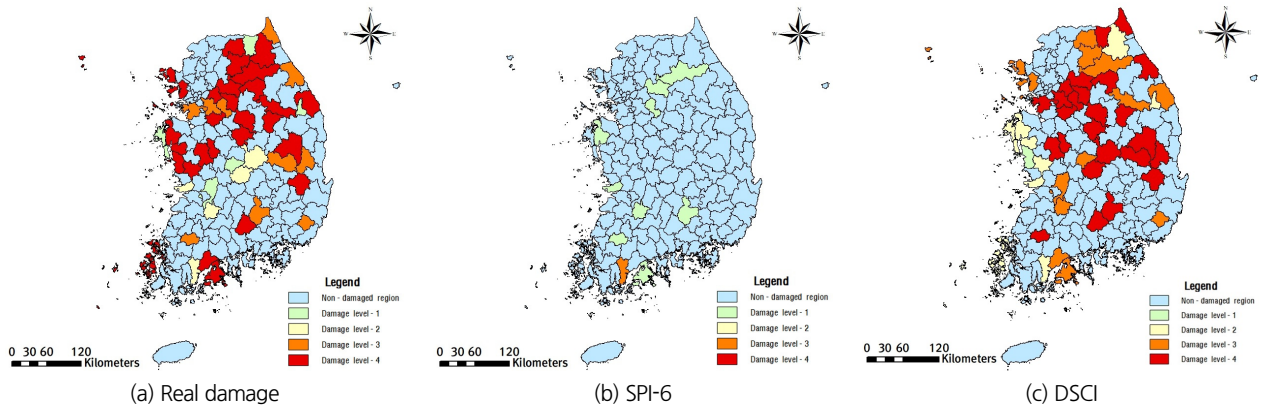


Fig. 6. Comparison between DSCI-Based and SPI-Based warning methodologies

bution Function, CDF)의 25%, 50%, 75%를 경계로 분류하여 가뭄의 단계를 정의하였으며, 해당 기준을 기상학적 가뭄의 강도 기준으로 제시한다(Table 7).

최종적으로 정규화 후 종속변수로 사용한 실제 피해지표와 DSCI를 비교하여 Table 8과 같이 나타내었다.

DSCI와 실제 피해지표를 비교한 결과 모든 비상급수 사상에 대한 절대오차평균(MAE)은 0.0083으로 Table 7에서 제시한 기준과 같이 확인하였을 때 비교적 큰 값이 나오는 것으로 확인되었다. 그러나 실제 가뭄의 강도를 나타내는 지표와 DSCI를 Table 7에서 제시한 기준으로 분류한 단계 사이의 MAE는 0.97로, 실제 가뭄의 피해 단계를 DSCI가 잘 나타내는 것으로 확인되었다. DSCI는 가뭄이 발생하기 이전 3개월동안의 기상 관측 자료를 이용하여 산정되므로, 실시간으로 관측되는 기상인자들을 활용하여 DSCI를 산정한다면 기존의 기상학적 가뭄의 예·경보 기준보다 정확한 예·경보를 할 수 있을 것으로 판단된다.

DSCI의 적용성을 평가하기 위하여 비상급수 실행이력이 199개로 가장 많은 2017년 6월을 대상으로 실제 발생한 가뭄의 크기, 대상기간에 산정된 SPI 값, DSCI로 분류하는 가뭄의 크기를 비교하였다.

2007년부터 2022년까지 발생한 비상급수 피해자료를 이용하여 시·군단위로 월별 비상급수 대상인원을 산정하였다. 산정한 월별 비상급수 대상인원을 25%단위로 범주화하여 1~4단계로 가뭄의 강도를 분류하였으며, 그 기준은 32명, 68명, 177명으로 확인되었다. 해당 기준을 적용하여 가뭄 피해가 가장 많이 발생한 2017년 6월의 지역별 가뭄피해 분포를 확인하였다(Fig. 6).

분석 결과 가뭄의 강도를 나타내는 대상인원의 경향을 SPI-6 기반의 기존 예·경보 기준에 비해 DSCI를 이용하여 정의한 가뭄의 단계가 실제 가뭄피해의 분포와 더 유사한 것으로 확인

되었으며, 가뭄피해가 발생하였음에도 예·경보가 발령되지 않던 기존 예·경보 기준의 문제점이 개선되었다. 그러나 DSCI가 일부 지역에 위치한 가뭄의 단계를 분류하는데 있어서 정확도가 떨어지는 결과를 확인하였다. 이는 가뭄에 따른 비상급수는 기상학적 인자로만 결정되는 것이 아니라는 뜻이다. 보다 정확한 가뭄지수를 정의하기 위해서는 기상학적 가뭄뿐 아니라 농업적, 수문학적 등의 가뭄 유형을 모두 포괄하는 종합적인 변수를 구축하여야 한다는 결론을 내렸다. DSCI는 선형함수의 형태를 가지며, 자연재난이 가지는 특징중 하나인 불규칙성에 따라 가뭄의 실제 피해 강도를 정확하게 재현하는 것은 어렵다는 점에서 한계를 가진다. 또한, 지역별 피해자료를 기반으로 최적화한 계수이기 때문에 피해이력이 없는 지역에는 적용하기 어렵다는 문제점이 있으며, 이러한 한계점들은 추후 연구에서 다뤄야 할 중요한 논제이다. 본 연구에서 제시하는 DSCI는 기존의 SPI-6에 따른 예·경보 기준의 한계점을 극복하여 개선된 결과를 얻을 수 있을 것으로 확인된다.

4. 결론

본 연구에서는 강수량만을 인자로 사용하는 기존 SPI의 한계점을 개선한 새로운 DSCI를 정의하고자 하였다. 현재 국내에서는 기상학적 가뭄의 강도 분류 기준으로 SPI-6을 사용하고 있다. 그러나 SPI는 강수량만을 인자로 활용하여 가뭄에 대한 여러 대응이 이루어진 현 시점에서 가뭄의 강도를 분류하는데 한계점이 있다. 실제로 피해가 발생하였음에도 가뭄에 대한 예·경보가 발령되지 않은 사례가 상당히 많은 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 기존 SPI의 한계점을 극복한 DSCI를 새로 정의하여 기상학적 가뭄의 강도를 분류하는 기준을 수립하였으며, 주요 결론을 아래와 같이 정리하였다.

- 1) 가뭄을 나타낼 수 있는 기상학적 인자들 중 실질적으로 가뭄의 강도에 영향을 크게 가지는 인자는 풍속, 습도, 증기압, 현지기압 등으로, 가뭄에는 강수량보다 증발산량이 큰 영향을 가진다.
- 2) 가뭄의 피해자료와 기상학적 인자들은 비선형성을 가진 인자로, 이를 고려하여 가뭄 지수를 정의하여야 한다.
- 3) 본 연구에서 제시하는 DSCI를 사용할 경우 기존에 기상학적 가뭄을 표현하던 SPI를 이용한 가뭄 예·경보 기준보다 정확하게 가뭄의 강도를 분류할 수 있다.
- 4) 비상급수는 기상학적 인자만 이용할 경우 정확한 분류에 있어 한계가 있으며 농업적, 수문학적 가뭄 등 다른 종류의 가뭄에 영향을 가지는 인자들을 종합적으로 고려한 가뭄 지수가 필요하다.
- 5) 기상학적 인자들만을 사용하여도 실제 가뭄의 피해를 일정 수준까지 재현하는 것이 가능하다.

그러나 재해의 특성상 발생하는 강도 단계가 불균형하고 기상인자에 따라 발생하는 재해의 강도가 상당히 불규칙적인 부분이 있기 때문에 유전 알고리즘을 통해 산정한 계수를 적용한 함수식으로 실제로 발생한 재해의 강도를 정확하게 분류하는 것은 한계점이 있다. 또한, 가뭄에 대한 여러 대응이 이루어진 현 시점에 기상학적 인자들이 가뭄에 미치는 영향력이 상대적으로 떨어지는 지역의 경우 분류한 재해 강도의 정확도가 떨어지는 문제점이 있다. 이는 가뭄의 강도를 정의할 때 기상학적 인자 뿐만 아니라 농업적, 수문학적 인자들을 추가적으로 고려해야 한다는 것을 의미한다. 이러한 한계점 및 문제점들은 추후 연구에 있어 중요한 해결과제가 될 것이다.

본 연구에서 제시하는 DSCI를 사용하면 3개월 단위의 실시간 기상관측값을 활용하여 앞으로 일어날 가뭄의 강도를 분류할 수 있다. 가뭄 발생 이전의 실 관측값에 계수를 적용하여 산정하기 때문에 SPI보다 산정이 간단하면서도 기존의 강도 분류 기준보다 정확한 분류를 할 수 있다는 강점이 있다. 이를 통하여 가뭄의 대응 단계에 있어 신속한 의사결정을 지원할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 자연재난 정책연계형 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(2022-MOIS35-005).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Reference

- Agricultural Drought Management System (ADMS) (2023). Drought warning, accessed 4 July 2023, <<https://adms.ekr.or.kr/baseInfo/baseInfo2Main.do>>
- Aon (2021). *Weather, climate & catastrophe insight*. 2018 Annual Report, London, UK.
- Bae, S.J., Lee, S.H., Yoo, S.H., and Kim, T.G. (2018). "Analysis of drought characteristics using time series of modified SPEI in South Korea from 1981 to 2010." *Water*, Vol. 10, No. 3, 327.
- Choi, H.S., and Kim, S.M. (2009). "Definition of drought disaster, defining conceptualizing and clarifying." *Water and Future: Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 12, pp. 90-99.
- Cohen, I., Huang, Y., Chen, J., and Benesty, J. (2009). "Pearson correlation coefficient." *Noise Reduction in Speech Processing*, Springer, Germany, pp. 1-4.
- Farahmand, A., AghaKouchak, A., and Teixeira, J. (2015). "A vantage from space can detect earlier drought onset: An approach using relative humidity." *Scientific Reports*, Vol. 5, No. 1, 8553.
- Holland, J.H. (1975). *Adaptation in natural artificial systems*. The MIT Press, MA, U.S., pp. 1-19.
- Kim, D.H., Lee, J.S., Kim, J.S., Lee, M.J., Wang, W.J., and Kim, H.S. (2022). "Comparative analysis of long short-term memory and storage function model for flood water level forecasting of Bokha stream in NamHan River, Korea." *Journal of Hydrology*, Vol. 606, 127415.
- Kim, H.S., Park, J.Y., Yoo, J.Y., and Kim, T.W. (2015a). "Assessment of drought hazard, vulnerability, and risk: A case study for administrative districts in South Korea." *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 9, No. 1, pp. 28-35.
- Kim, S.D., Kim, B.K., Ahn, T.J., and Kim, H.S. (2011). "Spatio-temporal characterization of Korean drought using severity - area - duration curve analysis." *Water and Environment Journal*, Vol. 25, No. 1, pp. 22-30.
- Kim, S.J., Kim, H.S., Kwak, J.W., Kim, Y.S., Noh, H.S., and Lee, J.S. (2015b). "Analysis of drought length using the BDS statistic and close returns test." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 19, No. 2, pp. 446-455.
- Kim, S.J., Kwak, J.W., Noh, H.S., and Kim, H.S. (2014). "Evaluation of drought and flood risks in a multipurpose dam under climate change: A case study of Chungju Dam in Korea." *Natural Hazards*, Vol. 73, No. 3, pp. 1663-1678.
- Kim, S.W., and Kim, H.S. (2007a). "Neural network-genetic algorithm model for modeling of nonlinear evaporation and evapotranspiration time series 1. Theory and application of the

- model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 1, pp. 73-88.
- Kim, S.W., and Kim, H.S. (2007b). "Neural network-genetic algorithm model for modeling of nonlinear evaporation and evapotranspiration time series 2. Optimal model construction by uncertainty analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 1, pp. 89-99.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2023a). Drought warning, accessed 4 July 2023, <<https://hydro.kma.go.kr/frontHelp/menu1180.do>>.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2023b). Ground meteorological station, accessed 4 July 2023, <<https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltmList.do?pgmNo=36>>.
- Kwak, J.W. (2008). *A study on the parameter calibration of flood forecasting models*. Master Thesis, Inha University, pp. 1-114.
- Kwak, J.W., Joo, H.J., Jung, J.W., Lee, J.S., Kim, S.J., and Kim, H.S. (2021). "A case study: Bivariate drought identification on the Andong dam, South Korea." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 35, No. 209, pp. 549-560.
- Kwak, J.W., Kim, S.J., Jung, J.W., Singh, V.P., Lee, D.R., and Kim, H.S. (2016a). "Assessment of meteorological drought in Korea under climate change." *Advances in Meteorology*, Vol. 2016, pp. 1-13.
- Kwak, J.W., Kim, S.J., Kim, D.G., Singh, V.P., and Kim, H.S. (2014). "Hydrological drought analysis in Namhan River basin, Korea." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 19, No. 8, 05014001.
- Kwak, J.W., Kim, S.J., Kim, G.H., Singh, V.P., Park, J.S., and Kim, H.S. (2016b). "Bivariate drought analysis using streamflow reconstruction with tree ring indices in the Sacramento Basin, California, USA." *Water*, Vol. 8, No. 122, pp. 1-16.
- Kwak, J.W., Kim, S.J., Singh, V.P., Kim, H.S., Kim, D.G., Hong, S.J., and Lee, K.H. (2015). "Impact of climate change on hydrological droughts in the upper Namhan River basin, Korea." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 19, No. 2, pp. 376-384.
- Kwon, M., Jun, K., Hwang, M., and Kim, T. (2015). "Assessment of meteorological drought using cumulative severity of daily standardized precipitation index." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 2, pp. 123-131.
- McKee, T., Doesken, N., and Kleist, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration to time scales." *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, AC, CA, U.S., Vol. 17, No. 22, pp. 179-183.
- Merabtene, T., Kawamura, A., Jinno, K., and Olsson, J. (2002). "Risk assessment for optimal drought management of an integrated water resources system using a genetic algorithm." *Hydrological Processes*, Vol. 16, No. 11, pp. 2189-2208.
- Mishra, A.K., and Singh, V.P. (2010). "A review of drought concepts." *Journal of Hydrology*, Vol. 391, No. 1-2, pp. 202-216.
- Naresh Kumar, M., Murthy, C.S., Sessa Sai, M.V.R., and Roy, P.S. (2009). "On the use of Standardized Precipitation Index (SPI) for drought intensity assessment." *Meteorological Applications: A Journal of Forecasting, Practical Applications, Training Techniques and Modelling*, Vol. 16, No. 3, pp. 381-389.
- National Disaster Management Research Institute (NDMI) (2017). *Development of assessment techniques for drought forecasting-warning information (I)*. 2017 Annual Report.
- National Drought Information Portal (NDIP) (2023). Drought response, accessed 4 July 2023, <https://www.drought.go.kr/menu/m60/m61_1.do>.
- Wilhite, D.A. (2000). "Drought as a natural hazard: Concepts and definitions." *Drought Mitigation Center Faculty Publications*, National Drought Mitigation Center, London, UK, pp. 3-18.
- Yoo, J.Y., Kim, D.H., Kim, H.S., and Kim, T.W. (2016). "Application of copula functions to construct confidence intervals of bivariate drought frequency curve." *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 11, pp. 113-122.
- Yoo, J.Y., Park, J.Y., and Kim, T.W. (2010). "Comparative analysis of drought characteristics considering various drought definitions." *Journal of Korea Water Resources Association Conference*, pp. 367-371.
- Zhang, Q., Li, J., Singh, V.P., and Bai, Y. (2012). "SPI-based evaluation of drought events in Xinjiang, China." *Natural Hazards*, Vol. 64, pp. 481-492.