

이변량 빈도분석을 이용한 RCP 기후변화 시나리오에 따른 극한가뭄의 수문학적 위험도 평가

박지연* · 김지은** · 이주현*** · 김태웅****

Park, Ji Yeon*, Kim, Ji Eun**, Lee, Joo-Heon***, Kim, Tae-Woong****

Assessment of Hydrologic Risk of Extreme Drought According to RCP Climate Change Scenarios Using Bivariate Frequency Analysis

ABSTRACT

Recently, Korea has suffered from severe droughts due to climate change. Therefore, we need to pay attention to the change of drought risk to develop appropriate drought mitigation measures. In this study, we investigated the changes of hydrologic risk of extreme drought using the current observed data and the projected data according to the RCP 4.5 and 8.5 climate change scenarios. The bivariate frequency analysis was performed for the paired data of drought duration and severity extracted by the threshold level method and by eliminating pooling and minor droughts. Based on the hydrologic risk of extreme drought events Jeonbuk showed the highest risk and increased by 51 % than the past for the RCP 4.5 scenario, while Gangwon showed the highest risk and increased by 47 % than the past for the RCP 8.5 scenario.

Key words : Bivariate drought frequency analysis, Climate change, Extreme drought, Hydrologic risk

초 록

최근 우리나라는 기후변화 영향으로 극심한 가뭄으로 인한 피해가 발생하고 있다. 따라서 가뭄에 대한 완화대책을 마련하기 위해서는 가뭄 위험도의 변화를 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 관측 강수량 자료와 RCP 4.5 및 8.5 기후변화 시나리오에 따른 미래 강수량 자료를 활용하여 극한가뭄에 대한 수문학적 위험도를 평가하였다. 먼저, 임계수준방법으로 가뭄사상을 정의하고 풀링을 통하여 미소가뭄을 제거하여 도출한 가뭄 지속기간 및 심도를 대상으로 이변량 가뭄빈도분석을 실시하였다. 극한가뭄사상에 대한 수문학적 위험도를 산정한 결과, RCP 4.5 시나리오에서 위험도가 가장 높은 지역은 전라북도이며 과거보다 51 % 증가하였다. 또한, RCP 8.5 시나리오에서 위험도가 가장 높은 지역은 강원도이며 과거보다 47 % 증가하였다.

검색어 : 이변량 가뭄 빈도분석, 기후변화, 극한가뭄, 수문학적 위험도

* 한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 석사과정 (Hanyang University · pjyamy@hanyang.ac.kr)

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

*** 중신회원 · 중부대학교 토목공학과 교수 (Joongbu University · leejh@joongbu.ac.kr)

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

Received April 1, 2019/ revised May 21, 2019/ accepted August 8, 2019

1. 서론

가뭄은 일반적으로 평년보다 적은 양의 강수량이나 유량이 발생하는 것으로 정의할 수 있다. Wilhite and Glantz(1985)는 가뭄을 기상학적, 수문학적, 농업적, 사회경제적 가뭄으로 분류하였다. 기상학적 가뭄은 강수량이 평균보다 부족한 것이며, 수문학적 가뭄은 수자원의 공급을 담당하는 하천이나 댐 등의 수량 부족을 의미하고, 농업적 가뭄은 농작물에 필요한 토양수분이 부족한 상태를 의미한다. 또한, 사회경제적 가뭄은 농업·공업·생활용수 등의 부족으로 인해 사회·경제적인 피해를 야기한다. 강수 부족량은 가뭄을 가장 일반적으로 정량화하는 지표이며, 하천유량 및 각종 용수량의 감소로 이어져 가뭄 피해가 발생하게 된다.

최근에 지구온난화로 인하여 기온상승과 같은 기후시스템의 변화로 전 세계적으로 이상기후가 자주 목격되고 있다. 특히 기후변화로 인해 강수량의 공간간적인 변동성이 커져 전 세계적으로 물 부족이 발생하는 지역이 크게 늘어날 것으로 전망된다(Kim et al., 2013). 가뭄은 광역적이고 주기적으로 발생하고, 정확한 장소나 시기 또는 원인을 파악하는 것이 힘들 뿐 아니라 그 영향력과 피해가 광범위하다(Bae et al., 2013; So et al., 2014). 우리나라의 경우, 2014년 7월에는 강원, 경기, 충청 일부 지역에서 강우량이 평년대비 50-61% 수준으로 떨어져 제한급수를 실시하였고, 2015년에는 강우량이 역대 최저를 기록하여 심각한 가뭄이 발생하였다. 이때 충남 서부는 생활용수 부족에 따른 급수 조정 등을 시행한 바가 있었다(Yu et al., 2016). 이렇게 우리나라는 최근 극심한 가뭄으로 인한 피해가 발생하고 있다. 기후변화는 계속해서 진행되기 때문에 이와 같은 극한가뭄이 일회성이 아니라 지속적인 추세가 될 수 있으므로 효과적인 가뭄대책을 마련해야 한다.

우리나라 지리적 특성상 국토면적은 작지만 기온, 강수량 등 기후노출의 지역적 편차가 매우 크다. 또한 기후변화에 따른 취약성은 지역에 따라 다르기 때문에 기후변화 영향을 고려하여 적절한 지역별 가뭄대책을 수립하는 것은 매우 필요하다(KRIHS, 2011). 따라서 미래에 극한가뭄에 효과적으로 대응하기 위해서는 기후변화 시나리오에 따라 지역의 가뭄 위험도를 평가할 필요가 있다. Kim et al.(2015)은 대표적인 가뭄지수인 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)를 이용하여 우리나라 중권역에 대한 가뭄 위험도 분석을 하였으며, Park et al.(2015)은 극한 가뭄사상에 대한 기후변화의 영향을 지점별로 분석한 바 있다.

가뭄 위험도는 여러 가지 관점으로 정의할 수 있다. 자연재해분야에서 주로 쓰이는 위험도의 개념은 특정 범위 내에서 자연재해에 의해 발생할 수 있는 잠재적인 피해 규모를 의미한다(KRIHS, 2015). 즉, 가뭄의 위해성(hazard)과 노출성(exposure) 그리고 취약성(vulnerability)을 분석하여 위험도를 평가하는 것이다. 이는

장기간 가뭄으로 인한 피해규모를 산정하고 저감대책을 마련하기 위한 것이다. 자연재해 분야의 가뭄 위험도와 다르게 수문학적 위험도(hydrologic risk)는 통계학적 빈도분석을 활용한다. 수문학적 위험도를 분석하는 가장 큰 이유는 가뭄 대응방안을 수립할 때, 수공구조물 운영 및 설계 기준을 산정할 수 있기 때문이다. 특정 규모 이상의 수문사상이 반복해서 발생하는 평균기간을 분석하는 확률통계학적 기법인 빈도분석을 통해서 가뭄사상의 재현기간을 산정하고, 수문학적 위험도 분석을 통해서 특정 재현기간을 가지는 극한가뭄이 특정 기간 동안에 발생할 수 있는 확률을 산정할 수 있다. Kim et al.(2018)은 미래 기후변화 시나리오 자료를 활용하여 가뭄의 지속기간과 심도를 동시에 고려하여 가뭄사상의 재현기간을 산출하여 서울 지역의 과거·현재·미래의 극한가뭄에 대한 수문학적 위험도를 산정하였다.

본 연구에서는 현재까지 관측된 자료와 미래 기후변화 시나리오에 따라 발생된 자료를 활용하여 가뭄사상의 특성변수인 지속기간 및 심도를 산정하고, 이를 대상으로 이변량 가뭄 빈도분석을 실시하여, 우리나라의 극한가뭄에 대한 수문학적 위험도의 변화를 분석하였다.

2. 연구범위 및 자료

기후변화 시나리오는 인간 활동에 따른 원인에 의한 기후변화가 언제, 어떻게, 어디서 일어날 지를 예측하기 위해 기후변화 예측모델을 이용하여 계산한 강수, 기온 등 미래기후에 대한 예측정보를 의미한다. 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 5차 평가보고서에서는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 정하고, 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 시나리오를 사용하였다. 우리나라 기상청은 IPCC RCP의 4가지 시나리오(2.6, 4.5, 6.0, 8.5)에 따라 기후변화 전망자료를 생산하고, 지방자치단체 기후변화 적응대책 수립 지원을 위하여 1 km 공간해상도의 지역 기후 전망자료를 제공하고 있다(KMA, 2018).

본 연구에서 사용한 강수량 자료에 대한 설명은 Table 1과 같다. 기후변화 시나리오는 지역기후모델(HadGEM3-RA)로 생산된 자료에 GIS 기반 통계적 공간상세화 기법을 적용한 것이다. 통계적 공간 상세화 기법은 저해상도 기후모델 예측 정보를 해안선 접근도, 해발고도 등 높은 공간 해상도를 가지는 국지적 정보를 이용하여 1 km 격자체계에 통계적으로 투영한 것이다. RCP 4.5와 8.5 시나리오의 차이점은 온실가스 배출 정도의 차이이다. RCP 4.5는 이산화탄소 중배출 시나리오이며, 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우이다. RCP 8.5 시나리오는 현재 추세로 온실가스 저감없이 가장 강한 온난화를 야기하는 고배출 온실가스

Table 1. Information of Precipitation Data

	Observed Data	RCP 4.5 & 8.5 Scenarios
Period	1973 - 2017	2018 - 2100
Time Scale	Day	Day
Target Area	Administrative Districts (Seoul, Busan, Daegu, Incheon, Gwangju, Daejeon, Ulsan, Gyeonggi, Gangwon, Chungbuk, Chungnam, Jeonbuk, Jeonnam, Gyeongbuk, Gyeongnam, Jeju)	
Model	-	HADGEM-ES

시나리오이다(KMA, 2018).

가뭄분석에는 월 단위 강수량 자료가 많이 활용된다. Kim et al.(2018)은 측우기 자료와 미래 강수량 자료를 월단위로 구축하여 가뭄분석을 하였으며, Kim et al.(2013)은 미래 가뭄 특성 전망을 위하여 월 단위의 기온 및 강수량 자료를 활용하여 표준강수증발산량지수(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)를 산정하였다. 그러나 월단위로 가뭄을 모니터링 하면 가뭄의 시작과 종료 시점을 파악하는데 시간적 지체가 발생할 수도 있다. 즉, 가뭄의 시작이나 종료 시점이 1~3주 차이가 발생하기 때문에 보다 짧은 시간 간격으로 가뭄 분석을 할 필요가 있다. 그러나 일단위 자료로 가뭄을 분석하면 가뭄의 지속성으로 인해 필요없는 계산이 늘어나게 된다. 따라서 본 연구에서는 Table 1의 자료를 주 단위로 변환시킨 후 분석을 수행하였다.

3. 연구방법

3.1 가뭄사상 및 풀링

가뭄사상은 연속이론과 절단수준에 의하여 정의된다. 주로 평균 강수량을 절단수준으로 설정하고, 연속이론에 의해 강수량이 절단수준 이하로 낮아지는 사상을 가뭄사상으로 정의한다(Tallaksen et al., 1997; Yu et al., 2017). 가뭄사상의 지속기간은 가뭄사상이 시작할 때부터 끝날 때까지의 기간을 의미하며, 가뭄사상의 심도는 지속기간동안 부족강우량을 의미한다. 이러한 연속이론을 통하여 가뭄을 정의하면, 큰 규모의 가뭄이 임계수준에 의해 여러 개의 미소가뭄사상으로 나누어지는 경우가 발생한다. 특히, 우리나라는 강수량의 계절 변동성이 크기 때문에 작은 규모의 가뭄사상이 빈번히 발생한다. 이러한 미소가뭄은 서로 의존적인 관계를 가지기 때문에 빈도분석의 기본 가정인 개별 가뭄사상이 서로 독립이라는 가정에 위배된다(Yu et al., 2017). 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 가뭄 풀링(drought pooling)을 적용하였다. 풀링은 작은 규모의 가뭄사상들이 짧은 기간에 반복적으로 발생했을 경우, 하나의 큰 가뭄사상으로 결합하는 것이다. 풀링을 하면 미소가뭄이 제거되어 극한가뭄의 위험도가 과소평가되는 것을 방지할 수 있다.

풀링 방법에는 Moving Average, Sequent Peal Algorithm, Inter-event Time and Volume Criterion 등이 있다(Tallaksen et al., 1997). 이 중 Moving Average (MA)는 가뭄변수 시계열을 이동평균하여 임계수준보다 작은 미소가뭄들을 제거하는 방법이다. 이 방법의 주요 장점은 상호 의존적인 미소가뭄이 풀링되기 때문에 미소가뭄이 가장 효과적으로 줄어든다는 것이다(Enyew et al., 2014). 또한, 3가지 방법 중 가장 일반적이고 쉽게 적용할 수 있기 때문에 본 연구에서는 MA 방법을 적용하였다. Van Loon and Van Lanen(2012)은 30일 이동평균을 활용하여 가뭄사상을 산정하였으며, Sung and Chung(2014)은 10일 이동평균을 사용하여 십점강땀 유입량에 대한 가뭄 사상을 추출하였다.

3.2 이변량 가뭄 빈도분석과 수문학적 위험도

가뭄 빈도분석은 가뭄사상의 재현기간을 산정하기 위하여 통계학적 빈도분석 방법을 적용한 것이다. 따라서 가뭄 빈도분석은 확률분포를 이용하여 가뭄사상의 심도를 발생빈도와 연결하는 과정이다.

과거에 수행된 가뭄 빈도분석에서는 지속기간 또는 심도를 각각 단변량으로 하는 분석방법을 주로 사용하였다(Sharma, 1997; Kang and Yoon, 2002). 그러나 이러한 방법으로 산정된 각각의 재현기간은 같은 가뭄사상에 대한 것이더라도 서로 상이하여 신뢰할 수 있는 결과라고 할 수 없다(Kim et al., 2003; Yu et al., 2016). 최근에는 이러한 단점을 보완하기 위해 지속기간과 심도를 결합하여 함께 고려하는 이변량 빈도분석이 주로 수행되고 있다. 두 가지 변수의 결합확률분포함수를 산정하는 방법에는 매개변수 및 비매개변수적 방법이 있지만, 가뭄사상의 지속기간과 심도를 결합하는 데에는 주로 코플라 함수가 많이 사용된다(Yoo et al., 2013; So et al., 2014; Kwon et al., 2018).

이변량 가뭄 빈도분석에서는 가뭄사상의 두 가지 특성변수인 지속기간과 심도에 대한 누적분포함수를 산정하고, 코플라 함수를 사용하여 결합누적분포함수를 Eq. (1)과 같이 산정한다.

$$F_{D,S}(d,s) = C(F_D(d), F_S(s)) \quad (1)$$

여기서, F_D 와 F_S 는 지속기간(d)과 심도(s)에 대한 누적분포함수이며, C 는 코플라 함수이다. 수문변수간의 상관관계를 잘 반영하고 다양한 형태의 결합분포함수를 간단히 산정할 수 있는 Archimedean 코플라 함수군에는 Clayton, Frank, Gumbel 등이 있다. 이 세 가지의 코플라의 산정식은 Table 2와 같으며, θ 는 매개변수이다.

이변량 가뭄 빈도분석을 통해서 가뭄사상의 재현기간을 산정할 수 있다. 수자원 시스템의 안정적인 설계를 위해서는 가뭄사상의

Table 2. Equations of Archimedean Copula Families

Copula	Equation
Clayton	$\max\{(d^{-\theta} + s^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}, 0\}$
Frank	$-\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta d} - 1)(e^{-\theta s} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$
Gumbel	$\exp[-\{(-\ln d)^\theta + (-\ln s)^\theta\}^{1/\theta}]$

결합 초과확률에 역수를 취하여 재현기간을 계산할 수 있다(Kwon and Kim, 2009; Kim et al., 2018). 이 때 가뭄사상의 평균 발생간격을 고려해야 하며(Shiau and Shen, 2001; Kim et al., 2006; Kim et al., 2018), 코플라 함수를 이용한 이변량 가뭄 재현기간은 Eq. (2)와 같다.

$$T_{DS} = \frac{E(L)}{P(D \geq d \text{ and } S \geq s)} \quad (2)$$

$$= \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + C(F_D(d), F_S(s))}$$

여기서, T_{DS} 는 지속기간과 심도의 누적확률분포함수가 각각의 지속기간과 심도보다 클 때의 결합재현기간이며, $E(L)$ 은 평균가뭄발생간격을 의미한다.

수문학적 위험도는 특정 재현기간(T_{DS})을 가지는 수문사상이 특정 기간(service life time, n) 동안 발생할 확률을 의미한다(Yu et al., 2016). 가뭄사상의 수문학적 위험도는 Eq. (2)를 이용해 산정된 이변량 재현기간을 Eq. (3)에 적용하여 산정할 수 있다. 만약 재현기간이 T_{DS} 년인 가뭄사상이 수자원 시스템 예상 수명기간 내에 발생한다면 용수공급은 실패할 가능성이 있다.

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_{DS}}\right)^n \quad (3)$$

4. 적용 및 결과

4.1 가뭄 지속기간과 심도

본 연구에서는 계절적 변동성을 고려하기 위하여 주간 강수량의 평균값을 절단수준으로 설정하였다. 따라서 주간 강수량이 절단수준보다 낮아져 부족량이 발생하는 부분을 가뭄이라고 정의하였다. Tallaksen et al.(1997)을 참조하여 Moving Window를 10주 설정하여 Moving Average 방법으로 풀링하였다. 또한 Van Loon and Van Lanen(2012)을 참조하여 가뭄 지속기간이 2주 이하인 가뭄사상은 미소가뭄으로 판단하여 분석에서 제외하였다.

본 연구의 대상 지역인 16개 광역시도에 대한 가뭄사상의 평균 지속기간 및 심도는 Table 3과 같다. 관측자료에 대한 평균 지속기

Table 3. Average Duration and Severity of Drought Events

Area	Observed Data		RCP 4.5		RCP 8.5	
	Duration (week)	Severity (mm)	Duration (week)	Severity (mm)	Duration (week)	Severity (mm)
Seoul	13.0	114.9	13.8	116.8	15.3	123.4
Busan	12.7	117.0	13.7	128.2	14.1	137.2
Daegu	12.6	83.6	14.2	96.1	14.7	101.1
Incheon	13.1	100.0	13.6	102.1	14.8	105.4
Gwangju	12.4	100.6	15.0	133.6	14.0	125.0
Daejeon	13.0	97.2	15.9	127.7	13.6	107.4
Ulsan	12.7	102.5	13.4	115.0	13.9	118.1
Gyeonggi	12.8	98.4	13.8	111.0	14.5	115.3
Gangwon	12.7	95.1	13.1	93.3	14.9	110.3
Chungbuk	12.7	91.3	14.4	109.1	13.4	103.5
Chungnam	12.7	93.2	15.0	114.9	13.3	102.2
Jeonbuk	12.9	94.3	16.1	132.8	13.9	108.9
Jeonnam	12.6	103.4	13.4	104.7	14.0	117.9
Gyeongbuk	12.3	77.2	14.8	102.6	14.2	99.0
Gyeongnam	12.3	108.8	13.6	112.3	14.4	123.1
Jeju	12.2	122.2	14.4	125.3	14.5	133.5

간과 심도는 지역적으로 큰 편차가 없었다. 지속기간은 대부분 12주에서 13주 정도로 나타났으며, 심도는 100 mm 내외로 나타났다. RCP 4.5 및 8.5 시나리오에 대한 결과 역시 비슷하였다. 가뭄 지속기간은 주로 13~16주로 나타났고 가뭄심도는 100~130 mm 내외로 나타났다. 특히 서울 지역의 관측 가뭄사상의 개수는 97개이고 평균 지속기간은 13.03주인데, 이는 Yoo et al.(2013)의 서울 지역의 가뭄사상 개수(94개)와 평균 지속기간(3.26개월)과 유사한 결과이다. Gwak et al.(2018)에 따르면, 우리나라 전역에서 가뭄 심도가 점차 증가하고 특히 남쪽 해안지역 중심으로 평균 가뭄심도가 RCP 4.5 시나리오 경우보다 RCP 8.5 시나리오에서 증가된다. 이에 대해 본 연구결과와 비교해보면, RCP 8.5 시나리오에서는 주로 부산, 경상남도, 강원도, 전라남도, 제주도 지역이 RCP 4.5 시나리오보다 평균 가뭄 심도가 심화되는 것을 확인할 수 있다.

또한 관측자료와 미래 기후변화 시나리오에 따른 최대 지속기간과 최대 심도를 Table 4와 같이 비교해 보면, 대체적으로 관측자료보다 기후변화 시나리오에서 지속기간 및 심도가 높은 것으로 나타났다. 즉, 미래에는 과거보다 지속기간 및 심도가 높은 가뭄들이 발생하므로 과거보다 더욱 더 극심한 가뭄이 발생할 것으로 판단된다.

4.2 최대 가뭄사상의 재현기간

가뭄사상의 지속기간과 심도에 대한 확률분포함수를 선정하기 위해 카이 제곱(χ^2) 검정을 시행한 결과, 여러 가지 확률분포

(exponential, normal, gamma, lognormal, Poisson, Weibull, generalized extreme value, generalized pareto) 중 지속기간은 관측자료와 RCP 4.5 시나리오에서 Weibull 분포가 채택되었고, RCP 8.5 시나리오에서는 lognormal 분포가 채택되었다. 심도는 관측자료 및 RCP 4.5 시나리오에서 lognormal 분포가 채택되었고, RCP 8.5 시나리오에서는 Weibull 분포가 채택되었다. 분포형이 달라지면 자료가 같아도 재현기간이 달라지므로, 본 연구에서는 지속기간은 Weibull 분포, 심도는 lognormal 분포를 사용하였다. 지속기간과 심도의 확률분포를 결합을 위해서는 수문분야에서 가장 많이 사용되는 Gumbel 코플라를 적용하였다.

이변량 가뭄 빈도분석을 통하여 산정한 이변량 재현기간을 바탕으로 지역별 그리고 자료별로 최대 가뭄사상을 선정하였다. 예를 들어, 서울 지역의 관측자료와 RCP 4.5 그리고 8.5 시나리오에 대한 이변량 가뭄 빈도분석 결과는 Fig. 1과 같다. 이변량 빈도분석은 두 개의 특성변수, 즉, 가뭄심도와 지속기간에 대해서 통계학적인 분석을 수행한 것이다. 하지만 이러한 특성변수는 존재 가능한 조합이 있다. 예를 들어, 긴 지속기간을 가지는 가뭄사상은 매우 작은 심도를 가질 수 없고, 짧은 지속기간을 가지는 가뭄사상은 매우 큰 심도를 가질 수 없다. 이러한 현상은 신뢰구간을 통해 분석될 수 있는데, Yoo et al.(2016)은 코플라 모의발생을 통한 이변량 가뭄빈도곡선의 신뢰구간을 추정하 바 있다. 따라서 Fig. 1에서 재현기간 곡선은 동일한 재현기간을 가지는 영역을 표현한

Table 4. Maximum Duration and Severity of Drought Events

Area	Observed Data		RCP 4.5		RCP 8.5	
	Duration (week)	Severity (mm)	Duration (week)	Severity (mm)	Duration (week)	Severity (mm)
Seoul	64	644.0	76	819.5	79	793.9
Busan	53	620.3	61	863.9	60	684.6
Daegu	51	488.9	78	803.3	67	495.2
Incheon	50	641.6	62	657.3	104	804.6
Gwangju	55	630.7	58	735.9	67	864.8
Daejeon	43	577.0	56	785.8	68	570.9
Ulsan	39	509.6	62	697.5	59	574.3
Gyeonggi	59	652.7	74	806.4	74	762.0
Gangwon	47	608.1	74	793.3	76	582.3
Chungbuk	71	524.8	64	798.8	67	571.2
Chungnam	52	541.8	56	733.0	67	579.4
Jeonbuk	52	554.2	55	738.0	67	672.5
Jeonnam	50	536.1	55	570.7	66	817.7
Gyeongbuk	69	418.5	75	680.3	67	492.9
Gyeongnam	41	545.9	61	732.8	59	546.9
Jeju	53	666.5	86	1066.6	79	849.4

것으로 이해할 수 있다.

Fig. 1에서 별로 표시된 것은 각 자료군의 최대 가뭄사상을 의미한다. 관측자료의 최대 가뭄사상의 재현기간은 41.67년이었다. RCP 4.5 시나리오의 최대 가뭄사상의 재현기간은 245.56년으로 관측자료에 비해 약 6배 정도 증가하였고, RCP 8.5 시나리오의 최대 가뭄사상의 재현기간은 97.75년으로 관측자료에 비해 약 2배 정도 증가하였다.

4.3 극한가뭄의 수문학적 위험도

4.2절에서 산정한 가뭄사상의 이변량 재현기간을 바탕으로 극한 가뭄의 수문학적 위험도를 산정하였다. 우리나라 댐 설계 기준을 참고하여 Eq. (3)의 n을 100년, 150년, 200년 설정하여 최대 가뭄사상에 대한 수문학적 위험도를 산정하였으며, Fig. 2에 도시하였다.

RCP 4.5 시나리오에서 울산, 경기도, 강원도, 충청남도, 전라북도, 경상남도 지역이 과거보다 위험도가 증가하였으며, 서울, 부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 충청북도, 전라남도, 경상북도 지역은 과거보다 감소하는 것으로 나타났다. n=100년에는 전라북도가 RCP 4.5 시나리오에서 위험도(R=0.9992)가 가장 높게 나타났으며, 이는 관측자료에 대한 위험도(R=0.6610)가 기후변화로 인해서 51.16 % 증가하는 것이다. 따라서 미래에서는 전라북도가 과거보다 극한가뭄의 발생확률이 매우 커질 것으로 예상된다. 반면, 서울 지역의 위험도는 0.3351로 관측자료에 대한 위험도(R=0.912) 보다 63.25 % 감소하는 것으로 나타났다. n=150에 대한 위험도는 n=100인 경우보다 대략 1.00~1.37배 높으며, n=200년의 경우는 위험도가 1.00~1.66배 높아지는 것을 확인할 수 있다.

RCP 8.5 시나리오에서는 인천, 울산, 경기도, 강원도, 충청북도,

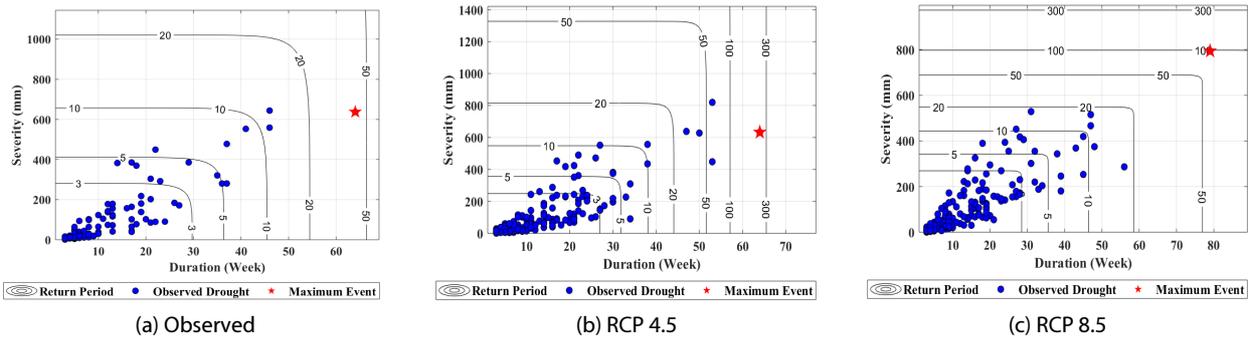


Fig. 1. Severity-Duration-Frequency Curves for Seoul

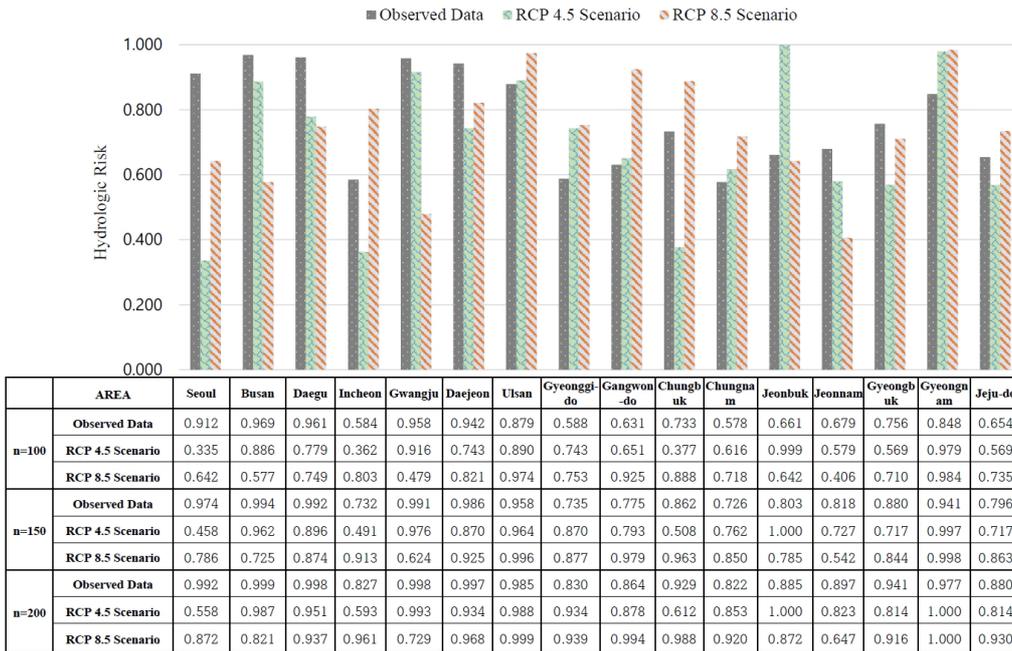


Fig. 2. Hydrologic Risk of Maximum Drought Events

충청남도, 경상남도, 제주도 지역에서 위험도가 증가하였으며, 서울, 부산, 대구, 광주, 대전, 전라북도, 전라남도, 경상북도 지역은 감소하였다. RCP 8.5 시나리오에서 위험도가 가장 낮게 나타난 전라남도 지역은 0.4061로 관측자료에 대한 위험도($R=0.679$)보다 40.19 % 감소하였다. 그러나 위험도가 가장 높게 나타난 경상남도 지역($R=0.9842$)은 관측자료에 대한 위험도($R=0.8478$)보다 16.09 % 증가하였다. 따라서 경상남도 역시 과거보다 미래에서 가뭄의 피해가 더 클 것으로 예상된다. $n=150$ 년에 대한 위험도는 $n=100$ 년보다 1.01~1.34배 높으며, $n=200$ 년의 경우 1.02~1.59배 높은 것을 확인할 수 있다.

Yu et al.(2018)에서는 Hidden Markov Model 기반으로 가뭄 지수를 산정하였으며, 이를 바탕으로 미래 기후변화 시나리오에 따른 가뭄 위험도를 평가하였다. 영산강 유역은 RCP 8.5 시나리오보다 RCP 4.5 시나리오에서 미래 기간(2044~2071, 2072~2100)에서 위험도가 높게 평가되었으며, RCP 8.5에서는 낙동강 유역이 가장 위험도가 높게 나왔다. 본 연구에서 영산강 유역인 광주, 전남 지역이 RCP 8.5보다 4.5시나리오가 위험도가 높게 산정되었으며, 부산을 제외한 낙동강 유역에 있는 경상남도 및 울산광역시 지역이 대표적으로 위험도가 높게 나타나 유사한 결과를 얻었다.

5. 결론

본 연구에서는 RCP 4.5 및 8.5 시나리오에 따른 강우량 자료를 활용하여 관측자료를 기준으로 우리나라 극한가뭄에 대한 수문학적 위험도를 비교 분석하였다. 각 자료군에 대해 MA 방법으로 풀링을 한 후 미소가뭄을 제거하여 가뭄사상을 추출하였다. 이를 통해 지속기간과 심도를 산정한 결과, 평균 가뭄지속기간 및 평균 가뭄심도는 모두 지역적으로 큰 편차는 없었으나, 부산, 경상남도, 강원도, 전라남도, 제주도 지역은 RCP 4.5 시나리오보다 RCP 8.5 시나리오에서 평균 가뭄심도가 증가하였다. 또한 최대 지속기간과 최대 심도는 관측자료 보다 RCP 기후변화 시나리오에서 증가하였다. 따라서 미래에는 과거보다 더욱 더 극심한 가뭄이 찾아올 것으로 판단된다.

또한 이변량 빈도분석을 코플라 함수를 이용하여 실시한 후, 최대 가뭄사상에 대한 재현기간을 바탕으로 수문학적 위험도를 산정하였다. 그 결과, 관측자료 기준으로 RCP 4.5 시나리오에서는 전라북도가 51.16 %, RCP 8.5 시나리오에서 강원도 지역이 46.62 % 증가하였다. 이는 전라북도와 강원도 지역이 미래 기후변화로 인하여 극한가뭄이 발생할 확률이 크게 높아진다는 것을 의미한다. 따라서, 이를 고려하여 가뭄 대책을 마련해야 한다.

RCP 8.5 시나리오가 고배출 온실가스 시나리오라서 RCP 4.5 시나리오보다 극심한 가뭄을 나타낼 것으로 예상했지만, 본 연구

결과에 의하면 RCP 4.5 시나리오가 RCP 8.5 시나리오보다 위험도가 증가한 지역들이 있다. 따라서, 미래의 극한 가뭄을 살펴보면 여러 가지 시나리오를 활용하여 가뭄 위험도를 비교해 볼 필요가 있다고 판단된다.

본 연구에서는 미래 기후변화 시나리오를 활용하여 행정구역별 가뭄 위험도 분석을 하였다. 따라서 유역기반의 위험도 평가보다 지자체에서 수행하는 가뭄 대응대책 수립에 좀 더 적합할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 환경부/한국환경산업기술원의 지원(과제번호 83070)과 한국연구재단의 지원(2016R1D1A1A09918872)을 받아 수행되었습니다.

References

- Bae, D. H., Son, K. H. and Kim, H. (2013). "Derivation and evaluation of drought threshold level considering hydro-meteorological data on South Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 3, pp. 287-299 (in Korean).
- Enyew, B. D., Van Lanen, H. A. J. and Van Loon, A. F. (2014). "Assessment of the impact of climate change on hydrological drought in Lake Tana catchment, Blue Nile basin, Ethiopia." *Journal of Geology & Geosciences*, Vol. 3, p. 174.
- Gwak, Y. S., Cho, J. P., Jung, I. G., Kim, D. W. and Jang, S. M. (2018). "Projection of future changes in drought characteristics in Korea peninsula using effective drought index." *Journal Climate Change Research*. Vol. 9, No. 1, pp. 31-45 (in Korean).
- Kang, I. J. and Yoon, Y. N. (2002). "Drought evaluation by a drought frequency formula." *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, KSCE, Vol. 2, No. 3, pp. 89-100 (in Korean).
- Kim, B., 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." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 2, pp. 97-109 (in Korean).
- Kim, J. E., Yu, J. S., Lee, J. H. and Kim, T. W. (2018). "Drought risk analysis in Seoul using Cheugugi and climate change scenario based rainfall data." *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, KSCE, Vol. 38, No. 3, pp. 387-393 (in Korean).
- Kim, N. S., Kim, J. S., Jang, H. W. and Lee, J. H. (2015). "Hydrologic risk analysis based on extreme drought over the Korean peninsula under climate change." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 4, pp. 45-52 (in Korean).
- Kim, T. W., Valdés, J. B. and Yoo, C. S. (2003). "Nonparametric approach for estimating return periods of droughts in arid regions." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 8, No. 5, pp. 237-246.
- Kim, T. W., Valdés, J. B. and Yoo, C. S. (2006). "Nonparametric approach for bivariate drought characterization using Parlmer

- drought index.” *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 134-143.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2018). *Climate change forecast report in Korea*, No. 11-1360000-001555-01 (in Korean).
- Korea Research Institute for Human Settlements (KRIHS) (2011). *Research for water management policy preparing with climate change - Focus on drought vulnerability and policy plan of territory* (in Korean).
- Korea Research Institute for Human Settlements (KRIHS) (2015). *On the development of the methodological framework for drought risk assessment* (in Korean).
- Kwon, M. S., Sung, J. H., Kim, T. W. and Ahn, J. H. (2018). “Drought assessment by bivariate frequency analysis using standardized precipitation index and precipitation deficit: Focused on Han river basin.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 10, pp. 875-886 (in Korean).
- Kwon, Y. M. and Kim, T. W. (2009). “Derived IDF curve in Seoul using bivariate precipitation frequency analysis.” *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, KSCE, Vol. 29, No. 2B, pp. 155-162 (in Korean).
- Park, M. W., Sim, H. J., Park, Y. K. and Kim, S. D. (2015). “Drought severity - duration - frequency analysis based on KMA 1-km resolution RCP scenario.” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 3, pp. 347-355 (in Korean).
- Sharma, T. C. (1997). “A drought frequency formula.” *Hydrological Sciences*, Vol. 42, No. 6, pp. 803-814.
- Shiau, J. T. and Shen, H. W. (2001). “Recurrence analysis of hydrologic droughts of differing severity.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 127, No. 1, pp. 30-40.
- So, J. M., Sohn, K. H. and Bae, D. H. (2014). “Estimation and assessment of bivariate joint drought index based on copula functions.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 2, pp. 171-182 (in Korean).
- Sung, J. H. and Chung, E. S. (2014). “Application of streamflow drought index using threshold level method.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 5, pp. 491-500 (in Korean).
- Tallaksen, L. M., Madsen, H. and Clausen, B. (1997). “On the definition and modeling of streamflow drought duration and deficit volume.” *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 42, No. 1, pp.15-33.
- Van Loon, A. F. and Van Lanen, A. J. (2012). “A process-based typology of hydrological drought.” *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 16, pp. 1915-1946.
- Wilhite, D. A. and Glantz, M. H. (1985). “Understanding: The drought phenomenon: The role of definitions.” *Water International*, Vol. 10, No. 3, pp. 111-120.
- Yoo, J. Y., Shin, J. Y., Kim, D. K. 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 (in Korean).
- Yoo, J. Y., Yu, J. S., Kwon, H. H. and Kim, T. W. (2016). “Determination of drought events considering the possibility of relieving drought and estimation of design drought severity.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 4, pp. 275-282 (in Korean).
- Yu, J. S., Park, Y. J., Kwon, H. H. and Kim, T. W. (2018). “Probabilistic assessment of meteorological drought over South Korea under RCP scenarios using a hidden Markov model.” *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, KSCE, Vol. 22, No. 1, pp. 365-372 (in Korean).
- Yu, J. S., Shin, J. Y., Kwon, M. S. and Kim, T. W. (2017). “Bivariate drought frequency analysis to evaluate water supply capacity of multi-purpose dams.” *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, KSCE, Vol. 37, No. 1, pp. 231-238 (in Korean).
- 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.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 3, pp. 217-225 (in Korean).