

Korean Model for Estimating Soil Available Water Content of Soybean Cultivation Area with Integrated Soil, Meteorology, and Crop Data

Seon-ah Hwang¹, Jung-hun Ok¹, Bu-yeong Oh¹, Jeong-woo Son¹, Se-In Lee², Seung-oh Hur³, and Kang-ho Jung^{4*}

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

²Post-Master's Researcher, Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

³Senior Researcher, Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

⁴Senior Researcher, Convergence and Innovation Strategy Team, Rural Development Administration, Jeonju 54875, Korea

*Corresponding author: stealea@korea.kr

ABSTRACT

Received: November 8, 2022

Revised: November 18, 2022

Accepted: November 21, 2022

Edited by

Woo-Jung Choi,
Chonnam National University,
Korea

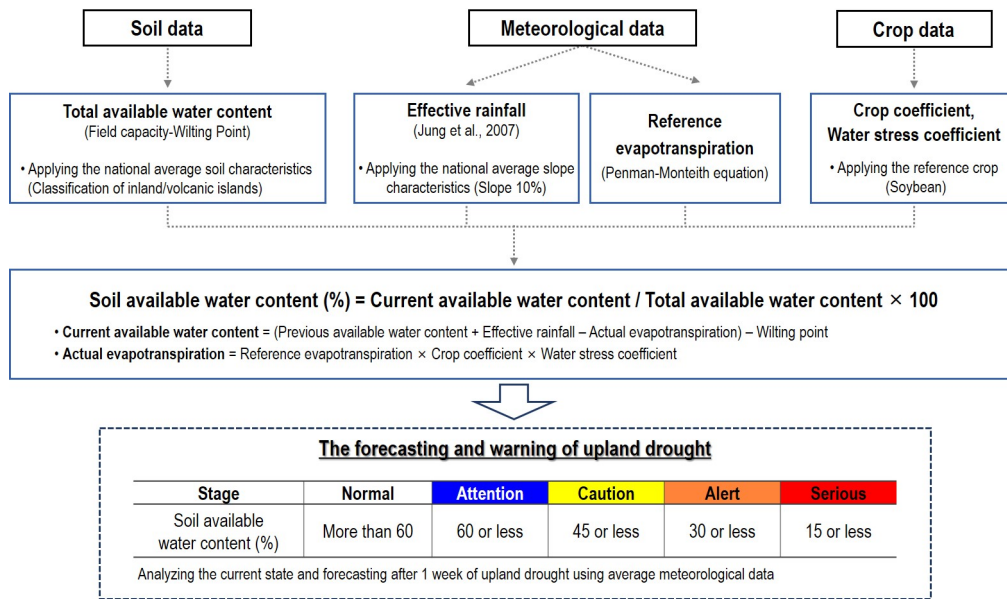
ORCID

Kang-ho Jung
<https://orcid.org/0000-0001-8854-7278>

This study was carried out to develop a model for a upland drought forecasting system using soil available water contents (SAWC). The SAWC expressed as a percentage of the current available water content out of the total available water content. The total available water content is defined as the difference between field capacity and wilting point, and the current available water content is calculated by subtracting the wilting point from the current soil water content. The total available water content was calculated by dividing the soil characteristics by depth based on the soil depth of 60 cm, and the current soil water content was calculated by adding the previous available water content and the effective rainfall and then subtracting the actual evapotranspiration. The actual evapotranspiration was calculated by multiplying the reference evapotranspiration, crop coefficients and water stress coefficients. The reference evapotranspiration was computed with FAO Penman-Monteith equation. Soybean was selected as the reference crop of the drought forecasting system due to its proportion in the total upland area and industrial importance. The water stress coefficient was evaluated as a function according to the soil available water condition. The drought stage was classified with five stages based on SAWC. To prepare countermeasures against drought of crop fields in upland, the information on SAWC and upland drought stage was provided to 167 cities and counties from April to October.

Keywords: Crop coefficient, Effective rainfall, Reference evapotranspiration, Soil available water contents, Upland drought





The schematic diagram of the model assessing soil available water content for the forecasting system of upland drought.

Introduction

최근 기후변화로 인한 가뭄, 홍수, 한파 등 재배 발생 빈도가 증가하고 있으나 현재까지 기후대응 기술은 눈에 띄지 않고 있다. 특히 가뭄에 대응하기 위한 연구는 농업 분야를 위주로 진행되어 발농업에 대한 가뭄대응기술 연구는 아직 미흡한 실정으로 기술 개발이 시급하다 (Shin et al., 2019). 농림축산식품부는 2015년 ‘농업·농촌 부분 가뭄대응 종합 대책’을 수립하였고, 행정안전부는 2016년 발토양 유효수분율을 농업가뭄 주요지표로 선정하였다. 토양유효수분은 토양의 수분 중에서 작물이 이용가능한 수분으로 정의하며, 토양 내 상한선은 포장용수량 (field capacity), 하한선은 영구위조점 (wilting point)을 적용한다. 포장용수량과 영구위조점의 차이로부터 토양 내 총유효수분량을 산정하며, 총유효수분량 중에 현재 유효수분량의 비율을 백분율로 표기한 것이 토양유효수분율이다. 가뭄이 지속되면 토양수분 결핍이 발생하고 작물의 수분 스트레스가 증가하여 발작물의 생산성에 영향을 미칠 수 있으므로, 토양수분은 작물 생산 및 농업적 가뭄 평가의 지표가 될 수 있다 (Eltahir, 1998; Narasimhan and Srinivasan, 2005; Nam et al., 2014; Hong et al., 2015a).

발작물의 경우 농업용 저수지 및 양수장과 같은 수리시설물로부터 용수를 공급받는 논작물 (벼)과 달리 자연 강우를 통해 필요한 용수량을 공급받는 천수전이 대부분이기 때문에 기후변화로 야기되는 수문학적 변화에 의한 가뭄의 취약성이 높다 (Mun et al., 2020; Yoon et al., 2020; Jeon et al., 2021). 발작물은 토양수분을 소비함으로써 생육하며, 작물의 생육시기와 기상환경, 농업환경에 민감하므로 토양수분 부족 및 가뭄에 직접적인 영향을 받는다 (Hong et al., 2012; Hong et al., 2015a; Otkin et al., 2015). 따라서 발가뭄을 분석하기 위해서는 기상인자뿐만 아니라 작물의 종류, 증발산량 및 토양의 특성도 반영되어야 한다 (Jeon et al., 2021).

농업적 가뭄 평가를 위하여 토양수분모형을 적용한 연구로는 Bae et al. (1999)이 토양수분 물수지 모형과 가뭄분석 모형을 결합하여 우리나라 발 지역의 농업가뭄을 평가하였으며, Kim et al. (2006)과 Nam et al. (2012)은 토양수분 물수지 모형과 Runs 이론을 이용하여 유역단위 농업가뭄의 정량적인 평가를 수행하였다. Nam et al. (2014)은 발 토

양수분 물수지 모형을 기반으로 기후변화에 따른 작물 소비수량 및 관개용수량을 추정하였고, Hong et al. (2015a)은 토양수분모형을 이용하여 전라남도 지역을 중심으로 주요 밭작물의 미래가뭄을 전망하였다. Jang et al. (2020)은 공공 기상데이터를 수집하여 기계학습기반의 토양수분 예측 모델을 개발하였다. 하지만 대부분의 연구 대상지역이 한정되거나 미래가뭄을 전망하고 있어 현재 전국의 지역적인 토양유효수분 유허을 신속하게 파악하여 밭가뭄을 평가할 수 있는 모형에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구에서는 노지 밭작물의 가뭄에 대비하기 위하여 토양, 기상, 작물 자료를 통합하고 물수지를 기반하는 토양 유효수분을 산정 모형을 제시하였다.

Materials and Methods

토양인자 토양유효수분을 산정하기 위해서는 총유효수분량 (mm)이 필요하며 이는 포장용수량에서 영구위조점을 뺀 값으로 산정할 수 있다. 밭가뭄 평가를 위한 토양유효수분율은 유효토심 60 cm 기준으로 산정하였으며, 토성별 총유효수분량 (mm)은 토성별 포장용수량 (% , $g\ g^{-1}$)과 영구위조 수분함량 (% , $g\ g^{-1}$)의 차에 용적밀도 ($g\ cm^{-3}$)와 유효토심 (cm)을 곱하여 산정하였다. 토성별 포장용수량과 영구위조 수분함량은 Eom et al. (1995)이 제시한 토성별 33 kPa와 1,500 kPa의 수분함량을 이용하였다. 용적밀도는 2017년도 농업환경변동조사 사업보고서 (NAS, 2018) 자료를 활용하여 밭토양 표토와 심토의 평균값을 적용하였다. 우리나라 내륙의 평균 총유효수분량은 토성별 총유효수분량에 토성별 면적 가중치 (ASI, 1992)를 적용하여 산정하였다.

기상인자 토양유효수분율은 강우량과 증발산량을 통해 그 값이 달라진다. 강우 중 토양에 침투 가능한 강우량은 유효강우량이라고 하며, 밭의 경사도에 따라 지표유출이 달라진다. 우리나라의 밭의 41% 정도가 경사도 7 - 15%이기 때문에, 밭가뭄 평가를 위한 유효강우량은 경사도 10% 기준으로 산정하였다. 유효강우량은 Jung et al. (2007)의 자료를 활용하여 일강우량과 유거 발생 최소 강우량을 구분하여 계산하였다. 이것은 일강우량이 유거 발생 최소 강우량과 비교하여 작을 때와 클 때를 나누어서 계산할 수 있다. 전자의 경우, 유효강우량은 일강우량과 같으나, 후자의 경우 유거량을 제외한 값을 유효강우량으로 산정하였다. 따라서 유효강우량은 일강우량이 유거 발생 최소 강우량인 38.3 mm보다 작거나 같으면 일강우량과 동일하며, 일강우량이 38.3 mm보다 크면 유거량 (유거율 0.67%)을 제외한 값을 유효강우량으로 산정하였다. 유거 발생 최소 강우량은 강수 전 토양수분 함량, 투수성 등에 따라 달라지나 모형의 단순화를 위해 대푯값을 설정하였다.

$$\text{Effective rainfall (mm)} = 38.3 + (\text{rainfall} - 38.3) \times 0.33 \text{ when rainfall} > 38.3 \quad (\text{Eq. 1})$$

작물 재배시 작물의 실증발산량을 모의하기 위해 기준증발산량을 산정하고 작물계수 (crop coefficient, K_c)와 수분 스트레스 계수 (water stress coefficient, K_s)를 곱해줌으로써 유효 근근역 내 작물 증발산량 (ET_c)을 일별로 산정하였다 (Allen et al., 1998; Hong et al., 2015b).

$$ET_c = ET_0 \times K_c \times K_s \quad (\text{Eq. 2})$$

기준증발산량은 유엔식량농업기구 (Food and Agriculture Organization, FAO)에서 추천하는 FAO-56 Penman-Monteith (PM) 공식 (Eq. 3)을 사용하였다.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8Z - 5.42)} \quad (\text{Eq. 4})$$

여기서, ET_0 는 PM 공식으로 산정된 기준증발산량 (mm day^{-1}), Δ 는 증기압 곡선의 기울기 ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), γ 는 건습계 상수 ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), u_2 는 지상 2 m 높이에서의 풍속 (m s^{-1}), R_n 은 순복사에너지 ($\text{MJm}^{-2} \text{day}^{-1}$), G 는 토양열 유동밀도 ($\text{MJm}^{-2} \text{day}^{-1}$), T 는 일 평균기온 ($^\circ\text{C}$), e_s 는 포화증기압 (kPa), e_a 는 실제증기압 (kPa), u_z 는 지상 Z m 높이에서의 풍속 (m s^{-1}), Z 는 풍속계 지표고도 (m)이며, 풍속은 Eq. 4에 의하여 높이를 보정한 후 PM 공식에 적용하였다.

작물인자 모형을 위한 대표작물로 콩을 선정하였다. 콩은 우리나라 노지 밭작물을 대표하는 작물로 밭 식량작물 중 재배면적이 가장 넓은 작물이다 (KOSIS, 2016). 작물계수는 작물에 대한 생육시기별 실제 증발산량의 기준증발산량에 대한 비율이며 작물의 생육단계에 따라 달라진다 (Table 1).

수분 스트레스 계수 (K_s)는 근권의 토양수분 함량이 일정 범위보다 낮아질 경우 증산에 필요한 충분한 양의 수분 공급이 저해됨으로 인해 작물의 증발산량이 감소하는 현상을 반영한다 (Allen et al., 1998; Hong et al., 2015b). 본 연구에서는 중량식 라이시미터 연구를 통하여 콩 재배시기에 설정된 수분 스트레스 계수를 산정하였다 (Table 2).

Table 1. Crop coefficients (K_c) for soybean with growth stage to evaluate evapotranspiration without water stress.

| Growth stage | Seedling | Leaf extension | Flowering | Beginning pod | Maturity | Harvest |
|----------------------------|----------|----------------|-----------|---------------|----------|---------|
| Start date | 5/20 | 6/11 | 7/21 | 8/21 | 9/11 | 9/26 |
| End date | 6/10 | 7/20 | 8/20 | 9/10 | 9/25 | 10/31 |
| Crop coefficient (K_c) | 0.58 | 0.88 | 1.00 | 0.93 | 0.93 | 0.50 |

Table 2. Water stress coefficients (K_s) for soybean with the grade of soil available water contents to evaluate actual evapotranspiration.

| Stage | Soybean growing period (5/20 - 10/31) | |
|-------|---------------------------------------|--------------------------|
| | Soil available water contents (%) † | Water stress coefficient |
| 1 | 80 or more | 1 |
| 2 | 60 - 80 | 0.8 |
| 3 | 40 - 60 | 0.7 |
| 4 | 30 - 40 | 0.4 |
| 5 | 0 - 30 | 0.1 |

† Effective soil depth 60 cm.

Results and Discussion

토양, 기상, 작물 인자를 활용한 토양유효수분을 산정 토양수분 물수지 모형은 기상자료, 토양 및 작물 특성 자료를 활용하여 토양수분을 추정할 수 있도록 Eq. 5와 같이 표현할 수 있다 (Nam et al., 2014; Hong et al., 2015a).

$$\Delta D = (P - RO) + IR + CR - ETC - DP \quad (\text{Eq. 5})$$

ΔD 는 토양 내에서의 토양수분 변화량 (mm), P 는 강수량 (mm), RO 은 지표유출량 (mm), IR 은 관개량 (mm), CR 는 모관력에 의한 수분상승량 (mm), ETC 는 작물 증발산량 (mm), DP 는 유효토층 하부에서의 지하배수량 (mm)이다. Eq. 5에 무관개를 가정한 후, 모세관력에 의한 수분상승량을 무시하고, 강수량, 지표유출량, 지하배수량을 유효강수량으로 표현하면 Eq. 6과 같이 정리할 수 있다.

$$SAM_t = SAM_{t-1} + ER_t - ETC_t \quad (\text{Eq. 6})$$

여기서, SAM_t 는 t일의 토양수분함량 (mm), SAM_{t-1} 는 t-1일의 토양수분함량 (mm), ER_t 는 t일의 유효강수량 (mm), ETC_t 는 t일의 작물 증발산량이다. 본 연구에서는 정리된 Eq. 6을 활용하여 토양유효수분을 산정하는 기본 공식으로 활용하였다.

토양유효수분율은 수분보유량, 유효강수량, 작물 증발산량 및 토양의 특성인 포장용수량, 영구위조점을 고려하여 산정한 값으로 토양, 작물, 기상 요인의 특성을 반영하고 있다 (Nam et al., 2014; Hong et al., 2015a; Jeon et al., 2021). 토양유효수분율 (%) 산정 공식은 Eq. 7 - Eq. 11과 같다.

$$SAMC (\%) = (SAM_t / SAM_{total}) \times 100 \quad (\text{Eq. 7})$$

$$SAM_t (\text{mm}) = (SAM_{t-1} + ER_t - ETC_t) - WP \quad (\text{Eq. 8})$$

$$SAM_{total} (\text{mm}) = FC - WP \quad (\text{Eq. 9})$$

$$\begin{aligned} ER_t (\text{mm}) &= \text{rainfall when rainfall} \leq 38.3 \\ &= 38.3 + (\text{rainfall} - 38.3) \times 0.33 \text{ when rainfall} > 38.3 \end{aligned} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$ETC_t (\text{mm}) = ET_0 \times Kc \times Ks \quad (\text{Eq. 11})$$

여기서, $SAMC$ 는 토양유효수분율 (%), SAM_t 는 t일의 유효수분량 (mm), SAM_{total} 은 총유효수분량 (mm), SAM_{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), ET_0 는 기준

증발산량 (mm), K_c 는 작물 계수 (crop coefficient), K_s 는 수분 스트레스 계수 (water stress coefficient)이다. 본 공식에 적용된 우리나라 내륙 60 cm 기준 평균 포장용수량은 150 mm, 영구위조점은 54 mm이고, 총유효수분량은 96 mm이다. 이러한 공식에 지역별 기상자료를 활용하면 지역별 토양유효수분율을 산정할 수 있다.

토양유효수분율을 활용한 밭가뭄 평가 밭가뭄은 토양에 존재하면서 작물이 이용가능한 토양수분 함량이 중요하며 이는 토양유효수분율로 산정할 수 있다. 지역별로 산정된 토양유효수분율은 밭가뭄을 평가하는 기준을 60%로 한다. 이는 국립농업과학원에서 중량식 라이시미터를 활용하여 콩을 재배하였을 때 작물의 생육상태와 토양유효수분율, 그리고 주요 밭작물의 관수 개시점 등을 고려하여 설정된 기준이다. 밭가뭄 단계는 Table 3과 같으며, 토양유효수분율을 활용한 밭가뭄 평가 모식도는 Fig. 1과 같다.

Table 3. The upland drought stages defined with soil available water contents used for the forecasting and warning system of upland drought in RDA.

| Stage | Normal | Attention | Caution | Alert | Serious |
|----------------------------------|--------------|------------|------------|------------|------------|
| Soil available water content (%) | More than 60 | 60 or less | 45 or less | 30 or less | 15 or less |

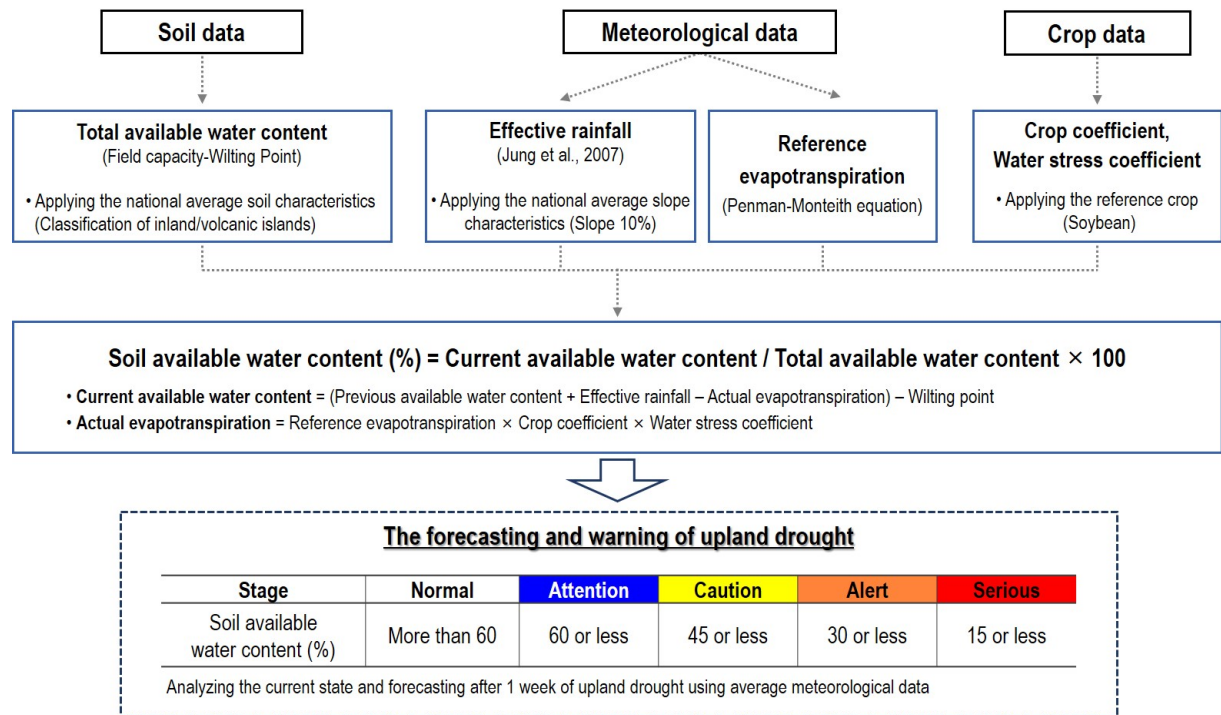


Fig. 1. The schematic diagram of the model assessing soil available water content for the forecasting system of upland drought.

본 연구에서 개발된 토양유효수분율 기준 밭가뭄 평가 모형을 활용한 밭가뭄 자료는 전국 167개 시군에 대하여 영농기인 4월부터 10월까지 주 1회, 가뭄기엔 주 2회 제공하였다. 2022년에는 가뭄 심화에 따라 5월 24일부터 6월 27일까지 주 2 - 5회 자료를 제공하여 전국 밭가뭄 현황을 신속하게 파악할 수 있도록 하였다. 5월 전국 평균 강수량이 6.4

mm였으며, 5월 24일에 전국 평균 토양유효수분율은 57.3%로 167개 시군 중 144개 시군 (86%)이 발가뭍 관심 단계로 확인되었다. 6월 3일에 전국 평균 토양유효수분율은 40.3%로 146개 시군 (87%)이 주의, 19개 시군 (11%)이 관심 단계로 확인되어 발가뭍이 점차 심화되었다. 6월 7일 전국 평균 17.1 mm의 강수로 일부지역은 일시적으로 발가뭍이 정상 단계가 되었지만 전국 50%가 넘는 지역은 여전히 관심과 주의 단계를 유지하였다. 6월 13일부터 경기와 충남 일부지역이 경계 단계로 확인되었으며, 일부지역은 강수량에 따라 발가뭍이 일시적으로 해소되었지만, 완전히 해결되진 못하였다. 5월 24일부터 전국 토양유효수분율은 37.4 - 68.4%의 범위를 유지하다가 6월 23일에 전국 평균 34.2 mm의 강수로 24일부터 발가뭍 정상 단계로 회복하기 시작하였다 (Fig. 2).

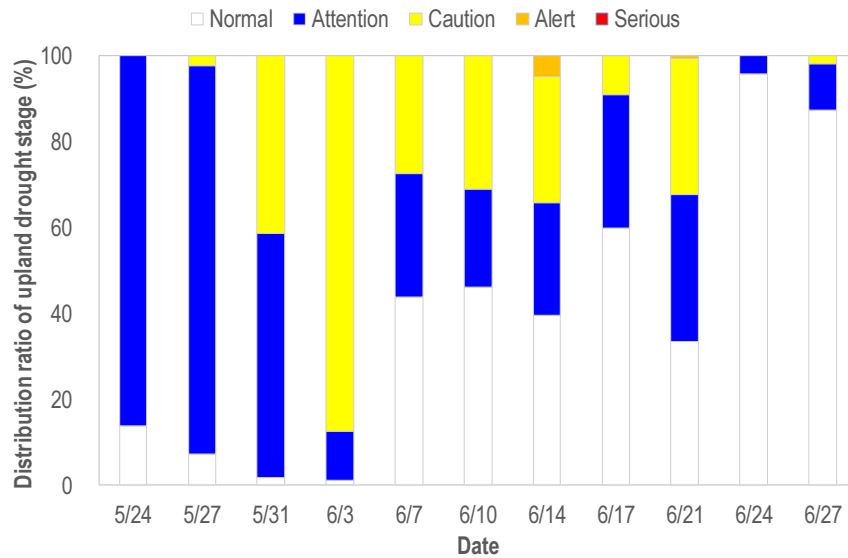


Fig. 2. The distribution ratio of upland drought stage based on soil available water content from May 24 to June 27, 2022 in Korea.

Conclusions

본 연구에서는 발가뭍에 대비하기 위하여 토양, 기상, 작물 자료를 통합하여 토양유효수분율을 평가할 수 있는 모형을 개발하여 제시하였다. 토양유효수분율은 총유효수분량 중 현재 유효수분량의 비율을 백분율 (%)로 표현한 값이다. 총유효수분량은 포장용수량에서 영구위조점을 제외한 값으로 산정할 수 있으며, 현재 유효수분량은 현 토양수분량에서 영구위조점을 뺀 값으로 산정한다. 본 연구의 모형에서 총유효수분량은 토심 60 cm 기준이며, 현 토양수분량은 전일 유효수분량과 유효강우량을 더한 후 실증발산량을 뺀 값으로 산정한다. 실증발산량은 기준증발산량과 작물 계수, 수분 스트레스 계수를 곱한 값으로 산정하였으며, 기준증발산량은 FAO Penman-Monteith 공식을 활용하였다. 작물계수는 콩을 기준작물로 설정하고, 수분스트레스 계수는 토양 수분조건에 따른 함수로 평가할 수 있다. 이렇게 설정된 인자들을 통합하여 지역별 토양유효수분율을 산정한 후 발가뭍을 평가할 수 있다. 발가뭍의 정도는 5단계로 나누는데 토양유효수분율 60% 이상을 ‘정상’, 15% 감소함에 따라 관심, 주의, 경계, 심각으로 설정하였다. 본 연구에서 개발된 토양유효수분율 기준 발가뭍 평가 모형을 활용한 발가뭍 자료를 전국 167개 시군에 대하여 영농기인 4월부터 10월까지 주 1회, 가뭄기엔 주 2회 제공하였다.

Acknowledgement

This study was financially supported by a grant from the research project (No. PJ014813) 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.
- ASI. 1992. Introduction of Korean soil. Agricultural Science Institute, Suwon, Korea.
- Bae, S.J., H.W. Chung, and J.Y. Choi. 1999. Agricultural drought analysis using soil water balance model and geographic information system. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 41(6):33-43.
- Eltahir, E.A.B. 1998. A soil moisture-rainfall feedback mechanism: 1. Theory and observations. *Water Resour. Res.* 34(4):765-776.
- Eom, K.C., K.C. Song, K.S. Ryu, Y.K. Sonn, and S.E. Lee. 1995. Model equations to estimate the soil water characteristics curve using scaling factor. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 28(3):227-232.
- Hong, E.M., J.Y. Choi, S.H. Yoo, and W.H. Nam. 2012. Analysis of soil moisture characteristics in nut pine forest about seasons and soil layers. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 54(4):105-114.
- Hong, E.M., W.H. Nam, and J.Y. Choi. 2015a. Climate change impacts on agricultural drought for major upland crops using soil moisture model -Focused on the Jeollanam-do-. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 57(3):65-76.
- Hong, M.K., S.H. Lee, J.Y. Choi, S.H. Lee, and S.J. Lee. 2015b. Estimation of soil moisture and irrigation requirement of upland using soil moisture model applied WRF meteorological data. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 57(6):173-183.
- Jang, Y.B., I.H. Jang, and Y.C. Choe. 2020. Prediction of soil moisture with open source weather data and machine learning algorithms. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 22(1):1-12.
- Jeon, M.G., W.H. Nam, H.J. Lee, E.M. Hong, S.A. Hwang, and S.O. Hur. 2021. Drought risk assessment for upland crops using satellite-derived evapotranspiration and soil available water capacity. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.* 21(1):25-33.
- Jung, K.H., S.O. Hur, S.G. Ha, C.W. Park, and H.H. Lee. 2007. Runoff pattern in upland soils with various soil texture and slope at torrential rainfall events. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 40(3):208-213.
- Kim, O.K., J.Y. Choi, M.W. Jang, S.H. Yoo, W.H. Nam, J.H. Lee, and J.K. Noh. 2006. Watershed scale drought assessment using soil moisture index. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 48(6):3-13.
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2016. <https://kosis.kr/index/index.do>.
- Mun, Y.S., W.H. Nam, M.G. Jeon, H.J. Kim, K. Kang, J.C. Lee, T.H. Ha, and K.Y. Lee. 2020. Evaluation of regional drought vulnerability assessment based on agricultural water and reservoirs. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 62(2):97-109.
- Nam, W.H., E.M. Hong, M.W. Jang, and J.Y. Choi. 2014. Projection of consumptive use and irrigation water for major upland crops using soil moisture model under climate change. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 56(5):77-87.
- Nam, W.H., J.Y. Choi, S.H. Yoo, and B.A. Engel. 2012. A real-time online drought broadcast system for monitoring soil moisture index. *KSCE J. Civ. Eng.* 16(3):357-365.
- Narasimhan, B. and R. Srinivasan, 2005. Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agric. For. Meteorol.* 133:69-88.

- NAS. 2018. Annual report 2017 monitoring project on agro-environmental quality, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju, Korea.
- Otkin, J.A., M.C. Anderson, C. Hain, and M. Svoboda. 2015. Using temporal changes in drought indices to generate probabilistic drought intensification forecasts. *J. Hydrometeorol.* 16:88-105.
- Shin, H.J., J.Y. Lee, S.M. Jo, S.M. Jeon, M.S. Kim, S.S. Cha, and C.G. Park. 2019. Vulnerability evaluation of ground-water well efficiency and capacity in drought vulnerable areas. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 61(6):41-53.
- Yoon, D.H., W.H. Nam, H.J. Lee, E.M. Hong, and T. Kim. 2020. Drought hazard assessment using MODIS-based evaporative stress index (ESI) and ROC analysis. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 62(3):51-61.