Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 37, No. 1: 231-238/ February, 2017
DOI: https://doi.org/10.12652/Ksce.2017.37.1.0231

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Water Engineering **수공학**

이변량 가뭄빈도해석을 통한 다목적댐의 용수공급능력 평가

유지수* · 신지예** · 권민성*** · 김태웅****
Yu, Ji Soo*, Shin, Ji Yae**, Kwon, Minsung***, Kim, Tea-Woong****

Bivariate Drought Frequency Analysis to Evaluate Water Supply Capacity of Multi-Purpose Dams

ABSTRACT

Water supply safety index plays an important role on assessing the water supply capacity of hydrologic system. Due to the absence of consistent guidance, however, practical problems have been brought up on data period used for dam design and performance evaluation. Therefore, this study employed bivariate drought frequency analysis which is able to consider drought severity and duration simultaneously, in order to evaluate water supply capacity of multi-purpose dams. Drought characteristics were analyzed based on the probabilistic approach, and water supply capacity of five multi-purpose dams in Korea (Soyang River, Chungju, Andong, Daecheong, Seomjin River) were evaluated under the specific drought conditions. As a result, it would be possible to have stable water supply with their own inflow during summer and fall, whereas water shortage would occur even under the 1-year return period drought event during spring and winter due to low rainfall.

Key words : Bivariate drought frequency analysis, Multi-purpose dam, Water supply capacity, Water supply safety

초 록

용수공급시설의 설계 및 운영에 기준이 되는 이수안전도는 용수공급안전도의 평가를 위한 중요한 지표이지만, 이수안전도에 대한 일관된 지침이 없어 댐 설계 과정에서 저마다 사용된 자료기간과 평가 방법이 서로 상이한 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 다목적댐의 용수공급능력을 일관성 있게 평가하기 위해 가뭄의 심도와 지속기간을 동시에 고려할 수 있는 이변량 가뭄빈도해석을 수행하였다. 확률론적 개념을 바탕으로 가뭄사상을 평가하여 댐유역의 가뭄특성을 분석하였으며, 우리나라의 5개 다목적댐(소양강, 충주, 안동, 대청, 섬진강)을 대상으로 특정 가뭄상황에서의 용수공급능력을 평가하였다. 그 결과 여름과 가을에는 자체 유입량만으로 안정적인 용수공급이 가능하지만, 강수량이 적은 봄과 겨울에는 1년 빈도의 작은 가뭄에도 용수부족이 발생하는 것으로 나타났다.

검색어 : 이변량 가뭄빈도해석, 다목적댐, 용수공급능력, 이수안전도

1. 서 론

가뭄은 관점에 따라 기상학적, 수문학적, 농업적, 사회경제적 가뭄으로 분류되고 있으나 일반적으로 평년보다 적은 양의 강수량 또는 하천유량이 발생하는 것으로써 정의할 수 있다. 가뭄과 물 부족은 같은 개념으로 이해되는 경우가 많지만, 가뭄은 기상 변동에 의해 발생하는 자연재해이며 물 부족은 수자원 시스템의 운영 실패로 인해 야기된다(Van Loon and Van Lanen, 2012). 따라서 용수의

* 정회원 · 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석박사과정 (Hanyang University · jisoo91@hanyang.ac.kr)
** 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석박사과정 (Hanyang University · starzee@hanyang.ac.kr)
*** 성균관대학교 수자원전문대학원 박사과정 (Sungkyunkwan University · kwon.ms@skku.edu)
**** 종신회원 · 교신저자 · 한양대학교 공학대학 건설환경플랜트공학과 교수 (**Corresponding Author** · Hanyang University · twkim72@hanyang.ac.kr)

Received November 30, 2016/ **revised** December 13, 2016/ **accepted** December 26, 2016

Copyright ⓒ 2017 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

부족은 주로 용수 공급 및 수요의 변화에 의한 것이며 수자원 시스템 내의 유입량과 유출량의 균형이 무너질 때 발생한다. 이는 주로 수자원의 부적절한 관리 또는 인간사회의 변화에 의한 것이지만 대부분의 경우 용수부족은 심각한 가뭄사상으로 인해 촉발된다.

이수안전도란 용수공급을 위한 시설이 용수수요에 대해 실패하지 않고 용수를 공급할 수 있는 안정성 정도를 의미하며, 용수공급시설의 설계 및 운영의 기준으로 사용된다. 그러나 우리나라의 경우 치수와 관련된 수자원시설의 운영 및 설계 기준은 명확하게 제시되어 있는 반면, 이수에 대한 안전도를 평가하기 위한 표준화된 방법은 정립되지 않은 실정이다. 우리나라의 용수공급능력 평가 지표는 주로 보장공급량과 신뢰도 기준이 사용되며, 일관된 지침이 없기 때문에 댐을 설계할 때마다 사용된 자료기간과 평가 기준이 다르게 적용되었다. 또한 가뭄을 평가할 경우, 물 부족 총량만을 산정하였고, 가뭄 지속기간에 대한 고려를 하지 못했다.

따라서 설계홍수량을 통해 수공구조물의 설계 기준 및 안전도를 평가하는 것과 같이, 가뭄에 대해서도 유역의 가뭄재현특성을 통해 수자원 시스템의 위험도와 용수공급능력을 평가할 필요성이 있다. 가뭄의 발생특성을 확률론적으로 추론하기 위해서는 확률론적 빈도해석방법을 적용할 수 있으며, 이를 통해 가뭄에 대한 수문학적 위험도를 정량화하여 나타낼 수 있다. 확률론적 해석방법에 기초한 가뭄의 재현특성 평가는 다양한 지역에서의 가뭄 위험도 평가를 위해 적용된 바 있다(Ganguli and Reddy, 2012; Li et al., 2015; Yoo et al., 2016a; Yu et al., 2016). 또한 가뭄 동안 지역의 용수공급능력을 평가하기 위한 확률가뭄심도(design drought)의 개념이 제시된 바 있다(Frick et al., 1990; Yoo et al., 2016b). 그러나 홍수와 다르게 가뭄은 심도와 지속기간의 두 가지 변수를 통해 정의되는 이변량 수문사상이다. 이러한 인식이 강화됨에 따라 최근 연구에서는 기존의 단변량 빈도해석보다 다변량 빈도해석을 통해 산정된 결과를 통해 재현특성을 더 명확하게 파악할 수 있는 것으로 알려져 있다(Shiau and Shen, 2001; Shiau, 2003).

본 연구에서는 댐 유역에서 발생했던 과거 수문학적 가뭄사상을 정의하고, 심도와 지속기간을 모두 고려하는 가뭄빈도해석을 통해 확률론적으로 재현특성을 평가하였다. 이러한 이변량 가뭄빈도해석 결과의 신뢰도를 크게 좌우하는 과정은 주변확률분포를 결합하여 결합확률분포함수를 산정하는 것으로, 본 연구에서는 코플라 함수를 이용하였다. 본 연구에서 산정된 결합확률분포함수의 조건부 함수를 이용하여 특정 가뭄 지속기간의 재현기간별 가뭄심도를 결정할 수 있으며, 이를 확률가뭄심도로서 정의하였다. 최종적으로 확률가뭄심도를 통해 다목적댐이 특정 가뭄 조건에서 용수 부족 없이 안정적인 공급이 가능한지 평가하였다.

2. 연구방법

2.1 수문학적 가뭄의 정의

가뭄은 단순한 강수의 부족 현상에서 출발하여 특정 목적을 위해 사용되는 용수의 부족 현상을 야기하기 때문에 사회경제적 피해를 가져온다. 갈수(low flow)는 가뭄 상황에서 발생되는 주요 현상이지만 반드시 가뭄을 나타내는 것은 아니며 가뭄의 크기(magnitude)를 나타내는 지표 중 하나이다. 일반적으로 갈수지표(low flow index)가 나타내는 정량적인 양과 가뭄사상을 동일시하는 경향이 있다. 그러나 갈수지표는 특정 범위를 통해 갈수량을 정의하는 반면, 수문학적 가뭄은 하천유량이 평년과 비교하여 어느 정도의 부족량이 얼마나 오래 지속되는지 크기와 기간을 통해 특징지어진다.

가뭄사상을 정량적으로 표현하기 위해 가장 많이 사용되는 방법은 일정 임계수준 이하의 연속된 부족량 발생을 가뭄사상으로 정의하는 것으로, 임계수준방법(threshold level method)이라 한다(Tallaksen, 2000). 임계수준은 다양한 방법으로 결정될 수 있지만 그 값에 따라 가뭄의 특성이 결정되므로 임계수준의 결정은 가뭄분석에 있어 가장 중요한 과정이다. 수문학적 가뭄의 임계수준 값은 주로 유역의 유황곡선(flow duration curve)을 통해 산정된다.

일(daily) 자료를 기반으로 산정된 유황곡선은 일유량과 그에 따른 초과확률(exceedance probability) 사이의 관계를 나타내며, 초과확률 값을 기반으로 유역별로 수문학적 특성의 비교가 가능하다. 또한 일별 임계수준은 홍수기 또는 갈수기에도 하천유량이 부족해지는 기간을 구분하는데 유용하다. Hisdal and Tallaksen (2003)은 기후가 다양한 지역에서는 고정된 값보다 계절별 또는 일별 변동성을 갖는 임계수준을 적용하는 것이 더 효과적임을 밝힌 바 있다. N년 동안의 일 유량자료를 이용하여 해당 일유량에 대한 초과확률은 Eq. (1)과 같이 계산된다.

$$E_t = \left(\frac{N \times n + 1 - k_t}{N \times n} \right) \times 100\% \tag{1}$$

여기서, E_t는 연중 t일에 대한 초과확률을 의미하며, N은 기록년수, n은 일(day)수, k_t는 t일에 측정된 유량의 오름차순 순위이다.

그러나 이러한 일별 임계수준의 적용은 두 가지 문제점을 야기할 수 있다. 첫째, 연속이론을 통해 가뭄을 정의할 때 하나의 대형 가뭄이 임계수준에 의해 부득이하게 여러 개의 미소가뭄(minor drought) 사상으로 나눠지는 경우가 발생한다. 둘째, 짧은 간격을 두고 존재하는 여러 개의 미소가뭄은 상호 의존적인 관계를 가진다. 따라서 개별 가뭄사상이 서로 독립이라는 빈도해석의 기본 가정을 무너뜨릴 수 있다. 또한 미소가뭄은 극한사상의 분석에 있어 왜곡을

발생시키는 원인으로써 작용하기도 한다.

이러한 문제는 나눠진 미소가뭄을 하나의 사상으로 결합하는 가뭄풀링(pooling) 과정을 적용함으로써 해결할 수 있다. 본 연구에서는 풀링 기법의 하나인 Sequent Peak Algorithm (SPA)를 적용하였다(Vogel and Stedinger, 1987; Tallaksen et al., 1997).

SPA는 두 개의 가뭄사상 중 처음 발생한 가뭄에 의해 발생한 부족량이 잉여량에 의해 회복되지 않았다면, 가뭄이 끝나지 않은 것으로 정의하여 두 가뭄 사상을 하나의 가뭄으로 정의하는 방법이다. 유입량 $Q(t)$에서 임계수준을 제외한 과부족량 $w(t)$는 Eq. (2)와 같이 산정할 수 있다.

$$w(t)=\begin{cases} w(t-1)+Q_0-Q(t) & , positive \\ 0 & , otherwise \end{cases} \tag{2}$$

2.2 이변량 가뭄빈도해석

이변량 가뭄빈도해석은 가뭄사상의 주요 특성인자인 지속기간과 심도의 결합분포를 통해 발생특성을 확률적으로 나타내는 과정이다. 코플라 함수는 서로 다른 여러 확률분포를 결합하는 것이 가능하고, 변수들 사이의 의존구조를 파악하기 쉽기 때문에 최근 수자원 분야에서 다양하게 적용되고 있다. 가뭄에 있어 재현기간은 특정 기준 값보다 작은 크기를 갖는 사상 사이의 평균 발생간격으로 정의된다. 코플라 함수를 적용한 결합확률분포를 통해 이변량 재현기간을 산정하는 방법은 Eqs. (3) and (4)와 같다(Shiau, 2003).

$$F_{D,S}(d,s)=C(F_D(d),F_S(s)) \tag{3}$$

$$T_{DS}=\frac{E(L)}{P(D\geq d \text{ and } S\geq s)} =\frac{E(L)}{1-F_D(d)-F_S(s)+C(F_D(d),F_S(s))} \tag{4}$$

여기서, $F_D(d)$와 $F_S(s)$는 각각 가뭄 지속기간(D)과 심도(S)에 대한 확률분포함수를 나타내며 C는 코플라 함수를 의미한다. T_{DS}는 $D\geq d$이고 $S\geq s$인 경우의 결합재현기간이며 $E(L)$은 평균 가뭄 발생간격을 나타낸다. 최근 수문빈도해석에서는 다양한 형태를 포함하며 산정과정이 간단하고 수문변수 간의 상관관계를 잘 반영하는 Archimedean 코플라 함수가 주로 적용되고 있다(Nelson, 1999; Zhang and Singh, 2006). 본 연구에서 사용된 세 가지 Archimedean 코플라 함수는 Table 1과 같다.

Table 1. Equations of Archimedean Copula Families

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

코플라 함수로 산정된 이변량 결합확률분포는 3차원의 형태를 가지고 있으며, 이러한 분포형태는 실무에서의 적용을 어렵게 하는 요인으로 작용한다. 그러나 조건부 결합확률분포를 활용하여 특정 지속기간 또는 심도에 따른 2차원 분포형태로 표현이 가능하다. 예를 들어, 지속기간에 대한 확률분포 $V=F_D(d)$에 대한, $U=F_S(s)$의 조건부 확률분포는 Eqs. (5) and (6)와 같이 산정할 수 있다.

$$C_{U|V=v}(u)=C(U\leq u|V=v) =\lim_{\Delta v\to 0}\frac{C(u,v+\Delta v)-C(u,v)}{\Delta v}=\frac{\partial}{\partial v}C(u,v)|V=v \tag{5}$$

$$C_{U|V\leq v}=C(U\leq u|V\leq v)=\frac{C(u,v)}{v} \tag{6}$$

3. 연구지역 및 자료

우리나라 댐의 이수안전도 평가기준은 건설시기에 따라 보장공급량 및 신뢰도와 같이 각각 다른 기준이 적용되어 왔다. 보장공급량은 최대한발과 같은 기준갈수년에 대한 유입량 자료를 이용하여 특정 갈수 기간 동안 보장할 수 있는 최대공급량을 산정하는 방법이고, 신뢰도 기준은 과거자료를 바탕으로 모의 운영을 수행하여 계획기간 동안 몇 회의 용수부족이 발생하는지 산정하는 방법이다. 이 두 방법은 실측자료가 적었던 과거에 사용하기에 유용했으나, 각 댐마다 건설시기가 달라 기록연한이 상이하고, 기준갈수년이 최대가뭄년과 일치하지 않는 유역이 발생하기 때문에 이수안전도 평가에 있어 일관된 기준이라하기 어렵다.

본 연구에서는 댐의 용수공급능력을 평가하기 위해 이변량 빈도해석으로 산정된 재현기간을 사용하였으며, 과거 발생했던 가뭄사상은 실측 댐 유입량 자료를 이용하여 분석되었다. 이를 위해 소양강댐(1974~2015), 충주댐(1986~2015), 안동댐(1977~2015), 대청댐(1981~2015), 섬진강댐(1975~2015)의 기록연한이 30년 이상인 5개 다목적댐을 연구지역으로 선정하였으며, 연구지역의 월평균 유입량, 방류량 및 계획용수공급량은 Table 2와 같다.

4. 적용 및 결과

4.1 가뭄사상의 정의

가뭄사상을 정의하기 위한 임계수준을 선정하기 위해 댐 유입량 자료를 이용하여 일별 유황곡선을 작성하였다. 임계수준은 50-95 백분위수까지 다양하게 적용할 수 있으며, 여러 임계수준을 비교하

Table 2. Average Characteristics of Dam Basin (10^6 m^3) (K-water, 2015)

	Soyang River			Chungju			Andong			Daecheong			Seomjin River		
	Inflow	Outflow	Supply Plan	Inflow	Outflow	Supply Plan	Inflow	Outflow	Supply Plan	Inflow	Outflow	Supply Plan	Inflow	Outflow	Supply Plan
Jan	16.41	156.22	123.74	54.53	200.26	260.34	13.00	70.54	53.30	55.24	100.82	110.35	11.11	13.36	0.00
Feb	22.23	151.52	111.77	79.10	178.89	235.15	18.53	65.17	48.14	68.48	94.70	99.67	17.97	13.98	0.00
Mar	75.83	152.72	125.35	192.26	211.82	260.34	41.09	61.88	53.30	111.64	119.02	110.35	27.35	15.67	0.00
Apr	162.89	139.52	122.34	312.64	288.09	275.53	71.01	59.05	53.91	129.80	146.09	109.64	33.11	46.86	6.48
May	154.01	179.22	126.42	308.63	415.83	318.73	70.11	87.13	90.26	132.03	198.55	123.21	26.88	76.58	16.34
Jun	139.89	191.89	122.34	350.86	538.67	324.52	84.86	121.35	127.79	205.98	248.52	230.17	49.24	73.50	106.01
Jul	587.00	224.70	126.42	1531.15	1025.81	308.55	241.62	109.47	108.48	688.18	480.32	191.77	149.83	72.31	83.57
Aug	535.68	270.70	126.42	1147.39	996.06	323.82	213.07	121.30	134.46	579.76	471.22	181.33	131.20	103.76	101.24
Sep	326.32	240.67	122.34	839.54	697.42	279.42	155.48	105.19	94.35	403.41	396.69	165.37	72.44	80.67	38.62
Oct	75.79	151.35	125.35	204.85	262.70	281.77	38.30	67.73	58.92	100.07	141.63	110.35	11.79	27.76	0.00
Nov	55.42	150.25	119.75	119.01	213.37	251.94	23.12	59.97	51.58	68.43	109.61	106.79	10.31	13.20	0.00
Dec	30.19	168.68	123.74	85.69	212.60	260.34	17.23	72.26	53.30	65.73	115.31	110.35	13.34	14.00	0.00

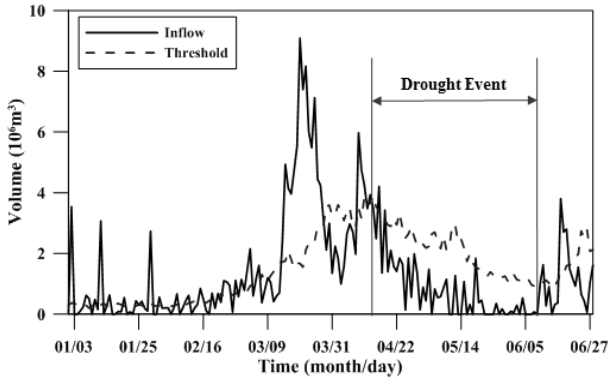

Fig. 1. Drought Definition Using Threshold Level Method

는 연구가 수행된 바 있다(Wu et al., 2008; van Huijgevoort et al., 2012; Beyene et al., 2014; Sung and Chung, 2014). 그러나 하나의 기준이 결정되어 제시된 바 없으며, 유역의 특성에 맞게 선택되는 것이 일반적이다. Fig. 1은 일별 댐 유입량과 임계수준을 함께 도시한 것으로, 본 연구에서는 Eq. (1)에 따라 유황곡선을 작성하고 60 백분위수를 가뭄에 대한 임계수준으로 사용하였다. 임계수준 이하의 연속된 유량들이 가뭄사상으로 정의된다. 따라서 가뭄 지속기간(duration)은 가뭄이 지속된 일수이며, 가뭄 심도(severity)는 가뭄 지속기간 동안 발생한 임계수준보다 부족한 유량의 합으로 정의된다.

본 연구에서 가뭄 심도 및 지속기간을 7개의 확률분포함수(Gaussian, Exponential, Gamma, Gumbel, GEV, Weibull, Generalized Pareto)에 대하여 Kolmogorov-Smirov 검정을 수행하였다. 그 결과 심도 및 지속기간은 각각 지수 분포와 감마 분포를 가장 잘 따르는 것으로 나타났다. 주변확률분포함수를 결정한 후 코플라 함수를 통해 이변량 결합확률분포함수 산정하였다. Archimedean 코플라 함수 중 Clayton, Frank, Gumbel을 대상으로 최우도법을 적용하여 최적의 함수를 선정하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다. 가뭄 심도는 댐 유역의 크기와 특성에 따라 7.5~ 95.8백만 m^3까지 다양한 범위를 갖지만 지속기간은 크게 1년을 넘어서지 않는 것으로 분석되었다. 5개 댐의 평균 지속기간은 3개월이고 평균 심도는 45백만 m^3이다.

Table 3. Drought Characteristics and Optimal Probability Distribution Functions

Dam Basin	Severity (10^6 m^3)				Duration (month)				Copula
	Func.	Max.	Min.	Avg.	Func.	Max.	Min.	Avg.	
Soyang	Exp.	185.18	1.94	45.84	Gamma	8.53	1.03	3.08	Clayton
Chungju	Exp.	470.23	2.86	95.77	Gamma	8.57	1.03	3.09	Frank
Andong	Exp.	71.82	1.16	22.97	Gamma	9.50	1.07	3.37	Clayton
Daecheong	Exp.	225.81	2.96	57.53	Gamma	10.80	1.03	3.49	Gumbel
Seomjin	Exp.	29.49	0.50	7.46	Gamma	6.27	1.03	2.36	Clayton

4.2 우리나라 계절별 가뭄 특성

본 연구에서는 봄(3, 4, 5월), 여름(6, 7, 8월), 가을(9, 10, 11월), 겨울(12, 1, 2월)로 나누어 계절별 가뭄발생 특성을 분석하였으며, 그 결과는 Table 4에 나타낸 것과 같다. 가뭄 발생 횟수는 계절별로 비슷하게 나타났지만 그 중 봄에 가장 빈번하게 가뭄이 발생하였으며 가장 가뭄 발생 빈도가 낮은 계절은 겨울로 분석되었다. 그러나 봄은 가뭄 발생 빈도가 높음에도 불구하고 지속기간이 평균의 0.67배 정도로 짧고 심도는 평균과 유사한 정도로 나타났으며, 겨울은 가뭄 지속기간과 심도가 모두 평균보다 0.85배와 0.54배이며, 재현기간도 평균의 0.37배로 가장 위험도가 낮은 것으로 분석되었다.

지속기간이 유역 평균보다 가장 높은 계절은 가을이며, 긴 지속기간에 비해 심도는 평균의 0.55배 정도로 낮게 나타났다. 가뭄 위험도를 나타내는 재현기간은 평균의 0.65배로 크지 않은 것으로 분석되었다. 유입량이 비교적 풍부한 여름철에 발생하는 가뭄의 지속기간과 심도는 평균보다 1.3배와 1.9배 높으며 재현기간은 2.3배 높은 것으로 나타났다. 여름의 가뭄발생 확률은 비교적 건조한 계절인 봄, 가을보다 높지 않으나 장마 및 태풍으로 평균 유입량이 크기 때문에 평년보다 강수량이 조금만 적어도 큰 심도를 나타내기 때문에 다른 계절보다 위험도가 높은 것으로 분석되었다.

Table 4. Seasonal Drought Characteristics of Dam Basins

(a) Spring

Dam Basin	Occurrence Probability	Duration (month)	Severity (10^6 m^3)	Return Period (year)
Soyang River	0.36	2.13	46.87	6.37
Chungju	0.23	2.10	120.11	10.99
Andong	0.35	2.39	24.55	3.56
Daecheong	0.29	2.14	50.41	2.80
Seomjin River	0.27	1.52	4.94	1.41

(b) Summer

Dam Basin	Occurrence Probability	Duration (month)	Severity (10^6 m^3)	Return Period (year)
Soyang River	0.28	3.41	76.86	16.92
Chungju	0.27	3.90	166.93	14.19
Andong	0.21	4.37	41.30	17.50
Daecheong	0.27	4.94	99.98	11.42
Seomjin River	0.20	3.19	17.64	19.41

(c) Fall

Dam Basin	Occurrence Probability	Duration (month)	Severity (10^6 m^3)	Return Period (year)
Soyang River	0.25	4.39	24.84	5.76
Chungju	0.23	3.57	36.92	2.88
Andong	0.28	4.06	13.21	4.48
Daecheong	0.31	3.76	36.05	3.55
Seomjin River	0.25	3.02	4.67	5.55

(d) Winter

Dam Basin	Occurrence Probability	Duration (month)	Severity (10^6 m^3)	Return Period (year)
Soyang River	0.11	2.49	12.33	1.48
Chungju	0.27	2.69	53.38	2.46
Andong	0.16	3.03	12.73	2.32
Daecheong	0.13	2.94	38.15	2.76
Seomjin River	0.28	1.96	4.97	3.21

4.3 계절별 용수부족량 산정

본 연구에서는 다목적 댐의 이수안전도를 평가하기 위해 특정 재현기간을 갖는 가뭄이 발생한 상황을 가정하여 계절별 평균 댐 유입량에서 확률가뭄심도를 제외하고 계획용수공급량대로 용수공급을 수행할 때 어느 정도의 물 부족이 발생하는지 산정하였다. Table 2에서 확인할 수 있듯이 계획용수공급량은 실제 댐의 상황에 따라 인위적인 조정이 있기 때문에 실제 방류량과 차이가 있으나 댐 유역에서 요구되는 생활, 농업 및 공업용수에 의해 결정된 값이므로 이수안전도를 평가할 때 기준수요량으로 사용되기에 적합하다고 판단하였다. 앞서 분석된 결과와 같이 우리나라의 평균 가뭄 지속기간은 약 3개월이며, 따라서 3개월에 해당하는 각 재현기간에 따른 가뭄심도를 확률가뭄심도로써 산정하였다(Fig. 2).

각 댐 유역에서 계절별 확률가뭄심도에 따른 용수부족량은 Table 5에 나타낸 것과 같다. 우리나라의 기상학적 특성 상 7,

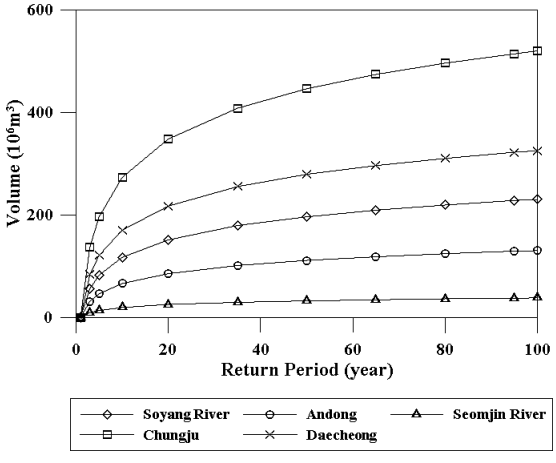

Fig. 2. Design Drought for 3-month Duration

Table 5. Water Shortage of Four Seasons under 3-month Duration Design Drought (10^6 m^3)

(a) Spring

Return Period (year)	Soyang River	Chungju	Andong	Daecheong	Seomjin River
1	20	-40	-20	30	-50
3	-40	-180	-50	-50	-60
5	-60	-240	-60	-90	-70
10	-100	-310	-80	-140	-70
20	-130	-390	-100	-190	-80
50	-180	-490	-130	-250	-80
100	-210	-560	-150	-300	-90

(b) Summer

Return Period (year)	Soyang River	Chungju	Andong	Daecheong	Seomjin River
1	890	2070	170	870	80
3	830	1940	140	790	70
5	810	1880	120	750	70
10	770	1800	100	700	60
20	740	1730	80	650	60
50	690	1630	60	590	50
100	660	1550	40	550	40

(c) Fall

Return Period (year)	Soyang River	Chungju	Andong	Daecheong	Seomjin River
1	90	350	10	190	-30
3	30	210	-20	110	-40
5	10	150	-30	70	-40
10	-30	80	-50	20	-50
20	-60	2	-70	-30	-50
50	-110	-100	-100	-90	-60
100	-140	-170	-120	-140	-70

(d) Winter

Return Period (year)	Soyang River	Chungju	Andong	Daecheong	Seomjin River
1	-290	-540	-110	-130	1
3	-350	-670	-140	-210	-10
5	-370	-730	-150	-250	-10
10	-410	-810	-170	-300	-20
20	-440	-890	-190	-350	-20
50	-490	-980	-220	-410	-30
100	-520	-1060	-240	-460	-40

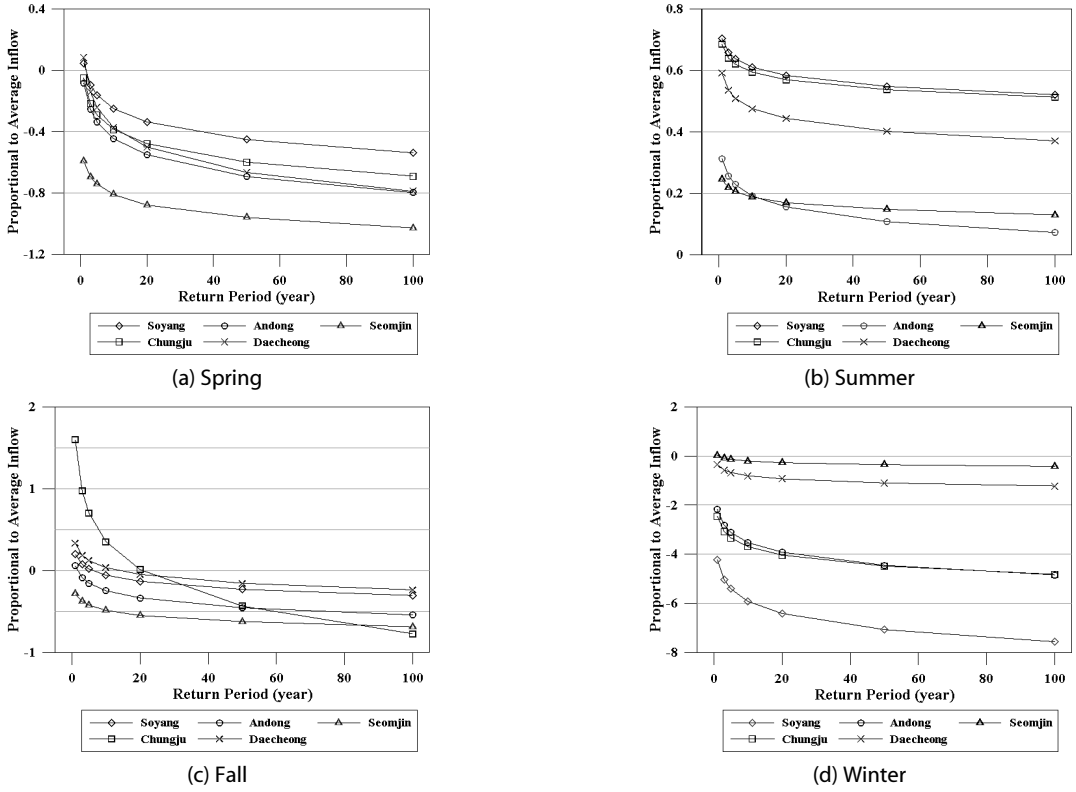

Fig. 3. Water Shortage of Four Seasons under 3-month Duration Design Drought

8, 9월에 장마와 태풍으로 인해 강우량이 집중되어 있기 때문에 댐 유입량이 가장 많은 계절은 여름과 가을이다. 여름에는 100년 빈도의 강한 가뭄이 발생하여도 3개월 지속기간을 갖는 확률가뭄심도 하에서는 용수부족을 나타내지 않는 것을 확인하였다. 가을에도 안동댐과 섬진강댐을 제외하고 5~10년 빈도 정도의 가뭄에는 안정적인 용수공급이 가능할 것으로 분석되었다. 반면 강수량이 적은 봄과 겨울에는 1년 빈도의 상시가뭄에도 용수부족이 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 3은 유역의 규모를 고려하여 댐의 계절별 용수공급능력을 비교하기 위해 평균 유입량에 비해 어느 정도의 용수부족량이 발생하는지 비율로 나타내었다. 그 결과 봄, 가을에는 섬진강댐, 여름에는 안동댐, 겨울에는 소양강댐의 이수안전도가 가장 낮은 것으로 분석되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 댐 유입량 자료를 이용하여 댐 유역에서 발생했던 과거 수문학적 가뭄사상을 정의하고, 계절별 가뭄 특성을 분석하였다. 가뭄의 주요 특성 변수인 심도와 지속기간을 사용하여 코플라 함수를 적용한 이변량 가뭄빈도해석을 수행하였으며, 이를 통해 확률론적으로 재현특성을 평가하였다. 그 후 산정된 결합확률분포 함수의 조건부 함수를 이용하여 3개월 지속기간에 대한 확률가뭄심도를 산정하였으며, 최종적으로 다목적댐이 특정 가뭄 조건에서 안정적인 용수공급이 가능한지 평가하였다.

우리나라의 수문학적 특성에 의해 여름에는 3개월 지속기간의 가뭄이 발생해도 자체 유입량만으로 안정적인 용수공급이 가능하며, 가을에는 안동댐과 섬진강댐을 제외하고 5~10년 빈도의 가뭄에도 견딜 수 있는 것으로 분석되었다. 그러나 강수량이 적은 봄과 겨울에는 1년 빈도의 작은 가뭄에도 용수부족이 발생하는 것으로 나타났다.

다목적댐은 생활·공업·농업용수 외에도 발전용수 및 생태환경 유지를 위한 하천유지용수 등 다양한 목적의 용수를 공급하므로 계획용수공급량을 충족시키지 못할 때 큰 사회경제적 피해를 야기할 수 있다. 실제로 2014~2015년 발생했던 극심한 가뭄으로 인해 소양강댐과 보령댐은 기록적인 저수위를 기록하며 큰 위기상황을 겪은 바 있다. 따라서 댐의 용수공급평가는 가뭄으로 인한 피해를 최소화할 수 있는 대책 마련과 함께 수자원 시스템의 운영 또는 설계지침으로 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리사업의 연구비지원(14AWMP-B082564-01)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

Beyene, B. S., Van Loon, A. F., Van Lanen, H. A. J. and Torfs, P. J. J. F. (2014). “Investigation of variable threshold level approaches for hydrological drought identification.” *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.,* Vol. 11, pp. 12765-12797.

Frick, D. M., Bode, D. and Salsa, J. D. (1990). “Effect of drought on urban water supplies I: Drought analysis.” *J. Hydraul. Eng.,* Vol. 116, No. 6, pp. 733-753.

Ganguli, P. and Reddy, M. J. (2012). “Risk assessment of droughts in Gujarat using bivariate copulas.” *Water Resour. Manage.,* Vol. 26, pp. 3301-3327.

Hisdal, H. and Tallaksen, L. M. (2003). “Estimation of regional meteorological and hydrological drought characteristics.” *J. Hydrolo.,* Vol. 281, No. 3, pp. 230-247.

K-water (2015). *Dams Operation Manual.*

Li, Y., Gu, W., Cui, W., Chang, Z. and Xu, Y. (2015). “Exploration of copula functions use in crop meteorological drought risk analysis: A case study of winter wheat in Beijing, China.” *Nat. Hazards,* Vol. 77, pp. 1289-1303.

Nelson, R. B. (1999). *An Introduction to Copulas*. Springer, New York.

Shiau, J. T. (2003). “Return period of bivariate distributed hydrologic events.” *Stoch. Env. Res. Risk A.,* Vol. 17, No. 1-2, pp. 42-57.

Shiau, J.-T., and Shen, H. W. (2001). “Recurrence analysis of hydrologic droughts of differing severity.” *J. Water Resour. Plan. Manage.,* Vol. 127, No. 1, pp. 30-40.

Sung, J. H. and Chung, E. S. (2014). “Development of streamflow drought severity-duration-frequency curves using the threshold level method.” *Hydrol. Earth Syst. Sci.,* Vol. 18, pp. 3341-3351.

Tallaksen, L. M. (2000). *Streamflow drought frequency analysis,* In: Drought and Drought Mitigation in Europe (ed. by J.V. Vogt and F. Somma), Kluwer Academic Publishers, the Netherlands, pp. 103-117.

Tallaksen, L. M., Madsen, H. and Clausen, B. (1997). “On the definition and modeling of streamflow drought duration and deficit volume.” *Hydrol. Sci. J.,* Vol. 42, No. 1, pp. 15-33.

van Huijgevoort, M. H. J., Hazenberg, P., van Lanen, H. A. J. and Uijlenhoet, R. (2012). “A generic method for hydrological drought identification across different climate regions.” *Hydrol. Earth Syst. Sci.,* Vol. 16, pp. 2437-2451.

Van Loon, A. F. and Van Lanen, A. J. (2012). “A process-based typology of hydrological drought.” *Hydol. Earth Syst. Sci.,* Vol. 16, pp. 1915-1946.

Vogel, R. M. and Stedinger, J. R. (1987). “Generalized reservoir storage-reliability-yield relationships.” *J. Hydrol.*, Vol. 89, pp. 303-327.

Wu, H., Soh, L. K., Samal, A. and Chen, X. H. (2008). “Trend analysis of streamflow drought events in Nebraska.” *Water Resour. Manage.,* Vol. 22, pp. 145-164.

Yoo, J., Kwon, H. H., Lee, J. H. and Kim, T. W. (2016a). “Influence of evapotranspiration of future drought risk using bivariate drought

frequency curves." *KSCE J. Civ. Eng.,* Vol. 20, No. 5, pp. 2059-2069 (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." *J. Korea Water Resour. Assoc.,* Vol. 49, No. 4, pp. 275-282 (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." *J. 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." *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 11, pp. 150-164.