



Determination of drought events considering the possibility of relieving drought and estimation of design drought severity

Yoo, Ji Young^a · Yu, Ji Soo^b · Kwon, Hyun-Han^a · Kim, Tae-Woong^{c*}

^aDept. of Civil Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea

^bDept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

^cDept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Ansan 15588, Republic of Korea

Paper number: 15-104

Received: 24 December 2015; Revised: 23 January 2016 / 2 February 2016; Accepted: 2 February 2016

Abstract

The objective of this study is to propose a new method to determine the drought event and the design drought severity. In order to define a drought event from precipitation data, theory of run was applied with the cumulative rainfall deficit. When we have a large amount of rainfall over the threshold level, in this study, we compare with the previous cumulative rainfall deficit to determine whether the drought is relieved or not. The recurrence characteristics of the drought severity on the specific duration was analyzed by the conditional bivariate copula function and confidence intervals were estimated to quantify uncertainties. The methodology was applied to Seoul station with the historical dataset (1909~2015). It was observed that the past droughts considered as extreme hydrological events had from 10 to 50 years of return period. On the other hand, the current on-going drought event started from 2013 showed the significantly higher return period. It is expected that the result of this study may be utilized as the reliable criteria based on the concept of return period for the drought contingency plan.

Keywords: Bivariate Frequency Analysis, Copula Function, Drought Event, Return Period

가뭄해갈 가능성을 고려한 가뭄사상의 결정 및 확률 가뭄심도 산정

유지영^a · 유지수^b · 권현한^a · 김태웅^{c*}

^a전북대학교 토목공학과, ^b한양대학교 대학원 건설환경공학과, ^c한양대학교 공학대학 건설환경플랜트공학과

요지

본 연구에서는 가뭄사상과 확률 가뭄심도를 결정하는 새로운 방법을 제안하였다. 강우자료로부터 가뭄사상을 추출하기 위해 연속이론과 누적 강우부족량을 동시에 고려하였다. 절단수준 이상의 강우사상이 발생할 경우, 그 때까지의 누적 강우부족량을 해갈할 수 있을 만큼의 강우량이 발생하였는가를 확인하여 가뭄사상의 종료여부를 최종 결정하였다. 이와 같이 추출된 가뭄사상의 지속기간과 심도의 상호 의존성 구조를 파악하여 결합분포함수를 추정하기 위해 코플라 함수를 적용하였다. 또한 이변량 코플라 함수의 조건부 함수를 이용하여 가뭄의 특정 지속기간에 대한 가뭄심도의 재현특성을 분석하였으며, 신뢰구간을 추정하여 이변량 빈도해석의 불확실성을 정량화하였다. 서울지점의 1909~2015년 강우자료에 적용한 결과 과거 극한가뭄으로 판단되었던 가뭄사상은 대부분 최소 10년에서 최대 50년 정도의 재현기간을 갖는 반면 2013년 발생하여 현재까지 지속되고 있는 2015년 가뭄은 현저히 높은 재현기간을 가지고 있는 것으로 나타났다. 이러한 연구 결과는 향후 가뭄대책을 마련하는 데 있어 빈도개념을 바탕으로 하는 신뢰성 있는 기준으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어: 가뭄사상, 이변량 빈도해석, 코플라 함수, 재현기간

*Corresponding Author. Tel: +82-31-400-5184
E-mail: twkim72@hanyang.ac.kr (T.-W. Kim)

1. 서론

가뭄은 일반적으로 강수량의 부족으로부터 유발되며, 도시 및 농업지역의 수자원 이용 및 관리에 상당한 영향을 미치게 된다. 특히, 홍수와는 달리 가뭄은 장기간에 걸쳐 광범위한 지역으로 피해가 확산되는 특징을 가지고 있어, 가뭄 감시 및 예측에 대한 어려움이 존재한다. 실제 우리나라에서도 최근까지 가뭄으로 인한 수자원 공급 긴장상태를 경험하는 빈도가 점차 증가하고 있는 실정이다. 이러한 가뭄에 대한 재현특성을 이해하는 것은 가뭄 대응을 위한 중요한 요소가 된다.

가뭄을 정량적으로 평가하기 위한 목적으로 다양한 가뭄 지수들이 개발되어 활용되고 있다. 이 중에서 국내외에서 공통적으로 많이 활용되는 가뭄 지수로는 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI), 파머가뭄지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI), 지표수공급지수(Surface Water Supply Index, SWSI) 등이 대표적이다. 하지만 대부분의 가뭄지수는 현재 및 미래의 가뭄상태를 모니터링하기 위한 목적으로 활용되고 있고, 가뭄의 예방 및 완화를 목적으로 하는 실질적인 가뭄대책 수립을 위한 정량적인 기준으로 활용되지 못하는 한계가 있다.

홍수의 경우에는 빈도개념을 통해 국가하천은 200년 빈도, 지방하천은 50~80년 빈도, 소하천은 30년 기준으로 수공구조물을 설계하여 관리하고 있다(KWRA, 2009). 가뭄의 경우에는 댐 개발 및 수자원장기종합계획을 수립을 위한 물 공급의 안전도는 과거 최대가뭄년을 기준으로 설정되고 있다. 이는 수문현상의 확률론적 불확실성과 재현특성을 반영하지 못하는 한계를 지니게 된다. 따라서 본 연구에서는 실제 댐 유입량의 갈수유입조건을 결정하는데 활용할 수 있는 확률 가뭄심도를 추정하기 위해서 기상학적 측면에서 강수의 부족량을 기반으로 가뭄 빈도해석을 수행하는 것이 목적이다. 이를 위해서, 우선 가뭄을 평년과 비교하여 강수량이 부족한 경우로 정의한 후, 평년대비 충분한 강수량이 내려 가뭄이 해소될 때까지 가뭄이 지속된다고 가정하였다. 이러한 가뭄정의에 따른 분석결과와 객관성을 확보하기 위해 우리나라에서 강수자료를 가장 길게 보유하고 있는 서울지점을 대상으로 실제 과거 가뭄기록과의 비교검토를 실시하였다.

일반적으로 가뭄에 대한 분석을 수행할 경우, 분석자료의 부족으로 인해 통계학적 분산이 증가하여 분석의 효율성이 감소할 가능성이 있기 때문에, 빈도해석 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 충분한 양의 관측자료를 확보해야 한다(Scott, 1992; Kim et al., 2006). Yoo et al. (2013)은 짧은 관측자료 기반의 가뭄해석 결과에 대한 불확실성을 분석하기 위한

방안으로 추계학적 강수모의기법을 활용한 바 있다. 그러나 시계열 모의발생시 모의기법에 필연적으로 불확실성 및 오차가 내재되기 때문에 가뭄사상을 추출할 때 신뢰성을 감소시키는 요인으로 작용할 수도 있다. 또한, 가뭄은 지속기간과 심도 모두를 주요 특성변수로 갖는 수문사상이므로 이를 반영한 확률 및 통계학적 해석방법을 적용할 필요가 있다. 가뭄의 지속기간과 심도에 따른 각각의 빈도해석 결과도 서로 상이하게 나타나는 문제가 있기 때문에, 이변량 빈도해석 모형을 적용하여 분석하는 것이 타당하다(Kim et al., 2003). 따라서 본 연구에서는 가뭄의 지속기간-심도의 분포형태를 유지하여 추계학적 모의발생이 가능한 코플라(Copula) 함수를 활용하였으며, 두 변량이 갖는 결합분포함수에 대한 불확실성을 정량적으로 해석하였다. 이러한 이변량 가뭄빈도해석 결과는 특정한 가뭄 지속기간(3, 6, 12, 18, 24개월)에 따른 조건부 확률 가뭄심도를 추정하는 것이 가능하며, 가뭄대응 기준을 마련하는 데 있어 신뢰성 있는 가뭄정보로서 활용이 가능할 것으로 기대된다.

2. 연구방법

2.1 가뭄의 정의

일반적으로 가뭄을 정의하는 데 있어 크게 4가지(기상학적, 수문학적, 농업적, 사회경제학적) 관점으로 구분된다. 본 연구에서는 가뭄의 근본적인 원인을 강수량의 부족에서부터 시작된다는 기상학적 관점으로 가뭄을 해석하기 위하여 월강수량을 이용하고 연속이론 개념을 적용하여 가뭄사상을 정의하였다. 일반적으로 연속이론을 기반으로 기상학적 가뭄사상을 정의하는 경우에는 가뭄절단수준 이하로 떨어지는 시점으로부터 절단수준 이상이 되는 종점까지의 시간을 가뭄 지속기간(duration)으로 정의하며, 가뭄 지속기간 동안의 누적 강우부족량을 가뭄의 심도(severity)로 정의한다.

본 연구에서는 기존의 선행연구에서 적용된 가뭄사상을 정의하는 방법에서 추가적으로 가뭄해소 가능성을 반영하기 위해 Fig. 1과 같이 가뭄사상을 새롭게 정의하는 방법을 제안하였다. 즉, 강우량이 절단수준 이하가 되면 가뭄사상이 시작되고, 가뭄사상의 심도는 누적 강우부족량이 된다. 가뭄이 지속되는 동안 강우량이 절단수준 이상이 되는 경우, 강우량과 누적 강우부족량을 비교하여 가뭄의 해갈여부를 판단한다. 예를 들어, Fig. 1에서는 3개의 가뭄사상 중 첫 번째 가뭄사상(부족강수량: -166.7 mm)과 세 번째 가뭄사상(부족강수량: -255.8 mm)은 연속되어 나타난 습윤사상(습윤량: 347.5 mm,

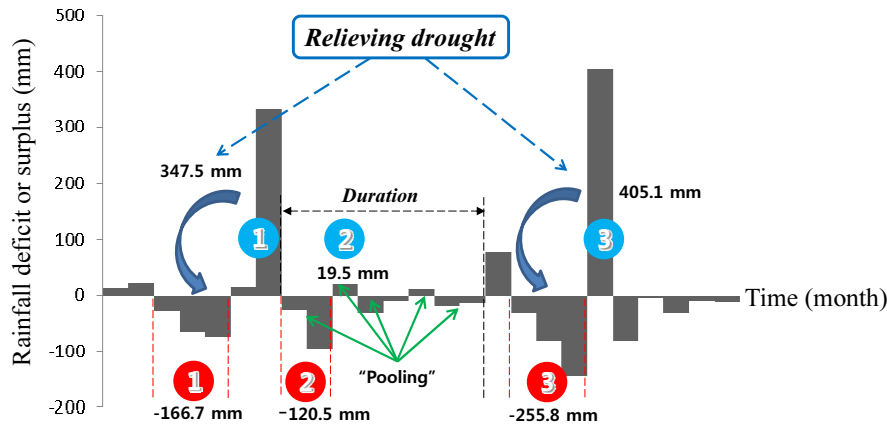


Fig. 1. Concept for new drought definition

405.1 mm)이 이전의 누적 부족강수량을 해결해 줄 수 있을 크기의 강수량이 발생하였다. 반면에 두 번째 가뭄사상(부족 강수량: -120.5 mm)의 경우, 연속되어 나타난 습윤사상(습윤량: 19.5 mm)은 이전의 부족강수량을 해결할 수 없으며, 즉, 이후 발생한 월 강우량은 앞서 발생한 가뭄사상의 누가 강수 부족량(-120.5 mm + 19.5 mm = -101.0 mm)이 음의 값을 가지게 되어 가뭄이 지속되고 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 가뭄사상의 풀링(pooling) 과정을 통해 가뭄사상을 최종 결정하였다.

Fig. 1에서 풀링된 가뭄사상의 지속기간은 8개월이며, 첫 번째 가뭄사상(부족강수량: -120.5 mm), 이후 연속되는 1개월의 습윤사상(습윤량: 19.5 mm), 이후 두 번째 가뭄사상(강수부족량: -32.5 mm + (-10.5 mm) = -43.0 mm), 이후 연속되는 1개월의 습윤사상(습윤량: 10.4 mm), 이후 연속되는 세 번째 가뭄사상(강수부족량: -20.6 mm + (-14.3 mm) = -34.9 mm)이 모두 고려되어 가뭄심도는 -168.5 mm로 결정된다. 다시 말해, 본 연구에서는 가뭄지속기간을 결정하는데 있어, 하나의 습윤사상이 이전의 가뭄사상을 해결해 줄 수 있는 크기의 습윤량 보다 적을 경우에는 이전의 누적강수부족량을 다음의 가뭄사상에도 영향을 미친다고 해석하였다.

2.2 불확실성을 고려한 코플라 함수 기반의 이변량 가뭄빈도 해석 기법

일반적으로 가뭄해석 연구에서는 다양한 가뭄 특성인자들 사이의 관계를 복합적으로 결합시켜 통계학적으로 유의한 결합분포함수의 조건부 확률을 추정하는 연구가 활발히 이루어지고 있다(Kim et al., 2003; Salas et al., 2005; Mirakbari et al., 2010). 최근에는 다변량 사이의 의존구조를 파악하는데 있어, 서로 다른 여러 확률분포의 결합과 분리가 용이하다는

장점으로 알려져 있는 코플라 함수가 가뭄해석에 활발하게 적용되고 있다(Wong et al., 2010; Lee and Salas, 2011; Yoo et al., 2014). Reddy and Ganguli (2012)는 코플라 함수를 기반으로 가뭄 지속기간과 심도의 의존성 구조를 파악하여 조건부 재현기간을 추정하였으며, 최종적으로 S-D-F (Severity-Duration-Frequency) 곡선을 유도한 바 있다.

본 연구에서는 가뭄 지속기간과 심도에 대한 결합특성을 분석하는데 있어, 두 변량 사이의 상호 의존성 구조를 파악하기에 용이한 4가지 코플라 함수(Gaussian copula, Clayton copula, Frank copula, Gumbel copula)를 적용하여 결합분포함수의 추정 및 이변량 코플라 함수를 이용한 조건부 모의를 실시하였다. 본 연구에서 사용한 코플라 함수에 대한 결합분포함수의 관련 수식은 참고문헌(Nelsen, 2006)을 통해 확인할 수 있으며, 이변량 코플라 함수의 조건부 모의절차는 아래와 같다(Darsow et al., 1992).

- (1) 코플라 함수를 통해 가뭄 심도(U_1)와 지속기간(U_2)의 이차원 결합확률밀도함수(C)를 추정한다.
 $\Rightarrow C: [0, 1]^2 \rightarrow U[0, 1]$
- (2) 임의의 U_2 를 모의한다.
 $\Rightarrow U_2 \sim U[0, 1]$
- (3) 코플라 함수(C)를 편미분한다.
 $\Rightarrow \phi_{U_1|U_2=u_2}(u_1) = \frac{\partial}{\partial u_2} C(u_1, u_2)|_{U_2=u_2}, u_1 \in [0, 1]$
- (4) 과정(3)의 역함수를 도출하여 조건부 결합밀도 함수(v)를 추정한다.
 $\Rightarrow \phi^{-1}_{U_1|U_2}(v) = \inf\{u_1 > 0; \phi_{U_1|U_2}(u_1) \geq v\}, v \in [0, 1]$
- (5) 임의의 $v \sim U[0, 1]$ 을 모의한 후, 과정(4)에서 계산되어진 역함수에 대입하여 U_1 을 구한다.

$\Rightarrow U_1 = \phi^{-1}_{U_1|U_2}(v)$ 이며, 즉 $C \sim (U_1, U_2)$ 와 같이 모의 된다.

이처럼 모의된 조건부 함수는 가뭄의 특정 지속기간에 대한 가뭄 심도의 발생특성을 모의하는 데 있어 효율적으로 활용이 가능하다. 즉 신뢰구간 추정을 통해 이변량 빈도해석의 불확실성을 정량화할 수 있다. 본 연구에서는 코플라 함수로 추정된 결합확률밀도함수를 이용하여 이변량 가뭄 재현기간을 산정하기 위해 Eq. (1)을 이용하였다(Kim et al., 2006).

$$T_{DS} = \frac{E(L)}{P(D \geq d, S \geq s)} = \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + C(F_D(d), F_S(s))} \quad (1)$$

여기서 T_{DS} 는 $D \geq d$ 이고, 동시에 $S \geq s$ 인 경우의 결합재현기간이며, $E(L)$ 은 가뭄의 발생간격을 나타낸다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 과거 1909~2015년 서울지점 가뭄 특성 분석

본 연구에서는 표준강수지수(SPI)을 계산할 때 이용되는 방법(Mckee et al., 1993)과 동일한 개념으로 서울지점 월강수량 시계열(1908~2015년)에 대하여 각 연도의 월별 가뭄 절단수준을 Eq. (2)와 같이 산정하였으며, 그 결과 Fig. 2와 같이 1909년 1월부터 2015년 9월에 대한 월단위 강수 과부족시계열을 구축하였다.

$$x_{(n,i)} = \frac{x_{(s,i)} + x_{(s+1,i)} + \dots + x_{(n-1,i)}}{n-s} \quad (2)$$

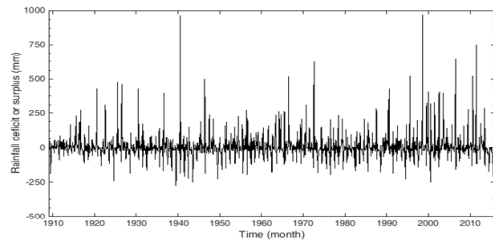


Fig. 2. Rainfall deficit and surplus time series at Seoul station

여기서 $x_{(n,i)}$ 는 n 년도 i 월의 가뭄절단수준을 나타내며, i 는 1, 2, 3, ..., 12월을 나타내고, s 는 강우자료보유의 시작연도이다.

본 연구에서 제안한 가뭄해갈 유무에 따른 풀링 과정을 적용했을 경우, 서울지점은 전체 자료 분석 기간 내 총 81개의 가뭄사상이 추출되며, 풀링 과정을 적용하지 않고 일반적인 방법으로 가뭄사상을 추출하였을 경우에는 183개가 발견되어진다. 즉, 기상학적 측면에서 평년대비 강수부족으로 인해 발생하는 가뭄사상 중 일부는 가뭄이 해갈되어져 가뭄사상에서 제외되거나, 이전의 가뭄사상과 연속사상으로 풀링이 되어 가뭄사상의 지속기간이 길어지게 된다. 그러나 일반적인 방법으로부터 추출된 가뭄사상의 최대 지속기간은 12개월이며, 다수의 가뭄사상은 짧은 지속기간을 갖고 있다. 이처럼 짧은 지속기간을 가지는 가뭄사상이 과도하게 많은 경우, 확률론적 방법으로 가뭄재현특성을 평가할 때 실제 확률적 거동이 왜곡되어 편향된 재현기간이 추정될 수 있다. Table 1은 일반적인 가뭄사상 추출방법을 적용하였을 경우와 본 연구에서 제안한 풀링 과정을 적용한 가뭄사상 추출방법을 적용하였을 경우에 대한 기초통계량을 나타낸다.

일반적인 가뭄사상 추출방법을 적용하였을 경우, 평균 가뭄 지속기간은 약 3.2개월, 평균 가뭄 심도는 135 mm였으나, 새롭게 제안된 가뭄사상 추출방법을 적용하였을 경우에는 평균 가뭄 지속기간은 약 10개월, 평균 가뭄 심도는 228 mm로

Table 1. Basic statistics of two different sets of drought events

	Number of drought events		Mean	Maximum	Standard Deviation	Skewness
Basic Method	183	Duration (month)	3.26	12.00	1.87	2.09
		Severity (mm)	-134.96	-647.97	127.47	-1.69
New Method	81	Duration (month)	9.88	35.00	6.50	1.74
		Severity (mm)	-227.73	-1364.58	238.29	-2.63

Table 2. Historical rankings of the drought at seoul

Ranking	Duration (month)	Period	Ranking	Severity (mm)	Period
1	35	1942.04~1945.02	<u>1</u>	<u>-1364.58</u>	<u>2013.08~2015.09</u>
2	30	1948.11~1951.04	2	-1054.39	1948.11~1951.04
3	27	1938.04~1940.06	3	-947.37	1942.04~1945.02
<u>4</u>	<u>26</u>	<u>2013.08~2015.09</u>	4	-918.28	1938.04~1940.06
5	23	1987.09~1989.07	5	-633.34	1987.09~1989.07
<u>6</u>	<u>23</u>	<u>1993.08~1995.06</u>	6	<u>-576.19</u>	<u>1993.08~1995.06</u>
7	20	1931.09~1933.04	7	-566.33	1981.08~1982.09

나타났다. 즉, 가뭄발생 후 충분한 강수가 발생하여 가뭄이 해결되거나, 강수 부족상태가 잠재적으로 장기간 지속되어 누적 가뭄심도가 증가된 경우의 가뭄사상을 복합적으로 고려함에 따라 가뭄의 지속기간과 심도는 상당히 증가하는 것을 확인할 수 있다.

또한, 과거 가뭄발생의 최대 지속기간과 심도의 역대 순위를 검토한 결과 Table 2와 같이 나타나며, 현재까지 지속되고 있는 2015년 가뭄은 지속기간 기준으로는 역대 4순위, 심도 기준으로는 역대 1순위로 나타났다. 또한, 과거 극한가뭄으로 기록된 1994~1995년 가뭄은 지속기간과 심도 기준으로 각각 검토하였을 경우, 모두 역대 6순위로 나타났으며, 가뭄기록조사보고서(MCT, 1995)에서 1954년 이후 강수량을 기반으로 분석하여 제시한 서울지역의 최대 가뭄기간(1987~1989년)은 본 연구에서는 역대 4위로 나타났다.

Yoo and Ryoo (2003)는 서울지점의 10개월의 누적강수량을 기반으로 SPI10을 산정하여 근대 관측기록을 포함하여 장기적인 가뭄특성을 분석하였다. Yoo and Ryoo (2003)가 제시한 건조기 이후(1911~1996년)의 가뭄 중 1938~1940년, 1942~1945년, 1948~1951년의 가뭄은 본 연구에서 검토한 역대 순위에서도 심한 가뭄기간으로 확인되었다.

3.2 단변량 가뭄빈도해석 결과

본 절에서는 가뭄해갈 유무에 따른 풀링 과정을 통해 새롭게 추출된 가뭄사상(지속기간, 심도)에 대하여, 가뭄 특성인 자별 재현특성을 검토하기 위하여 가뭄의 지속기간과 심도에 따른 단변량 빈도해석을 실시하였다. 먼저, 단변량(지속기간 또는 심도)의 최적분포함수를 결정하기 위해 Log-normal, Exponential, Gamma, Gumbel, GEV (Generalized Extreme Values), GP (Generalized Pareto) 분포를 검토하였다. 그 결과, 가뭄 지속기간은 Log-normal 분포, 가뭄 심도는 Gamma 분포가 최적함수로 결정되었다.

Fig. 3은 서울지점에 대한 단변량 재현기간의 크기 순서로

해당 가뭄기간을 도시한 그림이다. Fig. 3의 상단 그림은 가뭄 지속기간에 대한 재현기간의 순위를 나타내며, 50년 빈도 이상의 가뭄 지속기간을 갖는 가뭄은 총 4개(1942~1945, 1948~1951, 1938~1940, 2013~2015)로 확인되며, 현재 2015년 가뭄 또한 포함되어 있다. Fig. 3의 하단 그림은 가뭄 심도에 대한 재현기간의 순위를 나타내며, 현재 2015년 가뭄을 포함한 총 4개(2013~2015, 1948~1951, 1942~1945, 1938~1940)의 가뭄심도는 100년 빈도를 상회하는 것으로 확인되었다.

가뭄기록조사보고서(MCT, 1995)에서는 과거 우리나라에서 강우량의 부족으로 인해 가뭄 발생기간을 총 5개(1967

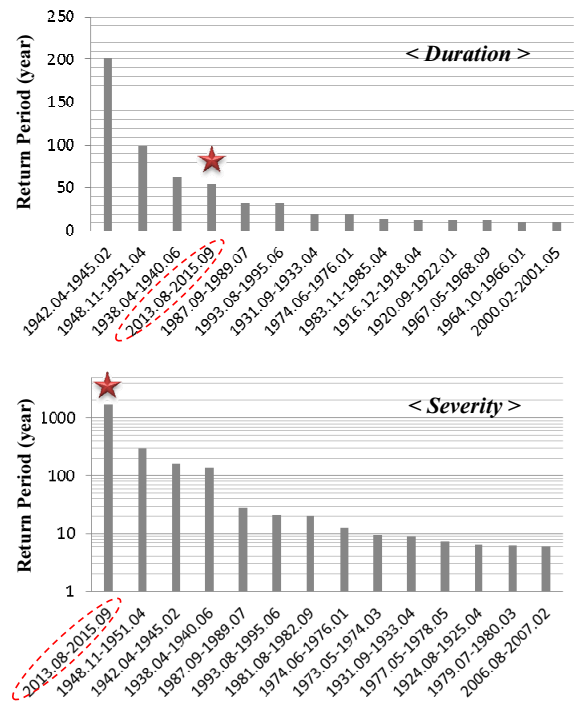


Fig. 3. The univariate return period for duration and severity of drought

~1968, 1976~1977, 1981~1982, 1987~1988, 1994~1995)로 구분하였으며, 본 연구결과에서 추정된 단변량 재현기간을 살펴보면 다음과 같다. 가뭄 지속기간의 경우, 1987~1988년과 1994~1995년 가뭄은 약 33년 빈도로 나타나며, 이외의 3개 가뭄(1967~1968, 1976~1977, 1981~1982)은 10년 빈도 내외로 확인된다. 반면 가뭄 심도의 경우, 1987~1988년 가뭄은 약 30년 빈도로 나타나며, 1981~1982년, 1994~1995년 가뭄은 약 20년 빈도, 이외 2개의 가뭄(1967~1968, 1976~1977)은 5년 이하의 빈도를 갖는 것으로 확인되었다. 이처럼 하나의 가뭄사상에 대한 재현기간을 추정할 결과, 가뭄 지속기간과 심도에 따라 추정된 재현기간이 서로 상이하게 나타나는 문제가 있으며, 이는 단변량 가뭄빈도해석의 한계점으로서 기존의 다양한 선행연구에서도 반복적으로 지적된 바 있다(Kim et al., 2003; Kim et al., 2006; Yoo et al., 2013).

3.3 불확실성을 고려한 이변량 가뭄빈도해석

본 절에서는 가뭄의 지속기간과 심도를 동시에 고려하여 가뭄의 특성을 종합적으로 판단할 수 있는 이변량 가뭄빈도해석을 수행하였다. 이변량 빈도해석을 위해 다양한 코플라 함수(Gaussian copula, Clayton copula, Frank copula, and Gumbel copula)를 적용하였으며, 서울지점의 가뭄 지속기간과 심도에 대한 발생특성을 효과적으로 나타낼 수 있는 최적 코플라 함수를 선정하기 위하여 Fig. 4와 같이 최대우도를 검토하였다. 그 결과 서울지점의 가뭄 지속기간과 심도의 특성은 최대우도를 갖는 Gumbel 코플라 함수를 이용하여 결합확률밀도함수를 추정하였다. 또한, Fig. 4에서 빨간색 동그라미는 관측된 서울지점의 가뭄사상을 나타내고, 파란색 동그라미는 코플라 함수로 모의된 가뭄사상을 나타내고 있다. 여기

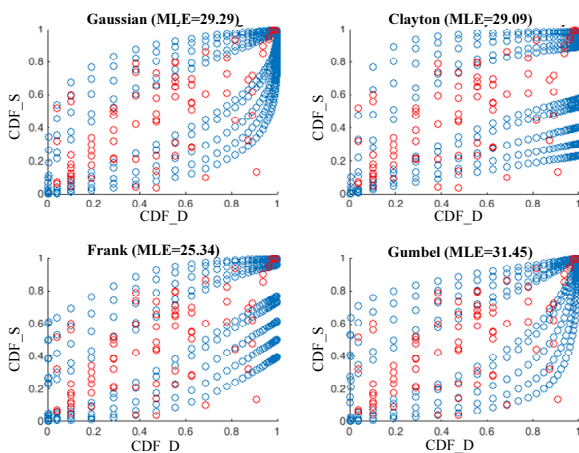


Fig. 4. Scatter plot for the uncertainty bound of the each copula function

서 Gumbel 코플라 함수를 적용하였을 경우, 불확실성 범위 내에 관측된 가뭄사상이 가장 많이 포함되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 Gumbel 코플라 함수로 추정된 결합확률밀도함수를 기반으로 여러 재현기간(2년, 5년, 10년, 20년, 50년, 100년)에 대한 이변량 가뭄빈도곡선을 추정하였다. 또한, 이변량 가뭄빈도해석 결과의 불확실성을 정량적으로 평가할 수 있도록 코플라 모의발생을 통해 신뢰구간을 추정하였다. 그 결과, 서울지점에서 가장 큰 이변량 재현기간을 갖는 가뭄사상은 2013년 8월부터 시작되어 최근 2015년까지 지속되고 있는 가뭄사상으로 확인되었으며, 200년 빈도를 상회하는 가뭄사상은 총 3개인 것으로 확인되었다. 이 중에서 최근 2015년까지 지속되고 있는 서울지점의 가뭄사상은 95% 신뢰수준을 벗어 나는 재현기간을 가지는 것으로 나타났다. 이는 지난 2013년 8월부터 26개월 동안 지속되는 서울지점의 강수 부족량(약 1300 mm)은 우리나라의 연평균 강수량 크기이다. 즉 최근 서울지점은 이례적인 강수 부족량을 가지는 가뭄이 지속되고 있다는 의미로 해석된다.

또한, 가뭄기록조사보고서(MCT, 1995)에서는 구분한 과거 가뭄사상에 대하여, 본 연구에서 가뭄 지속기간과 심도를 동시에 고려하여 추정된 이변량 가뭄 재현기간을 검토하였다. 그 결과, 1967~1968년 가뭄은 12년 빈도, 1976~1977년 가뭄은 8년 빈도, 1981~1982년 가뭄은 23년 빈도, 1987~1988년 가뭄은 52년 빈도, 1994~1995년 가뭄은 46년 빈도로 확인되었다. 이처럼 과거 극한 가뭄기간으로 알려져 왔던 대부분 가뭄은 최소 10년에서 최대 50년 정도의 재현기간을 갖는 가뭄이었다. 이와 비교하였을 경우, 현재까지 지속되고

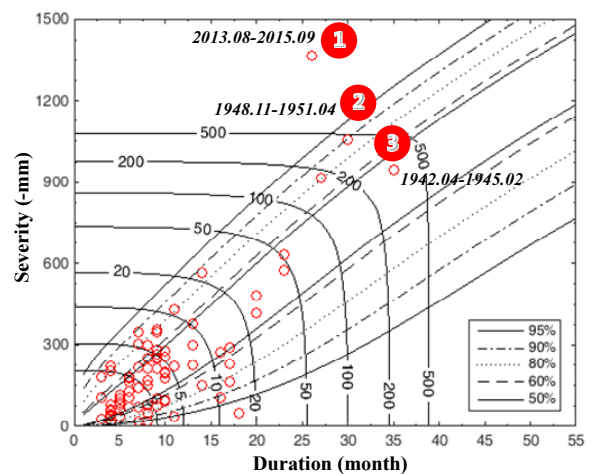


Fig. 5. Bivariate return periods for duration and severity of drought and confidence intervals based on gumbel copula function

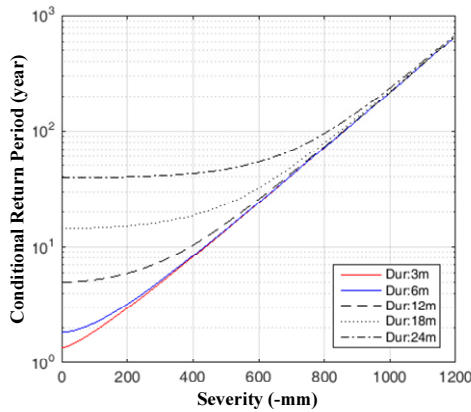


Fig. 6. Conditional return period of drought severity for a given drought duration

있는 2015년 가뭄은 상대적으로 심각한 수준임을 재확인 할 수 있다.

Fig. 6은 특정한 가뭄지속기간에 대한 가뭄심도의 조건부 재현기간을 나타내며, 각 지속기간(3, 6, 12, 18, 24개월)에 따른 조건부 가뭄 재현기간의 가뭄심도를 추정할 수 있다. 예를 들어, 12개월이 지속되는 가뭄 지속기간에 대한 10년 빈도의 가뭄 심도는 약 -400 mm인 것으로 확인되며, 30년 빈도의 가뭄 심도는 약 -620 mm로 해석된다. 다시 말해, 지난 12개월 동안 지속된 가뭄으로 인해 평년대비 연강수량의 50% 정도의 강수량(약 600 mm)이 부족했다면, 이 가뭄의 크기는 약 30년 빈도의 재현기간을 갖는 가뭄이다. 이러한 빈도해석 개념에서 평가한 가뭄해석 결과는 실질적인 가뭄의 심각성과 위험성을 나타내는 객관적인 지표로 활용이 가능할 것이다. 예를 들어, 대부분의 저수지 사업에서는 기준으로 삼고 있는 보장공급량은 기왕 최대 갈수기를 기준으로 결정하며, 본 연구에서 제시한 빈도해석 개념에서 평가한 가뭄해석 결과는 기왕 최대 갈수기에 대한 판단기준을 설정하는 데 있어 객관적인 지표로 활용이 가능할 것으로 기대된다. 또한, 실제 가뭄대응을 위한 댐 운영 기준수위를 결정하는 데 있어, 본 연구에서 추정한 확률가뭄량 산정결과는 댐 유입량의 갈수유입조건을 결정하는 데 중요한 정보로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 서울지점의 100년 이상의 장기간 월강수량 자료를 이용하여 가뭄사상을 구분하는 방법을 새롭게 제안하였다. 또한 코플라 함수를 이용하여 가뭄의 지속기간과 심도를 고려한 이변량 재현기간을 선정하였다. 새로운 가뭄사상

의 선택 방법과 코플라 함수를 통한 이변량 빈도해석의 이점은 다음과 같다.

첫째로, 일반적으로 가뭄의 정의에 적용되는 다양한 가뭄 지수들은 지수화 과정에서 현재의 가뭄이 해소되기 위해 필요한 정량적인 강수량을 제시하기에 한계가 있으며, 가뭄정보를 필요로 하는 실질적 사용자들의 입장에서도 직관적으로 판단하기에 어려움이 존재하였다. 본 연구에서 제시한 새로운 가뭄사상의 선택기준은 강수량의 과부족량을 정량적으로 표현함으로써 가뭄 정보의 이용자들에게 직관적으로 판단할 수 있으며, 가뭄 해소에 필요한 강수량을 정량적으로 제시할 수 있다. 또한, 부족량의 해소 여부에 따라서 연속적인 가뭄사상을 정의함으로써 강우사상의 발생만으로 가뭄이 해소되어지는 문제점을 해결하였다.

둘째로, 본 연구에서 적용된 코플라 함수는 이론적으로 두 변량이 갖는 결합분포함수를 효과적으로 재현할 수 있는 기법으로서 가뭄의 지속기간-심도의 분포형태를 유지한 모의 발생이 가능하며, 이는 기존 단변량 분포함수를 이용하는 모형에 내재된 불확실성을 감소시킬 수 있는 장점이 있는 것으로 확인된다. 즉, 한정된 가뭄사상 자료로 인해 발생할 수 있는 가뭄 재현기간의 신뢰성을 검토할 수 있는 불확실성을 고려한 이변량 가뭄빈도해석이 가능하게 된다. 또한 단변량 빈도해석 시에 한계점으로 지적되었던 가뭄 지속기간과 심도에 따른 재현기간의 일관성 결여문제를 해결할 수 있었다.

본 연구의 결과는 과거 가뭄기록과의 비교검토를 통해 가뭄빈도해석 결과에 대한 객관성을 증명하였으며, 향후 실질적인 가뭄대책의 정량적인 기준을 마련하는데 활용도가 높은 것으로 예상된다. 향후 연구에서는 이수관리 측면에서 필요로 하는 댐 및 저수지에 따른 수자원 보유 수량을 추정하여, 실제 수공구조물 설계에 반영할 수 있는 정량적인 기준을 제공할 수 있는 연구를 지속하고자 한다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 물관리사업의 연구비지원(14A WMP-B082564-01)과 한국연구재단의 지원(NRF-2013 R1A1A2013160)을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

Darsow, W.F., Nguyen, B., and Olsen, E.T. (1992). "Copulas and Markov processes." *Illinois Journal of Mathematics*, Vol.

- 36, No. 4, pp. 600-642.
- Kim, T.W., Valdes, J.B., and Yoo, C. (2003). "Nonparametric approach for estimating return period 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. (2006). "Nonparametric approach for bivariate drought characterization using Palmer drought index." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 134-143.
- KWRA (Korea Water Resource Association) (2009). *River Design Criteria · Commentary*.
- 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.
- Mckee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration to time scales." *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, January 17-22 1993, Anaheim, California, pp. 179-184.
- MCT (Ministry of Construction and Transportation) (1995). *Drought Record and Research Report 1995*.
- Mirakbari, M., Ganji, A., and Fallah, S. (2010). "Regional bivariate frequency analysis of meteorological droughts." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 985-1000.
- Nelson, R.B. (2006). *An introduction to copulas*. Springer, U.S.
- Reddy, M.J. and Ganguli, P. (2012). "Application of copulas derivation of drought severity-duration-frequency curves.", *Hydrological Processes*, Vol. 26, pp. 1672-1685.
- Salas, J.D., Fu, C., Cancelliere, A., Dustin, D., Bode, D., Pineda, A., and Vincent, E. (2005). "Characterizing the severity and risk of drought in the Poudre River, Colorado." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 131, No. 5, pp. 383-393.
- Scott, D.W. (1992). *Multivariate Density Estimation: Theory, Practice and Visualization*. Wiley, New York.
- Wong, G., Lambert, M.F., Leonard, M., and Metcalfe, A.V. (2010). "Drought analysis using trivariate copulas conditional on climate states." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 129-141.
- Yoo, C., and Ryoo, S. (2003). "Analysis of drought return and duration characteristics at Seoul." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 4, pp. 561-573.
- Yoo, J.Y., Kim, U.T., and Kim, T.W. (2013). "Bivariate drought frequency curves and confidence intervals: a case study using monthly rainfall generation." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 27, No. 1, pp. 285-295.
- Yoo, J.Y, Kim, D., Kim, H., and Kim, T.W. (2014). "Application of copula functions to construct confidence intervals of bivariate drought frequency curve." *Journal of Hydro-environmental Research*, In Press, doi:10.1016/j.jher.2014.10.002.