



Drought assessment by bivariate frequency analysis using standardized precipitation index and precipitation deficit: focused on Han river basin

Kwon, Minsung^a · Sung, Jang Hyun^b · Kim, Tae-Woong^c · Ahn, Jaehyun^{d*}

^aUrban Risk Management Research Center, Seokyeong University

^bMinistry of Environment, Han River Flood Control Office

^cDepartment of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University (ERICA)

^dDepartment of Civil & Architectural Engineering, Seokyeong University

Paper number: 18-065

Received: 8 August 2018; Revised: 4 September 2018; Accepted: 4 September 2018

Abstract

This study evaluated drought severity by bivariate frequency analysis using drought magnitude and precipitation deficit. A drought event was defined by Standardized Precipitation Index (SPI) and the precipitation deficit was estimated using reference precipitation corresponding to the SPI -1. In previous studies, drought magnitude and duration were used for bivariate frequency analysis. However, since these two variables have a largely linear relationship, extensibility of drought information is not great compared to the univariate frequency analysis for each variable. In the case of drought in 2015, return periods of 'drought magnitude-precipitation deficit' in the Seoul, Yangpyeong, and Chungju indicated severe drought over 300 years. However, the result of 'drought magnitude-duration' showed a significant difference by evaluating the return period of about 10, 50, and 50 years. Although a drought including the rainy season was seriously lacking in precipitation, drought magnitude did not adequately represent the severity of the absolute lack of precipitation. This showed that there is a limit to expressing the actual severity of drought. The results of frequency analysis for 'drought magnitude-precipitation deficit' include the absolute deficit of precipitation information, so which could consider being a useful indicator to cope with drought.

Keywords: Drought, Bivariate frequency analysis, Precipitation deficit, SPI

표준강수지수와 강수 부족량을 이용한 이변량 가뭄빈도해석: 한강유역을 중심으로

권민성^a · 성장현^b · 김태웅^c · 안재현^{d*}

^a서경대학교 도시안전연구소, ^b환경부 한강홍수통제소, ^c한양대학교 공학대학 건설환경공학과, ^d서경대학교 토목건축공학과

요지

본 연구에서는 표준강수지수를 이용하여 가뭄사상을 정의하고, 가뭄심도와 부족 강수량을 대상으로 이변량 가뭄빈도해석을 수행하였다. 부족강수량은 표준강수지수의 가뭄기준인 -1에 해당하는 강수량을 기준으로 산정하였다. 지금까지 연구에서 가뭄지수의 심도와 지속기간 이용한 빈도해석을 통한 가뭄의 평가가 주를 이루었다. 하지만 이 두 변량은 선형적인 관계가 매우 높아 각 변량에 대한 단변량 빈도해석과 비교하여 정보의 확장성은 크지 않다. 2015년 가뭄의 경우, 서울, 양평, 충주지점의 '가뭄심도-부족 강수량'의 재현기간은 모두 300년 이상의 극심한 가뭄을 나타내고 있지만, '가뭄심도-지속기간'에서는 재현기간을 약 10년, 50년, 50년으로 평가하여 큰 차이를 나타냈다. 우기를 포함한 가뭄은 강수량 부족이 심할지라도 가뭄심도는 가뭄을 상대적으로 낮게 평가할 수 있어 실제 가뭄의 심각성을 나타내는데 한계가 있었다. '가뭄심도-부족 강수량' 빈도해석 결과는 강수량의 절대적인 부족량 정보를 함께 포함하고 있어, 가뭄에 대응하기 위한 지표로 활용성이 높을 것으로 판단된다.

핵심용어: 가뭄, 이변량 빈도해석, 부족 강수량, 재현기간, 표준강수지수

*Corresponding Author. Tel: +82-2-940-7770
E-mail: wr21@naver.com (J. Ahn)

1. 서론

가뭄은 광범위한 범위에 많은 사람들에게 영향을 주는 자연재해로, 심각한 사회적, 경제적, 환경적 비용을 초래한다(Wilhite, 2006). 특히, 기후변화로 인해 가뭄의 발생 빈도 및 심도가 증가할 것으로 예상하고 있다(WMO, 2009; Sheffield *et al.*, 2012). 또한 Stokes *et al.* (2015)은 40개국 4만 5천명을 대상으로 기후변화로 인해 가장 우려되는 것이 무엇인지에 대한 설문조사를 실시했고, 가뭄과 물부족이 가장 우려되는 기후변화의 영향이라는 결과를 제시하였다. 우리나라의 미래 가뭄을 전망한 연구에서도 가뭄의 발생 빈도와 심도가 증가할 것으로 예측하고 있다(Kyoung *et al.*, 2009; Park *et al.*, 2013; Park *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2016). 특히 Kim *et al.* (2016)은 21세기 후반에 심각한 수준의 가뭄이 현재 연간 0.2회에서 1.55회로 증가할 것으로 전망하였으며, Lee *et al.* (2016)은 한강유역 가뭄의 심도가 약 45% 증가할 것으로 전망하였다.

가뭄은 시작 및 종료 시점을 명확하게 정의하기가 어렵고, 피해 발생까지 과정이 느리기 때문에 가뭄을 정량화할 수 있는 가뭄지수를 활용하여 가뭄사상을 정의하고 있다. 가뭄지수는 활용되는 목적에 따라 강수량, 증발산량, 토양수분, 저수량, 유출량 등 다양한 인자가 활용되고 다양한 가뭄지수가 개발되었다. 가뭄 지수를 통해 일차원적 가뭄 평가가 이루어졌으나, 최근에는 가뭄사상의 특성을 활용한 다변량 가뭄빈도해석을 통해 가뭄을 정량화하는 시도가 많아지고 있다. 가뭄사상의 특성은 Fig. 1과 같이 가뭄지수의 크기로 나타낼 수 있는 가뭄의 강도(intensity)와 가뭄이 지속되는 기간을 나타내는 지속기간(duration), 가뭄 지속기간 동안의 강도의 합으로 표현된 심도(magnitude)로 나타낼 수 있다. 주로 가뭄의 지속기간과 심도를 활용한 이변량 가뭄빈도해석을 통한 가뭄의 정량화가 활발히 이루어지고 있다(Yeon *et al.*, 2007; Kao *et al.*, 2010; Mirabbasi *et al.*, 2012; Ryu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2013; Yoo *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2017). 이변량 가뭄빈도해석은 가뭄사상에 대한 심각성을 정량적으로 표현할 수 있는 장점이 있다.

Mirabbasi *et al.* (2012)은 가뭄심도와 지속기간에 대해 copula 모형을 이용하여 이변량 가뭄빈도해석을 수행하였으며, 오차분석과 꼬리부분의 종속성 검증을 통해 최적의 copula 모형을 선택하는 연구를 수행하였다. Ryu *et al.* (2012)는 copulas 기반의 결합가뭄지수를 적용한 가뭄심도-영향면적-지속기간곡선을 작성하여 가뭄의 시공간적 거동을 분석하는 연구를 수행하였다. Yoo *et al.* (2013)은 가뭄 심도와 지

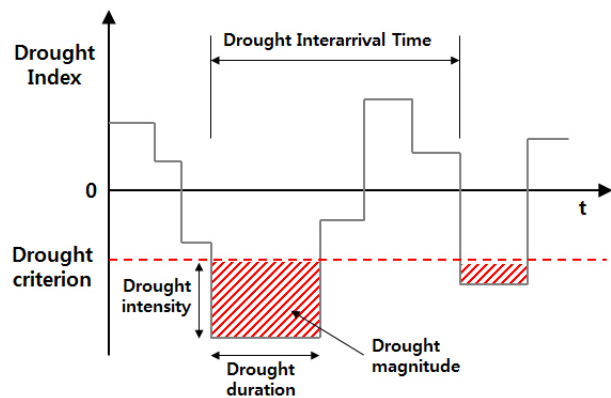


Fig. 1. Concept of drought characteristics

속기간을 변량으로 copula 함수를 이용한 이변량 빈도해석을 수행하였고, 빈도해석 결과의 불확실성을 정량화하기 위해 추계학적 강수모의기법을 활용하였다. Chen *et al.* (2013)은 가뭄 심도, 지속기간, 발생기간, 가뭄지수의 최솟값을 이용하고, copula 함수를 적용하여 다변량 빈도해석을 수행하였다. Kim *et al.* (2017)은 copula 모형에 Bayesian 기법을 적용하여 매개변수의 불확실성을 평가할 수 있는 이변량 가뭄빈도해석 기법을 개발하였다. 관측 자료뿐만 아니라 기후변화에 따른 가뭄 전망 및 위험도 분석 연구에서도 이변량 빈도해석 기법이 적용되고 있다(Yoo *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2018). Yoo *et al.* (2016)은 기후변화 시나리오를 활용하여 SPI와 SPEI를 산정하고, 이의 심도와 지속기간을 이용하여 미래의 가뭄 위험성 분석을 수행하였다. Yu *et al.* (2018) 기후변화 시나리오를 이용하여 가뭄 심도와 지속기간에 대한 이변량 빈도해석을 수행하고 가뭄위험지수를 개발하였다. 많은 연구에서 결합확률을 추정하기 위해 copula 함수를 이용하였고, 다변량 빈도해석 연구에서 copula 함수의 활용은 일반화되고 있다.

기존 연구에서는 가뭄의 지속기간과 심도를 이용하여 이변량 빈도해석을 주로 수행하였으나, 가뭄지수의 경우 건기 및 우기에 따라 동일한 가뭄의 심도라 할지라도 강수량의 절대적인 부족량은 큰 차이가 발생하고, 특히 현대사회는 저수지나 댐 등 용수 저장시설에 대한 의존도가 높기 때문에 부족 강수량을 변량으로 한 이변량 가뭄 빈도해석으로 가뭄을 정량화하여 평가할 필요가 있다. Kim *et al.* (2018)은 서울지역의 관측 자료와 기후변화 시나리오를 이용하여 가뭄 지속기간과 심도에 대해 이변량 빈도해석을 수행하였다. 이 연구에서 상위 70%의 강우량을 임계수준으로 설정하고 가뭄사상을 결정하였으며, 심도는 가뭄사상의 부족강수량의 합으로 결정하였으나, 가뭄을 결정하는 강수량의 기준이 높은 것으로 판단된다.

Kim *et al.* (2017)은 가뭄사상을 결정하기 위해 6개월 누적강수량의 평균값을 사용하였다. 부족량을 이용한 이변량 빈도 해석은 유출량 가뭄 관련 연구들에서 다수 확인할 수 있다 (Zhang and Singh 2006; Shiau *et al.*, 2007; Wong *et al.*, 2008; Kwak *et al.*, 2012). 이 연구들에서 부족량을 결정하는 절단수준으로 평균값을 이용하였다. 하지만 강수량 부족을 산정하기 위한 기준으로 평균값을 사용할 경우 실제 가뭄뿐만 아니라 일반적인 강수량 부족을 가뭄으로 산정할 수 있는 문제를 야기하게 된다. 따라서 본 연구에서는 가뭄지수의 가뭄기준에 해당하는 강수량을 절단수준으로 하여 강수량의 부족량을 산정하였다.

본 연구에서는 Standardized Precipitation Index (SPI)를 사용하였다. SPI는 강수량만을 이용한 간단한 계산과 지역적 강수특성을 반영할 수 있는 장점으로 가장 널리 활용되는 가뭄지수이다. 또한 SPI는 2009년 미국 University of Nebraska-Lincoln에서 개최된 ‘The Inter-Regional Workshop on Indices and Early Warning Systems for Drought’에서 가뭄 전문가들에 의해 세계 공통의 기상학적 가뭄지수로 사용하기로 합의되었다(WMO, 2009). 가뭄 사상은 SPI의 가뭄 기준인 -1이하가 연속되는 가뭄을 하나의 사상으로 정의하고, 부족 강수량은 SPI의 가뭄기준인 -1에 해당하는 강수량을 기준 강수량으로 정의하고 부족량을 산정하였다. 가뭄 사상의 가뭄 지속기간, 심도 및 부족 강수량을 이용하여 기존의 심도와 지속기간의 이변량 빈도해석과 심도와 부족 강수량을 이용한 이변량 빈도 해석 결과를 비교하여 평가하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 1973년부터 2017년까지 한강유역의 9개 기상관측소의 강수량 자료를 이용하였으며(Fig. 2), 3개월 누적강수량을 이용한 SPI를 산정하고, 가뭄사상을 추출하였다. 또한 SPI가 -1이 되는 강수량을 기준으로 강수량의 과부족을 결정하고 가뭄기간의 부족 강수량을 계산하여 이변량 빈도해석을 수행하였다.

2.1 SPI 및 부족 강수량 산정

SPI는 일정기간(본 연구에서는 3개월) 누적강수량에 대해 Gamma 분포를 적용하고 이를 표준화하여 산정한다. Gamma 분포는 $x = 0$ 에서 정의되지 않기 때문에 누적강수량이 0인 값을 제외하고 Gamma 분포의 매개변수를 추정한다. Gamma 분포의 누적분포함수(cumulative distribution function, CDF)

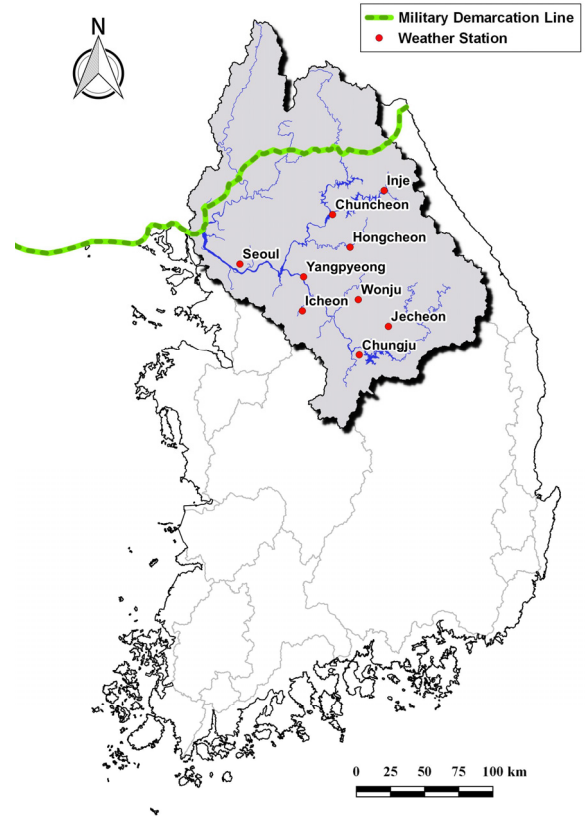


Fig. 2. Location of Han river basin and weather stations used in this study

(Eq. (1))와 0의 확률을 고려하여 비초과 확률 $H(x)$ (Eq. (2))를 산정하고, 표준정규분포 CDF (Eq. (3))에서 이의 확률에 해당하는 확률변수로 정의된다. 즉, Eq. (4)와 같이 SPI는 표준정규분포의 역함수에 $H(x)$ 를 대입하여 산정하게 된다.

$$G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t/\beta} dt \tag{1}$$

$$H(x) = (1-q)G(x) + q \tag{2}$$

여기서, α 는 형상모수(shape parameter), β 는 척척모수(scale parameter), $q = m/n$, m 은 해당 월의 누가 강수량이 0일 횟수, 그리고 n 은 관측년수이다.

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx \tag{3}$$

$$SPI = F^{-1}(H(x)) \tag{4}$$

SPI의 가뭄기준은 Table 1과 같이 정의된다. 본 연구에서는 SPI의 가뭄 기준인 -1에 해당하는 강수량(reference precipitation, RF)을 Eq. (5)와 같이 산정하였다.

$$RP = G^{-1}\left(\frac{F(-1) - q}{1 - q}\right) \quad (5)$$

여기서, G^{-1} 은 Gamma CDF의 역함수를 나타낸다.

Fig. 3은 서울지점의 SPI와 SPI가 -1일 때의 가뭄기준 강수량에 대한 과부족량을 나타내고 있다. SPI는 월별 누적강수량의 통계량을 통해 계산되어 부족 강수량과 SPI의 가뭄 강도는 비례하지 않는 것을 알 수 있다. Table 2는 각 지점별 SPI가 -1일 때의 강수량을 나타내고 있으며, Fig. 4에는 이의 Boxplot을 나타내었다.

이변량 빈도해석을 위해 가뭄사상을 추출해야 하고 가뭄사상은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 연속적으로 SPI가 -1 이하를 기록하는 기간을 하나의 가뭄 사상으로 정의하였다.

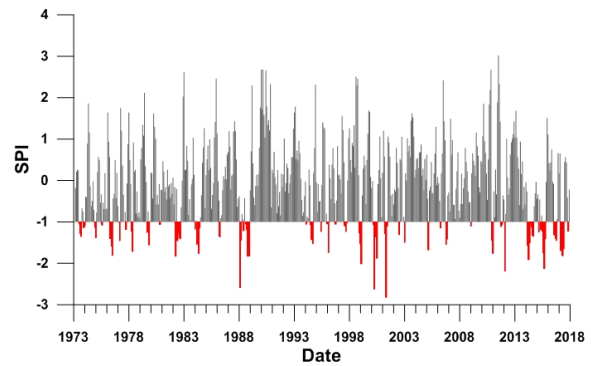
이변량 빈도해석에 앞서 가뭄 지속기간, 심도 및 부족강수량의 최적 확률분포를 결정하기 위해 GEV (Generalized Extreme Values), Gamma, Gumbel, Weibull, Generalized Pareto 분포를 각각의 변량에 대해 추정하고 χ^2 검정을 수행하였다. 각 변량에 대한 적합도 검정결과 가뭄 지속기간 및 심도는 Generalized Pareto 분포가 부족강수량에 대해서는 Gamma 분포가 최적함수로 결정되었다.

Table 1. Drought severity classification

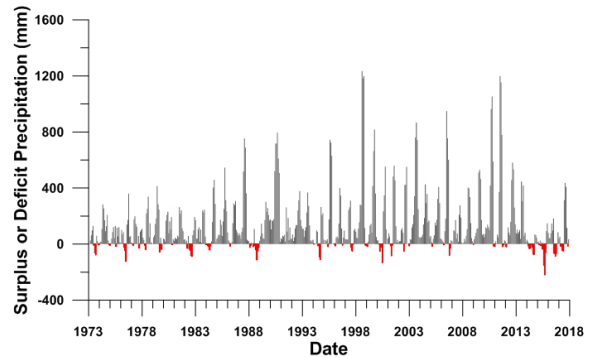
Drought index	Ranges	Description
SPI	-1.49 ~ -1.00	Moderate drought
	-1.99 ~ -1.50	Severe drought
	-2.00 or less	Extreme drought

Table 2. Reference precipitation of SPI drought

Weather station	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Seoul	53.9	34.6	49.7	87.7	130.7	194.8	390.7	549.0	545.4	242.8	118.6	67.8
Yangpyeong	52.2	32.2	49.3	87.7	127.0	201.1	398.5	565.2	553.9	247.4	115.7	67.9
Wonju	58.6	37.7	57.9	100.9	140.6	198.5	384.1	549.1	535.8	269.2	123.0	74.8
Icheon	54.5	36.4	55.1	92.6	131.3	201.7	388.6	518.4	523	253.4	119.1	68.2
Inje	47.1	29.0	41.8	81.5	123.1	169.5	316.7	470.1	483.4	230.4	108.8	61.8
Jecheon	56.8	40.5	63.8	111.6	147.9	208.7	359.9	498.4	496.1	266.1	126.3	71.7
Chuncheon	52.6	32.5	47.3	84.6	132.7	192.9	366.1	535.3	540.0	258.6	123.0	68.3
Chungju	52.0	34.9	56.5	94.2	122.7	179	327.8	469.8	456.5	245.8	117.9	64.4
Hongcheon	47.4	28.7	46.1	89.6	132.2	191.9	376.9	551.1	553.4	252.6	116.5	64.4



(a) SPI



(b) Reference precipitation

Fig. 3. Illustration of SPI's drought and precipitation deficit (Seoul)

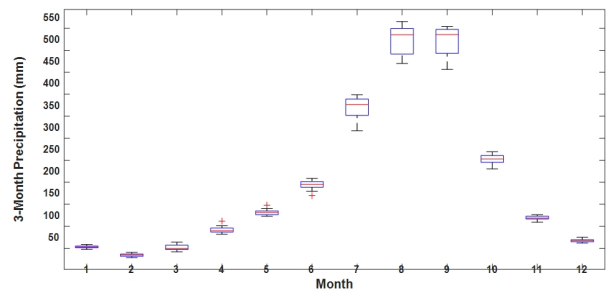


Fig. 4. Drought reference precipitation corresponding to SPI3 -1

2.2 Copula 함수를 이용한 이변량 가뭄빈도해석

홍수와 달리 장기적으로 지속되는 가뭄은 가뭄의 강도, 지속기간, 심도 등 다양한 특성 인자로 표현되며, 이들 특성 인자를 변량으로 한 결합분포함수의 조건부 확률을 추정하는 연구가 활발히 이루어지고 있다(Yoo *et al.*, 2013). 특히 copula 함수는 두 확률변수에 각각 적합한 확률분포에 대해 copula 함수를 이용하여 결합분포확률을 결정할 수 있어 다양한 분야에서 사용되고 있다(Shiau *et al.*, 2007; Wong *et al.*, 2010). 최근 이변량 가뭄빈도해석을 수행한 많은 연구에서 copula 함수를 이용하였고, copula 함수의 적용은 일반화 되고 있다.

Copula 함수는 누적확률분포를 활용하여 변수들 간의 종속성 구조를 평가하는데 이용된다(Kim *et al.*, 2017). Skalar (1959) 정리에 의하면 확률변수 X_1, X_2, \dots, X_n 의 주변확률분포 $F_1(x_1), \dots, F_n(x_n)$ 이 존재할 때, Eq. (6)의 관계를 만족하는 Copula 함수 C 가 존재한다.

$$H(x_1, x_2, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), F_1(x_1), \dots, F_n(x_n)) \quad (6)$$

Nelssen (2006)은 계산과정이 간편하고, 다양한 확률분포에 적용이 가능한 5개 copula 모형을 제안하였으며, 본 연구에서는 자료의 꼬리 구조를 잘 반영하여 가뭄 모의에 적합하다고 알려져 있는 clayton copula를 적용하였다(Kwak *et al.*, 2012). Clayton copula의 식은 Eq. (7)과 같다.

$$C_\theta(u, v) = \max\{u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1\}^{-1/\theta}, \theta \geq 0 \quad (7)$$

여기서, θ 는 두 변량(u, v) 사이의 연관성의 정도를 나타내는 매개변수이다.

Copula를 이용한 결합확률을 추정하고, Eq. (8)을 이용하여 가뭄사상의 재현기간을 산정하였다.

$$T = \frac{E(L)}{P(U \geq u, V \geq v)} = \frac{E(L)}{1 - F_U(u) - F_V(v) + C(F_U(u), F_V(v))} \quad (8)$$

여기서, $E(L)$ 은 가뭄의 평균 발생기간을 나타낸다.

3. 연구 결과

본 연구에서는 가뭄심도와 가뭄기간에 대한 이변량 빈도 해석 결과와 가뭄심도와 부족강수량에 대한 이변량 빈도 해석 결과를 비교하여 가뭄을 평가하였다. Table 3은 9개 지점에서 산정한 가뭄 사상에 대해 정리하였다. 평균 가뭄 사상의 수는 45.8개로 지점 별 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 평균 지속기간은 1.9개월, 평균 가뭄심도는 -2.8, 평균 부족강수량은 -73.5 mm로 나타났다. 가뭄사상의 최대 지속기간은 5~7개월, 최대 가뭄심도는 -7.7에서 -12.3, 최대 부족강수량은 -345.6 mm에서 -573.5 mm로 분석되었다.

Table 4에는 각 지점별 가뭄 지속기간, 가뭄 심도, 부족강수량의 최댓값이 나타난 가뭄사상의 시작 시점을 나타내었다. 가뭄 지속기간과 가뭄심도는 모두 동일한 가뭄사상에서 나타났으나, 부족강수량과는 대부분의 지점에서 다른 가뭄사상으로 나타났다. SPI가 월별 누적강수량의 특성이 반영된 결과로 가뭄 지속기간과 심도는 비례할 수 있으나, 부족강수량은 대체로 우기를 포함한 기간에 나타나게 되어 다른 가뭄사상에

Table 3. Summary of drought event

Weather station	No. of drought event	Mean value			Maximum value		
		Duration (month)	Magnitude (-)	Precipitation deficit (-mm)	Duration (month)	Magnitude (-)	Precipitation deficit (-mm)
Seoul	44	2.1	3.0	75.9	7	9.8	470.9
Yangpyeong	48	1.8	2.6	69.2	7	10.0	555.7
Wonju	46	2.0	2.9	80.8	6	10.6	522.9
Icheon	44	1.9	2.9	82.8	5	7.7	559.9
Inje	47	1.8	2.7	59.7	6	9.0	345.6
Jecheon	40	2.1	3.1	93.4	6	8.8	573.5
Chuncheon	48	1.7	2.6	68.5	7	12.1	664.7
Chungju	46	1.9	2.9	73.1	6	8.3	438.9
Hongcheon	49	1.7	2.5	58.2	7	12.3	546.1

Table 4. Drought start date for a maximum value of duration, magnitude, and precipitation deficit

Weather station	Drought duration	Drought magnitude	Precipitation deficit
Seoul	Mar-2014	Mar-2014	Jul-2015
Yangpyeong	Mar-2014	Mar-2014	Jul-2015
Wonju	Apr-2014	Apr-2014	Apr-2014
Icheon	Jan-1984	Jan-1984	Jul-2015
Inje	Apr-2014 May-2015	Apr-2014	Apr-2014
Jecheon	May-2015	May-2015	Jul-1973
Chuncheon	Mar-2014	Mar-2014	Jun-2015
Chungju	Jan-1995	Jan-1995	Jul-2015
Hongcheon	Mar-2014	Mar-2014	Jun-2015

서 최댓값이 나타났다.

그간 이변량 가뭄 빈도해석에서 주로 사용된 ‘가뭄심도-지속기간’의 관계는 ‘가뭄심도-부족 강수량’의 관계에 비해 선형적인 관계 매우 뚜렷이 나타나고 있다(Fig. 5). 직선에 가까운 두 변량과의 관계는 하나의 변량으로 다른 하나의 변량에 대해 설명이 가능하다고 할 수 있다. 즉, 이러한 두 변량에 대한 이변량 빈도해석은 단변량 빈도해석 결과에 비해 정보의 확장성이 크지 않다. ‘가뭄심도-지속기간’ 관계의 두 변량을 이용한 빈도해석보다 ‘가뭄심도-부족 강수량’의 관계를 이용한 빈도해석은 복잡한 가뭄의 현상을 정량하고, 추가적인 가뭄 정보를 얻기 위해 더 나은 선택이 될 수 있다.

Fig. 6에는 한강유역 9개 기상관측소의 가뭄 사상에 대한 이변량 빈도해석 결과를 비교하여 나타내었다. 왼쪽은 가뭄

심도와 가뭄기간, 오른쪽은 가뭄심도와 부족강수량에 대한 재현기간을 나타내었다. Fig. 6의 연도가 표시된 것은 두 종류의 빈도해석 결과 중 어느 한 쪽이라도 30년 빈도 이상일 때를 나타냈으며, 이를 통해 상대적인 비교가 가능하게 하였다. 두 종류의 그림 모두에서 연도와 월(‘연도-월’)은 가뭄 시작시의 날을 나타내며, 왼쪽의 괄호안의 값은 부족강수량, 오른쪽 괄호안의 값은 가뭄 지속기간을 나타내어 해당 기간의 상대적인 값들을 비교할 수 있게 하였다. 동일한 가뭄사상 일지라도 ‘가뭄심도-지속기간’의 이변량 빈도해석 결과와 ‘가뭄심도-부족 강수량’의 빈도해석 결과는 상이한 것을 알 수 있다.

서울(Fig. 6(a))의 경우 2015년 가뭄의 ‘가뭄심도-부족 강수량’ 재현기간은 300년이 넘는 것으로 분석되었지만, ‘가뭄심도-지속기간’에서는 재현기간이 10년을 조금 상회하는 것으로 나타나 큰 차이를 나타내었다. 양평(Fig. 6(b)) 역시 2015년 가뭄에 대해 ‘가뭄심도-부족 강수량’의 재현기간은 300년이 넘는 것으로 분석되었지만, ‘가뭄심도-지속기간’의 재현기간은 약 50년으로 큰 차이를 나타내고 있다. 원주(Fig. 6(c))의 경우 1988년 가뭄에 대해 ‘가뭄심도-부족 강수량’은 재현기간 약 50년 수준이나 ‘가뭄심도-지속기간’의 재현기간은 100년을 넘는 수준으로 평가하였다. 또한 2001년 가뭄에 대해서는 ‘가뭄심도-부족 강수량’에서 재현기간은 약 100년 수준으로 평가하였으나, ‘가뭄심도-지속기간’에서는 재현기간이 약 30년 미만으로 분석되어 큰 차이를 나타내었다. 이천(Fig. 6(d))은 ‘가뭄심도-지속기간’의 빈도해석 결과에서 1984년 가뭄을 300년 이상으로 가장 큰 가뭄으로 평가했으나, 30년 빈도 이상 가뭄 중 부족 강수량은 가장 적었던 것으로 확인되었다. 이천의 ‘가뭄심도-부족 강수량’ 기준으로 가장 큰 가

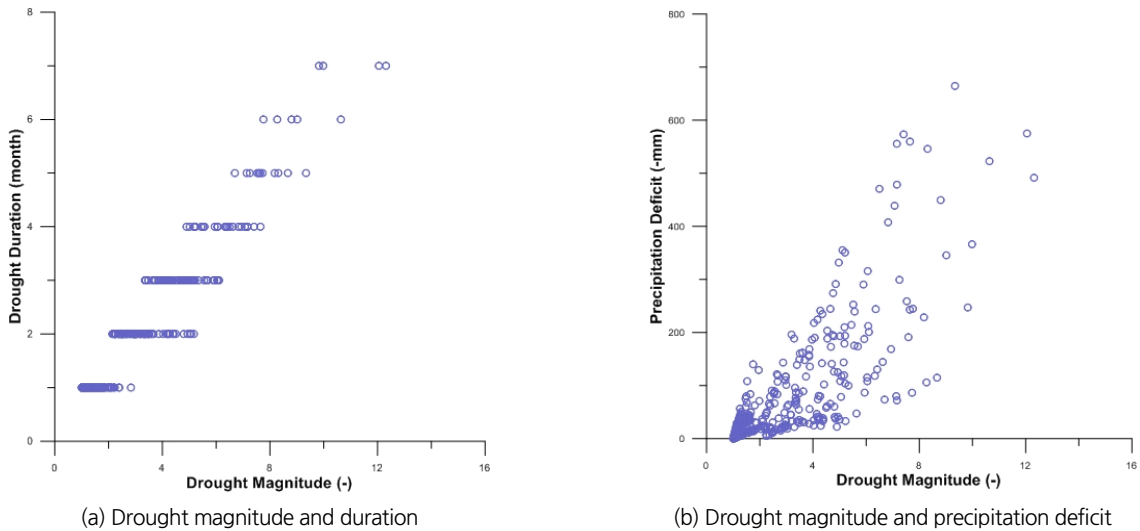
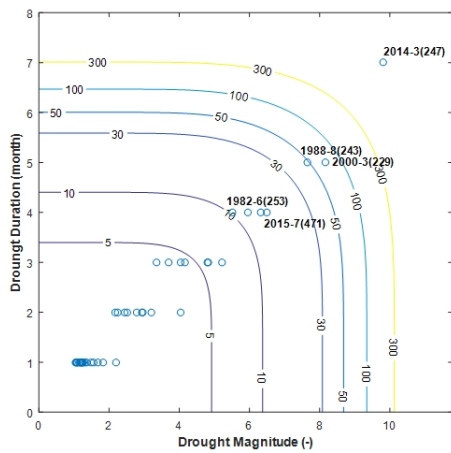
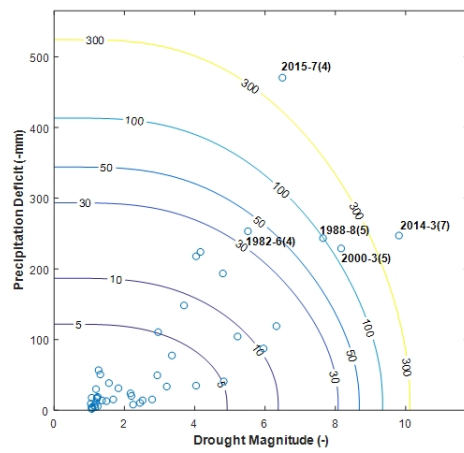


Fig. 5. Relationship among drought magnitude, duration, and precipitation deficit

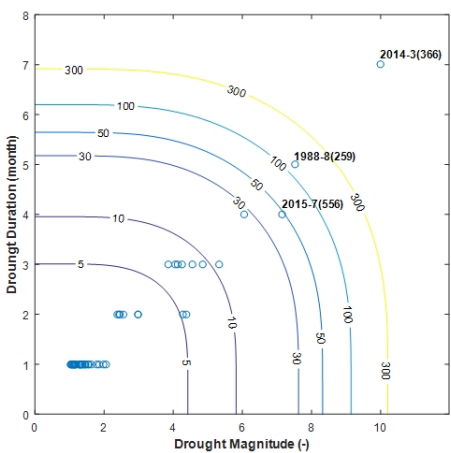


(a1) Drought magnitude and duration

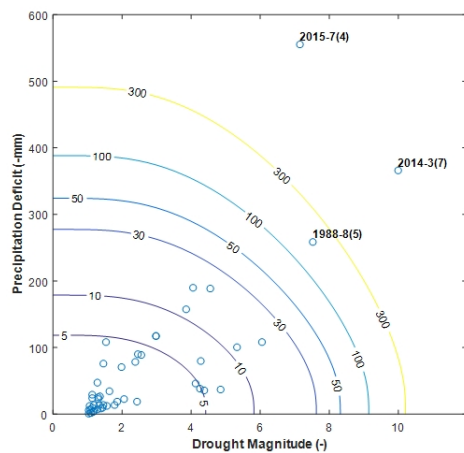


(a2) Drought magnitude and precipitation deficit

(a) Seoul

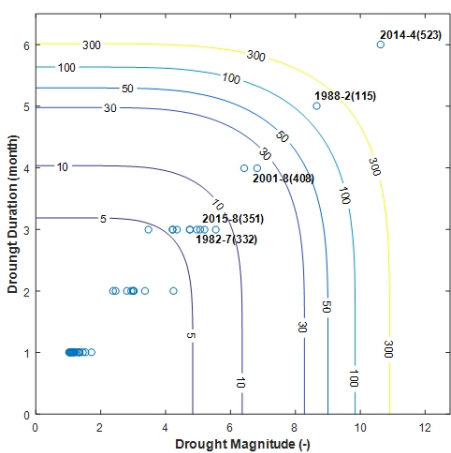


(b1) Drought magnitude and duration

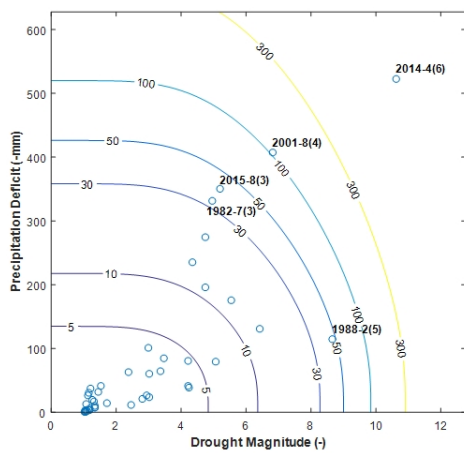


(b2) Drought magnitude and precipitation deficit

(b) Yangpyeong



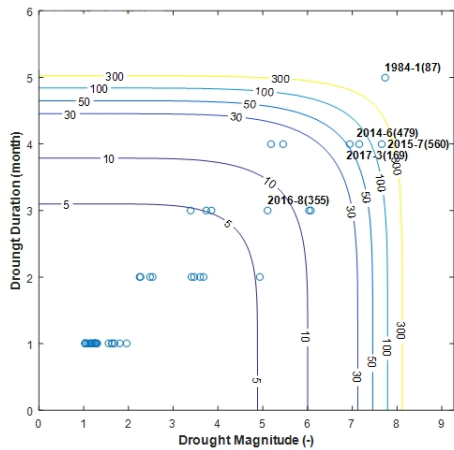
(c1) Drought magnitude and duration



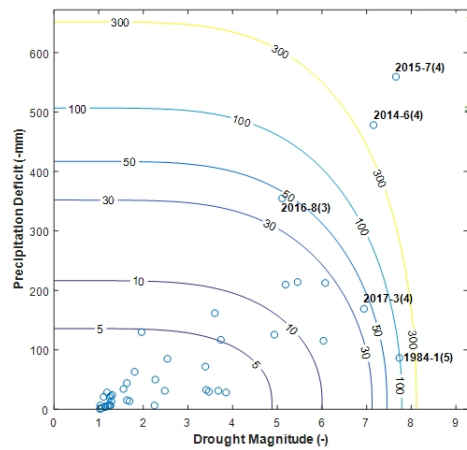
(c2) Drought magnitude and precipitation deficit

(c) Wonju

Fig. 6. Comparison of Return Period by applying drought magnitude, drought duration and precipitation deficit (Note: Left side, bivariate frequency analysis between drought magnitude and duration start date (precipitation deficit); Right side, bivariate frequency analysis between drought magnitude and precipitation deficit start date (drought duration))

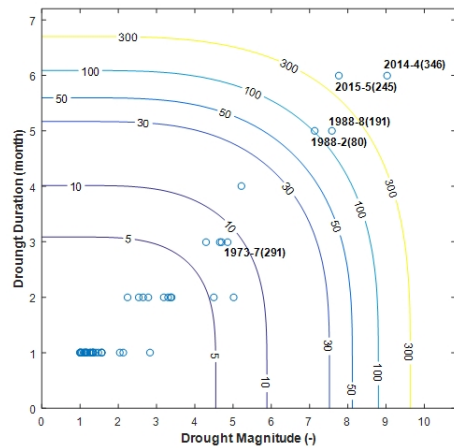


(d1) Drought magnitude and duration

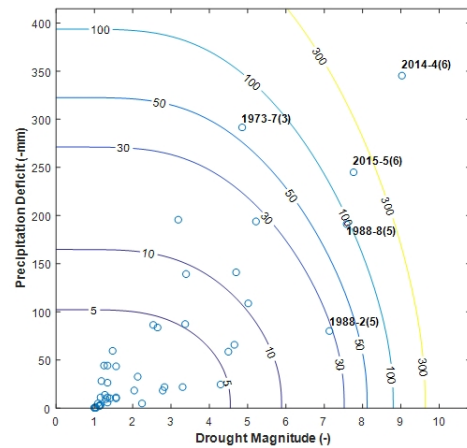


(d2) Drought magnitude and precipitation deficit

(d) Icheon

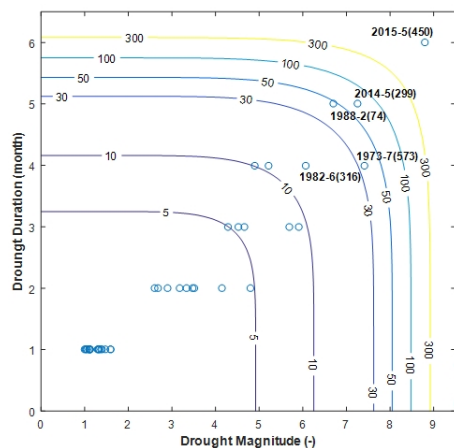


(e1) Drought magnitude and duration

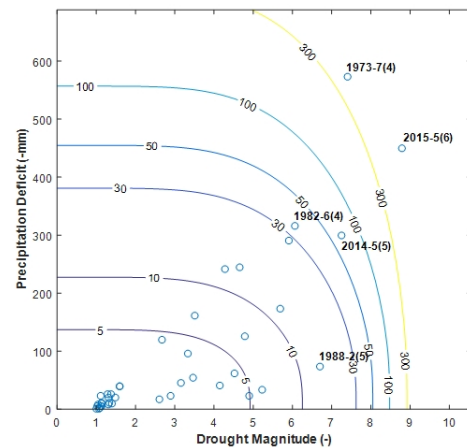


(e2) Drought magnitude and precipitation deficit

(e) Inje



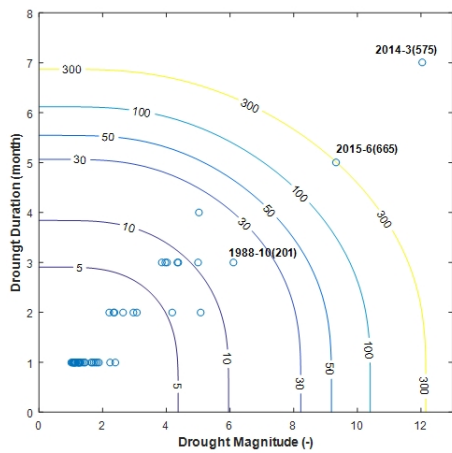
(f1) Drought magnitude and duration



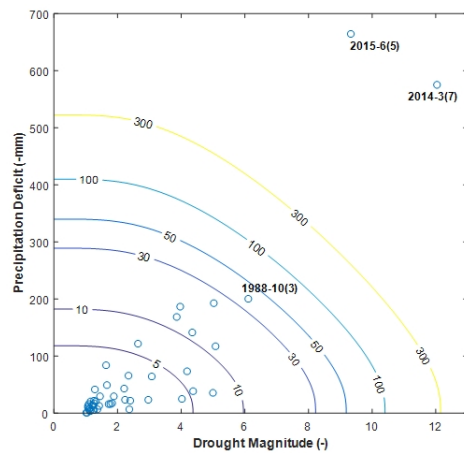
(f2) Drought magnitude and precipitation deficit

(f) Jecheon

Fig. 6. Comparison of Return Period by applying drought magnitude, drought duration and precipitation deficit (Note: Left side, bivariate frequency analysis between drought magnitude and duration start date (precipitation deficit); Right side, bivariate frequency analysis between drought magnitude and precipitation deficit start date (drought duration) (Continue)

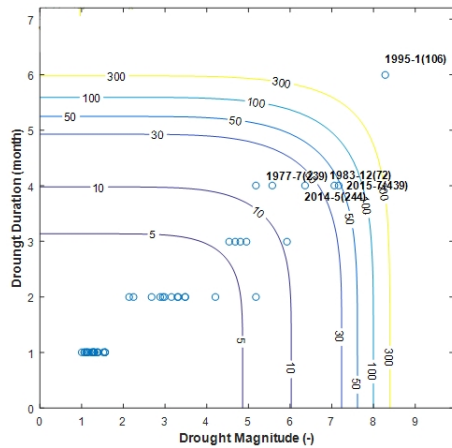


(g1) Drought magnitude and duration

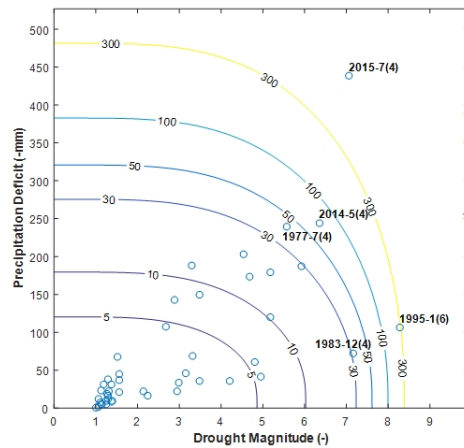


(g2) Drought magnitude and precipitation deficit

(g) Chuncheon

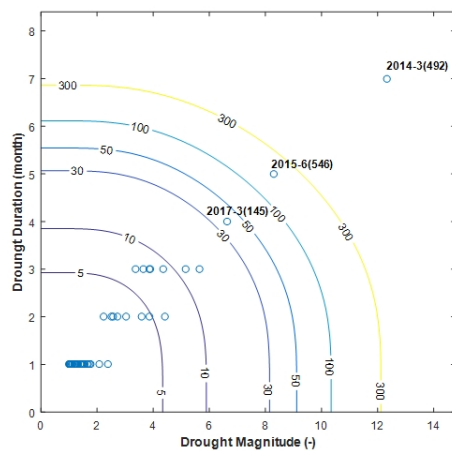


(h1) Drought magnitude and duration

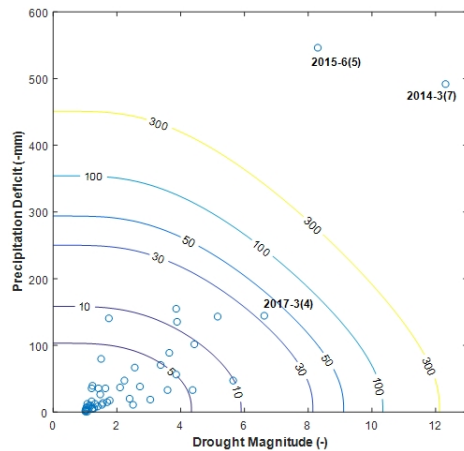


(h2) Drought magnitude and precipitation deficit

(h) Chungju



(i1) Drought magnitude and duration



(i2) Drought magnitude and precipitation deficit

(i) Hongcheon

Fig. 6. Comparison of Return Period by applying drought magnitude, drought duration and precipitation deficit (Note: Left side, bivariate frequency analysis between drought magnitude and duration start date (precipitation deficit); Right side, bivariate frequency analysis between drought magnitude and precipitation deficit start date (drought duration) (Continue)

물은 2015년과 2014년 가뭄으로 평가되었다. 인제(Fig. 6(e))의 경우 1973년 가뭄에 대해 ‘가뭄심도-부족 강수량’ 분석에서는 약 50년 빈도의 가뭄으로 평가했으나, ‘가뭄심도-지속 기간’에 대해서는 5~10년 사이의 재현기간을 나타내어 큰 차이를 나타내었다. 제천(Fig. 6(f)) 역시 1973년 가뭄에 대해 ‘가뭄심도-부족 강수량’의 재현기간이 300년을 넘는 것으로 분석되었으나, ‘가뭄심도-지속기간’의 재현기간은 약 30년 수준으로 나타났다. 춘천(Fig. 6(g))의 경우 부족강수량은 2015년이 더 크게 나타났으나, ‘가뭄심도-지속기간’의 재현기간은 2014년이 2015년에 비해 상당히 크게 나타났다. 충주(Fig. 6(h))의 2015년 가뭄에 대해 ‘가뭄심도-부족 강수량’의 재현기간은 300년 이상으로 평가되었으나, ‘가뭄심도-지속기간’에서는 약 50년 수준으로 평가했다. 홍천(Fig. 6(i))의 경우 2014년과 2015년 가뭄에 대해 ‘가뭄심도-부족 강수량’에서는 모두 재현기간을 300년 이상으로 평가했고 부족강수량은 상대적으로 2015년이 더 크게 나타났으나, ‘가뭄심도-지속기간’ 분석에서는 2015년 가뭄의 경우 100년 이상의 재현기간으로 평가되었고, 2014년 가뭄의 재현기간 300년을 훨씬 상회하는 수준으로 평가해 가뭄 평가의 결과가 대비되었다.

Kim *et al.* (2017)은 1973년부터 2015년까지의 강수량 자료를 이용하여, 6개월 누적강수량의 평균값을 임계수준으로 가뭄을 결정하였고, 2013년부터 2015년까지 가뭄사상을 가장 극심한 가뭄으로 평가했다. 이때의 서울지점 가뭄 재현기간은 2,000년 이상, 강화지점은 10,000년 이상으로 추정하였다. 본 연구에서는 서울지점의 ‘가뭄심도-부족 강수량’ 분석의 재현기간은 2014년과 2015년 모두 300년 수준으로 나타났다. 자료의 누적기간이 다르기 때문에 직접적인 비교가 어려울 수 있으나, 평균값을 임계수준으로 사용하여 짧은 기간의 일반적인 강수량 부족의 사상, 즉 미소가뭄이 다수 발생하여 확률밀도함수의 좌측(짧은 지속기간과 낮은 가뭄심도 부분)의 밀도가 높아져 재현기간이 매우 크게 산정된 것으로 판단된다. 가뭄을 평가하기 위해 사용하는 가뭄지수의 가뭄기준에 해당하는 강수량을 임계수준으로 사용하는 것이 미소가뭄을 가뭄평가에서 제외할 수 있는 좋은 방법이라고 판단된다.

‘가뭄심도-지속기간’에서 가뭄의 재현기간은 낮게 나타나나, ‘가뭄심도-부족 강수량’의 가뭄 재현기간이 높게 나타나는 경우는 6~9월에 가뭄이 시작할 때 나타났음을 알 수 있다. Table 4의 최대 부족강수량이 나타난 가뭄사상에 대해 ‘가뭄심도-지속기간’과 ‘가뭄심도-부족 강수량’의 재현기간을 비교하여 Table 5에 나타내었다. 대관령, 서울, 양평, 제천, 충주의 경우 대관령(9월)을 제외하고 모두 7월에 가뭄이 시작되었고, ‘가뭄심도-부족 강수량’의 재현기간은 모두 300년을 크게

넘는 극심한 가뭄으로 나타나나, ‘가뭄심도-지속기간’의 경우 재현기간 20~50년 수준으로 평가하였다. 재현기간 20~50년 가뭄 또한 극심한 가뭄으로 볼 수 있으나, 관측기간 중 부족 강수량이 최대인 것으로 고려한다면 상대적으로 가뭄을 과소 평가했다고 판단된다. 반면, 가뭄심도가 최대인 경우의 가뭄 사상의 재현기간을 비교하였을 때, ‘가뭄심도-지속기간’과 ‘가뭄심도-부족 강수량’의 재현기간은 모두 크게 다르지 않음을 알 수 있다(Table 6). 가뭄의 심도가 크다고 하여 강수량의 부족이 큰 것이 아니며, 이러한 복합적인 가뭄에 대한 정보를 표현하기 위해서는 ‘가뭄심도-부족 강수량’에 대한 이변량 빈도해석이 필요하다.

Table 7은 30년 빈도 이상의 가뭄사상에 대해 지점별 연도별로 나타내었다. 한강유역의 9개 기상관측소에서 ‘가뭄심

Table 5. Comparison of return period for drought event when precipitation deficit is maximum value

Weather station	Drought start date	Return period (year)	
		Magnitude & Duration	Magnitude & Precipitation deficit
Seoul	Jul-2015	About 20	Over 300
Yangpyeong	Jul-2015	About 50	Over 300
Wonju	Apr-2014	Over 300	Over 300
Icheon	Jul-2015	About 200	Over 300
Inje	Apr-2014	Over 300	Over 300
Jecheon	Jul-1973	About 30	Over 300
Chuncheon	Jun-2015	About 300	Over 300
Chungju	Jul-2015	About 50	Over 300
Hongcheon	Jun-2015	About 200	Over 300

Table 6. Comparison of return period for drought event when drought magnitude is maximum value

Weather station	Drought start date	Return period (year)	
		Magnitude & Duration	Magnitude & Precipitation deficit
Seoul	Mar-2014	Over 300	Over 300
Yangpyeong	Mar-2014	Over 300	Over 300
Wonju	Apr-2014	Over 300	Over 300
Icheon	Jan-1984	Over 300	About 100
Inje	Apr-2014	Over 300	Over 300
Jecheon	May-2015	Over 300	Over 300
Chuncheon	Mar-2014	Over 300	Over 300
Chungju	Jan-1995	Over 300	About 300
Hongcheon	Mar-2014	Over 300	Over 300

Table 7. Over 30-year return period of drought event

Weather station	Year														
	1973	1977	1982	1983	1984	1986	1988	1995	2000	2001	2010	2014	2015	2016	2017
Seoul			P				D/P		D/P			D/P	P		
Yangpyeong							D/P					D/P	D/P		
Wonju			P				D/P			P		D/P	P		
Icheon					D/P							D/P	D/P	P	D/P
Inje	P						D/P					D/P	D/P		
Jecheon	D/P		P				D					D/P	D/P		
Chuncheon							P					D/P	D/P		
Chungju		P		D				D/P				P	D/P		
Hongcheon												D/P	D/P		D/P

Note) D: Drought duration and magnitude
 P: Precipitation deficit and magnitude

Table 8. Over 100-year return period of drought event

Weather station	Year							
	1973	1984	1988	1995	2000	2001	2014	2015
Seoul			P		P		D/P	P
Yangpyeong			D/P				D/P	P
Wonju			D			P	D/P	
Icheon		D/P					P	D/P
Inje			D/P				D/P	D/P
Jecheon	P							D/P
Chuncheon							D/P	D/P
Chungju				D/P				P
Hongcheon							D/P	D/P

Note) D: Drought duration and magnitude
 P: Precipitation deficit and magnitude

도-지속기간' 또는 '가뭄심도-부족 강수량'에서 30년 빈도가 상 가뭄이 발생한 연도는 15개 연도로 나타났다. 하지만 대부분의 기간에서는 한두 개 지점에서 가뭄이 발생했으나, 1988년, 2014년, 2015년은 대부분의 지점에서 30년 빈도 이상의 가뭄이 발생한 것으로 알 수 있다. 특히 2014년과 2015년은 대다수의 지점에서 '가뭄심도-지속기간' 및 '가뭄심도-부족 강수량'의 가뭄 재현기간이 30년 이상으로 나타났다. 또한 Table 8의 재현기간 100년 이상의 가뭄사상의 결과를 확인하더라도 2014년과 2015년 가뭄이 1973년 이후 가장 극심한 가뭄이었음을 확인할 수 있다. 특히 2015년의 가뭄은 서울, 양평, 충주지점의 경우 '가뭄심도-부족 강수량'량의 재현기간은 모두 300년 이상의 극심한 가뭄을 나타내고 있지만, '가뭄심도-지속기간'에서는 재현기간을 각각 약 10년, 50년, 50년으로 평가하여 실제 체감되는 가뭄의 심각성보다 낮게 평가하

였다. 이는 가뭄에 대응하기 위한 정량적 지표로 '가뭄심도-지속기간'의 이변량 빈도해석의 한계를 보여주고 있다.

4. 결론

가뭄을 정량화 하는데 있어서 가뭄의 심도 및 지속기간도 중요하지만, 강수량의 부족분에 대한 평가 또한 중요하다. 특히 가뭄의 심도와 지속기간은 선형성이 매우 크기 때문에 단변량 빈도해석결과와 비교하여 이변량 빈도해석을 통한 정보의 확장성은 크지 않다. 본 연구에서는 가뭄의 심도와 지속기간을 변량으로 이변량 빈도해석을 주로 수행한 기존 연구와는 달리 가뭄의 심도와 강수부족량을 변수로 하는 이변량 가뭄빈도해석을 수행하였다.

가뭄 사상은 3개월 누적강수량을 이용한 SPI 지수를 이용하여, SPI의 가뭄 기준인 -1이 연속되는 가뭄을 하나의 가뭄사상으로 정의하였다. 그리고 부족 강수량은 SPI -1에 해당하는 강수량을 기준 강수량으로 하여 부족 강수량을 산정하였다.

가뭄 심도의 경우 가뭄지속기간과의 선형적 관계가 매우 크기 때문에 큰 가뭄의 경우 가뭄심도가 가뭄의 지속기간의 정보를 함께 가지고 있다고 할 수 있다. 따라서 계절적 강수특성을 기준으로 산정되는 SPI의 가뭄 심도가 같더라도 우기와 건기의 강수부족량은 큰 차이를 나타낸다. 특히 우기에 시작되는 가뭄의 경우 '가뭄심도-지속기간'의 재현기간이 '가뭄심도-부족 강수량'의 재현기간보다 매우 낮게 산정되어 실제 체감되는 가뭄에 비해 그 심각한 정도를 낮게 평가할 수 있다. 그리고 '가뭄심도-지속기간'에서 재현기간이 높은 가뭄의 경우 '가뭄심도-부족 강수량'에서도 재현기간을 높게 평가했지만,

‘가뭄심도-부족 강수량’에서 재현기간을 높게 평가한 가뭄은 ‘가뭄심도-지속기간’에서는 낮게 평가하는 경우가 있다. 가뭄의 심도가 크다고 하여 강수량의 부족이 큰 것이 아니며, 이러한 복합적인 가뭄에 대한 정보를 표현하기에는 ‘가뭄심도-부족 강수량’에 대한 이변량 빈도해석이 필요하다고 판단된다.

현대의 수자원 관리시스템은 저수지나 댐 등 용수 저장시설에 대한 의존도가 높다. 따라서 우기의 가뭄은 이듬해까지 영향을 주게 되어 우기의 가뭄 심각성을 명확히 표현해 줄 수 있는 ‘가뭄심도-부족 강수량’에 대한 이변량 가뭄빈도해석이 중요하며, 두 변량에 대한 정보는 가뭄대응을 위한 기준지표로 활용성이 클 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 18AWMP-B083066-05).

References

- Chen, L., Singh, V. P., Guo, S., Mishra, A. K., and Guo, J. (2013). “Drought analysis using copulas.” *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 18, No. 7, pp. 797-808.
- Kao, S. C., and Govindaraju, R. S. (2010). “A copula-based joint deficit index for droughts.” *Journal of Hydrology*, Vol. 380, No. 1-2, pp. 121-134.
- Kim, B. S., Chang, I. G., Sung, J. H., and Han, H. J. (2016). “Projection in future drought hazard of South Korea based on RCP climate change scenario 8.5 using SPEI.” *Advances in Meteorology*, 2016. DOI: 10.1155/2016/4148710
- Kim, J. Y., Kim, J. G., Cho, Y. H., and Kwon, H. H. (2017). “A development of Bayesian Copula model for a bivariate drought frequency analysis.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 11, pp. 745-758.
- Kwak, J. W., Kim, D. G., Lee, J. S., and Kim, H. S. (2012). “Hydrological drought analysis using copula theory.” *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 3B, pp. 161-168.
- Kyoung, M., Lee, Y., Kim, H., and Kim, B. (2009). “Assessment of climate change effect on temperature and drought in Seoul: Based on the AR4 SRES A2 scenario.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 2B, pp. 181-191.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., and Kleist, J. (1993). “The relationship of drought frequency and duration to time scales.” *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Boston, MA, pp. 179-183.
- Mirabbasi, R., Fakheri-Fard, A., and Dinpashoh, Y. (2012). “Bivariate drought frequency analysis using the copula method.” *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 108, No. 1-2, pp. 191-206.
- Nelssen, R. B. (2006). *An introduction to Copula*. Springer, New York, pp. 109-115.
- 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 of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33 No. 5, pp. 1871-1885.
- Park, M., Lee, O., Park, Y., and Kim, S. (2015). “Future drought projection in Korea under AR5 RCP climate change scenarios.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 6, pp. 423-433.
- Ryu, J. S., Ahn, J., and Kim, S. (2012). “An application of drought severity-area-duration curves using copulas-based joint drought index.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 10, pp. 1043-1050.
- Sheffield, J., Wood, E. F., and Roderick, M. L. (2012). “Little change in global drought over the past 60 years.” *Nature*, Vol. 491, No. 7424, pp. 435-438.
- Shiau, J. T., Feng, S., and Nadarajah, S. (2007). “Assessment of hydrological droughts for the Yellow River, China, using copulas.” *Hydrological Processes: An International Journal*, Vol. 21, No. 16, pp. 2157-2163.
- Stokes, B., Wike, R., and Carle, J. (2015). Global concern about climate change, broad support for limiting emissions, Pew Research Center, accessed 28 July 2018, <<http://www.pewglobal.org/2015/11/05/global-concern-about-climate-change-broad-support-for-limiting-emissions>>.
- Wilhite, D. (2006). *Drought monitoring and early warning: concepts, progress and future challenges*. Geneva: World Meteorological Organization, 1006: 24.
- WMO (2009). Experts agree on a universal drought index to cope with climate risks. World Meteorological Organization Press Release No. 872, accessed 17 July 2018, <http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/meetings/wies09/documents/872_en.pdf>.
- Wong, G., Lambert, M. F., and Metcalfe, A. V. (2008). “Trivariate copulas for characterisation of droughts.” *Anziam Journal*, Vol. 49, pp. 306-323.
- Yeon, J. M., Byun, S. H., Lee, J. K., and Kim, T. W. (2007). “Evaluation of droughts in Seoul using Two-dimensional drought frequency analysis.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 4, pp. 335-343.
- 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.
- Zhang, L., and Singh, V. P. (2006). “Bivariate flood frequency analysis using the copula method.” *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 150-164.