韓國水資源學會論文集
第47卷 第2號·2014年 2月
pp. 171～182

J. KOREA WATER RESOURCES ASSOCIATION
Vol. 47, No. 2:171-182, February 2014
http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2014.47.2.171
pISSN 1226-6280 • eISSN 2287-6138

Copula 함수 기반의 이변량 결합가뭄지수 산정 및 평가

Estimation and Assessment of Bivariate Joint Drought Index based on Copula Functions

소 재 민* / 손 경 환** / 배 덕 효***
So, Jae Min / Sohn, Kyung Hwan / Bae, Deg Hyo

Abstract

The objective of this study is to evaluate the utilization of bivariate joint drought index in South Korea. In order to develop the bivariate joint drought index, in this study, Clayton copula was used to estimate the joint distribution function and the calibration method was employed for parameter estimation. Precipitation and soil moisture data were selected as input data of bivariate joint drought index for period of 1977～2012. The time series analysis, ROC (Receiver Operating Characteristic) analysis, spatial analysis were used to evaluate the bivariate joint drought index with SPI (Standardized Precipitation Index) and SSI (Standardized Soil moisture Index). As a result, SPI performed better for drought onset and SSI for drought demise. On the other hand the bivariate joint drought index captured both drought onset and demise very well. The ROC score of bivariate joint drought index was higher than that of SPI and SSI, and it also reflected the local drought situations. The bivariate joint drought index overcomes the limitations of existing drought indices and is useful for drought analysis.

Keywords : bivariate joint drought index, copula function, drought, SPI, SSI

요 지

본 연구에서는 가뭄해석을 위한 이변량 결합가뭄지수를 산정하고 국내 활용성을 평가하였다. 이변량 결합가뭄지수 산정을 위해 결합분포함수는 Clayton copula, 매개변수 추정은 교정방법을 이용하였으며, 입력변수로는 1977～2012년 동안의 강수량 및 토양수분량 자료를 선정하였다. 우리나라에 대한 이변량 결합가뭄지수를 산정한 후, 기존 가뭄지수인 SPI 및 SSI와 같이 시계열 분석, 지역별 분석 및 ROC 분석을 수행하여 활용성을 평가하였다. 분석결과 SPI는 가뭄의 시작, SSI는 가뭄의 해갈을 적절히 고려하였으며, 이변량 결합가뭄지수는 SPI 및 SSI의 거동 특성을 적절히 반영하는 것으로 나타났다. 또한 이변량 결합가뭄지수가 SPI 및 SSI에 비해 ROC score가 높게 산정되었으며, 지역별 분석에서도 지역의 가뭄 상황을 적절히 재현하여 활용성이 우수하게 나타났다. 이변량 결합가뭄지수는 기존 가뭄지수의 해석적 한계를 보완하였다는 측면에서 국내 가뭄해석의 활용성이 높다고 판단된다.

핵심용어 : 이변량 결합가뭄지수, 코풀라 함수, 가뭄, 표준강수지수, 표준토양수분지수

* 세종대학교 물자원연구소, 건설환경공학과 석사과정 (e-mail: eenjoy0517@nate.com)
Master Course student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea
** 세종대학교 물자원연구소, 건설환경공학과 박사과정 (e-mail: skhdr@hanmail.net)
Ph.D. Course student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea
*** 교신저자, 세종대학교 물자원연구소, 건설환경공학과 교수 (e-mail: dhbae@sejong.ac.kr, Tel: 02-3408-3814)
Corresponding Author, Prof. Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

1. 서 론

최근 지구온난화에 따른 기후시스템의 변화로 과거에 경험하지 못했던 규모의 기상재해가 빈번히 발생하고 있으며, 피해 규모도 전 지구적으로 증가하고 있는 추세이다. 그 중 가뭄은 홍수와 더불어 우리나라를 대표하는 기상재해 중 하나로써, 장주기적이고 광역적으로 발생함에 따라 구체적인 발생 시기, 장소, 원인을 규명하는 것이 어렵고 그 피해와 영향력도 막대하다(Bae et al., 2013). 그동안 국내에서는 가뭄극복을 위해 관개용수의 확보, 비상관정의 개발 등의 구조적인 대책과 가뭄정보제공 시스템 개발 등의 비구조적인 대책을 마련해 왔다. 하지만 가뭄에 의한 피해는 여전히 계속되고 있으며, 특히 기후변화의 영향으로 향후 가뭄 발생이 더욱 빈번할 것이라는 견해가 제시되고 있어 가뭄 대응을 위한 지속적인 노력이 요구되고 있다(NEMA, 2013).

가뭄은 물 부족에 따른 물수지 불균형 현상으로 인위적인 요인 보다는 자연적인 요인에 의해 발생되는 자연재해이며, 이를 해석하기 위해서는 자연 상태의 수문순환 거동을 총체적으로 다뤄야 할 만큼 범위가 매우 광범위하다. 그렇다 보니 해석하는 관점에 따라 기상학적 가뭄, 수문학적 가뭄, 농업적 가뭄 등으로 구분하고 있으며, 해석 도구인 가뭄지수를 활용하여 각 분야별 목적에 따라 가뭄의 정도를 정량적 지표로 생산 및 활용해 왔다. 국내 가뭄해석에 주로 활용되는 가뭄지수로는 Palmer (1965)의 PDSI (Palmer Drought Severity Index), Mckee et al. (1993)의 SPI (Standardized Precipitation Index), Shukla and Wood (2008)의 SRI (Standardized Runoff Index), Son et al. (2011)의 SSI (Standardized Soil moisture Index) 등이 있으며, 이 지수들은 단일 기상(강수, 기온 등) 및 수문(유출량, 토양수분량, 증발산량 등) 변수에 의해 산정된다.

일반적으로 가뭄은 강수량 부족으로부터 시작되며, 이는 지면의 유출, 토양수분 및 지하수 등에 영향을 미친다. 따라서 가뭄해석을 위해서는 여러 가뭄지수를 개별적으로 검토하는 것보다는 하나의 통합된 정보로 나타내어 검토할 수 있는 기술 개발이 필요하다. 한편, 국외에서는 다수의 변수를 고려한 가뭄지수의 개발에 관한 연구를 수행한 바 있는데, NDMC (National Drought Mitigation Center)에서는 6가지 지수에 대한 가중치를 고려하여 미국 가뭄감시 정보(U.S. Drought Monitor Information)를 생산 및 제공하고 있다(NDMC, 2002). Keyantash and Dracup (2004)는 주성분 분석을 통해 기상학적 가뭄인자인 강수량, 수문학적 가뭄인자인 유출량 및 농업적 가뭄인자인 토양수분량을 통합하여 ADI (Aggregate Drought Index)라는 가뭄지수를 개발하였다. Hao and AghaKouchak (2013)는 결합분포함수를 이용해 기상학적 및 농업적 가뭄을 같이 고려하는 MSDI (Multivariate Standardized Drought Index)를 개발하였다. 국내의 경우 Kim et al. (2012)은 Copula 함수를 기반으로 지속기간(1, 2, 3~12개월)별 SPI를 결합한 JDI (Joint Drought Index)를 국내에 적용한 바 있다. 그러나 JDI는 강수량 기반의 가뭄지수로써 다른 변수에 의한 가뭄 특성을 고려하지 못하는 한계가 있다.

이처럼 국내에서는 단일변수 기반의 가뭄지수 활용에 국한되어 있으며, 여러 변수를 고려한 가뭄지수 산정 및 평가와 관련해서는 아직 제시된 바 없다. 이에 본 연구에서는 기상 및 수문 정보를 결합한 이변량 결합가뭄지수를 산정하고, 국내 가뭄해석의 활용성을 평가하고자 한다. 본 연구의 2절에서는 이변량 결합가뭄지수의 산정 및 평가방법을 기술하고, 3절에서는 입력변수의 선정 및 수집 결과를 제시하고자 한다. 4절에서는 이변량 결합가뭄지수의 생산 및 평가 결과를 분석하고, 5절에서는 본 연구에서의 연구결과를 요약 제시하고자 한다.

2. 이변량 결합가뭄지수 산정 및 평가방법

본 연구에서는 기상 및 수문정보를 결합한 이변량 결합가뭄지수를 산정 및 평가하고자 하며, 주요 연구수행 절차는 Fig. 1과 같다. 여러 기상 및 수문자료에서 가뭄해석을 위한 2개의 단일변수를 결정한다. 단일변량 자료의 빈도해석을 통해 적정 분포형을 선정하고 누가분포함수를 추정한다. 서로 다른 변량의 분포를 결합하기 위해 Copula 함수를 이용하며, Copula 함수의 매개변수를 추정한다. Copula 함수를 통해 결합 누가확률값을 산정한 후 표준화 과정을 거쳐 이변량 결합가뭄지수를 산정한다. 마지막으로 시계열 분석, 지역별 분석 및 ROC 분석을 통해 지수의 활용성을 평가한다.

2.1 Copula 함수

Copula의 사전적 뜻은 '연결물'로 라틴어로부터 유래된 말이며, 1959년 Sklar에 의해 처음으로 제시되었다. Copula 함수는 각 변량의 분포 특성이 다를 경우 개별적 분포의 특성을 결합 또는 분리가 용이하고 자료의 극대 또는 극소치 분포관계를 파악하는데 있어 적절하다고 알려져 있다(Sklar, 1959). 그동안 국내외 기후학, 지리학 및 수자원 분야에서 이를 이용한 많은 연구를 수행해 왔다(Favre et

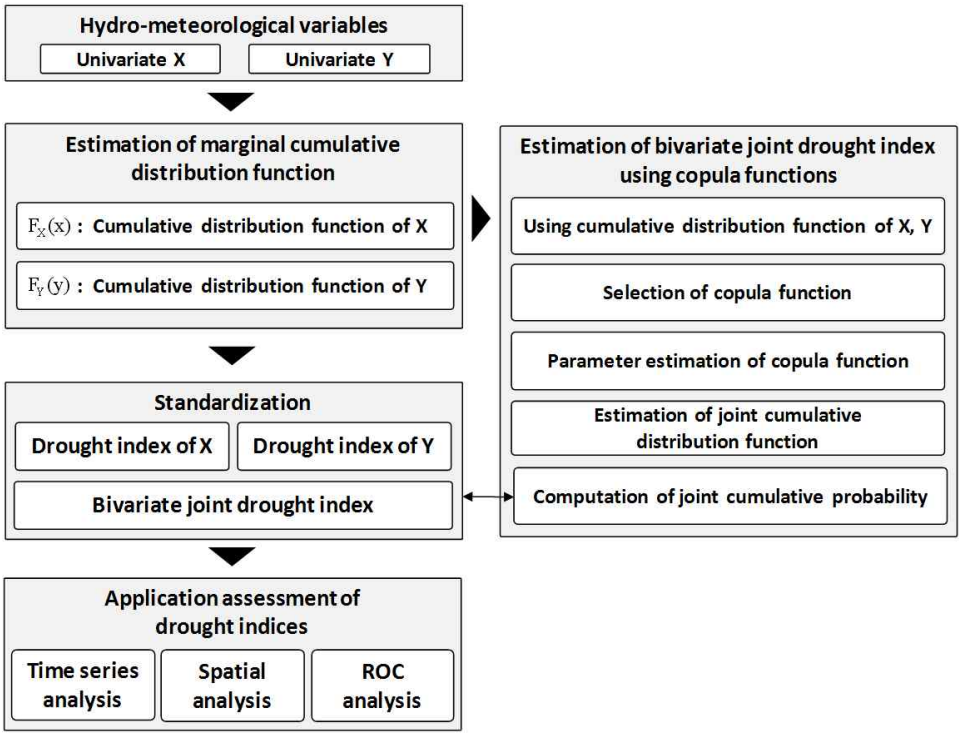


Fig. 1. Flow Chart of this Study

al., 2004; Bardossy, 2006; Shiau, 2006; Serinaldi et al., 2009; AghaKouchak et al., 2010; Kim et al., 2012; Kwak et al., 2013a; Yoo et al., 2013). 각 변량들의 특성을 효과적으로 반영하는데 있어 Copula 함수의 활용은 적절하다고 판단되며, 구체적인 이론은 다음과 같다.

Sklar 정리에 의하면 어떤 확률변수 X, Y에 대해 결합 누가분포함수 $F_{X,Y}(x,y)$ 의 주변 누가분포함수 $F_X(x)$, $F_Y(y)$가 존재하고 서로 연속인 경우 이를 결합할 수 있는 Copula 함수 C가 존재하게 된다(Schweizer and Sklar, 1983). 여기서, 주변 누가분포함수 $F_X(x)$, $F_Y(y)$는 확률변수 X, Y의 확률분포함수로부터 결정되며, 주변 누가분포함수 $F_X(x)$, $F_Y(y)$의 결합 누가분포함수는 Copula 함수를 통해 Eq. (1)과 같이 정의된다.

$$F_{X,Y}(x,y) = C[F_X(x), F_Y(y)] \quad (1)$$

여기서, $F_{X,Y}(x,y)$ 는 결합 누가분포함수, C는 Copula 함수, $F_X(x)$, $F_Y(y)$는 확률변수 X, Y의 주변 누가분포함수이다.

Copula 함수는 매개변수적 Copula, 비매개변수적 Copula로 구분할 수 있다. 매개변수적 Copula는 Gaussian, Student's t copula와 Archimedean copula인 Clayton, Gumbel, Frank copula 등이 있으며, 비매개변수적 Copula는 Empirical copula, Kernel copula가 있다(Cherubini et al., 2004). Clayton, Gumbel, Frank copula는 다른 Copula 함수에 비해 매개변수 추정이 쉽고 함수식이 간단하여 활용도가 높으며 그 중, Clayton copula는 극소값(smallest) 추정에 적합하다고 알려져 가뭄해석에 있어 다양하게 활용되어 왔다. 국외의 경우 Shiau et al. (2007)은 중국 양쯔강 유역을 대상으로 수문학적 가뭄의 결합분포함수를 추정하여 가뭄의 재현기간을 산정한 바 있으며, 국내의 경우 Kwak et al. (2013b)은 기상청 산하 55개 관측소를 대상으로 SPI에 따른 가뭄기간과 가뭄심도를 정의하고, Clayton copula 함수를 이용하여 결합분포함수를 추정한 바 있다. 본 연구에서는 국내외 가뭄연구에서 주로 활용되어온 Clayton copula 함수를 활용하고자 하며, 식은 다음과 같다.

$$C(F_X(x), F_Y(y)) = [F_X(x)^{-\theta} + F_Y(y)^{-\theta} - 1]^{-\frac{1}{\theta}} \quad (2)$$

$$C(u,v) = (u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-\frac{1}{\theta}}, \quad \theta > 0 \quad (3)$$

여기서, θ는 Copula 함수의 매개변수, C(u,v)는 결합 누가확률, u는 확률변수 X의 누가확률, v는 확률변수 Y의 누가확률이다.

2.2 매개변수 추정

Copula 함수의 매개변수(θ) 추정을 위해 교정방법(calibration method by using sample dependence

measure)을 이용하였다. 이 방법은 Archimedean copula 함수와 같은 이변량 확률분포의 매개변수를 추정하기 위해 주로 활용되며, Kendall의 순위 상관계수 τ를 이용해 계산된다. 여기서, 순위 상관계수 τ는 비타원형 분포의 비선형 상관관계를 나타낸다. 계산방법은 두 개의 확률변수를 크기에 따라 순위를 부여한 후, Eq. (6)을 통해 증·감의 경향(d_{ij})을 파악한다. 증·감의 값에 합(S)을 계산한 후, Eq. (4)를 통해 계수(τ)를 산정한다.

$$\tau = \frac{S}{\frac{N(N-1)}{2}} \tag{4}$$

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} d_{ij} \tag{5}$$

$$d_{ij} = \begin{cases} +1 : [(X_i - X_j) \times (Y_i - Y_j)] > 0 \\ 0 : [(X_i - X_j) \times (Y_i - Y_j)] = 0 \\ -1 : [(X_i - X_j) \times (Y_i - Y_j)] < 0 \end{cases} \tag{6}$$

여기서, N은 확률변수의 자료 개수, X_i, X_j 및 Y_i, Y_j는 확률변수 X와 Y의 i, j번째 표본자료이며, 확률변수 X, Y의 자료의 경향이 동일하면 1, 동일하지 않으면 -1, 경향이 없으면 0을 부여한다.

τ는 Copula 함수의 매개변수 추정에 활용되며, 산정방법은 다음과 같다.

$$\theta = \frac{2\tau}{1-\tau} \tag{7}$$

2.3 가뭄지수 산정

본 연구에서는 Copula 함수로부터 산정된 결합 누가확률값을 가뭄지수로 변환하기 위해 기존 Mckee et al. (1993)이 SPI 산정에 활용한 방법을 적용하였다. 이 방법을 통해 가뭄지수(Z)는 결합 누가확률값과 표준정규분포상의 동일한 누가확률값의 X축 변수를 산정하여 얻게 되며, Abromowitz and Stegun (1964)이 제시한 Eqs. (8)~(11)이 활용된다. 본 연구에서는 결합 누가확률값 C(u,v)를 아래의 식에 대입하여 지수를 산정하였으며, 가뭄 심도를 Table 1과 같이 SPI와 동일하게 구분하여 가뭄해석에 활용하였다(Hao and AghaKouchak, 2013).

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(C(u,v))^2}\right)}, \quad 0.0 < C(u,v) \le 0.5 \tag{8}$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-C(u,v))^2}\right)}, \quad 0.5 < C(u,v) \le 1.5 \tag{9}$$

$$Z = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 d_3 t^3}\right), \quad 0 < C(u,v) \le 0.5 \tag{10}$$

$$Z = +\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 d_3 t^3}\right), \quad 0.5 < C(u,v) \le 1.0 \tag{11}$$

여기서, C(u,v)는 결합 누가분포함수의 누가확률값, c_0는 2.515517, c_1은 0.802853, c_2는 0.010328, d_1은 1.432788, d_2는 0.189267, d_3는 0.001308이다.

Table 1. Classification of Drought Severity for the Range of Index Values

Values (Z)	Drought Category
2.00 ≤ Z	Extremely wet
1.99 ~ 1.50	Very wet
1.49 ~ 1.00	Moderately wet
0.99 ~ -0.99	Near normal
-1.00 ~ -1.49	Moderate Drought
-1.50 ~ -1.99	Severe Drought
-2.00 ≥ Z	Extremely Drought

Z: Bivariate Joint Drought Index Value

2.4 활용성 평가방법

가뭄은 광역적이고 시작과 끝을 알기가 어려워 평가에 많은 불확실성이 따르게 된다. 이로 인해 가뭄지수의 평가는 과거 피해사례와의 다양한 비교 방법을 통해 해당 가뭄지수의 재현정도를 분석하는 방법이 주로 활용된다. 본 연구에서는 과거 기록된 가뭄피해사례의 수집을 위해 1991~2012년 동안 기록된 KMA (2012) 및 Bae et al. (2013)의 자료를 인용하였다. 또한 가뭄평가를 위해 시계열 분석, 지역별 분석 및 ROC (Receiver Operating Characteristic) 분석을 이용하였으며, 가뭄사례가 행정구역별로 제시됨에 따라 본 연구에서도 가뭄지수를 행정구역별로 평균하여 평가에 활용하였다.

시계열 분석은 생산된 가뭄지수를 시계열로 도시한 후, 가뭄지수가 시계열에 따라 기록된 가뭄사상을 적절히 반영하는지에 대한 분석방법이며, 지역별 분석은 지점별로 산정된 가뭄지수를 공간적으로 분포시켜 가뭄기간 및 피해지역의 일치여부를 평가하는 방법이다. ROC 분석은 기록된 가뭄사례와 가뭄지수의 가뭄발생 유무에 대한 상호비교를 통해 적중률(Hit Rate, HR) 및 비적중률(False Alram Rate, FAR)을 산정하고 이 두 정보로부터 ROC score를 계산하여 가뭄지수의 정확도를 평가하는 방법이다. ROC score가 1.0이면 지수가 가뭄사례를 완벽히 재현하였음을

의미한다(Bae et al., 2013).

3. 입력변수 선정 및 수집

가뭄해석을 위한 가뭄지수의 선정을 위해 그동안 여러 연구가 수행된 바 있다. 국내의 경우 Kim and Lee (2011)는 ROC 분석을 이용해 SPI, PDSI, PN (Percent of Normal precipitation), Deciles 중에서 SPI, PN, Deciles의 적용성이 가장 높다고 하였다. Bae et al. (2011)은 SPI, SRI, SSI, DDI 및 PDSI 중에서 국내 활용성 높은 지수가 SPI, SSI 및 SRI라고 제시한 바 있으며, Bae and Son (2012)은 지속기간이 짧은 국내 가뭄의 특성상 3개월 SPI, SRI, SSI의 활용성이 높다고 제안한 바 있다. 국외에서는 Keyantash and Dracup (2002)은 가뭄감시에 있어 강수량 및 토양수분량의 활용을 제안하였으며, Hao and AghaKouchak (2013)은 SPI가 가뭄 시작의 재현성은 높으나 가뭄 해갈에는 재현성이 낮은 반면, SSI는 가뭄의 해갈에서는 재현성이 높으나 가뭄 감지에는 재현성이 낮아 두 지수를 공동 활용할 것을 제안한 바 있다.

본 연구에서는 3개월 누적강수량 및 누적토양수분량을 이변량 결합가뭄지수의 입력 변수로 선정하였다. 이를 위해 강수량은 1977~2012년 동안의 기상청 59개소의 ASOS (Automatic Synoptic Observation System) 자료, 토양수분량 자료는 지표수문해석모형으로부터 산정한 결과를 이용하였다. 본 연구에서 이용한 지표수문해석모형은 VIC (Variable Infiltration Capacity) 모형이며(Liang et al., 1994), 이는 대기와 식생 그리고 토양의 상호작용 등의 수문과정을 기반으로 물과 에너지의 유동(water & energy flux)을 모의하는 분포형 모형으로써 크게 물수지(water balance), 하도추적(channel routing), 에너지수지(energy balance) 등으로 구성되어 있으며, 각 모듈은 독립적으로 수행된다. 모형에서 적용 가능한 격자의 범위는 1/8°~2° 정도로 다양한 공간분해능이 가능하여, 기상모델(Global Climate Model, GCM; Regional Climate Model, RCM)과의 직접적인 연계에 용이하다. 모형을 통해 산정된 토양수분량은 이미 국내외적으로 대륙 또는 국가규모의 가뭄해석에 있어 그 활용성이 검증된 바 있다(Sheffield and Wood, 2008; Son et al., 2011).

4. 이변량 결합가뭄지수 산정 및 평가

강수량 및 토양수분량에 대한 이변량 결합가뭄지수의 산정을 위해 3개월 누적강수량의 확률분포형은 Mckee et al. (1993)가 제시한 Gamma 분포, 3개월 누적토양수분량의 확률분포형은 Son et al. (2011)의 연구 결과에 따른 Wakeby (5변수) 분포를 선정하였으며, 교정방법을 통해 Clayton copula 함수의 매개변수를 추정하였다. 또한, Kolmogorov-Smirnov 및 Cramer-Von Mises 검정 방법을 이용하여 결합 누가분포의 적합도를 검토하였으며, 모두 유의수준을 만족하였다.

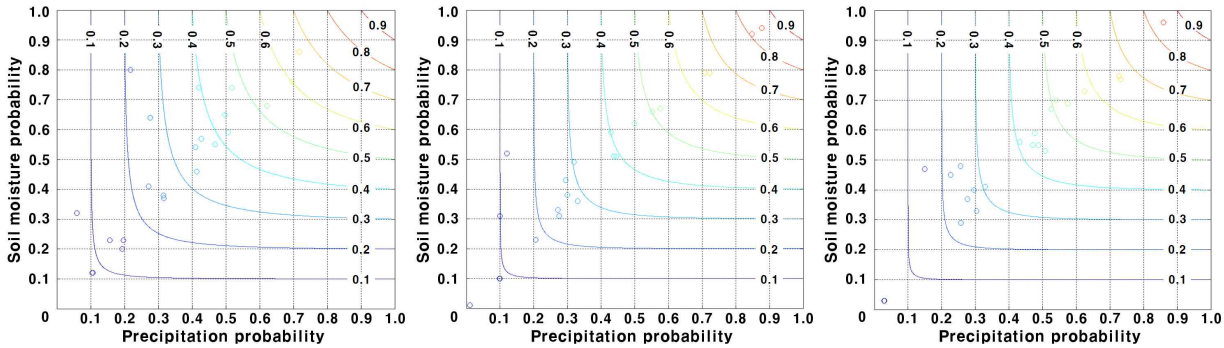
Fig. 2는 전라도와 경상도의 3, 4, 5월에 대한 결합 누가분포함수의 곡선을 예로써 나타낸 것으로 X축은 강수량, Y축은 토양수분량의 누가확률이며, ○는 강수량 및 토양수분량의 누가확률값을 의미한다. 결합누가확률의 곡선은 월별 추정된 Copula 함수의 매개변수로부터 그 형상이 결정되며, 그림에서와 같이 3월 전라도 강수량 및 토양수분량의 누가확률값이 0.2, 0.3일 경우 결합 누가분포함수의 곡선을 통해 0.17의 결합 누가확률값을 추정할 수 있다. 추정된 결합 누가확률값은 표준화 과정을 거쳐 가뭄지수로 변환된다.

4.1 시계열 분석

시계열에 따른 이변량 결합가뭄지수의 거동 특성을 검토하기 위해 행정구역별로 가뭄지수를 평균하여 1991~2012년까지 나열한 후, 과거 가뭄사례와 비교검토를 수행하였다. 또한, 강수 및 토양수분량의 가뭄지수인 SPI와 SSI를 이용하여 금회 결과와 비교하였다. Fig. 3은 6개 행정구역 중 전라도와 경상도의 평균 SPI, SSI 및 이변량 결합가뭄지수(Bivariate)를 예로써 도시한 것이다. 그림에서 ○와 △는 과거 실제 가뭄피해 사례에서의 가뭄시작 및 해갈, 검은색 실선은 SPI, 검은색 점선은 SSI, 회색 실선은 이변량 결합가뭄지수를 의미한다.

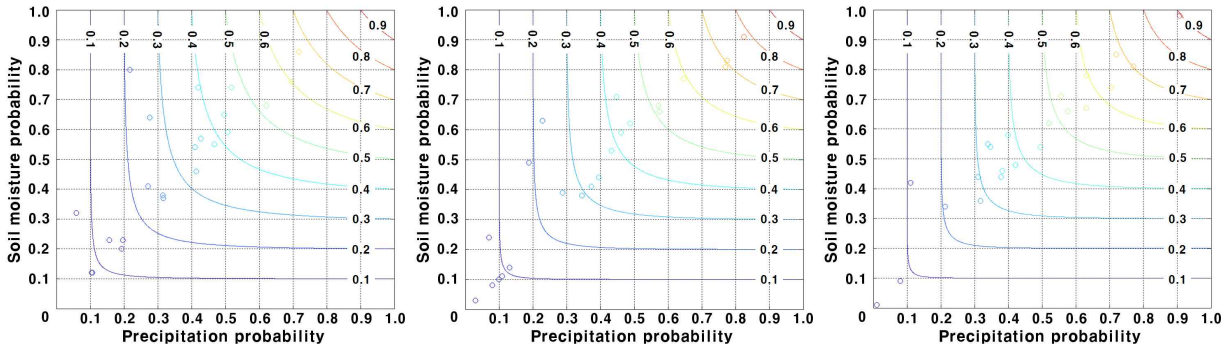
SPI 및 SSI에 대한 검토결과 2000년 2~6월과 2008년 9월~2009년 4월 가뭄사례에서 SPI가 SSI 보다 가뭄을 먼저 감지하지만 중간에 가뭄이 해갈되는 것으로 나타났다. SSI는 SPI에 비해 가뭄의 시작이 약 한달 정도 늦지만 가뭄의 상황은 계속 지속되는 것으로 나타났으며, 실사례와의 비교에서도 적용성이 높은 것으로 확인되었다. 통상 가뭄은 기상학적 가뭄에서 농업적 가뭄으로 이어진다. 이로 인해 가뭄의 시작은 SPI가 SSI 보다 빨리 감지하고, 가뭄 해갈은 SSI가 SPI 보다 더 늦어지는 것이며, 두 지수는 이러한 현상을 적절히 반영한다고 볼 수 있다.

1997년 11~12월 가뭄사례에서는 SPI가 가뭄을 감지하지 못하였으나 SSI 및 이변량 결합지수는 가뭄을 감지하였다. 2000년 2~6월 및 2001년 4~6월 가뭄사례에서는 이변량 결합지수는 SPI와 같이 가뭄의 시작을 SSI에 비



March April May

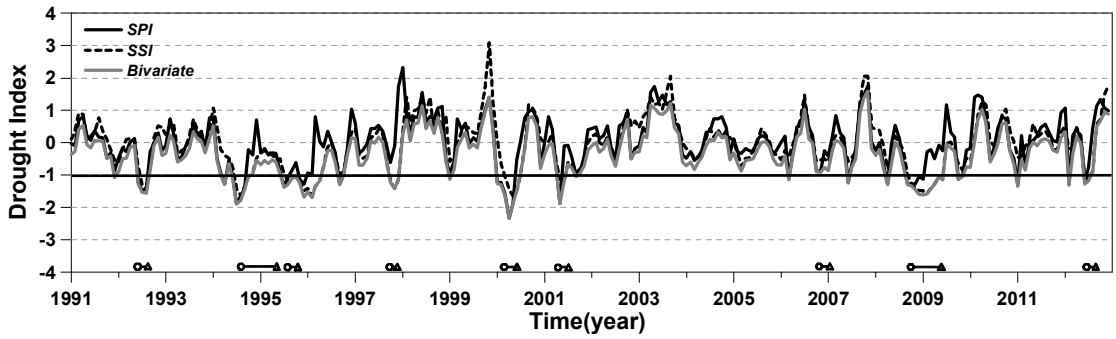
a) Jeolla-Do



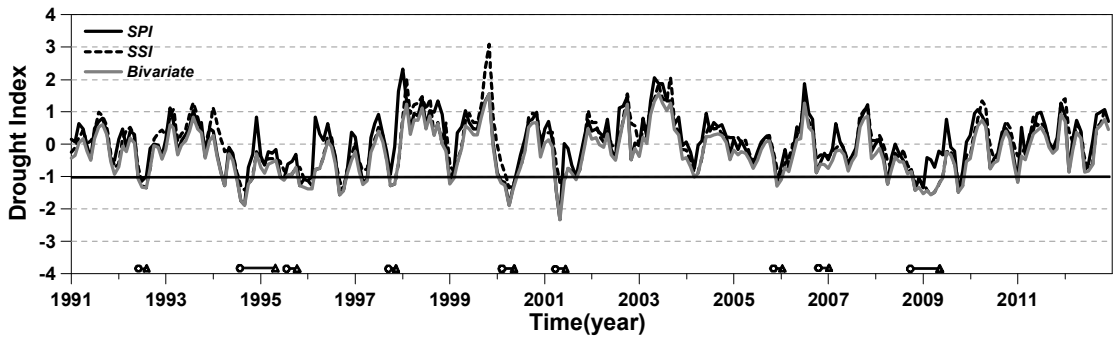
March April May

b) Gyeongsang-Do

Fig. 2. The Joint Cumulative Probability of Precipitation and Soil Moisture



a) Jeolla-Do



b) Gyeongsang-Do

Fig. 3. Time Series Analysis of SPI, SSI and Bivariate Joint Drought Index (1991~2012)

해 먼저 감지하였으며, 2008~2009년 가뭄사례에서는 SPI가 가뭄기간 도중 가뭄이 해갈되었으나, 이변량 결합가뭄지수 및 SSI는 가뭄이 지속되는 것으로 나타났다. 이변량 결합가뭄지수는 두 지역의 가뭄사례를 적절히 재현하는 것으로 확인되었으며, 특히, 가뭄의 시작은 SPI, 해갈은 SSI의 거동을 고려하는 것으로 나타났다. 다만, 장기간 지속된 1994~1995년 가뭄사례에서는 이변량 결합가뭄지수가 SPI 및 SSI와 같이 재현성이 낮아, 장기가뭄에 대한 해석에는 한계가 있는 것으로 확인되었다.

Table 2는 전라도 및 경상도 지역의 실제 가뭄기간에서 두 지수(SPI 및 SSI)의 거동이 크게 다른 기간에서의 지수값을 표기한 것이다. 1992년 두 지역에 산정된 가뭄지수의 값을 살펴보면 SPI가 가뭄 시작인 6월에 -1.23, -1.04, SSI는 -0.74, -0.71, 이변량 결합가뭄지수는 -1.27, -1.08, 7월은 SPI -1.48, -1.13, SSI -1.28, -1.28, 이변량 결합가뭄지수 -1.53, -1.33, 가뭄 해갈인 9월에는 모두 -1.0 이상의 값이 나타나 가뭄 시작은 SPI 및 이변량 결합가뭄지수, 해갈은 3개의 지수 모두 적절히 재현한 것으로

Table 2. Drought Indices for Each Drought Year in Jeolla-Do and Gyeongsang-Do

Drought Period		Jeolla-Do			Gyeongsang-Do		
Year	Month	SPI	SSI	Bivariate	SPI	SSI	Bivariate
1992	6	-1.23	-0.74	-1.27	-1.04	-0.71	-1.08
	7	-1.48	-1.28	-1.53	-1.13	-1.28	-1.33
	8	-1.41	-1.41	-1.56	-0.99	-1.34	-1.35
	9	-0.28	-0.84	-0.85	-0.13	-0.74	-0.74
1994	7	-1.88	-1.41	-1.89	-0.95	-0.84	-1.03
	8	-1.65	-1.65	-1.78	-1.75	-1.28	-1.75
	9	-1.41	-1.34	-1.45	-1.88	-1.41	-1.88
	10	-0.2	-1.04	-1.04	-0.71	-1.23	-1.23
	11	-0.38	-0.95	-0.96	-0.31	-1.04	-1.04
	12	0.71	-0.47	-0.54	0.84	-0.23	-0.29
1995	1	-0.31	-0.31	-0.67	-0.36	-0.44	-0.71
	2	-0.18	-0.25	-0.55	-0.64	-0.61	-0.89
	3	-0.38	-0.25	-0.65	-0.23	-0.44	-0.61
	4	-0.31	-0.38	-0.52	-0.28	-0.44	-0.56
	5	-0.33	-0.52	-0.59	-0.15	-0.44	-0.49
2000	2	-1.23	-0.64	-1.3	-1.13	-0.58	-1.19
	3	-1.56	-1.04	-1.62	-1.18	-0.88	-1.26
	4	-2.33	-1.41	-2.33	-1.88	-1.34	-1.89
	5	-1.88	-1.65	-1.89	-1.34	-1.28	-1.41
	6	-0.52	-1.48	-1.48	-0.84	-0.92	-1.03
2001	4	-0.74	-0.58	-0.82	-1.41	-0.67	-1.41
	5	-1.88	-1.13	-1.88	-2.33	-1.18	-2.33
	6	-0.1	-1.18	-1.18	0.02	-1.13	-1.13
2008	9	-1.28	-0.99	-1.29	-0.88	-0.64	-0.9
	10	-1.28	-1.23	-1.32	-0.77	-0.77	-0.84
	11	-1.28	-1.41	-1.44	-1.41	-1.23	-1.43
	12	-1.04	-1.48	-1.6	-1.04	-1.08	-1.32
2009	1	-1.13	-1.48	-1.61	-1.34	-1.23	-1.52
	2	-0.28	-1.56	-1.57	-0.41	-1.41	-1.42
	3	-0.2	-1.41	-1.42	-0.47	-1.56	-1.56
	4	-0.5	-1.28	-1.28	-0.71	-1.48	-1.48

확인되었으며, 특히, SPI 및 SSI가 모두 가뭄(-1.0 이하)일 경우 이변량 결합가뭄지수의 값은 두 지수보다 더 낮게 추정된 것으로 확인되었다. 이 결과는 6개 행정구역별 가뭄사상에서도 유사하게 나타나는 것으로 확인되었다.

4.2 지역별 분석

본 연구에서는 Barnes 객관분석 기법(Barnes, 1964)을 이용하여 SPI, SSI 및 이변량 결합가뭄지수에 대한 가뭄분포도를 작성한 후 과거 가뭄사례를 토대로 지역별 가뭄해석의 활용성을 평가하였다. 평가기간은 1992년 6~9월, 2008년 9월~2009년 4월의 가뭄사상을 선정하였다.

1992년의 가뭄은 6월을 시작으로 9월에 해갈된 사례로 6월에 전북, 전남, 충북 및 충남을 시작으로 7월, 8월에 경기 및 강원 일부를 제외한 남한 전역에 확장되었으며, 9월에 전반적으로 해갈되었다. Fig. 4는 1992년 6월에서 1992년 9월까지 1개월 단위로 SPI, SSI 및 이변량 결합가뭄지수의 가뭄분포도를 나타낸 것이다. SPI는 6월 전라도 및 경상도 지역을 중심으로 가뭄이 시작되다가 7월, 8월에 충청도 및 경기도를 중심으로 확장된 후, 9월에 모두 해갈된 것으로 나타났으며, SSI는 7월 전라도 및 경상도 지역의 가뭄을 시작으로 8월까지 충청도 및 강원도 일부 지역까지 확장되다가 9월에 해갈된 것으로 나타났다. 이변량 결합가뭄지수는 SPI와 같이 6월에 가뭄이 시작되고 7월, 8월에는 서울과 경기도 및 강원도 일부를 제외하고 모든 지역에서 가뭄이 발생하였으며, 9월에 대부분의 지역의 가뭄이 해갈되는 것으로 나타났다.

2008년 가뭄은 피해기간이 2008년 9월부터 시작하여 2009년 4월까지 이어진 대가뭄으로 볼 수 있다. 피해지역은 강원 및 중부 내륙지방과 남부지방 전역에 심각하게 발생하였으며, 특히 태백시는 90일간의 제한급수가 실시되는 등 피해가 가장 극심한 지역인 것으로 조사되었다. Fig. 5는 2008년 9월에서 2009년 3월까지 2개월 단위로 지수별 가뭄분포도를 나타낸 것이다. SPI의 경우 9월에 남부지방을 중심으로 가뭄이 발달하여 11월 및 2009년 1월

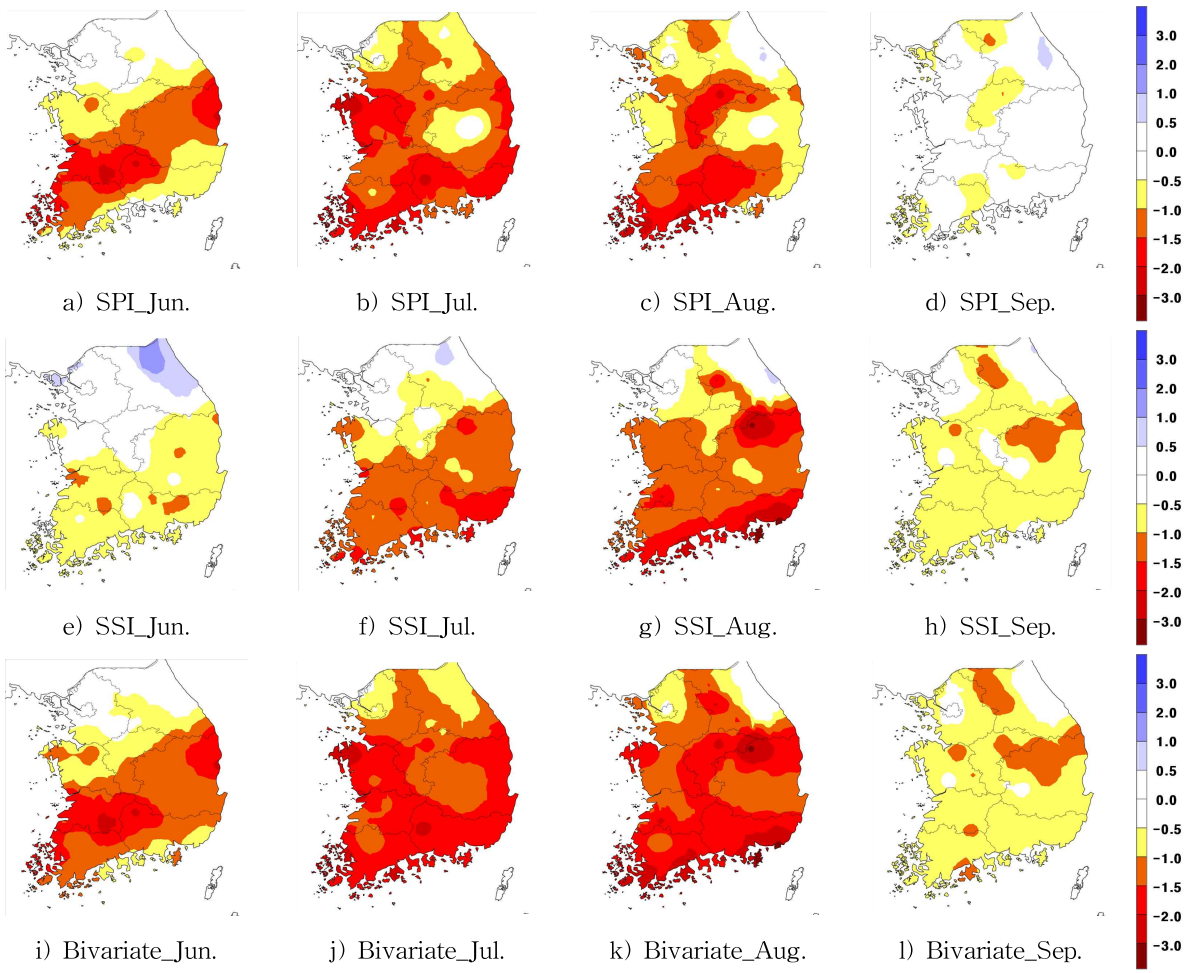


Fig. 4. Spatial Analysis of SPI, SSI and Bivariate Joint Drought Index (1992.06~1992.09)

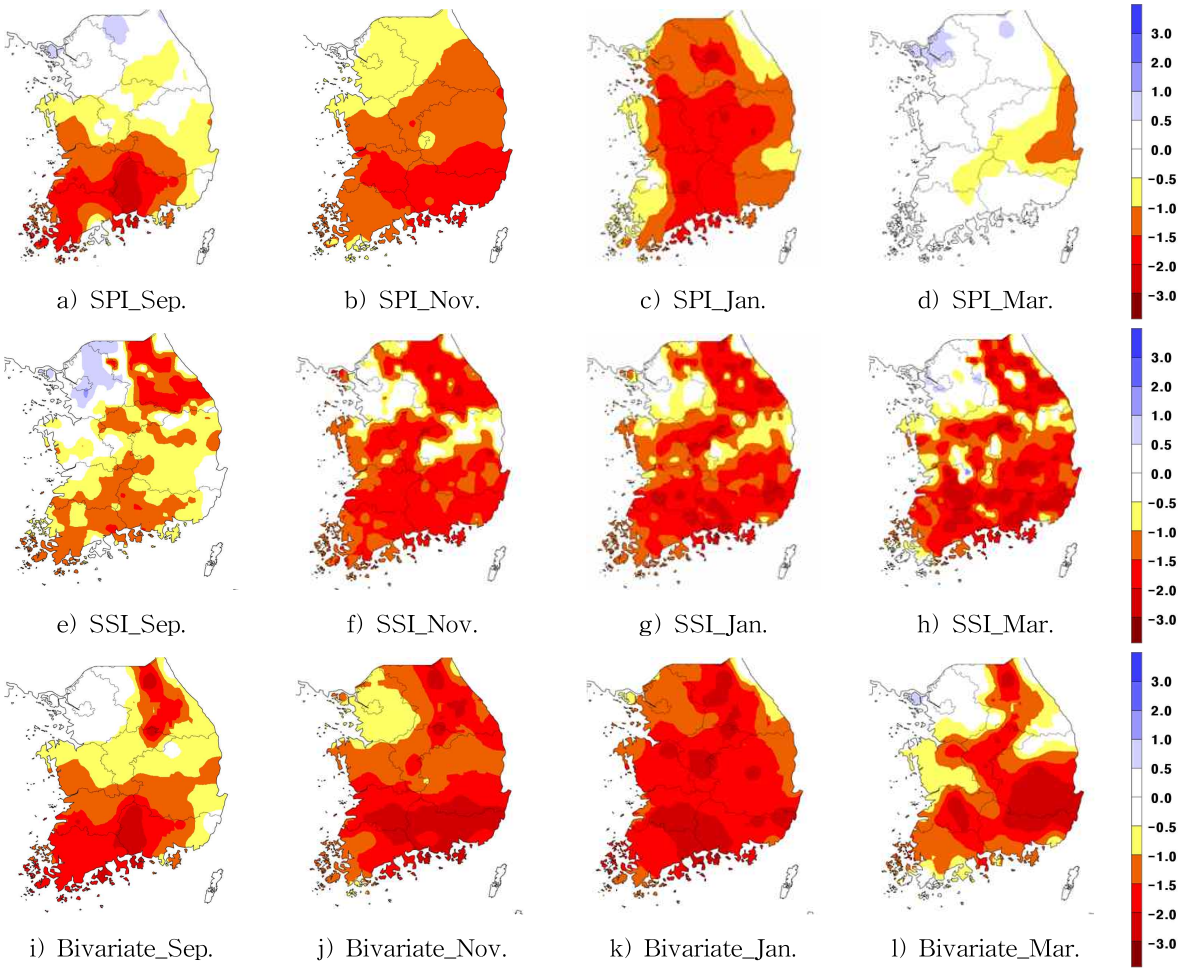


Fig. 5. Spatial Analysis of SPI, SSI and Bivariate Joint Drought Index (2008.09~2009.03)

까지 지속되다가 3월에는 경상도 일부를 제외한 모든 지역에서 가뭄이 해갈된 것으로 나타났다. SSI는 9월에 강원지역과 남부지방을 중심으로 가뭄이 발달하여 11월 및 1월에는 서울, 경기 및 경상도 일부를 제외한 남한 전역에 극심한 가뭄이 발생한 것으로 나타났으며, 2009년 3월 이후에도 가뭄이 지속되는 것으로 나타났다. 이변량 결합가뭄지수는 9월에 SPI, SSI와 같이 남부 및 강원도 지역의 가뭄의 상황을 적절히 재현하였으며, 11월 및 1월에는 SPI 및 SSI보다 더욱 심각한 수준의 가뭄 상황을 나타내었다. 또한, 3월에는 SSI와 같이 가뭄이 계속 지속되는 것으로 나타나 활용성이 높은 것으로 확인되었다.

4.3 ROC 분석

Fig. 6은 5개 행정구역별로 SPI, SSI 및 이변량 결합가뭄지수에 대한 ROC 분석 결과이다. 그림의 X축은 행정구역인 경기(GG), 강원(KW), 충청(CC), 전라(JL) 및 경상(GS)도를 의미한다. 가뭄지수로부터 산정된 ROC score

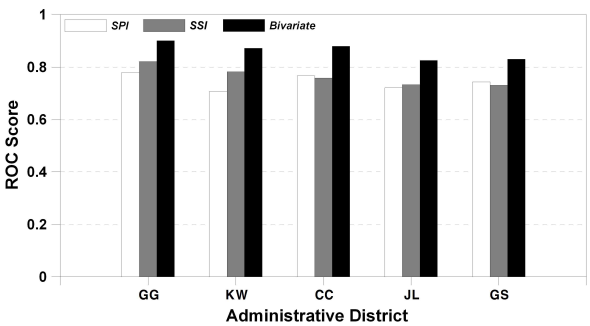


Fig. 6. Evaluation of Drought Indices (SPI, SSI, Bivariate) Using ROC Analysis

를 살펴보면 경기도는 SPI 0.78, SSI 0.82, 이변량 결합가뭄지수 0.90, 강원도는 SPI 0.71, SSI 0.78, 이변량 결합가뭄지수 0.87로 이변량 결합가뭄지수의 score가 SPI 및 SSI 보다 더 높게 산정된 것으로 나타났다. 또한 충청도는 SPI 0.77, SSI 0.76, 이변량 결합가뭄지수 0.88, 전라도는 SPI 0.72, SSI 0.73, 이변량 결합가뭄지수 0.83, 경상도

는 SPI 0.74, SSI 0.73, 이변량 결합가뭄지수 0.83로 SPI 및 SSI의 차이는 미비하고 이변량 결합가뭄지수의 score는 높은 것으로 확인되었다. 따라서 금회 산정된 이변량 결합가뭄지수는 국내 가뭄해석에 있어 활용성이 높다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 Copula 함수를 이용하여 이변량 결합가뭄지수를 생산하고 국내 가뭄해석의 활용성을 평가하였다. 본 연구의 주요 내용 및 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 이변량 결합가뭄지수 산정을 위해 결합분포함수는 Clayton copula 함수, 매개변수 추정은 교정방법을 이용하였다. 입력변수는 가뭄해석에 활용성이 높은 강수량 및 토양수분량을 선정하였다. 우리나라 59개 ASOS 지점에 대해 이변량 결합가뭄지수를 산정하고 SPI 및 SSI와 함께 시계열 분석을 수행하였다. 1991~2012년까지의 과거 가뭄사례와의 비교분석 결과 이변량 지수는 행정구역별 가뭄사례를 적절히 재현하였으며, 특히 가뭄의 시작은 SPI, 해갈은 SSI의 거동과 유사하고 두 지수가 모두 가뭄일 경우 지수의 값이 더 낮게 추정되었다.
2) 과거 가뭄기간 동안에 SPI, SSI 및 이변량 결합가뭄지수에 대한 분포도를 작성하여 지역별 가뭄해석의 활용성을 평가하였다. 1992년 6~9월 사례의 경우 이변량 결합가뭄지수는 SPI와 같이 6월에 가뭄이 시작되고 7월, 8월에는 서울과 경기도 및 강원도 일부를 제외하고 모든 지역에서 가뭄이 발생하였으며, 9월에 대부분의 지역의 가뭄이 해갈되는 것으로 나타났다. 2008년 9월~2009년 4월 사례에서는 9월에 SPI, SSI와 같이 남부 및 강원도 지역의 가뭄의 상황을 적절히 재현하였으며, 11월 및 1월에는 SPI 및 SSI보다 더욱 심각한 수준의 가뭄 상황을 나타내었다. 또한, 3월에는 SSI와 같이 가뭄이 계속 지속되는 것으로 나타나 이변량 결합가뭄지수는 과거 지역적 가뭄 상황을 적절히 재현하였다.
3) ROC 분석결과 SPI의 경우 경기, 강원, 충청, 전라 및 경상도 지역에서 각각 0.78, 0.71, 0.77, 0.72, 0.74, SSI는 0.82, 0.78, 0.76, 0.73, 0.73, 이변량 결합가뭄지수는 0.90, 0.87, 0.88, 0.83, 0.83으로 이변량 결합가뭄지수의 score가 두 지수보다 가장 높게 산정되었다.

본 연구에서 산정한 이변량 결합가뭄지수는 기존 단일변량 가뭄지수의 해석적 한계를 보완하고 국내 가뭄해석의 활용성이 우수하다는 점에서 그 가치가 높다고 판단된다. 앞으로의 국내 가뭄해석은 본 연구에서와 같이 여러 변수를 결합한 가뭄지수의 활용이 필요하다고 사료된다. 추후, 여러 Copula 함수를 이용하여 가뭄지수의 산정 및 평가가 필요하며, 두 개 이상의 변수들을 결합한 가뭄지수 생산에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2012~3100)의 지원과 2011년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NO. 2011-0030040)을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

References

Abromowitz, M., and Stegun, I.A. (1964). *Handbook of Mathematical Function*. U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series, No. 55.

AghaKouchak, A., Bárdossy, A., and Habib, E. (2010). "Conditional simulation of remotely sensed rainfall data using a non-Gaussian v-transformed copula." *Advances in Water Resources*, Vol. 33, No. 6, pp. 624-634.

Bae, D.H., and Son, K.H. (2012). "Status and future direction of drought prediction in Korea." *Magazine of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 5, pp. 46-54.

Bae, D.H., Son, K.H., Ahn, J.B., Hong, J.Y., Kim, G.S., Chung, J.S., Jung, U.S., and Kim, J.H. (2011). "Development of real-time drought monitoring and prediction system on Korea & East Asia region." *Atmosphere. Korean Meteorological Society*, Vol. 22, No. 2, pp. 267-277.

Bae, D.H., Son, K.H., and Kim, H.E. (2013). "Derivation & evaluation of drought threshold level considering hydro-meteorological data on South Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 3, pp. 287-299.

Bardossy, A. (2006). "Copula-based geostatistical models for groundwater quality parameters." *Water Resources Research*, Vol. 42, No. 11, W11416.

Barnes, S. (1964). "A technique for maximizing details in numerical map analysis." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 3, No. 4, pp. 395-409.

Cherubini, U., Luciano, E., and Vecchiato, W. (2004). *Copula Methods in Finance.* The Wiley Finance Series, John Wiley & Sons, Ltd.

Favre, A.C., Adlouni, S.E., Perreault, L., Thiémonge, N., and Bobée, B. (2004). "Multivariate hydrological frequency analysis using copulas." *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 1, W01101.

Hao, Z., and AghaKouchak, A. (2013). "Multivariate standardized drought Index: A parametric multi-index model." *Advances in Water Resources*, Vol. 57, pp. 12-18.

Keyantash, J., and Dracup, J.A. (2002). "The quantification of drought: An evaluation of drought indices." *American Meteorological Society*, Vol. 83, No. 8, pp. 1167-1180.

Keyantash, J.A. (2004). "An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage." *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 9, W09304.

Kim, G.S., and Lee, J.W. (2011). "Evaluation of drought indices using the drought records." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 8, pp. 639-652.

Kim, S.D., Ryu, J.S., Oh, K.R., and Jeong, S.M. (2012). "An application of copulas-based joint drought index for determining comprehensive drought conditions." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 12, No. 1, pp. 223-230.

Korea Meteorological Administration (KMA) (2012). *Development of Hydro-meteorological Early Warning System for Response to Climate Change.*

Kwak, J.W., Kim, D.G., Noh, H.S., Vijay, P., Singh, and Kim, H.S. (2013a). "Case Study: Hydrological Drought Analysis on Namhan River Basin, Korea-(1) Derivation of Joint Probability Distribution." *Journal of Hydrologic Engineering*, Accepted

Kwak, J.W., Lee, S.D., Kim, Y.S., and Kim, H.S. (2013b). "Return period estimation of droughts using drought variables from standardized precipitation index." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 8, pp. 795-805. (in Korean)

Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., Burges, S.J. (1994). "A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, No. D7, pp. 14415-14428

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.* 17-22 January, Anaheim, California.

National Drought Mitigation Center (NDMC) (2002). *Three Years and Counting: What's New with the Drought Monitor.*

National Emergency Management Agency (NEMA) (2013). *Establishment of National Drought Disaster Information System.*

Palmer, W.C. (1965). Meteorological Drought, Research paper. No. 45, U.S. Weather Bureau.

Schweizer, B., and Sklar, A. (1983). *Probabilistic Metric Spaces.* North-Holland, New York

Serinaldi, F., Bonaccorso, B., Cancelliere, A., and Grimaldi, S. (2009). "Probabilistic characterization of drought properties through copulas." *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 34, No. 10-12, pp. 596- 605.

Sheffield, J., and Wood, E.F. (2008). "Global trends and variability in soil moisture and drought characteristics, 1950-2000, from observation-driven simulations of the terrestrial hydrologic cycle." *Journal of Climate*, Vol. 21, No. 3, pp. 432-458.

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., 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.

Shukla, S., and Wood, A.W. (2008). "Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought." *Geophysical Research Letters*, doi:10.1029/2007GL032487

Sklar, K. (1959). "Fontions de reprartition a n dimensions et leurs marges." Publ. Inst. Statist. Univ. Paris 8, pp. 11.

Son, K.H., Bae, D.H., and Chung, J.S. (2011). “Drought analysis and assessment by using land surface model on South Korea.” *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 8, pp. 667-681.

Yoo, J.Y., Shin, J.Y., Kim, D.H., and Kim, T.W. (2013). “Drought risk analysis using stochastic rainfall generation model and copula functions.” *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 4, pp. 425-437.

논문번호: 13-091	접수: 2013.11.14
수정일자: 2013.12.09/2014.01.07	심사완료: 2014.01.07