

Copulas 기반의 결합가뭄지수를 이용한 가뭄심도-영향면적 -지속기간 곡선의 적용

An Application of Drought Severity-Area-Duration Curves Using Copulas -Based Joint Drought Index

류 정 수* / 안 재 현** / 김 상 단***

Ryu, Jung Su / Ahn, Jaehyun / Kim, Sangdan

Abstract

In this study, drought Severity-affected Area-drought Duration (SAD) curves are analyzed in order to examine temporal and spatial behavior of drought. A copulas-based joint drought index which is studied recently is applied to express the severity of drought. JDIs across the country with 60 points are calculated monthly basis, and using EOF and Kriging techniques, locational JDIs are spatially extended into grid-based JDIs with spatial resolution of 10×10 km. JDIs by lattice is analyzed by drought duration and by affected area, and JDI-based SAD curves are created to represent Korean historical drought events. Though created curves, drought events that occurred in the past in our country can be spatially and temporally characterized. In addition, curves are expected to contribute to determine the exact situation on the current drought condition have an impact to some extent.

Keywords : copulas, drought, EOF, joint drought index (JDI), kriging

요 지

본 연구에서는 copulas 기반의 결합가뭄지수를 적용한 가뭄심도-영향면적-지속기간 곡선을 작성하여 가뭄의 시공간적 거동을 살펴보았다. 우리나라 전국 60개 지점의 기상청 월 강수량 자료로부터 JDI를 산정한 후, 이를 다시 EOF와 Kriging 기법을 이용하여 10×10 km의 공간적 해상도를 가진 JDI 값으로 할당하였다. 격자기반의 JDIs를 가뭄의 지속기간별 영향면적별로 분석하고, 우리나라의 가뭄 사상을 표현하기 위하여 JDI-SAD 곡선을 작성하였다. JDI-SAD 곡선을 통하여 과거에 발생한 가뭄 사상을 시공간적으로 특성화할 수 있다. 또한 현재의 가뭄 상황에 대한 정확한 영향평가에 기여할 것으로 기대된다.

핵심용어 : Copulas, 가뭄, EOF, 결합가뭄지수, Kriging

1. 서 론

가뭄은 건조한 지역뿐만 아니라 어느 정도는 습한 지역

에서도 영향을 미치는 일반적인 자연현상이다. 가뭄은 일정 기간 동안의 평소보다 작은 강수량 부족에서 출발하기 때문에 댐과 같은 수자원 저류 시설을 구비함으로써 어느

*부경대학교 환경공학과 석사과정 (e-mail: hosinim@nate.com)

Dept. of Env. Engrg., Pukyong National Univ., 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

** 서경대학교 토목건축공학과 부교수 (e-mail: wrr@skuniv.ac.kr)

Associate Pfor., Dept. of Architecture and Civil Engrg., Seo Kyeong Univ., 16-1 Jungneung-dong, Sungbuk-gu, Seoul 136-704, Korea

*** 교신저자, 부경대학교 환경공학과 부교수 (e-mail: skim@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6529)

Corresponding Author, Associate Pfor., Dept. of Env. Engrg., Pukyong National Univ., 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

정도는 대비할 수 있으나, 심한 가뭄이 들 경우에는 도시와 농촌 지역에 충분한 용수를 공급할 수 없는 경우가 발생하게 되기도 하며, 수자원 인프라가 제대로 갖추어지지 못한 지역의 경우에는 빈번한 용수부족상황에 직면하게 되기도 한다. Wilhite (2000)은 가뭄이 세계에서 가장 피해액이 큰 자연 재해로 지적하기도 하였다. 그러므로 가뭄 특성을 잘 이해하는 것은 잘 준비된 방재계획의 필수적인 요소가 된다.

가뭄은 일반적으로 지점별로 분석되어 왔는데, 이는 수자원 관련 전문가들이 일반적으로 홍수분석 틀을 보다 선호하기 때문이기도 할 것이다. 하지만 가뭄은 시작을 인식하기 어렵고 진행속도가 느리며 국부적인 지역에서 발현하다기 보다는 공간적으로 넓은 지역에 전파되는 특성을 가진 것으로 볼 수 있다. 따라서 현재의 가뭄에 대한 정확한 상황판단을 위해서는 가뭄의 시간적 공간적 특성을 함께 고려한 연구가 필요할 것이다(김보경 등, 2006).

일반적으로 가뭄상황을 판단하고 평가하기위해서 가뭄지수를 이용하게 되는데 이러한 가뭄지수에는 PDSI (Palmer Drought Severity Index), SWSI (Surface Water Supply Index), SPI (Standardized Precipitation Index), SMI (Soil Moisture Index), CMI (Crop Moisture Index) 등이 있다. 이 중에서 PDSI와 SPI가 현재까지 국내·외에서 가장 널리 쓰이고 있으며, 특히 SPI의 경우, 명확한 확률론적 성질을 가지고 있기 때문에 다양한 지역의 가뭄을 표현하고 지역별 가뭄의 상대적인 심도를 비교하는데 유용하다. 또한 SPI는 다양한 시간 스케일에 대하여 적용함으로써 기상학적 가뭄과 농업적 가뭄, 그리고 수문학적 가뭄 등에 대하여 효과적으로 설명할 수 있는 장점을 가지고 있다.

하지만 다양한 형태의 가뭄을 평가하기 위하여 다양한 시간 스케일에 대하여 적용함으로써 다른 시간 스케일을 가진 SPIs 사이의 일관성 없는 결과가 도출될 때에는 가뭄에 대한 대책을 수립하는 과정에서 필요한 의사결정 지원 자료 생산에 큰 혼란을 초래할 가능성이 있다. 따라서 전체적인 가뭄 상황을 판단하기 위해서는 다양한 시간 스케일을 가진 SPIs를 동시에 검토할 필요가 있다. 이러한 SPI의 한계점을 보완하기 위하여 copulas를 이용하여 다양한 지속시간별 SPI를 동시에 고려함으로써, 기존의 SPI가 가지고 있는 장점을 그대로 유지하여 가뭄의 전체적인 상황을 보다 우수하게 표현할 수 있는 결합가뭄지수(Joint Drought Index, JDI)가 최근 적용되고 있는 추세이다(Kao and Govindaraju, 2010; 김상단 등, 2012).

이에 본 연구에서는 기 개발된 Copulas 기반의 JDI를 이용하여 가뭄심도를 정량화한 후, 이를 바탕으로 가뭄심도

-가뭄영향면적-가뭄지속기간(drought Severity-drought affected Area-drought Duration, SAD) 곡선을 작성하여 지속기간 및 영향면적에 따른 우리나라 과거 가뭄사상들의 시공간적인 거동을 특성화하고자 한다. 작성된 우리나라 대표 SAD 곡선은 현재 가뭄상황이 과거 가뭄상황과 비교해 보았을 때 시공간적으로 어느 정도의 영향력을 가질 수 있을 것인지에 대한 정확한 상황을 판단하는데 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구방법

2.1 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)

표준강수지수는 McKee et al. (1993)이 강수의 부족이 지수, 저수지 저수량, 토양수분, 적설 및 하천 유량에 다른 영향을 미친다는데 착안하여 개발한 가뭄지수로서 현재 많은 나라에서 가뭄대책 마련을 위한 지수로 적용하고 있다. SPI는 월강수량만을 고려하여 해당 지점의 수문학적 건조 상태를 상대적으로 간단하게 정량화하여 보여주는 가뭄지수이다(유철상 등, 2006). SPI의 산정절차는 다음과 같다. 우선 최소 30년 이상의 월 강수량 시계열을 이용하여 특정 지속시간 단위(예를 들어, 3개월 또는 12개월 등)에 대하여 이동평균시계열을 구성한다. 구성된 이동평균시계열을 다시 월별로 분석하여 최적 확률분포형을 결정한다. 월별로(1월부터 12월까지) 산정한 확률밀도함수를 이용하여 앞서 추정된 이동 평균 강수시계열에 대응하는 누가 확률을 산정한다. 이 누가확률 값을 다시 표준정규누가확률의 함수에 역으로 적용시켜 표준강수지수를 산정한다.

2.2 결합가뭄지수(Joint Drought Index, JDI)

SPI가 가뭄을 평가하고 현재의 가뭄상황을 판단하는데 널리 이용되고 있지만, 서로 다른 지속시간을 가진 SPIs (예를 들어, 3개월 지속시간 SPI 즉, SPI-3와 12개월 지속시간 SPI 즉, SPI-12)가 때때로 일관성 없는 결과를 야기할 경우가 있다. 따라서 다양한 시간적 규모를 가진 SPIs가 종합적으로 검토되어야 보다 현실적인 가뭄상황판단이 가능하다. Kao and Govindaraju (2010)는 다양한 가뭄과 연관된 지표로부터 copulas를 사용하여 확률에 기초한 전체 가뭄 지수의 계산을 가능하게 하는 새로운 가뭄지표인 결합가뭄지수(Joint Drought Index, JDI)를 제안하였다.

결합가뭄지수에 대한 신뢰할만한 다변량 통계 모델을 구성하기 위해서는 충분히 긴 기간의 관측 자료를 필요로

한다. 따라서 본 연구에서는 전국 60개 지점의 30년간(1981년부터 2010년까지)의 월강수량 자료로부터 1개월부터 12개월까지 지속시간을 가진 표준강수지수를 산정한 후, 12개의 SPI 시계열의 복잡한 상호상관구조를 구성하기 위하여 Nelsen (2006)이 제안한 결합누가확률의 순위통계량에 기초한 경험적 copulas를 적용하였다. 표본크기 n , d -차원 경험적 copula C_n 은 다음과 같다.

$$C_n\left(\frac{k_1}{n}, \frac{k_2}{n}, \dots, \frac{k_d}{n}\right) = \frac{a}{n} \quad (1)$$

여기서, a 는 $1 \leq k_1, \dots, k_d \leq n$ 이 성립하는 표본으로부터의 순위통계량을 $X_{1(k_1)}, \dots, X_{d(k_d)}$ 라 정의할 때, $X_1 \leq X_{1(k_1)}, \dots, X_d \leq X_{d(k_d)}$ 을 만족하는 $\{X_1, \dots, X_d\}$ 의 개수이다. 이를 통하여 각 지속시간별 SPIs 사이의 상관구조를 구성할 수 있다.

Copulas를 통하여 구성된 상관구조의 확률측도를 산정하기 위해서 Kendall 분포 함수(K_C)를 사용하였다. 이변량에 대한 Gumbel-Hougaard Archimedean copula의 예는 Fig. 1과 같다. Fig. 1이 포함하는 곡선들은 $C(u, v) = q$ 와 같은 등급 곡선을 나타낸다. 여기서 K_C 는 주어진 q 보다 작거나 같은($C(u, v) \leq q$ (A부분에 대하여 $K_C(0.25)$, A+B는 $K_C(0.5)$, A+B+C는 $K_C(0.75)$)) copula 값을 가진 음영면적의 확률측도를 산출한다. 본 연구에서는 아래와 같은 경험적 Kendall 분포 함수(K_C)를 사용하였다.

$$K_{C_n}\left(\frac{l}{n}\right) = \frac{b}{n} \quad (2)$$

여기서, b 는 $C_n(k_1/n, \dots, k_d/n) \leq l/n$ 을 가진 표본 $\{X_1, \dots, X_d\}$ 의 개수다. 이것은 표준강수지수와 마찬가지로 표준정규누가확률의 함수에 역으로 적용시켜 결합가뭄지수로 나타낼 수 있다. Fig. 2는 기상청 부산지점의 월 강수량 자료로

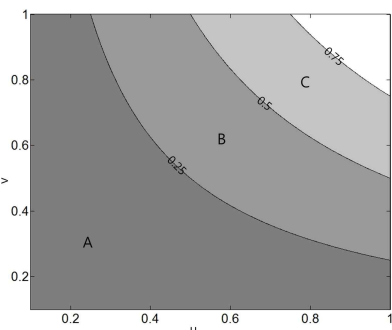


Fig 1. An example of Kendall Distribution Function K_C (Gumbel-Hougaard Archimedean copulas with dependence parameter $\theta = 2$)

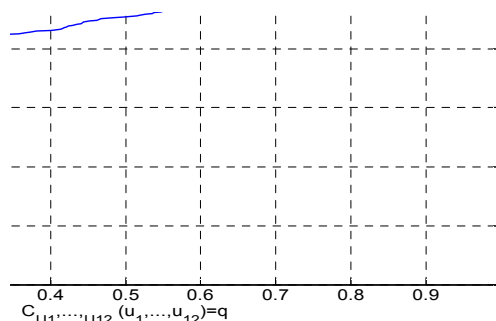


Fig 2. Kendall Distribution Function $K_C(q) = P[C_{U_1, \dots, U_{12}}(U_1, \dots, U_{12}) \leq q]$ of copulas $C_{U_1, \dots, U_{12}}(U_1, \dots, U_{12})$ of Busan site

부터 도출한 $K_C(t)$ 를 보여주고 있다. Fig. 2에서 0.4보다 작은 copula q 값을 가진 사상의 확률은 약 0.86이다.

$$JDI = \phi^{-1}(K_C(q)) = \phi^{-1}(P[C_{U_1, \dots, U_{12}}(U_1, \dots, U_{12}) \leq q]) \quad (3)$$

따라서 표준강수지수와 마찬가지로 양의 값을 가지는 JDI ($0.5 < K_C < 1$)는 습윤 상황을 의미하고, 음의 JDI ($0 < K_C < 0.5$)는 가뭄 상황을 나타낸다(김상단 등, 2012).

2.3 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function, EOF)

자연현상의 공간적 변동성은 주로 점 형태로 구성된 관측 망으로부터 얻어진 공간자료를 통하여 파악될 수 있다. 강수량 또한 이러한 점 구조로 된 관측망의 네트워크를 통하여 공간적인 패턴을 분석해 볼 수 있다. 이때, 어떤 자연현상의 공간적인 변동성의 주된 특징은 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function, EOF)라 불리는 기법에 의해 압축적으로 설명될 수 있으며 원자료의 차원을 줄이는데 그 목적이 있다. 이러한 EOF 분석은 학문분야에 따라 주성분분석(Principal Component Analysis, PCA) 또는 Karhunen-Loeve Basis Function이라 불리며 넓은 의미에서 통계기법 중의 하나로 분류될 수 있다(Yoo and Kim, 2004).

EOF 분석은 기상학, 지리학, 영상처리, 전자신호 등 여러 분야에서 사용되어 왔는데, 최근 들어 수문학에서도 점차 적용 빈도가 증가하고 있다. EOF 분석을 수행한 국외 연구로는 Tomozeju et al. (2000)이 강수량의 시계열 자료를 이용하여 여름철 강수량의 시·공간 분석을 수행한 바 있으며 Hisdal and Tallaksen (2003)은 강수량과 유량자료를 이용하여 덴마크의 가뭄특성을 추출하였다. 국내 연구로는 토양수분자료의 EOF분석을 수행한 Yoo and Kim (2004), 한강유역 강수의 산지효과 추정에 EOF 분석을

적용한 유철상 등(2004)의 연구, 가뭄의 시공간적 특성을 연구하기 위해 SPI의 EOF 분석을 이용한 유철상 등(2006), 장연규 등(2006), 경민수 등(2007), Kim et al. (2011)을 들 수 있다.

EOF는 일반적으로 자료의 선형변환을 통해 서로 상관성 없이 분포된 자료들을 구성하며 이로부터 원자료 변동성의 대부분을 설명할 수 있으면서도 더 작은 수의 자료들을 얻는 통계적 기법이다. 그러나 본 연구에서는 EOF 분석을 수행함에 있어서 차원축약보다는 계산절차의 간소화 및 공간적인 상관성의 보존에 주된 목적을 두었다. 예를 들어 본 연구의 경우 월별로 도출되는 공간정보를 60개의 EOF로 분리하지 않고 직접 Kriging을 실시할 경우, 매 월별로 Kriging 분석을 수행해야하는 문제가 발생하게 된다. 다시 말해 30년을 분석할 경우, 30×12 회의 Kriging 분석이 수행된다. 이때 Kriging 기법 자체가 가지고 있는 불확실성으로 인하여 이로부터 도출된 격자자료의 일부가 비현실적인 공간특성을 가진 자료로 도출되는 경우도 존재하게 된다. 그러나 30년을 분석할 경우에 월별로 도출되는 360개월의 공간정보를 60개의 EOF로 분리할 경우에는 60회의 Kriging 분석이 수행된다. 또한 각각의 EOF는 고유의 공간적인 특성뿐만 아니라 상태적인 가중치가 부여됨에 따라서 보다 현실적인 공간특성을 가진 자료가 도출될 수 있는 장점이 있다(최치현 등, 2010). EOF의 추정은 원자료 행렬에 대하여 비정적치분해 혹은 고유치분해(Single Value Decomposition; SVD)를 수행하여 얻을 수 있으며 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$A = U \times S \times V^T \quad (4)$$

여기서, 행렬 U 의 각 열을 A 의 EOF라 하며 각각의 EOF는 서로 독립적인 성분이다. 행렬 S 의 대각요소들은 고유값으로 이는 EOF가 설명하는 원자료의 분산 값으로 모든 EOF의 고유값을 더하면 원자료의 분산이 된다. 행렬 V 의 각 열은 시계열의 계수로 행렬 U 의 열에 대응하는 EOF의 시간적 전개를 나타낸다. 행렬 A 는 관측소의 개수(60개)와 JDI 시계열의 시간적 길이(348개월)로 구성되어 60×348 의 크기를 지니며 비정적치 분해를 수행한 행렬 U 는 60×60 의 크기로 표현된다. 여기서 30년 자료의 경우 360개월로 표현되어야 하지만 시계열 자료의 통일을 위하여 첫 해의 12개월을 제외하였기 때문이다. 따라서 행렬 S 는 60×348 의 크기로 대각 요소는 각 EOF의 비정적치로 원자료의 분산값을 표현하며 각 EOF의 시계열 자료인 행렬 V 는 348×348 의 크기로 구성된다.

2.4 공간분포를 적용한 결합가뭄지수 산정

가뭄심도-가뭄면적-가뭄지속기간 곡선을 작성하기 위해서는 지점별 JDI 시계열로부터 도출한 EOFs를 공간적으로 확장할 필요가 있다. 공간적인 현상을 설명할 수 있는 수문변수는 인근 지점의 상황이 공간적 의존성 혹은 상관성을 포함하기 때문에 공간적으로 완전히 무작위적인 특성을 가질 수 없으며 이러한 특성에 의거하여 일부 공간적인 표본자료로 지역적 현상 및 변동성에 대한 공간적인 패턴구조로 설명할 수 있다(윤강훈 등, 2004). 수문변수의 공간적인 변동성은 주로 공간상관함수(spatial correlation function) 및 반분산(semivariogram) 등의 방법에 의해 정량화된다. 산출된 각각의 EOFs를 공간적으로 확장을 위하여 본 연구에서는 Kriging 기법을 적용하였는데, Kriging 기법은 기지점의 정보와 거리에 따라 변화하는 반분산(semivariogram)을 이용하여 공간상의 추정오차를 최소화하면서 구하고자 하는 지점의 값을 내삽(interpolation)하는 방법이다. 따라서 기지점 혹은 기준점으로부터 거리가 가까운 미지점은 그 값의 신뢰성이 높고 거리가 먼 지점일수록 신뢰성이 낮은 특성을 지니게 된다. 이러한 Kriging 기법은 내삽 외에도 최적화된 측정망을 구성하는 연구 등에 폭넓게 활용되고 있다(경민수 등, 2006).

따라서 본 연구에서는 Kriging 기법을 이용하여 60개 EOFs를 우리나라 육지를 대상으로 하여 해상도 10×10 km 기준으로 내삽하고 각각의 셀로 나누어 각 셀을 하나의 지점으로 간주하였다. 다시 말해 Eq. (4)에서 60×60 의 크기를 지닌 행렬 U 가 630×60 의 크기를 지닌 새로운 행렬 U' 로 확장되는 것을 의미한다. 따라서 공간적으로 확장된 JDI 행렬 A' 는 다음과 같이 표현된다.

$$A' = U' \times S \times V^T \quad (5)$$

2.5 가뭄심도-영향면적-가뭄지속기간의 곡선 작성

가뭄은 공간적으로 국지적이며 시간적으로 한시적인 홍수와는 달리 가뭄의 심도뿐만 아니라 가뭄이 지속되는 기간 및 가뭄에 영향을 받는 지역에 대한 이해가 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 앞서 공간 확장된 JDI를 이용하여 가뭄심도에 따른 가뭄의 영향면적과 지속기간을 고려하고자 한다. 최근에는 김호성 등(2010)과 최치현 등(2010)이 현재 뿐만 아니라 미래 기후상황에서의 SAD 곡선을 작성, 비교함으로써 극한 가뭄 사상에 대한 기후변화의 영향에 대한 연구를 수행한 바 있으며, Kim et al. (2011)의 연구에서는 공간 확장된 SPI를 이용하여 SAD

곡선을 작성하여 우리나라의 시공간적 가뭄특성을 분석하였다.

SAD 곡선 작성에 앞서 각 격자별로 구성된 JDI 시계열 $S(x, y, t)$ 을 이용하여 지속기간별 이동평균 시계열 $S_d(x, y, t)$ 을 다음과 같이 작성하게 된다.

$$S_d(x, y, t) = \frac{1}{d} \int_{t-d}^t S_d(x, y, \tau) d\tau \quad (6)$$

여기서, d 는 지속기간이다.

시계열 $S_d(x, y, t)$ 을 각각의 지속기간에 대하여 영향면적별로 공간적인 이동평균 자료 시계열 $S_{a,d}(x, y, t)$ 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$S_{a,d}(x, y, t) = \frac{1}{a^2} \int_{x-a}^x \int_{y-a}^y S_d(\zeta, \xi, t) d\zeta d\xi \quad (7)$$

여기서, a^2 는 영향면적이다.

그런 다음 지속기간별 영향면적별 공간 이동평균 자료 $S_{a,d}(x, y, t)$ 로부터 최소 JDI 값을 찾는다. 이때의 값이 해당 지속기간에 대한 해당 영향면적을 대표하는 가뭄심도 $s(a, d)$ 로 정의되며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s(a, d) = \min[S_{a,d}(x, y, t)] \text{ for all } x, y, t \quad (8)$$

이것을 다시 각각의 지속기간별 영향면적별로 도시하면 최종적으로 SAD 곡선이 작성된다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 기상청에서 제공하고 있는 전국 60개 지점에 대하여 1981년부터 2010년까지 30년간 자료를 이용하여 1개월부터 12개월까지의 지속기간을 가진 표준강수지수를 각각 산정하였다. 또한 전체적인 가뭄 상황을 판단하고 SPI의 한계점을 보완하고자 copulas를 이용하여 이들의 결합 확률을 구성한 후 결합가뭄지수를 산정하였다.

산정한 지점별 JDI 시계열을 EOF 분석과 Kriging 기법을 통하여 10×10 km 해상도의 공간분포자료로 확장하였다. 이와 같이 확장된 JDI 시계열을 대상으로 본 연구에서 목적으로 하는 가뭄심도-영향면적-지속기간 곡선을 작성하였다. 이때, 영향면적은 400, 1,600, 3,600, 6,400, 10,000, 14,400, 19,600, 25,600 km^2 을 각각 적용하여 공간적인 이동평균 자료 시계열 $S_{a,d}(x, y, t)$ 을 계산하였으며, 이들로 부터 최소 JDI 값을 찾아내어 지속기간별 영향면적별 가뭄심도 $s(a, d)$ 를 결정하였다. 가뭄의 지속기간은 1, 3, 6, 9, 12, 24개월로 선정하였으며 JDI를 이용한 우리나라 대

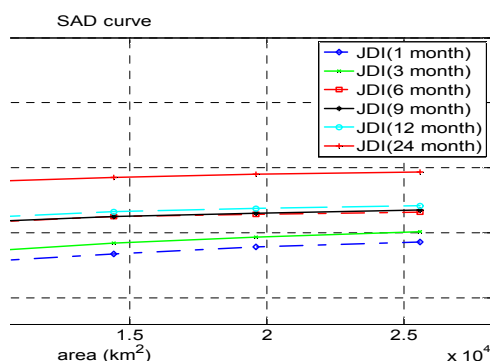


Fig. 3. SAD Curves for Joint Drought Index

표 SAD 곡선(JDI-SAD)을 Fig. 3에 도시하였다. 당연한 말이지만, 가뭄의 지속기간이 커질수록 동일한 가뭄의 영향면적에 대한 JDI와 SPIs의 가뭄심도가 모두 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 JDI와 3, 6, 12개월의 지속기간을 갖는 SPIs의 가뭄의 지속기간별 가뭄심도-영향면적-지속기간 곡선이다. 작성된 SAD 곡선은 가뭄의 지속기간이 짧고 영향면적이 작을수록 가뭄심도가 깊어지고, 각 지속기간에 따라 특정한 면적을 초과하는 경우 가뭄심도가 보다 완만하게 감소하는 형태를 보인다. 이것은 가뭄이 공간을 통하여 전파되는 특성으로 인하여 나타나는 결과로 판단된다. Fig. 4의 (a)에서 지속기간 1개월에 대한 가뭄심도는 영향면적이 400 km^2 일 때, -2.0 이하의 JDI로 극한 가뭄을 보였으며, 영향면적이 25,600 km^2 일 때, -1.5 이하의 심한 가뭄의 범주에 속하였다. 가뭄의 영향면적과 지속기간에 따른 JDI와 SPIs의 가뭄심도는 각 지속기간에서 대하여 가뭄의 영향면적이 증가함에 따라 가뭄심도가 감소하여 가뭄의 공간적 특성을 잘 반영한다고 할 수 있다. 여기서 특징적인 것은 SPIs의 경우, 각각의 SPI가 갖는 지속기간 이내의 가뭄의 지속기간 범위에서는 가뭄심도가 완만한 감소 형태를 나타내지만, SPI가 갖는 지속기간을 초과하는 가뭄의 지속기간에서는 급격한 가뭄심도의 감소를 보인다. 예를 들어 3개월 지속기간을 갖는 SPI는 가뭄의 영향면적에 대한 가뭄의 지속기간의 변화에 따른 차이가 1개월(Fig. 4의 (a))에서 3개월(Fig. 4의 (b)) 사이에서는 약 0.07~0.19인데 반하여 3개월(Fig. 4의 (c))에서 6개월(Fig. 4의 (d)) 사이에서는 약 0.39~0.54로 가뭄심도의 급격한 감소를 보인다. 반면 JDI의 경우에는 1, 3개월의 지속기간을 갖는 SAD 곡선과 6, 9, 12개월의 지속기간을 갖는 SAD 곡선, 그리고 24개월의 지속기간을 갖는 SAD 곡선으로 군집화되어 나타난다. 1, 3, 6, 9, 12개월의 지속기간을 갖는 JDI-SAD 곡선의 경우, 1개월부터 12개월의 지속기간을 갖는

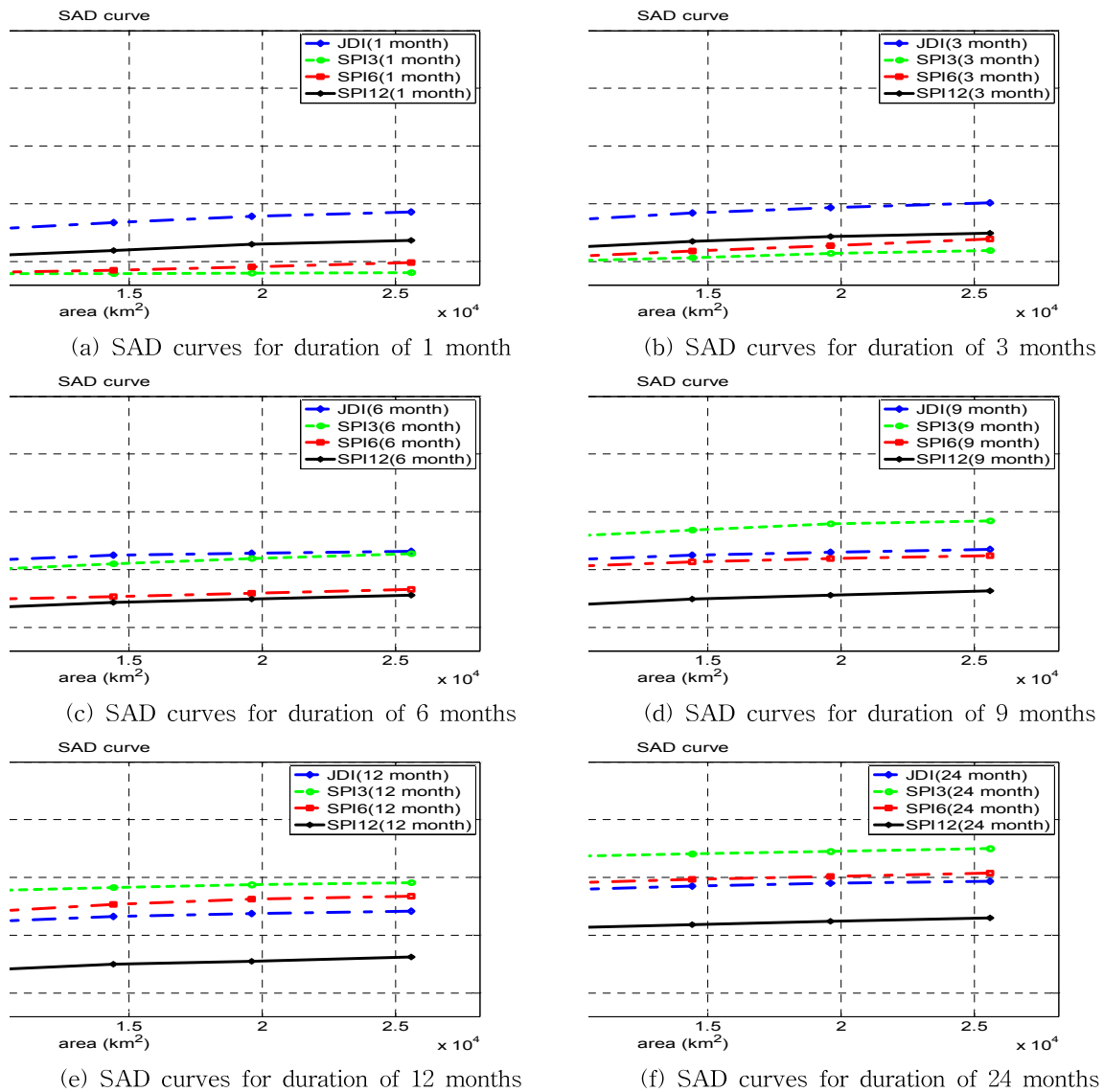


Fig. 4. SAD Curves for Drought Index (classified by duration)

SPIs의 개별적인 특성을 모두 반영하고 있으며, 24개월의 지속기간을 갖는 JDI-SAD 곡선의 경우에는 SPI가 가진 최장기간인 12개월을 초과하여 JDI가 내포하고 있는 지속시간의 범위를 초과한다. 따라서 JDI-SAD 곡선이 1, 3개월의 지속기간을 갖는 SAD (단기 가뭄), 6, 9, 12개월의 지속기간을 갖는 SAD (중·장기 가뭄), 24개월의 지속기간을 갖는 SAD 곡선으로 군집화 되어 나타나는 것으로 판단된다.

Fig. 5에서는 특정 가뭄 사상에 대한 시간적인 거동을 살펴보기 위하여 3개월의 지속기간을 갖는 JDI-SAD와 1994년 5월부터 1996년 9월까지의 기간에 대한 우리나라의 평균적인 JDI를 이용하여 가뭄의 진행 및 해결 과정을

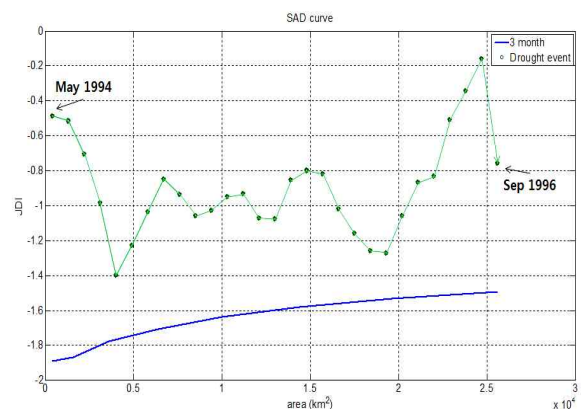


Fig. 5. SAD Curves for JDI of 3 Months Duration and Joint Drought Index of May. 94~Sep. 96

나타내었다. SAD 곡선의 경우, 지속기간별 영향면적별로 공간 이동 평균한 자료 $S_{a,d}(x, y, t)$ 로부터 최소 JDI 값을 찾고, 이때의 값이 해당 지속기간에 대한 해당 영향면적을 대표하는 가뭄심도 $s(a, d)$ 로 정의되기 때문에 공간 분포된 JDI를 평균한 시계열은 항상 SAD 곡선보다 상위에 위치하게 된다. Fig. 5를 살펴보면 1994년에서 1995년 사이에 발생한 가뭄의 경우, 1994년 7월에 가뭄이 발생하기 시작하여 1995년 7월까지 진행되어 1995년 8월에 다소 해갈되는 것을 확인할 수 있다.

JDI-SAD 곡선은 지속기간이 길어지고 이에 따른 영향면적이 증가함에 따라 가뭄심도가 보다 완만하게 낮아지고 있다. 다시 말해, 가뭄의 지속기간이 길어지고 가뭄의 영향면적이 광범위해짐에 따라 가뭄심도가 이에 비례하여 급격히 낮아지지 않는 것이다. 이것은 공간적으로 국지적이고, 시간적으로 한시적인 홍수와는 다르게 공간적으로 광역적이고, 시간적으로 비교적 장기적인 가뭄의 특징을 잘 표현해 주는 것으로 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 전국 60개 지점에 대한 강수량자료를 이용하여 가뭄심도에 따른 영향면적과 지속기간을 고려하여 가뭄심도-영향면적-지속기간 곡선을 작성하였다. 1981년부터 2010년까지 총 30년간의 강수량자료를 이용하여 1개월에서 12개월까지 지속시간을 갖는 SPI를 산정하였으며 이들의 결합 확률을 구성하여 JDI를 산정하였다. 또한 적용된 결합가뭄지수로 가뭄의 시공간적 특성을 파악하기 위하여 각각의 지점별 결합가뭄지수를 다시 EOF 및 Kriging 기법을 이용하여 공간적으로 확장하였다. 최종적으로 1, 3, 6, 9, 12, 24개월의 지속기간을 반영하여 가뭄심도-영향면적-지속기간 곡선을 작성하였다. 또한 3, 6, 12개월의 지속시간을 갖는 SPIs를 이용하여 SPI-SAD 곡선을 작성하고 JDI-SAD와 비교, 분석하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) JDI-SAD 및 SPI-SAD는 가뭄의 지속기간이 길어질수록 동일한 영향면적에 대한 가뭄심도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 가뭄심도-영향면적-지속기간의 관계곡선은 가뭄의 지속기간이 짧고, 가뭄의 영향면적이 작을수록 가뭄심도가 깊어지며 지속기간이 길고, 영향면적이 증가할수록 가뭄심도는 감소하였다.
- 2) 작성된 SAD 곡선은 각 지속기간에 따라 특정한 면적을 초과하는 경우에 가뭄심도가 보다 완만하게 감

소하는 형태를 보인다. 이것은 가뭄이 공간을 통하여 전파되는 특성으로 인하여 나타나는 결과로 판단된다. 또한 SAD 곡선은 지속기간이 길어지고 영향면적이 증가함에 따라 가뭄심도가 보다 완만하게 감소한다. 즉, 가뭄의 지속기간이 길어지고 가뭄의 영향면적이 광범위해짐에 따라 가뭄심도가 이에 비례하여 급격히 낮아지지 않는 것이다. 이것은 공간적으로 국지적이고, 시간적으로 한시적인 홍수와는 다르게 공간적으로 광역적이고, 시간적으로 비교적 장기적인 가뭄의 특징을 잘 표현해 주는 것으로 볼 수 있다.

- 3) SPI-SAD의 경우, 각각의 SPI가 갖는 지속시간 이내에 해당하는 가뭄의 지속기간 범위에서는 가뭄심도가 완만한 감소 형태를 나타내지만, SPI가 갖는 지속시간을 초과하는 가뭄의 지속기간에서는 급격한 가뭄심도의 감소를 보인다. 반면 JDI-SAD의 경우, 1, 3개월과 6, 9, 12개월, 그리고 24개월의 지속시간에서의 SAD 곡선으로 군집 특성을 나타낸다.

현재까지 우리나라를 비롯한 많은 외국에서 가뭄을 평가하고 판단하기 위한 지표로써 표준강수지수를 사용하고 있다. 하지만 본 연구에서는 향상된 가뭄평가를 위하여 결합가뭄지수를 이용한 가뭄심도-영향면적-지속기간 곡선을 작성하였다. 또한, 농업적 가뭄을 잘 대변하는 3개월 지속시간의 SPI, 수문학적 가뭄을 잘 대변하는 12개월 지속시간의 SPI 이 외에 6개월 지속시간을 갖는 SPI를 이용한 가뭄심도-영향면적-지속기간 곡선을 작성하여 비교, 분석을 실시하였다. 그 결과, 각각의 SPIs는 각각의 지속시간 이내의 가뭄의 지속기간에서는 가뭄을 과대평가하고, 각각의 지속시간을 초과하는 가뭄의 지속기간에 대해서는 가뭄을 과소평가하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 1개월에서 12개월까지 지속시간을 가진 SPIs의 결합 확률로 구성된 JDI는 단기가뭄 뿐만 아니라 장기가뭄의 특성을 모두 포함함으로써 더욱 객관적인 가뭄에 대한 묘사를 가능하게 하고, 또한 JDI-SAD가 SPI를 이용한 SAD보다 더 합리적인 결과를 도출한다고 판단할 수 있다.

마지막으로 가뭄의 잠재적인 영향 평가와 합리적인 수자원관리를 위해서는 시·공간적 특성이 고려된 가뭄 분석이 필요하다. 하지만 현재까지의 가뭄 평가는 시간적으로 고정된 표준강수지수에 대부분 의존하고 있다. 이러한 관점에서 다양한 지속시간의 표준강수지수가 고려된 결합가뭄지수를 적용한 가뭄심도-영향면적-지속기간 곡선을 통한 가뭄해석은 장·단기 혹은 극한 가뭄사상의 영향평가를 위해 적절하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업 [NEMA-자연-2011-40] 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

경민수, 김상단, 김보경, 김형수 (2007). “군집분석을 통한 수문학적 가뭄의 가뭄심도-가뭄면적-가뭄지속기간 곡선의 작성.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제3B호, pp. 267-276.

경민수, 김상단, 김형수, 박석근 (2006). “통계적 기법을 이용한 경안천 유역의 수질 측정망 구성.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제3B호, pp. 291-300.

김보경, 김상단, 이재수, 김형수 (2006). “가뭄의 시공간적 분포 특성 연구: 가뭄심도-가뭄면적-가뭄지속기간 곡선의 작성.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제1B호, pp. 69-78.

김상단, 류정수, 오국열, 정상만 (2012). “종합적인 가뭄상황판단을 위한 Copulas 기반의 결합가뭄지수의 적용,” **한국방재학회논문집**, 한국방재학회, 제12권, 제1호, pp. 223-230.

김호성, 박진혁, 윤재영, 김상단 (2010). “극한가뭄의 시공간적 특성에 대한 기후변화의 영향을 평가하기 위한 SAD 곡선의 적용.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제30권, 제6호, pp. 525-625.

유철상, 김대하, 김상단 (2006). “EOF 해석 및 다변량시계열 모형을 이용한 농업가뭄 대비능력의 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제7호, pp. 617-626.

유철상, 전경수, 김기욱 (2004) “한강유역 강수의 산지효과 추정: II. EOF 분석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제1B호, pp. 41-46.

윤강훈, 서봉철, 신현석 (2004). “크리깅 기법을 이용한 낙동강 유역 홍수강우의 공간해석 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제3호, pp. 233-240.

장연규, 김상단, 최계운 (2006). “SPI 가뭄지수의 EOF 분석

을 이용한 가뭄의 시공간적인 특성 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제8호, pp. 691-702.

최치현, 최대규, 김응석, 김상단 (2010). “SAD 해석을 이용한 기후변화가 가뭄의 시공간적 거동에 미치는 영향분석.” **한국방재학회논문집**, 한국방재학회, 제10권, 제6호, pp. 89-97.

Hisdal, H., and Tallaksen, L.M. (2003). “Estimation of regional meteorological and hydrological drought characteristics: a case study for Denmark.” *Journal of Hydrology*, Vol. 281, pp. 230-247.

Kao, S.C., and Govindaraju, R.S. (2010). “A copula-based joint deficit index for droughts.” *Journal of Hydrology*, Vol. 380, pp. 121-134, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.10.029.

Kim, S., Kim, B., Ahn, T.J., and Kim, H.S. (2011). “Spatio-temporal characterization of Korean drought using severity-area-duration curve analysis.” *Water and Environment Journal*, Vol. 25, pp. 22-30.

McKee, T.B., Doeskin, N.J., and Kleist, J. (1993). “The relationship of drought frequency and duration to time scales”, *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17-22 January, Anaheim, California, pp. 179-184.

Nelsen, R.B. (2006). *An Introduction to Copulas*, Springer, New York, pp. 17-23.

Tomozeju, R., Busuioc, A., Marletto, V., Zinoni, F., and Cacciamini, C. (2000). “Detection of Changes in the Summer Precipitation Time Series of the Region Emilia-Romagna, Italy.” *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 67, pp. 193-200.

Wilhite, D.A. (2000). *Drought as a natural hazard: concepts and definitions*, Routledge, pp. 3-18.

Yoo, C., and Kim, S. (2004). “EOF Analysis of surface soil moisture field variability.” *Advance in Water Resources*, Vol. 27, No. 8, pp. 831-842.

논문번호: 12-057	접수: 2012.06.01
수정일자: 2012.07.18	심사완료: 2012.07.18