



엽온과 기온의 차이를 이용한 노지 과수의 작물 수분 스트레스 지수 산정 간편식 개발

Development of Easy Equation for Crop Water Stress Index (CWSI_{EE}) Using the Temperature Difference between Canopy and Air ($T_c - T_a$) of Fruit Trees

최용훈^a · 이상봉^{b, †} · 김민영^c · 김영진^d · 전종길^e · 박정훈^f

Choi, Yonghun · Lee, Sangbong · Kim, Minyoung · Kim, Youngjin · Jeon, Jonggil · Park, Jeonghun

ABSTRACT

In order to calculate the Crop Water Stress Index (CWSI), it is necessary to collect weather data (air temperature, humidity, wind speed and solar radiation) and canopy temperature. However, it is not always available to have necessary data sets for CWSI calculation. Therefore, this study was aimed to develop an easy and simple CWSI equation (CWSI_{EE}) using only two data, air and canopy temperatures. Infrared sensors and weather sensors were installed on apple and peach trees and nearby a study area and every ten-minute data were collected from June to October in 2018 and 2019, respectively. A relationship between air-canopy temperature difference and CWSI was statistically analyzed and used to develop CWSI_{EE} using the three dimensional Gaussian model. The performance of CWSI_{EE} against original CWSI showed R^2 and NSE to 0.780 and 0.710 for apple trees and R^2 and NSE to 0.884 and 0.866 for peach trees. This study found that the level of crop water stress could be easily calculated using CWSI_{EE} with only air and canopy temperature data.

Keywords: Crop water stress index (CWSI); canopy temperature; air temperature; CWSI easy equation

1. 연구 배경 및 목적

작물 스트레스는 생물학적 요인과 비생물학적 요인으로 구분할 수 있다. 해충과 작물의 병 등으로 발생하는 생물학적 스트레스와 달리 비생물학적 스트레스는 물 부족, 가뭄, 냉해

그리고 고온과 같이 주변 환경의 변화 등으로 발생하고, 이를 제어하기 위해 작물은 능동적으로 내적 저항성을 증가시키거나, 생육을 조절하는 방법 등으로 작물 내부의 체계를 조절한다 (Dresselhaus and Hückelhoven, 2018; Bohnert et al., 2006; Song and Lee, 2012). 수분이 부족하게 되면 노출 시간과 강도 등에 따라 수분 응력의 비탈력화, 세포 팽압 감소, 뿌리 수분 잠재력 저하, 기공감소, 증산작용 저하, 작물 수분 장애, 뿌리 경화 등 스트레스에 대한 다양한 반응을 나타내며, 최종적으로 작물의 생산성 저하 및 품질 악화의 원인이 될 수 있다. (Woo, 2013; Limpus, 2009).

작물의 수분 상태는 토양 수분을 측정하는 것보다 여러 요인에 따른 작물의 반응을 측정하는 것이 더 민감하다 (Jones, 2010). 또한, 작물 수분 상태를 측정하는 방법은 다양한데, 측정 과정이 쉽고 신속한 적외선 온도측정을 통한 작물 수분 스트레스 지수 (Crop Water Stress Index, CWSI)를 산정하는 것이 효과적이라고 하였다 (O'Shaughnessy et al., 2012). CWSI는 수분에 대한 작물의 스트레스를 0과 1 사이의 지수로 표현하는 방법이며, 대상 작물에 손상을 주지 않는 비접촉식 측정을 통해 작물 수분 진단 및 처방에 활용하기 위한 연구들이 진행되었다 (O'Shaughnessy et al., 2012).

우리나라에서도 토마토 재배 온실에서의 엽온 변화에 관한

^a Post-doctoral Researcher, Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences (NAS), Rural Development Administration (RDA)

^b Agricultural Researcher, Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences (NAS), Rural Development Administration (RDA)

^c Agricultural Researcher, R&D Coordination Division, Research Policy Bureau, Rural Development Administration (RDA)

^d Agricultural Researcher, Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences (NAS), Rural Development Administration (RDA)

^e Agricultural Researcher, Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences (NAS), Rural Development Administration (RDA)

^f Researcher, Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences (NAS), Rural Development Administration (RDA)

† Corresponding author

Tel.: +82-63-238-4162 Fax.: +82-63-238-4145

E-mail: sblee0902@korea.kr

Received: August 31, 2020

Revised: September 18, 2020

Accepted: September 18, 2020

연구 (Nam et al., 2014), 배수 방법에 대한 광합성 특성 연구 (Choi et al., 2017), 적외선 영상 기반의 작물 병해 모니터링 연구 (Jeong et al., 2019), 관수 제어를 위한 배추의 수분 스트레스 지수 개발 연구 (Lee et al., 2019), 관개량에 따른 엽온 변화 연구 (Kim et al., 2019), CWSI 측정 간격에 관한 연구 (Choi et al., 2019), 복숭아나무의 수분 스트레스 평가 연구 (Yun et al., 2020) 등 작물 수분 스트레스를 도입하기 위한 초기 단계의 연구들이 수행되었다.

CWSI 산정을 위해서는 10시부터 15시 이전까지의 엽온과 대기 온도, 대기 습도, 일사량 그리고 풍속 등의 자료가 필요하다 (Kim et al., 2019). Choi et al. (2019)는 1분 단위 CWSI 산정과 비교하여 10분 단위 산정에서도 양질의 CWSI를 얻을 수 있다고 하였다. 또한, CWSI와 일사량 사이에 선형적인 상관관계가 나타나며, 시간에 대한 주기적 변화 패턴이 있다고 하였다 (Li et al., 2010; Agam et al., 2013). 그러나 여전히 CWSI 산정에는 데이터의 관리와 수집 그리고 분석 등 많은 노력이 필요한 것이 사실이며, 기상대의 거리가 실제 CWSI를 산정이 필요한 지점에서 먼 경우에는 온도, 습도, 일사량, 풍속의 정확한 정보를 받을 수 없는 단점이 있다. 또한 농경지 내부에서 다양한 지점에 대한 대기 온도, 대기 습도, 일사량 그리고 풍속은 기상 관측 지점의 기상과 동일한 것으로 보기 때문에 CWSI 산정에 엽온이 가장 큰 영향을 줄 것으로 기대된다.

따라서 CWSI 산정이 필요한 현장에서 엽온과 관련된 최소의 인자를 관측하여 계산할 수 있는 간편식의 개발이 필요하다고 판단되었다. 본 연구에서는 CWSI와 엽온과 대기 온도 사이의 차이 그리고 측정 시간 사이의 주기성을 확인하여, 체계적인 방법으로 CWSI를 산정 할 수 있는 간편식을 개발하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. CWSI 산정 방법

작물 잎의 온도가 대기온도보다 4~6°C 정도 높으면 증산 활동을 하지 않고, 1~4°C 정도 낮으면 증산이 최대가 된다. 증산 활동이 없을 때 작물의 수분 스트레스가 최대가 되고, 증산이 최대일 때 작물의 수분 스트레스가 최소가 되는 것을 활용하여, 0에서 1사이의 지수로 표현하는 것이 CWSI이다. 본 연구에서는 맑은 날과 흐린 날 등과 같이 서로 다른 날씨에 대한 매개 변수들을 고려할 수 있는 Jackson et al. (1981)에 의해 개발된 CWSI 공식을 적용하였다 (Eq. 1~3). CWSI는 비가 오거나, 매우 흐린 날씨에는 '0' 근처의 값으로 큰 변화가 없으므로 본 연구에서는 일사량이 15 MJ/day 이상인 날을

분석에 활용하였다.

$$CWSI = \frac{(dT - dT_l)}{(dT_u - dT_l)} \quad (1)$$

$$dT_u = r_a (R_n - G) / YC_p \quad (2)$$

$$dT_l = [r_a (R_n - G) / (Y C_p)] [K / (\sim + K) - VPD / (\sim + K)] \quad (3)$$

여기서, dT는 엽온과 대기 온도 사이의 차이 (°C), dT_u는 수분 스트레스로 인해 증산이 일어나지 않는 시간의 엽온과 대기 온도 사이의 차이 (°C), dT_l은 충분한 관개로 인해 수분 스트레스가 없을 때의 엽온과 대기온도간의 차이 (°C), r_a는 공기저항 (s/m), R_n은 순복사에너지 (W/m²), G는 토양의 비열 (W/m²), Y는 공기 밀도 (Kg/m³), C_p는 열용량 (1013 J/kg · °C), K는 건습계 상수 (kPa/°C), ~는 포화수증기압과 온도의 비 (kPa/°C) 그리고 VPD는 증기압 차 (kPa)이다.

2. CWSI 산정을 위한 모니터링 방법

전북 전주시 국립원예특작과학원의 사과나무 재배지에서 CWSI 산정을 위한 모니터링을 하였다. 사과 나무의 엽온 (Canopy Temperature, T_c)과 시험 포장의 대기 온도 (Air Temperature, T_a), 습도, 일사량, 풍속, 강우 등의 기상을 관측 하였으며, 2018년에는 7월 1일에서 9월 30일까지, 2019년에는 6월 1일에서 9월 30일까지 연구를 수행하였다 (Fig. 1).

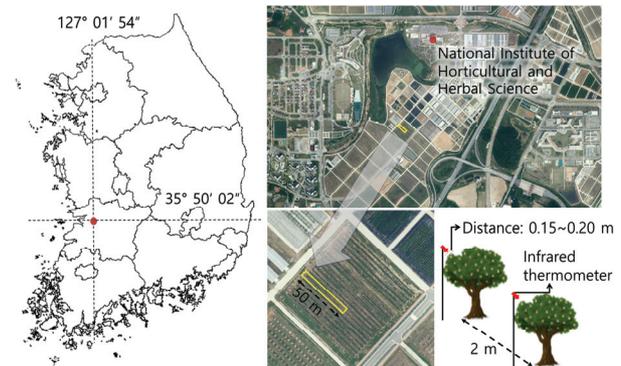


Fig. 1 Geographical description of study area

엽온은 사과나무의 상단부에 있는 잎에서 약 15~20 cm 떨어진 위치에 적외선 센서 (SI-431, Apogee, USA)를 설치하여 10분 간격으로 측정하였다. 시험 포장의 사과나무는 2 m 간격으로 사과를 1열 재배 중이며, 수세가 비슷한 사과나무를 선택하여 관측 대상으로 하였다. 2018년에는 총 5그루, 2019년에는 총 10그루의 사과나무에 대한 엽온을 측정하였다.

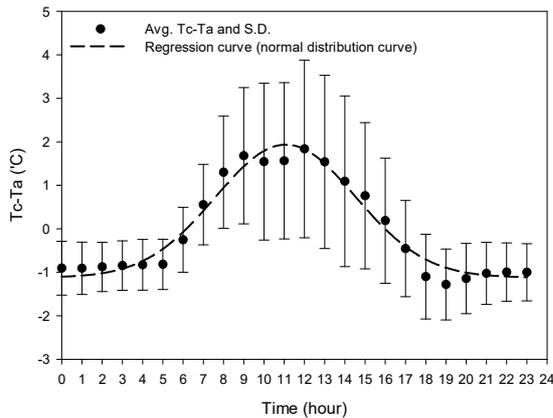
기상은 대기 온습도 센서 (SHT110, Mirae sense, Korea), 일사량계 (PYRANO-70, Mirae sense, Korea), 자기우량계 (WDR-205, Weedam, Korea) 그리고 풍속계 (AKit1, DFrobot, Korea) 등 기상 관측용 센서를 설치하여 10분 간격으로 측정하였다.

3. CWSI 간편식 개발 및 적합도 평가 방법

엽온과 관련된 최소의 인자를 관측하여 계산할 수 있는 간편식의 개발하기 위해서 CWSI 변화에 밀접한 변수를 조사하였다. Choi et al. (2019)는 CWSI와 일사량의 상관관계가 높고, 엽온과 CWSI의 상관관계보다 엽온과 대기 온도 차이가 상관관계가 더 크다고 하였다. 여기서, 일사량은 구름과 대기 먼지의 분포 그리고 계절에 따라 값의 차이는 나타나지만 맑은 날에는 시간의 흐름에 따른 일사량 세기가 태양의 고도에 따라 변화하기 때문에 El shazly (1996)와 Guo (2017)는 정규분포 모형을 활용하여 일사량을 예측하였다. 일사량과 상관관계가 좋은 CWSI와 엽온과 대기온도의 차이도 시간의 흐름에 따라 정규 분포의 형태로 표현 될 것으로 예상하였다. 따라서 각 항목에 대한 분포 및 주기성을 확인하고, 시간 (x축) 과 엽온과 대기온도의 차이 (y축) 그리고 CWSI (z축)에 대한 3차원 가우시안 분포 모형으로 표현이 가능한지 확인하여, CWSI 간편식 (CWSI easy equation, CWSI_{EE}) 개발에 활용하고자 하였다.

CWSI_{EE} 개발과 관련된 적합도 평가는 결정계수 (Coefficient of determination, r^2) 또는 Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) 지수를 사용하여 검증하였다 (Eq. 4~5).

$$r^2 = \left[\frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sqrt{(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n})(\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n})}} \right]^2 \quad (4)$$



여기서, x와 y는 각 변수에 속하는 변량이며, n은 변량의 개수이다. 또한 상관계수 (r)는 두 변수사이의 상관관계를 -1에서 1까지 지수로 표현하는 통계값이다. 상관계수가 1이면 두 변수가 완전한 양의 상관관계가 있고, -1이면 완전한 음의 상관성이 있음을 의미한다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_0^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2} \quad (5)$$

여기서, Q_0 는 관측값, \bar{Q}_0 는 관측값의 평균, Q_m 은 예측값, t는 관측 시간이다.

CWSI가 엽온과 기상자료에 대한 수학적 관계식인데, 작물과 관련된 변수가 없는 것이 특징이다. 이러한 부분으로 볼 때 연구에서 CWSI_{EE}가 다른 과수 작물에서 활용될 수 있는지 확인하는 것이 중요하다고 볼 수 있다. 따라서 같은 지역의 복숭아나무에서 측정한 자료 (2019년 6월 1일~7월 23일)를 활용하여 CWSI_{EE}의 범용성을 추가로 평가하였다.

III. 연구 결과

1. 엽온과 기온의 차이 따른 CWSI 주기성 평가

연구를 진행한 2018년과 2019년 기간에 시험포에서 10분 간격으로 측정된 기온 (T_a)과 엽온 (T_c)에 대한 1시간 평균 차이 ($T_c - T_a$)와 CWSI는 12시에서 13시 사이를 기준으로 좌우대칭인 정규곡선과 유사한 분포로 나타났다 (Fig. 2). 1시간 평균 $T_c - T_a$ 는 -1°C 에서 시작하여 완만하게 증가하다가 6시부터 급격하게 증가하기 시작하였다. 7시 무렵 0°C 를 지나 지속

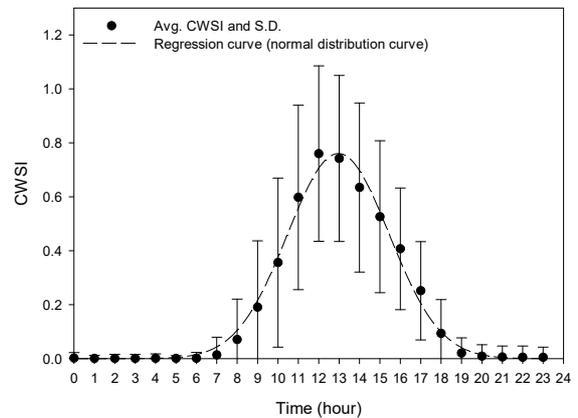


Fig. 2 Hourly variation of $T_c - T_a$ (left) and CWSI (right)

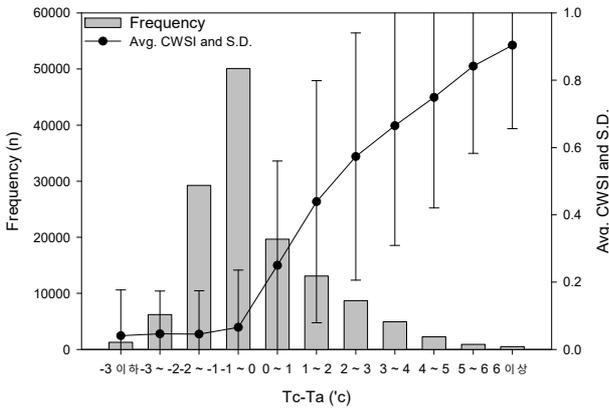


Fig. 3 Frequency of T_c-T_a and range of CWSI by T_c-T_a

해서 상승하며, 10시에서 14시까지 일정 수준의 1시간 평균 T_c-T_a ($1.5 \sim 2.0^\circ\text{C}$)를 유지하였다. 이후 지속해서 감소하다가 17시 무렵 0°C 이하로 내려가는 경향이 나타났다. CWSI는 8시 까지 0에 가까운 값을 나타내다가 증가하여 12시에서 13시 사이에 최댓값을 나타냈다. 이후 지속해서 감소하여 18시를 지나면서 0에 가까운 값이 나타났다.

T_c-T_a 빈도는 $-1 \sim 0^\circ\text{C}$ 구간에서 약 36.5%로 가장 높았으며, -3°C 이하의 구간과 5°C 이상의 구간이 모두 1% 정도로 매우 적은 분포가 나타났다. T_c-T_a 의 분포에 따른 CWSI의 변화는 0°C 이하의 구간에서는 약 0.1 이하의 평균값을 보였고, 0°C 이상의 구간에서 점차 완만하게 증가하는 경향이 나타났다. 0°C 이상의 구간에서 표준편차 (Standard Deviation, S.D.)가 매우 크게 나타났는데 이는 CWSI 산정에 T_c-T_a 이외에 일사량과 상대습도 그리고 풍속 등의 다양한 요인의 영향을 받기 때문으로 판단된다. 현재의 환경에서는 6 이상의 빈도가 낮으나, T_c-T_a 가 6°C 이상으로 지속해서 증가하는 경우에 CWSI도 증가하여 1에 근접 할 것으로 판단된다 (Fig. 3).

2. 측정 시간과 T_c-T_a 를 이용한 CWSI_{EE} 개발

시간 흐름에 따라서 정규분포와 유사한 분포를 나타내었기 때문에 3차원 가우시안 모형을 활용하여 시간에 대한 T_c-T_a 의 정보를 바탕으로 CWSI_{EE}을 개발하였다. 3차원 가우시안 모형의 결정계수는 0.676으로 비교적 양호한 적합성이 나타났다. 이를 통해 임의의 시간과 해당 시간에 대한 기온과 엽온 자료를 활용하면 다른 측정 항목 없이 CWSI를 예측 할 수 있을 것으로 판단된다 (Fig. 4).

3차원 가우시안 모형은 중심부가 불룩한 형태의 종 모양이며, 본 연구에서는 절반을 사용하는 형태로 구상하였기 때문에 변곡점의 위치가 중요하다고 판단하였다. 현재의 수준에서 T_c-T_a 가 6도 이상 발생하는 빈도가 낮아 변곡점이 4.89°C 를

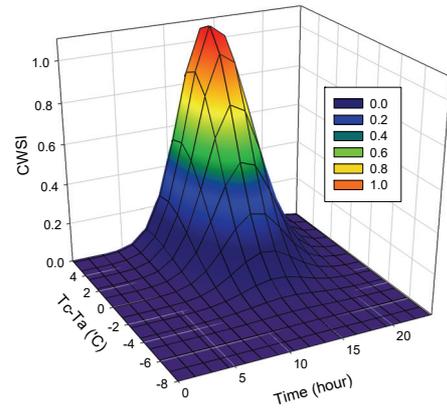


Fig. 4 Distribution of CWSI_{EE} and (T_c-T_a) over time

기준으로 발생하여, 4.89°C 이상이 되어도 CWSI가 감소하는 형태가 나타났다. 이를 해결하기 위해 CWSI_{EE}에서 T_c-T_a 의 최댓값을 4.89°C 로 제한하였다 (Eq. 6).

$$CWSI = 1.12 \left[\frac{\left(\frac{(time - 13.85)^2}{2.9} + \frac{(T_c - T_a - 4.89)^2}{3.15} \right)}{2} \right] \quad (6)$$

(If $T_c - T_a > 4.89^\circ\text{C}$, when $T_c - T_a = 4.89^\circ\text{C}$)

3. CWSI_{EE}을 이용한 CWSI의 예측 평가

CWSI_{EE}을 이용하여 관측 기간 전체에 대한 시간 단위 CWSI를 산정하였으며, 10분 단위로 산정한 CWSI (CWSI_{Ori})를 참값으로 가정하여 결정계수와 NSE를 확인하여 모형의 적합성을 평가하였다. 전체 기간의 결정계수의 범위는 0.96~0.30, 평균은 0.78, 표준편차는 0.12로 나타났으며, NSE의 범위는 0.95~-1.03, 평균은 0.71, 표준편차는 0.23으로 나타났다. 두 검토 값 자료의 범위를 보면 25% 이상의 값이 0.62 이상의 값으로 나타났고, 평균보다 중앙값이 더 높게 위치한 것으로 볼 때 결정계수와 NSE가 평균보다 큰 값의 빈도가 높은 것으로 확인된다 (Fig. 5).

CWSI_{EE}과 CWSI_{Ori} 사이의 결정계수와 NSE가 일사량, 기온, 습도 그리고 풍속의 증감에 영향을 받는지 확인하였다 (Fig. 6). 일사량과 기온 그리고 습도의 증감에 따른 결정계수와 NSE의 상관계수는 0.3 이하로 상관관계가 약한 것으로 나타났다. 풍속에 대한 결정계수와 NSE의 상관계수는 0.5 정도의 약한 양의 상관관계가 나타났다. 풍속은 다른 요소들과 다르게 비교적 큰 값의 출현 빈도가 적기 때문에 선형적인 증가를 보인다고 결정하기는 다소 어려울 것으로 보여진다. 다만 풍속 $1.5 \sim 2.0 \text{ m/s}$ 구간에서 결정계수와 NSE가 높게 나타났는데, 임의의 풍속 조건에서 CWSI_{EE}의 예측이 좋은 결과를 나타내는지는 지속적인 데이터의 수집과 분석이 더 필요할

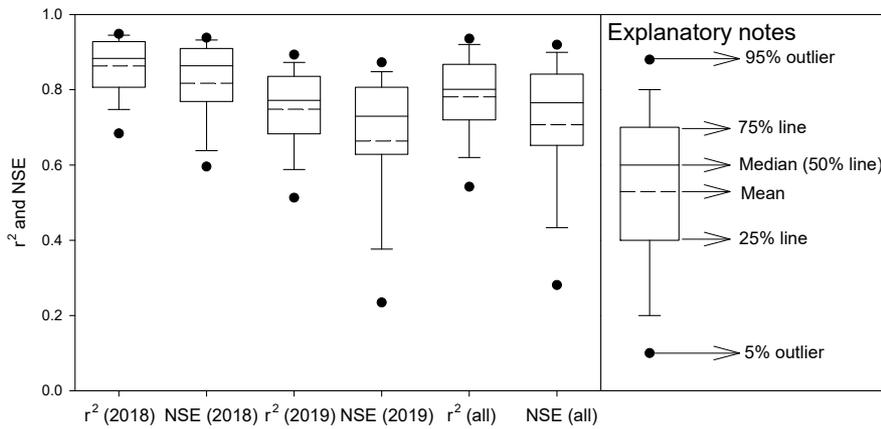


Fig. 5 Distribution chart of R^2 and NSE of $CWSI_{EE}$

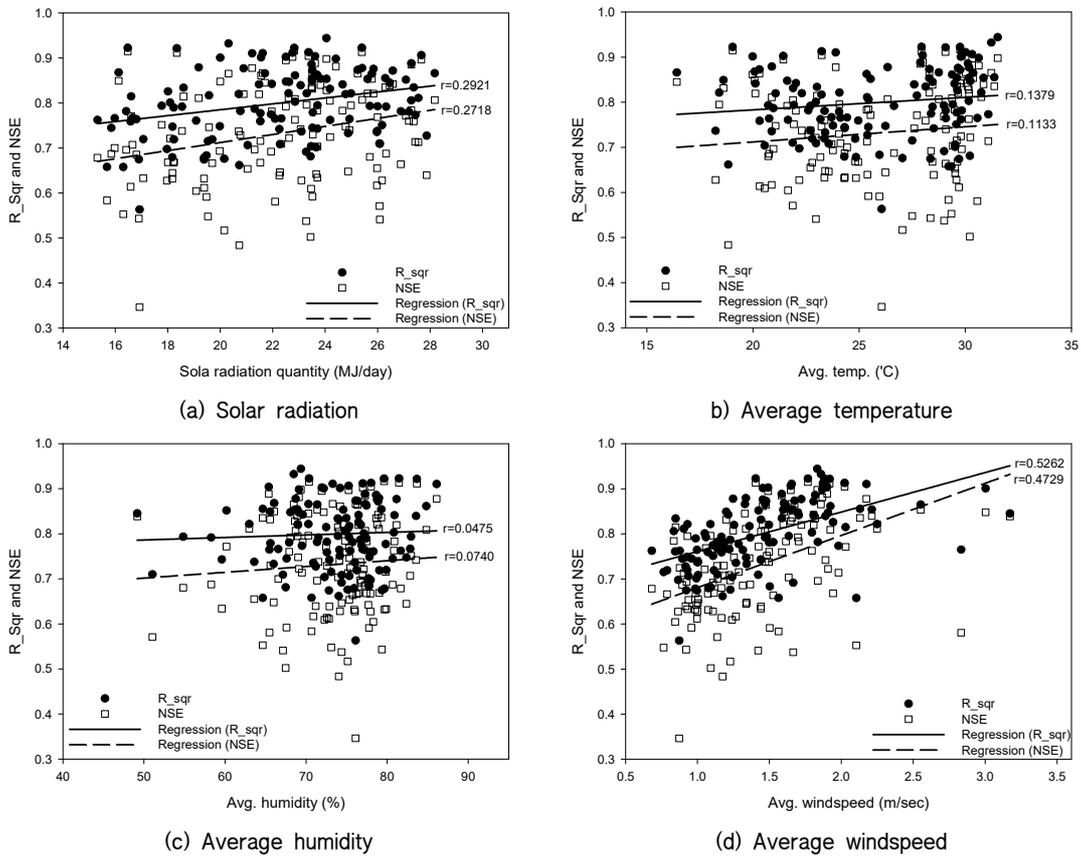


Fig. 6 Scatter plot of R^2 and NSE of $CWSI_{EE}$ with weather conditions

것으로 보여진다. 현재까지의 결과로 미루어 볼 때 $CWSI_{EE}$ 를 사용하여 $CWSI$ 를 산정할 때 일사량, 기온, 습도 그리고 풍속의 증감에 크게 영향을 받지 않는 것으로 판단할 수 있으며, 이는 기상 요건과 관계없이 활용될 수 있다는 것을 의미한다고 볼 수 있다. (단, 일사량이 15 MJ/day 이상으로 예상되며, 비가 오거나 구름이 많지 않은 맑은 날, 관측된 $T_c - T_a$ 가 $-8^{\circ}C$ 보

다 크고 $6^{\circ}C$ 이하일 때, 측정 시간이 8시에서 18시 사이일 경우로 제한됨).

연구 지역 근처에서 재배 중인 복숭아나무의 2019년 엽온과 대기 온도를 활용하여 $CWSI_{EE}$ 로 $CWSI$ 산정이 가능한지 $CWSI_{0n}$ 과 비교하여 평가하였다. 결정계수는 0.884, NSE는 0.866으로 상당히 높은 결과를 얻을 수 있었다. 결정계수와

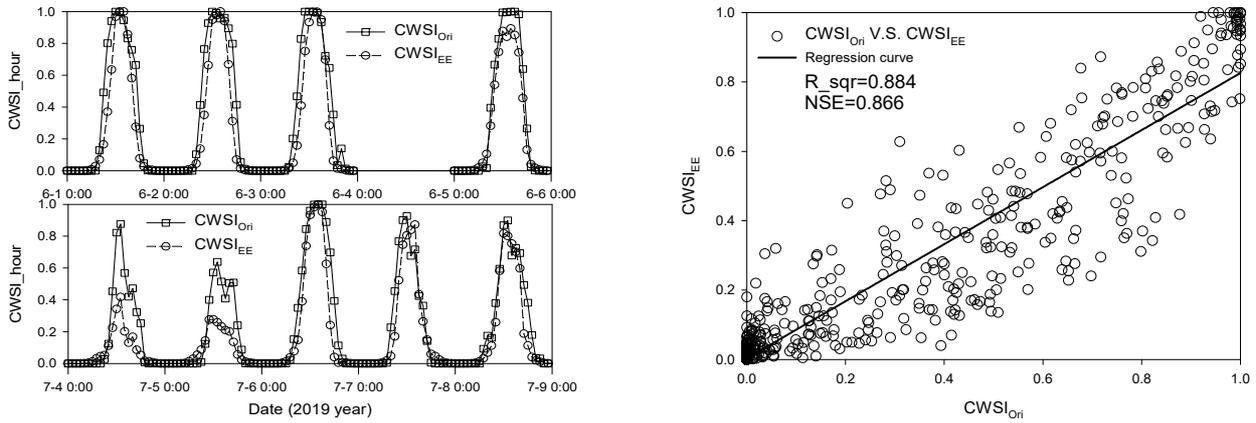


Fig. 7 Comparison between $CWSI_{EE}$ and $CWSI_{Or}$ of peach tree

NSE가 사과나무보다 좋은 결과로 나타난 이유는 측정 개수가 더 적기 때문인 것으로 사료된다. 또한, 대체로 맑고 일사량이 높은 날의 CWSI 예측이 좋은 것으로 나타났으나, 7월 4일 (23.3 MJ/day)과 5일 (23.5 MJ/day)과 같이 일사량이 높지만, 예측이 부정확한 경우도 있었다 (Fig. 7). 이는 CWSI 산정에 필요한 엽온의 측정에서 일사량 증가에 대한 엽온의 변화가 작게 나타났기 때문에 발생하는 것으로 보인다. 이런 오차는 주로 바람의 영향으로 측정 위치가 흔들렸기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 나무의 생장에 따른 가지치기와 방제 작업과 같은 농업 활동 등 외부적인 원인으로도 발생할 수 있을 것으로 사료된다. 추가로 같은 시간에 나뭇잎과 과실 온도를 측정하면 과실 온도가 더 높게 나타났기 때문에 관측시 과실이 측정되지 않도록 주의할 필요가 있었다. 엽온의 측정과 관련된 명확한 기준이 현재 없으므로 측정 위치에 따른 영향, 바람의 세기에 따른 영향 그리고 그늘 형성 등 장애물에 대한 영향 등 관련된 다양한 경우에 대한 조사와 연구가 필요할 것으로 판단된다.

IV. 결론

사과나무 재배지에서 작물의 수분 스트레스 지수 산정을 위한 모니터링하고, 시간의 흐름에 따른 T_c - T_a 와 CWSI의 주기성 등을 통계적으로 분석하였다. 또한, 3차원 가우시안 모형을 활용하여 측정 시간과 T_c - T_a 를 이용하여 $CWSI_{EE}$ 를 개발하였으며, 모형의 결정계수는 0.676으로 비교적 양호한 적합성이 나타났다. $CWSI_{EE}$ 를 활용하면 임의의 시간과 해당 시간에 대한 기온과 엽온 자료만으로 해당 시간의 CWSI를 예측할 수 있을 것으로 기대된다. 개발된 $CWSI_{EE}$ 로 2018년, 2019년 사과나무 재배지의 CWSI를 산정했을 때 결정계수는 0.780, NSE는 0.710으로 나타났고, 2019년 복숭아 재배지의

CWSI를 산정하였을 때 결정계수는 0.884, NSE는 0.866으로 상당히 높은 결과를 얻을 수 있었다. 실제 농업 현장에서 활용할 수 있는 수준으로 발전하기 위해서는 더 많은 연구가 필요하겠지만, 농업 지역 인근에 기상대가 없거나 기상 관측 시설을 설치하기 어려운 환경에서 기온과 엽온만을 측정하여 간편하게 사용할 수 있기 때문에 농업 현장에서 활용성을 높일 수 있을 것으로 사료된다.

그러나 본 연구의 $CWSI_{EE}$ 는 연구 지역에 국한하여 측정된 작물의 엽온을 바탕으로 산정하였기 때문에 여러 지역 및 다양한 작물을 대상으로 정보를 수집하여 고도화시켜 나갈 필요가 있을 것으로 생각한다. 또한, 작물 수분 스트레스와 관련된 연구들이 활발히 진행되고 있는 단계에 있기 때문에 작물별 CWSI에 대한 명확한 기준 및 해석, 관개량 및 관개 시기 등을 결정하기 위한 다양한 방법을 모색하는 연구들이 추후 진행된다면 더욱 활용성을 높일 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 신농업기후변화대응체계구축사업 (세부과제번호: PJ014944012020)의 지원으로 이루어진 것임.

REFERENCES

1. Agam, N., Y. Cohen, V. Alchanatis, and A. Ben-Gal, 2013. How sensitive is the CWSI to changes in solar radiation?. *International Journal of Remote Sensing* 34(17): 6109-6120. doi:10.1080/01431161.2013.793873.
2. Bohnert, H. J., Q. Gong, P. Li, and S. Ma, 2006. Unraveling abiotic stress tolerance mechanisms-Getting genomics going. *Current Opinion in Plant Biology* 9(2): 180-188.

- doi:10.1016/j.pbi.2006.01.003.
3. Choi, Y., M. Kim, W. Oh, J. Cho, S. Lee, Y. Kim, J. Jeon, and S. Yun, 2019. Statistical analysis of determining optimal monitoring time schedule for crop water stress index (CWSI). *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 61(6): 73-79 (in Korea). doi:10.5389/KSAE.2019.61.6.073.
 4. Choi, Y. M., S. M. Jung, and D. G. Choi, 2017. Effects of heavy rain during rainy season and drainage methods on soil water content, photosynthesis characteristics, and growth in 'jinok' and 'campbell early' grapes. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 19(1): 1-9 (in Korean). doi:10.5532/KJAFM.2017.19.1.1.
 5. Dresselhaus, T., and R. Hüchelhoven, 2018. Biotic and abiotic stress responses in crop plants. *Agronomy* 8(11): 267-272. doi:10.3390/agronomy8110267.
 6. El shazly, S. M., 1996. Estimation of hourly and daily global solar radiation at clear days using an approach based on modified version of gaussian distribution. *Advances in Atmospheric Sciences* 13(3): 349-358.
 7. Guo, Z., 2017. Daily variation low of solar radiarion flux density incident on the horizontal surface. *Journal of Earth Science & Climatic Change* 8(9): 1000412. doi:10.4172/2157-7617.1000412.
 8. Jackson, R. D., S. B. Idso, R. J. Reginato, and P. J. Pinter Jr., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research* 17(4): 1133-1138. doi:10.1029/WR017i004p01133.
 9. Jeong, H., R. Jeong, J. Ryu, D. Oh, S. Choi, and J. Cho, 2019. Preliminary growth chamber experiments using thermal infrared image to detect crop disease. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 21(2): 111-116 (in Korea). doi:10.5532/KJAFM.2019.21.2.111.
 10. Jones, H. G., 2010. Remote detection of crop water stress and distinguishing it from other stresses. *XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on* 922, 23-34. doi:10.17660/ActaHortic. 2011.922.2.
 11. Kim, M., Y. Choi, J. Cho, S. Yun, J. Park, Y. Kim, J. Jeon, and S. Lee, 2019. Response of crop water stress index (CWSI) and canopy temperature of apple tree to irrigation treatment schemes. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 61(5): 23-31 (in Korea). doi:10.5389/KSAE.2019.61.5.023.
 12. Lee, H. S., S. K. Kim, H. J. Lee, J. H. Lee, S. An, and S. G. Lee, 2019. Development of crop water stress index for kimchi cabbage precision irrigation control. *Horticultural Science and Technology* 37(4): 490-498 (in Korea). doi:10.7235/HORT.20190049.
 13. Li, L., D. C. Nielsen, Q. Yu, L. Ma, and L. R. Ahuja, 2010. Evaluating the crop water stress index and its correlation with latent heat and CO₂ fluxes over winter wheat and maize in the North China plain. *Agricultural Water Management* 97(8): 1146-1155. doi:10.1016/j.agwat.2008.09.015.
 14. Limpus, S., 2009. Isotropic and anisotropic characterisation of vegetable crops. Department on Primary Industries and Fisheries, Queensland.
 15. Nam, S. W., Y. S. Kim, and D. U. Seo, 2014. Change in the plant temperature of tomato by fogging and airflow in plastic greenhouse. *Protected Horticulture and Plant Factory* 23(1): 11-18 (in Korean). doi:10.12791/KSBEC.2014.23.1.011.
 16. O'Shaughnessy, S., S. R. Evett, P. D. Colaizzi, and T. A. Howell, 2012. A crop water stress index and time threshold for automatic irrigation scheduling of grain sorghum. *Agricultural Water Management* 107: 122-132. doi:10.1016/j.agwat.2012.01.018.
 17. Song, E. Y., and J. H. Lee, 2012. Plant responses to environmental stresses. *Nanotechnology in Biomedical Science* 32(4): 27-34 (in Korean).
 18. Woo, Y. H., 2013. Moisture and measuring and control in soil and plant. <https://www.af.ac.kr/planweb/board/download.9is?fileUid=0000000052e385d90152ed26d5432e9e&boardUid=816ac6da51a3db470151b3d169a5019b>.
 19. Yun, S. K., S. J. Kim, E. Y. Nam, J. H. Kwon, Y. S. Do, S. Y. Song, M. Kim, Y. Choi, G. Kim, and H. Shin, 2020. Evaluation of water stress using canopy temperature and crop water stress index (CWSI) in peach trees. *Protected Horticulture and Plant Factory* 29(1): 20-27 (in Korea). doi:10.12791/KSBEC.2020.29.1.30.