



Drought analysis of Cheongmicheon watershed using meteorological, agricultural and hydrological drought indices

Won, Kwang Jai^a · Chung, Eun-Sung^{a*}

^aDept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

Paper number: 16-017

Received: 11 February 2016; Revised: 24 March 2016 / 25 March 2016; Accepted: 25 March 2016

Abstract

This study assessed drought of Cheongmicheon watershed from 1985 to 2015 according to duration. In order to quantify drought, we used meteorological and hydrological drought index. Standardized Precipitation Index(SPI) based on precipitation and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index(SPEI) based on precipitation and evapotranspiration were applied as meteorological drought index. Palmer Drought Severity Index(PDSI) and Stream Drought Index(SDI) based on simulation of Soil and Water Assessment Tool(SWAT) model were applied as agricultural and hydrological drought index. As a result, in case average of extreme and averaged drought, 2014 and 2015 have the most vulnerable in all drought indices. Variation of drought showed different trend with regard to analysis of frequency. Also, the extreme and averaged drought have high correlation between drought indices excluding between PDSIs. However, each drought index showed different occurrence year and severity of drought Therefore, drought indices with various characteristics were used to analysis drought.

Keywords: Drought severity, Meteorological drought index, Agricultural drought index, Hydrological drought index, SWAT

기상학적, 농업학적, 수문학적 가뭄지수를 이용한 청미천 유역의 가뭄 분석

원광재^a · 정은성^{a*}

^a서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과

요 지

본 연구는 1985년부터 2015년까지 지속기간에 따른 청미천 유역의 가뭄을 분석하였다. 가뭄의 정량적 평가를 위해 기상학적 가뭄지수와 수문학적 가뭄지수를 사용하였다. 기상학적 가뭄지수로써는 강수량을 변수로 하는 SPI(Standardized Precipitation Index)와 강수량과 증발산량을 변수로 하는 SPEI(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)를 사용하였다. SWAT 모형의 모의를 통해 도출된 결과를 바탕으로 농업학적 가뭄지수인 PDSI(Palmer Drought Severity Index)와 수문학적 가뭄지수인 SDI(Streamflow Drought Index)를 적용하였다. 산정 결과, 극한 및 평균 가뭄의 평균에서 2015년과 2014년이 가장 가뭄에 취약함이 확인되었다. 빈도분석에 따른 가뭄의 변동성은 서로 다른 형태를 보였다. 또한 상관분석에서 극한 가뭄 및 평균 가뭄은 PDSI를 제외한 SPI, SPEI, SDI 가뭄지수간에는 높은 상관관계가 확인되었다. 하지만 각 가뭄지수는 서로 다른 극한가뭄의 시기 및 강도를 보였다. 따라서 가뭄분석시 다양한 특성을 지닌 가뭄지수를 활용하는 것이 필요하다.

핵심용어: 가뭄 심도, 기상학적 가뭄지수, 농업학적 가뭄지수, 수문학적 가뭄지수, SWAT

1. 서 론

기후변화에 따른 지구 온난화 현상으로 기온이 상승하고

이로 인한 강수의 상당 부분이 증발산량으로 손실되고 있으며, 평년 강수량 대비 급격히 줄어든 강수량을 보이는 지역들이 점점 늘어날 것으로 전망되고 있다. 이로 인해 가뭄에 취약하고 피해 받는 지역들이 증가할 것으로 예상된다. 이에 따라 가뭄의 피해를 최소화하기 위해 다양한 가뭄지수가 개발되어 가뭄의 심도(severity)를 정량화하려는 연구가 진행 중이며,

*Corresponding Author. Tel: +82-02-970-9017
E-mail: eschung@seoultech.ac.kr (E. -S. Chung)

관심분야에 따라 각기 다른 변수들을 이용한 가뭄지수가 활용되고 있다(Du Pisani et al., 1998; Heim, 2002; Keyantash and Dracup, 2002; Sung and Chung, 2014).

다양한 가뭄지수가 존재하며, 기상학적 가뭄은 강수량 규모에 의존하여 구분되며 전 세계적으로 강수량 자료를 이용한 다양한 지수들이 개발되어 활용되고 있다(Keyantash and Dracup, 2002; Hernandez and Uddameri, 2013). 넓은 범위의 가뭄의 정의에서, 강수의 부족은 기상학적 가뭄을 야기하고, 이러한 강수 부족은 농업학적 가뭄이라 불릴 수 있는 토양수분에 영향을 끼친다. 토양부터 하천까지에 이르는 적은 토양수분 함양은 수문학적 가뭄의 원인이 된다. 이렇듯 가뭄은 서로 다른 특징들을 보이며, 각자의 가뭄지수가 서로에게 영향을 끼치는 연속적인 일련의 과정이다(Karamouz et al., 2012). 가뭄을 정량화하는 지수 중 SPI(Standardized Precipitation Index; McKee et al., 1993)는 계산과정이 쉽고, 강수의 부족만으로 가뭄을 직관적으로 판단할 수 있어 가장 활발하게 이용되고 있으며, 최근에는 강수량과 증발산량을 함께 고려하여 조금 더 물리적으로 가뭄을 평가할 수 있는 SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index; Vicente-Serrano, 2010)가 많은 주목을 받고 있다(Lee et al., 2015). 가뭄 정량화에 효과적인 방법으로 알려져 있는 PDSI(Palmer Drought Severity Index; Palmer, 1965)는 다양한 분야의 가뭄평가를 위해 사용되고 있으며, Nalbantis (2008)는 하천수 가뭄지수인 SDI(Streamflow Drought Index)를 제안하여 월 유량으로 가뭄의 심도와 지속기간을 구분해 내는 방법을 제안하였다. 하지만 다양한 가뭄 지수에 내재되어있는 민감도 및 정확성으로 인해 하나의 가뭄지수로 대상 지역의 가뭄을 평가하는 것은 적합하지 않다. 가뭄의 경우 강수량, 증발산량, 토양수분 등의 다양한 조건들로 인해 발생하기 때문에 다양한 가뭄지수의 적용을 통해 각 가뭄지수의 일치성 및 가뭄 정도의 파악은 필요한 연구라고 할 수 있다(Morid et al., 2006; Smakhtin and Hughes, 2007; Banimahd and Khalili, 2013).

또한 물 부족 현상을 규명하기 위해 강우-유출모형은 오랜 기간 동안 사용되어 왔으며, 공간분석 기술의 발전은 유역의 특성을 반영하는 다양한 매개변수로 이루어지고 있는 강우-유출모형의 전·후처리에 많은 기여를 했다(Won et al., 2015). 이러한 기술을 바탕으로 최근에는 분포형(distributed) 및 준(semi)분포형 모형이 수자원 관리에서 복잡한 문제를 해결하기 위해 사용되고 있다(Beven, 1989; Beven, 2002; Sorooshian and Gupta, 1995). 그 중에서도 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형은 토양의 특성과 토지이용 그리고 다양한 기후 조건을 고려하여 유역의 유출량 산정에

과적으로 사용되고 있다.

본 연구는 청미천 유역의 지속기간 3개월, 6개월, 9개월에 따른 1985년부터 2015년까지의 가뭄을 비교하였고, 빈도분석을 통한 가뭄의 변동성 확인 및 가뭄 지수별 상관계수를 산정하였다. 이 때 사용한 가뭄지수로는 기상학적 가뭄지수인 SPI와 SPEI와 농업학적 가뭄지수인 PDSI, 수문학적 가뭄지수인 SDI를 적용하여 평가하였다. SWAT 모형의 적용을 통해 농업학적 가뭄지수 산정을 위한 유효토양수분량과 수문학적 가뭄지수 산정을 위한 유출량을 모의하여 해당 가뭄지수를 도출하였다.

2. 이론적 배경

2.1 SWAT 및 SWAT-CUP 모형

SWAT 모형은 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준 분포형 장기-강우유출모의 모형으로서 네 개의 부모형으로 구성되어 있다. 즉, 수문, 영양물질, 토양유실, 하도추적 부모형으로 구분할 수 있다. 이 중에서 수문 부모형은 연속방정식에 의해 일 단위로 물수지를 산정하며, 그 구성으로는 수로손실, 유출, 지하수 흐름, 증발산, 지표면, 차단, 침투 등이다. 이를 통해 각 수문응답단위(HRU, Hydrological Response Unit) 별로 독립적으로 유출량이 계산되며 하도추적을 통해 해당 유역의 출구지점에서의 유출량이 계산한다. SWAT 모형에서 수문 부모형은 다음 Eq. (1)과 같은 물수지 방정식에 근거를 두고 있다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_{surf} - ET_i - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서, SW_t 는 t 일의 토양수분함량(mm), t 는 시간으로써 일 단위이며, R_i 는 i 일의 강수량(mm), Q_{surf} 는 i 일의 유출량(mm), ET_i 는 i 일의 증발산량(mm), W_{seep} 은 i 일의 침투량(mm), Q_{gw} 는 i 일의 환원유출(mm)이다.

SWAT 모형의 매개변수 최적화를 위한 SWAT-CUP 모형은 SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Ver.2), GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), ParaSol (Parameter Solution), PSO(Particle Swarm Optimization), MCMC (Markov Chain Monte Carlo)로 구성되어 있다. 본 연구에서는 SUFI-2 방법을 사용하였다. 이 방법은 GLUE 알고리즘의 개념과 유사하게 순차적으로 매개변수를 추정한다

다. SUFI-2 알고리즘은 개념적 모델, 매개변수, 추정값 그리고 강수량 등 모두가 불확실한 매개변수로 이루어져 있다고 본다. 불확실성(uncertainty)의 정도는 P-factor로 불리는 95% 예측의 불확실성(95PPU)의 비율로 측정되며, 강우량, 온도와 같은 입력자료는 모델 예측의 불확실성을 증가시키므로 예측의 불확실성에 의해 선택된 자료의 비율은 불확실성 분석의 강도를 평가하는 좋은 척도가 된다.

2.2 SPI와 SPEI

기상학적 가뭄지수인 SPI는 시간 단위별 누가강수 시계열의 작성, Pearson Type-III (PT-III) 분포를 이용한 매개변수 추정, 누가분포함수(cumulative distribution function) 산정 및 표준정규분포에 적용시킨 가뭄지수의 산정 등의 단계로 계산되며, 최종적으로 산정한 SPI는 다음과 같이 총 7단계로 구분된다(Mckee et al., 1993)(Table 1).

가뭄은 SPI값이 -1.0 혹은 더 작은 값에 도달할 때 발생하며 0보다 클 때 가뭄이 끝나게 된다. 가뭄 사상은 가뭄 시작과 끝의 시간 간격으로 정의된 지속기간과 SPI 값으로 표현되는 가뭄 심도로 표현하며 누적된 가뭄의 총량도 구분할 수 있다. 이를 가뭄 크기(Drought Magnitude, DM)라 하며, 가뭄 사상에 속한 모든 기간에 대한 지수의 합으로서 Eq. (2)로 계산된다.

$$DM = - \left(\sum_{j=i}^x SPI_{i,j} \right) \tag{2}$$

여기서, 임의의 기간 *i*월 단위에 대하여, *j*는 가뭄 시작 첫 번째 달로부터 가뭄이 종료되는 시점(*x*)까지 계속해서 증가한다.

강수량과 잠재 증발산량인 PET (Potential Evapotranspiration)의 차이에 의해 계산되는 SPEI의 가뭄심도는 SPI의 분류 기준과 같다(Table 1). SPEI의 증발산량은 자료 획득이 쉽고 연산과정이 간단한 Thornthwaite (Thornthwaite, 1948; Thornthwaite and Mather, 1955)방법을 사용하였으며, 산정 과정은 다음과 같다.

$$PET = 16K \left(\frac{10T}{I} \right)^m \tag{3}$$

여기서, *T*는 월평균 기온으로 단위는 °C, *I*는 열지수(heat index)로 월(month) 열지수를 합하여 구한 연(year) 열지수를 의미하며, *m*은 *I*와의 관계를 통해 나타낼 수 있다. 또한 *K*는 위도(latitude)와 월(month)의 함수이다. 월 열지수는 Eq. (4)와 같다.

$$I = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \tag{4}$$

연월지수 *I*는 *m*과의 관계로 구해지며 두 변수 사이의 관계는 아래 Eq. (5)와 같다.

$$m = 6.75E^{-7}I^3 - 7.71E^{-5}I^2 + 1.79E^{-2}I + 0.492 \tag{5}$$

Eq. (3)의 *K*는 위도(latitude)와 월(month)의 함수로 Eq. (6)과 같다.

$$K = \left(\frac{N}{12} \right) \left(\frac{NDM}{30} \right) \tag{6}$$

여기서, *NDM*은 월별 일(day)수, *N*은 일조시간의 최대값 ($N = \left(\frac{24}{\pi} \right) \omega_s$)이다.

각기 다른 시간 규모(time scales)에 따라 Eq. (7)과 같이 강수량과 증발산량의 차로 산정되는 *D_i*는 시간 규모에 따라 합성되며, Eq. (8)로부터 합성된 *D_i*의 확률분포(probability distribution)는 Log-logistic 분포를 이용하여 매개변수 산정한 후, 표준정규분포로 변환하여 가뭄지수를 산정하게 된다 (Vicente-Serrano, 2010).

$$D_i = P_i - PET_i \tag{7}$$

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} P_{n-i} - PET_{n-i} \tag{8}$$

여기서, *k*는 합성 시간 규모, *n*은 계산에 이용된 월(month)이다.

Table 1. SPI ranges for drought condition (Mckee et al., 1993)

SPI range	Drought condition
> 2.00	Extremely wet
1.50 ~ 1.99	Very wet
1.00 ~ 1.49	Moderately wet
-0.99 ~ 0.99	Near normal
-1.00 ~ -1.49	Moderately dry
-1.50 ~ -1.99	Severely dry
< -2.00	Extremely dry

2.3 PDSI

Palmer(1965)는 가뭄을 장시간의 이상수분부족으로 나타나는 현상이며, 이상수분부족은 정상적인 기후에서 현저하게 벗어난 비정상적인 수분부족기간이라고 정의하였다.

PDSI는 강수량, 평균기온, 유효토양수분량을 이용하여 산정되므로 농업학적 가뭄을 정량화 하는데 효과적인 가뭄지수이다. 산정방법으로는 Thornthwaite(1948) 방법으로 잠재증발산을 추정한 후, 대상지역의 실제 강우량과 기후학적으로 필요한 강우량의 차를 계산하여 지역적인 가뭄지수를 얻는 방법으로, 가뭄지수 PDSI를 구하는 공식을 Eq. (9)와 같다 (Karamouz et al. 2012).

$$PDSI_i = 0.897PDSI_{i-1} + \left(\frac{Z_i}{3}\right), i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

Eq. (11)과 같이 수분이상지수(moisture anomaly index) Z 는 Eq. (10)을 통한 기후특성인자 k 와 수분편차 d 를 바탕으로 도출한다.

$$k_i = 17.67\hat{k}_j / \sum_{i=1}^{12} \bar{D}_i \times \hat{k}_j \quad (10)$$

$$Z_i = k_i \times d_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (11)$$

여기서, $\hat{k}_j = 1.51 \log_{10} \left(\frac{T_j + 2.8}{D_j} \right) + 0.5$, $T_j = (\overline{PE}_j + \overline{R}_j + \overline{RO}_j) / (\overline{P}_j + \overline{L}_j)$ 이다.

산정된 가뭄지수를 바탕으로 PDSI의 가뭄 범주는 9단계로 구분되는데, 그 중 가뭄이라 일컫는 범주는 -4.00 미만이면 극심한가뭄, -4~-3이면 심한가뭄, -3~-2이면 보통가뭄, -2~-1이면 거의가뭄, -1~1.0이면 정상으로 정의하였다.

2.4 SDI

수문학적 가뭄지수인 SDI는 Eq. (12)와 같으며, $Q_{i,j}$ 는 월 유량, 누적값 $V_{i,k}$ 는 Eq. (7)에 의하여 계산된다(Nalbantis, 2008).

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j}, \quad i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots, 12, k = 1, 2, 3, 4 \quad (12)$$

여기서, $V_{i,k}$ 는 i 번째 연도에서 k 번째 기간 동안 누가한 유량이다. 예를 들어 $k = 1$ 이면 특정 년도의 10월부터 12월, $k = 2$ 이면 10월부터 그 다음해의 3월, $k = 3$ 이면 10월부터 그 다음해 9월까지를 의미한다.

누가한 유량 $V_{i,k}$ 를 이용하여 SDI는 특정 i 번째 연도의 k 기간에 대하여 Eq. (13)과 같이 정의할 수 있다.

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \overline{V}_k}{s_k} \quad (13)$$

여기서, \overline{V}_k 와 s_k 는 각각 누적한 하천수량의 평균과 표준편차(standard deviation)를 나타낸다. 임계수준은 주로 평균인 \overline{V}_k 가 사용된다. 작은 규모의 하천에는 유량이 Gamma 분포형에 근사하게 되어 확률분포형이 왜곡되므로 유량을 정규분포에 적합하게 변환하여야 한다. 2변수 대수정규(log-normal) 분포형으로 변환하면, SDI는 최종적으로 Eq. (14)와 같으며, y 는 하천수량에 자연로그를 취한 값이다(Eq. (15)).

$$SDI_{i,k} = \frac{y_{i,k} - \overline{y}_k}{s_{y,k}}, \quad i = 1, 2, \dots, k = 1, 2, 3, 4 \quad (14)$$

$$y_{i,k} = \ln(V_{i,k}), \quad i = 1, 2, \dots, k = 1, 2, 3, 4 \quad (15)$$

Nalbantis and Tsakiris (2009)에 의하면, SDI에 의해 정의되는 수문학적 가뭄은 다음과 같이 5단계로 구분된다(Table 2).

Table 2. SDI ranges for drought condition (Nalbantis and Tsakiris, 2009)

SDI range	Drought condition
$SDI \geq 0.0$	Non-drought
$-1.0 \leq SDI \leq 0.0$	Mild drought
$-1.5 \leq SDI \leq -1.0$	Moderate drought
$-2.0 \leq SDI \leq -1.5$	Severe drought
$SDI \leq -2.0$	Extreme drought

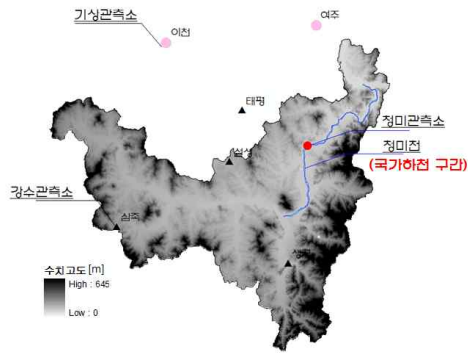
3. 연구결과

3.1 SWAT 모형 구축

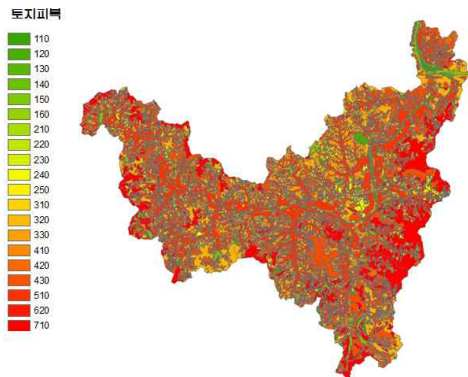
본 연구 대상지역은 청미천 유역으로 농업학적 가뭄지수인 PDSI의 산정을 위한 유효토양수분량 및 수문학적 가뭄지수인 SDI의 산정에 필요한 유출량을 위해 SWAT 모형을 이용하였다. 모형구축을 위해서는 지형 및 기상학적 입력자료가 필요하며, 지형학적 입력자료에는 격자크기가 30 m x 30 m인 DEM(Digital Elevation Model; 수치고도모형), 1:25,000의 토지피복도(land cover)와 토양도(soil type)가 이용되었다(Fig. 1). 1985년부터 2015년까지의 기상학적 입력 자료는 일 강수량(mm), 최고/최저 기온(°C), 풍속(m/s), 습도(%)이며, 기상학적 가뭄지수 산정을 위한 자료는 기상청 관할 이천 기상 관측소의 자료를 이용하였다(Table 3).

이천 기상 관측소의 1985년부터 2015년까지의 월별 강수

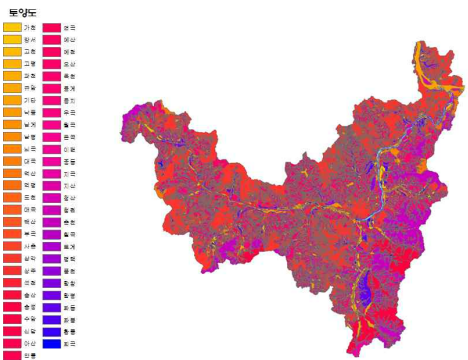
특성을 확인한 결과는 Fig. 2와 같다. 31년간 평균 강수량은 1372.8 mm로 2014년이 31년 평균 강수량 대비 57.5%인 791.5 mm로 가장 낮은 연평균 강수량을 보였으며, 그 다음은 2015년, 2001년 순이었다.



(a) DEM



(b) Land cover



(c) Soil

Fig. 1. Geological descriptions of study watershed

Table 3. Information of weather station

Station ID	Name of weather station	Latitude (° N)	Longitude (° E)	Elevation (m)
203	Icheon	128.4842	37.2640	78.01

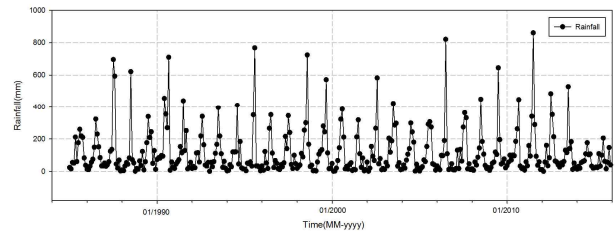


Fig. 2. Monthly rainfalls of Icheon weather station

3.2 매개변수 최적화

2013년 관측유량에 대하여 SUFI-2 알고리즘을 이용하여 SWAT 모형의 매개변수를 최적화하였다. 유량 모의와 관계된 매개변수는 총 19개이며, SUFI-2 알고리즘으로 구한 최적 매개변수들로 모의된 유량과 관측유량을 비교하면 Fig. 3과 같은데 월별 및 계절별 변동성을 잘 재현하고 있으며, 대응하는 월별 유량의 크기도 비슷하였다. 좀 더 정량적으로 비교하기 위하여 NSE(Nash and Sutcliffe, 1970)와 상관계수를 함께 비교하였는데 NSE는 0.88, 상관계수는 0.90로 모형 추정치가 관측의 경향 및 정량적인 크기 또한 잘 따르고 있었다. 장기 유출 모형은 일반적으로 월 단위 모의는 정확하지만 일별 침투유량 모사에 취약하다고 알려져 있어서 일 유량을 도시하여 검토하였다. Fig. 4와 같이 구축한 모형이 다소 큰 수준의 일 유량들을 무리 없이 재현하고 있어서 일 단위 미래 전망에도 활용 될 수 있음을 확인할 수 있다.

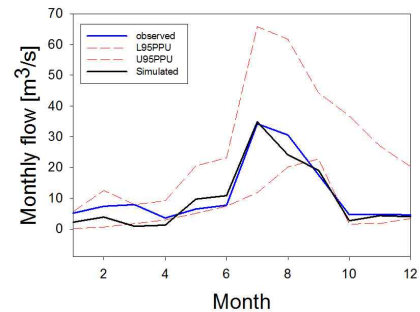


Fig. 3. Observed, simulated and confidential monthly discharges

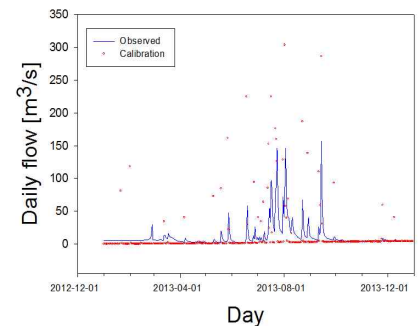


Fig. 4. Daily observed and simulated discharges

3.3 산정결과

3.3.1 가뭄지수 산정

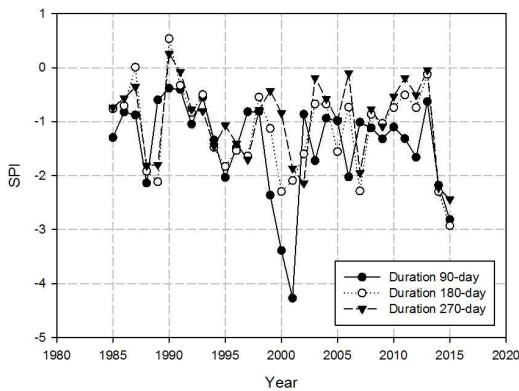
본 연구는 지속기간 3개월, 6개월, 9개월에 따른 청미천 유역의 가뭄을 정량화 하였다. 정량화를 위해 기상학적 가뭄지수인 SPI와 SPEI, 수문학적 가뭄지수인 SDI를 산정하였다. SPI 산정 결과 Fig. 5(a)와 같다. 지속기간 3개월일 경우 -4.27로 2001년이 가장 극심한 가뭄을 보였고, 2000년, 2015년 순이었으며, 지속기간 6개월일 경우 -2.93으로 2015년이 가장 극심한 가뭄을 나타냈고, 2014년, 2000년 순이었다. 또한 지속기간 9개월일 경우 2015년이 -2.44로 가장 극심한 가뭄을 나타냈고, 2014년, 2001년 순이었다.

SPEI 산정 결과 Fig. 5(b)와 같다. 지속기간 3개월일 경우 -2.28로 2000년이 가장 극심한 가뭄을 보였고, 2014년, 2015년 순이었으며, 지속기간 6개월일 경우 -2.55로 2015년이 가장 극심한 가뭄을 나타냈고, 2014년, 2000년 순이었

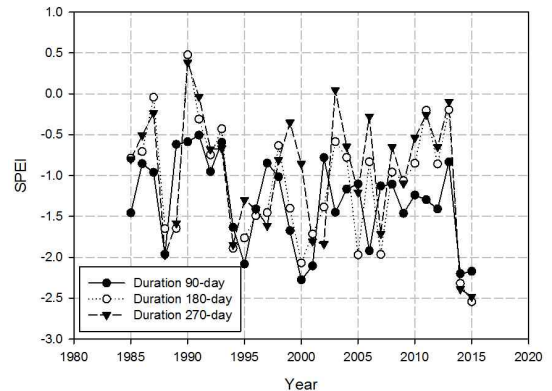
다. 또한 지속기간 9개월일 경우 2015년이 -2.48로 가장 극심한 가뭄을 나타냈고, 2014년, 1988년 순이었다.

SDI 산정 결과 Fig. 5(c)와 같다. 지속기간 3개월일 경우 -2.91로 2000년이 가장 극심한 가뭄을 보였고, 2001년, 2015년 순이었으며, 지속기간 6개월일 경우 -2.64로 2015년이 가장 극심한 가뭄을 나타냈고, 2014년, 2001년 순이었다. 또한 지속기간 9개월일 경우 2015년이 -2.42로 가장 극심한 가뭄을 나타냈고, 2014년, 2001년 순이었다.

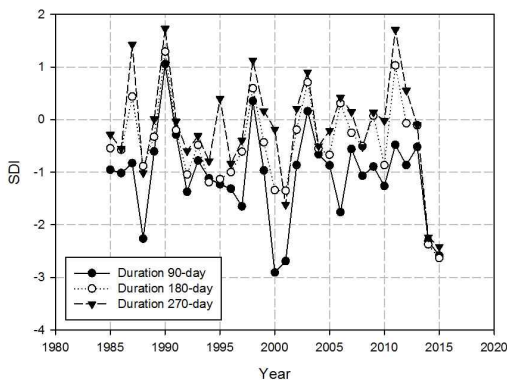
PDSI 산정 결과 Fig. 5(d)와 같다. 지속기간 3개월일 경우 -5.95로 2015년이 가장 극심한 가뭄을 보였고, 2001년, 2000년 순이었으며, 지속기간 6개월일 경우 -9.21로 지속기간 3개월과 마찬가지로 2015년이 가장 극심한 가뭄을 나타냈고, 2014년, 2000년 순이었다. 또한 지속기간 9개월일 경우 2015년이 -9.50으로 가장 극심한 가뭄을 나타냈고, 2014년, 2002년 순이었다.



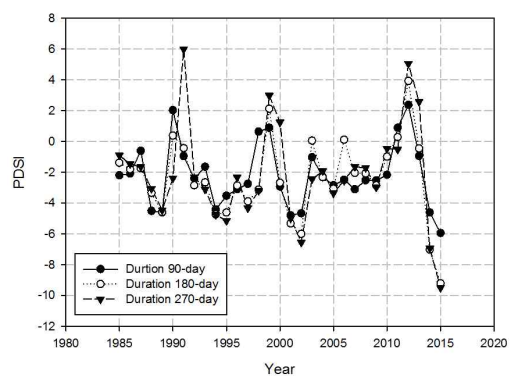
(a) SPI



(b) SPEI



(c) SDI



(d) PDSI

Fig. 5. Calculation results of SPI, SPEI, SDI and PDSI for three durations

3.3.2 가뭄지수 비교

지속 기간에 따른 가뭄지수별 극한 및 평균 가뭄의 연도별 순위를 Table 4와 같이 산정하였다. 극한 가뭄의 평균에서는 SPI는 2001년이 -2.74로 가장 극한 가뭄을 나타냈으며, 2015년, 2014년 순이었으며, SPEI는 2015년이 -2.400, SDI는 2015년이 -2.547로 가장 극심한 가뭄을 보였으며 두 가뭄 지수는 2014년, 2001년 순이었다. PDSI 역시 2015년이 -8.219로 가장 극심했으며, 2014년과 2002년 순이었다. 평균 가뭄의 평균에서는 극한 가뭄의 평균과는 다른 형태를 나타냈다. SPI, SPEI, SDI 모두에서 2014년이 가장 심한 가뭄을 나타

났다. 가뭄의 정도는 SPI는 -1.190, SPEI는 -1.281, SDI는 -1.357로 확인되었으며, 2014년 다음으로 SPI와 SDI는 2015년, 2001년 순이었으며, SPEI는 2015년, 1994년 순이었다. 하지만 PDSI에서는 2015년이 -6.139로 가장 극심한 가뭄을 보였으며, 1994년, 2002년 순이었다. 전체적인 극한 가뭄의 평균에서는 극한 가뭄은 2015년, 2014년, 2001년 순으로 가뭄에 취약했으며, 평균 가뭄의 평균에서도 역시 2015년이 가장 극심한 가뭄을 보였으며, 2014년, 1994년 순을 나타냈다.

Table 4. Rankings of extreme and averaged drought according to droughts indices

Drought	Rank	SPI		SPEI		SDI		PDSI	
		Year	Drought severity	Year	Drought severity	Year	Drought severity	Year	Drought severity
Extreme drought	1	2001	-2.743	2015	-2.400	2015	-2.547	2015	-8.219
	2	2015	-2.728	2014	-2.304	2014	-2.307	2014	-6.186
	3	2014	-2.233	2001	-1.876	2001	-1.889	2002	-5.742
	4	2000	-2.177	1988	-1.862	2000	-1.479	2001	-5.036
	5	1988	-1.957	1994	-1.792	1988	-1.388	1994	-4.635
Averaged drought	1	2014	-1.190	2014	-1.281	2014	-1.357	2015	-6.139
	2	2015	-1.179	2015	-1.190	2015	-1.260	1994	-3.219
	3	2001	-0.891	1994	-0.877	2001	-0.996	2002	-3.075
	4	1988	-0.677	2001	-0.778	1988	-0.676	2014	-2.670
	5	1994	-0.665	1988	-0.641	1994	-0.579	1995	-2.513

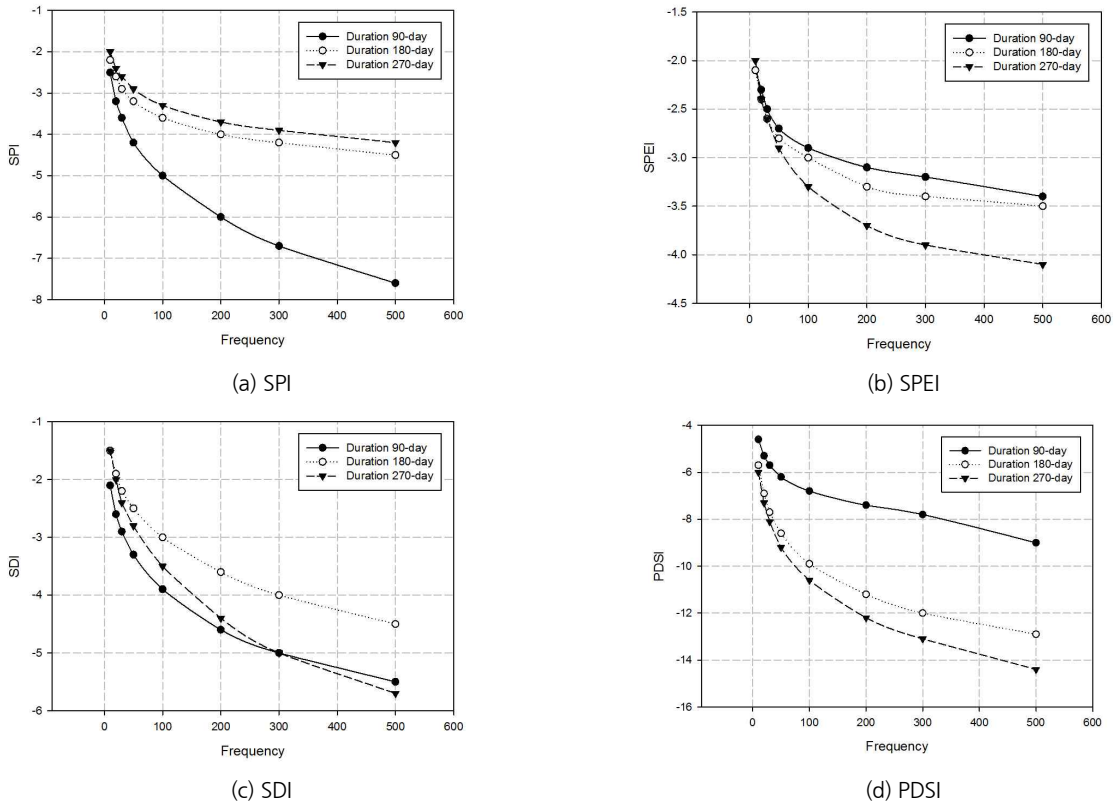


Fig. 6. Frequency analysis of SPI, SPEI, SDI and PDSI for three durations

4. 결론

본 연구는 지속기간에 따른 기상학적 가뭄지수 중 강수량을 변수로 하는 SPI와 강수량과 증발산량을 변수로 하는 SPEI, 농업학적 가뭄지수인 PDSI와 수문학적 가뭄지수인 SDI를 바탕으로 청미천 유역의 1985년부터 2015년까지의 가뭄현상을 파악하였다. 이 때 PDSI와 SDI의 경우 SWAT 모형 모의를 통해 산정된 결과를 바탕으로 산정하였으며, 기상자료의 기상청 관할 이전 기상 관측소의 자료를 이용하였다.

가뭄지수 산정결과 극한가뭄에서 SPI는 2001년이 가장 극한 가뭄을 나타냈으며, 2015년, 2014년 순이었으며, SPEI, SDI, PDSI는 2015년이 가장 극심한 가뭄을 보였으며 두 가뭄지수는 2014년, 2001년 순이었다. 평균 가뭄의 평균에서는 극한 가뭄의 평균과는 다른 형태를 나타냈다. SPI, SPEI, SDI 모두에서 2014년이 가장 심한 가뭄의 형태를 나타냈지만 이와 달리 PDSI에서는 극한가뭄 평균과 마찬가지로 2015년이 가장 극심한 가뭄 형태를 보였다. 전체적인 극한 가뭄 및 평균 가뭄의 평균에서 2015년이 가장 가뭄에 취약한 연도였다. 최근 들어 극한 가뭄의 형태를 보이고 있는 지역들이 증가하고 있는 실정이다. 이는 강수의 형태에서도 보았듯이, 2015년, 2014년이 31년간 평균 강수보다 현저히 적은 강수량을 기록하였으며, 이와 더불어 기후변화로 인한 최근 기온 상승으로 인한 증발산량의 증가로 가뭄의 정도가 심각해졌음을 알 수 있었다.

빈도해석에 따른 가뭄 분석에서는 PDSI가 가장 큰 가뭄 빈도를 보였으며, SPI를 제외한 SPEI와 PDSI에서는 증가의 형태를 SDI에서는 지속기간이 늘어남에 따라 가뭄의 정도가 증가 후 감소의 형태가 확인 되었다. 또한 산정한 빈도를 토대로 극한 가뭄의 평균의 빈도를 산정하였다. SPI의 경우 지속기간 3개월 매개변수로 산정할 경우 빈도 14.5년으로 발생 빈도가 낮았으며 SPEI의 경우 지속기간 6개월일 경우 빈도 19.2년으로 가장 극한 가뭄의 평균의 가뭄정도가 나타날 가능성이 가장 컸다. SDI의 경우 SPI와 마찬가지로 지속기간 3개월일 때 빈도 19.1년으로 해당 가뭄이 발생할 확률이 있었으며, PDSI의 경우 지속기간 9개월일 경우 빈도 30.6년임이 확인 되었다. 산정된 가뭄지수를 바탕으로 가뭄지수별 상관계수를 계산한 결과, 극한 가뭄 및 평균 가뭄의 경우 높은 상관정도를 보였으며, 그 중 SPI와 SPEI 간에는 높은 상관정도를 SPI와 PDSI 간에는 낮은 상관정도가 나타남을 확인하였다.

기상학적, 농업학적, 수문학적 가뭄지수를 확인 하였듯이, 각 가뭄은 연속적인 하나의 과정으로 서로 영향을 주고 받는 밀접한 관계를 갖는다. 이는 극한 및 평균 가뭄의 연도별 순위

산정을 통해 가뭄지수별 비슷한 연도가 가뭄의 연도임을 확인 하였다. 하지만 각각 가뭄지수의 극한가뭄 발생 시기 및 강도의 경우는 다르고 전체적인 평균 및 극한 가뭄지수별 상관계수가 상대적으로 높을 지라도 가뭄지수별 극한가뭄의 상관계수에는 차이가 있었다. 또한 빈도에서도 서로 다른 특성을 보이기 때문에 가뭄을 분석하고 평가하기 위해서는 다양한 가뭄지수의 활용이 필요하다.

감사의 글

연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- Banimahd, S.A., and Khalili, D. (2013) "Factors influencing Markov Chains Predictability characteristics, utilizing SPI, RDI, EDI and SPEI drought indices in different climatic zones." *Water Resources Management*, Vol. 27(11), pp. 3911-3928.
- Beven, K. (1989). "Changing ideas in hydrology-the case of physically-based models." *Journal of Hydrology*, Vol. 105, pp. 157-172.
- Beven, K. (2002). "Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system." *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 189-206.
- Du Pisani, C.G., Fouché, H.J., and Venter, J.C. (1998). "Assessing rangeland drought in South Africa." *Agricultural Systems*, Vol. 57, No. 3, pp. 367-380.
- Heim, R.R. (2002). "A review of twentieth-century drought indices used in the United States." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 83, No. 8, pp. 1149-1165.
- Hernandez, E.A., and Uddameri, V. (2013). "Standardized precipitation evaporation index (SPEI)-based drought assessment in semi-arid south Texas." *Environmental Earth Sciences*, pp. 1-11.
- Karamouz, M., Nazif, S., and Falahi, M. (2012). *Hydrology and hydroclimatology: principles and applications*.
- Keyantash, J., and Dracup, J. (2002). "The quantification of drought: an evaluation of drought indices." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 83, No. 8, pp. 1167-1180.
- Lee, B.R., Sung, J.H., and Chung, E.S. (2015) "Comparison of meteorological drought and hydrological drought

- index." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 1, pp. 69-78.
- McKee, T.B., Doeskin, N.J., and Kleist, J. (1993). Drought monitoring with multiple time scales." Proceeding of 9th Conference on Applied Climatology, *American Meteorological Society*, pp. 233-236.
- Morid, S., Smakhtin, V.U., and Moghadasi, M. (2006) " Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *Int Journal or Climatol*, Vol. 26, pp.971-985.
- Nalbantis, I. (2008). "Evaluation of a hydrological drought index." *European Water*, Vol. 23, No. 24, pp. 67-77.
- Nalbantis, I, and Tsakiris, G. (2009). "Assessment of hydrological drought revisited." *Water Resources Management*, Vol. 23, pp. 881-897.
- Nash. J. E., and Sutcliffe, J. V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models: Part I: A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, 10(3), pp.283-290.
- Palmer, W, C. (1965). *Meteorological drought, Research paper*. No. 45, U.S. Weather Bureau.
- Smakhtin, V.U., and Hughes, D.A. (2007). "Automated estimation and analyses of meteorological drought characteristics from monthly rainfall data." *Environment Modelling Software*, Vol. 22, pp. 880-890.
- Sorooshian, S., and Gupta, V. (1995). "Chapter 2: Model calibration." *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh VP, Publications, LLC, Highlands Ranch, CO, pp. 23-68.
- Sung, J.H., and Chung, E.S. (2014). "Development of streamflow drought severity-duration -frequency curves using the threshold level method." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 18, No. 9, pp. 3341-3351.
- Thornthwaite, C.W. (1948). "An approach toward a rational classification of climate." *Geographical Review*, Vol. 38, No. 1, pp. 55-94.
- Thornthwaite, C.W., and Mather, J.R. (1955). "The water balance." *Publications in Climatology*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-104.
- Vicente-Serrano, S.M., Begueria, S., and Lopez-Moreno, J.I. (2010). "A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index." *Journal of Climate*, Vol. 23, No.7, pp. 1696-1718.
- Won, G.J., Chung, E.S., and Choi, S.U. (2015). "Parametric assessment of water use vulnerability variations using SWAT and Fuzzy TOPSIS coupled with entropy." *Sustainability*, Vol. 7, No. 9, 12052-12070.