가뭄지표를 활용한 지역별 가뭄 상관성 분석

Analysis of Regional Drought Correlation Using Drought Indicators

김하룡* · 장현휘** · 조지현*** · 주진걸****

Kim, Hayong*, Zhang, Xuanhui**, Cho, Ji Hyun***, and Joo, Jingul****

Abstract

The distribution of water resources between regions should be considered along with various conditions in establishing long-term drought measures. Therefore, analysis of the correlation of drought occurrence by region is essential. In this study, three drought indexes, SPI, GEI, and SPEI, were calculated in major cities, and the regional drought was compared. The drought status by region was compared using the incidence ratio by drought depth, Pearson correlation coefficient. The closer the distance, the higher the correlation between drought indicators. As a result of this study, it is expected that the inter-regional drought correlation analysis can be used to cope with long-term drought.

Key words : Drought, SPI, GEVI, SPEI, Correlation Coefficient

요 지

장기적 가뭄대책 수립을 위해서는 다양한 여건이 반영되어야 하지만, 광역간 물 이용량 배분 및 가뭄시 지역간 자원 배분의 문제도 고려되어야 한다. 따라서 지역별 가뭄발생의 상관성에 대한 분석이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 주요 도시에서 SPI, GEVI, SPEI 등 3개 가뭄지수를 산정하고, 6개 도시에서 지역별 가뭄을 비교하였다. 가뭄 심도별 발생비율, 피어슨 상관계수를 사용하여 지역별 가뭄 현황을 비교하였다. 분석결과 거리가 가까울수록 가뭄지표간 상관성이 높은 것으로 나타났다. 본 연구의 결과인 지역간 가뭄상관성 분석이 장기가뭄 대책에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 가뭄, SPI, GEVI, SPEI, 상관계수

1. 서 론

단기간에 인명 및 재산피해가 집중되는 태풍, 폭우 및 지진 등의 자연재해와 달리 가뭄은 광범위한 지역에 서서히, 장기간 발생하여 피해를 누적시키는 특징이 있다. 우리나라의 경우 연 강수량이 1,300 mm 내외로 비교적 강수량이 풍부한 편이나, 강수의 절반 이상이 여름철 우기에 집중되어

겨울 이후 이듬해 봄까지는 매년 강수량 부족을 겪고 있는 실정이다. 특히 여름철 강수량이 적어 댐 및 저수지의 저수량이 부족하지 않은 해에는 가뭄으로 인한 피해가 심각해진다 (Kim et al., 2016). 최근에는 거의 매년 가뭄피해가 발생하고 있으며, 2016년 이후 전국의 가뭄피해 면적은 약 75,162 ha에 달하는 것으로 나타났다.

가뭄은 서서히 진행되어 그 시작을 정확하게 인지하기

*정회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 건설환경연구실 책임연구원(E-mail: civilkhy@lh.or.kr)

Member, Assistant Fellow, Department of Construction Environment Research Land & Housing Institute

**동신대학교 토목환경공학과 박사(E-mail: xuanhui8468@naver.com)

Ph.D., Department of Civil Environmental Engineering, Dongshin University

***동신대학교 사회복지학과 조교수

Assistant Professor, Dept. of Social Welfare, Dongshin University

****교신저자, 정회원, 동신대학교 토목환경공학과 부교수(Tel: +82-61-330-3137, Fax: +82-61-330-3138, E-mail: jgjoo@dsu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Civil Environmental Engineering, Dongshin University

어려울 정도이나, 일반적으로는 장기간에 걸친 강우의 부족과 이로 인한 가뭄 수자원의 부족으로 정의한다(Kim et al., 2010; Kim et al., 2013). 가뭄은 광범위한 지역에서 막대한 재산피해를 발생시키며, 다른 분야에 미치는 영향도 커, 가뭄 모니터링 및 예측(Svoboda et al., 2002; Burke et al., 2006; Sheffield and Wood, 2008)과 가뭄평가를 위한 다양한 연구가 진행되고 있다(Heim, 2002; Keyantash and Dracup, 2002).

가뭄관련 초기의 연구들은 가뭄을 정의하고, 가뭄의 심도를 평가하고자 하였다. Palmer (1965), McKee et al. (1993), Wang et al. (2012), Vicente-Serrano et al. (2010) 등은 강수량의 부족이라는 가뭄의 1차적인 특징을 사용하여 가뭄을 평가하고자 하였으며, 강우량과 연관된 가뭄평가지수를 개발하였다. 이후 저수지 저류량 등 인위적인 물공급 시스템(Shafer and Dezman, 1982; Kwon et al., 2006) 및 농업 등 식물의 생육조건과 연관된 토양수분조건(Yoo et al., 2006)을 반영한 가뭄지수가 개발되었다. 각각의 목적에 따라 개발된 다양한 가뭄지수가 지역의 여건에 따라 다양한 지역에서 활용되고 있다(Kim et al., 2012). Kim et al. (2017), Lee et al. (2016) 등은 가뭄지수와 식생지수 및 현장가뭄간의 상관성을 비교하였으며, Zhang et al. (2019)은 동일한 지역에서 산정한 가뭄지수간 상관성 분석을 수행하였다.

최근에는 광역적으로 발생하는 가뭄의 공간적 특성을 파악하기 위하여 가뭄의 심도와 범위를 동시에 평가하고자 하는 연구들이 수행되었다. 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function)를 사용하여 가뭄의 공간적인 분포를 분석하였으며, 가뭄심도-가뭄면적-가뭄지속기간 곡선과 경험적 직교방법을 사용하여 가뭄의 심도를 정량화하였다(Dai et al., 1998; Cook et al., 1999; Hisdal and Tallaksen, 2003; Kim et al., 2006; Kyoung et al., 2007; Ganguli and Reddy, 2012; Yoo et al., 2013; Halwatura et al., 2015; Yoo et al., 2015; Yu et al., 2016). 최근에는 3차원 시공간적 해석을 사용하여 가뭄을 특성화하려는 연구가 진행되고 있다(Sheffield et al., 2009; Wang et al., 2011; Xu et al., 2015; Liu et al., 2019).

가뭄의 심도 및 범위를 평가하고, 이에 맞춘 대책을 수립하기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔다. 기존의 연구들은 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function)나 군집분

석을 활용한 가뭄의 공간적 분포, 코폴라 함수를 이용한 지역별 위험성 분석 등을 통해 특정 가뭄사상에 대한 공간상의 연계성 및 가뭄 위험성의 공간적 분포를 보여주고 있다. 그러나 여러 지역에서 가뭄의 동시 발생여부에 대한 전반적인 패턴을 보여주기에는 부족하며, 특히 다양한 가뭄 지수를 사용하여, 지역간의 가뭄 상관성을 분석한 연구는 부족한 실정이다. 이에 본 연구는 강수량을 이용한 가뭄지수인 SPI, GEVI, SPEI를 사용하여 지역별 가뭄을 비교하고자 한다. 이를 위해, 서울, 대전, 대구, 부산, 광주, 강릉 등 6개 도시에서 월 강우를 사용하여 3가지 방법(SPI, SPEI, GEVI)의 가뭄지수를 산정하여 가뭄을 평가하고, 각 지역간 가뭄발생 특성을 정량적으로 비교하였다.

2. 연구방법

2.1 가뭄지수 산정방법

6개 지역의 가뭄을 비교하기 위하여 강우와 증발산량의 시계열 자료만으로 가뭄의 심도를 평가하는 지수들을 분석에 사용하였다. McKee et al. (1993)이 제안한 이후 다양한 연구에서 활용되고 있는 Standard Precipitation Index (SPI), SPI에 기반하여 강우 분포형을 GEV 분포로 변경한 Wang et al. (2012)의 Generalized Extreme Value Index (GEVI), SPI에 증발산량을 추가로 고려하여 가뭄을 평가한 Vicente-Serrano et al. (2010)의 Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) 등 3개 가뭄지수를 사용하여 지역 간 가뭄비교에 활용하였다.

Table 1은 3개 가뭄지수의 가뭄분류 기준을 나타낸다. SPI는 가뭄을 3단계로 나누었으나, GEVI, SPEI는 4단계로 구분하였다. 이에 본 연구에서는 Zhang et al. (2019)의 연구와 마찬가지로, SPI에 한 단계를 추가하여 가뭄 등급을 4단계로 구분하여 가뭄지수 간 비교를 수행하였다.

2.2 대상지역

서울, 대전, 대구, 부산, 광주, 강릉 등 전국 6개 도시를 대상으로 도시 간 가뭄심도를 비교하였다. Fig. 1은 대상 지역의 위치를 나타내며, Table 2는 각 도시의 분석에 사용된 강우관측기간과 해당 기간 동안의 연평균 강수량을 나타낸다.

Table 1. Drought Classification Criteria by Drought Index (Zhang et al., 2019)

	SPI		GEVI	SPEI
	McKee et al. (1993)	This study		
SLD	-1.49 ~ -1.0	-0.99 ~ -0.50	-0.15 ~ 0.36	-0.99 ~ -0.50
MD		-1.49 ~ -1.00		-1.49 ~ -1.00
SD	-1.99 ~ -1.50		-1.32 ~ -1.00	-1.99 ~ -1.50
ED	Less than -2.0		Less than -1.33	Less than -2.0

Table 2. Rainfall Monitoring Record by 6 Gauge Stations

Gauge Station	Rainfall Observation Period	Average Annual Precipitation (mm)
Seoul	1908.01 ~ 2017.12 (110 year)	1,276.8
Daejeon	1969.01 ~ 2017.12 (49 year)	1,353.3
Daegu	1909.01 ~ 2017.12 (109 year)	1,013.5
Busan	1908.01 ~ 2017.12 (110 year)	1,453.7
Gwangju	1940.01 ~ 2017.12 (78 year)	1,323.9
Gangneung	1912.01 ~ 2017.12 (106 year)	1,339.0

Fig. 1. Location of 6 Gauge Stations Used

2.3 지역별 상관성 분석 방법

2가지 기준을 사용하여 6개 도시 사이의 가뭄 상관성을 분석하였다. 첫째는 지역별 가뭄발생일수이며, 둘째는 가뭄지수의 상관성이다. 가뭄발생일수는 전체 분석기간 중 SPI, GEVI, SPEI 등 3가지 가뭄지수를 산정한 후 Slight Drought, Moderately Drought, Severely Drought, Extremely Drought 등 가뭄 심도별로 해당하는 기간의 비율로 평가하였다. 가뭄지수의 상관성은 2개 도시씩 묶어 동일한 방법으로 산정한 가뭄지수값 사이의 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient)로 산정하였다.

3. 지역별 가뭄지수 결과비교

3.1 지역별 가뭄심도별 가뭄지수에 따른 가뭄발생일수 비교

SPI, GEVI, SPEI 등 3개 가뭄지수를 사용하여 6개 도시에

서의 가뭄심도별 가뭄 발생일수를 비교하였다(Figs. 2, 3, 4). 각 도시별 관측기간이 상이해, 가뭄발생일수는 전체 관측기간 대비 심도별 가뭄발생일수의 비율로 비교하였다. 육각형에 실제 도시의 위치와 유사하게 서울, 강릉, 대구, 부산, 광주, 대전의 가뭄 발생일수를 시계방향으로 배치하여 지역별 가뭄일수를 직관적으로 비교할 수 있도록 하였다. 가장 바깥쪽 육각형은 Slight Drought (SLD) 이상의 가뭄발생일수를 나타내며, 안쪽으로 들어가며 Moderately Drought (MD), Severely Drought (SD), Extremely Drought (ED) 등 가뭄의 심도가 깊음을 나타낸다.

SPI 지수로 분석한 결과 가뭄 지속기간이 길수록(장기가뭄일수록), 가뭄의 심도가 깊을수록(Extremely drought), 6개 도시를 상징하는 육각형이 모습이 찌그러진 모습을 하는 것으로 나타났다. 정육각형에 가까울수록 각 도시간 가뭄 발생일수가 비슷하며, 찌그러진 모습일수록 지역별 가뭄의 격차가 크게 나타남을 의미한다. 지역별로는 서울은 단기, 중기, 장기 가뭄 모두에서 다른 도시에 비하여 전반적으로 가뭄일수가 적은 것으로 나타났다. 광주는 단기, 중기, 장기 가뭄 모두에서 가뭄의 심도가 낮은 SLD와 MD의 발생일수는 타 도시에 비해 많지 않으나, 가뭄의 심도가 깊은 SD, ED에서 타 도시에 비해 가뭄 일수가 많은 것으로 나타났다. 세부적으로 단기가뭄 SPI-3에서는 서울이 모든 가뭄심도에서 가뭄일수가 적게 나타났고, 낮은 심도는 부산, 중간심도는 강릉, 깊은 심도는 광주가 가뭄일수가 많은 것으로 나타났다. 중기가뭄 SPI-6, 9에서는 서울이 SLD와 MD에서 가뭄일수가 적게 나타났고, 대전과 부산이 ED이 적은 것으로 나타났다. 광주는 SD와 ED의 발생일수가 많았다. 장기가뭄 SPI-12에서도 서울이 SLD와 MD에서 가뭄일수가 적게 나타났고, 광주는 SD와 ED의 발생일수가 많았다.

GEVI 지수도 가뭄 지속기간이 길수록(장기가뭄일수록), 가뭄의 심도가 깊을수록(Extremely drought), 6각형이 찌그러진 모습을 하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 SPEI에서도 동일하게 나타났다. GEVI 지수에서는 단기와 중기의 얇은 심도가뭄에서 강릉과 대전이 가뭄일수가 적게 나타났으며, 서울과 광주는 장기의 얇은 심도가뭄에서 가뭄일수가 적게 나타났다. SPI와 달리 GEVI-9에서는 서울이 SD와

Fig. 2. Comparison of Drought in 6 Cities (SPI)

Fig. 3. Comparison of Drought in 6 Cities (GEVI)

Fig. 4. Comparison of Drought in 6 Cities (SPEI)

Table 3. Correlation Coefficient of Six Cities

Index	City	Seoul	Busan	Daegu	Daejoen	Gwangju	Gangneung
SPI	Seoul	1	0.254	0.354	0.438	0.376	0.146
	Busan	-	1	0.768	0.460	0.639	0.421
	Daegu	-	-	1	0.672	0.748	0.532
	Daejoen	-	-	-	1	0.673	0.431
	Gwangju	-	-	-	-	1	0.487
	Gangneung	-	-	-	-	-	1
GEVI	Seoul	1	0.256	0.385	0.468	0.408	0.209
	Busan	-	1	0.766	0.380	0.587	0.452
	Daegu	-	-	1	0.619	0.694	0.594
	Daejoen	-	-	-	1	0.621	0.398
	Gwangju	-	-	-	-	1	0.495
	Gangneung	-	-	-	-	-	1
SPEI	Seoul	1	0.271	0.390	0.451	0.408	0.188
	Busan	-	1	0.775	0.462	0.639	0.431
	Daegu	-	-	1	0.661	0.745	0.546
	Daejoen	-	-	-	1	0.678	0.424
	Gwangju	-	-	-	-	1	0.490
	Gangneung	-	-	-	-	-	1

ED의 발생일수가 많았다. GEVI-12에서는 광주가 가뭄이 심한 것으로 나타났다.

SPEI에서도 얇은 가뭄에서는 서울의 발생일수가 적게 나타났다. 다만, SPEI-6, 9, 12의 가뭄 심도가 깊은 SD, ED에 서울의 가뭄일수가 많은 것으로 나타났다. 증발산량을 고려할 경우 서울의 장기가뭄 위험성이 높은 것으로 분석된다. 또한 심도가 얇은 가뭄에서는 부산과 대구, 광주에서 가뭄발생일수가 많은 것으로 나타났다.

3.2 가뭄 지수별 상관성 분석

세 가지 가뭄지수를 사용하여 지역 간 상관성을 알아보기 위해 동일한 기간에 산정된 가뭄지수값 간 피어슨 상관계수를 산정하였다(Table 3). 지역 간 가뭄지수 상관성 분석 결과 두 도시간 거리가 가뭄의 상관성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, SPI, GEVI, SPEI 모두에서 대구와 부산 사이의 가뭄상관성이 가장 높은 것으로 나타났다. 대구-부산은 본 연구에서 상관성을 분석한 6개 도시 중 가장 가까이 위치하는 도시이다. 광주-대구가 그 뒤를 이었으며, 대전-광주와 대전-대구도 도시 간 가뭄상관성이 높게 나타났다. 즉, 대구를 중심으로 거리가 가까운 지자체인 부산, 광주, 대전이 상관성이 비교적 높은 것으로 나타났으며, 서울과 강릉은 다른 도시와의 가뭄상관성이 낮은 것으로 나타났다. 특히, 서울과 강릉은 대전-광주와 대전-대구보다 거리가 가까웠으나, 가뭄 상관성은 낮게 나타났다. 거리뿐만 아니라 지형, 기후 등이 가뭄 상관성에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한, SPI, GEVI, SPEI 지수별 가뭄 발생일수, 가뭄 심도의 비율 등은 차이 있었으나, 지역별 상관성을 계산할 때는 모두 동일한 패턴을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 지역별 가뭄 상관성 검토를 목적으로 가뭄지수 값을 산정하고 정량적인 값을 상호비교 하였다. 이를 위해, 서울, 대전, 대구, 부산, 광주, 강릉 등 6개 도시에서 SPI, GEVI, SPEI 등 3개 가뭄지수값을 산정하고, 이를 기반으로 도시별 가뭄 발생일수 및 가뭄지수의 상관성을 분석하였다. 가뭄발생일수는 가뭄지표에 따라 다소간 차이가 발생하였다. 다만, 광주는 가뭄지표, 가뭄기간과 무관하게 가뭄이 타 도시에 비해 심한 경향이 나타났다. 또한, 서울은 강수량으로 판단한 SPI, GEVI에서는 가뭄일수가 적었으나, 증발산량을 고려할 경우 심도가 깊은 가뭄이 타 지역보다 많이 발생하는 것으로 나타났다.

도시간 가뭄지수 상관성 분석에서는 SPI, GEVI, SPEI 등 가뭄지수의 종류에 상관없이 대구를 중심으로 거리가 가까운 도시인 부산과 대전, 광주의 상관성이 높은 것으로 나타났다. 서울과 강릉은 거리와 무관하게 다른 도시들과는 가뭄 상관성이 낮게 나타났다. 이러한 결과들은 기존의 경험

적 직교함수(Empirical Orthogonal Function)나 군집분석을 활용한 가뭄의 공간적 분포, 코폴라 함수를 이용한 지역별 위험성 분석 등의 선행연구와는 다른 양상을 나타내고 있다. 기존의 연구들은 특정 가뭄사상에 대한 공간상의 연계성 및 가뭄 위험성의 공간적 분포를 나타내고 있다. 본 연구의 결과는 지역들간 가뭄이 동시에 발생한 개략적인 패턴을 간단한 방법으로 확인할 수 있다. 지역간 가뭄의 동시 발생여부에 대한 확인은 가뭄 대응을 위한 지자체간 협조체계 구축을 위해 필수적이다. 특히, 극한 가뭄 발생을 대비한 광역적인 대체 수자원 공급체계 구축시 수계별 가뭄 발생이 상이한 지역과의 연계 구축을 위해 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지능형 도시수자원 관리사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2019002950003).

References

- Burke, E.J., Brown, S.J., and Christidis, N. (2006). Modeling the recent evolution of global drought and projections for the twenty-first century with the Hadley Centre climate model. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 7, No. 5, pp. 1113-1125.
- Cook, E.R., Meko, D.M., Stahle, D.W., and Cleaveland, M.K. (1999). Drought reconstructions for the continental United States. *Journal of Climate*, Vol. 12, No. 4, pp. 1145-1162.
- Dai, A., Trenberth, K.E., and Karl, T.R. (1998). Global variations in droughts and wet spells: 1900-1995. *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, No. 17, pp. 3367-3370.
- Ganguli, P., and Reddy, M.J. (2012). Risk assessment of droughts in Gujarat using bivariate copulas. *Water Resources Management*, Vol. 26, No. 11, pp. 3301-3327.
- Halwatura, D., Lechner, A.M., and Arnold, S. (2015). Drought severity-duration-frequency curves: A foundation for risk assessment and planning tool for ecosystem establishment in post-mining landscape. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 19, No. 2, pp. 1069-1091.
- Heim Jr., R.R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 83, No. 8,

- pp. 1149-1165.
- Hisdal, H., and Tallaksen, L.M. (2003). Estimation of regional meteorological and hydrological drought characteristics: A case study for Denmark. *Journal of Hydrology*, Vol. 281, No. 3, pp. 230-247.
- Keyantash, J., and Dracup, J. (2002). The quantification of drought: An evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 83, No. 8, pp. 1167-1180.
- Kim, B.S., Sung, J.H., Kang, H.S., and Cho, C.H. (2012). Assessment of drought severity over South Korea using standardized precipitation evapo-transpiration index (SPEI). *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 9, pp. 887-900.
- Kim, B.S., Sung, J.H., Lee, B.H., and Kim, D.J. (2013). Evaluation on the impact of extreme droughts in South Korea using the SPEI and RCP8.5 climate change scenario. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 2, pp. 97-109.
- Kim, B.K., Kim, S., Lee, J.S., and Kim, H.S. (2006). Spatio-temporal characteristics of droughts in Korea: Construction of drought severity-area-duration curves. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 1B, pp. 69-78.
- Kim, D.W., Park, J.C., and Jang, D.H. (2017). Analysis of the possibility for drought detection of spring season using SPI and NDVI. *Journal of the Association of Korean Geographers*, Vol. 6, No. 2, pp. 165-174.
- Kim, H., Park, J., Yoon, J., and Kim, S. (2010). Application of SAD curve in assessing climate-change impacts on spatio-temporal characteristics of extreme drought events. *Journal of Korean Society Civil Engineering*, Vol. 30, No. 6B, pp. 561-569.
- Kim, J.H., Lee, J.H., Park, M.J., and Joo, J.G. (2016). Effect of climate change scenarios and regional climate models on the drought severity-duration-frequency analysis. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 2, pp. 351-361.
- Kwon, H.J., Park, H.J., Hong, D.O., and Kim, S.J. (2006). A study on semi-distributed hydrologic drought assessment modifying SWSI. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 8, pp. 645-658.
- Kyoung, M.S., Kim, S.D., Kim, B.K., and Kim, H.S. (2007). Construction of hydrological drought severity-area-duration curves using cluster analysis. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 3B, pp. 267-276.
- Lee, J.W., Jang, S.S., Ahn, S.R., Park, K.W., and Kim S.J. (2016). Evaluation of the relationship between meteorological, agricultural and in-situ big data droughts. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 19, No. 1, pp. 64-79.
- Liu, Y., Zhu, Y., Ren, L., Singh, V.P., Yong, B., Jiang, S., et al. (2019). Understanding the spatiotemporal links between meteorological and hydrological droughts from a three dimensional perspective. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 124, No. 6, pp. 3090-3109.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1993). The Relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proc. 8th Conf. on Applied Climatology*, American Meteorological Society, January 17-22, 1993, Boston, Massachusetts, pp. 179-184.
- Palmer, W.C. (1965). *Meteorological drought*. Research paper, No. 45, U.S. Weather Bureau.
- Shafer, B.A., and Dezman, L.E. (1982). Development of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. *Proceedings of the 50th Annual Western Snow Conference*, Reno, NV, USA, pp. 164-175.
- Sheffield, J., and Wood, E.F. (2008). Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate Dynamics*, Vol. 31, No. 1, pp. 79-105.
- Sheffield, J., Andreadis, K.M., Wood, E.F., and Lettenmaier, D.P. (2009). Global and continental drought in the second half of the twentieth century: Severity-area-duration analysis and temporal variability of large-scale events. *Journal of Climate*, Vol. 22, No. 8, pp. 1962-1981.
- Svoboda, M., LeComte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., et al. (2002). The drought monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 83, No. 8, pp. 1181-1190.
- Vicente-Serrano, S.M., Begueria, S., and López-Moreno, J.I. (2010). A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index-SPEI. *Journal of Climate*, Vol. 23, No. 7, pp. 1696-1718.
- Wang, A., Lettenmaier, D.P., and Sheffield, J. (2011). Soil moisture drought in China 1950-2006. *Journal of Climate*, Vol. 24, No. 13, pp. 3257-3271.
- Wang, C.H., Wang, Z., Guo, Y. (2012). Application and

- verification of drought index in meteorology drought monitor and prediction. *Journal of Advances in Earth Science*, Vol. 27, No. 9, pp. 957-968.
- Xu, K., Yang, D., Yang, H., Li, Z., Qin, Y., and Shen, Y. (2015). Spatio-temporal variation of drought in China during 1961-2012: A climatic perspective. *Journal of Hydrology*, Vol. 526, pp. 253-264.
- Yoo, C.S., Kim, D.H., and Kim, S. (2006). Evaluation of agricultural drought prevention ability based on EOF analysis and multi-variate time series model. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 7, pp. 617-626.
- Yoo, J.Y., Kwon, H.H., Lee, J.H., and Kim, T.W. (2015). Influence of evapotranspiration on future drought risk using bivariate drought frequency curves. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 20, No. 5, pp. 2059-2069. doi:10.1007/s12205-015-0078-9
- Yoo, J.Y., Shin, J.Y., Kim, D., and Kim, T.W. (2013). Drought risk analysis using stochastic rainfall generation model and copula functions. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 4, pp. 425-437.
- Yu, J.S., Yoo, J.Y., Lee, J.H., and Kim, T.W. (2016). Estimation of drought risk through the bivariate drought frequency analysis using copula functions. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 49, No. 3, pp. 217-225.
- Zhang, X., Park, M.J., Kim, H.Y., Cho, J.H., and Joo, J.G. (2019). Comparison of drought assessment results according to three drought indices. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 7, pp. 95-104.

Received	October 29, 2020
Revised	November 9, 2020
Accepted	November 19, 2020