

측우기 및 미래 기후변화 시나리오 자료를 활용한 서울지역의 가뭄 위험도 분석

김지은* · 유지수** · 이주현*** · 김태웅****

Kim, Ji Eun*, Yu, Ji Soo**, Lee, Joo-Heon***, Kim, Tae-Woong****

Drought Risk Analysis in Seoul Using Cheugugi and Climate Change Scenario Based Rainfall Data

ABSTRACT

Considering the effect of climate change, a quantitative analysis of extreme drought is needed to reduce the damage from extreme droughts. Therefore, in this study, a quantitative risk analysis of extreme drought was conducted. The threshold level method was applied to define a drought event using Cheugugi rainfall data in past, gauged rainfall data in present, and climate change scenario rainfall data in future. A bivariate drought frequency analysis was performed using the copula function to simultaneously consider two major drought characteristics such as duration and severity. Based on the bivariate drought frequency curves, the risks for the past, present and future were calculated and the risks for future extreme drought were analyzed comparing with the past and present. As a result, the mean drought duration of the future was shorter than that of past and present, however, the mean drought severity was much larger. Therefore short term and severe droughts were expected to occur in the future. In addition, the analysis of the maximum drought risk indicated that the future maximum drought risk was 1.39~1.94 times and 1.33~1.81 times higher than the past and present. Finally, the risk of extreme drought over past and present maximum drought in the future was very high, ranging from 0.989 to 1.0, and the occurrence probability of extreme drought was high in the future.

Key words : Bivariate drought frequency analysis, Cheugugi, Climate change, Risk analysis

초 록

기후변화의 영향으로 극심한 가뭄에 의한 피해가 증가하고 있으며, 이러한 피해를 줄이기 위하여 극한 가뭄에 대한 정량적인 분석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 극한 가뭄의 위험도에 대한 정량적 분석을 위해 임계수준방법을 측우기 강우자료, 관측 강우자료, 미래 기후변화 시나리오 강우 자료에 적용하여 가뭄사상을 정의하고 가뭄의 지속기간과 심도를 도출하였다. 또한, 코플라 함수를 활용하여 가뭄 지속기간 및 심도를 동시에 고려하는 이변량 가뭄빈도분석을 실시하였다. 이변량 가뭄빈도곡선을 바탕으로 과거·현재·미래에 대한 위험도를 산정했으며, 과거 및 현재를 기준으로 미래의 극한 가뭄에 대한 위험도를 분석하였다. 그 결과 과거 및 현재에 비해 미래의 평균 가뭄 지속기간은 짧게 나타났으나 평균 가뭄 심도는 매우 크게 나타났다. 따라서 미래에는 짧은 기간의 심한 가뭄들이 발생할 것으로 예측된다. 또한, 최대가뭄의 위험도를 분석한 결과 미래의 최대 가뭄 위험도는 과거 및 현재에 비해 각각 1.39~1.94배, 1.33~1.81배 큰 것으로 확인되었다. 최종적으로 미래에서 과거 및 현재의 기왕최대 가뭄 이상의 극한 가뭄위험도는 0.989와 1.0 사이의 범위를 가지는 것으로 나타나, 미래에는 극한 가뭄의 발생확률이 높은 것으로 판단된다.

검색어 : 기후변화, 위험도 분석, 이변량 빈도분석, 측우기

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

** 정회원 · 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석박사과정 (member · Hanyang University · jisoo91@hanyang.ac.kr)

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

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

Received December 8, 2017/ revised January 12, 2018/ accepted March 16, 2018

1. 서론

최근 기후변화의 영향으로 인하여 세계 곳곳에서 이상기후 현상이 빈번히 발생하고 있으며, 극한 기후현상의 발생도 증가하고 있다. 이로 인하여 세계 곳곳에서 심각한 피해가 발생하고 있다. 특히 가뭄의 경우 넓은 지역에 장기간에 걸쳐서 지속되는 특징으로 인하여 즉각적인 인지가 어려우며, 적절한 대처가 이루어지지 않는다면 피해가 매우 커지게 된다. 따라서 기후변화의 영향으로 발생하는 가뭄 피해를 최소화하고 이에 대한 대책을 마련하기 위하여, 과거·현재·미래의 극한 가뭄 위험도에 대해 정량적으로 분석할 필요가 있다.

장기간의 평균보다 강수량이 부족하다는 개념의 임계수준방법을 적용하면 가뭄의 정의가 매우 간단해진다. Yoo et al.(2013)은 월강우량에 대한 가뭄 절단수준을 결정하여 기상학적 가뭄을 정의하고 가뭄해석을 수행했으며, Yu et al.(2017)은 하천유량이 연속해서 일정 임계수준 이하로 부족해지는 기간을 수문학적 가뭄으로 정의하고 가뭄빈도해석을 통해 확률론적 재현기간을 분석하였다.

가뭄사상의 지속기간 및 심도에 대하여 단변량 빈도해석을 진행할 경우 각각의 결과가 상이하게 나타나는 문제가 발생한다. 따라서 가뭄을 일관성있게 분석하기 위해서는 가뭄사상의 지속기간과 심도를 동시에 고려하는 이변량 빈도해석을 수행해야 한다(Kim et al., 2003). 예를 들어, Chen et al.(2013)은 결합확률분포로 아르키메디안(archimedean) 및 메타타원형(metaelliptical) 코플라를 적용하여 단변량 및 다변량 가뭄빈도해석을 수행하여 각 결과를 분석 및 비교하였다. Yoo et al.(2016b)는 코플라 함수를 활용하여 가뭄의 지속기간·심도의 분포 형태를 유지하고 두 변량의 불확실성에 대해 정량적으로 해석하였다.

이러한 이변량 빈도해석의 결과를 활용하면 특정 가뭄사상에 대한 위험도를 분석할 수 있다. 특히 최근에는 미래 기후변화 시나리오 자료를 바탕으로 미래 가뭄에 대한 위험도를 산정하는 연구들이 진행되고 있다. Yoo et al.(2016a)은 미래 기후변화 시나리오 자료를 사용하여 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI) 기반 및 표준강수·증발산량지수(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) 기반의 가뭄 위험도를 비교·분석했으며, Kim et al.(2015)는 미래 기후변화 시나리오를 적용하여, 한반도 극한 가뭄사상에 대한 사공간적 분석을 수행하여 수문학적 위험도를 산정하고 미래 가뭄에 대하여 평가하였다. 또한 Yu et al.(2016; 2017)은 코플라 함수를 적용한 이변량 빈도해석을 실시하여 비초과확률에 따른 임계심도를 결정했으며, 이를 활용하여 극한 가뭄사상에 대한 수문학적 위험도를 산정하였다.

현재 가뭄의 위험도 평가에 관한 연구들이 다양하게 진행되고 있지만, 과거·현재·미래의 가뭄에 대해 정량적으로 분석하는 연구

는 아직까지 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 측우기 자료와 미래 기후변화 시나리오 자료를 활용하여 과거·현재·미래의 극한 가뭄에 대한 기상학적 가뭄 위험도를 산정했으며, 과거 및 현재를 기준으로 미래의 가뭄 위험도를 비교·분석하였다. 또한 가뭄 위험도 산정 과정에 가뭄의 지속기간과 심도를 동시에 고려하도록 코플라 함수를 적용하여 이변량 빈도해석을 실시하였다.

2. 연구지역 및 자료

기후변화에 따른 미래의 가뭄 위험도를 정량적으로 평가하기 위해서는 과거와 현재 자료에 대한 가뭄빈도해석을 통한 가뭄 위험도를 산정하고 이를 미래의 가뭄 위험도와 비교·분석하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 과거 강수량 자료를 확보하기 위하여 측우기 기록을 활용하였다. 측우기 기록은 1770년대 이후부터 승정원일기와 일성록을 비롯한 여러 문헌에 관측기록이 남아있으며, Jhun and Moon(1997)이 승정원일기와 일성록에 기록된 강수량 자료를 바탕으로 측우기 자료(1777~1907년)를 복원하였다. 현재 강수량 자료는 기상청의 관측자료(1912~2015년)를 사용했으며, 미래 강수량 자료는 IPCC 5차 평가보고서에서 선정한 4개의 기후변화 시나리오 중 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우를 의미하는 RCP 8.5 시나리오에 HADGEM-ES 모델을 이용하여 추정된 자료(2016~2099년)를 사용하였다(Park et al., 2013). 서울지역의 경우, 복원된 측우기 자료의 신뢰성이 인정되어 있고(Yoo et al., 2007), 100년 이상의 강수량 관측자료가 구축되어 있다. 따라서 본 연구의 대상지역은 과거, 현재, 미래의 강수량 자료를 확보할 수 있는 서울지역으로 선정하였다.

3. 연구방법

본 연구에서는 강수량 자료에 대한 동질성 분석을 수행한 후, 측우기 자료, 관측 자료 및 미래 기후변화 시나리오 자료 각각에 대해 임계수준 방법을 적용하여 가뭄의 특성을 산정하였다. 산정된 지속기간과 심도를 결합하기 위해 코플라 함수를 활용하여 이변량 빈도해석을 수행했으며, 그 결과인 재현기간을 바탕으로 과거, 현재, 미래의 가뭄 위험도를 분석하였다.

3.1 동질성 분석

본 연구에서는 세 개의 서로 다른 강우량 자료를 사용하므로, 세 개의 자료가 각각의 모집단 분포를 가지고 있다는 것을 입증해야 유의미한 결과를 얻을 수 있다. 이를 위해 세 개의 강우량 자료 집단에 대한 분산분석(Analysis of variance, ANOVA)을 실시하였다.

분산분석은 두 개 이상 집단의 모평균에 대한 분석을 수행하여

주어진 자료에 대한 동질성 검사를 실시하는 것이다. 즉, 집단 내 분산 변동과 각 집단 간 분산의 비교를 통해 생성된 F 분포를 이용하여, 각 집단의 모집단 분산 및 평균이 차이가 있는지 검정하는 것이다(Nam et al., 2010). 분산분석은 요인 수에 의해 일원분산분석, 이원분산분석 및 다원분산분석으로 분류된다. 이 중 일원분산분석은 종속변수 1개에 단일독립변수를 가지며, 단일독립변수 내의 k개 집단의 표본들을 비교하여 집단 간 평균치의 차이가 유의한지 검증한다. 분산분석을 통하여 동질성 검정을 하기 위하여 k개의 각 집단에서의 모집단 분산은 동일하다는 귀무가설을 설정하고 F 검정을 실시한다. Eq. (1)은 F 검정의 기각역을 나타낸 것이다.

$$R : F = \frac{MS_B}{MS_W} \geq F_{\alpha, k-1, n_T-1} \quad (1)$$

여기서, α 는 유의수준, k 는 집단의 갯수, n_T 는 총자료수이며, MS_B 는 집단간 평균제곱이고, MS_W 는 집단내 평균제곱이다.

3.2 임계수준방법

가뭄사상을 정의하기 위해 미리 결정된 임계수준을 기준으로 활용하는 임계수준방법을 사용하였다.

임계수준을 결정하는 방법은 다양하며, 임계수준에 따라 가뭄의 특성이 달라지므로 적절한 방법을 선택해야 한다(Yu et al., 2017). 임계수준은 과거 강수량의 경험적 누적 분포 함수에 기초하여 강수량이나 유허곡선의 백분율을 기준으로 결정된다(Carrão et al., 2014). 일반적으로 지역의 특성을 고려하여 유허곡선의 70% (Q_{70})와 95% (Q_{95}) 사이에서 임계수준이 결정된다. 임계수준은 크게 고정 임계수준과 변동 임계수준으로 구분된다. 고정 임계수준은 전체 통계 기간 동안 하나의 임계값을 가지며, 변동 임계수준은 기준 기간(일별, 월별, 계절별)에 따라 서로 다른 임계값을 갖고 있다. 변동 임계수준방법의 경우, 고정 임계수준방법에 비해 강우량 과부족에 대한 정확성을 증가시켜 가뭄분석에 더욱 적절하다(Karimi and Shahedi, 2013). Fig. 1은 임계수준방법(threshold level method)을 사용하여 가뭄을 정의한 것이다. ①, ②, ③은

각각 가뭄사상을 의미하며, 지속기간(duration)은 가뭄이 시작할 때부터 끝날 때까지의 기간이다. 또한 지속기간동안의 총 강우 부족량을 심도(severity)라고 하며, 가뭄의 시작부터 그 다음 가뭄사상의 시작까지의 기간을 발생간격(interarrival)이라 한다.

3.3 이변량 빈도해석

가뭄사상은 지속기간과 심도의 두 가지 특성인자로 분석될 수 있으며, 동일한 심도를 가지더라도 지속기간이 달라진다면 빈도해석의 결과가 상이하게 나타난다. 따라서 가뭄의 빈도해석을 수행할 때 하나의 특성만을 고려한다면 일관성 있는 결과를 얻을 수 없으므로(Kim et al., 2006), 가뭄의 심도와 지속기간 모두를 고려하는 이변량 빈도해석을 실시해야 한다.

이변량 빈도해석을 실시하기 위해서 먼저 가뭄의 지속기간과 심도에 적합한 확률분포함수를 산정해야 한다. 산정된 두 변량의 주변확률분포를 결합하기 위하여 결합확률밀도함수를 추정하고, 이를 통하여 이변량 가뭄빈도해석을 실시한다. 최근에는 결합밀도함수를 추정하기 위해서 두 변수간의 의존구조를 잘 반영하고 각각의 확률분포간의 결합 및 분리가 용이한 코플라 함수가 많이 사용되고 있다(Zhang and Singh, 2006; Wong et al., 2010; Lee and Salas, 2011; Yoo et al., 2016b; Yu et al., 2016). 코플라 함수를 사용하여 결합확률분포를 산정하는 방법은 Eq. (2)와 같다.

$$F_{D,S}(d,s) = C(F_D(d), F_S(s)) \quad (2)$$

여기서, d 는 지속기간, s 는 심도를 나타낸다. F_D 는 지속기간에 대한 누적분포함수이고 F_S 는 심도에 대한 누적분포함수이며, C 는 F_D 와 F_S 를 결합하는 코플라 함수이다.

코플라 함수는 크게 Archimedean, Elliptical, Extreme value, Plackett 등 4가지로 구분된다. 여러가지 코플라 함수 중 Archimedean 코플라 함수는 다른 코플라 함수에 비해 매개변수 추정 및 분포함수 산정 과정이 간단하고, 다양한 형태의 함수를 포함하고 있어 변수간의 상관관계를 잘 반영하기 때문에 가뭄빈도해석에서

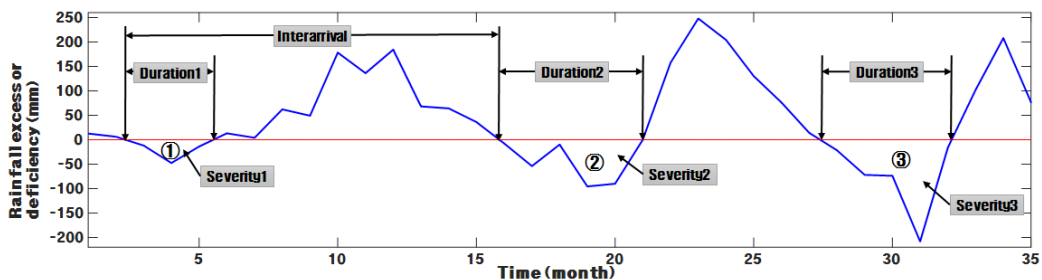


Fig. 1. Drought Definition Using a Threshold Level Method

많이 적용되고 있다(Nelson, 1999; Zhang and Singh, 2006; Yu et al., 2016). Archimedean 코플라 중 Clayton, Frank, Gumbel 코플라 산정식은 Table 1과 같다. Table 1에서 u와 v는 각각의 변수를 의미하며, θ 는 매개변수를 나타낸다.

빈도해석은 어떠한 크기를 가진 가뭄사상의 발생 특성을 확률론적으로 추정하는 방법으로써, 이변량 빈도해석의 결과로 이변량 재현기간을 얻을 수 있다. 임의의 가뭄사상의 재현기간은 해당 사상의 초과확률에 역수를 취하여 계산할 수 있다. 또한 가뭄의 재현기간은 두 가뭄 사이의 평균 발생간격 또는 평균경과시간을 고려해야 한다(Shiau and Shen, 2001; Kim et al., 2006; Serinaldi et al., 2009; Chen et al., 2013). 이변량 가뭄빈도해석의 경우 여러 가지 확률적 결합시나리오가 가능하다. 예를 들어 수문사상이 두 가지 변수(X와 Y)를 가지고 있다면, X와 Y 중 어떤 한 변수가 초과하거나 X와 Y 모두 초과했을 때의 재현기간 산정이 가능하다. 수자원 설계에서는 초과확률에 의해 산정된 재현기간이 적용되기 때문에, 안정적인 설계를 위해서는 두 변수 모두 초과했을 때의 재현기간을 반영하는 것이 적절하다(Kown and Kim, 2009). 따라서 가뭄의 지속기간 및 심도를 모두 고려하며, 두 변수 모두 일정 크기 이상일 경우($D \geq d$ and $S \geq s$)에서의 이변량 재현기간은 Eq. (3)에 의해 산정할 수 있다.

$$T_{DS} = \frac{E(L)}{P(D \geq d \text{ and } S \geq s)} \quad (3)$$

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

여기서, $E(L)$ 은 가뭄사상의 평균 발생간격이며, T_{DS} 는 가뭄 지속기간과 심도에 대한 결합재현기간이다.

산정된 이변량 재현기간을 통해 가뭄사상에 대한 위험도를 산정할 수 있다. 위험도는 설계년도 n년 이내에 재현기간 T_{DS} 를 갖는 크기의 사상이 발생할 확률을 의미하며(Yu et al., 2016), Eq. (4)에 의해 계산된다. 따라서 Eq. (4)를 활용하여 과거·현재·미래의 극심한 가뭄에 대한 위험도 분석을 실시하고, 이에 대한 비교를 통하여 과거·현재에 비해 미래의 가뭄 위험도의 변화를 파악할 수 있다.

Table 1. Equations of Archimedean Copula Families

Name	Equation $C(u, v)$
Clayton	$(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$
Frank	$\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$
Gumbel	$\exp \left[- \{ (-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta \}^{1/\theta} \right]$

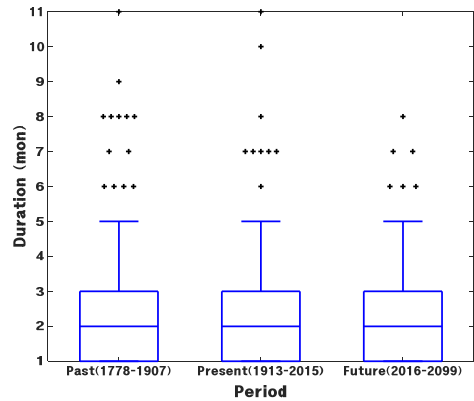
$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_{DS}} \right)^n \quad (4)$$

4. 적용 및 결과

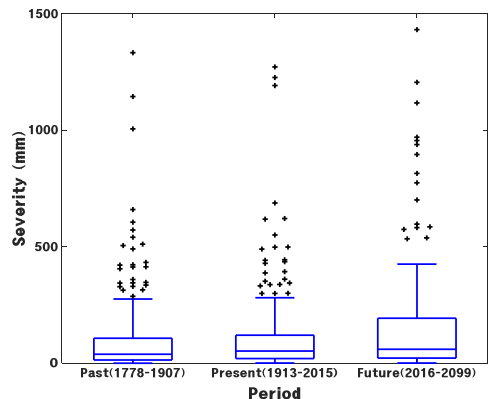
4.1 가뭄사상의 정의

가뭄 빈도해석을 수행하기 전, 본 연구에서 사용하는 측우기 자료, 관측자료, 미래 기후변화 시나리오 자료의 3가지 강수량 자료에 대하여 동질성 검사를 실시하였다. 계산된 F-통계량 값은 $8.61e^{-12}$ 이며 유의수준 0.05%내에서 ‘각 자료들은 동일한 모집단을 가진다’는 귀무가설을 기각하였다. 따라서 3가지의 강수량 자료는 동질성을 가지지 못하므로 개별적으로 분리하여 분석을 시행하였다.

측우기 자료, 관측자료 및 미래 기후변화 시나리오 자료의 가뭄사상을 추출하기 위하여, 강수량 자료를 3개월씩 누적시킨 후, 시간적 순서와 상관없이 크기순으로 나열해서 얻은 경험적 누적분포함수를 각 강수량 자료에 적용하였다. 그 결과, 일반적으로 많이 사용하는 70~95% 임계수준 중 가뭄사상의 수가 SPI로 산정한 결과와



(a) Distribution of Duration



(b) Distribution of Severity

Fig. 2. Distribution of Drought Characteristics

Table 2. Changes of Drought Characteristics According to Past, Present, and Future

Characteristic \ Period	Past (1778~1907)	Present (1913~2015)	Future (2016~2099)
Average duration (month)	2.28	2.36	2.25
Average severity (mm)	112.80	138.44	182.90
Average interarrival time (month)	7.81	8.13	7.76

가장 가까운 70%에 해당하는 강우량을 임계수준으로 설정하였다. 설정된 임계수준을 바탕으로 가뭄사상을 추출했으며, 가뭄사상의 지속기간(duration)과 심도(severity)의 분포특성을 Fig. 2에 상자 그림(boxplot) 형태 및 Table 2에 표로 나타내었다. 측우기 자료, 관측자료 및 미래 기후변화 시나리오 자료에서 가뭄사상은 각각 198개, 145개 및 127개이다. 평균 가뭄 지속기간은 현재에서 2.36개월로 가장 높게 나타났고, 평균 가뭄 심도는 미래에서 182.9mm로 가장 높게 나타났다. 대체적으로 미래에는 지속기간은 짧지만 심도가 높은 가뭄들이 많이 발생하고 있다. 이는 결국 기존 연구들과 마찬가지로 미래에는 단기간에 강한 가뭄들이 발생한다는 것을 의미한다.

4.2 이변량 빈도해석

4.1절에서 산정된 가뭄 지속기간 및 심도의 최적분포함수를 결정하기 위해서 다양한 확률분포(exponential, normal, gamma, lognormal, Poisson, weibull, generalized extreme value, generalized pareto)에 대해 최우도법으로 매개변수를 추정하고 χ^2 검정을 이용하여 적합도 검정을 실시하였다. 그 결과 측우기 자료, 관측자료 및 미래 기후변화 시나리오 자료 모두 지속기간은 지수분포가 채택되었으며, 심도는 대수정규분포가 채택되었다. 또한 지속기간과 심도의 주변확률분포를 결합하기 위하여 아르키메디안 코플라 (Clayton, Frank, Gumbel) 함수를 적용하였다. 결합된 확률분포함수에 대하여 최우도법을 활용하여 적합도 검정 및 매개변수를 추정한 결과 세 자료 모두 Frank 코플라 결합확률밀도함수로 선정되었다. 선정된 Frank 코플라 결합확률밀도함수를 바탕으로 이변량 빈도해석을 실시했으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 그림에서 다이아몬드로 표시된 각 기간의 최대가뭄사상(maximum drought event)은 위험도 분석에서 기준이 되는 기왕 최대가뭄으로 사용되었다.

4.3 위험도 분석

이변량 빈도해석의 결과를 바탕으로 과거·현재·미래의 최대 가

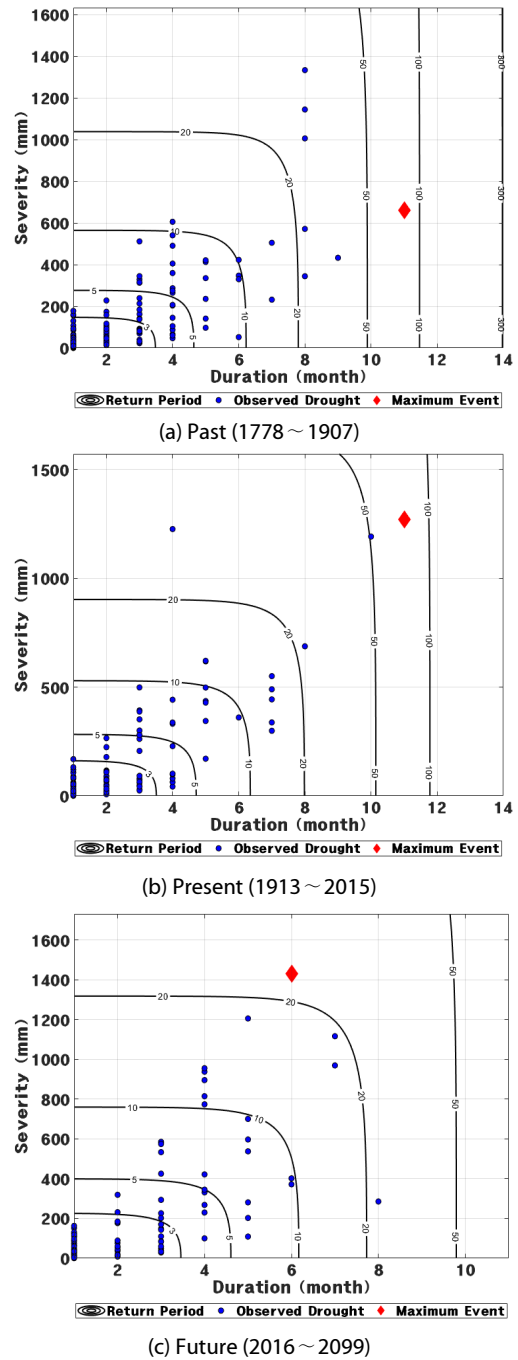


Fig. 3. Severity-Duration-Frequency Curves

뭄사상에 대한 위험도 분석을 수행했으며, 그 결과는 Table 3과 같다. 가뭄사상의 최대 지속기간은 11개월으로써, 1904년 6월에서 1905년 4월 그리고 1942년 12월에서 1943년 10월에 발생하였다. 실제로 2015년 가뭄기록조사 보고서에 의하면 1942년부터 3년 동안 가뭄이 발생하면서 발전용수가 고갈되고 홍작으로 인한 기근이 발생하는 등 피해가 심각했음을 알 수 있다(MLIT, 2016).

하지만 미래 기후변화 시나리오에 의한 최대가뭄사상은 2065년 7월과 2065년 12월 동안 발생하며, 이때의 가뭄심도는 1432.08mm이다. 이 기간에 발생한 가뭄의 위험도도 다른 최대가뭄사상에 비해 크게 나타났다. 특히, 이때의 최대가뭄사상에 대한 설계연한 50, 70, 100년도에서 위험도는 각각 증가하고 있으며, 설계연한 50년일 때의 위험도는 0.8938, 설계연한 100년일 때의 위험도는 0.9887로서 매우 심각한 위험도를 나타내고 있다. 이는 과거 최대가뭄사상과 현재 최대가뭄사상의 위험도보다 각각 설계연한 50년의 경우 1.94배, 1.81배 높으며, 설계연한 100년의 경우 각각 1.39배, 1.33배 높은 것을 확인할 수 있다.

또한, 미래 가뭄 위험도의 변화를 분석하기 위하여 과거와 현재의 최대가뭄사상을 구하고 이를 기왕최대가뭄사상으로 정의했으며, 과거 기왕최대가뭄과 현재 기왕최대가뭄을 기준으로 미래에서 각각 기왕최대가뭄사상보다 지속기간, 심도 및 재현기간이 큰 가뭄에 대한 위험도를 산정하여 비교·분석하였다. Table 4에 제시한 바와 같이, 2065년 7월부터 2065년 12월에 발생한 가뭄은 심도가 가장 큰 가뭄으로써 유일하게 과거 및 현재 기왕최대가뭄보다 모두

큰 가뭄이며 미래 최대 가뭄사상을 나타낸다. 미래에서 현재 기왕최대가뭄 이상의 가뭄이 발생한 사상은 하나이지만 과거 기왕최대가뭄 이상의 가뭄이 발생한 사상은 10개이며, 과거보다 극한 가뭄의 발생빈도가 크게 나타나고 있다. 이에 대한 위험도도 0.9887부터 최대 1.0까지 매우 큰 값을 갖는 것으로 산정되었다.

5. 결론

본 연구에서는 측우기 자료, 관측자료 및 미래 기후변화 시나리오 자료를 활용하여 서울지점의 과거·현재·미래에 대한 이변량 빈도해석을 실시하였다. 임계수준방법을 사용하여 가뭄사상을 추출한 결과, 평균적으로 지속기간은 현재에서, 심도는 미래에서 가장 크게 나타났다. 즉, 미래에는 과거 및 현재에 비해 단기간의 극심한 가뭄이 발생할 것으로 판단된다.

미래의 극한 가뭄 위험도를 정량적으로 분석하기 위해 과거·현재·미래의 최대가뭄사상에 대해 먼저 분석한 결과, 지속기간은 과거와 현재보다 낮지만 심도는 더욱 크게 나타났다. 또한, 위험도의

Table 3. Results of Risk Analysis for the Maximum Drought

Characteristic	Period	Past	Present	Future
		1778~1907	1913~2015	2016~2099
Period of maximum event		1904.06~1905.04	1942.12~1943.10	2065.07~2065.12
Duration (month)		11.00	11.00	6.00
Severity (mm)		659.43	1271.70	1432.08
Return period (month)		81.51	74.19	22.80
Risk (n=100)		0.7090	0.7426	0.9887
Risk (n=70)		0.5786	0.6132	0.9567
Risk (n=50)		0.4606	0.4926	0.8938

Table 4. Risk Analysis of Future Droughts More Severe than the Past and Present Maximum Drought

Characteristic	Baseline				
	Drought period	Duration (month)	Severity (mm)	Return period (month)	Risk
Past maximum drought	2028.06~2028.09	4.00	938.30	12.96	0.9997
	2029.06~2029.09	4.00	955.89	13.26	0.9996
	2037.04~2037.10	7.00	969.85	17.28	0.9974
	2053.06~2053.10	5.00	1206.00	17.93	0.9968
	2058.04~2058.08	5.00	701.02	9.72	1.0000
	2063.07~2063.10	4.00	895.94	12.26	0.9998
	2065.07~2065.12	6.00	1432.08	22.80	0.9887
	2072.07~2072.10	4.00	774.34	10.33	1.0000
	2081.06~2081.09	4.00	814.95	10.96	0.9999
	2085.04~2085.10	7.00	1116.88	18.96	0.9956
Present maximum drought	2065.07~2065.12	6.00	1432.08	22.80	0.9887

경우 과거 및 현재에 비해 크게 산정된 것을 통해 향후 미래에 극한 가뭄 발생확률이 높은 것을 확인할 수 있다. 과거 및 현재 기왕최대가뭄을 기준으로 미래의 가뭄에 대하여 분석한 결과 과거 기왕최대가뭄 이상의 가뭄사상은 10개, 현재 기왕최대가뭄 이상의 가뭄사상은 1개로 산정되었다. 게다가 이렇게 산정된 가뭄의 위험도는 모두 0.9 이상의 값을 가지므로 극한 가뭄의 발생확률이 매우 큰 것을 확인할 수 있다. 즉, 과거 및 현재에 비해 미래에 극한 가뭄의 발생 빈도가 높은 것으로 판단된다.

따라서 현재의 가뭄에 대한 수자원 시스템의 설계 기준은 미래 기후변화를 고려하여 가뭄에 대한 대책 및 정책을 수립할 수 있도록 변경해야 한다. 본 연구의 결과는 수자원 시스템에 대한 정량적인 설계 기준을 마련하기 위한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 17AWMP-B083066-04)과 한국연구재단의 지원(2016R1D1A1A09918872)을 받아 수행되었습니다.

References

- Carrão, H., Singleton, A., Naumann, G., Barbosa, P. and Vogt, J. (2014). "An optimized system for the classification of meteorological drought intensity with applications in frequency analysis." *Journal Appl. Meteor. Climatol.*, Vol. 53, pp. 1943-1960.
- Chen, L., Singh, V. P., Guo, S., Mishra, A. K. and Guo, J. (2013). "Drought analysis using copulas." *Journal Hydrol. Eng.*, Vol. 18, No. 7, pp. 797-808.
- Jhun, J. G. and Moon, B. K. (1997). "Restorations and analyses of rainfall amount observed by Chukwookee." *Asia-Pac, Journal Atmos. Sci.*, Vol. 33, No. 4, pp. 691-707.
- Karimi, M. and Shahedi, K. (2013). "Hydrological drought analysis of Karkkeh river basin in Iran using variable threshold level method." *Curr. World. Environ. Journal*, Vol. 8, No. 3, pp. 419-428.
- 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 Korea Soc. Hazard Mitig.*, 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 Hydrol. Eng.*, 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 Palmer drought index." *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 11, No. 2, pp. 134-143.
- Kwon, Y. M. and Kim, T. W. (2009). "Derived I-D-F curve in Seoul using bivariate precipitation frequency analysis." *Journal Korean Society of Civ. Eng.*, Vol. 29, No. 2B, pp. 155-162 (in Korean).
- Lee, T. and Salas, J. D. (2011). "Copula-based stochastic simulation of hydrological data applied to Nile river flows." *Hydrology Research*, Vol. 42, No. 4, pp. 318-330.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT) (2016). *2015 Drought investigation report* (in Korean).
- Nam, D. H., Noh, S. C., Park, S. Y., Chung, I. H. and Park, C. H. (2010). "Statistical analysis of effect factor for excess sludge reduction in the OSA process." *Seoul Studies*, Vol. 11, No. 4, pp. 161-172.
- Nelson, R. B. (1999). *An Introduction to Copulas*, Springer, New York.
- Park, B. S., Lee, J. H., Kim, C. J. and Jang, H. W. (2013). "Projection of future drought of Korea based on probabilistic approach using multi-model and multi climate change scenarios." *Journal Korean Society of Civ. Eng.*, Vol. 33, No. 5, pp. 1871-1885 (in Korean).
- Serinaldi, F., Bonaccorso, B., Cancelliere, A. and Grimaldi, S. (2009). "Probabilistic characterization of drought properties through copulas." *Phys. Chem. Earth*, Vol. 34, No. 10-12, pp. 596-605.
- Shiau, J. T. and Shen, H. W. (2001). "Recurrence analysis of hydrologic droughts of differing severity." *Journal Water Resour. Plan. Manage.*, Vol. 127, No. 1, pp. 30-40.
- Wong, G., Lambert, M. F., Leonard, M. and Metcalfe, A. V. (2010). "Drought analysis using trivariate copulas conditional on climate states." *Journal Hydrol. Eng.*, Vol. 15, No. 2, pp. 129-141.
- Yoo, C. S., Kim, D. H. and Kim, H. J. (2007). "Evaluation of major storm events both measured by Chukwooki and recorded in annals of Chosen Dynasty: 1. Qualitative approach" *Journal Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 40, No. 7, pp. 533-543 (in Korean).
- Yoo, J. Y., Kwon, H. H., Lee, J. H. and Kim, T. W. (2016a). "Influence of evapotranspiration of future drought risk using bivariate drought frequency curves." *KSCE Journal Civ. Eng.*, Vol. 20, No. 5, pp. 2059-2069.
- 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 Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 46, No. 4, pp. 425-437 (in Korean).
- Yoo, J. Y., Yu, J. S., Kwon, H. H. and Kim, T. W. (2016b). "Determination of drought events considering the possibility of relieving drought and estimation of design drought severity." *Journal Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 49, No. 4, pp. 275-282.
- 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." *Journal Korean Society of Civ. Eng.*, 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 Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 49, No. 3, pp. 217-225 (in Korean).
- Zhang, L. and Singh, V. P. (2006). "Bivariate flood frequency analysis using the copula method." *Journal Hydrol. Eng.*, Vol. 11, pp. 150-164.