

표준강수지수 시계열의 가뭄특성치를 이용한 가뭄 재현기간 산정

Return Period Estimation of Droughts Using Drought Variables from Standardized Precipitation Index

곽재원* / 이성대** / 김연수*** / 김형수****

Kwak, Jae Won / Lee, Sung Dae / Kim, Yon Soo / Kim, Hung Soo

Abstract

Drought is one of the severe natural disasters and it can profoundly affect our society and ecosystem. Also, it is a very important variable for water resources planning and management. Therefore, the drought is analyzed in this study to understand the drought distribution and trend. The Standard Precipitation Index (SPI) is estimated using precipitation data obtained from 55 rain gauge stations in South Korea and the SPI based drought variables such as drought duration and drought severity were defined. Drought occurrence and joint probabilistic analysis for SPI based drought variables were performed with run theory and copula functions. And then the return period and spatial distribution of droughts on the South Korea was estimated. As the results, we have shown that Gongju and Chungju in Chungcheong-do and Wonju, Inje, Jeongseon, Taebeak in Gangwon-do have vulnerability to droughts.

Keywords : drought, SPI index, joint probability, copula theory

요 지

가뭄은 중요한 자연재해의 하나로서 수자원 관리 부분에서 매우 중요한 인자이다. 본 연구에서는 대한민국의 55개 기상청 관측소를 대상으로 SPI지수에 따른 가뭄기간과 가뭄심도를 정의하고, 코플라 이론을 이용하여 두 가뭄변수의 결합 확률 분포를 유도하였다. 또한 이를 이용하여 가뭄의 발생 양상을 고찰하고 가뭄의 재현기간으로 제시하였으며, 대한민국을 대상으로 가뭄의 공간적 분포를 분석하였다. 연구에서 도출된 가뭄의 재현기간별 SPI 지수로부터 대한민국의 충청도의 공주 및 충주 인근, 강원도의 원주, 인제, 정선, 태백 등의 지역이 상대적으로 가뭄에 취약한 것으로 도출되었다.

핵심용어 : 가뭄, SPI지수, 결합확률분포, 코플라 이론

1. 서 론

가뭄은 홍수와 더불어 주요한 자연재해의 하나로서 자

연환경과 사회경제적으로 큰 부담을 주고 있다. 그러나 홍수가 수문·기상학적 측면에서 정량화 연구가 활발하게 진행되고 있는 것에 비하면, 가뭄은 그 피해의 심각성이

*인하대학교 사회기반시스템공학부 토목공학과 연구교수 (e-mail: firstsword@naver.com)

Research Professor, Dept. of Civil Engineering, Inha University, Incheon 402-571, Korea

**교신저자, 한라대학교 토목공학과 정교수 (e-mail: sdlee@halla.ac.kr, Tel: 82-33-760-1264)

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil Engineering, Halla University, Wonju 220-712, Korea

***인하대학교 사회기반시스템공학부 토목공학과 박사과정 (e-mail: civil.engineer@hanmail.net)

Ph.D Candidate, Dept. of Civil Engineering, Inha University, Incheon 402-571, Korea

****인하대학교 사회기반시스템공학부 토목공학과 정교수 (e-mail: sookim@inha.ac.kr)

Professor, Dept. of Civil Engineering, Inha University, Incheon 402-571, Korea

나 중요성에 비해 상대적으로 연구 정도가 낮은 것으로 보인다. 기존의 가뭄 분석은 가뭄의 발생확률, 지속특성, 평균심도(또는 최대심도)와 같은 여러 특성치에 대한 일관된 정량화를 위한 연구가 대다수를 이루고 있다. 가뭄의 여러 특성에 대한 해석은 주로 연속이론(Yevjevich, 1967)을 바탕으로 한 가뭄의 특성치 평가나 확률론을 결합한 해석을 수행하여 왔다. 또한, 기상학적인 측면에서 PDSI (Palmer Drought Severity Index, 팔머가뭄지수)(Palmer, 1968)나 SPI (Standardized Precipitation Index, 표준강수지수)(McKee, 1995) 등의 연구를 통하여 가뭄의 특성을 정량적으로 판단하기 위한 연구가 수행되어 왔다.

기존의 연구에서는 가뭄의 특성을 시계열 분석하여 그 특성을 조사하거나(Chang and Kleopa, 1991; Mishra et al., 2007), Guttman (1999)과 같이 SPI와 PDSI를 이용하여 미국전역을 대상으로 스펙트럼 분석을 수행해 적용성을 고찰하기도 하였다. 가뭄의 거동 측면에서도 Kim et al. (2006)은 가뭄의 시공간적 분포 특성을 가뭄심도-가뭄면적-가뭄지속기간 곡선으로 도출한 바 있고, Yeon et al. (2007)은 서울 지역에 대한 이차원 가뭄빈도 해석을 수행한 바 있으며, Yoo et al. (2010)은 군집분석을 이용하여 우리나라 가뭄특성의 공간적 특성 분석을 수행하였다. 또한 Choi et al. (2011)은 가뭄의 빈도별로 농업용수 공급능력을 분석하였고, Lee et al. (2011, 2012)은 가뭄의 빈도해석과 경향성에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 이러한 연구를 통하여 도출된 가뭄의 특성 변수는 상호 복합적으로 작용하고 있으며, 전통적인 확률론에 기반한 빈도해석 방법론으로는 종속성에 대한 고려가 어려운 것이 사실이다. 이를 보완하기 위하여 Nadarajah (2007)가 이변수 Gamma 분포를 가뭄사상에 적용하여 결합확률 분포를 고찰하는 등 여러 보완연구(Bonaccorso et al., 2003; Gonzalez and Valdes, 2003; Kim et al., 2006a, 2006b; Kyoung et al., 2007)가 이루어진 바 있으나, 가뭄의 여러 상이한 특성치를 모두 Gamma 분포로 가정한 단점이 있다. 기존의 많은 연구에서 가뭄의 지속기간과 가뭄의 심도가 각기 다른 분포형에 적합하다는 연구 결과(Shiau 2003, 2006; Wong et al., 2008)가 다수 있었다는 점을 고려하면, 이러한 여러 특성치를 단일 분포형으로 고려하기에는 문제점이 있는 것으로 보여진다. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위해 서로 상이한 한계 분포를 결합하는 코플라 함수(copula function)를 이용하여 가뭄의 결합확률분포를 산정하는 방법이 Shiau et al. (2006; 2007)에 의해 제시되면서 활발하게 적용되고 있다. 최근에는 기상학적 변수에 대하여 3개 이상의 변수에 대한 결합확률을 적용하는 연구(Kao and

Govindaraju, 2008; Wong et al., 2009)나 코플라 함수에 대한 적용성 연구(Lee et al., 2012)도 시도되고 있다.

이에 대하여, 본 연구에서는 기상청 산하의 55개 관측소에 대하여 SPI지수를 산정하고 이에 연속이론을 적용하여 가뭄을 정의한 후, 가뭄의 중요한 확률 변수인 지속기간과 심도를 코플라 함수를 적용하여 결합확률 분포로서 유도한다. 이를 기반으로 가뭄의 지속기간에 따른 재현기간을 정의하고, 대한민국을 대상으로 공간 분포하여 대한민국에서 발생하는 가뭄에 대한 경향성과 그 재현기간의 특성을 고찰하고자 한다.

2. 적용 이론

2.1 가뭄의 정의

2.1.1 SPI 지수

가뭄의 정의에는 여러 가지 관점이 있으나 일반적으로 강수량의 부족 및 이로 인하여 발생하는 환경적, 사회적, 경제적인 현상을 나타낸다. 다양한 개념의 가뭄 정의를 위하여 가뭄 발생, 가뭄 종결, 가뭄 지속기간, 가뭄 심도, 가뭄 빈도 등의 여러 정량적인 판단 기준이 개발되었으며, 가뭄지수는 가뭄의 심도와 기간, 강도 등을 간편하게 정의할 수 있는 방법으로서 널리 사용되어 왔다. 일반적으로 사용되는 가뭄지수로는 SPI가 있다. SPI는 단위별로 누가 강수시계열에 적정 확률분포형을 도입하여 표준 정규분포에 적용하여(Fig. 1) 산정하며, McKee et al. (1993, 1995)에 의하여 개발되었다. SPI는 이론적으로는 한계값이 없으며, 값 자체에 발생빈도의 개념을 포함하고 있다(Ryoo and Yoo, 2004) 이러한 SPI지수는 이론적으로 값의 상한선은 없으나, 일반적으로 -1.0 이하일 경우 가뭄으로 간주하며, -1.5 이하는 심한 가뭄, -2.0 이하는 극심한 가뭄으로 간주된다(McKee et al., 1993).

2.1.2 연속이론

연속이론은 Yevjevich (1967)가 가뭄을 정의하고 가뭄의 변수(가뭄의 지속기간, 심도, 간격 등)를 산정하는 방법으로 제안하였다. Fig. 2에서 나타낸 것과 같이 가뭄은 수문기상학적 변수인 x_t 가 이미 결정되어진 절단 수준인 x_0 이하로 떨어지는 기간으로 정의될 수 있으며, 이때 가뭄을 정의하는 기준인 절단 수준 x_0 는 상수 또는 시간에 따른 함수로서 적용할 수 있다. 절단 수준을 기준으로 하여, 수문기상학 시계열이 절단 수준 이하로 내려간 시간을 가뭄의 지속기간(D_t)으로 정의하며, 가뭄의 지속기간

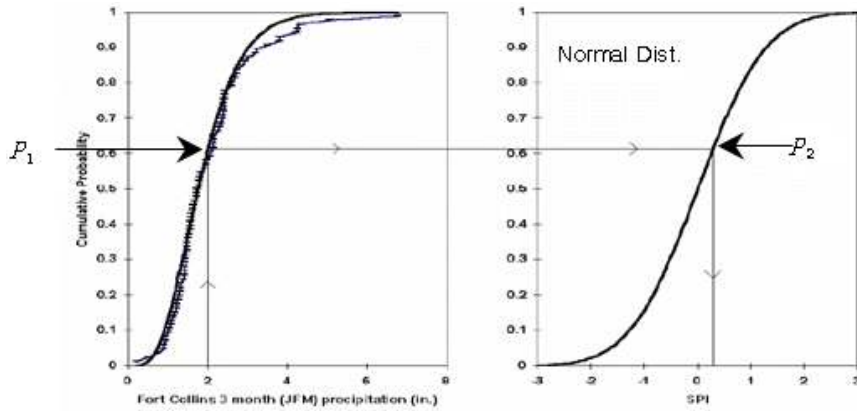


Fig. 1. Concept of SPI Estimation (Mckee et al., 1993)

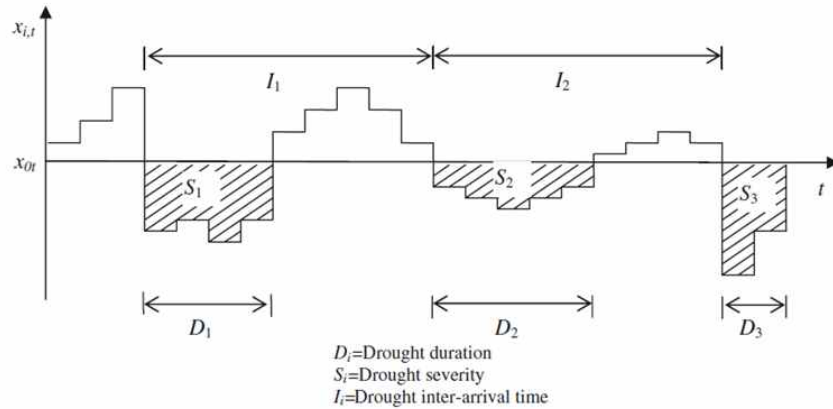


Fig. 2. Drought Characteristics using the Run Theory (Moye et al., 1988)

동안에 절단 수준 이하로 내려간 누적 부족량을 가뭄의 심도(S_i)로 정의한다. 또한 가뭄 발생시점 사이의 기간을 가뭄의 간격(I_i)으로 간주한다.

이러한 연속이론은 개념적인 적용의 간편함으로 인하여 여러 수문기상학적 시계열에 적용할 수 있다. 본 연구에서는 SPI지수를 연속적인 수문기상학적 시계열로 간주하여 연속이론을 적용하고 그에 따른 가뭄의 지속기간과 심도, 발생간격을 정의하였다.

2.2 코플라 이론

서로 종속적인 구조를 가진 확률 모형 모의는 종속적인 n 개의 결합확률분포로 단순화시킬 수 있으나(Michele and Salvadori, 2010), 이러한 결합확률의 모의는 상대적으로 난해한 것으로 받아들여져 왔다. 이에 대한 대안으로서 Sklar (1959)에 의해 제시된 코플라 함수를 적용하는 연구가 이루어지고 있다. 코플라 함수는 상관계수처럼 두 개 이상의 확률변수의 관계를 구조적으로 규명하는 방법으로서 종속성구조를 파악하는 데 유용하다.

확률분포 $F(x_1, \dots, x_n)$ 가 주변분포 $F_1(x_1), \dots, F_n(x_n)$ 을 가지는 n 차원 분포함수일 때, $F(x_1, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), \dots, F_n(x_n))$ 관계를 만족하는 코플라 함수 C 가 존재한다. 이때, $F_1(x_1), \dots, F_n(x_n)$ 이 연속인 경우에는 코플라 함수 C 는 $C(u_1, \dots, u_n) = F(F_1^{-1}(u_1), \dots, F_1^{-1}(u_n))$ 과 같이 나타낼 수 있다. 상기의 식을 x_1, \dots, x_n 에 대하여 편미분하면 다음과 같은 Eq. (1)을 얻을 수 있다.

$$f(x_1, \dots, x_n) = c(F_1(x_1), \dots, F_n(x_n)) \prod_{i=1}^n f_i(x_i) \quad (1a)$$

$$c(u_1, \dots, u_n) = \frac{f(F_1^{-1}(u_1), \dots, F_n^{-1}(u_n))}{\prod_{i=1}^n f_i(F_1^{-1}(u_i))} \quad (1b)$$

이를 이용하여 결합확률분포를 주변확률밀도함수와 코플라 함수를 통하여 구할 수 있다. 여러 코플라 함수 중에서도 본 연구에서는 적용상의 이점이 있는 Archimedean 코플라 함수를 이용하였으며, 그 중에서도 가뭄에 대한

적용이 널리 이루어진 Clayton 코풀라 함수를 이용하였다 (Kwak, 2012; Shiau, 2006; Shiau et al., 2007; Shiau and Modarres, 2009; Song and Singh, 2010; Zhang and Song, 2010). Clayton 코풀라 함수는 일반적으로 양의 상관관계를 가지는 확률 변수를 모의하는데 적합한 것으로 알려져 있으며, 낮은 수치의 사상이 빈발하는 수문 현상을 모의하는데도 적합한 것으로 연구되었다(Kwak et al., 2012a, 2012b, 2013). 가뭄의 결합확률을 모의하기 위한 Clayton 코풀라의 식은 Eq. (2)와 같이 표현된다.

$$C_{\theta}(u, v) = \max\left([F_d(u)^{-\theta} + F_s(v)^{-\theta} - 1]^{-\frac{1}{\theta}}, 0\right), \quad (2)$$

$$\theta \in (0, \infty)$$

$$\phi_{\theta}(t) = \frac{1}{\theta} (t^{-\theta} - 1) ; \phi_{\theta}\text{-generator function}$$

F_s ; 가뭄의 심도에 대한 단일 변량 누적확률밀도함수

F_d ; 가뭄의 지속기간에 대한 단일 변량 누적확률밀도함수

Clayton 코풀라의 매개변수를 결정하기 위한 방법으로, Canonical Maximum Likelihood Method (CML)를 사용하였다. CML 방법은 먼저 개별 자료를 Empirical marginal transformation을 이용하여 균일 분포로 변환시킨 후 개별 분포함수들의 모수를 이용하여 코풀라 모수를 추정하는 방법이다.

또한, 코풀라 함수를 이용한 결합확률 분포 추정을 위해서는 각각의 주변확률 분포형을 먼저 모의하여야 한다. 일반적으로 가뭄의 지속기간에 대해서는 Weibull 분포가 적합하게 모의하는 것으로 알려져 있으며 (Shiau 2003, 2006; Wong et al., 2008) 또한, Gamma 분포의 경우 가뭄의 심도를 적합하게 모의하고 있는 것으로 알려져 있다 (Shiau 2006). 본 연구에서는 가뭄의 지속기간을 모의하기 위하여 Weibull 분포를 (Eq. (3)), 가뭄의 심도를 모의하기 위하여 Gamma 분포형을 사용하였다 (Eq. (4)).

$$F_d(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\alpha^{\beta}} \quad (3)$$

$$F_s(x) = \frac{1}{\alpha^{\beta}\Gamma(\beta)} x^{\beta-1} e^{-(x/\alpha)} \quad (4)$$

여기서, α 는 분포의 규모에 대한 매개변수이며, β 는 분포의 형상에 대한 매개변수, x_0 는 위치에 대한 매개변수이다. 본 연구에서는 Kwak et al. (2012a, 2013)의 연구방법론과 동일하게 가뭄의 심도와 지속기간을 Gamma 및 Weibull 분포형으로 모의한 후, 이를 코풀라 이론을 이용하여 결합확률분포로 유도하였다. 가뭄에 대한 결합확률분포는

Kwak et al. (2012a)의 연구에서 도출된 바와 같이 코풀라를 이용한 결합확률분포를 적용하지 않을 경우 빈도 해석을 수행할 때 잘못된 결과를 도출할 수 있으므로 가뭄의 심도와 지속기간을 모두 고려하는 결합확률분포를 통하여 빈도 해석을 수행하여야 한다.

3. SPI를 이용한 가뭄사상의 재현기간 분석

3.1 가뭄사상 추출

본 연구에서는 가뭄이 미치는 잠재적인 영향 평가와 수자원관리를 위해서 전국의 기상청 산하 55개 관측소를 대상으로 SPI지수를 산정하였다. 이를 위하여 KMA (Korea Meteorological Administration, 한국기상청)의 1976년부터 2009년까지의 일 강수량을 월 단위로 합산하여 월 총강수량을 산정한 후, 월 강수량의 지속기간별 강수시계열에 적정 확률분포형을 적용하고, 개개 변량의 누가확률을 표준 정규분포에 적용시켰다. 지속기간은 Kyoung (2010)의 연구결과에 따라서, 장기간의 가뭄경향을 분석하기에 적합한 12개월 지속기간과, SPI지수의 경우 분포형에 따른 차이가 크게 발생하므로 χ^2 적합도 검정 과정을 거쳐 Guttman (1999)이 제시한 Pearson Type III 분포를 사용하여 SPI를 산정하였다 (Fig. 3).

산정된 55개 기상관측소에 대한 SPI지수에 대해서 가뭄을 정의하기 위하여 절단 수준을 결정하여야 하며, SPI 지수에서는 -1.0 이하를 가뭄으로 간주하므로 이를 절단수준으로 간주하여 가뭄 사상을 정의하였다 (Figs, 4 and 5).

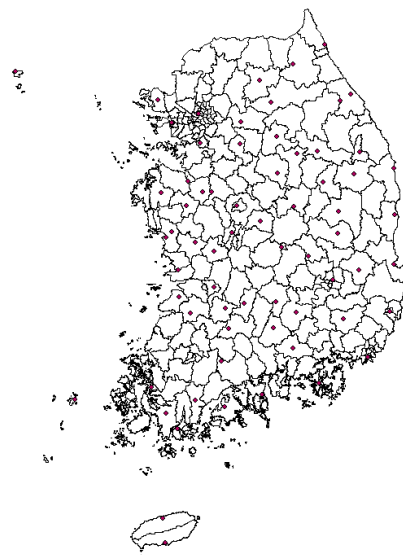


Fig. 3. Rain Gauge Station of Korea Meteorological Administration (KMA)

3.2 가뭄의 재현기간 분석

각각 가뭄의 지속기간과 심도는 Weibull 및 Gamma 분포로 모의되고 있으며, 두 가뭄변수의 결합확률 분포를 Clayton 코풀라 함수를 이용하여 구축 한다. 가뭄의 지속기간 및 심도에 대한 결합누적확률밀도함수는 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C(F_d(d), F_s(s)) = (F_d(d))^{-\theta} + F_s(s)^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}, \theta > 0 \quad (5)$$

여기서, θ 는 코풀라를 이용해서 산정한 F_s 와 F_d 사이의 연관성에 대한 매개변수이다. 이러한 결합확률분포를 이용하여 수문기상학적 사상에 대하여 가뭄 지속기간과 심도가 모두 초과할 확률($D > d$ and $S > s$), 또는 가뭄 지속기

간과 심도중에 하나가 초과할 확률($D > d$ or $S > s$)에 대한 이변량 재현기간으로 산정할 수 있다(Shiau, 2006).

$$RP_{D > d \text{ and } S > s} = E(L) / 1 - F_D(d) - F_S(s) + C(F_{D(d)}, F_S(s)) \quad (6)$$

$$RP_{D > d \text{ or } S > s} = E(L) / 1 - C(F_{D(d)}, F_S(s)) \quad (7)$$

RP ; 재현기간(Return Period)

3.3 가뭄 지속기간에 따른 공간적 패턴

가뭄의 지속기간에 따른 가뭄의 공간적인 분포를 Figs. 6 and 7과 Table 1에 나타내었다. 결합확률에 의한 재현기간 산정에 있어서는 가뭄의 지속시간과 심도가 모두 초과할 확률(가뭄 지속기간(Duration) $> D$ and 가뭄 심도(Severity) $> S$)과 지속시간과 심도중에 어느 하나가 초과할 확률

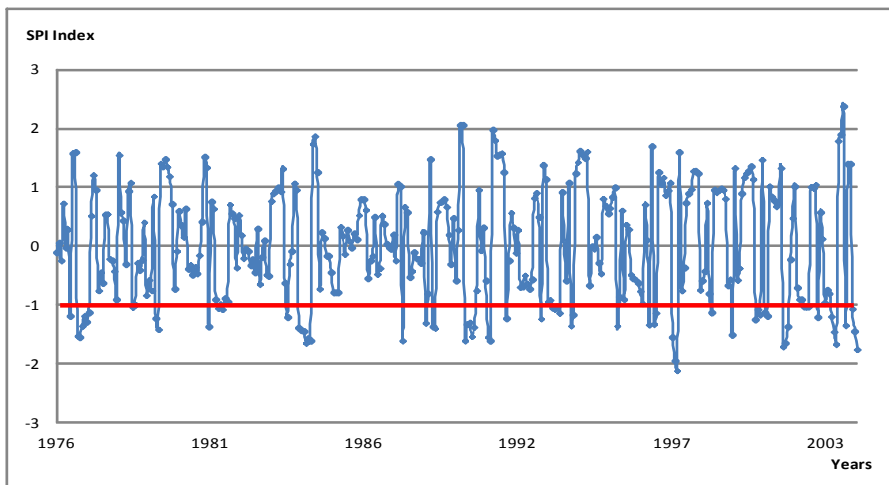


Fig. 4. SPI for Seoul Weather Station (KMA; 1976~2009 yr)

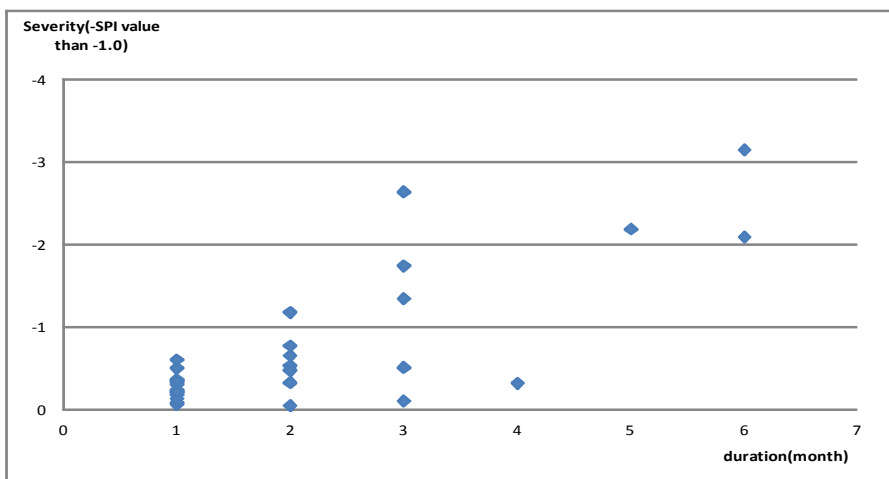


Fig. 5. Drought Event for Seoul Weather Station (KMA; 1976~2009 yr)

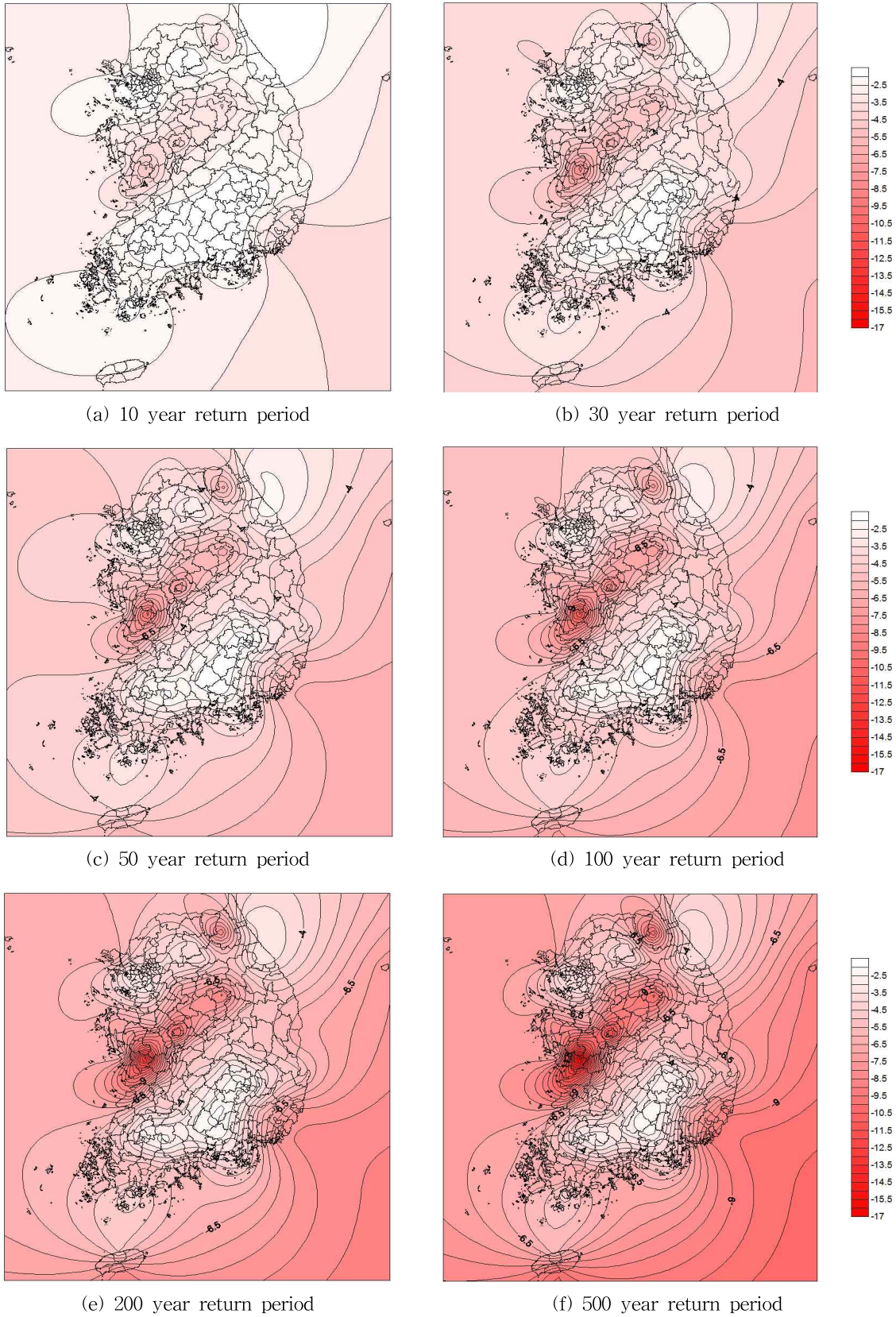
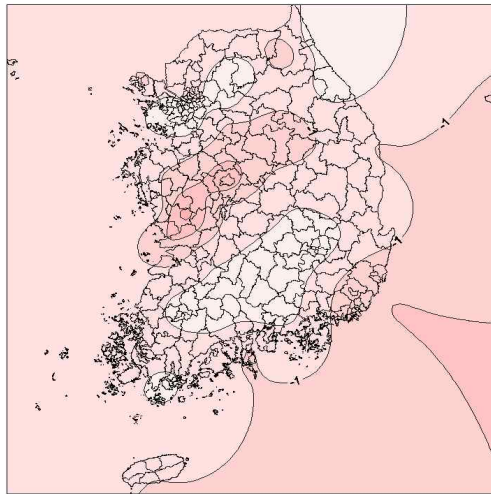
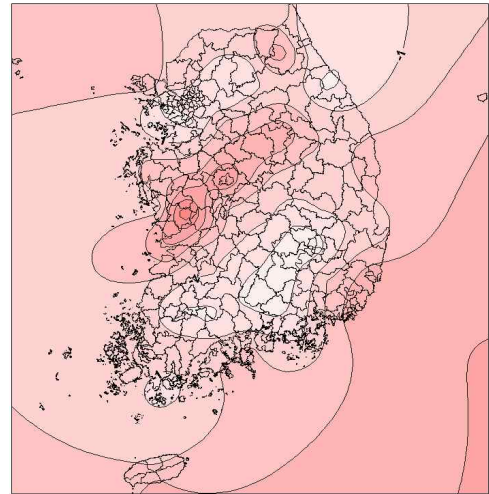


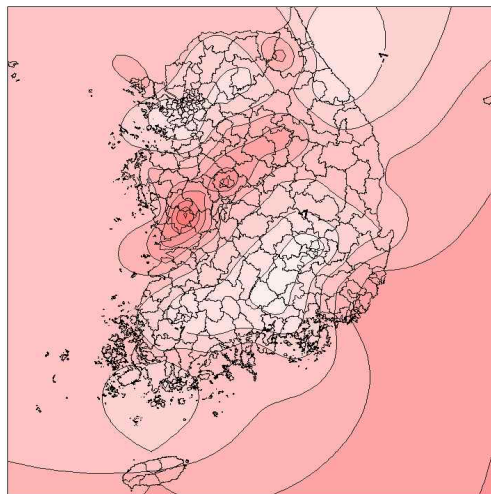
Fig. 6. Drought Severity Contour Map of Each Return Period (1976~2009; 2 month duration)



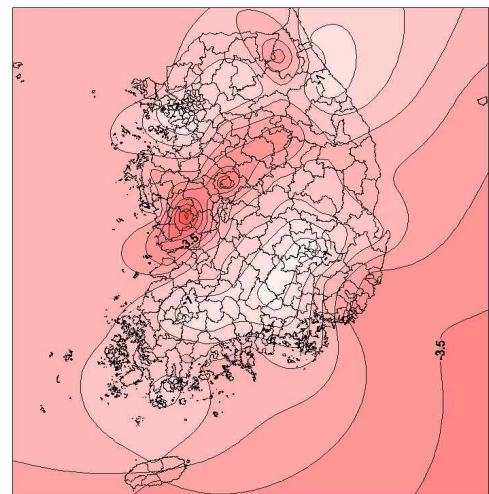
(a) 10 year return period



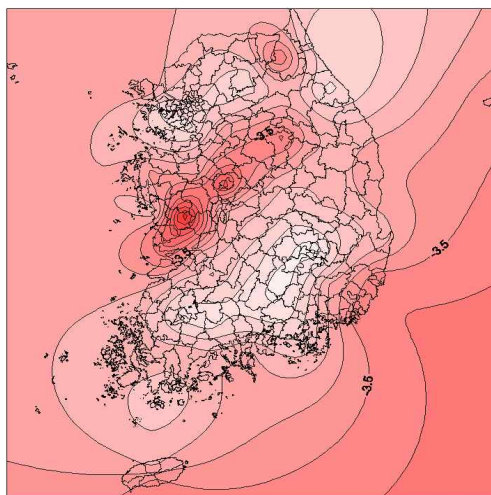
(b) 30 year return period



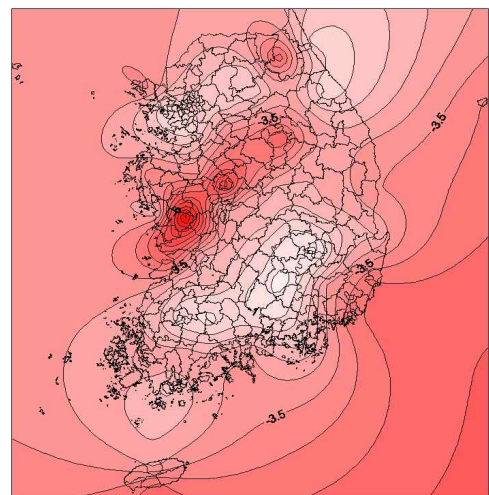
(c) 50 year return period



(d) 100 year return period



(e) 200 year return period



(f) 500 year return period

Fig. 7. Drought Severity Contour Map of Each Return Period (1976~2009; 4 month duration)

Table 1. Drought Severity Table of Each Return Period (1976~2009; 3 month duration)

Name of Obs.	SPI Index for each return period						Name of Obs.	SPI Index for each return period					
	2	5	10	50	100	200		2	5	10	50	100	200
Sokcho	-0.33	-0.50	-0.77	-1.40	-1.67	-1.95	Yangpyeong	-0.34	-0.65	-1.02	-1.89	-2.26	-2.63
Daegwanryeong	-0.34	-0.51	-0.73	-1.24	-1.46	-1.68	Icheon	-0.49	-1.20	-1.74	-2.99	-3.53	-4.07
Chuncheon	-0.33	-0.58	-0.89	-1.60	-1.91	-2.22	Inje	-0.34	-1.36	-2.18	-4.08	-4.90	-5.71
Gangneung	-0.32	-0.59	-0.85	-1.46	-1.72	-1.99	Hongcheon	-0.37	-0.75	-1.03	-1.69	-1.97	-2.26
Seoul	-0.46	-0.84	-1.13	-1.80	-2.09	-2.38	Jecheon	-0.36	-1.36	-2.18	-4.08	-4.90	-5.71
Incheon	-0.34	-0.48	-0.70	-1.20	-1.42	-1.64	Boeun	-0.55	-1.15	-1.60	-2.65	-3.11	-3.56
Ulleungdo	-0.32	-1.11	-1.80	-3.39	-4.08	-4.76	Cheonan	-0.81	-1.44	-1.91	-3.00	-3.47	-3.94
Suwon	-0.33	-0.51	-0.73	-1.24	-1.46	-1.68	Boryeong	-0.35	-0.86	-1.35	-2.46	-2.94	-3.42
Seosan	-0.33	-0.87	-1.53	-3.07	-3.73	-4.38	Buyeo	-0.34	-1.89	-3.31	-6.62	-8.05	-9.47
Ulsan	-0.38	-1.07	-1.58	-2.79	-3.30	-3.82	Buan	-0.32	-1.06	-1.83	-3.63	-4.41	-5.18
Cheongju	-0.36	-1.70	-2.72	-5.08	-6.10	-7.12	Imsil	-0.31	-0.49	-0.98	-2.11	-2.59	-3.08
Daejeon	-0.50	-1.13	-1.61	-2.72	-3.20	-3.67	Jeongeup	-0.36	-0.86	-1.24	-2.12	-2.50	-2.88
Chupungnyeong	-0.47	-0.94	-1.30	-2.13	-2.49	-2.85	Namwon	-0.33	-0.60	-0.85	-1.44	-1.69	-1.94
Pohang	-0.35	-0.80	-1.22	-2.18	-2.59	-3.00	Suncheon	-0.33	-0.53	-0.67	-1.01	-1.16	-1.30
Gunsan	-0.34	-1.44	-2.42	-4.71	-5.69	-6.68	Jangheung	-0.34	-0.95	-1.45	-2.62	-3.13	-3.63
Daegu	-0.32	-0.34	-0.43	-0.77	-0.91	-1.06	Haenam	-0.32	-0.75	-1.25	-2.41	-2.91	-3.40
Jeonju	-0.40	-0.87	-1.22	-2.05	-2.40	-2.76	Goheung	-0.46	-1.05	-1.49	-2.52	-2.97	-3.41
Ulsan	-0.62	-1.49	-2.16	-3.69	-4.36	-5.02	Yeongju	-0.58	-1.10	-1.50	-2.41	-2.81	-3.20
Gwangju	-0.36	-0.53	-0.71	-1.12	-1.30	-1.48	Mungyeong	-0.48	-1.01	-1.41	-2.35	-2.75	-3.15
Busan	-0.66	-1.53	-2.19	-3.71	-4.37	-5.03	Yeongdeok	-0.39	-0.90	-1.50	-2.88	-3.47	-4.06
Tongyeong	-0.47	-0.84	-1.13	-1.79	-2.07	-2.35	Uiseong	-0.36	-0.81	-1.23	-2.21	-2.63	-3.05
Mokpo	-0.43	-1.00	-1.43	-2.43	-2.86	-3.29	Gumi	-0.33	-0.59	-0.76	-1.15	-1.32	-1.49
Yeosu	-0.52	-1.15	-1.62	-2.71	-3.18	-3.65	Yeongcheon	-0.31	-0.77	-1.11	-1.88	-2.21	-2.55
Wando	-0.34	-0.51	-0.85	-1.63	-1.97	-2.30	Geochang	-0.34	-0.58	-0.78	-1.22	-1.41	-1.60
Jeju-do	-0.33	-0.83	-1.28	-2.30	-2.75	-3.19	Hapcheon	-0.32	-0.34	-0.34	-0.34	-0.34	-0.34
Seogwipo	-0.31	-0.78	-1.64	-3.66	-4.52	-5.39	Miryang	-0.39	-1.03	-1.51	-2.64	-3.12	-3.61
Jinju	-0.33	-0.41	-0.54	-0.85	-0.98	-1.11	Sancheong	-0.33	-0.39	-0.52	-0.82	-0.95	-1.08
Ganghwa	-0.35	-1.07	-1.65	-3.00	-3.58	-4.16							

(가뭄 지속기간(Duration) > D or 가뭄 심도(Severity) > S)로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 가뭄의 지속기간이 길어질수록 전체적인 심도도 증가하는 것으로 고려하였으며, Liu et al. (2011)의 연구에서와 같이 지속기간과 심도 결합확률은 상호간 유사한 공간분포 특성을 보이므로 가뭄 분석의 용이성을 위하여 지속기간을 기준으로 공간분포를 작성하였다. 이를 이용하여 가뭄의 지속기간과 심도를 기준으로 하여 가뭄의 재현기간을 판단할 수 있으며, 반

대로 재현기간에 따른 가뭄의 정도를 정량적으로 판단할 수 있다. 예를 들어서 강원도 중부 지방에서 지속기간 4개월 동안 평균적인 SPI지수가 -1.5일 경우 이 가뭄의 재현기간은 Fig. 7에 의거하여 약 30년 재현빈도로 계산할 수 있으며, 이를 활용한 확률가뭄량의 도출이 가능하다.

100년 재현기간을 가지는 가뭄에 대한 전국 평균 SPI 지수는 1개월 가뭄이 -9.51, 2개월 가뭄이 -4.58, 3개월 가뭄이 -2.80, 4개월 가뭄이 -1.88인 것으로 분석되었다. 일반적

인 상황 하에서 SPI 지수가 -3.0 이하로 내려가는 경우 심한 가뭄으로 간주하기 때문에 지속기간에 따라서 가뭄을 판단하는 기준으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, Figs. 6 and 7과 Table 1에서 나타난 가뭄의 공간분포 특성을 보면 공통적으로 동일한 재현기간을 가지는 가뭄에 대해서 특정 지역의 가뭄심도가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 동일한 재현기간을 가지는 가뭄에 대해서 강우량 부족량이 높게 나타나는 것을 의미하므로 해당 지역이 가뭄에 대해서 더 취약함을 반영한다고 할 수 있다. 다만, 가뭄을 판단하는 것이 SPI 지수에 일률적으로 의존하고 있으므로 좀 더 정확한 가뭄의 양상을 도출하기 위해서는 향후에 각 지역적인 특성 및 기상적인 특성에 적합한 SPI 판단기준이 필요할 것으로 판단된다. 연구결과에 의하여 대한민국의 충청도의 공주 및 충주 인근, 강원도의 원주, 인제, 정선, 태백 등의 지역이 동일 재현기간에 대한 가뭄심도가 높게 나타났으며, 이는 상기의 지역이 가뭄에 대해서 더 취약할 수 있음을 나타낸다(Fig. 7(f)).

4. 결 론

본 연구에서는 대한민국의 기상학적인 가뭄을 정량적으로 분석하기 위하여 전국의 55개 기상청관측소를 대상으로 SPI 시계열을 산정하고, 연속이론을 통하여 가뭄과 가뭄 사상을 정의 하였다. 정의된 가뭄의 지속기간과 심도를 확률변수로 간주하고 이를 코풀라 이론을 적용하여 결합 확률분포로서 유도하였으며, 가뭄의 지속기간과 심도에 따른 재현기간을 정의하고 이를 확장하여 대한민국을 대상으로 가뭄의 시공간적 분포를 분석하였다. 기상청 산하의 55개 기상관측소에 대하여 산정된 가뭄의 재현기간별 SPI 지수를 살펴보면 공통적으로 대한민국의 금강유역과 낙동강 유역과 한강유역의 일부가 가뭄에 취약한 것으로 나타나고 있으며, 충청도의 공주 및 충주 인근, 강원도의 원주, 인제, 정선, 태백 등의 지역이 이에 해당한다. 향후에 SPI에 의한 가뭄의 정의와 관련된 연구가 이루어진다면, 본 연구에서 제시한 확률적인 가뭄 심도의 산정 방법론을 통하여 정량적인 가뭄의 재현빈도 평가 및 수자원관리에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단 글로벌연구네트워크 지원사업(MEST)(NRF-2009-220-D00104) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Bonaccorso, B., Cancelliere, A., and Rossi, G. (2003). "An analytical formulation of return period of drought severity." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 17, No. 3, pp. 157-174.
- Chang, T.J., and Kleopa, X.A. (1991). "A proposed method for drought monitoring." *Water Resources Bulletin*, Vol. 27, pp. 275-281.
- Choi, S.J., Moon, J.W., Lee, D.R., Kang, S.K., and Seo, J.S. (2011). "Evaluation of Water Supply Capacity of Agriculture Reservoir According to Drought Frequency." *Proceedings of Korea Water Resources Association 2011*, KWRA, Dae-gu, Korea, pp. 449-449.
- Gonzalez, J., and Valdes, J. B. (2003). "Bivariate Drought Recurrence Analysis Using Tree Ring Reconstructions." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 8, No. 5, pp. 247-258.
- Guttman, N.B. (1999). "Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm." *Journal of the American Water Resources Association*, AWRA, Vol. 35, No. 2, pp. 311-322.
- Kao, S.C., and Govindaraju, R.S. (2008). "Trivariate statistical analysis of extreme rainfall events via the Plackett family of Copulas." *Water Resour Res*, Vol. 44, No. 2, W02415.
- Kim, B.K., Kim, S.D., Lee, J.S., and Kim, H.S. (2006). "Spatio-Temporal Characteristics of Droughts in Korea: Construction of Drought Severity-Area-Duration Curves." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 26, No. 1B, pp. 69-78.
- Kim, T.W., Valdes, J.B., and Yoo, C. (2006b). "Non-parametric approach for bivariate drought characterization using Palmer drought index." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 11, No. 2, pp. 134-143.
- Kim, T.W., Valdes, J.B., and Aparicio, J. (2006a). "Spatial characterization of droughts in the Conchos River Basin based on bivariate frequency analysis." *Water International*, Vol. 31, No. 1, pp. 50-58.
- Kwak, J.W. (2012a). *Drought Analysis Using Copula Theory and Impact of Climate Change on Droughts*. Ph.D. Dissertation, Inha University, Incheon, Korea,

- pp. 23–110.
- Kwak, J.W., Kim, D.G., Lee, J.S., and Kim, H.S. (2012b). “Hydrological Drought Analysis using Copula Theory.” *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 32, No. 3B, pp. 161–168.
- Kwak, J.W., Kim, D.G., Noh, H.S., Vijay, P., Singh, and Kim, H.S. (2013). “Case Study: Hydrological Drought Analysis on Namhan River Basin, Korea-(1) Derivation of Joint Probability Distribution.” *Journal of Hydrologic Engineering*, Accepted.
- Kyoung, M. (2010). *Assessment of Climate Change Effect on Drought and Frequency Based Precipitation*. Ph.D. Dissertation, Inha University, Incheon, Korea, pp. 72–98.
- Kyoung, M., Kim, S., Kim, B.K., and Kim, H.S. (2007). “Construction of Hydrological Drought Severity–Area–Duration Curves Using Cluster Analysis.” *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 27, No. 3B, pp. 267–276.
- Lee, J.H., and Kim, C.J. (2011). “Derivation of Drought Severity–Duration–Frequency Curves Using Drought Frequency Analysis.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 11, pp. 889–902.
- Lee, J.H., Seo, J.W., and Kim, C.J. (2012). “Analysis on Trends, Periodicities and Frequencies of Korean Drought Using Drought Indices.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 1, pp. 75–89.
- Lee, T., Modarres, R., and Ouarda, T.B.M.J. (2012). Data based analysis of bivariate copula tail dependence for drought duration and severity. *Hydrological Processes*. DOI:10.1002/hyp.923
- Liu, C.L., Zhang, Q., Vijay, P.S., and Cui, Y. (2011). “Copula-Based evaluation of drought variations in Guangdong, South China.” *Natural Hazards*, Vol. 59, No. 3, pp. 1533–1546.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1993). “The relationship of drought frequency and duration to time scales.” *8th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Boston, USA, Vol. 17, No. 22, pp. 179–183.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1995). “Drought monitoring with multiple time scales.” *9th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Dallas, USA, Vol. 18, No. 21, pp. 211–215.
- Michele, C.D., and Salvadori, G. (2010). “Multivariate Extreme Value models in hydrology: A Copula approach.” *Geophysical Research Abstracts*, EGU 2010, Vienna, Austria, Vol. 12, pp. 9486.
- Mishra, A.K., Desai, V.R., and Vijay P. Singh (2007). “Drought Forecasting Using a Hybrid Stochastic and Neural Network Model.” *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 12, No. 6, pp. 626–638.
- Moye, L.A., Kapadia, A.S., Cech, I.M., and Hardy, R.J. (1988). “The theory of runs with applications to drought prediction.” *Journal of Hydrology*, Vol. 103, No. 1, pp. 127–137.
- Nadarajah, S. (2007). “A bivariate gamma model for drought.” *Water Resour Res*, Vol. 43, W08501.
- Palmer, W.C. (1968). “Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index.” *Weatherwise*, Vol. 21, pp. 156–161.
- Ryoo, S.R., and Yoo, C.S. (2004). “A Modified Standardized Precipitation Index (MSPI) and Its Application.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 37, No. 7, pp. 553–567
- Shiau, J.T. (2003). “Return period of bivariate distributed hydrological events.” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 17, No. 2, pp. 42–57.
- Shiau, J.T. (2006). “Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas.” *Water Resources Management*, Vol. 20, No. 5, pp. 795–815.
- Shiau, J.T., and Modarres, R. (2009). “Copula-based drought severity–duration–frequency analysis in Iran.” *Meteorological Applications*, Vol. 16, No. 4, pp. 481–489.
- Shiau, J.T., Feng, S., and Nadarajah, S. (2007). “Assessment of hydrological droughts for the Yellow River, China, using copulas.” *Hydrological Processes*, Vol. 21, No. 16, pp. 2157–2163.
- Sklar, K. (1959). “Fonctions de repartition à n dimensions et leurs marges.” *Publications de l’Institut de Statistique, L’University de Paris*, Vol. 8, pp. 229–231.
- Song, S., and Vijay, P. Singh (2010). “Meta-elliptical copulas for drought frequency analysis of periodic hydrologic data.” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 24, No. 3, pp. 425–444.

- Wong, G., Lambert, M.F., and Metcalfe, A.V. (2008). "Trivariate copulas for characterization of droughts." *ANZIAM Journal*, Vol. 49, pp. 306-323.
- Wong, G., Lambert, M.F., Leonard, M., and Metcalfe, A.V. (2009). "Drought analysis using trivariate Copulas conditional on climate states." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 15, No. 2, pp. 129-141.
- Yeon, J.M., Byun, S.H., Lee, J.K., and Kim, T. (2007). "Evaluation of Droughts in Seoul Using Two-Dimensional Drought Frequency Analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 40, No. 4, pp. 335-343.
- Yevjevich, V. (1967). *An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic drought*. Hydrology Paper No. 23, Fort Collins, USA, Vol. 23.
- Yoo, J.Y., Choi, M.H., and Kim, T. (2010). "Spatial Analysis of Drought Characteristics in Korea Using Cluster Analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 43, No. 1, pp. 15-24.
- Zhang, Y., and Song, S.B. (2010). "Application of Archimedean Copulas in Multi-variable Drought Distribution." *Journal of Irrigation and Drainage*, Vol. 3, p. 16.

논문번호: 12-088	접수: 2012.08.02
수정일자: 2013.04.12/05.07	심사완료: 2013.05.07