

집수역 내 농업가뭄 감시를 위한 가뭄지수 개발

김대준¹ · 문경환² · 윤진일^{1*}

¹경희대학교 생명과학대학, ²국립원예특작과학원 온난화대응농업연구센터
(2014년 9월 27일 접수; 2014년 11월 7일 수정; 2014년 11월 9일 수락)

Drought Index Development for Agricultural Drought Monitoring in a Catchment

Dae-jun Kim¹, Kyung-hwan Moon² and Jin I. Yun^{1*}

¹Agricultural Climatology Lab., College of Life Sciences, Kyung Hee University, Yongin 446-701, Korea

²Natinal Institute of Horticultural & Herbal Science, RDA, Jeju 690-150, Korea

(Received September 27, 2014; Revised November 7, 2014; Accepted November 9, 2014)

ABSTRACT

Drought index can be used to implement an early warning system for drought and to operate a drought monitoring service. In this study, an approach was examined to determine agricultural drought index (ADI) at high spatial resolution, e.g., 270 m. The value of ADI was calculated based on soil water balance between supply and demand of water. Water supply is calculated by the cumulative effective precipitation with the application of the weight to the precipitation from two months ago. Water demand is derived from the actual evapotranspiration, which was calculated applying a crop coefficient to the reference evapotranspiration. The amount of surface runoff on a given soil type was also used to calculate soil residual moisture. Presence of drought was determined based on the probability distribution in the given area. In order to assess the reliability of this index, the amount of residual moisture, which represents severity of drought, was compared with measurements of soil moisture at three experimental between July 2012 and December 2013. As a result, the ADI had greater correlation with measured soil moisture compared with the standardized precipitation index, which suggested that the ADI would be useful for drought warning services.

Key words: Agricultural drought index, Effective precipitation, Evapotranspiration, Runoff, Soil moisture

I. 서 론

미국 대기해양청(NOAA)에서 가뭄을 20세기에 관측된 가장 큰 자연재해 중 하나로 선정하고, 21세기에는 기후변화에 따른 기온, 강수량의 연차변이 증가가 가뭄피해 급증으로 이어질 것으로 전망함에 따라 가뭄대책 마련이 전세계적인 관심사안이 되고 있다 (Trenberth *et al.*, 2004). 가뭄이란 평균에 비해 부족

한 물수지를 표현하는 용어이며 그 성격에 따라 기상학적, 농업적, 수문학적, 사회·경제적 가뭄 등으로 분류한다. 그 중 농업적 가뭄이라 함은 농작물, 산림, 초지 등에 필요한 토양수분의 부족상태로서 식물의 생육에 영향을 미칠 수 있는 가뭄을 뜻한다. 고대로부터 농업부문의 가뭄대책은 매우 다양하게 발달해 왔지만, 효과적인 가뭄대책을 위한 선결조건은 가뭄 진행상황을 미리 파악하여 피해를 입기 전에 충분한 시간을



* Corresponding Author : Jin I. Yun
(jiyun@khu.ac.kr)

(2006)의 값을 적용하였으며, γ 은 건습계상수(kPa·°C⁻¹), T 는 2m 높이의 일 평균기온(°C), U_2 는 2m 높이의 평균 풍속(ms⁻¹), e_s 는 포화수증기압(kPa), e_a 는 실제 수증기압(kPa), Δ 는 포화수증기압의 온도에 따른 기울기이다. 각 요소별 구체적인 계산방법은 Allen *et al.* (1998)을 따랐다.

식 (1)에 의해 기준증발산량을 매일 계산하여 일주일 치를 합산하고 여기에 재배작물 및 발육단계에 따른 작물계수(K_c)를 적용하여 해당작물의 실제증발산량을 얻었다(식 2).

$$ET_c = ET_o \times K_c \tag{2}$$

작물계수는 논벼 외의 작물은 Allen *et al.*(1998)이 제시한 작물분류표에서 연구대상지역의 작목과 유사한 식생을 찾아 지목 별 대표 작물계수로 설정하였다. 적용기간은 파종 후 발아까지의 초기단계, 발아 후 개화까지의 중간단계, 개화 이후 수확까지의 후기단계로 구분하였다. 논외의 경우 30년간 논벼의 작물소비수량 실측자료를 근거로 파종 후 120일까지 10일 단위로 산정한 Yoo *et al.*(2006)의 작물계수 값을 사용하였다.

2.1.3. 지면유출량의 계산

강수량이 지표면에 도달하면 일부는 증발하고, 일부는 토양으로 흡수된다. 미처 흡수되지 못한 초과수분은 지표면을 흘러 유출되는데, 본 연구에서는 유출량 추정을 위해 미국 토양 보존국(SCS, U.S. Soil Conservation Service)에서 개발한 유출곡선지수(Runoff Curve Number)를 사용하였다. CN값은 강우-유출관계를 해석하여 토지 이용도, 토양의 성질에 따라 지표수 유출의 잠재력을 표시한다(Morel-Seytoux and Verdin, 1982; Shin and Kim, 2000).

CN값은 1에서 100까지의 범위를 가지고 있으며, 토양의 최대 흡수량(S)에 반비례한다. SCS에서 제시하고 있는 CN 값은 수문학적 토양군(hydrologic soil group)과 토지이용에 따라 분류되는데(McCuen, 1982; Ha *et al.*, 2009), 유출량(Q)은 CN값을 이용하여 다음 식에 의해 계산된다.

$$Q = \frac{EP^2}{EP+S} \tag{3}$$

여기서 P는 유효강수량, S는 토양의 최대흡수량으로 다음 식에 의해 산정한다.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \text{ (mm)} \tag{4}$$

2.1.4. 가뭄지수 계산

토양 중 물의 공급과 수요 간 물수지는 유효강수량에서 증발산량과 지면유출량을 뺀 잔류수분량(EW)이 되며 다음 식으로 표현된다.

$$EW = EP - ET_c - Q \tag{5}$$

여기서 EP는 유효강수량, ET_c는 작물증발산, Q는 지면유출량이다. 잔류수분량의 주 단위 분포는 왼쪽으로 치우쳐진 Gamma 분포와 비슷한데, 이를 중 모양의 정규분포로 변환하기 위해서는 자연대수를 취하면 된다(Hillel, 1998). 잔류수분량의 자연대수값을 ‘잔류수분지수’(EW_L)라 칭하고 기후학적 평년의 평균(avg)과 표준편차(sd)를 계산하였다.

$$EW_L = \log_e(EW) \tag{6}$$

기후학적 평년의 52개 주에 대해 각각 잔류수분지수를 계산하여 표준편차로 나누면 평균이 0, 표준편차가 1인 표준정규분포에 근접한다. 임의연도 임의 주치의 잔류수분지수를 계산하여 평년 평균과의 편차를 얻고 이를 표준화시키면 평년 정규분포 상에서 상대적인 위치(Z, 발생 확률)를 알 수 있다. 이것은 기후학적 평년 대비 해당 주의 토양수분 과부족을 판단하는 지표로 쓸 수 있다.

$$Z = (EW_L - avg) / sd \tag{7}$$

예를 들어 표준편차 1배 이내 범위에 속한다면 정상적인 토양수분상태이지만, 2배를 벗어나면 30년에 한 번 정도의 이변으로 간주하며, 3배를 넘게 되면 100년에 1회 정도의 희귀한 가뭄으로 본다. 이를 기준으로 농업가뭄지수(Agricultural Drought Index, ADI)를 4단계로 분류하였다(Table 2).

2.2. 기존 가뭄지수와 성능비교

기상청에서는 최근 3개월 동안 강수량의 경시분포를

Table 2. Description of the agricultural drought index

Index	Drought Stage (DS)	Description
< -3	DS3	Extreme drought
-3 ~ -2	DS2	Severe drought
-2 ~ -1	DS1	Mild drought
-1 ~ 0	DS0	Normal

이용하여 계산하는 표준강수지수(SPI, Standardized Precipitation Index)를 대표 가뭄지수 중 하나로 선정하여 수요자에게 제공하고 있다. SPI는 특정지역에 강우자료가 충분할 경우 지속기간(1, 3, 6, 9, 12개월 등)을 설정하여 계산할 수 있는데(Mckee *et al.*, 1993), 평년의 누적 강수량 대비 현재 강수량에 의해 상대적인 가뭄 정도를 파악한다. 따라서 본 연구에서 개발한 농업가뭄지수(ADI)의 신뢰성을 검증하기 위한 기준지수로서 적당하다.

SPI계산은 Abromowitz and Stegun(1964)의 방법을 따라 다음 식에 의해 수행하였다.

$$SPI = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \text{ for } 0 < H(x) \leq 0.5$$

$$SPI = +\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \text{ for } 0.5 < H(x) \leq 1.0$$
(8)

여기서

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{H(x)}\right)} \text{ for } 0 < H(x) \leq 0.5$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{1.0 - H(x)}\right)} \text{ for } 0.5 < H(x) \leq 1.0$$
(9)

이며, $H(x)$ 는 누가확률로서 감마함수 $G(x)$ 로부터

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (10)$$

로 계산되는데 q 는 관측기간(m)에 대한 강수일(m)의 비율이다. C_0 는 2.515517, C_1 은 0.802583, C_2 는 0.010328, d_1 은 1.432788, d_2 는 0.189267, d_3 는 0.001308이다.

신뢰성 비교를 위해서는 두 가지 방법에 의해 추정된 가뭄 정도가 실제 토양 중 식물가용수분과 어떤 관계에 있는지 알아야 한다. 식물가용수분은 토성만 알려지면 토양수분함량으로 대체할 수 있지만, 가뭄지수(무명수)와 토양수분함량(단위 %) 간 직접비교는 어렵다. 이를 해결하기 위해 SPI의 경우 3개월 누적 강수량을 90으로 나눈 값을 사용하고, ADI의 경우 잔류수분량의 자연대수(잔류수분지수)를 사용하여 관측된 토양수분함량과 비교하는 방안을 채택하였다.

토양수분함량을 장기간 관측하기 위해 경남 하동군 악양집수역 내 실험포장을 운영하였다. 악양집수역은 면적이 50km²에 불과하지만, 해발고도가 6m에서

1,117m까지 편차가 매우 크고 다양한 지형면을 갖고 있어 강수분포가 불균일한 지역이다. 또한 집수역 내에서 논, 밭, 과원, 산림 등 다양한 용도로 토지가 이용되고 있어 작물의 종류에 따른 증발산 정도와 지형 및 토양에 따른 지면유출의 공간분포를 살펴보기에 적합한 곳이다. 해발고도 10, 50, 250m에 해당하는 세 포장(‘햇차원’; Site A, ‘상명농장’; Site B, ‘자연을 담은사람들’; Site C)을 선정하였는데, 토성은 각각 사양토(점토 10, 미사 20, 모래 70), 양토(점토 20, 미사 40, 모래 40), 미사질식양토(점토 20, 미사 60, 모래 10)로서 깊이 10cm에 토양수분 센서(EC-5, Decagon Device Inc. USA)를 2개씩 설치하여 2012년 7월1일부터 2013년 12월 31일까지 측정하였다. 분석 시에는 두 개의 측정값을 평균하여 각 포장의 대표값으로 삼았다. 같은 기간 중 포장 기상관측을 위해 무인기상관측장비(Automatic Weather Station, AWS)를 설치하여 기온, 상대습도, 일사량, 풍향, 풍속, 강수량을 1분 간격으로 측정하였다.

2.3. 농업가뭄지수의 적용

농업가뭄지수의 필지단위 적용을 위하여 전술한 경상남도 하동군 악양집수역을 대상지역으로 선정하였다. 이 지역에 가뭄이 심했던 2013년 9월 마지막 주(39주차)부터 해갈되었던 10월 셋째 주(42주차)까지 ADI의 공간분포를 필지별 구분이 가능한 사방 270m 격자 단위로 제작하고자 하였다.

집수역 내 필지단위 농업가뭄지수 산정을 위해서는 먼저 필지별 구분이 가능한 상세 기상자료는 물론 수치지형도, 토지이용도, 토양도 등 고해상도 공간자료가 필요하다. 유효강수량 계산에 필요한 고해상도 일 강수량의 경우 Kim and Yun(2013)의 방법을 이용하였는데, 이 방법은 기상청의 실시간 중규모 해상도 산출물(KLAPS)를 기반으로 강수레이더 자료와 PRISM 모형에 의해 2단계에 걸쳐 270m 해상도로 강수량을 추정한다. 기준증발산량 계산에 필요한 일 최고기온, 최저기온, 일사량, 풍속, 수증기압 등은 Yun *et al.*(2013)의 방법에 의해 30m 해상도로 제작하였다.

지면유출량 추정을 위한 토지이용도는 환경부 사이트(www.egis.go.kr)에서 수집하여 벼논, 과원 및 밭, 산림, 초지 등으로 재분류하였다. 토양도는 한국수자원공사 사이트(www.wamis.go.kr)에서 수집하여 각 토양통을 SCS의 수문학적 토양군(A, B, C, D)으로 분류

하였다. 토양군의 토지이용도가 결정되면 CN값이 부여된다.

농업가뭄지수의 평년 기준값(정규분포)은 인근 진주와 순천기상대 기후자료(1971-2000)를 토대로 공간내삽(IDW)에 의해 산정하였는데, 최종적으로 사방 270m 격자 해상도의 주별 평균 및 편차를 얻었다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 농업가뭄지수(ADI)의 성능

농업가뭄의 척도는 식물가용 토양수분이다. 전술한 대로 SPI와 ADI 모두 산출 방법이 평년과 비교한 가뭄의 정도를 무명수로 나타낸 것으로서, 토양 중 수분함량을 %로 표현하는 토양수분함량과는 직접적인 비교가 곤란하다. 대신 2012년 7월부터 2013년 12월

까지 실험기간 중 SPI의 3개월 누적 강수량을 90일로 나눈 값과, ADI의 잔류수분지수 값을 실제 측정된 토양수분함량(%)에 회귀시켜 결정계수를 비교하였다. 그 결과 세 지점 모두 누적 강수량보다는 잔류수분지수가 토양수분함량과 더 높은 상관을 보였다(Fig. 1). 세 지점 가운데 다른 곳보다 점토와 미사함량이 높은 ‘자연을 닮은 사람들’인 Site C 지점의 경우 잔류수분지수(ADI)와의 상관도가 가장 낮았지만 누적강수량(SPI)과의 상관은 가장 높았다. 토성에 따른 가뭄지수의 해석에 추가적인 연구가 필요하겠지만, 농업적 가뭄과 직접 관련이 있는 토양수분의 경우 단순히 강수량 값을 이용하는 표준강수지수에 비해 증발산과 유출량을 고려한 농업가뭄지수와 더 밀접한 관계가 있음이 확인된 셈이다.

세 실험포장 중 해발고도 250m 남동사면에 위치한

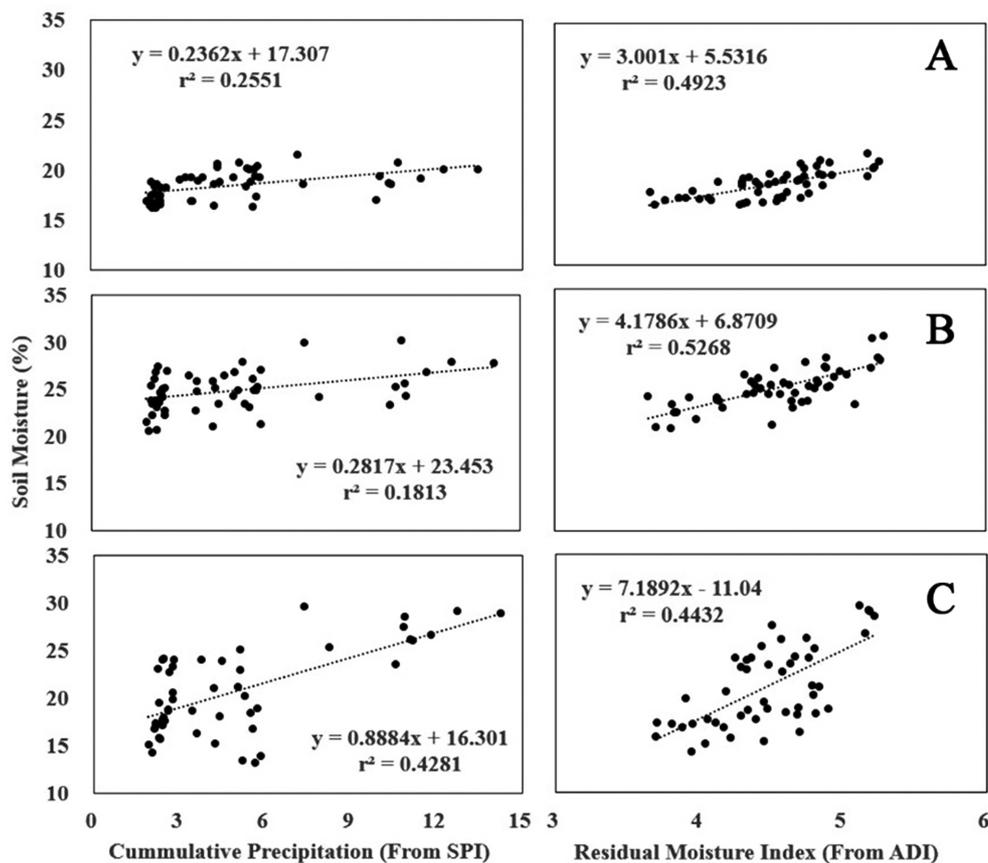


Fig. 1. Relationship between the drought index at the three experimental sites and the measured soil moisture content. Left panels are based on the 3 month cumulative precipitation from SPI, and right panels are based on the residual moisture index from ADI.

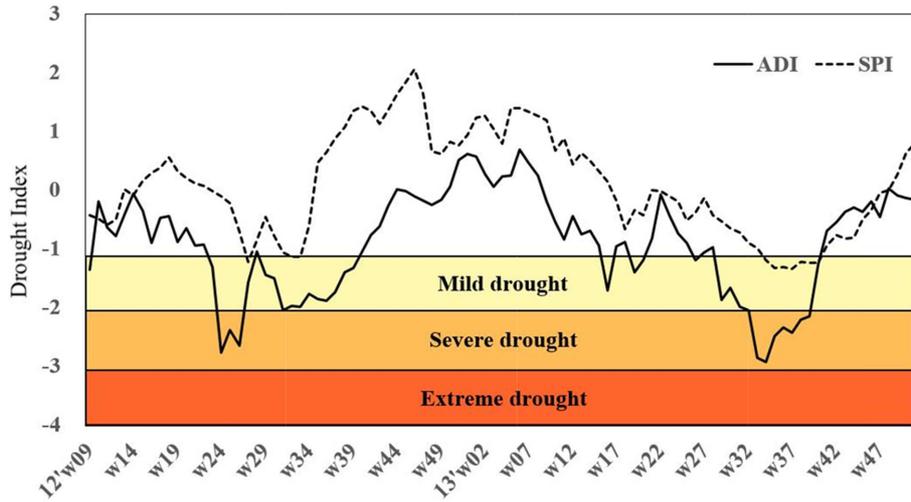


Fig. 2. Comparison of two drought indices (SPI and ADI) with respect to time course change in the progression of drought during the study period (2012~2013) at site A (in Fig. 1).

‘햇차원’(토성 사양토)을 대상으로 실험기간 동안의 SPI와 ADI를 계산하여 비교한 것이 Fig. 2이다. 두 가뭄지수 모두 시간경과에 따른 가뭄의 추이를 표현하는 양상은 유사하였지만 가뭄의 심각성을 나타내는 데는 상당한 차이를 보였다. ADI의 경우 2012년 23~29주차, 2013년 32~40주차에 ‘심한 가뭄’을 나타내었지만, SPI의 경우 실험기간 동안 ‘심한 가뭄’으로 표현된 주차는 한 차례도 없었다. 이 시기에 실제로 악양지역 여러 농가에서 가뭄으로 인한 어려움이 보고

되었고(‘햇차원’, ‘배달농원’, ‘상명농장’을 포함한 다수의 현지농가 면담), 2012년 제주도는 5, 6월 강수량이 32년만에 가장 적었고, 2013년에는 90년만의 가뭄으로 인해 노지감귤, 콩, 수박 등의 작물피해로 약 2,000억원의 피해액이 보고된 바 있다. 경기지역에서 2013년에 평년의 10% 미만의 강수량만이 관측되는 등 실험기간 내 전국적으로 기록적인 가뭄이 보고되었다(기상청, 2013). 이러한 간접적인 증거만으로도 SPI에 비해 ADI가 2012년과 2013년의 가뭄 정도를 더

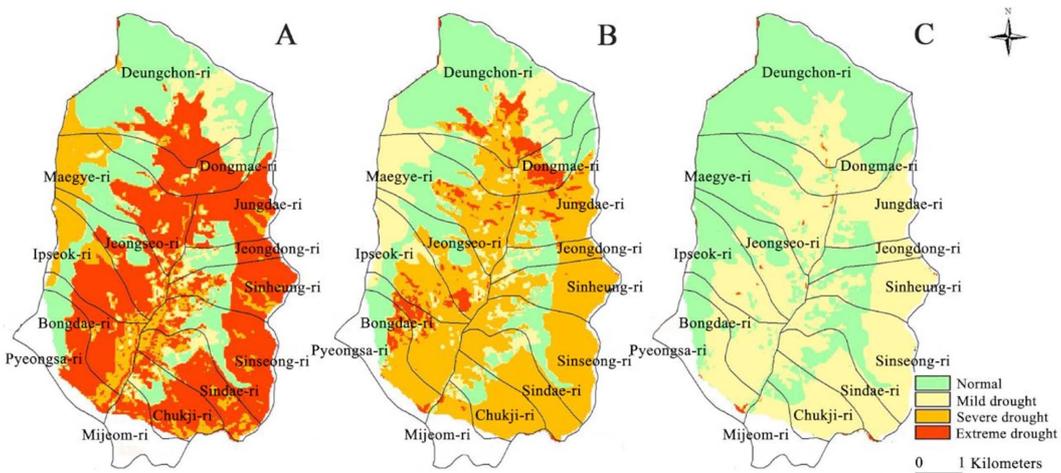


Fig. 3. Spatio-temporal variation of the agricultural drought index (ADI) over the experimental watershed projected from the climatic and spatial data in 2013 (A: 39th week, B: 40th week, C: 42nd week).

Table 3. Drought indices that have been reported to quantify agricultural drought (Adapted from Woli *et al.*, 2012).

Drought indicator	Reference	Time step	S ⁺	P*	A [§]	G [¶]
Crop Moisture Index	Palmer(1968)	weekly	O	X	O	O
Crop-Specific Drought Index	Meyer <i>et al.</i> (1993)	seasonal	O	O	O	X
Crop Water Stress Index	Idso <i>et al.</i> (1981)	instantaneous	X	X	O	X
Evapotranspiration Deficit Index	Narasimhan and Srinivasan(2005)	weekly	O	O	O	X
Keetch and Byram Drought Index	Keetch and Byram(1968)	daily	X	X	O	O
Lawn and Garden Moisture Index	Christy(2004)	daily	X	X	O	O
Palmer Drought Severity Index	Palmer(1965)	monthly	O	X	O	O
Palmer Z Index	Palmer(1965)	monthly	O	X	O	O
Soil Moisture Deficit Index	Narasimhan and Srinivasan(2005)	weekly	O	O	O	X
Stress Day Index	Hiler and Clark(1971)	daily	O	O	O	X
Standardized Precipitation Index	Mckee <i>et al.</i> (1993)	monthly	X	X	O	O
Water Requirement Satisfaction Index	Frere and Popov(1986)	dacadal	O	O	O	X
Water stress index of the DSSAT [#]	Jones <i>et al.</i> (2003)	daily	O	O	O	X

+Soil water balance based

*Plant physiology based

§Atmosphere based

¶Generic, not requiring crop-specific parameters.

#DSSAT CERES-Maize model (Jones and Kiniry, 1986)

잘 반영하였다고 판단된다.

3.2. 필지단위 농업가뭄 감시

연구대상지역의 상세한 기상 및 공간자료를 이용하여 가뭄이 극심했던 2013년 9월 마지막 주차(39주차)부터 해결되었던 10월 셋째 주(42주차)까지 ADI의 공간분포를 제작하였다(Fig. 3). 분포도를 보면 39주차에는 산림지대 일부를 제외하고 ‘매우 심한 가뭄’을 뜻하는 붉은 색이 대부분이지만, 9월 29일부터 5일간 지속된 강수에 의해 10월 첫째 주(40주차)에 ‘매우 심한 가뭄’(붉은색)이 한 단계 아래인 ‘심한 가뭄’(오렌지색)으로 완화된 것을 확인 할 수 있다. 또한 10월 9~10일에도 강수가 관측되었는데, 10월 셋째 주(42주차)에는 ‘매우 심한 가뭄’이나, ‘심한 가뭄’ 지역은 대부분 사라졌고 ‘약한 가뭄’ 정도로 완화되었음을 확인 할 수 있다.

전반적인 가뭄분포양상은 작물이 재배되고 있는 논밭에 비해 산림지역의 가뭄이 덜한 것으로 표현되며, 같은 산림지역이라도 하천을 중심으로 동향사면이 많은 서쪽 산록에 비해 서향사면이 많은 동쪽 산록에서 가뭄이 심하다. 이는 서향사면의 경우 동향사면에 비해 낮시간대 기온이 높기 때문에 증발산량이 많았기 때문으로 추정된다.

3.3. 고찰

농업가뭄을 정량적으로 표현하고 감시하기 위해 지금까지 많은 가뭄지수가 개발되었다(Table 3). 이들은 설계개념, 계산을 위한 입력변수, 주된 용도, 복잡성, 범용성, 시공간 해상도 등 여러 측면에서 서로 다른데, 각각은 나름대로의 목적과 특징을 갖도록 만들어졌다(Woli *et al.*, 2012). 따라서 특정 가뭄지수가 모든 형태의 농업에 적용될 수는 없으며, 외국에서 많이 사용한다고 하여 국내농업에 그대로 적용해서 성공하리란 보장도 없다. 이번 연구에서 제시하는 농업가뭄지수 역시 우리 농업환경에 적용 가능한 여러 기술적 방안 중 하나로 받아들여야 할 것이다. 하지만 현존 가뭄감시체계에서는 기대할 수 없는 몇 가지 장점을 갖고 있는 것은 분명하다.

현재 가뭄진행상황을 감시, 평가하여 일별가뭄진단 정보를 제공하는 시스템이 한국수자원공사, 기상청 등에 구축되어 있기는 하지만, 그 적용 범위가 매우 조방적이어서 국지적인 가뭄상황을 제대로 반영하지 못한다. 본 연구에서 개발한 가뭄지수는 집수역 별로 쉽게 제작할 수 있는 전자기후도와 결합하여 필지단위의 고해상도 감시가 가능하다. 또한 계산 편의 상 일주일 간격으로 제작했지만 2013년 9월의 사례에서 볼 수 있듯이 심한 가뭄이 비가 내리면서 해결되는 과정을

일 기상자료에 의해 하루 간격으로 보여줄 수 있다. 즉 시공간 해상도 측면에서 지금까지 국내에서 발표된 어떤 가뭄지수보다도 정교하다는 특징을 갖는다. 농업 가뭄지수의 설계개념이 비록 식물생리학에 기반을 두지는 않았지만, 토양수분 측정값과의 비교에서 확인한 바와 같이 기존의 대표적인 가뭄지수에 비해 작물가용 수분에 더욱 근접한 예측을 함으로써 농업가뭄의 감시 지표로서 높은 신뢰성을 갖는다.

하지만 현재 기술수준에서 농업가뭄지수의 효용은 과거의 기상자료를 이용하여 현재의 가뭄정도를 파악하는 정도, 즉 감시기능에 국한된다. 미래의 가뭄 완화 또는 심화 정도를 예측할 수 없는 가장 큰 이유는 중기예보의 경우 단기예보(동네예보)에서 제공하는 강수분포 예측자료가 없으며, 필지규모 상세화에 필수적인 레이더강수자료는 아예 예보에서 빠져있기 때문이다. 하지만 현재 상태에서도 본 연구에서 개발한 농업 가뭄지수는 작물 및 토양의 종류에 따른 세밀한 가뭄 진단과 가뭄진단에 따른 물 관리 정보의 제공, 농업가뭄의 공간적인 분포에 대한 연구의 이용성을 증대시킬 것으로 기대된다. 앞으로 기상청의 강수예보기술이 발전함에 따라 농업가뭄의 감시는 물론 해갈 또는 가뭄의 심화를 예측하는데도 활용될 수 있을 것이다.

적 요

필지 단위 가뭄상황을 한 주 간격으로 감시함으로써 한밭피해의 조기경보체계 개발과 현업서비스 구축에 기여할 목적으로 농업가뭄지수를 개발하였다. 이 지수는 토양의 물수지를 기반으로 설계되었는데, 물의 공급은 2개월 전 강수량부터 가중치를 적용하여 누적시킨 유효강수량에 의해, 물의 수요는 기준증발산에 작물계수를 적용한 실제증발산과 토양 종류에 따른 지면 유출량에 의해 산정하여 토양잔류수분을 얻는다. 잔류수분량의 자연대수를 기반으로 해당 지역 기후학적 평년의 정규확률분포를 제작한 다음 임의연도, 임의기간 잔류수분량의 정규확률분포 상 위치를 검색하여 가뭄 여부를 판단한다. 이 지수의 신뢰도 평가를 위해 실험 포장 세 곳을 대상으로 2012년 7월부터 2013년 12월까지 잔류수분량을 계산하여 실측 토양수분과 비교한 결과 널리 쓰이는 표준강수지수에 비해 훨씬 높은 상관을 보였으며, 실제 가뭄과 더욱 근접한 경보를 발령할 수 있었다. 고해상도 전자기후도를 이용하여 소

규모 시험유역에 대해 농업가뭄지수의 공간분포를 270m 해상도로 제작함으로써 필지단위 가뭄감시 가능성을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 국립농업과학원 공동연구사업(과제번호: PJ01000705)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Abromowitz, M., and I. A. Stegun, 1964: *Handbook of Mathematical Functions: With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. National Bureau of Standards Applied Mathematics Series **55**. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.1046 pp.
- Allen, R. G., L. S. Peretira, D. Raes, and M. Smith, 1998: *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO irrigation and drainage paper **56**, UN-FAO, Rome, Italy.
- Byun, H. R., and D. A. Wilhite, 1999: Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate* **12**, 2747-2756.
- Christy, J., 2004: The lawn & garden moisture index. (http://nssc.uah.edu/aosc/lawn_garden2.html), (2011.12.17)
- Frere, M., and G. Popov, 1986: *Early Agro-Meteorological Crop Yield Assessment*. FAO Plant Production and Protection Paper 73. FAO, Rome.
- Ha, K. C., W. B. Park, and D. C. Moon, 2009: Estimation of direct runoff variation according to land use changes in Jeju island. *Economic and Environmental Geology* **42**(4), 343-356. (in Korean with English abstract)
- Hiler, E. A., and R. N. Clark, 1971: Stress day index to characterize effects of water stress on crop yields. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **14**(4), 757-761.
- Hillel, D., 1998: *Environmental Soil Physics*. Academic Pr. 660pp.
- Hur, S. O., K. H. Jung, S. K. Ha, and J. G. Kim, 2006: Evaluation of meteorological elements used for reference evapotranspiration calculation of FAO Penman-Monteith model. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **39**(5), 274-279. (in Korean with English abstract)
- Idso, S. B., R. D. Jackson, P. J. Pinter, Jr, R. J. Reginato, and J. L. Hatfield, 1981: Normalizing the stress-degree day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology* **24**, 45-55. Doi: 10.1016/0002-1571(81)90032-7
- Jones, C. A., and J. R. Kiniry, 1986: *CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development*. Texas A&M Univ. Press, College Station.
- Jones, J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W.

- D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijssman, and J. T. Ritchie, 2003: The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* **18**, 235-265. Doi: 10.1016/S1161-0301(02)00107-7
- Keetch, J. J., and G. M. Byram, 1968: A drought index for forest fire control. U.S.D.A. Forest Service Research Paper SE-38. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station. 35 p.
- Kim, D. J., and J. I. Yun, 2013: Improving usage of the Korea Meteorological Administration's digital forecasts in agriculture: 2. Refining the distribution of precipitation amount. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **15**(3), 171-177. (in Korean with English abstract)
- Meyer, S. J., K. G. Hubbard, and D. A. Wihite, 1993: A crop-specific drought index for corn: I. Model development and validation. *Agronomy Journal* **85**, 396-399. Doi: 10.2134/agronj1993.00021962008500020041x
- McCuen, R. H., 1982: *A Guide to Hydrologic Analysis Using SCS Methods*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 110p.
- McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scale. Preprints, *8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA, January 17-22, pp. 179-184.
- Morel-Seytoux, H. J., and J. P. Verdin, 1982: Correspondence between the SCS CN and Infiltration Parameters. *Advance in Irrigation and Drainage*, 308-319.
- Nasimhan, B., and R. Srinivasan, 2005: Development and evaluation of soil moisture deficit index and evapotranspiration deficit index for agricultural drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology* **133**, 69-88. Doi: 10.1016/j.agrformet.2005.07.012
- Palmer, W. C., 1965: *Meteorological Drought*. Research Paper No. 45. U.S. Weather Bureau. Washington, DC.
- Palmer, W. C., 1968: Keeping track of moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index. *Weatherwise* **21**, 156-161. Doi: 10.1080/00431672.1968.9932814
- Shin, K. J., and Y. J. Kim, 2000: Application of GIS technique for direct runoff estimation. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography* **18**(2), 199-209. (in Korean with English abstract)
- Trenberth, K., J. Overpeck, and S. Solomon, 2004: Exploring drought and its implications for the future. *Eos, Transactions American Geophysical Union* **85**(3), 27p.
- Wöil, P., J. W. Jones, K. T. Ingram, and C. W. Fraisse, 2012: Agricultural reference index for drought (ARID). *Agronomy Journal* **104**(2), 287-300.
- Yoo, S. H., J. Y. Choi, and M. W. Jang, 2006: Estimation of paddy rice crop coefficients for Penman-Monteith and FAO modified Penman Method. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* **48**, 13-23. (in Korean with English abstract)
- Yun, J. I., S. O. Kim, J. H. Kim, and D. J. Kim, 2013: User-specific agrometeorological service to local farming community: a case study. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **15**(4), 63-73. (in Korean with English Abstract)
- 기상청, 2013: 2012년 이상기후보고서, 12-21.
- 한국수자원공사 www.wamis.go.kr (2014.09.01)
- 환경부 www.egis.go.kr (2014.09.01)