



관개수준별 사과나무의 엽온 및 수분 스트레스 지수 변화 분석

Response of Crop Water Stress Index (CWSI) and Canopy Temperature of Apple Tree to Irrigation Treatment Schemes

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

Kim, Minyoung · Choi, Yonghun · Cho, Junggun · Yun, Seokkyu · Park, Jeonghun · Kim, Youngjin · Jeon, Jonggil · Lee, Sangbong

ABSTRACT

Crop response to weather and internal water pressure changes is more sensitive to crop water stress than soil water content. Recently, its implementation to optimal irrigation scheduling has been receiving much attention. This study was conducted to determine and compare the theoretical crop water stress index (CWSI) using meteorological data and canopy temperature collected from three different irrigation treatments, which were Tr-1 plot (rainfed), Tr-2 plot (50% of daily evapotranspiration (ET) irrigated) and Tr-3 plot (75% of daily evapotranspiration (ET) irrigated). The readings of canopy temperature and CWSI were significantly different among irrigation treatment schemes. The average canopy temperatures and CWSIs of Tr-1 and Tr-3 plots were 34.6°C and 32.6°C, 0.79 and 0.64, respectively. Solar radiation had the biggest correlation with CWSI (R=0.68) which was followed by wind speed, relative humidity and air temperature. Overall, the findings of this study indicated that canopy temperatures and CWSIs could be further used for irrigation scheduling for crop growth.

Keywords: Irrigation treatments; canopy temperature; crop water stress index (CWSI)

1. 연구배경 및 목적

경험이나 직관에 의존하던 농경지의 물관리 방식에서 벗어나 실시간으로 토양의 수분함량 및 수분장력을 측정하는 방법과 대기 온습도, 일사량, 풍속, 강우량 등 기상정보를 이용해 작물의 증발산량을 산정하는 방법 등 농경지에서 물을 관리하는 방법이 다양화되고 있다 (Kim and Kim, 1988). 하지만 토양의 수분함량 또는 작물의 증발산량을 활용하는 방법은 토양의 이질성 및 시·공간적 변이 등 다양한 특성을 반영하

기 어려워 관개에 필요한 용수량이 부적절하게 산정될 가능성이 있다. 또한 주변에 기상관측소가 없거나 너무 멀 경우 별도의 기상관측장치를 갖춰야 하는 문제점이 발생 할 수 있다 (Aguilar et al., 2015). 이에 토양과 기상 등 작물 생육환경에 영향을 주는 요인의 변화에 따른 작물 스트레스 영향을 직·간접적인 방법으로 측정하고, 이를 작물 관개를 위한 의사결정에 활용하는 연구들이 점차 늘어나고 있다 (Erdem et al., 2006; O'Shaughnessy et al., 2012).

작물이 받는 스트레스는 병해충으로 인한 생물학적 스트레스와 물 부족, 가뭄, 냉해 그리고 고온 등과 같이 외기 환경의 변화로 발생하는 비생물학적 스트레스로 구분 할 수 있다. 여기서, 환경적 요인으로 발생하는 스트레스에 능동적으로 대처하기 위해 작물은 스트레스 내적 저항성을 증가시키거나 생육 환경을 조절하는 등 식물 내부 체계를 적당히 조절한다 (Dresselhaus and Hückelhoven, 2018; Bohnert et al., 2006; Song and Lee, 2012). 하지만 작물이 허용할 수 있는 스트레스의 정도를 넘어서게 되면, 체내 조직을 통해 작물은 다양한 반응이 나타나게 된다. 수분 결핍의 경우 수분응력의 비탈력화, 세포팽압 감소, 뿌리 수분포텐셜 저하, 기공감소, 증산작용 저하, 작물 수분 장해, 뿌리 경화 등 스트레스 요인에 노출되는 시간, 강도에 따라 다양한 반응을 나타내며, 이는 결국 작물의 생산량 저하 및 품질 악화를 초래하게 된다 (Woo,

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

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

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

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

† Corresponding author

Tel.: +82-63-238-4161 Fax: +82-63-238-4145

E-mail: yhchoi82@korea.kr

Received: July 24, 2019

Revised: August 19, 2019

Accepted: August 19, 2019

2003; Limpus, 2009).

작물 수분상태 (crop water status)는 대기환경 조건, 유효 토양수분량, 증발량, 작물체 내 수리저항성 그리고 작물 뿌리의 수분 흡수능 등 여러 요인에 따라 작물의 반응을 측정하는 것이며, 토양 수분보다 더 민감한 지표라 할 수 있다 (Jones, 2010). 작물 수분 스트레스를 직·간접적으로 측정 및 진단하는 방법들은 다양하다. 비교적 정확성이 높아 널리 사용되고 있는 기공 전도도, 엽수분포텐셜, 상대수분함량 등과 같이 직접 측정하는 방법은 측정에 소요되는 시간 및 노력이 크고, 시·공간 변이분석이 어려운 단점이 있다 (Scholander et al., 1965; Zarco-Tejada et al., 2012; Bellvert et al., 2016). 이를 극복하기 위해 최근 들어 적외선 온도측정과 분광식생지수 산정 등 관련 연구들이 많이 이루어지고 있다 (Kim et al., 2015; O'Shaughnessy et al., 2012; Calera et al., 2017; Amatya et al., 2012). 엽온과 반사율 등 대상영역의 측정값을 정확하게 수집하기 위해서는 분할 및 추출 등과 같은 별도의 영상처리 과정이 필요하기 때문에 측정과정이 쉽고 신속한 적외선 온도측정과 같은 비파괴적인 방법과 관련된 분야의 연구들이 많이 늘어나고 있다 (O'Shaughnessy et al., 2012; Ihuoma and Madramootoo, 2017; Amatya et al., 2012).

작물 수분스트레스를 진단하고 처방에 활용하는 연구들이 미국 등에서 많이 이루어지고 있다. O'Shaughnessy et al. (2012)은 적외선센서를 이용해 작물 외관부 엽온의 시·공간 변이를 분석하여, 적정 관개계획 의사결정모델을 개발하는데 활용하였다. Osroosh et al. (2015)은 한낮시간대 (midday)의 사과나무를 대상으로 계산된 작물 수분 스트레스 지수 (Crop Water Stress Index, CWSI)와 줄기 수분 포텐셜 사이의 높은 상관관계를 규명하고, 단일 CWSI의 임계값을 사용하는 기존 방법과 달리 CWSI의 추세를 분석하여 상황에 따라 임계값을 달리 하는 동적 관개제어 알고리즘을 개발하였다. Erdem et al. (2010)은 브로콜리 재배를 위한 점적 관수시설의 관개계획 수립을 위해 경험적인 CWSI를 활용한 연구를 수행하여, CWSI를 0.51로 적용하였을 때 수확량이 가장 많다고 하였다. 또한 CWSI를 활용하여 브로콜리 수확량을 예측할 수 있는 모형도 개발하였다. 우리나라에서는 포그분사와 공기유동에 의한 온실재배 토마토의 엽온 변화 연구 (Nam et al., 2014), 배수방법이 토양수분 및 포도의 광합성 특성과 생육에 미치는 영향 (Choi et al., 2017) 등 작물의 수분스트레스와 관련된 연구들이 진행되었으나, 아직 초기 단계의 연구로 실용적인 기술 개발을 위해서는 많은 연구가 필요하다.

농업 생산성 보전과 농업인의 소득 안정을 위해서는 무엇보다도 정확한 관개계획, 즉 관개하는 시기와 양을 결정하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 관개량

수준을 다르게 하여 인위적으로 사과나무에 수분 스트레스를 발생하게 하였으며, 엽온의 변화 및 기상 상황을 측정하였다. 이를 통해 사과나무의 수분 스트레스 차이를 통계적으로 비교하였으며, 엽온과 기상 측정을 통해 비파괴적으로 작물의 물관리가 가능한지 확인하였다.

II. 연구방법

1. 대상 작물 및 시험구 조성

본 연구에서는 4년생 '시나노 스위트' 사과나무 (*Malus domestica* Borkh cv. Sinano Sweet)를 대상으로 2018년 6월부터 9월까지 연구를 수행하였다. 약 2 m 간격으로 1열 재배 중인 사과 재배지의 일부 구간에서 사과나무 3~4 그루씩 묶어 3개의 처리구로 구분하였으며, 각 처리구의 물 관리 방법에 따른 수분 스트레스를 산정하기 위하여 관개량을 다르게 하였다. 사과나무에 인위적으로 수분 스트레스를 주기 위하여 관개를 하지 않고 강우에 의존하여 물관리가 된 구역 (처리구-1, Tr-1), 누적 증발산량의 50%를 관개한 구역 (처리구-2, Tr-2) 그리고 누적 증발산량의 75% 관개한 구역 (처리구-3, Tr-3)으로 조성하였다. 물관리는 농업기술 길라잡이-사과재배 (RDA, 2016)를 참고하여 4~5일 간격을 기준으로 하였으나, 강우량에 따라 관개량 및 간격을 탄력적으로 조절하였다.

작물에 필요한 관개량은 증발산량을 기준으로 산정하였으며, 본 연구에서는 국제연합식량농업기구 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)에서 공식적으로 사용하고 있는 Panman-Moteith Equation을 활용하여 산정하였다 (Doorenbos and Pruitt, 1997). Panman-Moteith Equation은 태양복사에너지 또는 일조시간 (sunshine duration), 최고기온, 최저기온, 최대상대습도, 최저상대습도, 그리고 풍속 등을 이용하여 증발산량을 산정하는 방법이다 (Eq. 1).

$$ET_c = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left\{ \frac{900}{(T_{mean} + 273)} \right\} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \times K_c \quad (1)$$

여기서, ET_c 는 실제증발산량 (mm/day)이고, R_n 은 순복사량 (MJ/m²/day), G 는 토양 열 유속밀도 (MJ/m²/day), T_{mean} 은 2 m 높이에서의 일평균기온 (°C), u_2 는 2m 높이에서의 풍속 (m/s), e_s 는 포화증기압 (kPa), e_a 는 실제 증기압 (kPa), Δ 은 증기압 곡선의 기울기, γ 는 건습계 상수 (kPa/°C) 그리고 K_c 는 작물계수이다.

관개수준별 시험구 사이의 수분 이동을 차단하기 위하여 지하 40 cm 깊이까지 물막이 판을 설치하였고, 외부에서 유입되는 물을 차단하기 위한 간이 배수로도 조성하여, 관개량을 제외한 다른 요소들의 영향이 없는 독립적인 시험포로 유지 관리 하였다.

2. 작물 수분 스트레스 지수 산정

CWSI는 작물이 수분에 대하여 느끼는 스트레스 정도를 0에서 1사이의 값으로 표현하는 지수 중 하나이다. 작물의 엽온이 대기온도보다 1~4도 정도 낮은 경우에 작물의 증산이 최대가 되며, 이때의 CWSI는 0이 된다. 반대로 작물의 엽온이 대기온도보다 4~6도 정도 높을 경우에 작물은 증산 활동을 하지 않게 되며, CWSI가 1이 된다 (Jones, 2004; O'Shaughnessy et al., 2012).

CWSI를 산정하는 방법에는 경험적 방법과 이론적 방법이 있다. Idso et al. (1981)에 의해 개발된 CWSI 경험식 (empirical CWSI)은 대기온도와 엽온 그리고 상대습도의 3가지 자료를 사용하여 간편하게 산정할 수 있다. 그러나 작물 생장에 있어 대기온습도 뿐만 아니라 구름의 양 또는 맑은 날과 흐린 날과 같이 서로 다른 날씨에 대한 매개 변수들이 고려될 필요가 있었고, Jackson et al. (1981)이 풍속, 일사량의 영향도 고려할 수 있는 CWSI 이론식 (theoretical CWSI)을 개발하였다.

CWSI 이론식은 에너지 수지방정식을 기본으로 하며, 대기 온습도, 엽온, 순복사량, 풍속 그리고 작물의 초장을 이용하여 산정된다. 작물이 증산작용을 할 경우 T_c 와 T_{wet} 이 같고, CWSI는 0이다. 반대로 증산작용을 하지 않을 경우 T_c 는 T_{dry} 와 같고, CWSI는 1이 된다 (Agam et al., 2013). 본 연구에서는 CWSI 이론식을 이용하였으며 (Eq. 2~4), 10분 간격으로 수집된 기상 및 엽온 자료를 바탕으로 계산된 10분 단위 CWSI를 활용하여 일평균 CWSI를 산정하였다.

$$CWSI = \frac{(dT - dT_i)}{(dT_u - dT_i)} \quad (2)$$

$$dT_u = r_a(R_n - G) / YC_p \quad (3)$$

$$dT_i = [r_a(R_n - G) / (YC_p)] [K / (\sim + K) - VPD / (\sim + K)] \quad (4)$$

여기서, dT 는 엽온과 대기온도간의 차이 (°C), dT_u 는 수분 스트레스로 인해 증산이 일어나지 않는 시간의 엽온과 대기 온도간의 차이 (°C), dT_i 는 충분한 관개로 인해 수분스트레스

가 없을 때의 엽온과 대기온도간의 차이 (°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 ($1013 J/kg \cdot ^\circ C$), VPD는 증기압차 (kPa) 그리고 G 는 토양의 비열 (W/m^2)이다.

CWSI의 산정에 필요한 작물의 엽온 측정은 적외선 센서 (SI-431, Apogee, USA) 를 활용하였다. 적외선 센서의 시야각을 고려하여 사과나무 끝단에 위치한 잎의 15~20 cm 떨어진 위치에 적외선 센서를 고정하여 설치하였고, 햇볕에 노출된 잎의 온도를 10분 간격으로 연속 측정하였다. 대기 온습도 센서 (SHT110, Mireasense, Korea), 일사량계 (PYRANO-70, Mireasense, Korea), 자기우량계 (WDR-205, Weedam, Korea) 그리고 풍속계 (AKIT1, DFrobot, Korea) 등 기상 관측용 센서를 설치하고, 10분 간격으로 연구지역의 엽온 및 기상 데이터를 수집하였다.

본 연구는 수분 스트레스가 발생할 때 사과나무 잎이 기공을 닫아 증산 작용이 감소하고, 그에 따라 엽온이 증가하는 것을 바탕으로 하여 시험을 계획하였다. 따라서 비가 오거나 흐린 날처럼 사과나무의 증산 작용이 다른 요인으로 변화할 수 있는 기간은 분석에서 제외하였다. 또한 Guisard (2008), Garcia y et al. (2014)의 연구에서 오전 10시부터 오후 3시까지 증산 활동이 가장 활발하다고 보고된 사례를 참고하여 본 연구에서도 오전 10시부터 오후 3시까지 측정된 누적일사량을 비교하여 맑은 날로 추정되는 기간을 선택하였다.

3. 통계학적 분석

엽온과 처리구로부터 산정된 CWSI의 평균에 대한 통계적 차이가 나타나는지 분산분석 (ANOVA test)을 통해 확인하였다. 처리에 따른 집단의 평균을 크기순으로 정리하고, 평균의 위치에 따라 서로 다른 기준 값을 적용하여 처리간의 유의차가 인정될 때 어느 것과 차이가 있는지를 분석하는 Duncan's multiple range test를 사용하였다. 또한 처리에 따른 엽온과 CWSI에 대해 기상자료와의 피어슨 상관계수 (Pearson's correlation coefficient)를 산정하고, 기상 자료와의 상관관계 유무를 판단하였다. 피어슨 상관계수는 코시-슈바르츠 부등식 (Cauchy-Schwarz inequality)에 의해 변수 사이의 선형 관계를 1에서 -1까지의 척도로 표현하는 통계 값이다. 상관계수가 1이면 두 변수가 완전한 양의 상관관계가 있고, -1이면 완전한 음의 상관관계가 있음을 의미한다. 그리고 0의 값으로 가까워질수록 관계가 적은 것으로 표현한다. 분산분석과 피어슨 상관관계 등의 통계분석은 SAS Enterprise 7.1 프로그램을 이용하였으며, 유의수준은 0.05를 기준으로 분석하였다.

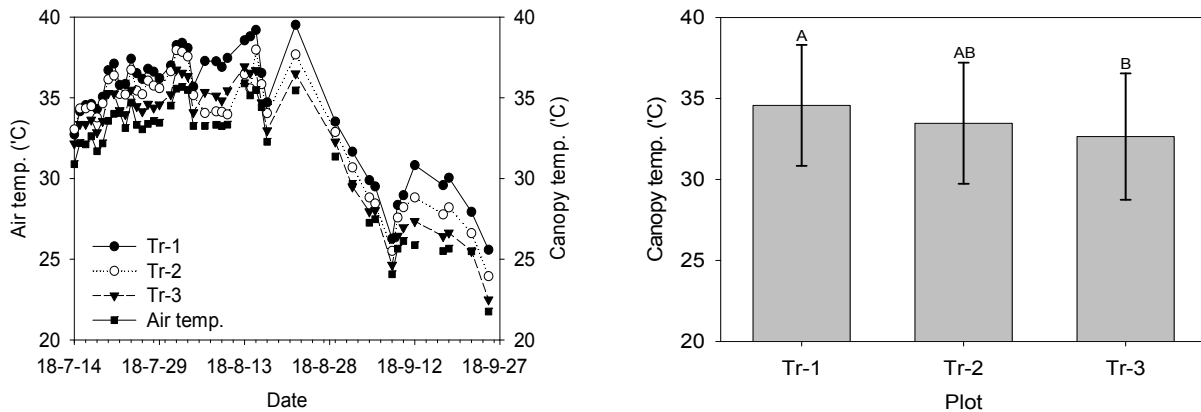


Fig. 1 Comparison of canopy temperature depending upon irrigation treatment schemes (note: A, B groups by Duncan's multiple range test)

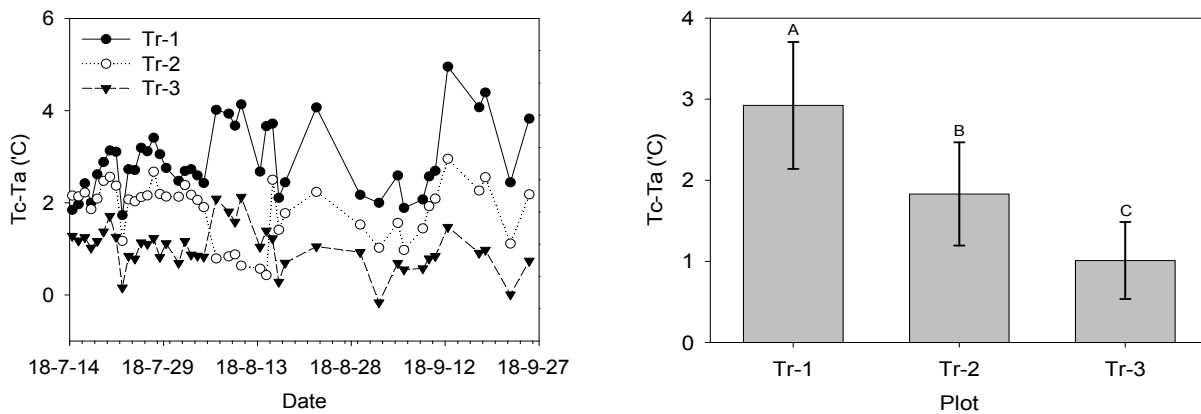


Fig. 2 Comparison of $(T_c - T_a)$ depending upon irrigation treatment schemes (note: A, B, C groups by Duncan's multiple range test)

III. 연구결과

1. 관개수준별 엽온의 변화

연구기간인 2018년 7월 14일부터 9월 27일까지 총 76일 동안 10시부터 15시까지의 평균 기온은 $20.2^{\circ}\text{C} \sim 35.9^{\circ}\text{C}$ (평균 29.6°C)이며, 누적일사량은 $0 \sim 15.9 \text{ MJ}$ (평균 10.7 MJ/m^2)로 나타났다. 본 연구에서는 누적일사량이 12 MJ/m^2 이상인 기간을 대상으로 하였으며, 이는 총 연구기간인 76일 중 43일에 해당 (누적 일사량의 상위 60%)하는 것으로 나타났다. 연구기간 동안 $0.5 \sim 80.5 \text{ mm/day}$ 의 크고 작은 강우가 16회 (누적 강우량 379.0 mm)가 발생하였다.

시험구별 측정된 엽온의 범위 (평균±표준편차)는 처리구-1에서 $25.6 \sim 39.5^{\circ}\text{C}$ (34.6 ± 3.7), 처리구-2에서 $24.0 \sim 38.0^{\circ}\text{C}$ (33.5 ± 3.7), 처리구-3에서 $22.5 \sim 37.0^{\circ}\text{C}$ (32.6 ± 3.9)로 처리구-3에서 가장 낮게 나타났다. 대기온도와 엽온의 변화는 7월부터 8월 중순까지 상승하다가 8월 중순 이후로 하강하는 경향이 나타났다. Duncan's multiple range test 결과 A와 AB 그리고

B의 두 그룹으로 나누어졌고, 처리구-1과 처리구-3 사이에는 통계적으로 유의한 차이가 나타나는 것으로 분석되었다 (Fig. 1).

작물의 증산 작용과 관련된 엽온과 대기온도의 차이 (Canopy temperature-Air temperature, $T_c - T_a$)는 Fig. 2에서 보이는 것과 같이 관개량 처리에 따라 확연한 차이가 나타났다. 시험구별 엽온-대기온도의 범위 (평균±표준편차)는 처리구-1에서 $1.73 \sim 4.95^{\circ}\text{C}$ (2.92 ± 0.78), 처리구-2에서 $0.43 \sim 2.96^{\circ}\text{C}$ (1.83 ± 0.64), 처리구-3에서 $-0.16 \sim 2.12^{\circ}\text{C}$ (1.01 ± 0.47)로 처리구-3에서 가장 낮게 나타났다. Duncan's multiple range test 결과 A와 B 그리고 C의 세 그룹으로 나누어졌고, 통계적으로 유의한 차이가 나타나는 것으로 분석되었다.

엽온은 기온, 일조량과 풍속간에는 양 (+)의 상관관계를 나타낸 반면, 상대습도와는 음 (-)의 상관관계가 나타났다. 엽온과 기온의 상관계수가 0.9 이상으로 높은 상관성을 보였으나, 나머지 항목에서의 상관계수가 0.3 이하로 비교적 낮은 상관성을 갖는 것으로 분석되었다 (Table 1).

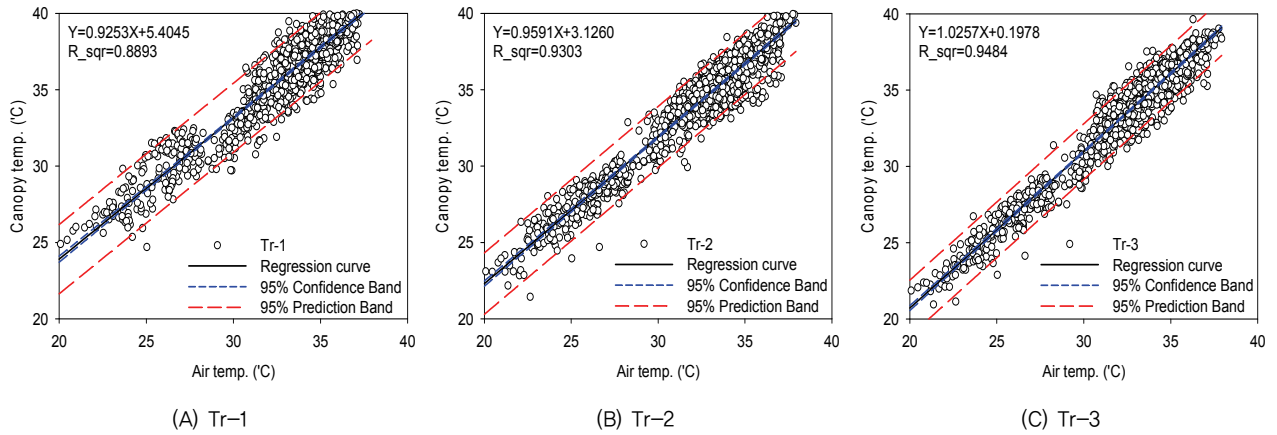


Fig. 3 Linear regression of canopy temperature with a change of air temperature

Table 1 Pearson correlations between meteorological data and canopy temperature (n=1,290)

Class.	Air temperature	Relative humidity	Solar radiation	Wind speed
Tr-1	0.949 < 0.0001	-0.186 < 0.0001	0.237 < 0.0001	0.232 < 0.0001
Tr-2	0.938 < 0.0001	-0.194 < 0.0001	0.240 < 0.0001	0.207 < 0.0001
Tr-3	0.936 < 0.0001	-0.220 < 0.0001	0.232 < 0.0001	0.267 < 0.0001

상관성이 높은 기온과 엽온의 회귀곡선을 도시하면 관개를 하지 않았을 때보다 관개량이 많아졌을 때 Y 절편이 아래쪽에 위치하며, 회귀곡선의 위치와 함께 데이터가 분포된 위치도 Y축 방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 3). 또한 엽온이 40°C에 도달할 때 예상되는 기온이 처리구-1은 37.4°C, 처리구-2은 38.4°C, 처리구-3는 38.8°C이며, 기온이

35°C 일 때 예상되는 엽온은 처리구-1은 37.8°C, 처리구-2은 36.7°C, 처리구-3는 36.1°C로 예측되었다. 이는 35°C 이상의 폭염에서도 물 관리에 따라 엽온 또는 기온을 2°C 정도 낮게 유지 할 수 있다는 것을 의미하며, 최종적으로는 작물이 느끼는 수분 스트레스의 정도에도 영향을 줄 것으로 판단된다. 그러나 현재 기온 수준을 벗어나 기온이 40°C 이상이 되면 엽온의 증가가 물 관리와 관계없이 동일한 수준까지 올라갈 것으로 예측되기 때문에 관련 분야의 지속적인 연구와 이상 기후에 대처할 수 있는 관개 기술 및 작물 관리 기술이 추가적으로 필요할 것으로 사료된다.

2. 관개수준별 작물 스트레스 지수 비교

시험구별 산정된 CWSI의 범위 (평균±표준편차)를 비교하면 처리구-1에서 0.52~0.98 (0.79±0.10), 처리구-2에서 0.47~0.94 (0.71±0.11), 처리구-3에서 0.40~0.85 (0.64±0.09)로 나타났다. 시험 준비기간 동안 충분한 물을 모든 시험구에 주었기

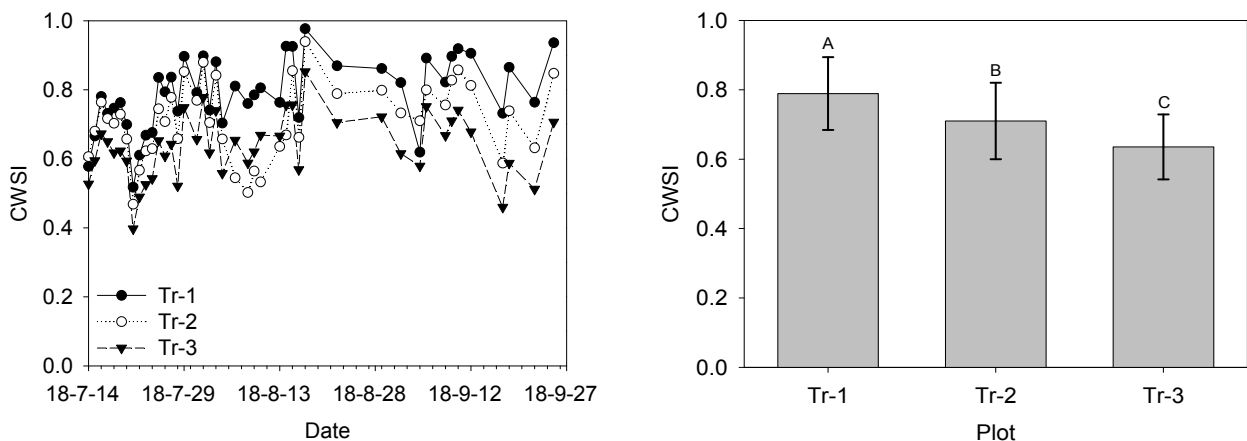


Fig. 4 Comparison of CWSIs depending upon irrigation treatment schemes (note: A, B C groups by Duncan's multiple range test)

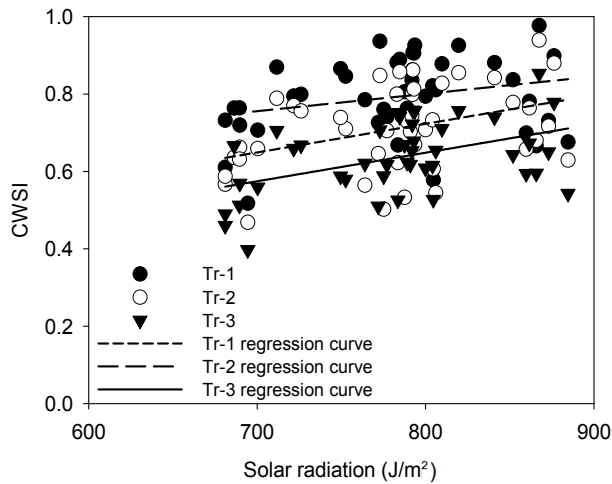
Table 2 Pearson correlations between meteorological data and CWSI

(n=1,290)

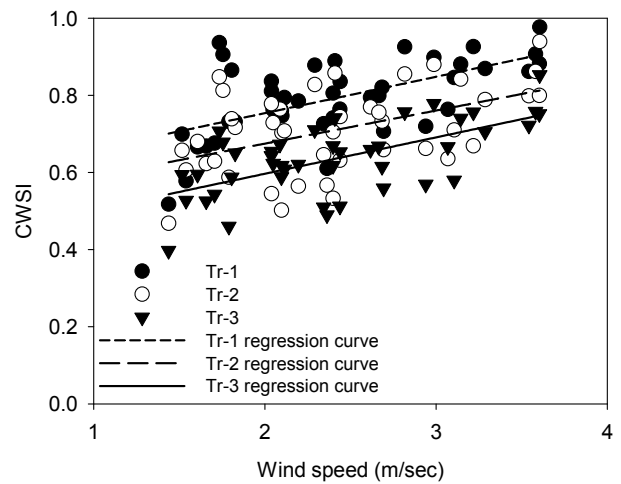
Class.	Air temperature	Canopy temperature	$T_c - T_a$	Relative humidity	Solar radiation	Wind speed
Tr-1	0.005 0.8541	0.119 <0.001	0.386 <0.001	-0.452 <0.001	0.653 <0.001	0.528 <0.001
Tr-2	-0.009 0.7520	0.085 0.0022	0.352 <0.001	-0.472 <0.001	0.666 <0.001	0.504 <0.001
Tr-3	0.146 <0.001	0.232 <0.001	0.406 <0.001	-0.524 <0.001	0.684 <0.001	0.541 <0.001

때문에 연구기간 초기에는 처리에 따라 수분 스트레스 환경이 조성되지 못하여 관개량에 따른 CWSI의 차이가 크지 않은 것으로 판단된다. 시험기간이 지속됨에 따라 처리구-1의 CWSI가 점차 높아지는 경향이 두드러지게 나타났다. 8월 초기에 처리구-3에서 처리구-2보다 CSWI가 높게 산정된 기간

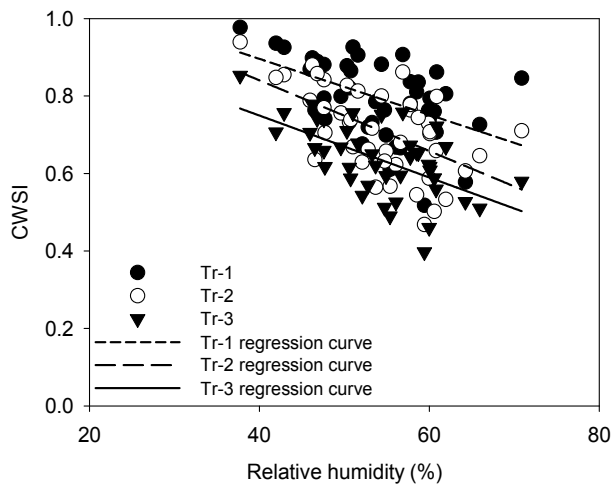
이 나타났다. 이는 시험에서 물 관리를 제외하면 동일한 생육 환경 조건을 연구에서 유지하고자 하였으나, 작물의 생육 현황과 생리적인 활동 또는 측정 기기의 오차 등 내적·외적으로 많은 다른 요인의 발생이 가능하기 때문에 추가적인 검토가 더 필요할 것으로 판단된다. Duncan's multiple range test



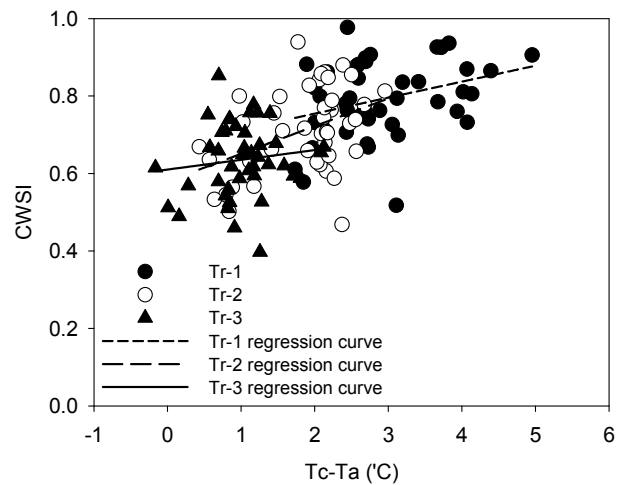
(A) Solar radiation vs. CWSI



(B) Wind speed vs. CWSI



(C) Relative humidity vs. CWSI



(D) $T_c - T_a$ vs. CWSI

Fig. 5 Effects of meteorological data on CWSI

결과 A와 B 그리고 C의 세 그룹으로 나누어졌고, 통계적으로 유의한 차이가 나타나는 것으로 분석되었다 (Fig. 4). 엽온-대기온도의 분산분석 결과와 동일한 결과가 나타났다. 이는 작물 스트레스 지수의 산정에 있어 단순히 작물 엽온의 증감에 영향을 받는 것이 아니고, 대기온도와 풍속 그리고 습도 등 기상학적 요인들이 복합적으로 기인하기 때문인 것으로 판단된다.

CWSI는 일조량과 풍속 그리고 엽온-대기온도 (T_c-T_a) 사이에서 양 (+)의 상관관계가 확인되었고, CWSI와 상대습도는 음 (-)의 상관관계가 나타났다. CWSI와 기온과 엽온 사이에서는 상관관계가 약한 것으로 분석되었다 (Table 2).

McCann et al. (1992)의 연구에 따르면 CWSI와 풍속 사이에는 양의 상관관계가 있음을 밝힌 데 반해, O'Toole and Hatfield (1983)는 두 항목간에는 음의 상관관계가 나타났다고 보고하였다. 이처럼 CWSI가 측정된 엽온과 기상 인자들을 개발된 공식에 따라 산정된 지수이기 때문에 특정 기상 인자들의 상관관계가 매우 높다거나 또는 전혀 없다고 확정할 수는 없을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 일사량 ($R=0.684$), 풍속 ($R=0.541$), 상대습도 ($R=0.524$) 그리고 엽온-대기온도 ($R=0.406$) 순으로 상관관계가 높게 나타났다.

기상인자에 대한 CWSI의 분포를 보면 Fig. 5와 같다. 전체적으로 일사량과 풍속이 증가할수록 CWSI가 증가하는 경향이 나타나는 반면, 상대습도는 증가할수록 CWSI가 감소하는 경향이 나타났다. 동일한 기상 조건에서 처리에 따라 기온의 변화는 작지만 Y축 방향으로 수평이동 하는 것을 확인할 수 있다. 또한 엽온-대기온도 (T_c-T_a) 항목에서는 CWSI의 분포가 처리에 따라 원점 방향으로 군집 이동하는 것을 볼 수 있다. 전체적으로 데이터의 분포 이동에서 보이듯이 동일한 기상 조건에서 관개 조건에 따라서 작물의 스트레스가 증감하는 것을 보여주는 것을 의미하며, 엽온의 관측 및 CWSI의 산정을 통해 관개 관리가 가능 할 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 현재 작물별로 관개 관리를 할 수 있는 CWSI 기준 또는 관개 시점 등의 연구가 미비하기 때문에 구체적인 기준 마련을 위한 추가적인 연구가 필요하다고 할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 사과나무의 물관리 방법에 따른 스트레스의 변화를 수치적으로 산정하여 비교·평가하였다. 독립적인 사과나무 시험구를 조성하여 물 관리를 제외한 다른 요인들은 동일하게 관리하였으며, 무관개 시험구와 누적 증발산량의 50% 수준으로 관개하는 시험구 그리고 누적 증발산량의 75% 수준으로 관개하는 시험구로 3 처리하였다. 사과나무 끝단에

위치한 잎의 엽온을 측정하여 CWSI를 산정한 결과는 다음과 같다.

1. 시험구별 측정된 평균 엽온은 처리구-1에서 34.6°C, 처리구-2에서 33.5°C, 처리구-3에서 32.6°C로 나타났다. 엽온에서 대기온도를 뺀 값의 평균은 처리구-1에서 2.92°C, 처리구-2에서 1.83°C, 처리구-3에서 1.01°C로 나타났다. CWSI는 처리구-1에서 0.79, 처리구-2에서 0.71, 처리구-3에서 0.64로 나타났다. 엽온과 엽온-대기온도 그리고 CWSI는 처리구-3에서 가장 낮은 값이 관측되었으며, 시험처리에 따라 통계적으로 유의한 차이가 나타나는 것으로 분석되었다.
2. CWSI의 산정은 복합적인 기상요인의 영향을 받아 특정 요인의 원인이라고 단정할 수는 없지만 본 연구에서는 CWSI과 일조량과 풍속 그리고 엽온-대기온도 (T_c-T_a) 사이에서 양 (+)의 상관관계가 확인되었고, CWSI와 상대습도는 음 (-)의 상관관계가 나타났다.
3. 기상인자와 CWSI의 분포도에서 물관리에 따라 분포하는 위치의 차이가 뚜렷하게 나타났다. 물 관리를 제외한 동일한 기상 조건에서 관개 증감에 따라서 엽온 및 작물 스트레스 지수가 증감하는 경향이 뚜렷하게 나타났다.

본 연구에서는 관개수준별 변화하는 작물 수분 스트레스 지수를 확인함으로써 엽온 측정 및 작물 수분 스트레스 지수를 이용하여 작물의 관개 관리가 가능하다는 것을 보여주고자 하였다. 하지만 현재의 연구수준에서 CWSI와 관련된 구체적인 관개 기준을 제시 할 수 없기 때문에 작물별 관개 시점과 관개 기준 등의 추가적인 연구가 필요하다고 할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 (세부과제번호: PJ012759012018)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

1. Agam, N., Y. Cohen, J.A.J. Berni, V. Alchanatis, D. Kool, A. Dag, U. Yermiyahu, and A. Ben-Gal, 2013. An insight to the performance of crop water stress index for olive trees. *Agricultural Water Management* 118: 79-86. doi: 10.1016/j.agwat.2012.12.004.
2. Aguilar, J., D. Rogers, and I. Kisekka, 2015. Irrigation scheduling based on soil moisture sensors and

- evapotranspiration. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports* 1(5): 1-6. doi:10.4148/2378-5977.1087.
3. Amatya, S., M. Karkee, A. K. Alva, and B. Adhikari, 2012. Hyperspectral imaging for detecting water stress in potatoes. *American Society of Agricultural and Biological Engineers 2012 Annual Meeting*, Dallas, Texas. 29. July-1. August, 2012. doi:10.13031/2013.42218.
 4. Bellvert, J., J. Marsal, J. Birona, V. Gonzalez-Dugo, E. Fereres, S. L. Ustin, and P. J. Zarco-Tejada, 2016. Airborne thermal imagery to detect the seasonal evolution of crop water status in peach, nectarine and saturn peach orchards. *Remote Sensing* 8(1): 39-56. doi:10.3390/rs8010039.
 5. 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.
 6. Calera, A., I. Campos, A. Osann, G. D'Urso, and M. Menenti, 2017. Remote sensing for crop water management: From ET modeling to services for the end users. *Sensors* 17(5): 1104-1129. doi:10.3390/s17051104.
 7. 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.
 8. Doorenbos, J., and W. O. Pruitt, 1977. Crop Water Requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Rome, Italy. p15-29.
 9. Dresselhaus, T., and R. Hüchelhoven, 2018. Biotic and abiotic stress responses in crop plants. *Agronomy* 8(11): 267-272. doi:10.3390/agronomy8110267.
 10. 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.
 11. Erdem, Y., S. Şehiralı, T. Erdem, and D. Kenar, 2006. Determination of crop water stress index for irrigation scheduling of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Turkish Journal of Agricultural and Forestry* 30(3): 195-202.
 12. Garcia y, A. G., 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.
 13. Guisard, Y., 2008. Crop canopy temperature as indicator of water stress: application to grapevines. Doctoral thesis, Charles Sturt University, Australia.
 14. Idso, S. B., R. D. Jackson, P. J. Pinter, R. J. Reginato, and J. L. Hatfield, 1981. Normalizing the stress-degreeday parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology* 24: 45-55. doi:10.1016/0002-1571(81)90032-7.
 15. Ihuoma, S. O., and C. A. Madramootoo, 2017. Recent advances in crop water stress detection. *Computers and Electronics in Agriculture* 141: 267-275. doi:10.1016/J.compag.2017.07.026
 16. 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.
 17. Jones, H. G., 2004. Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. *Advances in Botanical Research* 41: 107-163. doi:10.1016/S0065-2296(04)41003-9.
 18. 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.
 19. Kim, M., S. Kim, Y. Kim, Y. Choi, and M. Seo, 2015. Infrared estimation of canopy temperature as crop water stress indicator. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 48(5): 499-504. doi:10.7745/KJSSF.2015.48.5.499.
 20. Kim, S. W., and S. J. Kim, 1988. Study on the estimation of project duty of water and facility capacity in upland irrigation - on the estimation of duty of water for the upland crops by the measurement of evapotranspiration. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 30(4): 23-44 (in Korean).
 21. Limpus, S., 2009. Isotropic and anisotropic characterisation of vegetable crops. Department on Primary Industries and fisheries, Queensland.
 22. 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.
 23. McCann, I. R., J. C. Stark, and B. A. King, 1992.

- Evaluation and interpretation of the crop water stress index for well-watered potatoes. *American Potato Journal* 69: 831-841. doi:10.1007/BF02854191.
24. 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.
 25. 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.
 26. O'Toole J. C., and J. L. Hatfield, 1983. Effect of wind on the crop water stress index derived by infrared thermometry. *Agronomy Journal* 75: 811-817. doi:10.2134/agronj1983.00021962007500050019x.
 28. Rural development administration (RDA), 2016. Agricultural technical note-Apple cultivation. 144-145, Jeonju, Korea. (in Korean).
 27. Scholander, P. F., H. T. Hammel, E. D. Bradstreet, and E. A. Hemmingsen, 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science* 148(3668): 339-346. doi:10.1126/science.148.3668.339.
 28. Song, E. Y., and J. H. Lee, 2012. Plant responses to environmental stresses. *Nanotechnology in Biomedical Science* 32(4): 27-34 (in Korean).
 29. 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>.
 30. Zarco-Tejada, P. J., V. González-Dugo, and J.A.J. Berni, 2012. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote sensing of Environment* 117: 322-337. doi:10.1016/j.rse.2011.10.007.