

# 이차원 가뭄빈도해석을 통한 서울지역의 가뭄 평가

## Evaluation of Droughts in Seoul Using Two-Dimensional Drought Frequency Analysis

연 제 문\* / 변 성 호\*\* / 이 정 규\*\*\* / 김 태 웅\*\*\*\*  
Yeon, Je Mun / Byun, Sung Ho / Lee, Jung Kyu / Kim, Tae-Woong

### Abstract

Drought characteristics need to be preceded before establishing a drought mitigation plan. In this study, using a Standardized Precipitation Index (SPI), a hydrologic drought was defined as an event during which the SPIs are continuously below a certain truncation level. Then, a methodology of drought frequency analysis was performed to quantitatively characterize droughts considering drought duration and severity simultaneously. The theory of runs was used to model drought recurrence and to determine drought properties like duration and severity. Short historical records usually do not allow reliable bivariate analyses. However, more than hundred years of precipitation data (1770 ~ 1907) collected in Chosun Kingdom Age using an old Korean rain gage called Chukwooki can provide valuable information about past events. It is shown that a bivariate gamma distribution well represented the joint probabilistic properties of Korean drought duration and severity. The overall results of this study show that the proposed bivariate drought frequency analysis overcomes the drawbacks of the conventional univariate frequency analysis by providing a consistent representation of the drought recurrent property.

**keywords** : Drought, Standardized Precipitation Index, Chukwooki, Recurrence

### 요 지

가뭄에 대한 대책을 수립하기 위해서는 가뭄의 심도 및 지속기간 등 가뭄특성을 산정하여 가뭄을 정량화하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 표준강수지수(SPI)를 도입하여 가뭄특성을 정량적으로 산정하였다. 가뭄은 일정기간 지속되는 특성을 지니고 있기 때문에 일정 관측기간동안 제한된 가뭄사상을 가지게 된다. 본 연구에서는 조선시대에 기록된 측우기 자료(1770년 ~ 1907년)를 이용하여 관측자료를 확장하였고, 이를 이용하여 보다 많은 가뭄특성자료를 획득하여 가뭄빈도해석을 실시하였다. 측우기 자료와 관측자료를 이용하여 산정된 SPI로부터 절단수준법 개념을

\* 한양대학교 토목공학과 대학원 석사과정

Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea  
(e-mail: moon2291@hotmail.com)

\*\* 한양대학교 토목공학과 대학원 석사과정

Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea  
(e-mail: 5548462@hanmail.net)

\*\*\* 한양대학교 토목공학과 교수

Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea  
(e-mail: leejk@hanyang.ac.kr)

\*\*\*\* 교신저자, 한양대학교 건설환경시스템공학전공 전임강사

Corresponding Author, Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Hanyang University, Ansan, 426-791, Korea  
(e-mail: twkim72@hanyang.ac.kr)

이용하여 SPI의 -1이하를 가뭄으로 정의하고, 가뭄 심도 및 가뭄 지속기간을 구하였다. 가뭄의 심도와 지속기간은 가뭄을 특성화하는데 있어서 중요한 인자로서 최근 이 두 특성을 함께 고려하는 빈도해석법들이 제안되고 있다. 기존의 단일변수 빈도해석을 가뭄에 적용하였을 경우, 가뭄의 심도와 지속기간을 이용하여 구한 각각의 재현특성이 상이하게 나타나는 경우가 있는데, 이는 하나의 가뭄사상의 재현특성을 표현하는데 적절하지가 않다. 본 연구에서는 이변수 감마분포를 이용하여 가뭄심도와 지속기간의 결합확률밀도함수를 추정하고, 이를 통하여 가뭄의 이변수 재현기간을 산정하여 분석하였다.

**핵심용어** : 가뭄, 표준강수지수, 측우기 자료, 가뭄의 재현특성

## 1. 서 론

인간의 활동은 가뭄에 의하여 환경, 경제 등 사회 전반적인 분야에 큰 영향을 받아 왔다. 그러나, 가뭄의 특성은 복잡하고 정확히 판단하기 어렵기 때문에 그 영향을 정량화하여 사회 정책에 적용하기는 어렵다.

이러한 가뭄의 해석에는 그 목적에 따라 여러 가지 지표를 이용하여 가뭄을 정의하여 왔으며, 그 중 강수, 하천 유량 등은 기상 및 수문학적 가뭄을 판단하기 위한 지표로 널리 사용되어 오고 있다. 특히 강수는 지역의 수자원관리모형의 입력요소로서, 강수의 부족은 가뭄의 주된 요인이라 할 수 있으며, 가뭄의 정량적 평가에 효과적으로 이용될 수 있다. 강수를 이용한 가뭄의 평가지수로는 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)가 대표적이다. SPI는 가뭄을 모니터링하고 정의하기 위하여 개발되었으며 (Mckee et al., 1993), 이후 많은 연구에서 가뭄의 특성을 판단하고, 관리하는데 이용되고 있다 (Guttman, 1999; 유철상 등, 2003). Guttman(1999)은 SPI를 이용하여 다양한 확률분포모형과 SPI의 상관관계를 살펴보고, 적절한 확률분포모형을 제시하였으며, 유철상 등(2003)은 서울지역 월 강우량 자료에 대하여 지속기간 10개월의 SPI를 산정하여 서울지역의 가뭄의 재현 및 지속 특성을 파악하였다. 또한 유원희(2002)는 강수량 자료로부터 가뭄 지수를 산정하는 SPI방법을 유출량 자료에 적용하여 가뭄지수를 산정하였고, 이의 유용성을 Palmer 지수와 강수 SPI와 비교하였다.

가뭄은 수문시스템내의 물의 공급상태가 정상보다 낮은 현상으로 이를 정량적으로 정의하기 위해서는 통계학적인 접근방법이 필요하다. Yevjevich(1967)는 가뭄을 조사하고 정의하기 위하여 Run 개념을 도입하였으며, 이는 가뭄을 정의하고 확률적인 특성을 연구하는데 주로 이용된다. Dracup et al.(1980b)은 Run 이론을 이용한 가뭄의 평균기간, 물 부족, 절단수준 등의 특성을 도입하여 가뭄을 정의하였으며, Wilhite and

Glantz(1985)는 가뭄을 수문, 기상, 농업, 사회적인 가뭄으로 분류하였다. 이러한 가뭄의 정의와 분류는 가뭄에 접근하는 관점에 따라 달라진다. 가뭄은 정확하게 예측하기 불가능한 현상이기 때문에 주로 가뭄의 확률적 거동을 파악함으로써 가뭄의 특성 및 재현특성을 정량화할 수 있다. 따라서 Run 이론과 여러 확률모형들은 가뭄을 모의하고 분석하는데 많이 이용되고 있다(Sen 1976, 1980; Dracup et al., 1980a, 1980b; Fernandez and Salas 1999a, 1999b; Shiau and Shen 2001). Dracup et al.(1980a, 1980b)은 Run이론을 이용하여 가뭄의 지속기간과 심도를 산정하고 분석하였으며, Fernandez and Salas(1999a,1999b)는 서로 다른 수문학적 사상을 이용하여 재현기간을 정의하고 수문학적 사상의 발생에 연관된 가뭄, 홍수 등을 이용하여 재현기간과 수공구조물의 위험성을 산정하였다. 우리나라에서는 유철상 등(2003)이 포아송 과정(Poisson process)을 이용하여 가뭄의 재현 및 지속 특성을 설명한 바 있다.

최근들어 가뭄의 지속시간과 심도에 의한 2차원적인 확률거동을 파악하기 위해 2차원 빈도해석법이 제안되고 있다. 가뭄의 2차원적 확률거동을 해석하기 위해서는 가뭄의 주요 특성이 지속기간과 심도의 결합확률분포(Joint Probability Density Function)의 산정이 필요하다. Shiau and Shen(2001)은 이변수 감마분포(bivariate gamma distribution)를 이용하여 서로 다른 심도에 대하여 가뭄의 재현 간격을 산정하였으며, Kim et al.(2003, 2006)은 비모수 추정방법(nonparametric approach)을 이용하여 가뭄의 2차원적 재현기간(bivariate return period)을 산정한 바 있다. Yue(1999)와 Yue et al.(2001)은 유량 등을 이용하여 수문학적 홍수의 2차원적 해석을 하였다. 이러한 2변수 확률분포를 이용한 해석에는 충분한 관측자료가 필요하게 된다. Gonzalez and Valdes(2003)는 나이테 자료(tree-ring reconstructions)를 이용하여 자료의 길이를 확장하여 2변수 가뭄 해석을 수행한 바 있다.

본 연구에서는 서울지역의 2차원적 가뭄평가를 위하

여 측우기 자료(1770년~1907년)를 이용하여 월강수량의 관측기간을 조선말까지 확장하였다. 측우기 자료는 Wada(1917)에 의해 조선고대관측기록조사보고(朝鮮古代觀測記錄調查報告)에서 근대 도량체계로 환산되어 수록되었으며, 정현숙(1993)이 서울 지방 강수 특성에 근거한 측우기 자료의 신뢰성을 분석하였고, Yoo (2006)은 측우기 자료를 이용하여 서울 지점의 장기 가뭄 특성을 살펴본 바 있다.

본 연구에서는 먼저 서울지점의 월강수량 자료(1770년~2003년)에 대하여 3개월-SPI(3month SPI)를 구축하고 이를 이용하여 가뭄의 지속기간과 심도를 산정하였다. 산정된 가뭄의 특성을 이용하여 결합확률밀도함수를 추정하여 재현기간을 산정하였다. 가뭄의 재현특성이 기존의 단일 변수 해석을 이용하여 가뭄에 적용하였을 경우와 가뭄의 특성 중 2가지(예, 심도와 지속기간)를 동시에 고려하여 산정한 경우가 상이하게 나타나는 경우가 있다 (Kim et al., 2006). 이는 하나의 가뭄특성이 가뭄의 재현특성을 표현하는데 적절하지 않음을 보여준다. 또한, 가뭄의 지속기간만을 고려한 재현기간과 본 연구에서 산정된 2변수 가뭄 재현기간을 서로 비교하였다. 이러한 방법을 통하여 가뭄사상의 대표 재현특성을 추정할 수 있고, 이는 가뭄과 관련된 정책결정에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

## 2. 강수자료

가뭄은 일정기간 지속되는 특성을 지니고 있다. 이러

한 특성 때문에 일정 관측기간 동안 제한된 가뭄사상을 가지게 된다. 서울지점은 강수의 근대 관측 기간이 약 100년 정도(1907년~2003년)이다. 보통 100년 정도의 관측자료에서 약 50여 개의 가뭄사상이 나타나게 된다 (Kim et al., 2006). 서울지점은 강수의 근대 관측 기간(약 100년 정도, 1907년~2003년) 동안 약 40~50개 정도의 가뭄사상이 관측되고 있다. 이러한 적은 수의 가뭄사상으로부터 추출된 가뭄특성자료만으로는 신뢰성있는 가뭄해석에 한계가 있다. 본 연구에서는 약 1770년~1907년까지 기록된 측우기 자료를 이용하여 관측자료를 확장하였고, 이를 이용하여 보다 많은 가뭄특성자료를 확보하였다. 1770년부터 1907년까지의 고대 측우기 관측 자료는 ‘조선고대관측기록조사보고(朝鮮古代觀測記錄調查報告)’ (Wada, 1917)에 수록되어 있는 第1表(雨量)에 있는 자료를 그대로 인용하였다. 第1表(雨量)는 조선시대 측우기 관측에 의한 강수량자료를 근대 단위체계로 환산을 실시한 후 정리해 둔 월강수량 자료이다. 1908년 이후는 근대 일반 우량계 관측자료이다.

정현숙(1999)의 연구에 의하면 측우기를 이용한 기록은 겨울철 강설에 의한 관측과 약 2mm이하의 강수량은 측우기의 측정 방법과 측정 단위에 의하여 제외되거나 과소 측정되었다고 보고 있다. 이것을 연강수량으로 보면 약 75~80mm정도가 되고, 이는 측우기 관측 기록과 근대 관측 기록사이의 연평균 강수량의 차이로 나타난다 (Table 1). 또한, 근대 관측 기록 중에서 한국전쟁기간(1950년~1953년)의 관측도 제외되었다.

Table 1. Basic Statistics of Monthly Rainfall in Seoul (unit: mm)

Month	Data Period					
	1770-2003		1770-1907		1908-2003	
	Mean	Standard Deviation	Mean	Standard Deviation	Mean	Standard Deviation
1	12.6	17.8	5.6	10.8	23	20.9
2	17.9	21.5	9.1	18.6	23.3	22.8
3	38.6	39.5	34	40.1	24.3	37.8
4	73.2	50.3	69.2	44.2	79.2	57.8
5	85	54.1	82	54.5	89.6	53.5
6	133	99	126	91.3	142	109
7	356	209	346.6	215	369	199
8	274	179	265	162	286	201
9	133	112	126	114	144	108
10	46.8	38.4	46	39.6	48.2	36.7
11	39.4	28.6	35	26.8	45.5	30.1
12	19.3	19.7	15	19.1	25.5	19.1

### 3. SPI(3month) 산정

SPI지수는 Mckee et al.(1993)이 가뭄이 물 부족을 유발하는 강수량의 감소에 의한 것에 착안하여 가뭄을 모니터하고 정의하기 위하여 개발하였다. SPI는 계산 시간 단위를 1, 3, 6, 12, 24, 48개월 등과 같이 설정하고 시간 단위 별로 강수 부족량을 측정하여 개개의 강수량이 가뭄에 미치는 영향을 산정하는 것이다.

SPI의 구축 절차는 다음과 같다. 먼저 서울 지점 월 강수량 자료를 이용하여 이동평균  $i$ 개월( $i=3, 6, 12, 24, 48$ 개월)의 강수 시계열을 작성한다. 다음으로 이렇게 작성된 자료에 대하여 적정 확률분포형을 선정한다. 각 월에 필요한 매개변수를 계산하여, 각 월의 확률분포함수를 결정하고 누가확률을 산정한다. 누가확률값과 표준정규분포의 누가확률값이 같아지는 값을 찾아 표준정규분포의 변수값을 읽으면 그 값이 지속기간  $i$ 개월에 해당하는 SPI가 되는 것이다.

Edwards et al.(1997)은 SPI를 산정하기 위하여 기후적 강수의 시계열 분포에 잘 맞는 감마분포형을 이용하였으며, 유원희(2002)는 3변수 감마분포(Pearson Type-III) 외에 2변수 감마, 3변수 대수정규분포, Generalized Extreme Value, Generalized Logistic 등 4개의 분포형을 강수, 유출량 자료에 적용시켜 SPI를 산정한 결과 가뭄의 경향은 거의 비슷한 결과를 얻었다. 본 연구에서는 적정 확률분포형을 감마분포형으로 선정하였다.

2변수 감마분포는 2개의 매개변수를 가지고 있으며, 분포의 형태와 수학적 특성이 잘 알려져 수문분야에서 광범위하게 쓰이는 분포이다. 이 분포 모형은 연최대홍수량, 갈수량 및 극대강수량 등의 확률분포를 나타내는데 사용되고 있다. 감마분포의 확률밀도함수 및 누가확률분포함수는 다음과 같이 정의된다.

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right) \text{ for } x > 0 \quad (1)$$

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx \quad (2)$$

$$= \frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} \exp\left(-\frac{x}{\hat{\beta}}\right) dx$$

여기서  $\alpha$ 는 현상매개변수(shape parameter),  $\beta$ 는 규모매개변수(scale parameter),  $\Gamma(\alpha)$ 는 감마함수(gamma function)이다. 각 매개변수는 모멘트법, 확률가중모멘트법과 최우도법 등을 이용하여 추정할 수 있으며, 본 연구에서는 최우도법을 이용하여 매개변수를 추정하였다. K-S검정을 통하여 적합도 검정을 실시한 결과 감마분포를 사용하는데 문제가 없음을 확인하였다.

Mckee et al.(1993)은 SPI가 0의 아래 위로 자주 변하는 3 혹은 6개월을 가뭄의 단기 특성을 표현하고, 그 변화가 작은 12, 24, 48개월은 가뭄의 장기 특성을 나타낸다고 분류하였다. 본 연구에서는 3개월의 표준강수지수(3month SPI)를 구축하여 가뭄 재현기간 및 특성을 분석하였다. 지속기간 3개월 SPI를 선택한 이유는 우리나라 가뭄 현상이 3개월 정도의 단기 강수 부족에 의하여 주로 발생하고 있다고 판단하였기 때문이다. Fig. 1은 산정된 SPI(3month)를 보여주며, Table 2는 Mckee et al.(1993)에 의해 제안된 SPI로부터 얻은 가뭄 심도를 정의하기 위한 분류 체계를 보여준다.

### 4. 가뭄의 정의

가뭄은 일반적으로 서서히 찾아오는 현상으로 홍수와 달리 가뭄의 시작과 끝을 정의하기가 매우 어렵다.

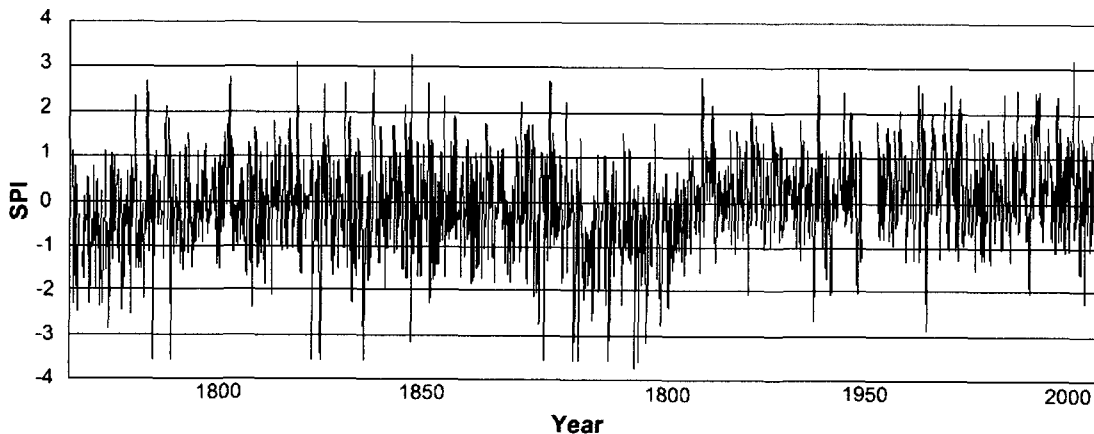


Fig. 1. Standardized Precipitation Index of Seoul (3month-SPI, 1770-2003, 2800months)

Table 2. SPI and Moisture Categories

SPI Values	Drought Category
$\geq 2.00$	Extreme wet
1.99 to 1.50	Severe wet
1.49 to 1.00	Moderate wet
0.99 to -0.99	Normal condition
-1.00 to -1.49	Moderate drought
-1.50 to -1.99	Severe drought
$\leq -2.00$	extreme drought

가뭄을 적절하게 정의하는데 어려움을 주는 요인으로서는 가뭄특성인자들이 수문시스템에 동시에 영향을 미치지 않는다는 점이다. 또한, 가뭄은 절대적인 상태가 아니고 오히려 상대적인 물의 부족이라는데 있기 때문이다(이재수, 2006).

본 연구에서는 가뭄의 크기를 SPI를 이용하여 정량화하였다. Mckee et al. (1993)은 Table 2에서 제안한 것과 같이 SPI의 -1이하를 가뭄으로 분류하였다. Yevjevich(1967)에 의해 제안된 Run이론을 이용하여 Fig. 2와 같이 SPI의 -1 이하의 연속된 기간을 가뭄으로 정의하였다. 이러한 각각의 가뭄사상을 통하여 가뭄의 두가지 주요 특성인 지속기간(duration)과 심도(severity)를 구할 수 있다. 가뭄의 지속기간은 절단수준인 -1이하의 SPI가 지속된 기간을 의미하며, 심도는 가뭄사건에 대하여 -1이하의 크기를 더한 면적이 된다.

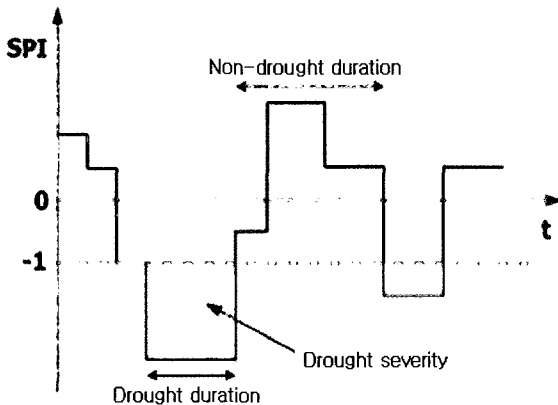


Fig. 2. Concept and Definition of Drought

가뭄의 지속기간과 심도는 각 가뭄사상마다 나타나 는 임의의 특성이다. 그러므로 확률분포를 이용하여 나타낼 수 있다. 일반적으로 관측된 가뭄 지속기간과 심도를 각각 분리하여 분포시켜 가뭄의 특성을 얻어낸다 (Sen, 1976; Mathier et al., 1992). 이러한 경우 가뭄의 지속기간과 특성의 상호관계를 명백히 알아 낼 수 없다. 가뭄의 지속기간과 심도의 상호관계를 알기 위해서

는 두 특성을 결합하여 가뭄 특성에 접근할 필요가 있다. 가뭄 지속기간과 심도의 결합확률밀도함수(joint probability density function)는 가뭄 지속기간의 주변 분포(marginal distribution)와 가뭄 지속기간이 주어졌을 때 가뭄심도의 조건부 분포(conditional distribution)의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$f_{D,S}(d,s) = f_D(d) \cdot f_{S|D=d}(s) \quad (3)$$

여기서, D와 d는 가뭄 지속기간, S와 s는 가뭄 심도,  $f_{D,S}(d,s)$ 는 지속기간과 심도가 주어졌을 때 결합밀도함수,  $f_{S|D=d}(s)$ 는 특정 지속기간(d)이 주어졌을 때 가뭄 심도의 조건부 분포이고  $f_D(d)$ 는 가뭄지속기간분포이다.

### 5. 가뭄의 재현기간

각종 목적을 위한 수자원시스템은 정확한 발생기간을 예측할 수 없는 특정 크기의 장래 수문사상에 대하여 계획되고 설계되는 것이 보통이다. 따라서, 수문학적 분석을 통해 수문량이 어떤 특정값을 초과할 확률(exceedance probability)을 추정하여 발생양상을 분석한다. 빈도해석은 홍수 혹은 가뭄의 발생빈도를 확률론적으로 예측하는 방법으로 어떤 수문 사상이 발생하는 원인과 과정 등에 관해서는 전혀 상관하지 않고 오직 어떤 크기를 가진 사상이 발생할 확률을 결정한다(윤용남, 2004).

어느 관측된 사건의 재현기간은 그것의 초과확률( $P(X > x_T)$ )의 역수에 해당한다.

$$T = \frac{1}{P(X > x_T)} = \frac{1}{1 - P(X \leq x_T)} \quad (4)$$

여기서,  $x_T$ 는 재현기간 T를 갖는 사건의 크기이며, 확률변수 X는 Fig. 2에서 정의되어 있는 가뭄의 지속기간 혹은 심도의 한 특성이다.

Gonzalez and Valdes(2003)은 가뭄의 재현 간격과 Run이론을 통하여 가뭄기간을 이차원으로 산정하였다. 가뭄과 습윤이 교대로 연속적으로 발생한다고 가정하면 가뭄의 발생 시간 간격(L)은 가뭄지속기간(D)과 습윤지속기간(W)으로 나타낼 수 있다.

$$L = D + W \quad (5)$$

가뭄은 일반적으로 가뭄의 지속기간과 심도를 이용하여 분석한다. 가뭄의 결합누가확률함수(joint cumulative distribution function, jcdf)는 가뭄의 지속기간과 심도를 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_{D,s}(d,s) = P(D \leq d \cap S \leq s) \quad (6)$$

모든 가뭄(drought set,  $D(d,s)$ )은 가뭄 지속기간(d)과 심도(s)가 임계 지속기간과 심도보다 커야만 한다. 모든 가뭄으로부터 각각의 가뭄으로 구분하면 그 발생 시간을 알 수 있다. 그러므로 발생한 가뭄의 이변수 재현간격(bivariate recurrence interval,  $T_{d,s}$ )는 발생한 가뭄의 발생 시간 간격의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{d,s} = L_{D > d \cup S > s} + \sum_{i=1}^{N_{d,s}-1} L_{d \leq d \cap S \leq s} \quad (7)$$

여기서  $L_{D > d \cup S > s} = D_{D > d \cup S > s} + W$ ,  $L_{d \leq d \cap S \leq s} = D_{d \leq d \cap S \leq s} + W$ 이고,  $N_{d,s}$ 는 임계 지속기간과 심도보다 큰 가뭄의 발생 개수이다. Shiau and Sen(2001)과 Gonzalez and Valdes(2003)에 의하면  $T_{d,s}$ 의 기댓값이 가뭄의 재현기간을 의미하며, Eq. (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$E(T_{d,s}) = E(N_{d,s}) [E(D) + E(W)] \quad (8)$$

각각의 가뭄이 독립적이라는 가정아래 다음 가뭄이 발생하는 횟수( $N_{d,s}$ )는 기하분포를 이루고 기댓값은  $E(N_{d,s}) = \frac{1}{P(D > d \cup S > s)}$  이다. 따라서, 가뭄의 재현기간은 Eq. (9)와 같다.

$$\begin{aligned} E(T_{d,s}) &= E(N_{d,s}) [E(D) + E(W)] \\ &= \frac{E(D) + E(W)}{P(D > d \cup S > s)} = \frac{E(D) + E(W)}{1 - P(D \leq d \cap S \leq s)} \\ &= \frac{E(D) + E(W)}{1 - F_{D,s}(d,s)} \end{aligned} \quad (9)$$

## 6. 가뭄의 확률분포 선정

본 연구에서는 근대 기상자료와 측우기 자료를 합한 약 234년의 강수 자료를 이용하여 SPI를 작성하였다. Mckee et al.(1993)이 제안한 SPI의 -1이하를 가뭄으로 정의하고 가뭄 발생 사상을 관찰하였다. 가뭄사상으로부터 지속기간과 심도의 상관계수를 구해본 결과  $\rho_{D,S} = 0.74$ 이었다.

가뭄의 분포는 Run이론을 이용하여 이론적으로 유도할 수가 있다(Yevjevich 1976; Mathier et al., 1992). Run이론을 이용하여 시간 t에 대하여 SPI값을 가뭄(절단수준 아래)과 가뭄 상태가 아닌 습윤(절단수준 위)의 두가지 상태로 나눌 수 있다. 만약 시간 t의 가뭄이 이전 가뭄 t-1에 대하여 시간 의존적이라면 지체-1 Markov모형을 이용하여 상태전환확률(state transition probability)로 나타낼 수 있다. 상태전환확률은 전환확률행렬(transition probability matrix) P로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$P_{DD} = P(\text{SPI}_{t+1} \leq -1 | \text{SPI}_t \leq -1) \quad (10a)$$

$$P_{DW} = P(\text{SPI}_{t+1} > -1 | \text{SPI}_t \leq -1) \quad (10b)$$

$$P_{WD} = P(\text{SPI}_{t+1} \leq -1 | \text{SPI}_t > -1) \quad (10c)$$

$$P_{WW} = P(\text{SPI}_{t+1} > -1 | \text{SPI}_t > -1) \quad (10d)$$

상태전환확률의 합은 1.0이 되어야 하므로  $P_{DD} + P_{DW} = 1$  와  $P_{WW} + P_{WD} = 1$  가 된다. 그러므로 가뭄과 습윤의 지속기간 분포는 다음과 같다.

$$f_D(d) = P_{DW} \cdot P_{DD}^{d-1}; \quad d = 1, 2, 3, \dots \quad (11a)$$

$$f_W(w) = P_{WD} \cdot P_{WW}^{w-1}; \quad w = 1, 2, 3, \dots \quad (11b)$$

D와 W의 기댓값은 각각  $\frac{1}{P_{DW}}$  와  $\frac{1}{P_{WD}}$  와 같으므로 (Gonzalez and Valdes, 2003), Eq. (9)는 다음과 같아진다.

$$E(T_{d,s}) = \frac{\frac{1}{P_{DW}} + \frac{1}{P_{WD}}}{1 - F_{D,s}(d,s)} \quad (12)$$

그러므로 가뭄의 이변수 재현기간은 결합누가확률함수와 상대전환확률의 함수로 표현된다. 그러나 아직까지 이변수 결합누가확률함수의 해석적 해는 존재하지 않고, 이변수 결합확률밀도함수로부터 수치적 적분을 통해 추정할 수 있다. 가뭄의 지속시간과 심도의 결합확률밀도함수는 가뭄의 지속시간이 주어졌을 때 가뭄 심도의 조건부분포(감마분포)를 이용하여(Eqs. (3) and (13)) Eq. (14)와 같이 추정할 수 있다.

$$f_{s|D}(s) = \frac{s^{\alpha_d-1}}{\beta_d^{\alpha_d} \Gamma(\alpha_d)} e^{-s/\beta_d}; \quad s > 0 \quad (13)$$

$$f_{D,s}(d,s) = \frac{s^{\alpha_d-1} e^{-s/\beta_d}}{\beta_d^{\alpha_d} \Gamma(\alpha_d)} \cdot P_{DW} \cdot P_{DD}^{d-1}; \quad (14)$$

$s > 0$  and  $d = 1, 2, \dots$

Fig. 3은 Eq. (14)를 이용하여 추정한 서울지역 가뭄의 지속시간과 심도의 결합확률밀도를 보여주고 있다. Fig. 4는 가뭄의 특정 지속시간에 대하여 가뭄 심도의 누가확률을 도식적으로 보여주고 있다. Fig. 5는 상대전환확률(Eq. (10))과 결합누가확률(Fig. 4)을 이용하여 추정한 가뭄의 이변수 재현기간을 도식적으로 보여주고 있다.

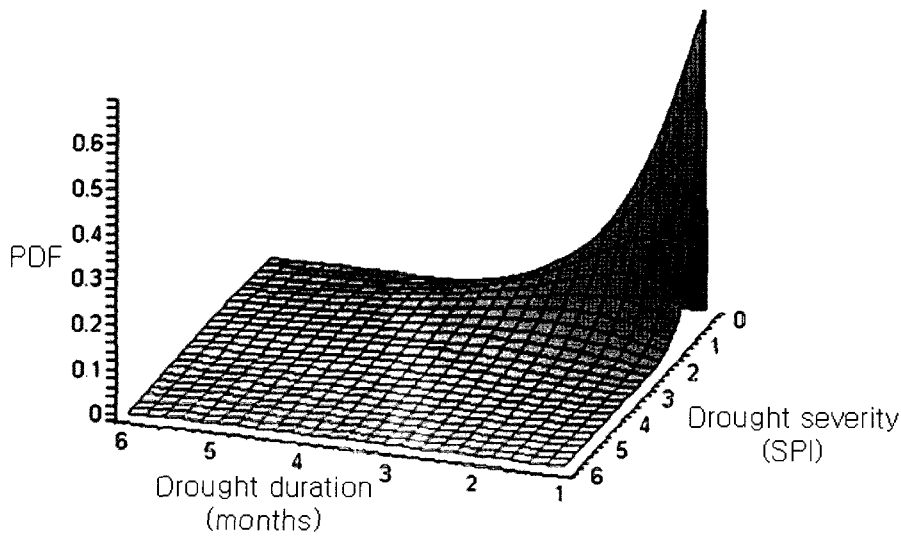


Fig. 3. Joint Probability Density Function of Drought Duration and Severity

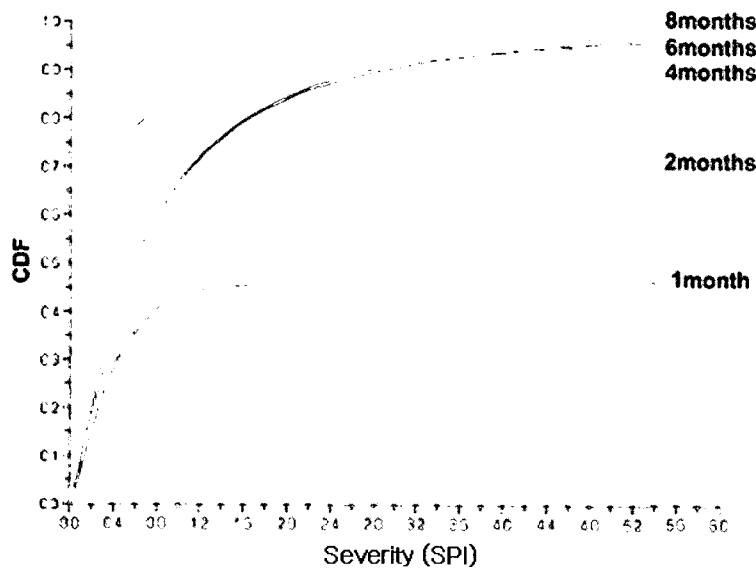


Fig. 4. Joint Cumulative Density Function of Drought Duration and Severity

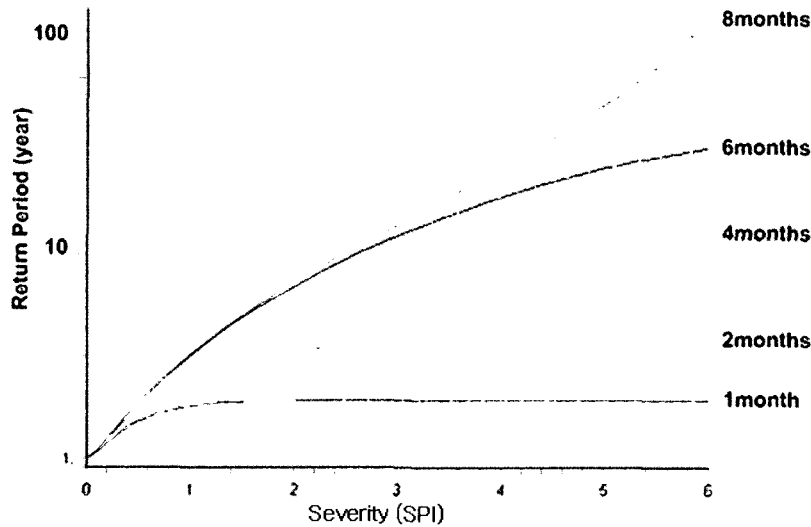


Fig. 5. Bivariate Return Period of Drought Duration and Severity

Table 3. Comparison of Univariate Return Period and Bivariate Return Period Estimated from Data

Drought	Duration (months)	Severities	$T_{D,s}$ (years)	$T_D$ (years)	$T_s$ (years)
1777년	8	4.9	77	67	25
1836년 ~ 1837년	7	8.1	61	33	101
1943년 ~ 1944년	7	2.6	41	33	9
1901년	6	8.3	39	28	202
2000년	4	0.5	7	7	2

## 7. 토의 및 결론

본 연구에서는 전체강우기간(1770년~2003년) 동안 대표적인 가뭄사상의 지속시간과 심도, 그리고 여러가지 재현기간을 비교하여 Table 3에 정리하였다.  $T_{D,s}$ 는 이변수 해석을 통한 재현기간이며,  $T_D$ 와  $T_s$ 는 각각 지속시간과 심도만을 확률변수로 한 단일변수 해석을 통한 재현기간이다. 같은 지속시간을 갖고 있어도 가뭄 심도에 따라 재현기간이 크게 차이가 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, 단일변수와 이변수 해석방법은 명백하게 다른 재현기간이 산정되는 것을 볼 수 있다. 지속기간과 심도의 단일 변수 재현기간을 살펴보면 같은 가뭄 사건에 대하여 서로 다른 재현 기간이 산정됨을 볼 수 있다. 재현기간의 결과에서 비교해 본 결과 지속기간과 심도를 결합하여 산정한 재현기간이 가뭄의 일관된 특성을 잘 설명하고 있음을 파악할 수 있다.

본 연구의 목적은 여러가지 가뭄 특성의 상호 관계를 고려하여 가뭄의 특성을 정량화하는데 있다. 가뭄 관리에 중요한 인자인 가뭄 심도와 지속기간과의 관계를 이변수 감마확률분포를 이용하여 그 재현 특성을 살

펴보았다. 이러한 이변수 분포의 목적은 서로 다른 가뭄 사상의 빈도해석에 있어서 일관적인 가뭄의 정보를 제공하는 것이다. 가뭄의 심도와 지속기간은 가뭄의 정책을 결정하는데 중요한 인자이다. 본 연구결과는 명백한 상호관계를 가지고 있는 가뭄 지속시간과 심도를 함께 고려하여 해석함으로써 일관적이고 정량화된 가뭄정보를 제공할 수 있고, 이러한 가뭄정보는 수자원 정책 결정자에게 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

## 참고 문헌

- 유원희 (2002). 유출량 계열을 이용한 가뭄 지수 산정. 석사학위논문, 인하대학교.
- 유철상, 류재희 (2003). "서울지점 가뭄의 재현 및 지속 특성 분석." 한국수자원학회논문집, 제36권 제4호, 한국수자원학회, pp. 561-573.
- 윤용남 (2004). 공업수문학. 청문각.
- 이재수(2006). 수문학. 구미서관.
- 정현숙 (1993). 서울지역 강수 특성에 근거한 측우기 자료의 신뢰성, 석사학위논문, 서울대학교.



- Edwards, D.C. and Mckee, T.B. (1997). Characteristics of 20th century drought in the united states at multiple time scales. *Climatology Report No. 97-2*.
- Fernandez, B., and Salas, J.D. (1999a). "Return period and risk of hydrologic events. I: Mathematical formulation." *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*, 4(4), pp. 297-307.
- Fernandez, B., and Salas, J.D. (1999b). "Return period and risk of hydrologic events. II: applications." *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*, 4(4), pp. 308-316.
- Dracup, J.A., Lee, K.S., and Paulson, E.G. (1980a). "On the statistical characteristics of drought events." *Water Resources Research*, 16(2), pp. 289-296.
- Dracup, J.A., Lee, K.S., and Paulson, E.G. (1980b). "On the definition of droughts." *Water Resources Research*, 16(2), pp. 297-302.
- Gonzalez, J., and Valdes, J.B. (2003). "Bivariate drought recurrence analysis using tree rings reconstructions." *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*, 8(5), pp. 247-258.
- Guttman, N.B. (1999). "Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm." *Journal of the American Water Resources.*, 35(2), pp. 311-322.
- Kim, T., Valdes, J.B., and Yoo, C. (2003). "A nonparametric approach for estimation return periods of droughts in arid regions." *Journal of hydrologic Engineering*, 8(5), pp. 237-246.
- Kim, T., Valdes, J.B., and Yoo, C. (2006). "Nonparametric approach for bivariate drought characterization using Palmer drought index." *Journal of hydrologic Engineering*, 11(2), pp. 134-143.
- Mathier, L., Perreault, L., Bobe, B., and Ashkar, F. (1992). "The use of Geometric and Gamma-related distribution for frequency analysis of water deficit." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 6(4), pp. 239-254.
- Mckee, T.B., Doesken, N.J., and Klest J. (1993). "The relationship of drought frequency and Duration of Time scales." 8th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Jan 17-23, 1993, Anaheim, CA, 179-184.
- Sen, Z. (1976). "Wet and dry periods of annual flow series." *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 102(10), pp. 1503-1514.
- Sen, Z. (1980). "Statistical analysis of hydrologic critical droughts." *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 106(1), pp. 99-115.
- Shiau, J.-T., and Shen, H.W. (2001). "Recurrence analysis of hydrologic droughts of differing severity." *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 127(1), pp. 30-40.
- Wada, Y. (1917). 朝鮮古代觀測記錄調查報告, 朝鮮總督府觀測所, pp. 200.
- White, D.A., and Glantz, M.H. (1985). "Understanding the drought phenomenon: the role of definitions." *Water International*, 10(3), pp. 111-120.
- Yevjevich, V.M. (1967). "An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts." hydrologic paper 23, Colorado State Univ., Fort Collins, CO.
- Yoo, C. (2006). "Long term analysis of wet and dry year in Seoul, Korea" *Journal of Hydrology*, 318, pp. 24-36 .
- Yue, S. (1999). "Applying bivariate normal distribution to flood frequency analysis." *Water International*, 24(3), pp. 248-254.
- Yue, S., Quarda, T.B.M.J., and Bobee, B. (2001). "A review of bivariate gamma distributions for hydrological application." *Journal of Hydrology*, Vol. 246, pp. 1-18.

(논문번호:06-106/접수:2006.11.01/심사완료:2007.04.02)