

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2022.55.4.497>
pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Drought Assessment Using Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, Standardized Precipitation Index and Soil Available Water Content

Bu-yeong Oh¹, Jeong-woo Son¹, Seon-ah Hwang¹, and Seung-oh Hur^{2*}

¹Researcher, Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

²Senior Researcher, Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: soilssohur@korea.kr

ABSTRACT

Received: November 8, 2022
Revised: November 22, 2022
Accepted: November 23, 2022

Edited by

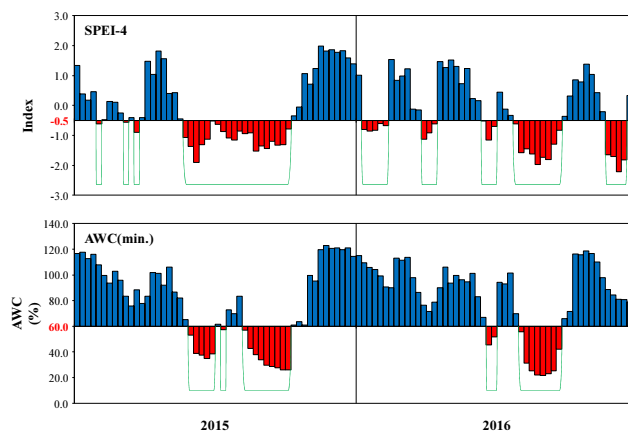
Woo-Jung Choi,
Chonnam National University,
Korea

ORCID

Seung-oh Hur
<https://orcid.org/0000-0001-5388-9657>

In order to analyze drought, it is necessary to define and quantify drought intensity. Various drought indices have been proposed depending on purposes, but multiple time steps of Drought Indices make it hard to decide that which time step is the best to show the drought condition. This study aims to compare the drought results evaluated by the meteorological and agricultural drought standard. SPEI (standardized precipitation evapotranspiration index), SPI (standardized precipitation index), AWC (soil available water content) were calculated in three cities, and drought assessment results were compared. The characteristics of drought occurrence time, duration, intensity and tendency were analyzed by time series. It was found that the SPEI had the advantage to detect the starting of drought resulting from meteorological drought such as cumulative shortage of rainfall, while the results obtained from AWC had the advantage to detect the stage of drought resulting from agricultural drought. This study also proposed standard for time unit of drought index by comparing of estimated soil available water content results. The SPEI in 4-week unit could be selected as the meteorological drought index, which is judged to be suitable for comparing the time and depth of agricultural drought in Korea. We suggest that AWC based on the soil moisture deficit and SPEI-4 can be used for the drought monitoring and management. SPEI can be applied to detect meteorological drought earlier than Agricultural drought event.

Keywords: Drought, Soil available water content, SPEI, SPI



Comparison of drought assessment results using SPEI and AWC for 2015 to 2016 in Boryeong. SPEI-4 adequately matched the drought characteristics of AWC.



Introduction

가뭄은 기상학적 (meteorological), 농업적 (agricultural), 수문학적 (hydrological) 및 사회·경제학적 (socioeconomic) 가뭄으로 구분되고 목적에 따라 여러 지수들로 분석된다 (Wilhite and Glantz, 1985; Tate and Gustard, 2000). 가뭄 지수 (drought index)는 가뭄의 시공간적인 전개 과정과 가뭄진행상황을 모니터링, 분석 및 대응을 위한 기초자료로써 매우 중요하다 (Hayes et al., 2012). 가뭄지수는 종류가 많고 가뭄측정과 실시간 모니터링, 가뭄기간의 시작과 끝, 가뭄강도나 크기, 지형이나 시간에 따른 가뭄의 영향 등 목적에 따라 활용하는 가뭄지수가 달라진다 (Tsakiris et al., 2007; Niemeier, 2008). 또한 가뭄심도의 정량적 산정과 평가, 가뭄 대응계획 수립을 위한 도구로써 다양하게 개발되어 활용되고 있다 (Hayes et al., 1999; Heim, 2002; Trnka et al., 2009). 체계적 가뭄관리 필요성에 따라 다양한 국가에서는 가뭄정보 시스템과 가뭄 예·경보를 운영하며, ‘가뭄조기경보체계 (drought early warning system)’를 운영하고 있다. 우리나라의 가뭄진행상황을 감시 및 평가하여 일별가뭄진단정보를 제공하는 시스템은 기상청, 농어촌공사, 농촌진흥청 등이 있고, 이를 종합하여 가뭄정보를 제공하는 ‘국가가뭄정보포털 (<http://drought.go.kr>)’이 있다. 기상청 수문기상가뭄정보시스템 (<https://hydro.kma.go.kr>)은 주 (week) 단위 ‘표준강수지수 (standardized precipitation index, SPI)’ 및 ‘표준강수증발산지수 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)’로 가뭄평가 및 예·경보 지도 서비스를 제공하고 있다. 농촌진흥청 흙토람 (<http://soil.rda.go.kr>)의 ‘발가뭄토양수분지도’는 167개 시군을 대상으로 기상조건, 토양 특성 및 작물재배를 고려한 토양유효수분율을 기준으로 산정된 가뭄단계 정보를 제공하고 있다. 농어촌공사 농업가뭄관리시스템 (<http://adms.ekr.or.kr>)은 저수율 기준으로 논가뭄 정보를 제공한다. 가뭄 모니터링 방법, 가뭄의 크기, 지속기간, 강도 등 가뭄 정량화와 특성을 판단하는 기준은 연구자, 재단 관리담당자 및 기관마다 다를 수 있다. 특히 가뭄을 정량적인 값으로 산정하고 평가하는 것은 다양한 수문기상학적 변수와 조합방식에 따라 달라진다 (Tsakiris et al., 2007; Lee et al., 2015).

최근에는 단일 가뭄지수의 활용에 의존하기 보다, 여러 가뭄지수 간의 특징과 장단점을 상호보완한 연구를 권하고 있다 (Lee et al., 2015; Nam et al., 2017). 가뭄 피해의 내재된 복잡성으로 인해, 단일 가뭄지수만으로 모든 지역 및 관련 분야의 가뭄 평가는 이상적이지 않다. 따라서 가뭄시작을 예측하고 정량화 후 가뭄단계에 따른 대책수립을 위한 새로운 연구방법의 제시가 필요하다. 우리나라의 가뭄대책은 사전대비보다, 이미 가뭄이 상당히 진행된 후 긴급복구 대책에 의존하는 경향이 있다. 특히 농업가뭄이 본격화되기 전 가뭄진행에 따른 적절한 대응책 수립을 위해 가뭄발생의 조기 확인과 현재 가뭄상황에 대한 정확한 이해가 필요하다. 기상학적 가뭄은 농업적 및 수문학적 가뭄을 일으킬 전제 조건이므로, 기상학적 가뭄의 원인분석은 서로 다른 분야의 가뭄 예측성을 높이는 것에 기여한다. 따라서 본 연구는 농업가뭄으로 이어지기 전, 선행하는 기상학적 가뭄 분석을 통해 가뭄 시작을 인지하고, 농업가뭄 평가기준과 동시 비교하여 가뭄의 진행상황 및 특성을 분석하였다. 기상학적 가뭄지수와 농업가뭄을 판별하는 기준을 상호비교하여 서로 다른 가뭄평가 기준의 효용성을 검토하고자 한다. 가뭄의 정량화를 위해 기상학적 가뭄지수인 SPI 및 SPEI를 산정하고 토양유효수분율 기준으로 가뭄평가를 실시하여 가뭄의 발생시기, 지속기간, 강도, 경향성 등의 가뭄발생 특성을 상호 비교하였다. 그리고 기상학적 가뭄지수와 토양유효수분율 가뭄단계를 가뭄관리 및 모니터링에 효과적으로 활용할 수 있도록 상호검토가 가능한 시간척도와 기준을 제시하였다.

Materials and Methods

대상 지역 및 분석자료 충청북도 보령시, 괴산군 및 전라북도 전주시를 대상으로 가뭄지수를 산정하고 토양유효수분을 기준 가뭄단계를 산출하였다. 가뭄의 정량적 평가를 수행하기 위하여 1981 - 2021년의 기간 동안, 기상청 (KMO) 관측자료 중 일 단위의 평균기온 (°C), 최저기온 (°C), 최고기온 (°C), 일강수량 (mm), 평균풍속 (ms^{-1}), 평균상대습도 (%), 누적일사량 (hr) 기상자료를 수집하였다. 우리나라의 가뭄은 과거 약 10년을 주기로 큰 피해가 발생하였으며, 본 연구에서는 ‘이상기후보고서’를 참고하여 우리나라에서 최근 발생된 농업가뭄 중 지속기간 (5 - 9월)이 가장 긴 가뭄이 발생한 2015년과 2016년에 대하여 정밀하게 분석하였다. 또한 가뭄지수 산정 및 분석을 위한 강수 및 증발산량의 시간 척도는 1, 4 (1개월), 13 (3개월), 26 (6개월), 52 (1년) 주 단위로 설정하였다. 토양유효수분율은 일 (day) 단위의 토양유효수분율 (%) 자료를 주 단위의 시간 척도로 변환하였다. 농촌진흥청에서 제공하고 있는 발 토양수분지도의 토양유효수분율 자료는 2008년부터 누적된 일 단위 자료를 이용하였다.

표준강수지수 (standardized precipitation index, SPI) SPI는 McKee et al. (1993)에 의해 개발된 방법으로 강수량만으로 가뭄 예측이 가능한 간편한 방법이다. SPI를 산정하기 위해서는 강수 시계열을 분석하고자 하는 시간단위 (예를 들어 1, 3, 6, 9, 12, 24개월 등)에 따라 이동 누가하여, 누가 강우 시계열을 작성한다. 누가 강우 시계열을 Gamma 분포형에 대입하여, 각 변량에 대한 누가 확률을 산정한다. 최종적으로 표준정규분포에서 동일한 누가 확률을 갖는 값을 결정하면 이 값이 SPI가 된다. 가뭄은 SPI값이 -0.5 또는 더 작은 값에 도달할 때 발생하며, 0보다 클 때 가뭄이 끝나는 것으로 해석한다. 가뭄 사상은 가뭄 시작과 끝의 시간 간격으로 정의된 지속기간과 SPI 값으로 표현되는 가뭄 심도로 표현하며, 누적된 가뭄의 총량도 구분할 수 있다. SPI는 강수 부족만으로 가뭄을 직관적으로 판단할 수 있어 가장 빈번하게 활용되며, 최근에는 강수 및 기온의 변동성에 따른 공급량 (강수량)과 수요량 (증발산량)을 반영함으로써 가뭄판단에 활용되는 표준강수증발산지수 (SPEI)가 주목을 받고 있다 (Vicente-Serrano et al., 2012; Chen and Sun, 2015; Kingston et al., 2015; Potopova et al., 2016; Zhao et al., 2017).

표준강수증발산지수 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI) SPEI는 강수량 자료만을 이용하는 SPI의 단점을 개선하기 위해 기온인자를 사용하여 잠재증발산량 ET_o (potential evapo-transpiration, PET)을 고려하여 가뭄을 평가한다 (Vicente-Serrano et al., 2010). 강수량과 잠재증발산량의 차이가 유출, 지하수 및 토양수분에 따른 수분 저장의 합과 같아지는 물수지 (water balance)를 기본 개념으로 산정된다. 잠재증발산량 (ET_o)의 계산에는 Penman-Monteith (Allen et al., 1998)의 방법을 이용하였다.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta \left(R_n - G + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a) \right)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서, R_n 은 순복사량 ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$), G 는 지중열류 ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$), T 는 2 m 높이의 일 평균기온 (°C), U_2 는 2 m 높이의 평균풍속 (ms^{-1}), γ 는 건습계상수 ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), Δ 는 포화수증기압에 따른 기울기, e_s 는 포화수증기압 (kPa), e_a 는 실제수증기압 (kPa)이다.

잠재증발산량의 계산 후 SPEI 산정은 SPI의 계산 절차와 유사하고 Vicente-Serrano et al. (2010)의 방법을 이용한다.

$$D_i = P_i - ET_{oi} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} P_{n-i} - ET_{0(n-i)} \quad (\text{Eq. 3})$$

Eq. 2에서 강수량 (P_i)과 잠재증발산량 (ET_{oi})의 차로 산정되는 D_i 의 누적 값의 시계열 자료로부터 적정확률분포로 선정된 Log-logistic 분포를 이용하여 매개변수를 추정한 후, 표준정규분포로 변환하여 가뭄지수를 산정한다 (Vicente-Serrano et al., 2010; Stagge et al., 2015).

토양유효수분율 (soil available water content) 기준 가뭄 평가방법 토양유효수분율 (AWC)은 총유효수분량 중 현재 유효수분량의 비율 (%)로 표현한 값으로 (Eq. 4), 강수량, 잠재증발산량, 작물계수, 수분스트레스 계수 등을 활용하여 산정한다 (Eqs. 4 - 8). 실증발산량은 잠재증발산량 (ET_0), 작물계수 (K_C) 및 수분스트레스 (K_s)의 곱으로 산정한 값을 이용한다 (Eq. 8). 총유효수분함량은 현재 포장용수량과 영구위조점의 수분량의 차이로 산정한다 (Eq. 6). SAW_t 는 t일의 유효수분량 (mm), SAW_{total} 은 총유효수분량 (mm), SAW_{t-1} 은 t-1일의 유효수분량 (mm), ER_t 은 t일의 유효강수량 (mm), ETC_t 은 t일의 작물 증발산량 (mm), FC 는 유효토심 60 cm 기준의 포장용수량 (field capacity, mm), WP 는 유효토심 60 cm 기준의 영구위조점 (wilting point, mm)이다. 토양유효수분율의 현재 토양수분량은 전일 유효수분량과 유효강수량의 합에서 실증발산량을 뺀 물수지를 기본으로 한다 (Eom, 2021; Hwang et al., 2022). 토양유효수분율로 가뭄을 평가하는 기준은 60%를 기준으로 하며, 가뭄단계는 정상, 관심, 주의, 경계, 심각 총 5단계로 구분한다 (Hwang et al., 2022).

$$AWC(\%) = \left(\frac{SAW_t}{SAW_{total}} \right) \times 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

$$SAW_t(\text{mm}) = (SAW_{t-1} - ER_t - ETC_t) - WP \quad (\text{Eq. 5})$$

$$SAW_{total}(\text{mm}) = FC - WP \quad (\text{Eq. 6})$$

$$ER_t(\text{mm}) = \begin{cases} \text{rain fall} & \text{when rain fall} \leq 38.3 \\ 38.3 + (\text{rain fall} - 38.3) \times 0.33 & \text{when rain fall} > 38.3 \end{cases} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$ETC_t(\text{mm}) = ET_0 \times K_C \times K_S \quad (\text{Eq. 8})$$

본 연구에서는 일 단위 자료로 산정된 토양유효수분율 기준 가뭄자료를 가뭄지수와 동일한 시간 척도로 비교하기 위하여 일주일 중 최소값 (minimum)을 기준으로 하여 주 단위 자료로 생성하였다. 토양유효수분율 기준의 가뭄 평가 방법 순서는 Fig. 1과 같다.

가뭄 예·경보기준의 가뭄 ‘관심’단계인 토양유효수분율 ‘60%’를 기준으로 이보다 낮은 값의 범위를 기준으로 가뭄단계를 산정하였다. 토양유효수분율 기준 평가방법은 심한 가뭄이 들더라도 비가 내리면 해결되는 과정이 일 (day) 기상자료에 의해 일 단위로 확인할 수 있지만, SPI 및 SPEI와의 비교를 위하여 주 단위로 평가하였다.

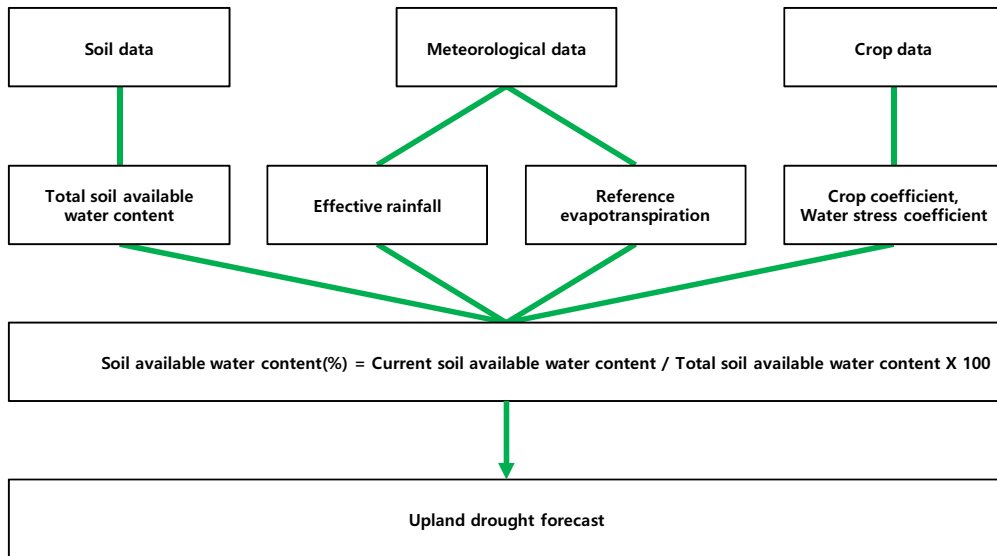


Fig. 1. Schematic diagram of upland drought evaluation based on soil available water content.

가뭄단계 분류방법 및 분석방법 산정된 가뭄지수의 심도를 정의하기 위하여 SPI와 SPEI를 동일한 가뭄분류 체계인 미국의 ‘국립가뭄경감센터 (national drought mitigation center, NDMC)’의 기준을 채택하였다 (Svoboda et al., 2002; Nam et al., 2015). 가뭄상황을 총 5단계의 가뭄심도 (drought severity)로 구분하고 있으며 (Hayes et al., 1999; Botterill and Hayes, 2012; Nam et al., 2014; Svoboda et al., 2015), 지수값이 낮을수록 가뭄 상태가 심한 것을 의미한다. 가뭄 상황을 표현하기 위한 가뭄단계 설정 기준은 Table 1과 같다.

정량적 가뭄 분석을 위해 주 단위로 산정된 가뭄지수와 토양유효수분율 기준의 가뭄 사상을 그래프로 도시화 하였다. 그래프의 해석은 가뭄발생 횟수 (event), 지속기간 (duration), 크기 (magnitude), 강도 (intensity)를 분석한 대표적인 특징을 서술하였다. 가뭄의 지속기간은 가뭄이 시작한 후 종료할 때까지 걸린 시간이며, 이러한 사건의 개수를 가뭄 발생 횟수로 하였다. 가뭄의 크기는 가뭄이 발생한 기간의 물부족 누적량으로 계산하였다. 가뭄의 강도는 앞서 산정된 가뭄의 크기를 지속기간으로 나누어 산정한다. 분석하는 시간 척도는 기존의 월 (month) 단위 SPI와 SPEI를 수정하여 1년을 52주 단위로 하였고, 1, 4, 13, 26 (6개월), 52주 (1년)로 시간 척도를 나누었다. 가뭄 판단기준은 Table 1과 같이 두 가뭄지수가 동일 적용가능한 가뭄분류체계를 사용하였다 (Svoboda et al., 2002; Nam et al., 2015). 토양유효수분율 기준의 가뭄 분석도 마찬가지로 실시하였으며 가뭄 판단기준은 토양유효수분율 범위에 따라 Table 1과 같다.

가뭄지수의 분석기간은 1981 - 2021년까지 41년치를 산정하였으며, 이 중에서 가장 최근의 연속적인 농업가뭄 발생년도인 2015년 및 2016년에 대해 정밀분석을 수행하였다. 2015년도는 전국 평균강수량이 평년대비 53.8%에 해당하고, 가뭄 발생 시기가 5 - 9월로 장기간 발생했다. 전국적으로 농업적 가뭄 피해 면적이 2015년에는 대략 7.3천 ha, 2016년에는 16천 ha가 발생했다. 가뭄지수와 토양유효수분율 기준 간 비교를 통해 비슷한 시기에 가뭄의 시작과 종료가 일치하는 구간을 분석하였다. 또한 가뭄사상 분석은 가뭄발생 횟수, 지속기간, 발생 및 종료시점을 중심으로 고찰

하였다. 연속적으로 가뭄단계가 큰 가뭄이 발생하더라도 지속기간이 길어지면 한 사상에 대한 가뭄강도가 낮게 평가 되는 경우가 있기 때문에, 가뭄을 정량화 한 후 정확한 해석과 판단에 기준이 필요한 것으로 보인다. 본 연구의 목적은 주 단위로 산정된 SPI와 SPEI가뭄을 토양유효수분율 기준의 가뭄과 비교·분석 한 후, 우리나라 가뭄관리 및 모니터링에 효용성이 있는 기상학적 가뭄지수와 시간척도를 선정하여 제시하는 것이다.

Table 1. Drought severity classification of drought index and soil available water content.

Category	Description	SPI and SPEI value	Level	Soil available water content
D0	Abnormally dry	-0.5 to -0.7	Normal	More 61%
D1	Moderate drought	-0.8 to -1.2	Attention	46 - 60%
D2	Severe drought	-1.3 to -1.5	Caution	31 - 45%
D3	Extreme drought	-1.6 to -1.9	Alert	16 - 30%
D4	Exceptional drought	-2.0 or less	Serious	0 - 15%

Results and Discussion

주 단위 가뭄지수를 이용한 가뭄분석 보령, 괴산, 전주 지역을 대상으로 수집한 41개년도 기상자료 (1981 - 2021년)로 가뭄지수 산정을 실시한 후, 2001 - 2020년의 기간의 가뭄지수 결과값을 도시화 하였다 (Figs. 2 - 4). 가뭄지수의 효용성을 살펴보기 위해 SPI 및 SPEI를 산정하고 분석한 결과, 두 지수는 지역과 상관없이 모든 시간 척도에 서 가뭄 사상 개수, 가뭄 지속기간 및 가뭄 회복시기 등이 서로 유사하였다. 또한 가뭄심도가 크고 가뭄기간이 긴 경우, 어떤 가뭄지수를 사용하더라도 유사한 결과를 얻을 수 있는 것으로 분석되었다 (Figs. 2, 3, 4d, e, i, and j). 다만, 가뭄 심도가 작거나 단기가뭄의 경우 가뭄지수별로 평가결과가 다르게 나타날 수 있어, 가뭄지수 적용에 유의해야 할 것으로 판단된다.

우리나라는 사계절이 뚜렷하고 장기가뭄 (26, 52주 단위)보다 단기가뭄의 특성을 가지는 가뭄사상이 발생하므로, 가뭄분석의 시간척도는 1, 4, 13주 단위를 대상으로 하는 것이 적합하다. 1주 단위 가뭄지수의 경우 가뭄 발생 횟수는 많고 주로 D1단계로 발생하며 (Figs. 2, 3, 4a and f), 가뭄지수 값의 변화는 빈번하게 나타난다. 4주 단위 가뭄지수의 경우 가뭄발생 시기와 지속기간은 13주 단위와 비슷하나, 가뭄발생 크기와 경향성은 1주 단위와 유사하게 나타났다. 13주 단위 가뭄지수의 경우 가뭄 발생횟수는 적고, D3단계 이상 가뭄발생이 많고, 지속기간이 긴 특징이 나타났다. 분석결과, 주 단위가 작을수록 가뭄 상황은 강우로 인한 회복을 빠르게 반영하여 가뭄지수 값 변화가 즉각적인 것으로 보인다. 가뭄지수를 분석할 때, 사계절 변화는 월간 온도변화를 바탕으로 발생하므로, 우리나라의 단기가뭄 발생 특성을 반영한 시간척도는 4주가 타당하다. 가뭄지수 간의 특징은 SPI의 경우 강수량 유무에 따라, 가뭄 심화 속도는 습윤 (wet)상태에서 D0 이상 가뭄단계로 변하는 시기와 다시 습윤상태로 회복하는 주기가 빠르며, 이는 강우에 의한 지수의 변동이 큰 특징을 나타낸다. SPI와 SPEI 가뭄지수는 서로 유사한 가뭄특성을 반영하나, SPI는 강수량만을 고려하므로 가뭄 회복 속도가 빠르고 가뭄을 과소평가하는 경향을 나타낸다. SPEI는 강수량과 증발산량을 반영하고, 강수가 충분하더라도 온도조건에 의해 가뭄회복이 되지 않는 경우의 가뭄지속상태를 반영하는 것으로 보인다. 따라서 가뭄평가에 활용할 기상학적 가뭄지수는 SPI의 단점을 보완한 SPEI를 기준으로 두는 것이 논리적으로 타당하며, 토양유효수분율 기준과 동시 모니터링을 할 때에도 SPEI를 선택하는 것이 적합하다.

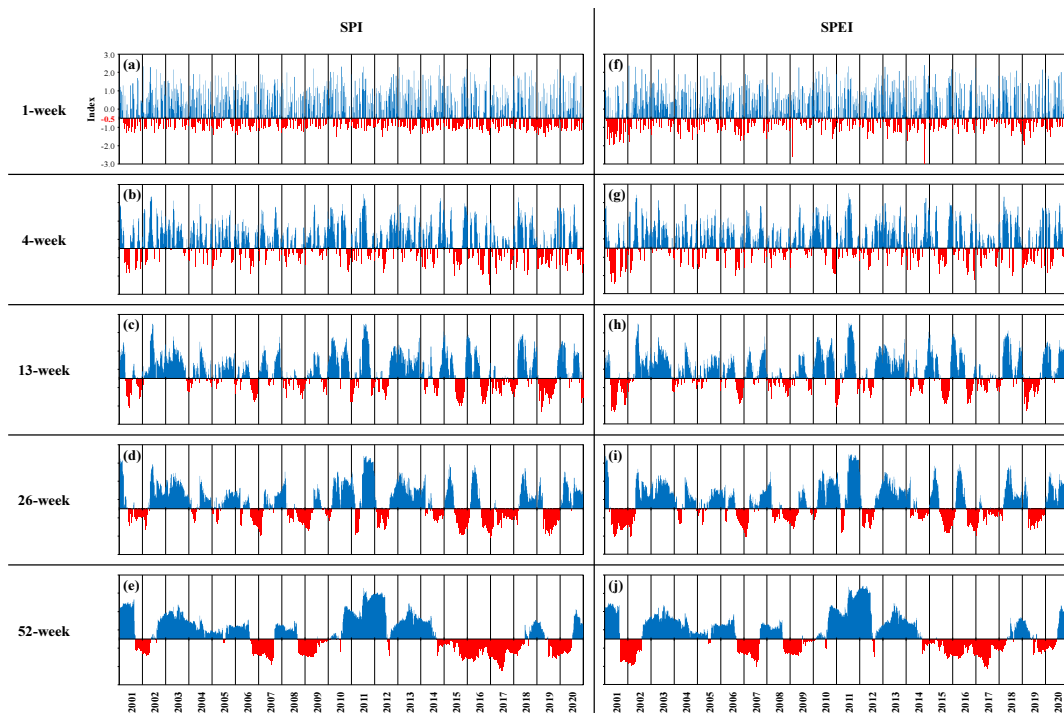


Fig. 2. Weekly SPI and SPEI by time series (1, 4, 13, 26, 52 weeks from the top) for 2001 to 2020 in Boryeong. SPI is depicted on the left panel and SPEI is shown on the right panel. Blue and red color indicate wet and dry conditions, respectively, based on the value of -0.5.

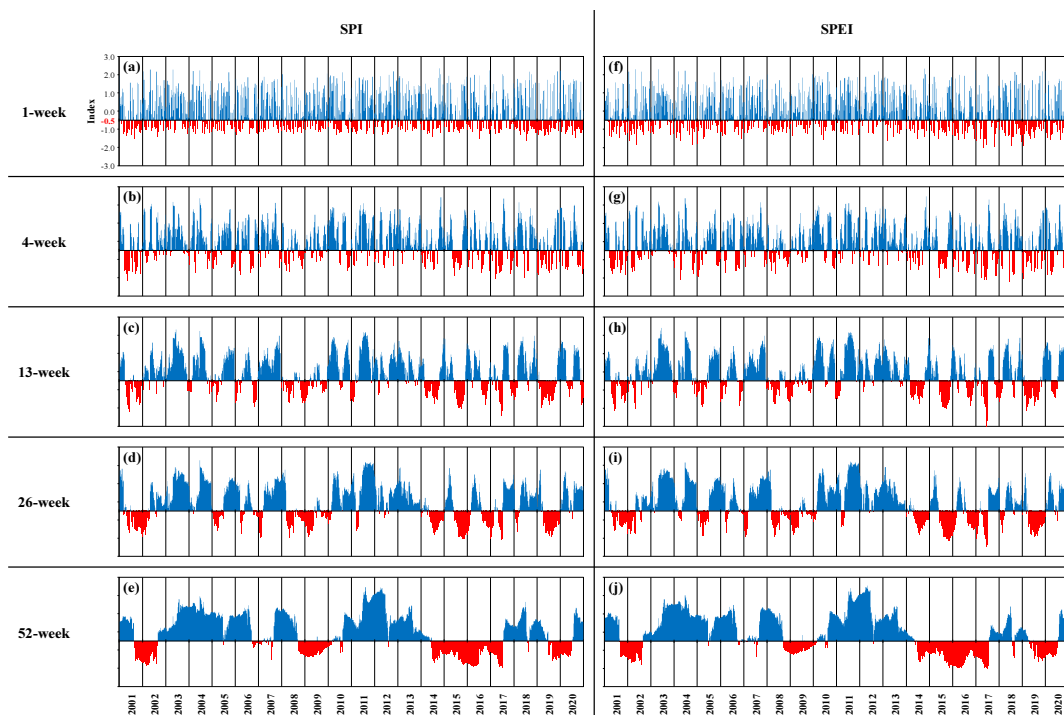


Fig. 3. Weekly SPI and SPEI by time series (1, 4, 13, 26, 52 weeks from the top) for 2001 to 2020 in Goesan. SPI is depicted on the left panel and SPEI is shown on the right panel. Blue and red color indicate wet and dry conditions, respectively, based on the value of -0.5.

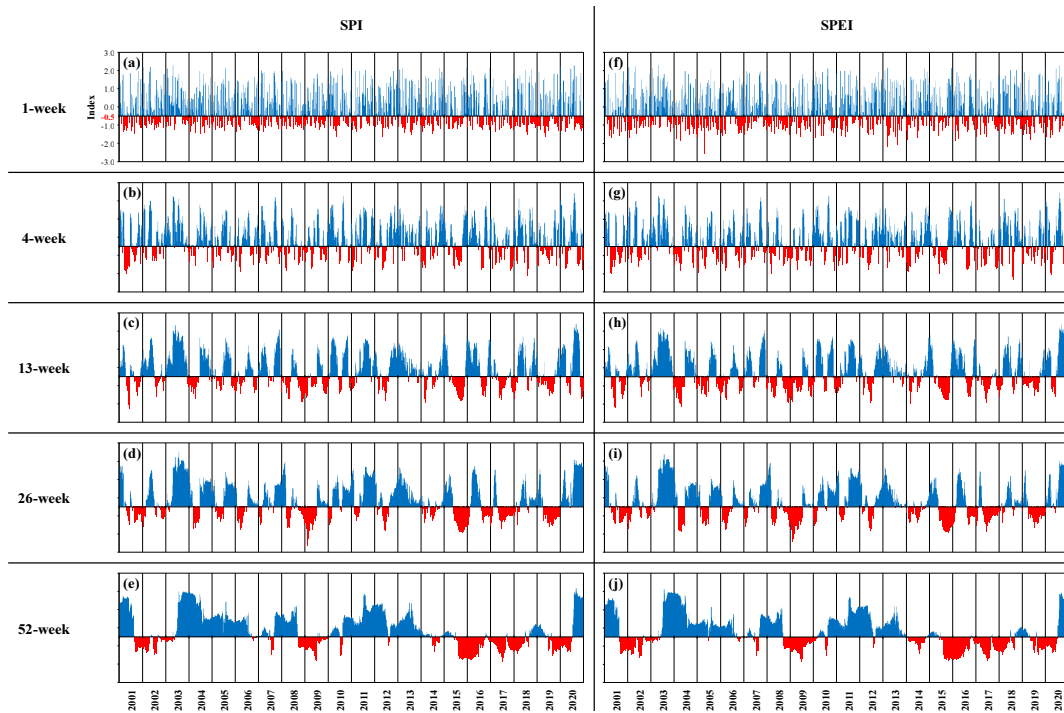


Fig. 4. Weekly SPI and SPEI by time series (1, 4, 13, 26, 52 weeks from the top) for 2001 to 2020 in Jeonju. SPI is depicted on the left panel and SPEI is shown on the right panel. Blue and red color indicate wet and dry conditions, respectively, based on the value of -0.5.

토양유효수분율 (AWC)을 이용한 가뭄분석 지역별 가뭄발생 횟수, 발생 및 종료 시기, 지속기간, 토양유효수분율에 따른 가뭄단계 등을 분석하였다. 2015년 충북 보령의 가뭄 발생 횟수는 총 3회로 나타났다 (Fig. 5d). 첫 가뭄 발생은 22주차로 ‘관심’ 단계로 시작된 가뭄은 5주간 지속되었고, 이 기간 중에 가장 심한 가뭄은 25주차에 발생한 가뭄으로 ‘주의’ 단계에 해당한다. 두 번째 가뭄 사상은 28주차로 ‘관심’ 단계의 미미한 가뭄으로 발생했다. 세 번째 가뭄은 32주차에 ‘관심’ 단계로 발생하여 ‘주의’ 단계로 심화된 가뭄이 3주간 지속된 후, 연달아 ‘경계’ 단계의 가뭄이 5주간 지속되었다. 2016년 가뭄 발생 횟수는 총 2회로, 첫 가뭄은 25주차에 발생하고 2주간 지속되었다. 두 번째 가뭄은 31주차에 ‘관심’ 단계로 발생하여 32주차에 ‘주의’ 단계, 34주차부터 37주차까지 ‘경계’ 단계로 극심한 가뭄이 발생하였다. 이와 같은 경향성은 괴산, 전주의 가뭄에서도 확인하였다 (Figs. 6 and 7d). 토양유효수분율에 의한 가뭄평가 결과, 가뭄 발생시기와 지속기간의 차이는 있으나 모든 지역에서 첫 가뭄 발생은 주로 21주차를 전후로 발생하였다. 계절성을 고려할 때, 21주차는 5월 하순에 해당하고 이 시기에 발생하는 가뭄은 상대적으로 약한 ‘관심’ 단계의 봄가뭄 특징으로 볼 수 있다. 가뭄 지속기간이 가장 길었던 시기는 24 - 26주차에 시기로, 6월 중·하순에 해당하며 ‘주의’ 단계 가뭄 발생이 많았다. 7월에는 강수로 인해 가뭄발생이 없거나 미미하게 나타났고, 가뭄 지속기간이 4주 이상으로 길고 ‘주의’, ‘경계’와 같은 심한 단계의 가뭄은 주로 8 - 9월의 시기에 발생하였다.

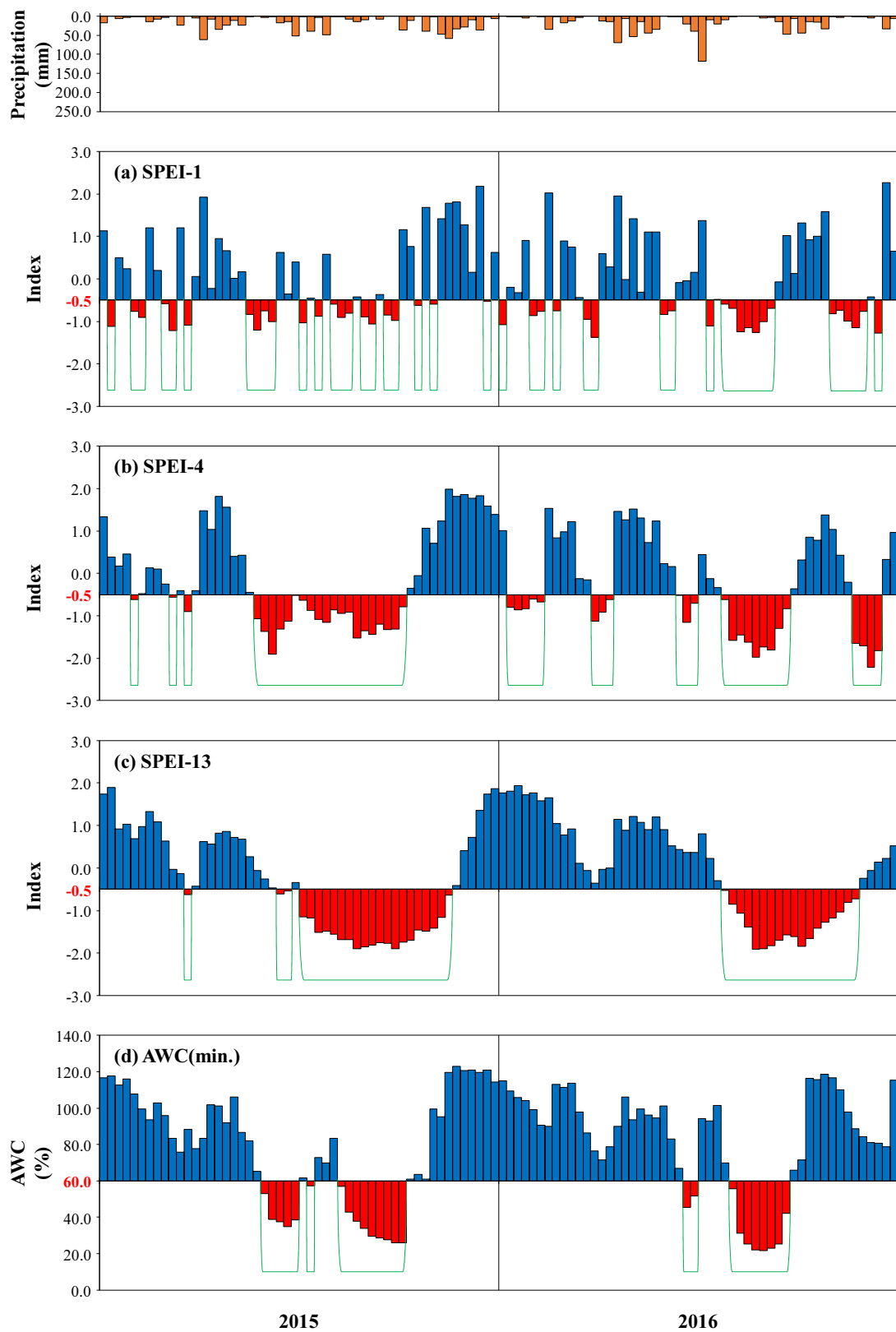


Fig. 5. Drought events based on weekly SPEI by time series (1, 4, 13 weeks) and AWC for 2015 to 2016 in Boryeong. The top graph shows the weekly precipitation. Green lines represent individual drought events. Blue and red color indicate wet and dry conditions, respectively, based on the value of -0.5 and AWC of 60%.

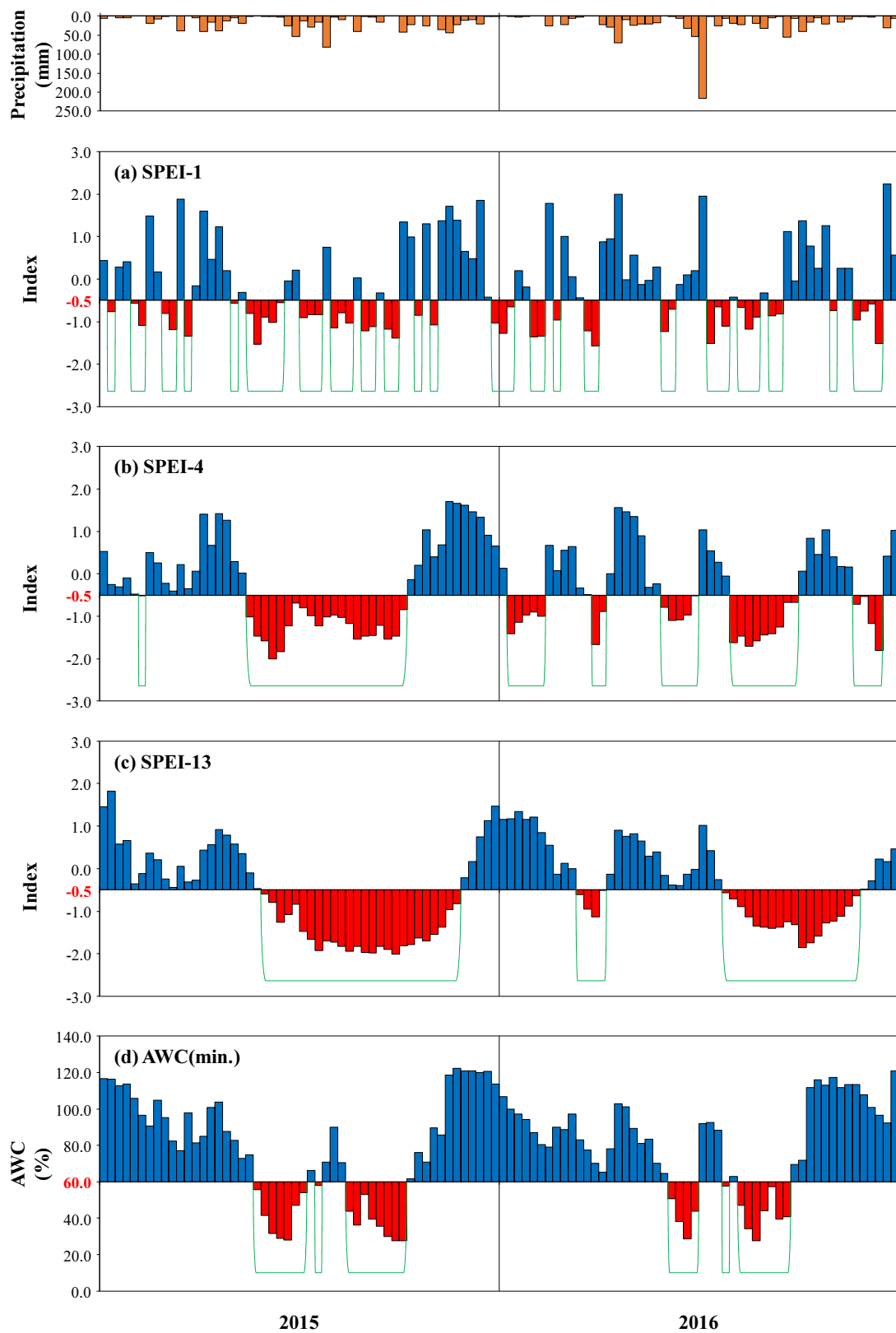


Fig. 6. Drought events based on weekly SPEI by time series (1, 4, 13 weeks) and AWC for 2015 to 2016 in Goesan. The top graph shows the weekly precipitation. Green lines represent individual drought events. Blue and red color indicate wet and dry conditions, respectively, based on the value of -0.5 and AWC of 60%.

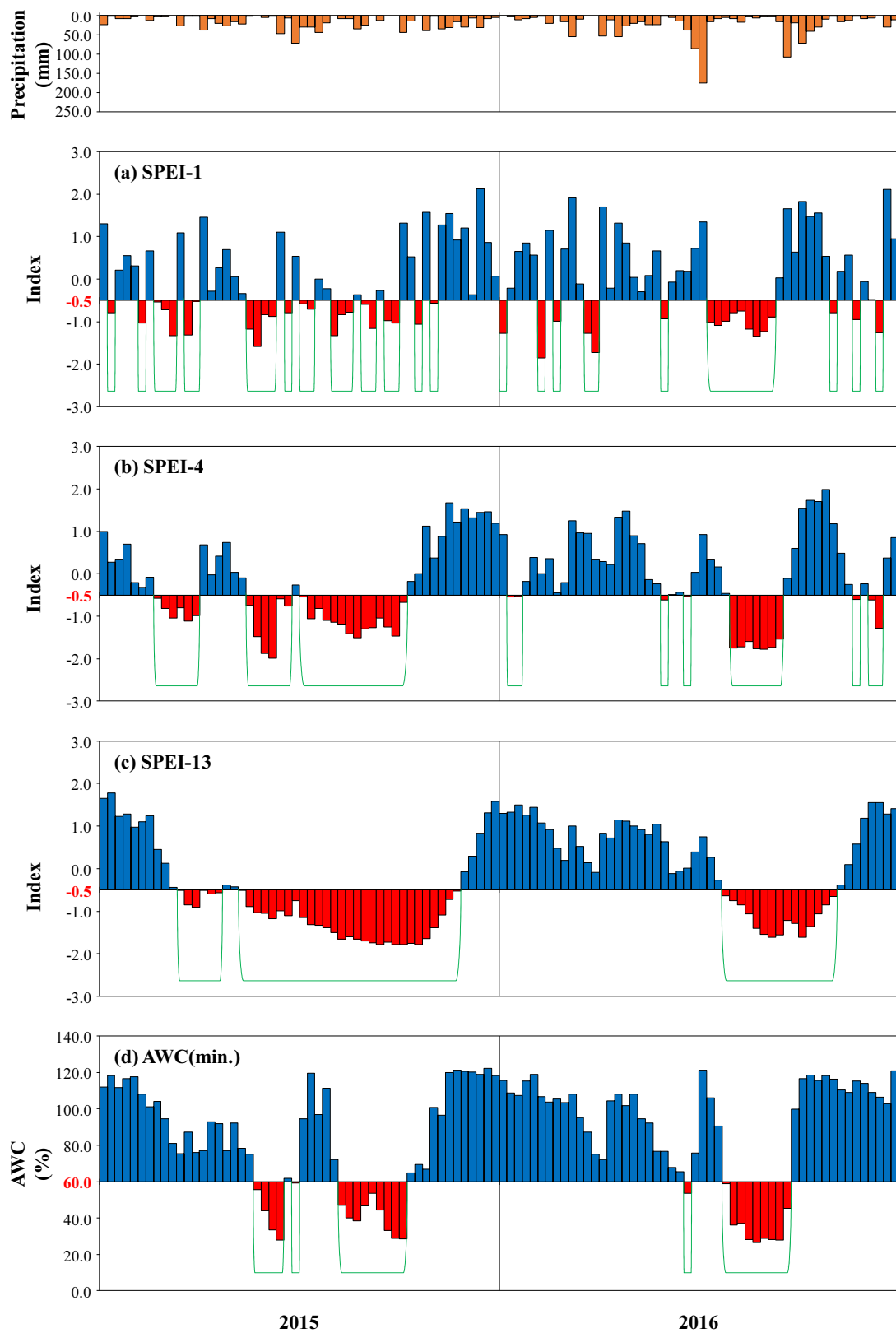


Fig. 7. Drought events based on weekly SPEI by time series (1, 4, 13 weeks) and AWC for 2015 to 2016 in JEONJU. The top graph shows the weekly precipitation. Green lines represent individual drought events. Blue and red color indicate wet and dry conditions, respectively, based on the value of -0.5 and AWC of 60%.

가뭄지수와 토양유효수분을 기준 간 비교 기상학적 가뭄과 농업적 가뭄의 동시 비교는, SPEI로 평가된 결과와 토양유효수분을 기준의 가뭄 단계로 분석하였다. 토양유효수분을 가뭄 그래프 대비 SPEI 가뭄 그래프를 비교하여 가뭄 발생 시기, 가뭄변화 양상 등의 경향을 분석하였다. 모든 대상지역에서 Figs. 5 - 7과 같이 기상학적 가뭄지수의 시간 척도는 4주일 때가 농업가뭄 기준의 가뭄 발생의 시작과 종료되는 시점, 지속기간, 가뭄 변화 양상 등이 가장 유사하다. 2015년 보령의 SPEI-4를 분석 결과, 1주간 지속된 단기 가뭄을 제외하고 21주차에 D1 단계의 가뭄 발생을 시작으로 40주차를 마지막 가뭄단계로 종료되었다. 토양유효수분을 기준 가뭄이 유사하게 모니터링된 시기는 22주차이며, 40주차에 종료했다. 또한 22주차에 D2 (-1.37) 단계, 23주차에는 D3 (-1.9) 단계로 심화되어 나타나는데, 동일 시기에 토양유효수분 가뭄평가는 22주차에 ‘관심’ (53.03%) 단계에서 23주차 ‘주의’ (38.31%) 단계로 변화하는 것이 유사한 경향성으로 보인다. 이러한 특징은 괴산과 전주에서도 나타난다.

우리나라 농업가뭄의 피해에 대한 지속기간은 평균 2개월 이하이고, 대부분 여름철 장마전선의 영향으로 가뭄이 종료되는 때에 발생한다. 2015년 가뭄사상의 가장 큰 특징은 가뭄 지속기간 중 회복시기 존재의 유무이다. 모든 지역에 대해 2015년의 Figs. 5, 6 및 7d를 살펴보면 토양유효수분율로 평가된 가뭄은 지속기간 중 가뭄이 회복된 시기가 있으나, 같은 시기 Figs. 5, 6 및 7b를 살펴보면 SPEI 가뭄 지속기간 동안에는 가뭄이 해결되지 않았다. 이는 기상 환경만 고려한 가뭄지수에서는 강수, 온도의 영향에 따라 가뭄을 평가하는 반면, 토양유효수분율을 고려한 가뭄평가는 강수량, 증발산량과 같은 기상환경 외에 작물재배기간, 작물계수, 토양환경 등이 반영되어 토양수분의 보유능력으로 인한 가뭄이 해결되었음을 시사한다. 2016년에는 토양유효수분율로 평가된 가뭄 (Figs. 5, 6, and 7d)의 가뭄 지속기간 중 가뭄이 회복되는 시기가 SPEI로 평가된 가뭄 (Figs. 5, 6, and 7b)과 유사한 경향으로 회복하는데, 이는 강수량이 풍부한 여름장마의 특성이 반영된 것이다. 즉, 토양유효수분율 기준의 가뭄평가는 단순히 강수량, 증발산량과 같은 기상환경 외에도 농업기후지대에 따른 작물재배시기, 생육기간, 토양의 특성을 복잡하게 반영된 결과이므로 농업가뭄을 평가할 때 중요한 기준이 되는 것으로 판단된다.

Conclusions

본 연구는 기상학적 가뭄지수로 많이 이용하는 SPI 및 SPEI에 따른 가뭄등급과 토양유효수분율에 따른 농업가뭄 단계를 산정하여 가뭄을 평가하고 분석하였다. 가뭄을 평가하기 위해 단일 가뭄지수를 이용하지 않은 것은 가뭄이 지역 및 시간에 따라 상이한 특성을 가지고 있는 점을 반영하기 위함이다. 연구를 수행하며 어떠한 시간 단위로 가뭄지수를 산정하는 것이 우리나라의 가뭄 관리 및 모니터링을 위해 유용한 정보를 줄 수 있는가를 판단하였다. 두 가지 가뭄평가 기준을 동시에 비교한 결과, 가뭄사상에 대해 평가체계는 상이하지만, 가뭄의 수준과 경향은 유사하게 평가되었다. 모든 지역과 시간 척도의 그래프 경향을 분석해 보면, 기상학적 가뭄이 먼저 발생하는 것을 확인하였다. 우리나라의 농업가뭄 발생시기와 심도를 상호 비교하는데 적합한 것으로 판단되는 기상학적 가뭄지수는 4주 단위 SPEI를 선정하였다.

두 가지 가뭄평가 기준으로 가뭄을 분석한 결과, 우리나라 가뭄의 발생시기는 지역별 환경조건이나 기상상황에 따라 다르지만, 주로 농번기에 해당하는 6월 중·하순에 처음 발생하고 작물생육이 활발한 8, 9월에 지속기간이 긴 가뭄이 발생하였다르겠지. 대부분 단기가뭄의 형태로 발생되며, SPEI-4에서는 가뭄이 지속되는 반면, 토양유효수분율 기준에서는 가뭄이 해결되는 결과도 나타났다. 이는 강수나 증발산량과 같은 기상조건 외에 작물재배의 효과, 토양의 수분 보유능력이 반영되는 농업 가뭄의 특징에 따른 결과로 볼 수 있다. 4주 척도 단위의 기상학적 가뭄지수는 토양유

효수분을 기준일 때보다 빠르게 가뭄발생을 판단할 수 있기 때문에 농업가뭄의 사전 대비에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 기상학적 가뭄지수로 가뭄을 판단하여 가뭄발생을 미리 인지하고, 가뭄이 농업에 영향을 미치기 이전부터 가뭄의 진행단계별로 적합한 사전 가뭄 대책을 수립함으로써 가뭄에 효율적으로 대응할 수 있다.

본 연구에서는 일부 가뭄 사례를 통해 가뭄단계를 제시하고 분석하였으나, 향후 포괄적인 적용을 위해서는 장기적으로 축적된 자료를 분석한 결과와 대조할 뿐만 아니라 지역별 기상상황, 토양조건에 따른 특이점이 있음을 고려해야 한다. 본 연구는 정량적으로 가뭄사상의 시계열 변화 및 가뭄 모니터링을 위한 기초자료로 쓰일 수 있지만, 종합적으로 가뭄단계를 설정하는 추가적인 연구를 통한 개선도 필요하다. 연구 결과는 농업가뭄을 평가할 때 토양유효수분을 단일자료로 농업가뭄을 판단했던 것을 다른 가뭄평가 지수와 비교·검토 하여 효용성 있는 가뭄분석을 수행하는 것에 활용될 것으로 기대한다. 또한 가뭄을 산정 및 판단하는 기준을 수립하는 기초연구로써 향후 재난관리 담당자가 의사 결정을 하는 과정에 활용 가능할 것이다.

Acknowledgement

This study was financially supported by a grant from the research project (No. PJ015692) of National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration - Guideline for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Botterill, L.C. and M.J. Hayes. 2012. Drought triggers and declarations: Science and policy considerations for drought risk management. *Nat. Hazards* 64:139-151.
- Chen, H. and J. Sun. 2015. Changes in drought characteristics over China using the standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Clim.* 28:5430-5447.
- Eom, K. 2021. Estimation models for soil water content and rainfall in Andong. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 54(4):486-503.
- Hayes, M.J., M.D. Svoboda, B.D. Wardlow, M.C. Anderson, and F. Kogan. 2012. Drought monitoring: Historical and current perspectives. p. 1-19. In B.D. Wardlow et al. (ed.) *Remote sensing of drought: Innovative monitoring approaches*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Hayes, M.J., M.D. Svoboda, D.A. Wilhite, and O.V. Vanyarkho. 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 80:429-438.
- Heim, R.R. 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 83:1149-1165.
- Hwang, S.A., J.H. Ok, B.Y. Oh, and S.O. Hur. 2022. Analysis of upland drought variation based on soil available water contents in the 2022 drought period. p. 65. In *Proceedings of the 54th Conference on Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Jeju, Korea.
- Kingston, D.G., J.H. Stagge, L.M. Tallaksen, and D.M. Hannah. 2015. European-scale drought: Understanding connections between atmospheric circulation and meteorological drought indices. *J. Clim.* 28:505-516.
- Lee, B.R., J.H. Sung, and E.S. Chung. 2015. Comparison of meteorological drought and hydrological drought index. *J. Korea Water Resour. Assoc.* 48(1):69-78.

- McKee, T.B., N.J. Doesken, and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. p. 179-184. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA, USA.
- Nam, W.H., E.M.Hong, Choi, J.Y., T.G. Kim, M.J. Hayes and M.D.Svoboda. 2017. Assessment of the extreme 2014~2015 drought events in North Korea using weekly standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI). *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 59(4):65-74.
- Nam, W.H., M.J. Hayes, D.A. Wilhite, T. Tadesse, M.D. Svoboda, and C.L. Knutson. 2014. Drought management and policy based on risk assessment in the context of climate change. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 56(2):2-15.
- Nam, W.H., M.J. Hayes, M.D. Svoboda, T. Tadesse, and D.A. Wilhite. 2015. Drought hazard assessment in the context of climate change for South Korea. *Agric. Water Manage.* 160:106-117.
- Niemeyer, S. 2008. New drought indices. p. 267-274. In A. López-Francos (ed.) *Options Mediterraneennes, Serie A: Seminaires Mediterraneens*, No. 80. CIHEAM-IAMZ, Zaragoza, Spain.
- Potopova, V., C. Boroneant, B. Boincean, and J. Soukup. 2016. Impact of agricultural drought on main crop yields in the Republic of Moldova. *Int. J. Climatol.* 36:2063-2082.
- Stagge, J.H., L.M. Tallaksen, L. Gudmundsson, A.F. Van Loon, and K. Stahl. 2015. Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *Int. J. Climatol.* 35:4027-4040.
- Svoboda, M., D. LeComte, M. Hayes, R. Heim, K. Gleason, J. Angel, B. Rippey, R. Tinker, M. Palecki, D. Stooksbury, D. Miskus, and S. Stephens. 2002. The drought monitor. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 83(8):1181-1190.
- Svoboda, M.D., B.A. Fuchs, C.C. Poulsen, and J.R. Nothwehr. 2015. The drought risk atlas: Enhancing decision support for drought risk management in the United States. *J. Hydrol.* 526:274-286.
- Tate, E.L. and A. Gustard. 2000. Drought definition: A hydrological perspective. p. 23-48. In J.V. Vogt and F. Somma (ed.) *Drought and drought mitigation in Europe*. Springer, Heidelberg, Netherlands.
- Trnka, M., M. Dubrovsky, M. Svoboda, D. Semerádová, M. Hayes, Z. Zalud, and D. Wilhite. 2009. Developing a regional drought climatology for the Czech Republic. *Int. J. Climatol.* 29:863-883.
- Tsakiris, G., A. Loukas, D. Pangalou, H. Vangelis, D. Tigkas, G. Rossi, and A. Cancelliere. 2007. Chapter 7. Drought characterization. p. 85-102. In A. Iglesias et al. (ed.) *Options Mediterraneennes*. Ciheam, Paris, France.
- Vicente-Serrano, S.M., S. Begueria, and J.I. Lopez-Moreno. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Clim.* 23:1696-1718
- Vicente-Serrano, S.M., S. Begueria, J. Lorenzo-Lacruz, J.J. Camarero, J.I. Lopez-Moreno, C. Azorin-Molina, J. Revuelto, E. Moran-Tejeda, and A. Sanchez-Lorenzo. 2012. Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interact.* 16:1-27.
- Wilhite, D.A. and M.H. Glantz. 1985. Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water Int.* 10(3):111-120.
- Zhao, M., G. A. I. Velicogna, and J.S. Kimball. 2017. A global gridded dataset of GRACE drought severity index for 2002-2014: Comparison with PDSI and SPEI and a case study of the Australia Millennium drought. *J. Hydro-meteorol.* 18:2117-2129.