

Hidden Markov Chain 모형과 이변량 코플라함수를 이용한 가뭄빈도분석

Drought Frequency Analysis Using Hidden Markov Chain Model and Bivariate Copula Function

전 시 영* / 김 용 탁** / 권 현 한***

Chun, Si-Young / Kim, Yong-Tak / Kwon, Hyun-Han

Abstract

This study applied a probabilistic-based hidden Markov model (HMM) to better characterize drought patterns. In addition, a copula-based bivariate drought frequency analysis was employed to further investigate return periods of the current drought condition in year 2015. The obtained results revealed that western Kangwon area was generally more vulnerable to drought risk than eastern Kangwon area using the 40-year data. Imjin-river watershed including Cheorwon area was the most vulnerable area in terms of severe drought events. Four stations in Han-river watershed showed a joint return period exceeding 1,000 years associated with the drought duration and severity in 2014-2015. Especially, current drought status in Northern Han-river and Imjin-river watershed is most severe drought exceeding 100-year return period.

Keywords : copula, drought, drought frequency, duration, hidden Markov model, severity

요 지

본 연구에서는 가뭄의 특성분석에 유리하며, 확률론적 접근이 가능한 은닉 마코프 모델(HMM) 기반의 가뭄 분석 기법을 적용하였다. HMM 기반의 가뭄의 심도뿐만 아니라 지속시간을 동시에 평가할 수 있도록 코플라 함수 기반의 이변량 가뭄빈도분석 기법을 도입하여 우리나라의 2015년 가뭄 빈도를 평가하였다. 가뭄빈도분석 결과 최근 40년 자료를 기준으로 영동지방에 비해 영서지방이 전체적으로 가뭄이 발생할 경우 가뭄의 심도가 큰 것으로 평가되었다. 심한가뭄의 발생 비율의 경우에 철원의 경우 10%를 상회하는 등 임진강 유역에서 상대적으로 심한가뭄의 발생비율이 크다는 것을 확인할 수 있었다. 한강유역 일부지점에서는 2014/2015년의 가뭄 지속기간 및 심도의 결합재현기간이 1,000년이 넘는 가뭄이 발생하고 있는 것으로 평가되었다. 특히 북한강 및 임진강 유역에 심한 가뭄이 발생하고 있으며 전반적으로 100년 이상의 기왕최대가뭄을 나타내고 있는 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 가뭄, 가뭄빈도, 심도, 은닉 마코프 모델, 지속기간, 코플라 함수

* 원광대학교 토목환경공학과 정교수 (e-mail: chunsy@wku.ac.kr)

Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Wonkwang University, 460 Iksan-daero, Iksan, Jeonbuk 54538, Korea

** 전북대학교 토목공학과 석사과정 (e-mail: dydxkr@jbn.ac.kr)

Master Course, Department of Civil Engineering, Chonbuk National University, 664-14 1Ga Deokjin-dong, Jeonju-city, Jeonbuk 561-756, Korea

*** 교신저자, 전북대학교 토목공학과 부교수 (e-mail: hkwon@jbn.ac.kr, Tel: 82-63-270-2426)

Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Chonbuk National University, 664-14 1Ga Deokjin-dong, Jeonju-city, Jeonbuk 561-756, Korea

1. 서 론

가뭄은 관측 및 정의하기 어려우며 가뭄 피해를 정량적으로 나타낼 수 없는 복잡한 자연현상이다. 이러한 이유로 1980년대 초반 약 150 개가 넘는 가뭄에 관한 정의가 나올 정도로 연구가 활발히 수행되었다. 그러나 지역적 기후특성 및 물수요 주체, 학문적 접근방법 등에 따라 평가기준이 상이하므로, 하나의 대표성을 갖는 가뭄을 정의하기보다는 가뭄을 특성에 따라 범주로 분류하고, 목적에 따른 지표설정을 통해 가뭄을 평가하는 방법이 합리적인 방법으로 평가받고 있다. 이와 관련하여 가뭄 관련 국내외 선진 연구기관인 미국의 가뭄경감센터(National Drought Mitigation Center; NDMC)에서는 가뭄의 범주를 물리적 특성에 따라 기후학적, 수문학적, 농업적 가뭄으로 분류하고 있으며, 물 수요공급에 따른 영향을 고려한 사회경제적 가뭄을 추가하여 총 4가지 범주로 분류한 방법을 준용하고 있다(Wilhite and Glantz, 1985).

NDMC에서 분류하고 있는 가뭄에 대한 정의에 따르면 먼저 기후학적 가뭄은 임의 지역에 건조한 기후패턴이 지속되는 상태를 말한다. 수문학적 가뭄은 기후학적 가뭄이 수개월 지속되었을 때 하천, 저수지, 지하수위 저하로 발생하는 가용 물 공급 수준을 의미한다. 농업적 가뭄은 농작물의 성장 및 생태 환경 유지에 필요한 토양 수분이 확보되지 못한 상태를 의미하며, 주로 토양수분지수를 활용하여 나타낸다. 사회경제적 가뭄은 물 공급이 사회경제적 수요에 미치지 못하는 상태가 일정기간 지속되는 정도를 기준으로 평가된다. 우리나라는 산업화 전·후로 가뭄의 관심사가 변화하는 모습을 확인할 수 있다. 과거 농업기반 산업에서는 농업적 가뭄의 중요성이 대두되었다. 다양한 역사문헌을 통해 농업적 가뭄은 정치·사회·문화적으로 많은 영향을 주었음을 확인할 수 있으며, 강수량을 측정하기 위한 측우기와 하천 유량을 측정할 수 있는 수표 등의 발명 등은 우리나라 과학적 수문관측의 시초라고 할 수 있다. 그러나 산업화 이후 물 수요의 급격한 증가로 사회경제적 가뭄의 중요성이 언급되기 시작하였으며, 겨울철 대도시의 생공용수 및 발전용수 등 지속적으로 물을 사용해야 하는 부분에서 발생하는 물 부족현상은 심각한 사회경제적 문제로 대두되었다. 고도산업화 사회로 진입하는 최근에는 수문기상학적 변동성 증가로 인한 기상학적 가뭄의 중요성이 언급되고 있으며, 기상학적 가뭄과 사회경제적 가뭄을 동시에 고려한 가뭄 대책이 필요한 실정이다.

가뭄은 수문학적 극치현상의 하나로 빈도해석을 통해

서 재현기간(return period)을 평가하는 것이 일반적으로 요구된다. 빈도해석은 극치자료의 무작위성을 기본가정으로 확률밀도함수로부터 재현기간과 동일한 의미를 가지는 초과확률(exceedance probability) 또는 비초과확률(nonexceedance probability)에 해당하는 수문량을 평가하는 과정으로 수자원설계에 있어 가장 근간이 되는 과정이라 할 수 있다. 앞서 언급되었듯이 가뭄을 정의하는데 있어서 여러 가지 방법이 적용되고 있지만 여전히 어려운 점으로 인식되고 있으며, 현재에도 다양한 방법론들이 제안되고 있다.

2015년 8월 현재 우리나라 대부분의 지역에서 가뭄을 겪고 있으며, 특히 한강유역의 경우 과거의 유례를 찾지 힘든 장기적 가뭄이 나타나고 있다. 이러한 점에서 본 연구에서는 우리나라 2015년 가뭄에 대한 정량적인 평가를 수행하고자 한다. 특히 현재 가뭄의 신뢰성 있는 평가를 위하여 기존 가뭄지수의 문제점을 상당부분 보완할 수 있으며, 확률론적 접근이 가능한 은닉마코프모델(hidden Markov model, HMM) 기반의 가뭄지수(Yoo et al., 2015)를 적용하였으며, 가뭄의 심도뿐만 아니라 지속시간을 동시에 평가할 수 있도록 코플라(copula) 함수 기반의 이변량 가뭄빈도해석 기법을 통해 최근 2014~2015 가뭄의 빈도를 평가하였다.

본 논문은 1장에서 기존 연구 문헌에 대한 조사 및 연구 배경 등에 대해서 서술하였다. 2장에서는 본 연구에서 적용된 해석 방법인 HMM 모형과 코플라 함수에 대한 이론적 배경을 요약 정리하였다. 3장에서는 대상자료, 가뭄 빈도해석 수행 결과 및 기상학적 특성을 수록하였다. 마지막으로 결론 및 토의를 4장에 정리하였다.

2. 가뭄지수 및 이변량 빈도해석 방법

2.1 가뭄의 정의

본 연구에서는 가뭄을 정의하는데 있어서 Yevjevich (1967)에 의해서 제안된 Run Theory를 활용하였다. Run Theory는 가뭄의 지속시간, 심도, 강도를 정의하는데 있어서 여러 연구에서 적용되고 있다. 즉, 가뭄특성을 평가하는데 있어서 지점별로 결정된 기준값(truncation level)을 토대로 지속성이 큰 가뭄의 시공간적 가뭄평가 및 결합재현기간을 위한 가뭄 특성을 추출하는데 활용된다(Dracup et al., 1980; Loaiciga and Leipnik, 1996; Mishra and Desai, 2005; Yoo et al., 2015). 본 연구에서는 6개월 누적 월강수량을 구축하였으며, 기상학적 가뭄을 정의하기 위해서 정상년 기준의 강수량을 기준으로 강수의

Anomaly를 구분하고자 다음 Eq. (1)을 이용하여 가뭄절단수준을 결정하였다. Fig. 1은 절단수준을 활용하여 강수의 Anomaly를 결정하는 개념적 모식도를 나타낸다 (Yoo et al., 2015).

$$a_{(n,i)} = \frac{a_{(ys,i)} + a_{(ys+1,i)} + \dots + a_{(n-1,i)}}{n-ys} \quad (1)$$

여기서, $a_{(n,i)}$ 는 n 년도 i 월의 가뭄절단수준을 나타내며, i 는 1, 2, 3, ..., 12월을 나타내고, ys 는 강우자료보유의 시작연도이다.

2.2 은닉 마코프 모델(hidden Markov model, HMM)

본 연구에서는 HMM 기반의 가뭄분석 기법을 도입하였으며, 가뭄의 상태를 구분하는 기본지표로서 활용하였다. HMM기반의 가뭄분석 기법은 Yoo et al. (2014, 2015)에 소개된 바 있으며, 본 절에서 핵심적인 내용에 대해서만 간략하게 요약 정리하였다.

HMM 모형은 수문시계열에 내재되어 있는 특성을 효과적으로 평가할 수 있는 방법으로서 시계열의 범주화 및 모델링이 동시에 가능한 방법이라 할 수 있다. 즉, HMM은 수문시계열을 통계적 관점에서 가장 효과적인 분리 방안을 모색할 수 있으며, 본 연구에서 목적으로 하고 있는 가뭄을 평가하는 과정과도 매우 부합된다. 기본적으로 HMM은 수문변량의 특성이 은닉상태(hidden state)에 있으며, 이러한 은닉상태들의 천이확률(transition probability)은 시간에 따라 일정하다는 정상성 가정을 기본으로 한다. 여기서 은닉상태는 일종의 범주와 같으며, 예를 들어 1번 은닉상태는 1번 범주에 해당하는 자료 분류로 설명될 수 있다. 만약, 이러한 은닉상태가 시간에 따라 변화한다면, 비동질성(nonhomogeneous) HMM (NHMM) 모형을 사

용하여, 시간에 따른 변화 양상을 동적으로 고려할 수 있다. 그러나 월강수량 자료에 대한 경향성을 검토한 결과 통계적인 유의성을 확인할 수 없었으며, 시간을 고려한 NHMM 모형에서 적합성의 차이를 발견하지 못했다. 이러한 점에서 본 연구에서는 동질성 HMM 모형을 기본적으로 활용하였다. 앞서 언급하였듯이 HMM은 수문시계열을 도출된 State를 기준으로 범주화 할 수 있으며 각 범주간의 천이확률 및 출력확률밀도함수(emission probability density function)에 대해서 모의가 가능하다. 여기서 출력확률밀도함수는 혼합분포(mixture)의 형태를 가지며, 은닉 상태 수(K)에 해당하는 Gaussian 혼합분포가 적용되었다. 이를 통하여 시계열을 보다 효과적으로 모의할 수 있는 장점을 제공하며, 특히 시계열의 비선형성이 크거나 변동성이 큰 우리나라 강수 시계열에 적용하는데 유리하다(Kwon et al., 2013).

HMM을 구성하는데 있어서 가장 기본적인 사항은 조건부 독립가정이다. 즉, 직접적인 조건 상태에 있지는 않지만, 간접적으로 영향을 받고 있다 하여 조건부 독립이라고 명명한다. HMM은 관측 강수량 자료로부터 은닉상태의 확률론적 과정을 통해 수문시계열을 우선적으로 분류하고 이를 기준으로 강수량을 모의할 수 있는 이중의 확률론적 과정이라 할 수 있다. 강수의 Anomaly 시계열을 시간 t 의 연속 벡터로 나타내면 Eq. (2)과 같다.

$$R_{1:t} = (R_1, \dots, R_t) \quad (2)$$

또한 시간 t 에 해당하는 은닉상태를 나타내는 연속 계열 순서(sequence)는 Eq. (3)와 같다.

$$S_{1:t} = (S_1, \dots, S_t) \quad (3)$$

여기서, R 은 강수 시계열을 의미하며, S 는 연속 계열 순서

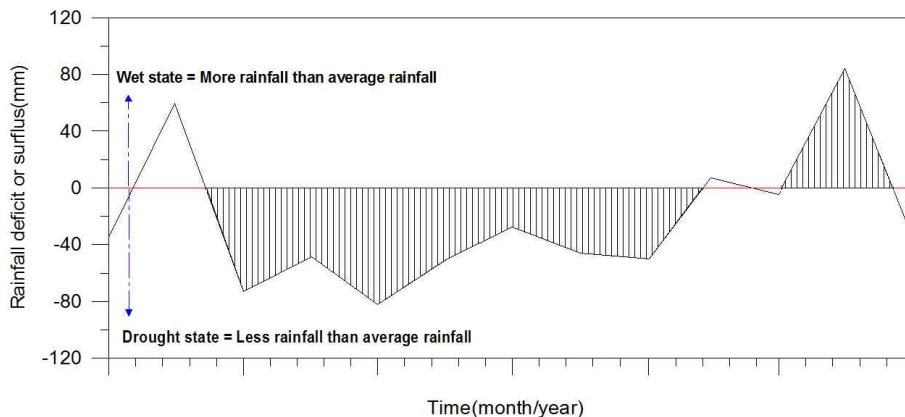


Fig. 1. A Schematic Representation of Drought State Based on the Run Theory for a Given Threshold Level (Yoo et al., 2015)

를 말한다.

HMM을 구성하는데 있어서 두 가지 조건부 독립 가정은 다음과 같다. 첫째, 주어진 은닉상태와 관측시계열로 이루어진 모형에서 관측시계열 벡터는 다른 모든 변수와 조건부적으로 독립이라고 가정한다. 둘째, 현재의 시계열은 바로 이전의 은닉상태에만 상관성이 있는 1차 Markov Chain을 기준으로 구성되며 은닉상태의 분포특성은 시간적으로 오직 이전 은닉상태에 의존한다.

$$P(s_t | s_{1:t-1}) = \begin{cases} P(s_t | s_{t-1}) & t \geq 2, \\ p(s_1) & t = 1. \end{cases} \quad (4)$$

앞서 언급하였듯이 동질성 HMM은 조건부확률 $P(s_t | s_{t-1})$ 가 시간에 따라서 일정하다는 정상성 가정에 기본을 두고 있다. 동질성 HMM에 대해서 $\Pi = \pi_1, \dots, \pi_K$ 는 초기 확률벡터라 하고 $\Gamma = (\gamma_{11}, \dots, \gamma_{KK})$ 를 천이확률 행렬이라고 정의한다. 여기서 K 는 은닉상태의 수를 나타내며 Υ 는 각각의 은닉상태별로 결정되는 출력 확률밀도함수의 매개변수로서 은닉상태 S_t 를 기준으로 강수시계열 r_t 의 발생확률 $F_i(r) = P(r_t | S_t = i)$ 을 산정하는데 활용된다. Eq. (5)은 동질성 HMM 모형의 우도함수를 나타낸다. 본 연구에서는 출력확률밀도함수로 Gaussian 분포를 활용하였다. 여기서 우도함수는 매개변수와 자료의 함수로서 본 연구에서는 최적 은닉상태 수, 은닉상태간의 천이확률, 출력확률밀도함수의 매개변수 추정을 위해서 활용된다.

$$P(r_{1:T}, S_{1:T} = s_{1:T} | \Pi, \Gamma, \Upsilon) = \left[\pi_{s_1} \prod_{t=2}^T \gamma_{s_{t-1}s_t} \right] \left[\prod_{t=1}^T F_{s_t}(r_t | r_{t-1}) \right] \quad (5)$$

2.3 코플라 함수를 이용한 이변량 빈도해석

본 연구에서는 가뭄의 특성 변수로 HMM을 통하여 가뭄의 지속시간과 심도를 산정하였다. 산정된 결과를 이용하여 이변량 가뭄빈도 분석을 수행하고자 한다. 일반적으로 가뭄의 특성인자들은 상관성을 가지고 있으며, 가뭄빈도해석을 수행하는 데 있어 이러한 복합적 연관성을 유지시키면서 평가할 수 있는 방법론의 적용이 지속적으로 강조되고 있다. 일반적으로 2개 이상의 변수의 결합확률분포(joint probability density function)를 도출하기 위해서는 각각의 변량이 주변확률밀도함수(marginal probability density function)가 동일한 분포를 따르는 경우로 가정하여 해석하는 것이 일반적으로 요구되고 있다. 이러한 목적으로 2변량 Gamma 분포(Yue, 2001), 2변량 Gumbel 분

포(Lee et al., 2009) 등이 수문학적 빈도해석을 위해서 사용된 사례가 있다. 그러나 많은 경우에 변량들에 주변분포(marginal distribution)는 서로 다르며, 이러한 경우에 기존 다변량 분포의 적용을 위해서 변량을 변환하는 등의 과정이 요구된다. 이러한 문제점을 상당부분 개선할 수 있는 방법으로서 코플라 함수 기법이 제안되고 있으며 수문학적 다변량 분석에서 변량들의 의존 구조를 파악하는데 그 활용도가 매우 증가하고 있다. 즉, 다변량 분석에 있어서 상관계수가 일반적으로 활용되지만, 빈도해석과 같이 분포의 분포함수의 꼬리 부분의 의존성을 평가하는 경우에는 코플라를 사용하여 그 의존 구조를 파악하는 것이 다양한 장점을 제공한다(Sklar, 1959).

특히 가뭄해석 연구에서는 지속시간, 심도, 강도 등 가뭄 특성 인자의 발생분포 특성을 다변량으로 해석하는 연구가 활발히 이루어지고 있다(Bonaccorso et al., 2003; Kim et al., 2003; Salas et al., 2005; Mirakbari and Ganji, 2010). 가뭄 특성인자들의 다변량 의존구조를 고려한 빈도해석을 수행 시 최근에는 코플라를 이용한 해석이 다수 이루어지고 있다(Zhang and Singh, 2006; Kao and Govindaraju, 2007, 2010). 국내에서도 코플라 함수를 활용한 가뭄해석이 수행되고 있으며, 주로 강수량의 Anomaly 및 SPI 등을 기준으로 가뭄특성을 도출한 후 다변량 빈도해석이 이루어지고 있다(Kwak et al., 2012).

본 연구에서는 가뭄의 특성변수로 가뭄 지속시간과 심도를 고려하였으며, 이변량 가뭄빈도를 추정하기 위해서는 다음 Eq. (6)와 같은 이변량 가뭄재현기간 산정이 필요하다(Kim et al., 2006).

$$T_{DS} = \frac{E(L)}{P(D \geq d, S \geq s)} = \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + C(F_D(d), F_S(s))} \quad (6)$$

여기서, T_{DS} 는 $D \geq d$ 이고, 동시에 $S \geq s$ 인 경우의 결합재현기간이며, $E(L)$ 은 가뭄의 발생간격을 나타낸다(Kim et al., 2006).

Eq. (6)에서 보듯이 결합재현기간을 산정하기 위해서는 지속시간 D와 심도 S에 대한 주변누가확률분포 $F(D)$ 와 $F(S)$ 추정과 더불어 결합누가확률분포 $C(F_D(d), F_S(s))$ 의 추정이 반드시 필요하다. 본 연구에서 결합누가확률분포 $C(F_D(d), F_S(s))$ 를 추정하기 위해서 코플라 함수를 이용하였다. 본 연구에서는 이변량 빈도해석을 수행하는데 있어서 기본적으로 5가지 코플라 함수(Gaussian copula, Clayton copula, Frank copula, Gumbel copula, Student's

t-copula)를 고려하였으며, 각 지점별 최적의 코플라 함수를 선정하기 위해서 우도함수를 추정하여 분석에 활용하였다. 본 연구에서 사용된 5가지 코플라 함수는 다음 Table 1과 같다.

3. 우리나라 가뭄 빈도분석 결과

3.1 대상지역 및 자료의 특성

본 연구에서는 극치 사상을 추출하기 위해 기상청에서 관리하는 92개 강우관측소의 일자료를 사용하여 월평균 강우량을 산정하였다. 본 연구에서는 자료의 타당성을 위하여 30년 이상의 자료가 구축된 지점을 선정하였으며 2015년 6월 14일 기준으로 기상청에서 극한 가뭄 또는 심한가뭄으로 선정한 지역인 서울, 경기도 및 강원도 지역의 지점을 추가적으로 선정하여 연구 시 64개 지점의 강우관측소를 사용하였다.

3.2 우리나라 가뭄특성 변수 산출

본 연구에서는 HMM을 이용하여 강수의 특성을 7가지 상태로 구분하여 나타내었으며, 강우의 Anomaly가 음수를 나타내는 상태 1~3까지를 가뭄의 절단수준으로 가정하였다. 본 연구에서는 가뭄을 정의하는데 있어서 상태-1을 극한가뭄, 상태-2를 심한가뭄, 상태-3을 보통가뭄으로 구분하였다. 가뭄의 특성변수인 지속기간은 상태 1~3 값의 연속된 기간으로 산정하였으며, 심도는 지속기간의 강수부족량을 합한 값으로 정의하였다. Fig. 3에서는 기상청 강우관측소 중 최근 가장 심한 가뭄지속기간과 가뭄심도를 나타내고 있는 속초, 철원, 동두천 및 파주 지점의 HMM을 통한 가뭄상태를 분류하여 나타내었다. 속초의 경우 극한 가뭄인 상태-1의 평균심도가 -48mm 정도로

철원(-62mm), 동두천(-88mm) 및 파주(-79mm)에 비해 평균적으로 가뭄의 강도가 크지 않은 것으로 나타났다. 속초, 동두천 및 파주의 경우에 극한가뭄의 비율이 5% 정도를 나타내고 있지만, 철원의 경우 10%를 상회하는 비율을 가지는 것으로 나타나고 있어 상대적으로 심한 가뭄의 발생비율이 크다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 HMM 분석하여 최근 2014~2015년 가뭄에 대한 상태를 공간적으로 분포한 결과이다. Fig. 4에서는 2014년 10월, 12월, 2015년 4월 및 6월 결과를 각각 나타내어 가뭄심도의 공간적인 분포를 평가하였다. Fig. 4에서 확인되는 바와 같이 서울, 경기도 및 강원도 지역을 포함한 한강유역에 상태-1 즉 극한가뭄이 집중적으로 위치하고 있는 것을 확인할 수 있다.

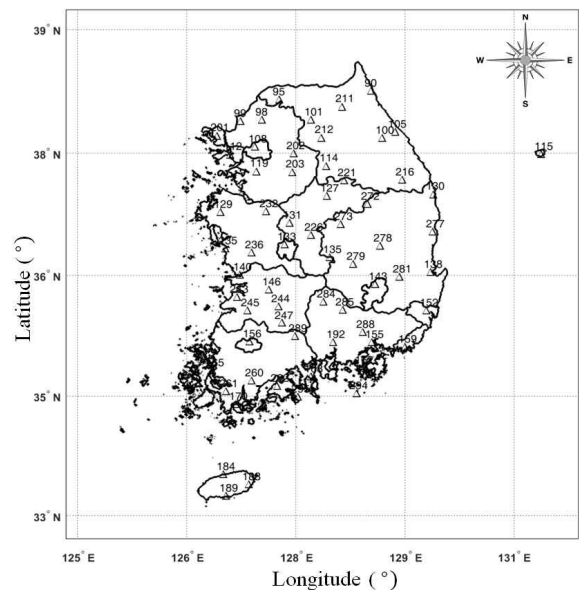


Fig. 2. Weather Stations Used in this Study

Table 1. Copula Functions for Bivariate Drought Frequency Analysis

Copula	Functions
Clayton	$[\max(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1; 0)]^{-1/\theta}$
Gumbel	$\exp(-((-\log(u))^\theta + (-\log(v))^\theta)^{1/\theta})$
Frank	$-\frac{1}{\theta} \log\left(1 + \frac{(\exp(-\theta u) - 1)(\exp(-\theta v) - 1)}{\exp(-\theta) - 1}\right)$
Gaussian	$\frac{1}{\sqrt{\det R}} \exp\left(-\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \Phi^{-1}(u_1) \\ \vdots \\ \Phi^{-1}(u_d) \end{pmatrix}^T \cdot (R^{-1} - I) \cdot \begin{pmatrix} \Phi^{-1}(u_1) \\ \vdots \\ \Phi^{-1}(u_d) \end{pmatrix}\right)$
Student-t	$\frac{\Gamma((v+d)/2)[\Gamma(v/2)]^{d-1}}{[\Gamma((v+d)/2)]^{\frac{1}{2}}} \left[\prod_{i=1}^d (1 + y_i^2/v)^{(v+1)/2} \right] (1 + y^T \sum_{i=1}^{d-1} y/v)^{-(v+d)/2}$

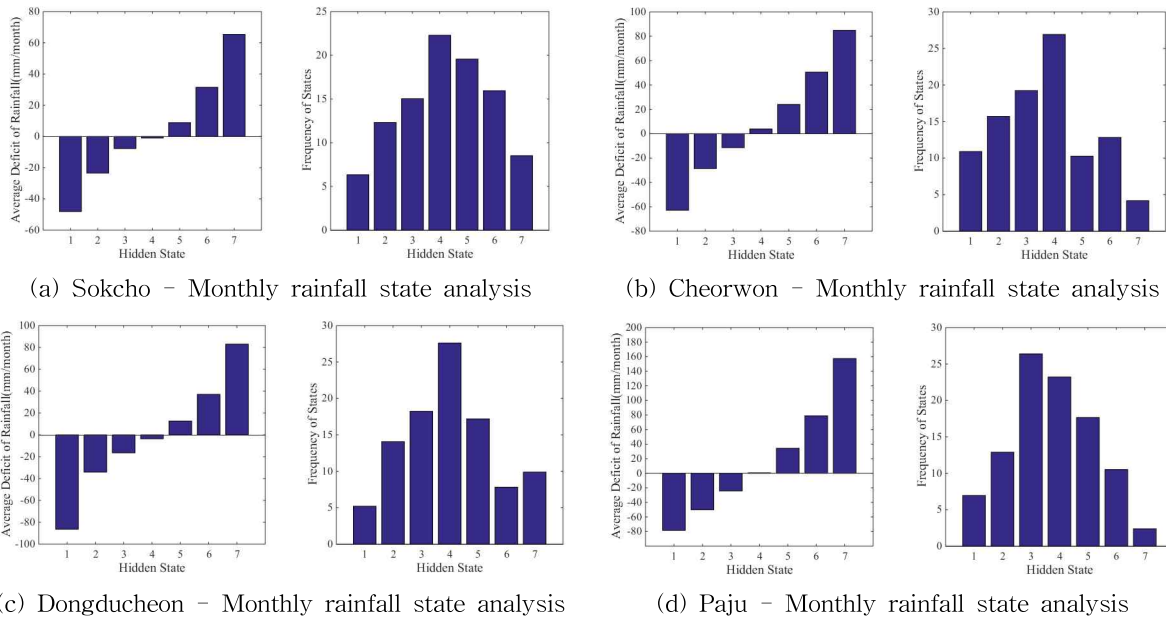


Fig. 3. The Average Severity of Drought Along with the Occurrence Rate of Major Drought Areas in 2015 (1973–2015)

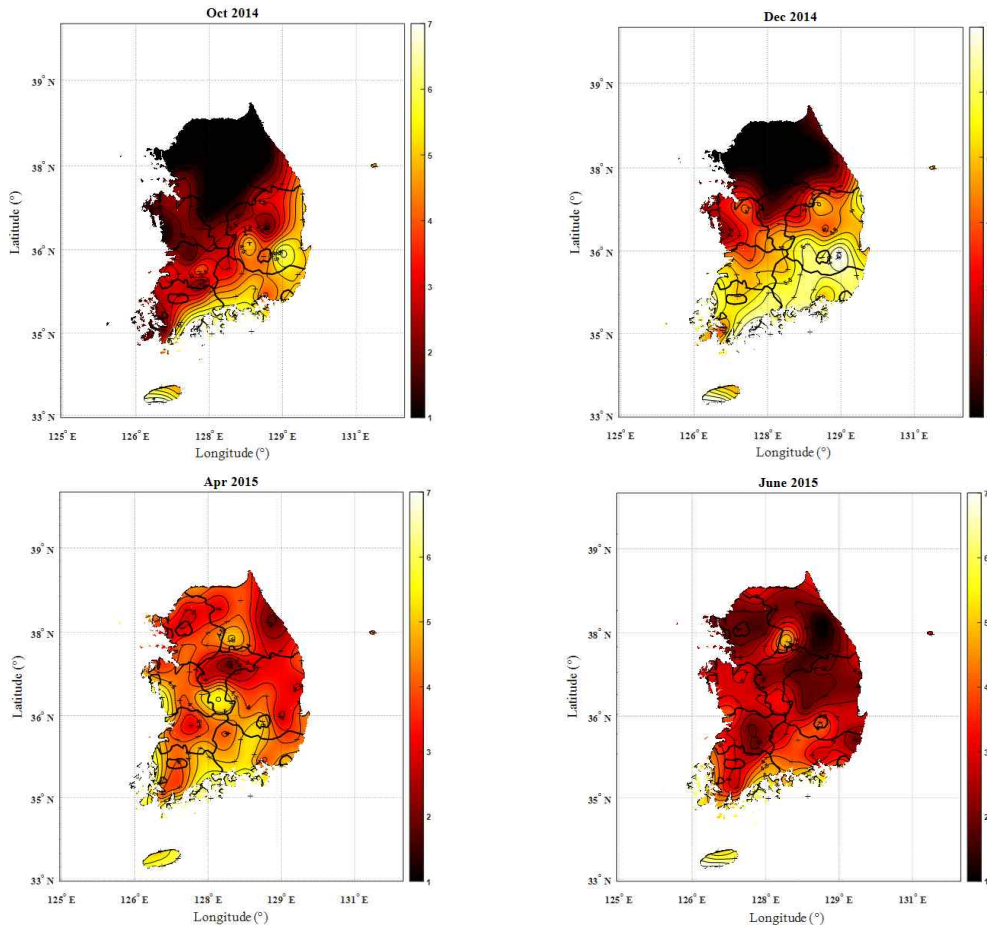


Fig. 4. Spatio-temporal Pattern on Drought States Based on the HMM Model

3.3 이변량 가뭄빈도해석

본 연구에서는 HMM을 통하여 추출된 특성변수로 가뭄의 지속기간 및 심도를 산정하였다. 산정된 2개의 변량에 대해서 가뭄빈도 분석을 수행하여 현재 가뭄의 결합계현빈도를 평가하였다. 본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 코플라 함수를 사용하여 특성변수간의 의존 구조를 고려한 이변량 가뭄빈도해석을 수행하였다. 이변량 가뭄빈도해석을 수행하는데 있어서 가뭄의 지속시간과 심도에 대한 주변확률분포를 우선적으로 결정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 수문학적 빈도해석에 사용하는 연속

확률분포를 대상으로 대수우도함수(log-likelihood)를 산정하여 최적 주변분포함수를 검토하였으며 가뭄의 심도와 지속시간에 대하여 각각 Gumbel 분포와 Gamma 분포를 최적의 주변확률분포를 결정하였다. 주변확률분포를 결정한 후 각 해석지점에 대해서 가장 적합한 코플라 함수를 대수우도함수, AIC (Akaike Information Criterion), BIC (Bayesian Information Criterion) 등을 고려하여 결정하였다.

선정된 주변확률밀도함수 및 코플라 함수를 이용하여 2014~2015 지점별 이변량 빈도분석을 실시한 결과 한강 유역을 제외하고 대부분의 지점에서 10년 정도의 재현기

Table 2. Selected Copula Functions for Each Station

Station		Selected Copula	Station		Selected Copula
Number	Name		Number	Name	
90	Sokcho	Clayton's copula	189	Seogwipo	Clayton's copula
95	Cheorwon	Stuent's t copula	192	Jinju	Stuent's t copula
98	Dongducheon	Stuent's t copula	201	Ganghwa	Normal copula
99	Paju	Stuent's t copula	202	Yangpyeong	Stuent's t copula
100	Daegwallyeong	Stuent's t copula	203	Icheon	Stuent's t copula
101	Chuncheon	Normal copula	211	Inje	Stuent's t copula
105	Gangneung	Stuent's t copula	212	Hongcheon	Stuent's t copula
108	Seoul	Normal copula	216	Taebaek	Stuent's t copula
112	Incheon	Normal copula	221	Jecheon	Stuent's t copula
114	Wonju	Stuent's t copula	226	Boeun	Stuent's t copula
115	Ulleungdo	Stuent's t copula	232	Cheonan	Clayton's copula
119	Suwon	Normal copula	235	Boryeong	Stuent's t copula
127	Chungju	Stuent's t copula	236	Buyeo	Stuent's t copula
129	Seosan	Clayton's copula	243	Buan	Stuent's t copula
130	Uljin	Clayton's copula	244	Imsil	Stuent's t copula
131	Cheongju	Stuent's t copula	245	Jeongeup	Stuent's t copula
133	Daejeon	Stuent's t copula	247	Namwon	Stuent's t copula
135	Chupungnyeong	Stuent's t copula	260	Jangheung	Stuent's t copula
138	Pohang	Stuent's t copula	261	Haenam	Stuent's t copula
140	Gunsan	Clayton's copula	262	Goheung	Clayton's copula
143	Daegu	Normal copula	272	Yeongju	Stuent's t copula
146	Jeonju	Stuent's t copula	273	Mungyeong	Stuent's t copula
152	Ulsan	Normal copula	277	Yeongdeok	Stuent's t copula
155	Changwon	Stuent's t copula	278	Uiseong	Stuent's t copula
156	Gwangju	Stuent's t copula	279	Gumi	Stuent's t copula
159	Busan	Stuent's t copula	281	Yongcheon	Stuent's t copula
162	Tongyeong	Clayton's copula	284	Geochang	Stuent's t copula
165	Mokpo	Stuent's t copula	285	Hapcheon	Stuent's t copula
168	Yeosu	Clayton's copula	288	Miryang	Stuent's t copula
170	Wando	Clayton's copula	289	Sancheong	Stuent's t copula
184	Jeju	Clayton's copula	294	Geoje	Stuent's t copula
188	Seongsan	Clayton's copula	295	Namhae	Frank copula

간을 가지는 것으로 분석되었다. 코플라 이변량 빈도분석 결과를 기준으로 지점별로 현재의 가뭄지속기간 및 가뭄 심도의 재현기간을 정량적으로 추정하여 공간적으로 평가하면 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 보면 북한강 유역 및 임진강유역에 현재 가뭄의 빈도가 100년을 넘는 것으로 평가되고 있으며, 반면 중부지방을 제외한 지역은 가뭄의 정도가 상대적으로 심하지 않은 것으로 나타나고 있다. 즉, 최근 가뭄의 경우 가뭄의 재현기간의 있어서 공간적인 변동성도 매우 큰 것으로 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

한강유역의 경우 재현기간 산정이 어려울 정도로 빈도가 높게 산정되고 있다. 특히, 파주의 경우 한강유역에서 가장 심한 가뭄상태를 나타내고 있으며, 현재의 자료를 기준으로 빈도를 평가하기 어려울 정도로 매우 이례적인 가뭄이 발생하고 있다. 본 연구에서 사용된 자료는 30년 정도의 자료로서 30년을 넘어가는 재현기간에 대해서는 표본오차가 매우 크며, 기왕 최대값 근처에서 작은 변화에 매우 큰 빈도 차이를 나타낼 수 있다. 이러한 점을 고려하더라도, 한강유역 일부지점에서 현재의 가뭄빈도 및 가뭄심도의 결합재현기간이 1,000년이 넘는 것은 매우 이례적인 현상으로서 현재의 가뭄의 심각정도를 짐작할 수 있다. 가뭄의 지속기간 또는 심도의 한쪽만을 고려한 빈도분석의 경우에도 대부분 지역에서 20년 빈도 이상의 재현기간을 나타내고 있으며 지점에 따라 최대 57년의 빈도를 보이고 있다. 특히, 속초, 철원, 동두천 및 파주 등의 가뭄이 특히 심한 4개 지점에 대한 이변량 빈도분석 결과를

Fig. 6에 나타내었다. 휴전선과 인접한 북한강 및 임진강 유역에 심한 가뭄이 발생하였다는 것을 관측할 수 있으며, 전반적으로 가뭄빈도는 100년 이상의 기왕최대가뭄을 나타내고 있다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 월강수량 자료를 6개월 단위로 이동 평균한 값을 기준으로 HMM을 적용하여 가뭄의 상태를 확률론적 관점에서 정량적으로 평가하였다. 평가 결과 한강 유역 대부분의 지역에서 심한 가뭄의 특성을 가지는 것으로 분석되었다. 본 연구를 통해서 분석된 현재가뭄의 특성을 정리하여 나타내면 다음과 같다.

- 1) 현재 우리나라의 가뭄은 2015년 1월부터 6월 기준으로 서울·경기 및 강원도를 중심으로 평년강수 대비 39~55%를 기록하여 극심한 가뭄상태를 나타내고 있는 반면 남부지방은 평년강수 대비 70~110%를 나타내는 등 중부지방에 비해 대체적으로 가뭄의 정도가 크게 나타나지 않고 있다. 즉, 공간적 변동성이 매우 큰 특징을 가지고 있으며, 지역별 가뭄 특성을 고려한 대응책 마련이 필요할 것으로 판단된다.
- 2) 최근 40년 자료를 기준으로 영동지방에 비해 영서지방이 전체적으로 가뭄이 발생할 경우 가뭄의 심도가 큰 것으로 나타났다. 심한가뭄의 발생 비율의 경우에 철원 및 파주의 경우 10%를 상회하는 등 임진강 유역에서 상대적으로 심한가뭄의 발생비율이 크다

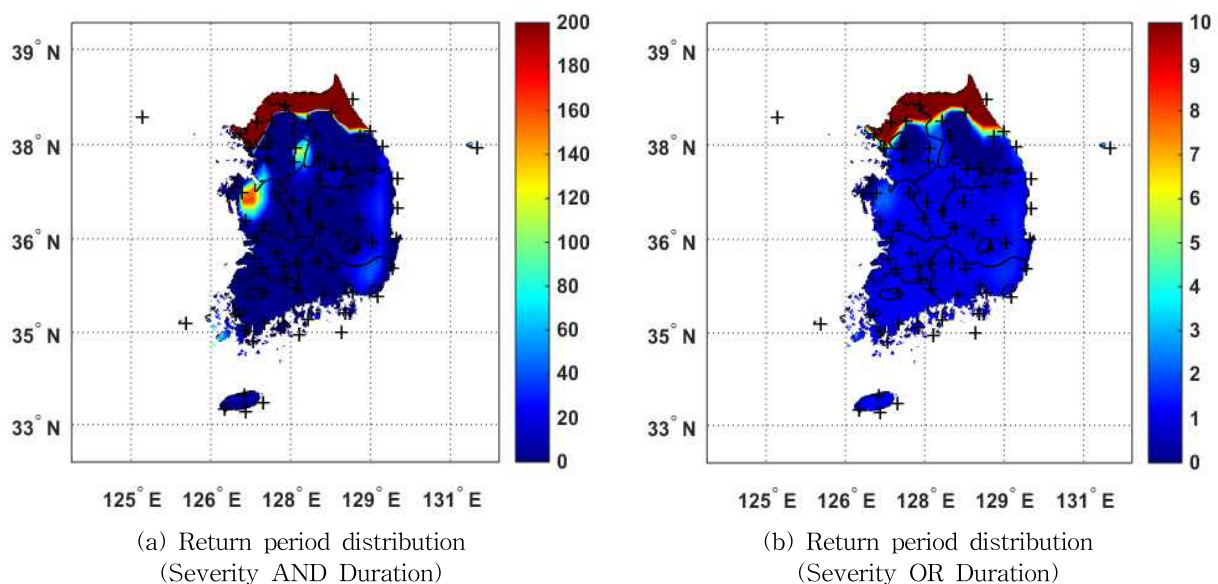


Fig. 5. Frequency Analysis Distribution Chart of the Each Location

는 것을 확인할 수 있었다. 북한지역의 댐 건설 등으로 수자원 가용량 감소 등을 고려할 때 가뭄의 사회경제적 파급정도는 타 지역에 비해 더욱 크게 나타날 수 있을 것으로 사료된다.

- 3) 한강유역 일부지점에서 현재의 가뭄빈도 및 가뭄심도의 결합재현기간이 1,000년이 넘는 등 매우 이례적인 가뭄을 겪고 있으며 파주의 경우 빈도를 평가하기 어려울 정도로 큰 가뭄이 발생하고 있다. 앞서 분석된 결과와 동일하게 속초, 철원, 동두천 및 파주 등의 휴전선과 인접한 북한강 및 임진강 유역에 심한 가뭄이 발생하고 있으며 전반적으로 100년 이상의 기왕최대가뭄을 나타내고 있다.

최근 가뭄재해를 토대로 향후 기상학적 변동성 및 기후변화 영향을 고려한 가뭄예측 및 전망기술 개발과 함께 수문기상학적 관점에서 종합적으로 가뭄위험도 평가를 시행하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문의 첫 번째 저자는 2013년도 원광대학교 교비지원을 받아 본 연구성과에 기여하였으며, 연구비 지원에 감사를 드립니다.

References

- Bonaccorso, B., Bordi, I., Cancelliere, A., Ross, G., and Sutera, A. (2003). "Spatial Variability of Drought: An Analysis of the SPI in Sicily." *Water Resources Management*, Vol. 17, No. 4, pp. 273-296.
- Dracup, J.A., Lee, K.S., and Paulson, E.G. (1980). "On the Statistical Characteristics of Drought Events." *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 2, pp. 289-296.
- Kao, S.C., and Govindaraju, R.S. (2007). "A bivariate frequency analysis of extreme rainfall with implications for design." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, Issue. D13, pp. 1-15, doi:10.1029/2007JD008522.
- Kao, S.C., and Govindaraju, R.S. (2010). "A copula-based joint deficit index for droughts." *Journal of Hydrology*, Vol. 380, pp. 121-134.
- Kim, T.W., Valde's, J.B., and Yoo, C.S. (2003). "Nonparametric Approach for Estimating Return Periods of Droughts in Arid Regions." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 8, pp. 237-246.
- Kim, T.W., Valde's, J.B., ASCE, F., and Yoo, C.S. (2006). "Nonparametric Approach for Bivariate Drought Characterization Using Palmer Drought Index." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 11, pp. 134-143.
- Kwak, J.W., Kim, Y.S., Lee, J.S., and Kim, H.S. (2012). "Analysis of Drought Characteristics Using Copula Theory." *Journal of the Korean Civil Engineering*, pp. 1762-1771, doi: 10.1061/9780784412312.175.
- Kwon, H.H., Kim, T.J., Hwang, S.H., and Kim, T.W. (2013). "Development of Daily Rainfall Simulation Model Based on Homogeneous Hidden Markov Chain." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 5, pp. 1861-1870.
- Lee, J.H., Chung, G.H., and Kim, T.W. (2009). "Evaluation of Flood Severity Using Bivariate Gumbel Mixed Model." *J. Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 9, pp. 725-736.
- Loaiciga, H.A., and Leipnik, R.B. (1996). "Stochastic renewal model of low-fow streamflow sequences." *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Vol. 10, pp. 65-85.
- Mirakbari, M., and Ganji, A. (2010). "Reliability analysis of a rangeland system: the application of Profust theory." *Stoch Environ Res Risk Assess*, Vol. 24, pp. 399-409, doi:10.1007/s00477-009-0329-8
- Mishra, A.K., and Desai, V.R. (2005). "Drought forecasting using stochastic models." *Stoch Environ Res Risk Assess*, Vol. 19, pp. 326-339, doi:10.1007/s00477-005-0238-4
- Salas, D., Chauvin, F., Déqué, M., Douville, H., Guérémy, J.F., Marquet, P., Planton, S., Royer, J.F., and Tyteca, S. (2005). "Description and validation of the CNRM-CM3 global coupled model." *Climate Dynamics*, Vol. 103, pp. 1-36.
- Sklar, A. (1959). "Fonctions de repartition a n dimensions et leurs marges." *Université Paris*, Vol. 8, pp. 229-231.
- Wilhite, D.A., and Glantz, M.H. (1985). "Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions." *Water International*, Vol. 10, Issue. 3, pp. 111-120.
- Yevjevich, V. (1967). "An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic

- droughts.” Hydrology papers colorado state university fort collins, colorado, No. 23.
- Yoo, J.Y., Kwon, H.H., Kim, T.W., and Lee, S.O. (2014). “Probabilistic Assessment of Drought Characteristics based on Homogeneous Hidden Markov Model.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 1, pp. 145-153.
- Yoo, J.Y., Kwon, H.H., So, B.J., Rajagopalan, B., and Kim, T.W. (2015). “Identifying the role of typhoons as drought busters in South Korea based on hidden Markov chain models.” *Geophysical Research Letters: Research Letter*, Vol. 42, pp. 2797-2804, doi: 10.1002/2015GL063753.
- Yue, S. (2001). “A bivariate gamma distribution for use in multivariate flood frequency analysis.” *Hydrological Processes*, Vol. 15, No. 6, pp. 1033-1045.
- Zhang, L., and Singh, V.P. (2006). “Bivariate Flood Frequency Analysis Using the Copula Method.” *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 150-164.

paper number : 15-071

Received : 8 September 2015

Revised : 22 September 2015 / 30 September 2015

Accepted : 30 September 2015