



작물 수분 스트레스 지수 산정을 위한 최적의 관측 간격과 시간에 대한 통계적 분석

Statistical Analysis of Determining Optimal Monitoring Time Schedule for Crop Water Stress Index (CWSI)

최용훈^a · 김민영^{b,†} · 오우현^c · 조정건^d · 윤석규^e · 이상봉^f · 김영진^g · 전종길^h

Choi Yonghun · Kim Minyoung · Oh Woohyun · Cho Junggun · Yun Seokkyu · Lee Sangbong · Kim Youngjin · Jeon Jonggil

ABSTRACT

Continuous and tremendous data (canopy temperature and meteorological variables) are necessary to determine Crop Water Stress Index (CWSI). This study investigated the optimal monitoring time and interval of canopy temperature and meteorological variables (air temperature, relative humidity, solar radiation and wind speed) to determine CWSIs. The Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE) was used to quantitatively describe the accuracy of sampling method depending upon various time intervals ($t=5, 10, 15, 20, 30$ and 60 minutes) and CWSIs per every minute were used as a reference. The NSE coefficient of wind speed was 0.516 at the sampling time of 60 minutes, while the ones of other meteorological variables and canopy temperature were greater than 0.8. The pattern of daily CWSIs increased from 8:00 am, reached the maximum value at 12:00 pm, then decreased after 2:00 pm. The statistical analysis showed that the data collection at 11:40 am produced the closest CWSI value to the daily average of CWSI, which indicates that just one time of measurement could be representative throughout the day. Overall, the findings of this study contributes to the economical and convenient method of quantifying CWSIs and irrigation management.

Keywords: Crop water stress index (CWSI); canopy temperature; optimal monitoring time

1. 연구배경 및 목적

외기환경 스트레스에 의한 작물의 반응은 다양한데 수분이 부족한 경우에는 기공을 닫아 증산 작용을 저하시키고, 스트레스 노출 빈도에 따라 작물 생산성 및 품질 저하의 원인이 될 수 있다. 이처럼 작물이 받는 수분 스트레스는 다양한 방법으로 측정이 가능하지만 측정과정이 쉽고 신속한 적외선 온

도측정을 이용한 작물 수분 스트레스 지수 (Crop Water Stress Index, CWSI)로 표현이 가능하다. CWSI는 작물의 수분에 대한 스트레스를 비접촉식 또는 비파괴적인 방법으로 측정하는 방법으로 CWSI를 이용하여 작물의 수분진단 및 물관리 처방에 활용하는 연구들이 미국, 유럽 등에서 많이 이루어지고 있다. 적정 관개계획 의사결정모델을 개발 (O'Shaughnessy et al., 2012), 점적 관수시설의 관개계획 수립 활용 (Erdem et al., 2010), CWSI를 이용한 동적 관개제어 알고리즘을 개발 (Osroosh et al., 2015) 등과 같은 연구가 진행되었으며, 관개 시기와 량 등 관개 계획 및 의사를 결정하는데 활용이 가능하다고 할 수 있다.

CWSI는 보통 오전 10시부터 오후 15시까지의 기상 및 엽온 자료를 이용하여 계산할 수 있는데, 일사량, 엽온과 기온의 차에 따른 상관관계가 크다고 하였다 (Guisard, 2008; Garcia y Garcia et al., 2014; Kim et al., 2019). 또한 일사량 수준에 따라 정도의 차이가 나타나지만 일사량과 CWSI 사이의 선형적인 상관관계와 주기적 변화에 관한 연구들이 많이 이루어지고 있다 (Li et al., 2010; Agam et al., 2013, DeJonge et al., 2015). Testi et al. (2008)은 토양수분함량 부족 등에 따라 작물 기공전도도는 증가하며, 이로 인해 CWSI의 변화가 시작되고, 선형적으로 증가한 CWSI가 오후 13시 30분 이후 감소하는

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

^{b, f, g, h} Agricultural Researcher, Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences (NAS), Rural Development Administration (RDA)

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

^{d, e} Agricultural Researcher, Department of Horticultural Crop Research, National Institute of Horticultural and Herbal Sciences (NIHHS), Rural Development Administration (RDA)

[†] Corresponding author

Tel.: +82-63-238-4156, Fax: +82-63-238-4145

E-mail: mykim75@korea.kr

Received: September 19, 2019

Revised: October 25, 2019

Accepted: October 28, 2019

변화를 나타낸다고 보고하였다. 따라서 맑은 날의 경우에 시간에 따라 기온 및 일사량의 증감이 뚜렷하기 때문에 시간의 경과에 따른 CWSI 변화도 일정한 경향을 가질 것으로 예상되며, CWSI 산정에 필요한 최적 관측 시간대 등과 관련된 패턴 분석이 가능할 것으로 판단된다.

기상변화에 따라 작물이 받는 수분 스트레스를 정량화하기 위해 본 연구에서 선택한 CWSI의 산정에는 기상 및 엽온 등의 시계열 관측 자료가 필요한데, 관측 간격이 짧아지면 자료의 수와 계산에 필요한 수식 등의 양이 매우 많아지게 된다. 또한 이러한 대용량의 데이터를 취급하거나 가공하기 위해서는 많은 시간과 노력이 필요하기 때문에 효율이 낮아지는 문제와 함께 경제성과 관련된 부분에서도 불리해 질 수 있다. 반대로 관측 간격이 너무 멀어지면 실제의 경향에서 벗어날 수 있고 측정에서 발생할 수 있는 오차 등의 불확실성을 구별하기 어려운 문제가 발생할 수 있다. 따라서 적절한 통계적 분석을 통해 질적·양적으로 합리적인 관측 시간 간격 또는 관측 시간대 등을 선정하는 것이 자료의 관리에 효과적일 수 있다.

본 연구는 기상 및 엽온의 측정 간격에 따라 복숭아나무의 수분스트레스 지수의 변동을 확인하여 합리적인 관측 시간 간격을 구명하고, CWSI의 일 변화 경향 등을 통계적으로 분석하여 최적 관측 시간대를 선정하는 것이 가능한지 확인하였다.

II. 연구방법

1. CWSI 개요

CWSI는 작물의 수분에 대한 스트레스를 0에서 1사이의 지수로 표현하는 방법이다 (O'Shaughnessy et al., 2012). CWSI를 산정하는 방법에는 경험적 방법과 이론적 방법이 있으며, CWSI 이론식 (theoretical CWSI)은 풍속과 일사량 등 맑고 흐린 날의 영향도 고려할 수 있는 장점이 있다 (Jackson et al., 1981). 본 연구에서도 날씨의 영향을 고려하기 위해 CWSI 이론식을 사용하였으며, 1분 간격으로 CWSI를 산정하였다 (Eq. 1~3).

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

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

$$dT_i = [r_a (R_n - G) / (YC_p)] [K / (\sim + K) - VPD / (\sim + K)] \quad (3)$$

여기서, dT 는 엽온과 대기온도간의 차이 ($^{\circ}C$), dT_u 는 수분

스트레스로 인해 증산이 일어나지 않는 시간의 엽온과 대기 온도간의 차이 ($^{\circ}C$), dT_i 는 충분한 관개로 인해 수분스트레스가 없을 때의 엽온과 대기온도간의 차이 ($^{\circ}C$), R_n 은 순복사에너지 (W/m^2), \sim 는 포화수증기압과 온도의 비 ($kPa/^{\circ}C$), K 는 건습계 상수 ($kPa/^{\circ}C$), r_a 는 공기저항 (s/m), Y 는 공기밀도 (kg/m^3), C_p 는 열용량 ($1013 J/kg \cdot ^{\circ}C$), VPD 는 증기압차 (kPa) 그리고 G 는 토양의 비열 (W/m^2)이다.

2. 대상작물 및 시험포 조성

본 연구에서는 5년생 ‘유미’ 복숭아나무 (*Prunus persica* (Batsch L.), Yumi) 6그루 (T-1~T-6)를 대상으로 연구를 수행하였다. 전라북도 완주군에 위치한 국립원예특작과학원에서 복숭아의 생육과 관련된 연구를 목적으로 조성된 작은 시험포장이며, 2열로 21그루의 ‘유미’ 복숭아나무를 약 2 m 간격으로 재배하는 공간을 5개의 구획 (4그루~5그루)으로 나누어 관리하였다. 복숭아나무의 끝단에 위치한 잎의 15 cm~20 cm 떨어진 위치에 적외선 센서 (SI-431, Apogee, USA)를 설치하고, 1분 간격으로 엽온을 측정하였다. 이때 엽온 측정을 위한 나무는 크기 및 성장 상태 등이 비슷한 나무를 선택하였다. 엽온을 측정하기 위해서는 잎의 면적이 충분히 많이 확보되어야하기 때문에 잎이 무성해졌다고 판단된 6월 1일부터 7월 23일까지 관측을 수행하였다. 또한 시험지역에 종합 기상 관측시설 (SWS-600, Korea digital, Korea)을 설치하여, 기온, 습도, 풍속, 일사량 그리고 강우량을 1분 간격으로 측정하였다 (Fig. 1).

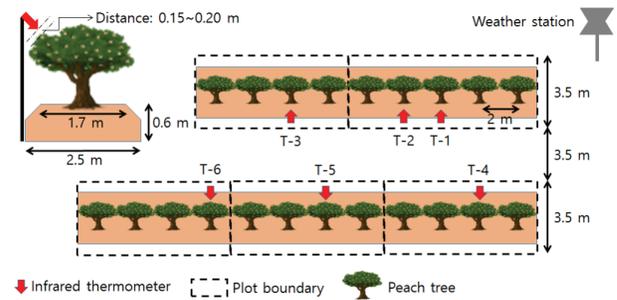


Fig. 1 Design of study area

3. CWSI 산정을 위한 측정 간격에 대한 적합성 평가 방법

1분 간격으로 측정된 기상 및 엽온 자료를 바탕으로 60분 평균 기상값 및 CWSI ($CWSI_{60}$)를 산정하고, 참값으로 설정하였다. 측정 간격을 5분, 10분, 15분, 20분, 30분 그리고 60분으로 가정하였고, 측정 간격별 ($n=5, 10, 15, 20, 30, 60$) $CWSI_n$ 값, 즉 $CWSI_5, CWSI_{10}, CWSI_{15}, CWSI_{20}, CWSI_{30}, CWSI_{60}$ 를 산정

하여 60분에 대한 평균값을 산정하고 이를 CWSI₁값과 비교하여 어느 정도 부합하는지 적합도 평가를 실시하였다. 적합도 평가는 Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) 지수로 검증하였다.

NSE 지수는 주로 수문학적 모델의 예측력을 평가하는데 사용되는 산정식의 신뢰도를 검증하는데 유용하게 활용되고 있으며, -∞~1까지의 범위를 가지고 있다 (Eq. 4). NSE가 1이면 관측값과 모형값이 완전하게 일치함을 의미하고, 충분히 좋은 결과를 나타내는 NSE 임계값이 0.5에서 0.65사이라고 제안하였다 (Nash and Sutcliffe 1970; Moriasi et al., 2007; Ritter and Muñoz-Carpena, 2013).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q'_m - Q'_t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q'_0 - \bar{Q}_0)^2} \quad (4)$$

여기서, Q₀'는 시간 t에서의 관측값, \bar{Q}_0 는 관측값의 평균, Q_m'는 시간 t에서의 예측값, T는 관측시간이다.

4. CWSI 산정을 위한 최적 관측 시간대 선정 및 검정 방법

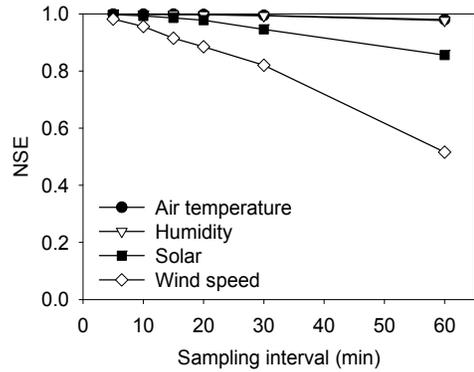
측정 간격에 대한 적합성 평가 방법으로 제시된 측정 간격으로 CWSI의 일 변화 패턴을 확인하고, 일 평균 CWSI 산정에 적합한 측정 시간대를 통계적인 방법으로 분석하였다. 통계적 분석은 평균을 크기순으로 정렬하여 평균의 위치에 따라 서로 다른 기준 값을 적용하여 유의차가 인정될 때 어느 것과 차이가 있는가를 분석하는 Duncan's multiple range test로 수행하였다. 측정 간격에 따른 샘플의 숫자를 충분히 확보하기 위하여 간격의 시작부터 다음 간격의 시작 전까지 같은 그룹이라 가정하였다. 예를 들어 5분 간격일 경우 0분~4분과 5분~9분, 그리고 10분 간격일 경우 0분~9분까지의 자료를 사용하였다.

최적 관측 시간대로 평가된 시각에 대한 자료를 바탕으로 일 평균 CWSI를 산정하고, 1분 간격으로 측정하여 산정한 일 평균 CWSI와 비교하여 최적 관측 시간대를 활용한 CWSI 산정이 가능한지 평가하였다.

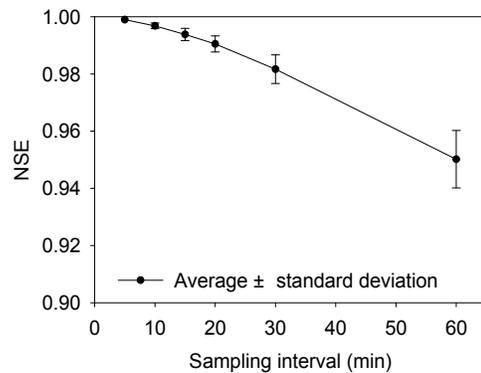
III. 결 과

1. CWSI 산정을 위한 측정 간격에 대한 적합성 평가

기온과 습도 그리고 일사량은 측정 간격 60분까지 NSE 지수가 0.85 이상으로 좋은 결과가 나타났으나, 풍속 항목에서는 측정 간격 60분에서의 NSE 지수가 0.516으로 다른 기상 항



(a) Meteorological variables



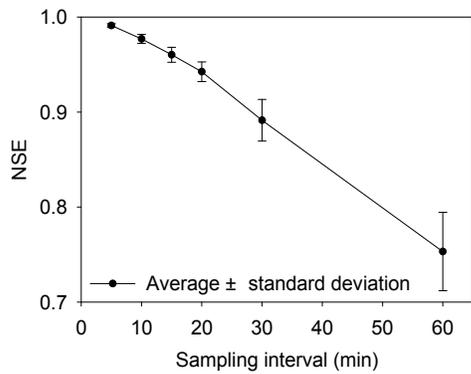
(b) Canopy temperature

Fig. 2 Effect of measurement time interval on NSE

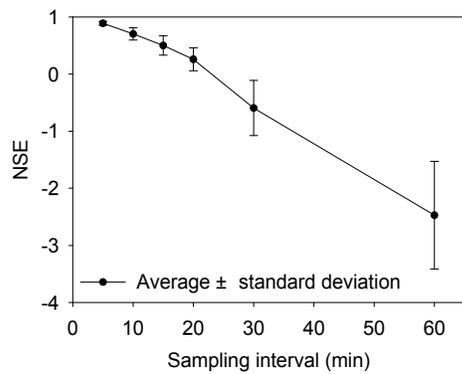
목에 비해 적합하지 않은 것으로 나타났다. 풍속은 기온과 습도 그리고 일사량과는 다르게 돌풍이나 이상 기류의 발생 또는 무풍 등과 같이 비선형적이고, 순간적으로 급변할 수 있는 항목이기 때문에 1분 측정간격의 60분 평균값과 60분 간격의 측정값 사이에서 큰 차이가 나타난 것으로 판단되었다. 엷은 항목에서는 60분 간격으로 측정해도 NSE 지수가 0.950으로써 매우 좋은 결과가 나타났다. 따라서 기온, 습도, 일사량 그리고 엷은 항목은 측정 간격이 CWSI 산정에 큰 영향을 주지 않지만 풍속의 변화는 측정 간격에 따른 CWSI 산정에 영향을 주고 이에 따라 도출되는 결과가 달라질 것으로 예상되었다 (Fig. 2).

CWSI는 측정간격에 반비례하여 NSE 지수가 낮아지는 경향이 나타났고, CWSI₃₀에서 NSE 지수가 0.9이하, CWSI₆₀에서는 0.8이하로 낮아졌다. 전체적인 경향을 보면 NSE가 0.7 이상으로 풍속의 변동성이 크더라도 60분 간격으로 측정하고 CWSI를 산정해도 신뢰도 높은 자료를 생성할 수 있을 것으로 기대되었다. 그러나 연구에서 CWSI는 작물의 스트레스 지수로 낮은 경우에는 작물의 관리에 있어 크게 고려하지 않는 상황이 대부분이 될 것이고, 이는 곧 작물 스트레스 지수가 높은 시점에 대한 평가가 잘 이루어져야 작물 관리에 CWSI를

제대로 활용할 수 있을 것이라고 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 CWSI가 높은 구간을 0.5 이상으로 가정하고, 0.5 이상인 구간에 대한 NSE 지수를 재평가하였다. 전체구간을 평가한 것에 비해 NSE 지수가 큰 폭으로 떨어진 것을 확인할 수 있었다. 이는 CWSI 0.5 인근의 값이 최솟값이 되어 평균 및 분산이 증가하고, 분포의 불균형에 따라 NSE 지수가 떨어진 것으로 판단되었다. 또한 측정간격에 따라서 NSE 편차가 크게 나타났다. 이는 측정 지점별로 CWSI 0.5 이상인 자료를 추출하는 과정에서 자료의 총 개수가 다르기 때문인 것으로 판단되었다. 측정 지점별 자료의 개수가 약 100~170개로 편차가 컸으며, CWSI 0.5 인근의 자료의 개수가 많이 포함될수록 NSE가 평균보다 높게 나타나고, 적게 포함될수록 NSE가 평균보다 낮게 나타나는 것으로 확인되었다. $0.5 < CWSI < 1$ 구간에 대한 NSE 지수의 평균값은 0.889 (CWSI₅), 0.704 (CWSI₁₀), 0.500 (CWSI₁₅), 0.258 (CWSI₂₀), -0.594 (CWSI₃₀), -2.472 (CWSI₆₀)로 나타났으며, 10분 이하의 측정 간격에서는 만족스러운 결과가 나타났다. 따라서 안정적인 CWSI 산정과 관리를 위해서는 10분 이하로 기상 및 엽온을 연속 측정할 필요가 있는 것으로 분석되었다 (Fig. 3).



(a) Case 1 ($0 < CWSI < 1$)



(b) Case 2 ($0.5 < CWSI < 1$)

Fig. 3 NSE comparison of CWSI_t and CWSI_n depending upon measurement time interval

2. CWSI 산정을 위한 최적 관측 시간대 선정 및 검증

연구기간인 6월 1일부터 7월 23일까지의 결측 구간이 있는 데이터와 강우가 발생하거나 날씨가 흐린 기간을 제외하여 25일에 해당하는 자료를 분석하였다. CWSI는 오전 8시부터 9시 사이에 증가하기 시작해 12시에서 14시 사이에 최댓값을 나타내다가 20시를 지나 0.1 이하로 내려가는 일 변화패턴을 가지는 것으로 나타났다. 일자별로 토양 수분과 일사량 등 기상 조건이 다르기 때문에 각 시각의 CWSI 평균에 대한 표준편차가 크게 나타난 것으로 판단된다 (Fig. 4). Guisard (2008)과 Garcia y et al. (2014)의 연구에서 일 평균 CWSI를 산정할 때 10시부터 15시까지의 관측값을 사용한다고 보고된 바 있다. 이에 따라 본 연구에서도 10시부터 15시까지의 관측값을 사용하여 일 평균 CWSI를 산정하였다. 일 평균 CWSI는 0.59로 나타났으며, 10분 단위 시간에 대한 분산분석을 수행하여 11시 40분 또는 14시 30분에서 15시 10분 사이에 측정하면 일 평균과 유사한 CWSI를 얻을 수 있는 최적 관측 시간대인 것으로 분석되었다 (Table 1).

최적 관측 시간대로 선정된 각 6개의 시각에 측정된 자료를 사용하여 CWSI의 적합성을 검증하였다. 오전 11시 40분에 측정된 자료를 활용할 때 결정계수 0.759, NSE 지수 0.510으로 가장 좋은 결과가 나타났으나, 그 외의 자료를 활용하는 경우에는 다소 만족스럽지 못한 결과가 나타났다 (Fig. 5). 다만 단독 측정이 아닌 다중 측정의 측면으로 활용한다면 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 본 연구에서는 농업인이 현장에서 바로 작물 스트레스 지수를 확인할 수 있도록 하나의 측정을 기초로 설정하였고, 그와 관련된 통계적인 방법을 소개하는데 초점을 맞추었기 때문에 다중 측정에 대한 부분은 고려하지 않았다. 따라서 본 연구와 같이 사전 조사와 통계적 접근을 통한 작물 수분 스트레스 지수의 변화 경향 및 일 평균에 근접한 시간의 설정을 통해 경제적이고 편리한 방법으로 작물 수분 스트레스 관리가 가능할 것으로 판단된다.

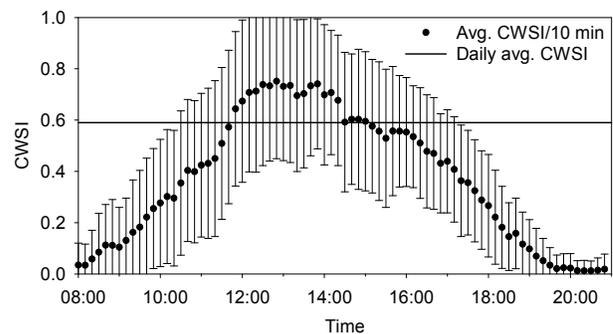


Fig. 4 Daily pattern of CWSI (8am~9pm, average ± standard deviation)

Table 1 Variance analysis of determining optimal measurement time for CWSI computation

Time	CWSI	Time	CWSI	Time	CWSI
Daily Avg.	0.59*	14:40	0.60*	15:40	0.56
11:30	0.51	14:50	0.60*	15:50	0.56
11:40	0.57*	15:00	0.60*	16:00	0.55
11:50	0.64	15:10	0.58*	16:10	0.54
14:20	0.68	15:20	0.56	16:20	0.51
14:30	0.59*	15:30	0.53	16:30	0.53

(note: * is same group by duncan's multiple range test at $\alpha=0.05$, shows only neighboring time zone of daily avg. CWSI)

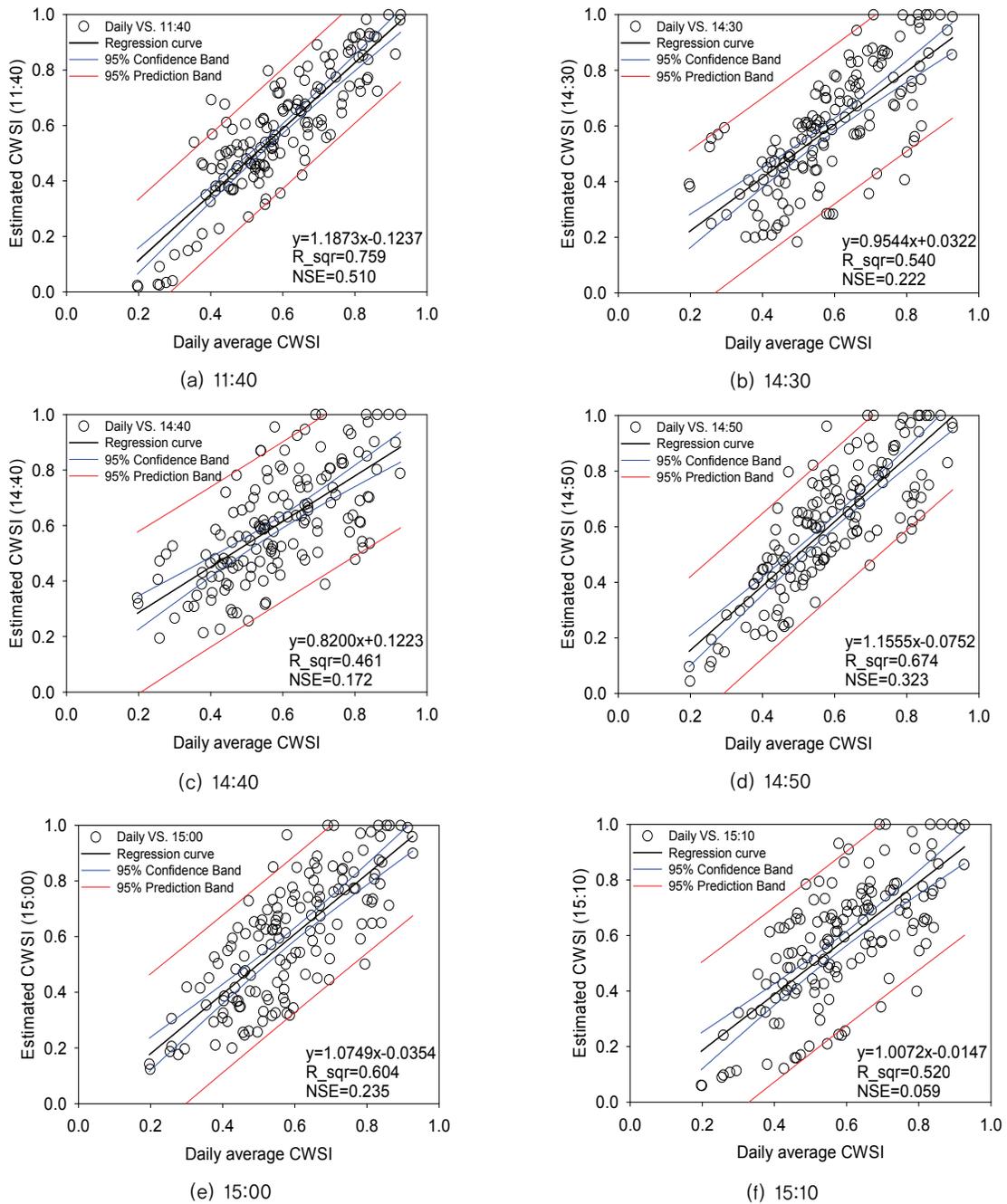


Fig. 5 Comparison of estimated CWSI and daily averaged CWSI

IV. 결 론

본 연구에서는 기상 및 복숭아 나무 6그루의 엽온을 1분 간격으로 측정하여, CWSI를 산정하고, 통계적 방법을 통해 일 평균 CWSI를 더 적은 자료의 수로 산정할 수 있도록 연속 측정 간격 및 측정 시간대 등을 분석하였다.

1. 기상자료와 엽온 자료 중에서 다른 항목에 비하여 풍속의 비선형성이 측정 간격에 미치는 영향이 큰 것으로 판단되며, 1분 간격으로 연속 측정하여 산정된 CWSI를 참값이라 할 때 5분 또는 10분 간격으로 연속 측정해도 양질의 CWSI가 산정 가능한 것으로 분석되었다.

2. CWSI는 8시에서 9시 사이에 증가하기 시작해 12시에서 14시 사이에 최댓값을 나타내다가 20시를 지나 0.1 이하로 내려가는 일 변화패턴을 가지는 것으로 나타났다. 현재 연구 수준에서 분산분석과 결정계수 그리고 NSE 등과 같은 통계적인 접근을 통해 11시 40분에서 11시 50분 사이를 1분 간격으로 측정하면 일 평균에 가까운 CWSI를 얻을 수 있는 것으로 분석되었다. 이와 같이 농업 현장에서도 모니터링 (선)과 통계적 분석 (후)을 활용하여 최적 관측 시간대의 설정이 농가 상황에 맞추어 충분히 가능할 것으로 판단된다.

본 연구와 같이 다양한 지역에서 장기간의 관측 기록을 확보하고, 빅 데이터 분석 등과 같은 통계적 방법을 다양하게 활용한다면 더 간단한 방법으로 실제 농업 현장에서의 최적 관측 시간을 이용한 작물 수분 스트레스 산정에 대한 정확성을 높일 수 있을 것으로 기대된다. 단, 현재 연구에서 제시된 최적 관측 시간대인 11시 40분에서 50분은 현재 자료에 국한된 통계적 분석일 뿐 절대적인 기준으로 설정하는 것은 다소 무리가 있다. 또한 통계적인 접근을 통해 최적 관측 시간의 설정이 가능할 것이라는 가설에 대한 확인이므로 기상 자료의 양과 질 등에 따라 다른 결과가 나타날 수 있기 때문에 실제 농업 현장에서는 충분한 검토가 필요할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구 개발사업 (세부과제번호: PJ014433012019)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

1. Agam, N., Y. Cohen, V. Alchanatis, and A. Ben-Gal, 2013. How sensitive is the CWSI to changes in solar radiatoin?. *International Journal of Remote Sensing* 34(17): 6109-6120. doi:10.1080/01431161.2013.793873.
2. DeJonge, K. C., S. Taghvaeian, T. J. Trout, and L. H. Comas, 2015. Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize, *Agricultural Water Management* 156: 51-62. doi:10.1016/j.agwat.2015.03.023.
3. Garcia y Garcia, A., M. A. Abritta, C. M. T. Soler, and A. Green, 2014. Water and heat stress: The effect on the growth and yield of maize and the impacts on irrigation water. *WIT Transactions on Ecology and The Environment* 185: 77-87. doi:10.2495/SI140081.
4. Guisard, Y., 2008. Crop canopy temperature as indicator of water stress: Application to grapevines. Doctoral thesis, Charles Sturt University, Australia.
5. Erdem, Y., L. Arin, T. Erdem, S. Polat, M. Deveci, H. Okursoy, and H. T. Gültaş, 2010. Crop water stress index for assessing irrigation scheduling of drip irrigated broccoli (*Brassica oleracea* L. var. italica). *Agricultural Water Management* 98(1): 148-156. doi:10.1016/j.agwat.2010.08.013.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models part 1 - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
10. Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3): 885-900. doi:10.13031/2013.23153.
11. 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.
12. Osroosh, Y., R. T. Peters, C. S. Campbell, and Q. Zhang, 2015. Automatic irrigation scheduling of apple trees using theoretical crop water stress index with an innovative dynamic threshold. *Computers and Electronics in Agriculture* 118: 193-203. doi:10.1016/j.compag.2015.09.006.
13. Ritter, A., and R. Muñoz-Carpena, 2013. Performance evaluation of hydrological models: statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology* 480(1): 33-45. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.12.004.
14. Testi, L., D. A. Goldhamer, F. Iniesta, and M. Salinas, 2008. Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees. *Irrigation Science* 26(5): 395-405. doi:10.1007/s00271-008-0104-5.