나이테 자료를 활용한 가뭄 분석 연구

A Assessment of Hydrological Drought using Tree-ring Data

이영곤* · 최규현** · 객재원***

Lee, Younggon*, Choi, Kyuhyun**, and Kwak, Jaewon***

Abstract

Generally, Long-term data are vital for analysis of hydrological phenomenon, but it also has many constraints. So, 19th century onwards data are mainly used. The objective of the study is, therefore, to reconstruct and evaluate hydrological data using tree-ring, which known as the method to acquire long-term data, and to analyze drought frequency with its result. For this, The tree-ring data in the Sacramento river basin were obtained and about 300 years streamflow data were reconstructed based on the artificial neural network. Also, the drought frequency and its occurrence trend were analyzed with copula method which is widely adopted for drought.

Key words : Tree-ring, Hydrological Drought, Artificial Neural Network

요 지

일반적으로 수문현상의 해석에는 최대한 장기간의 자료를 사용하는 것이 바람직하나, 여러 제약조건으로 인하여 19세기 이후의 자료가 주로 사용되고 있는 실정이다. 본 연구의 목적은 장기간에 걸친 자료를 획득할 수 있는 나이테 자료를 이용하여 장기간에 걸친 수문자료를 재생성함으로써 그 적용성을 검증하고, 이를 통하여 장기간의 자료를 바탕으로 한 가뭄의 특성을 분석하는 데 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 미국의 세크라멘토 강 유역을 대상으로 해당 유역의 다양한 나이테 자료와 관측유출량 자료를 수집하고 인공신경망을 적용하여 약 300년에 걸친 연유출량을 재생성하고 적용성을 검증 하였다. 또한, 재생성된 장기간의 연유출량 자료와 가뭄의 이변량 분석에 널리 사용되는 코풀라 기법을 적용하고 가뭄의 발생 경향성을 분석하였다.

핵심용어 : 나이테, 수문학적 가뭄, 인공신경망

1. 서 론

일반적으로 모든 자연현상을 해석함에 있어서 가능한 장기간의 자료를 사용하는 것이 바람직하다(Mun and Lee, 2011). 자연현상에 대한 자료는 중세시대부터 이루어졌으며, 강수량자료의 경우 16세기부터의 자료도 존재하고 있다. 그러나, 도량형의 불확실성, 조사위치의 변경, 조사기간의 불명확 등으로 인하여 자료의 신뢰성 확보가 어려운 실정이며 그에 따라서 일반적으로 19세기 이후의 자료가 주로

사용되고 있다(Wang et al., 2007). 이에 대한 대안으로서 나무의 나이테를 비롯한 기후지수를 활용하여 기존의 기상 또는 수문자료를 재생성하는 기법이 주목을 받고 있다(Kim et al., 1998).

일반적으로 나이테는 기상 및 수문조건에 따라서 생장이 달라지므로 유용한 기후지수로서 사용할 수 있으며(Hughes et al., 1994), 1968년에 처음으로 나이테자료를 통하여 기후 자료의 접근 가능성이 제시된 이후로 다양한 관심을 받아왔다(Ferguson, 1968). 또한, Fritts (1969)이 나이테자료를 통하

*정회원, 국토교통부 낙동강홍수통제소 시설주사(E-mail: dleh3@korea.kr)

Member, Facility Officer, Nakdong Flood Control Office, Ministry of Land, Infrastructure and Transport

**정회원, 국토교통부 낙동강홍수통제소 시설연구관(E-mail: choikyuhyun@korea.kr)

Member, Senior Researcher, Nakdong Flood Control Office, Ministry of Land, Infrastructure and Transport

***교신저자, 정회원, 국토교통부 낙동강홍수통제소 시설연구사(Tel: +82-51-603-3347, Fax: +82-51-201-3494, E-mail: hydrokwak@gmail.com)

Corresponding Author, Member, Senior Officer, Nakdong Flood Control Office, Ministry of Land, Infrastructure and Transport

여 수문자료와의 적용성을 제시한 이후로는 수자원 분야에서도 적용되어 왔다. 대표적으로 Díaz et al. (2001)이 멕시코의 나이트테 자료를 이용하여 강수량 자료를 재생성한 바 있으며, Gray et al. (2004)은 와이오밍의 삼림지역 자료를 이용하여 강수량을 재생성 하였다. 아시아지역에서도 Hughes et al. (1994)이 중국 중앙부의 나이트테 자료를 활용하여 강수량 자료를 재생성한 바 있다. 단순히 기상자료의 재생성에만 멈추지 않고 Schneuwly and Stoffel (2008)은 알프스 지역의 나이트테 자료를 이용하여 낙석의 발생시기와 그 정도를 분석하기도 하였으며, 유럽 고산지역에서의 평균 기온의 추이 (Frank and Esper, 2005), 강수량의 변동성 등을 분석하는데 이용되었다 (Graumlich, 1987). 그러나 대부분의 나이트테 자료를 이용한 재생성 연구는 계절별 또는 월강수량자료의 재생성에 집중되어 있다 (Meko et al., 1995; Stahle et al., 2000; Raffalli-Delerce et al., 2004; Li et al., 2006). 이는 나이트테가 일 년에 한 개의 층만이 생성되기 때문에 일 년보다 적은 단위기간의 기후자료는 재생성하기 어렵기 때문이다 (Mun and Lee, 2011). 이 때문에 나이트테 자료를 이용한 수자원 및 방재분야의 연구는 주로 가뭄분야에 집중되어 있다 (Tian et al., 2007). 특히, 가뭄의 경우에는 시간 및 일 단위로 진행되는 홍수와는 달리 월 또는 계절 단위로 발생하며, 길게는 몇 년 동안 지속되는 경우도 있으므로 (Mishra and Singh, 2011), 연 단위분석이 유용하게 적용될 수 있으며, 나이트테 자료를 통한 기후자료의 재생성이 좋은 대안이 될 수 있다 (Agüero and Rodríguez, 2004). 이에 따라서, 나이트테 자료를 활용한 가뭄분석 연구가 활발하게 이루어져 왔다. Stockton and Meko (1975)가 미국 서부의 가뭄 이력을 나이트테를 통하여 분석한 연구가 대표적이며, 이후로도 다양한 연구가 이루어졌다.

이외에도 나이트테를 이용하여 가뭄 주기의 진동성이 있음을 보인 연구도 있었으며 (Ropelewski and Halpert, 1986; Helama et al., 2009), 가뭄의 공간적인 변화연구 (Chbouki, 1992) 등이 있다. 특히, 장기간의 자료를 바탕으로 하여 가뭄의 재현기간을 다루는 연구가 이루어지고 있으며 (Mishra and Singh, 2011), 최근에 가뭄의 다변량분석을 위한 코폴라기법이 활발한 연구도 이루어지고 있다 (Shiau, 2006; Shiau and Modarres, 2009; Vergni et al., 2015). 이와 같이 다양한 나이트테 관련 연구가 이루어지고 있으나, 국내에서의 나이트테 및 가뭄 관련 연구는 수문현상과의 상관성이 낮은 나이트테 자료의 한계 등으로 인하여 미흡한 실정이다 (Mun and Lee, 2011).

이에 본 연구의 목적은 나이트테 자료를 이용하여 자료를 재생성하고 그 적용성을 확인하는 것이며, 해당 자료를 통한 다변량 가뭄분석의 방법론 및 그 타당성을 검증하고자 한다. 이를 위하여 다양한 나이트테 자료가 존재하고 있는 미국 세크라멘토 강 유역의 나이트테 자료와 유출량 자료를 수집하고 상관성이 높은 나이트테 자료를 선정하였으며 해당 자료와

인공신경망 모형을 이용하여 15세기 부터의 연유출량 자료를 재생성하고 이를 기존의 자료와 비교하여 타당성을 검증하였다. 또한, 재생성된 장기간의 연유출량 자료에 코폴라기법을 적용하여 다변량 가뭄분석과 빈도분석을 수행하고 이를 국내의 연구결과와 비교하였다.

2. 이론적 배경 및 자료

2.1 인공신경망 모형

상관관계에 있다고 판단되는 두 개 이상의 변수를 모의하는 기법은 통계적 회귀분석부터 각 모델에 대한 가설확률을 이용하는 Bayesian 방법까지 다양하게 존재하고 있다. 또한, 각각의 목적과 자료특성에 따라서 이러한 방법의 선정 결과에 중요한 영향을 미친다 (Noh, 2016). 나이트테자료와 수문자료 사이에 여러 비정형 상관성이 존재할 수 있을 것으로 판단되므로 본 연구에서는 자료의 재생성에 인공신경망을 적용하였다. 인공신경망 (artificial neural network)은 생물의 시각 신경망을 모방하여 만들어진 알고리즘으로서 시각이 신경 (Neuron)들의 망으로 구성되고 노드 (node)사이의 연결강도를 바탕으로 구성되는 구조를 모사하는 이론 (Hopfield, 1982)이다. 인공신경망 모형은 미국의 Rosenblatt (1958)가 패턴의 분류를 위하여 퍼셉트론 (perceptron)을 제시한 이후에 비선형 또는 비정형 정보를 처리하기 위한 방법으로 널리 사용되고 있다. 신경망은 크게 자료를 받아들이는 입력층, 이를 결과값으로 나타내는 출력층, 자료와 결과와의 상관관계를 나타내는 은닉층이 있어 각 패턴마다 필요한 정보를 학습한다. 이 과정에서 역전파 알고리즘을 통하여 각각의 연결강도를 조정하게 되며, 역전파 알고리즘과 각각의 계층의 개수를 선정하는 것이 인공신경망의 효율을 결정짓는 중요한 요소가 된다 (Battiti, 1989). 본 연구에서는 기존의 수문자료에 대한 연구에서 좋은 결과를 나타낸 Lovenberg-Marquardt 역전파 알고리즘 및 Sigmoid 전달함수를 적용하였다 (Battiti, 1989).

Fig. 1. Simple Neural Network Diagram

본 연구에서 인공신경망을 선정한 이유는 크게 두 가지로 제시할 수 있다. 첫 번째로 인공신경망의 경우 비선형성을 지니는 자료에 대해서 높은 적용성을 지니고 있으므로 (Bourquin et al., 1998), 발생 가능한 다중공선성 또는 비선형 문제로부터 자유롭다. 두 번째로 세크라멘토 지역의 나이테 자료가 자기회귀성(autocorrelation) 또는 지연된 상관성(Lagged-correlation)을 지니고 있기 때문이다(Meko et al., 2001). 따라서, 이 경우 인공신경망 모형을 적용하는 것이 지연된 상관성 문제해결을 위한 대안이 될 수 있다(Basheer and Hajmeer, 2000).

2.2 연속이론을 통한 가뭄 정의

가뭄이라 함은 일반적으로 강수량의 부족으로 인하여 발생하는 다양한 사회·경제·환경·산업적인 문제를 가리킨다. 이러한 가뭄을 정의하기 위하여 가뭄의 발생, 종료, 지속기간, 심도, 빈도 등의 다양한 기준이 개발되고 제시되었다. 이 중에서 본 연구에서는 가뭄의 특성을 고찰하기 위하여 연속이론(Yevjevich, 1967)을 적용하였다.

Fig. 2. Drought Characteristics using the Run Theory

연속이론은 Fig. 2에서와 같이 특정한 수문변수인 $x_{i,t}$ 가 이미 결정되어진 특정 기준인 $x_{0,t}$ 이하로 떨어졌을 때의 사상(event)로 정의한다. 연속이론에서는 기준인 $x_{0,t}$ 이하로 떨어졌을 때의 기간을 지속기간, 떨어진 양의 총합을 심도,

가뭄 발생 사이의 기간을 간격으로 간주한다. 또한, 가뭄을 정의 하는 기준인 $x_{0,t}$ 는 상수 또는 시간에 따른 함수로서 적용할 수 있으며, 본 연구에서는 유출량의 중간값인 17.6 MAF를 기준으로 적용하였다. 가뭄의 변수 중에서는 일반적으로 지속기간과 심도가 중요하게 사용되며, 본 연구에서도 이를 가뭄의 주요변수로 분석하였다.

2.3 코플라 이론

홍수와는 다르게 가뭄은 각각의 지속기간별로 상이한 통계적 거동을 보인다(Kwak et al., 2014). 또한, 가뭄의 지속기간과 심도가 상호연관성을 가지고 있기 때문에 이를 동시에 고려할 수 있는 통계적 기법이 필요하다(AghaKouchak, 2014). 일반적인 다변량 기법들의 경우 동일한 확률분포형을 가정하나, 가뭄의 경우 상이한 확률분포형을 가지므로 적용 상에 문제점이 있다(Rodriguez, 2007). 이에 대한 대안으로서 코플라 이론이 대두되고 있다. 코플라 이론은 Sklar에 의하여 제시된 개념으로서 서로 상이한 확률분포형을 가지는 상호연관된 변수의 결합확률을 산정하는 기법이다(AghaKouchak, 2014). 서로 상관성을 지니고 있는 확률분포 $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 에 대하여, 각각의 주변확률분포 $F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)$ 가 존재할 경우, 각각의 확률분포형의 결합확률을 나타내는 코플라 함수 C 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = \frac{F_1(x_1), \dots, F_n(x_n)}{F(x_1, \dots, x_n)} = \psi_\alpha^{-1}(\psi_\alpha(F_1(x_1)) + \dots + \psi_\alpha(F_n(x_n))) \quad (1)$$

$$\frac{1}{T} = \frac{E(L)}{[1 - F_1, \dots, -F_n + C(F_1, \dots, F_n)]} \quad (2)$$

여기에서 ψ_α 는 코플라 모함수를 지칭하며, ψ_α^{-1} 는 모함수의 역함수를 가리킨다. T 는 재현기간, $E(L)$ 은 가뭄 사상 사이의 간격이다. 코플라 모함수의 경우에는 여러 가지 함수가 제시되어 있으며, 본 연구에서는 그 적용성으로 인하여 널리 사용되고 있는 Archimedean 코플라 함수를 사용하였다(Table 1 참조).

Table 1. Bivariate Archimedean Copula Family (AghaKouchak, 2014)

Family	Copula Function (C)	Generator function (ψ_α)	Parameter (α)
Gumbel	$\exp\left[-\left((-\log(F_1(x_1)))^\alpha + (-\log(F_2(x_2)))^\alpha\right)^{\frac{1}{\alpha}}\right]$	$-\log(t)^\alpha$	$\alpha \in [-1, \infty]$
Frank	$\frac{-1}{\alpha} \log\left[1 + \frac{(\exp(-\alpha F_1(x_1)) - 1)(\exp(-\alpha F_2(x_2)) - 1)}{\exp(-\alpha) - 1}\right]$	$-\log\left(\frac{\exp(-\alpha t) - 1}{\exp(-\alpha) - 1}\right)$	$\alpha \in [Y]$
Clayton	$(\max[F_1(x_1)^{-1} + F_2(x_2)^{-1} - 1])$	$1/\alpha(t^{-\alpha} - 1)$	$\alpha \in [-1, \infty]$

3. 적용 및 결과

3.1 대상유역 및 자료수집 및 선정

기존의 연구에서는 나이테와 강수량과의 관계를 고찰하고 재생성을 수행한 연구가 많았다. 그러나, 본 연구에서는 수자원과의 관계를 고찰하기 위하여 유출량을 재생성하고자 하며, 이를 위하여 미국의 세크라멘토강 유역을 선정하였다. 해당 유역은 다양한 나이테자료가 존재하고 있어서 자료의 특성을 세부적으로 볼 수 있으며, 상대적으로 장기간의 유량자료도 존재한다는 장점이 있다. 나이테 자료는 국제나이테DB (Grissino-Mayer and Fritts, 1997)를 통하여 수집되었다.

나이테는 각각의 고리 사이의 넓이(width)지수가 사용되었으며, 각각의 지수는 Cook (1985)의 연구에 따라서 표준화되었다. 이에 대응되는 하천의 유출량 자료는 Sacramento 강, Feather 강, Yuba 강, American 강의 4개의 유량측정지점에서 관측된 유량자료를 이용하였으며, 각 관측값의 합을 세크라멘토강의 총 유출량으로 간주하였다. 유출량자료는 캘리포니아 수자원국에서 수집되었으며, 1872년부터 1977년 사이의 자료를 사용하였다. 세크라멘토 유역의 연평균 유출량은 18.9 MAF (million acre-feet; $1.23 \times 10^9 \text{ m}^3$; 23.2 억 m^3)이며, 중간값은 17.6 MAF, 최대값은 1890년의 51.6

MAF이다(California Data Exchange Center, 2017). 나이테자료의 위치 및 유출량 자료수집지점의 세부적인 위치 및 고도, 수종은 Table 2에 명기하였다.

세크라멘토 지역의 17개의 나이테자료를 수집하였으나, 해당 나이테자료가 유역의 수문조건과 상관성을 지니고 있는가에 대한 여부는 제시된 바 없으며, 적합한 인공신경망 구축을 위해서 적절한 나이테 입력자료가 선정되어야 한다. 일반적으로 시행착오법을 통하여 입력변수를 조정하나, 인공신경망의 경우에는 시행착오법에 의한 선정이 어렵다는 점이 지적된 바 있다(Maier and Dandy, 2000). 이에 대안으로 Meko et al. (2001)의 연구에서 제시된 것과 같이 교차상관성을 기준으로 나이테자료를 선정하였다(Fig. 3 참조). 유출량자료와 나이테자료와의 교차상관을 기준으로 보면 총 17개의 나이테 자료 중 Antelope lake (Pinus jeffreyi, Pinus ponderosa), Felkner ridge, Frederick Butte, Lemon canyon, Piute mountain, Sorrel peak의 총 7개의 나이테자료가 유관한 것으로 나타났다. 또한, Antelope (Pinus jeffreyi, Pinus ponderosa), Dalton reservoir, Hager basin reservoir의 4개의 나이테자료는 당해연도가 아닌 차년도의 유출량과도 유관한 것으로 나타났다. 따라서, 총 9개의 나이테자료 (다음해와 유관한 4개 중에서 2개는 당해연도 유출량과도 유관함)를 입력자료로서 구축하였다. 또한, 특이점으로는 차년도와

Table 2. Tree Ring Site and Streamflow Observatory Specification

Cat.	Site Name	Location			Tree Species	Tick
		Lat. (degree)	Lon. (degree)	Height (E.L.m)		
Tree-ring sites	Antelope Lake (1)	40.15	-120.6	1480	<i>Pinus jeffreyi</i> Balf	(f)
	Antelope Lake (2)	40.15	-120.6	1480	<i>Pinus ponderosa</i> Douglas ex C. Lawson	(g)
	Calamity Creek	43.98	-118.8	1464	<i>Juniperus occidentalis</i> Hook	(c)
	Dalton Reservoir	41.62	-120.7	1531	<i>Pinus ponderosa</i> Douglas ex C. Lawson	(d)
	Devil's Dance Floor	37.75	-119.75	2084	<i>Pinus jeffreyi</i> Balf	(n)
	Donner Summit	39.32	-120.35	2265	<i>Pinus jeffreyi</i> Balf	(j)
	Felkner Ridge	39.5	-122.67	1494	<i>Pinus lambertiana</i> Douglas	(a)
	Frederick Butte	43.58	-120.45	1494	<i>Juniperus occidentalis</i> Hook	(k)
	Hager Basin Reservoir	41.77	-120.75	1524	<i>Juniperus occidentalis</i> Hook	(e)
	Hell's Half Acre	39.6	-122.95	1922	<i>Pinus jeffreyi</i> Balf	(i)
	Lemon Canyon	39.57	-120.25	1859	<i>Pinus jeffreyi</i> Balf	(b)
	Piute Mountain	35.53	-118.43	1975	<i>Pinus jeffreyi</i> Balf	(p)
	Snow White Ridge	38.13	-120.05	1731	<i>Pinus ponderosa</i> Douglas ex C. Lawson	(q)
	Sorrel Peak	35.43	-118.28	2011	<i>Pinus jeffreyi</i> Balf	(o)
	Spring Canyon	44.9	-118.93	1366	<i>Juniperus occidentalis</i> Hook	(l)
	Steens Mountain	42.67	-118.92	1656	<i>Juniperus occidentalis</i> Hook	(h)
	St. White Mountain	39.43	-122.68	1555	<i>Pinus ponderosa</i> Douglas ex C. Lawson	(m)
Stream-flow sites	Sacramento River	40.29	-122.19	56.6		
	Feather river, Oroville	39.52	-121.55	45.4		
	Yuba river, smartville	39.24	-121.27	85.3		
	American river, Folsom	38.68	-121.18	0

Fig. 3. Cross Correlation Diagram Between Streamflow and Tree Ring Data; (a)~(p) is Same as Tick in Table 2

Fig. 4. Study Area, and tree ring sites, streamflow sites; green circle indicates that the tree ring has correlation with streamflow, red circle indicates correlation with time-lag (1 year) and yellow box indicates that there is no correlation with streamflow

연관성을 보인 4개의 나이테자료는 모두 저수지 및 호소와 인접한 위치를 지니고 있었다. 따라서, 저수지와 관련되어 차년도에도 직접적으로 영향을 받거나, 지하수의 영향을 받는 것으로 판단된다. 입력자료로서 선정된 7개 및 4개의 나이테자료의 위치와 상관성은 Fig. 4에 명기하였다.

3.2 인공신경망 모형 구축 및 검증

이전 절에서 선정된 총 11개의 나이테자료를 이용하여 인공신경망을 구축하고 이를 실제 관측유출량자료와 비교하여 검증하였다. 모형의 구축을 위해서 1872년부터 1957년까지의 자료를 이용하여 학습을 수행하였고, 이후 1958년부터 1977년까지의 자료를 이용하여 모형을 검증하였다. 또한, 모형의 적합도를 판정하기 위하여 전체적인 오차의 정도를 나타내는 R^2 값과 $RMSE$ (Hyndman and Khandakar, 2007), 모형의 효율성을 나타내는 $Nash$ 효율성계수(Nash and Sutcliffe, 1970)를 적용하였다. 인공신경망 모형의 보정 및 검증 결과는 Fig. 5와 같다. 보정 결과에 따르면 R^2 , $RMSE$ 및 $Nash$ 효율성계수 값이 각각 0.75, 3.85 MAF, 0.76을 나타내었으며, 이는 기존의 연구결과보다 높은 신뢰성을 보여주는 것이라 할 수 있다. 또한, 검증단계에서도 R^2 , $RMSE$ 및 $Nash$ 효율성계수 값이 각각 0.88, 2.71 MAF, 0.87으로 나타났다. 다만, 보정단계보다 검증단계의 평가합수값이 더 높게 나타났다. 이에 대한 원인은 여러 가지가 있을 수 있으나, 가장 큰 이유는 전체적인 변동성과 기간의 차이인 것으로 보인다. 그 예로 보정기간에는 연유출량이 5.74에서 51.64 MAF를 나타내었으나, 검증기간에는 5.13부터 32.5 MAF 사이의 값을 보여주었다.

구축된 모형이 보정 및 검증 과정을 거쳐서 재생성을 하기 위한 신뢰성이 있음이 판정되었으므로 기존의 나이테 자료를 이용하여 1560년부터 1871년 사이의 유출량을 재생성하였으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다. 재생성된 자료를 보면 평균 유출량은 20.4 MAF, 중간값은 19.8 MAF이며, 비대칭도 0.67로서 관측값과 유사한 결과를 나타내었다. 또한, 특징적으로 1750년대부터 1800년대 초반, 1850년도 전후, 1915년도 이후로 낮은 유출체적을 보여주어 해당 기간에 장기간의 가뭄이 발생하였을 것으로 판단된다. 워싱턴주 지역에 대해서 수행된 Gedalof et al. (2004)의 연구결과를 보면, 1750년대와 1850년대 전후로 최대 12년에 달하는 장기간의 가뭄이 발생한 것으로 제시하고 있으며, 1920년대 이후로 가뭄도 존재하여(Jones, 2015), 재생성결과와 설득력이 있는 것으로 판단된다.

3.3 이변량 가뭄분석 및 고찰

3.2절에서 재생성된 연단위 유출량자료와 관측 유출량자료를 결합하여 1560년부터의 가뭄에 대한 이변량 가뭄분석을 수행하였다. 해당 연유출량 계열에 세크라멘토 유역의 유출량 중간값인 19.4 MAF를 절단기준으로 간주하여 가뭄의 지속기간과 심도를 분리하였다. 가뭄 사상을 분리한 결과, 1560년부터 1977년 사이에 총 96건의 가뭄이 발생한 것으로 정의되었으며, 평균적인 가뭄의 간격은 2.1년으로 산정되었다. 가장 장기간의 가뭄은 1927년부터 1936년까지의 10년간에 걸친 가뭄(심도 75.3 MAF)인 것으로 나타났으며, 가장 심한 가뭄은 1582년부터 1589년까지 8년 동안에 발생한 심도 76.2 MAF의 가뭄인 것으로 나타났다.

Fig. 5. Calibration and Validation Results with Tree Ring; (a) calibration period (1872 to 1957), and (b) validation period (1958 to 1977)

Fig. 6. Reconstructed Streamflow using ANN Model

분리된 가뭄 사상에 코풀라 함수를 적용하여 가뭄의 지속 기간과 심도에 대한 이변량 가뭄분석을 시행하였다. 각각의 분포형을 결정하기 위하여 PPCC 검정(Vogel et al., 2009)을 시행하였으며, 가뭄의 지속기간은 exponential 분포형, 심도는 gamma 분포형인 것으로 검정되었다. 각각의 주변확률분포에 대하여 Archimedean 코풀라(Frank, Clayton, Gumbel)를 적용하였으며, 코풀라함수의 매개변수는 Kentall's tau와의 상관관계를 이용하여 산정하고, 3개의 코풀라함수 중에서 가장 적합한 함수를 선정하기 위해서 K Criterion 값을 이용한 최소 2차 거리 (L^2)를 산정하였다(El Adlouni and Ouarda, 2009).

Fig. 7에서 나타난 바와 같이 가장 적은 거리($L^2=0.023$)를

Fig. 7. K Criterion Plot for Copula Families

보여준 Frank 코풀라함수가 세크라멘토 강 유역의 가장 적합한 함수인 것으로 판단되며, 해당 코풀라 매개변수는 8.03으로 산정되었다. 또한, 각각의 가뭄에 대한 재현기간은 Eq. (2)를 통하여 산정하였다. 여기에서 평균 가뭄의 간격 ($E(L)$)은 2.1년이며, 그에 따른 가뭄 이변량 재현기간도는 Fig. 8과 같다.

가뭄의 재현기간도는 세크라멘토 강 유역의 가뭄 양상을 나타낸다. 전체적으로 세크라멘토 강 유역의 가뭄은 지속기간과 심도가 양의 상관관계를 지니고 있는 것으로 판단된다. 또한, 3년 기간의 가뭄의 변동성보다 2년 기간의 변동성이 높은 것으로 나타났으며, 이는 기존의 가뭄분석 방법론으로는 2년 기간 가뭄의 확률값이 비정상적으로 높게 나타날 수 있다는 것을 의미한다. 따라서, 해당 유역의 가뭄 분석은 이변량 분석이 필수적일 것으로 판단된다. 또한, 세크라멘토 강 유역에서 발생한 대부분의 가뭄은 50년 빈도를 초과하지 않으며, 오직 6번의 가뭄만이 100년 빈도를 초과한 것으로 나타났다. 상기에 전술한 1927-1936년의 가뭄(심도 75.3 MAF)는 약 1000년의 재현기간, 1582-1589년 가뭄(심도 76.2 MAF)는 약 800년의 재현기간을 가지는 가뭄으로 판단된다. 기존에 관측자료만을 기반으로 분석하는 경우 필연적으로 이상치의 영향을 크게 받는다. 따라서, 상대적으로 큰 가뭄이 발생한 경우 재현기간이 급격히 증가하는 단점이 있으나, 이러한 결과를 포함하면 가뭄의 빈도에 대한 좀 더 정확한 판정이 가능할 것으로 판단된다.

또한, 본 연구에서 도출된 결과 중에서 특이점은 당해연도 뿐만 아니라 차년도의 유출량과도 상관관계를 지니고 있는 나이트 자료 존재한다는 점이다. 공통적으로 호소 및 저수지와 인접하고 있으므로 호소의 수자원 및 지하수 등에

Fig. 8. Return Period Plot for Sacramento River

영향을 받는 것으로 판단되며, 이를 통하여 왜 대한민국의 나이테자료의 활용이 어려운지를 추정해볼 수 있다. 국내에서 조사된 나이테 자료는 설악산 관측지점에 자생하는 342개의 잣나무를 대상으로 수집되었다(Fig. 9 참조). 그러나, 설악산 지역은 고도가 높으며 인근에 하천 및 호소 등이 거의 존재하고 있지 않다. 따라서, 국내의 나이테 자료는 수자원과의 연관성은 매우 적을 것으로 판단된다. 또한, 설악산 지형은 대부분 선캄브리아대의 화강암질 편마암으로 이루어져 있으며 이 경우 지하수나 강수를 함양하는 능력이 떨어질 것으로 판단된다. 따라서, 기존의 연구(Mun et al., 2011)에서 상관관계가 적은 것으로 제시된 것은 이러한 원인인 것으로 판단되며, 이를 보완하기 위해서는 하천 및 기상인자와 밀접한 관련이 있는 보전지역에 대해서 나이테 자료를 수집하여야 할 것으로 판단된다.

Fig. 9. Site Location of Tree-ring in Korea

4. 결 론

본 연구에서는 나이테 자료를 이용하여 장기간에 걸친 가뭄의 경향을 분석하였다. 이를 위하여 세크라멘토 강 유역의 나이테자료와 인공신경망 모델을 이용하여 1560년부터의 유출량 자료를 재생성하였으며, 이에 코플라 함수를 적용하여 이변량 가뭄분석 및 그 특성 분석을 수행하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결과는 크게 다음과 같은 세 가지로 요약할 수 있다.

- (1) 나이테자료와 인공신경망을 이용하여 설득력 있는 연유출량 재생성이 가능함을 보였다. 따라서, 나이테 자료를 활용하여 기존의 미관측기간의 자료를 효율적으로 습득할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 기존의 가용한 기록과 자료를 활용하여 불확실성에 대한 검토가 수반되어야 할 것으로 판단된다.
- (2) 세크라멘토 강 유역의 가뭄경향은 지속기간과 심도 모두 양의 상관관계를 보여주었으며, 2년 지속기간 가뭄의 변동성이 3년보다 더 높게 나타났다. 이 경우, 기존의 지속기간에 따른 단변량 분석을 수행할 경우 2년 재현기간을 지니는 가뭄의 심도가 높게 나타날 수 있어 이변량 분석이 필요하다 판단된다.
- (3) 수문량과 연관성을 보이는 나이테자료를 인공신경망의 입력자료로서 구축하였으며, 해당 자료의 대부분은 호소 및 하천과 인접한 지역인 것으로 판단된다. 그에 따라서 국내에서 제공하는 설악산 지역의 나이테자료는 상대적으로 수자원 및 기상자료 재생성에 부적합할 가능성이 높으며, 새로운 나이테자료 조사지역의 발굴

이 시급하다.

본 연구의 한계점은 나이테 자료를 이용하여 연유출량을 재생성함으로써 발생하는 불확실성이다. 따라서, 향후 좀 더 다양한 자료와 지수를 이용하여 자료 재생성의 불확실성을 저감하는 것이 가장 큰 과제라 하겠다. 그러나, 장기간에 걸친 자료를 획득할 수 있다는 점에서 수문학적인 적용성이 높다 하겠다.

References

- AghaKouchak, A. (2014) Entropy-Copula in Hydrology and Climatology. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 15, No. 6, pp. 2176-2189.
- Agüero, J.D.L.C., and Rodríguez, F.J.G. (2004) Morphometric Stock Structure of the Pacific Sardine *Sardinops sagax* (Jenyns, 1842) off Baja California, Mexico. *Morphometrics*, Edited by Elewa, A.M.T., Springer Science & Business Media, Berlin, Heidelberg, Germany, pp. 115-127.
- Basheer, I.A., and Hajmeer, M. (2000) Artificial Neural Networks: Fundamentals, Computing, Design, and Application. *Journal of Microbiological Methods*, Vol. 43, No. 1, pp. 3-31.
- Battiti, R. (1989) Accelerated Backpropagation Learning: Two Optimization Methods. *Complex systems*, Vol. 3, pp. 331-342.
- Bourquin, J., Schmidli, H., van Hoogevest, P., and Leuenberger, H. (1998) Advantages of Artificial Neural Networks (ANNs) as Alternative Modelling Technique for Data Sets Showing Non-linear Relationships Using Data from a Galenic Study on a Solid Dosage Form. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, Vol. 7, No. 1, pp. 5-16.
- California Data Exchange Center (2017) Retrieved May 12, 2017, from <http://cdec.water.ca.gov/index.html>
- Chbouki, N. (1992) *Spatio-temporal Characteristics of Drought as Inferred from Tree-ring Data in Morocco*. Ph.D. dissertation, University of Arizona, Tucson, AZ, USA.
- Cook, E.R. (1985) *A Time Series Analysis Approach to Tree-Ring Standardization*. Ph.D. Dissertation. University of Arizona, Tucson, AZ, USA
- Díaz, S.C., Touchan, R., and Swetnam, T.W. (2001) A Tree-ring Reconstruction of Past Precipitation for Baja California Sur, Mexico. *International Journal of Climatology*, Vol. 21, No. 8, pp. 1007-1019.
- El Adlouni, S., and Ouarda, T.B. (2009) Joint Bayesian Model Selection and Parameter Estimation of the Generalized Extreme Value Model with Covariates using Birth-death Markov Chain Monte Carlo. *Water Resources Research*, Vol. 45, No. 6, doi:10.1029/2007WR006427
- Ferguson, C.W. (1968) Bristlecone Pine: Science and Esthetics: A 7100-year Tree-ring Chronology Aids Scientists; Old Trees Draw Visitors to California Mountains. *Science*, Vol. 159, No. 3817, pp. 839-846.
- Frank, D., and Esper, J. (2005) Characterization and Climate Response Patterns of a High-elevation, Multi-species Tree-ring Network in the European Alps. *Dendrochronologia*, Vol. 22, No. 2, pp. 107-121.
- Fritts, H.C. (1969) Tree-ring Analysis: A Tool for Water Resources Research. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Vol. 50, No. 1, pp. 22-29.
- Gedalof, Z.E., Peterson, D.L., and Mantua, N.J. (2004) Columbia River Flow and Drought Since 1750. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 40, No. 6, pp. 1579-1592.
- Graumlich, L.J. (1987) Precipitation Variation in the Pacific Northwest (1675-1975) as Reconstructed from Tree Rings. *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 77, No. 1, pp. 19-29.
- Gray, S.T., Fastie, C.L., Jackson, S.T., and Betancourt, J.L. (2004) Tree-ring-based Reconstruction of Precipitation in the Bighorn Basin, Wyoming, since 1260 AD. *Journal of Climate*, Vol. 17, No. 19, pp. 3855-3865.
- Grissino-Mayer, H.D., and Fritts, H.C. (1997) The International Tree-Ring Data Bank: An Enhanced Global Database Serving the Global Scientific Community. *The Holocene*, Vol. 7, No. 2, pp. 235-238.
- Helama, S., Meriläinen, J., and Tuomenvirta, H. (2009) Multicentennial Megadrought in Northern Europe Coincided with a Global El Niño-Southern Oscillation Drought Pattern during the Medieval Climate Anomaly. *Geology*, Vol. 37, No. 2, pp. 175-178.
- Hopfield, J.J. (1982) Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.*, Vol. 79, No. 8, pp. 2554-2558.
- Hughes, M.K., Xiangding, W., Xuemei, S., and Garfin, G.M. (1994) A Preliminary Reconstruction of Rainfall in North-central China Since A.D. 1600 from Tree-ring Density and Width. *Quaternary Research*, Vol. 42, No. 1, pp. 88-99.
- Hyndman, R.J., and Khandakar, Y. (2007) Automatic Time

- Series Forecasting: The Forecast Package for R. *Journal of Statistical Software*, Vol. 27, Issue 3, pp. 1-21.
- Jones, J. (2015) California's Most Significant Droughts: Comparing Historical and Recent Conditions. California Department of Water Resources.
- Kim, H.S., Hwang, S. H., and Kim, J. H. (1998) Reconstruction of River Flows Using Tree-Ring Series and Neural Network, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 18, No. 2-6, pp. 583-589.
- Kwak, J., Kim, D., Kim, S., Singh, V.P., and Kim, H. (2014) Hydrological Drought Analysis in Namhan River Basin, Korea. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 19, No. 8, doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000889
- Li, J., Gou, X., Cook, E. R. and Chen, F. (2006) Tree-ring Based Drought Reconstruction for the Central Tien Shan Area in Northwest China. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, No. 7, L07715. doi:10.1029/2006GL025803
- Maier, H.R., and Dandy, G.C. (2000) Neural Networks for the Prediction and Forecasting of Water Resources Variables: A Review of Modelling Issues and Applications. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 15, No. 1, pp. 101-124.
- Meko, D., Stockton, C.W., and Boggess, W.R. (1995) The Tree-ring Record of Severe Sustained Drought. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 31, No. 5, pp. 789-801.
- Meko, D., Therrell, M.D., Baisan, C.H., and Hughes, M.K. (2001) Sacramento River Flow Reconstructed to A.D. 869 from Tree Rings. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 37, No. 4, pp. 1029-1039.
- Mishra, A.K., and Singh, V.P. (2011) Drought Modeling: A Review. *Journal of Hydrology*, Vol. 403, No. 1-2, pp. 157-175.
- Mun, J.W., and Lee, D.Y. (2011) Tree-ring Data Application for Drought Mitigation. *Magazine of Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 11, No. 1, pp. 70-78.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970) River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I: A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Noh, Y. (2016) A Comparison Study on Statistical Modeling Methods. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 17, No. 5, pp. 645-652.
- Raffalli-Delercq, G., Masson-Delmotte, V., Dupouey, J.L., Stievenard, M., Breda, N., and Moisselin, J.M. (2004) Reconstruction of Summer Droughts using Tree-ring Cellulose Isotopes: A Calibration Study with Living Oaks from Brittany (western France). *Tellus B*, Vol. 56, No. 2, pp. 160-174.
- Rodriguez, J.C. (2007) Measuring Financial Contagion: A Copula Approach. *Journal of Empirical Finance*, Vol. 14, No. 3, pp. 401-423.
- Ropelewski, C.F., and Halpert, M.S. (1986) North American Precipitation and Temperature Patterns Associated with the El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Monthly Weather Review*, Vol. 114, No. 12, pp. 2352-2362.
- Rosenblatt, F. (1958) The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain. *Psychological Review*, Vol. 65, No. 6, pp. 386-408.
- Schneuwly, D.M., and Stoffel, M. (2008) Tree-ring Based Reconstruction of the Seasonal Timing, Major Events and Origin of Rockfall on a Case-study Slope in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 8, No. 2, pp. 203-211.
- 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.
- Stahle, D.W., Cook, E.R., Cleaveland, M.K., Therrell, M. D., Meko, D.M., Grissino-Mayer, H. D. and Luckman, B. H. (2000) Tree-ring Data Document 16th Century Megadrought Over North America. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, Vol. 81, No. 12, pp. 121-125.
- Stockton, C.W., and Meko, D.M. (1975) A Long-term History of Drought Occurrence in Western United States as Inferred from Tree Rings. *Weatherwise*, Vol. 28, No. 6, pp. 244-249.
- Tian, Q., Gou, X., Zhang, Y., Peng, J., Wang, J., and Chen, T. (2007) Tree-ring Based Drought Reconstruction (A.D. 1855-2001) for the Qilian Mountains, Northwestern China. *Tree-Ring Research*, Vol. 63, No. 1, pp. 27-36.
- Vergni, L., Todisco, F.I. and Mannocchi, F. (2015) Analysis of Agricultural Drought Characteristics through a Two-dimensional Copula. *Water Resources Management*, Vol. 29, No. 8, pp. 2819-2835.
- Vogel, R.M., Hosking, J.R., Elphick, C.S., Roberts, D.L.,

and Reed, J.M. (2009) Goodness of Fit of Probability Distributions for Sightings as Species Approach Extinction. *Bulletin of Mathematical Biology*, Vol. 71, No. 3, pp. 701-719.

Wang, B., Jhun, J.G., and Moon, B.K. (2007) Variability and Singularity of Seoul, South Korea, Rainy Season (1778-2004). *Journal of Climate*, Vol. 20, No. 11, pp. 2572-2580.

Yevjevich, V. (1967) *An Objective Approach to Definitions*

and Investigations of Continental Hydrologic Droughts. Hydrologic Paper No. 23, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA.

Received	October 30, 2017
Revised	November 1, 2017
Accepted	January 29, 2018