

복숭아나무의 엽온 및 작물수분스트레스 지수를 이용한 수분스트레스 평가

윤석규¹ · 김성종¹ · 남은영¹ · 권정현¹ · 도윤수¹ · 송승엽¹ · 김민영² · 최용훈² · 김기석³ · 신현석^{4*}

¹농촌진흥청 국립원예특작과학원 과수학과, ²농촌진흥청 국립농업과학원 재해예방공학과, ³서울대학교 바이오시스템·소재학부, ⁴경남과학기술대학교 원예학과

Evaluation of Water Stress Using Canopy Temperature and Crop Water Stress Index (CWSI) in Peach Trees

Seok Kyu Yun¹, Sung Jong Kim¹, Eun Young Nam¹, Jung Hyun Kwon¹, Yun Soo Do¹,
Seung-Yeob Song¹, Minyoung Kim², Yonghun Choi², Ghiseok Kim³, and Hyunsuk Shin^{4*}

¹Department of Horticultural Crop Research, National Institute of Horticultural and Herbal Science, Wanju 55365, Korea

²Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

³Department of Biosystems and Biomaterials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

⁴Department of Horticulture, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju 52725, Korea

Abstract. The study was performed to calculate canopy temperatures and crop water stress index (CWSI) of 2-year-old ‘Yumi’ peach trees using thermal infrared imaging under different soil water conditions, and to evaluate availability for water stress determination. Canopy temperatures showed similar daily variations to air temperatures and they were higher during the daytime than air temperatures. Canopy temperatures for 24 h were correlated highly to air temperatures ($r^2 = 0.95$), solar radiations ($r^2 = 0.74$), and relative humidity ($r^2 = -0.88$). In addition, soil water potential showed a highly negative correlation to canopy temperatures ($r^2 = -0.57$), temperature differences between leaf and air (TD) ($r^2 = -0.71$), and CWSI ($r^2 = -0.72$) during the daytime (11 to 16 h). CWSI for 24 h was highly related to canopy temperatures ($r^2 = 0.90$) and TD ($r^2 = 0.92$), whereas CWSI was not correlated to soil water potential ($r^2 = -0.27$) for 24 h but related highly to water potential ($r^2 = -0.72$) during the daytime (11 to 16 h). Correlation coefficients between CWSI (y) and soil water potential (x) were highest from 11 to 12 h and a regression equation was deduced as $y = -0.0087x + 0.14$. CWSI was calculated as 0.575 at -50 kPa, which soil water stress generally occurs. Thus our result suggests that this regression equation using thermal infrared imaging is useful to evaluate soil water stress of peach trees.

Additional key words : drought, leaf temperature, *Prunus persica*, water deficit

서 론

세계적으로 수자원의 부족에 직면해 있는 실정에서 건조스트레스는 식량자원의 보존을 위협하는 가장 중대한 요인 중 하나이다. 건조스트레스는 식물 생육에 있어서 형태적 수준 또는 분자적 수준에 이르기까지 영향을 주며, 수분 부족은 식물의 계절적 생육 단계에서도 식물체에 영향을 가할 수 있다 (Farooq 등, 2009). 하지만 이러한 건조스트레스는 강우량, 증산량, 토양수분보유력 등 많은 요인들에 의해 영향을 받기 때문에 예측하기가 매우 어렵다 (Wery 등, 1994).

복숭아는 연평균기온 12-15°C에서 재배되는 온대과수로

타 과수작물에 비해 상대적으로 내건성이 강한 것으로 알려져 있음에도 불구하고 최근 몇 년간 이상기상의 영향으로 4주 이상의 장기간의 가뭄이 복숭아 주요 재배지역에서 발생하고 건조 피해 사례가 증가하여 이에 대한 대비책 마련이 필요하다.

이러한 장기간의 가뭄은 단순하게는 관수시설을 설치하여 토양수분 함량을 기준으로 대응하는 것이 가능하지만, 좀 더 효율적인 물 관리를 위해서는 물의 소비량을 최소화하면서 복숭아 과실 품질을 향상시킬 수 있는 수분 관리가 필요하다. 캐노피 온도(canopy temperature)는 증산과정에서 발생하는 냉각효과를 배경으로 1960년대 이후 작물 수분스트레스를 판단하는 지표로서 제안되어 왔다 (Çolak과 Yazar, 2017). 엽온도 측정방법으로는 온도센서를 이용한 접촉식 측정법을 시작으로 최근에는 적외선 온도측정법(infrared thermometry) 또는 열 영상 분석법(thermal imaging)과 같은 원격 측정 기술이 활

*Corresponding author: shin@gntech.ac.kr

Received October 22, 2019; Revised November 30, 2019;

Accepted December 11, 2019

용되고 있다(Fuentes 등, 2012).

작물 수분스트레스 지수(crop water stress index, CWSI)는 식물체 수분 상태를 나타내는 지표로서 모니터링 시스템을 이용하여 원거리에서 상시로 측정할 수 있어 밀, 옥수수 등 대규모 식량 작물 재배에서 관수 시기를 측정하기 위해 널리 이용되어 왔다(Colak과 Yazar, 2017). 이 기술은 점적관수 시스템과 같은 물 절약 관수 시스템과 함께 이용할 때, 상당한 양의 물을 절약할 수 있고 물 생산성을 최대화할 수 있다(Wheaton 등, 2011; Bellvert 등, 2015). 과수 작물에서 CWSI의 활용은 아직 활발하지 않지만, 관수 스케줄링에 CWSI의 적용은 효율적인 관수 시스템으로 평가되고 있다(Wheaton 등, 2011; Bellvert 등, 2015). 하지만 복숭아에서는 적외선 열 영상 자료 및 CWSI를 이용한 관수 스케줄링 연구는 아직 부족한 실정이다.

본 연구는 가뭄 등 건조스트레스에 대응하여 복숭아 과수원의 효율적인 관수 시스템을 구성하는데 필요한 엽 수분스트레스 측정 기술을 확보하고자 수행하였으며, 적외선 열 영상 장치를 이용하여 토양수분 수준에 따른 엽온 및 CWSI를 분석하여 수분스트레스 측정 가능성을 검토하였다.

재료 및 방법

1. 실험재료 및 재배조건

전라북도 완주군에 소재한 국립원예특작과학원 시험포장에서 45 L 플라스틱 화분에 식재된 복숭아 ‘유미’ 2년생 유묘를 사용하였으며, 엽온 변화를 측정하기 위해 강우가 차단된 유리 온실에서 2018년 9월 20일부터 9월 30일까지 수행하였다. 시험구의 대기 기상환경 측정을 위해 하우스 내 대기온도,

일사량, 상대습도 변화를 각각의 측정센서 및 데이터로거(ZF-10M, USAM Co., Korea)를 사용하여 측정하였다.

2. 토양수분 처리

토양수분은 -80, -70, -40, -25kPa로 4수준을 목표로 관수량을 제어하였으며, 토양 수분장력은 텐시오미터 타입의 토양 수분센서(UE-3023, USAM Co., Korea)를 이용하여 모니터링 하였다. 시험에 이용된 복숭아나무는 토양수분 수준별 3주씩 총 12주가 이용되었다. 시험구별 관수량은 텐시오미터로 측정된 토양수분장력 값과 시험구별 1일 증발산량을 기준으로 관수량을 조절하였다. 시험구의 1일 증발산량은 75kg까지 측정가능한 중형 전자저울(HB-75, CASscale Co., Korea)을 이용하여 시험구 화분의 무게 변동을 측정하여 1일 증발산량을 조사하였으며, 이를 기준으로 관수량을 조절하였다.

3. 복숭아 엽 온도 조사

엽 온도 측정은 적외선 열영상 측정장치(T420, FLAR Co., USA)를 이용하여 5분 간격으로 촬영하여 측정하였으며, 촬영된 적외선 열영상 사진은 열영상 분석 소프트웨어(Flir IR, FLAR Co., USA)를 이용하여 온도 값으로 변환하였다(Fig. 1).

4. 작물 수분스트레스 지수(CWSI)

작물은 수분스트레스를 받게 되면 기공을 닫고 증산을 최소화시키게 되는데, 이로 인해 엽온은 상승하며, 이러한 수분스트레스에 대한 엽온 반응을 표현하는 지수의 하나로 CWSI가 활용되고 있다(Jackson 등, 1981). CWSI는 작물이 수분을 감

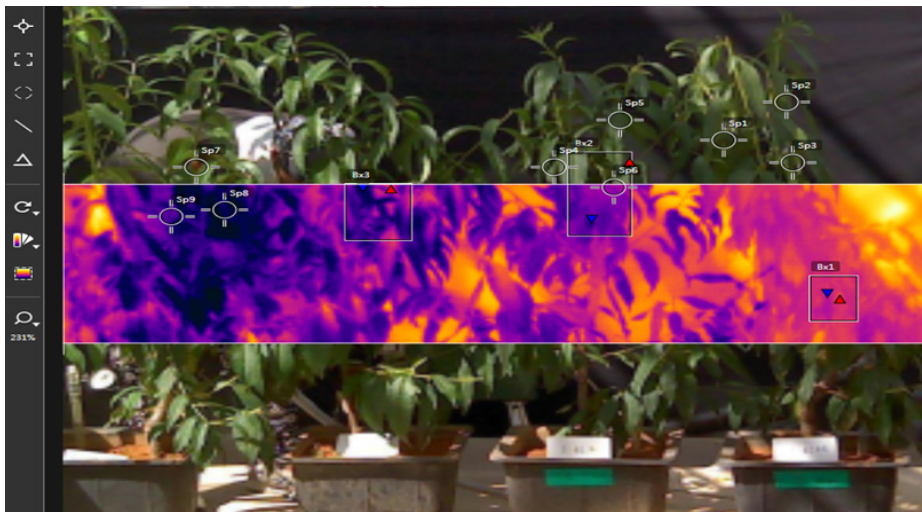


Fig. 1. An example of canopy temperatures of 2-year-old ‘Yumi’ peach trees measured using thermal infrared imaging under different soil water conditions.

Table 1. Correlation coefficients between canopy temperatures (T_{canopy} , °C), measured on 2-year-old ‘Yumi’ peach trees under different soil water conditions (-80, -70, -40, and -25 kPa), and air temperatures, solar radiations, or relative humidity during September 21 to 28th, 2018.

Time (h)	Correlation coefficient (r^2)		
	T_{canopy} vs T_{air}^z	T_{canopy} vs SR^y	T_{canopy} vs RH^x
00~24	0.95	0.74	-0.88
01~06	0.99	—	-0.63
07~10	0.94	0.70	-0.85
11~16	0.68	0.11	-0.41
17~18	0.92	0.40	-0.34
19~24	0.99	0.16	-0.69

^z T_{air} , air temperatures.

^ySR, solar radiations.

^xRH, relative humidity.

지하는 스트레스 정도를 0에서 1사이의 값으로 표현하고, 작물의 엽온이 대기온도보다 1~4°C 정도 낮은 경우에 작물의 증산이 최대가 되며 이때의 CWSI는 0이 된다. 반대로 작물의 엽온이 대기온도보다 4~6°C 정도 높을 경우에 작물은 증산 활동을 하지 않게 되며 CWSI가 1이 된다(Jones, 2004; O’Shaughnessy 등, 2012). CWSI는 식(1)과 같이 계산되며(Eq. 1), 여기서, dT 는 엽온과 대기온도간의 차이(°C), dTu 는 수분 스트레스로 인해 증산이 일어나지 않는 시간의 엽온과 대기온도간의 차이(°C), dTl 은 충분한 관개로 인해 수분스트레스가 없을 때의 엽온과 대기온도간의 차이(°C)를 의미한다.

$$CWSI = (dT_u - dT_l) / (dT - dT_l) \quad (1)$$

5. 통계 분석

실험 결과의 통계 처리는 SAS 프로그램(SAS Institute, Cary, NC, USA)을 사용하여 분산분석(ANOVA)을 하였으며, 5% 유의수준에서 던킨의 다중검정방법(Duncan’s multiple range test)을 수행하였다.

결과 및 고찰

1. 대기온도, 엽온 및 일사량의 일변화

2019년 09월 21일부터 09월 28일까지의 대기온도, 엽온 및 일사량의 변화를 측정된 결과(Fig. 2), 대기온도는 07시경에 일출과 함께 증가하여 20시경에 일몰과 함께 낮아졌으며, 엽

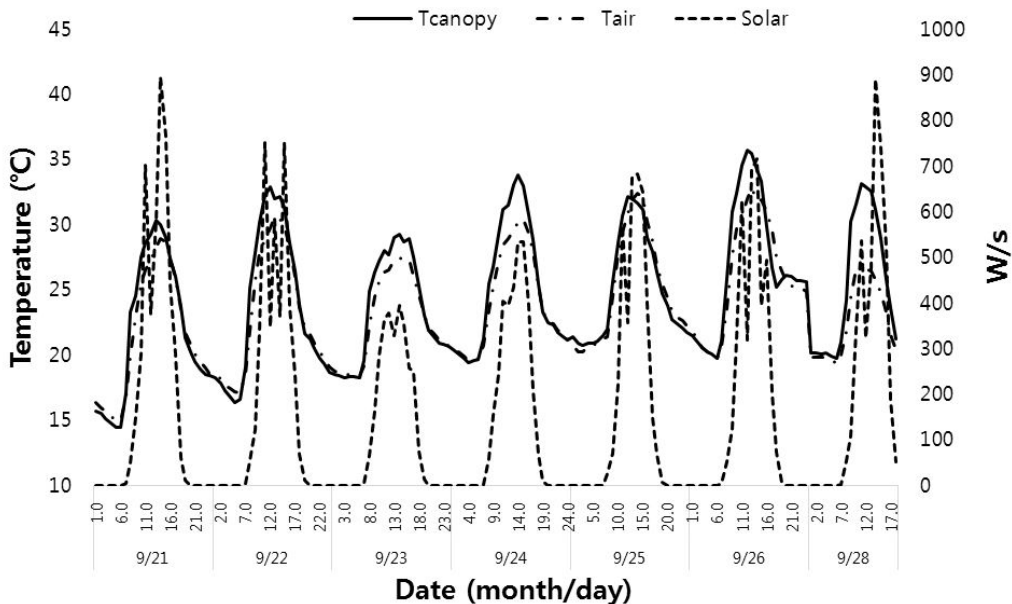


Fig. 2. Canopy temperatures (°C), air temperatures (°C) and solar radiations (W/s) during September 21 to 28th, 2018.

온은 대기온도와 유사한 일변화를 보이며 햇볕이 강한 낮 시간대에는 대기온도보다 높은 양상을 보였다. 또한 일사량의 일변화는 07시에서 10시까지 급격히 증가하고, 11~16시 사이에는 500~1100W/s 범위의 높은 일사량을 유지하고 16~20시까지 서서히 감소하였다. 이러한 시간대별 일사량 변화는 낮 시간대의 대기온도 및 엽온의 상승에 영향을 미치는 것으로 판단되며, 엽온 일변화 분석에 고려해야 할 요인으로 생각된다.

2. 엽온(T_{canopy})과 대기온도, 일사량, 상대습도의 상관관계

엽온과 대기온도, 일사량, 상대습도의 상관분석 결과(Table 1), 전일(24시간) 기준으로 대기온도($r^2 = 0.95$), 일사량($r^2 = 0.74$), 상대습도($r^2 = -0.88$) 모두 상관계수가 높게 나타났다. 엽온과 대기온도의 상관계수는 조사 시간대별로 큰 차이 없이 높게 나타났으며($r^2 = 0.68$ 이상), 엽온은 대기온도에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 엽온과 일사량의 상관계수는 전체적으로는 높지만(24시간, $r^2 = 0.74$), 시간대별로는 차이를 보였는데, 일사량 증가 시간대(7~10시) 및 일사량 하강 시간대(17~18시)에서는 상관계수가 높게 나타났지만, 일사량이 높게 유지되는 시간대(11~16시)에는 상관계수가 낮았다($r^2 = 0.11$). 따라서 일사량 증가 시간대(7~10시) 및 일사량 하강 시간대(17~18시)에 엽온은 일사량의 영향을 크게 받지만, 일사량이 높게 유지되는 시간대(11~16시)에 작물의 엽온 반응이 일사량의 영향은 배제되고 토양수분장력 등 기타 요인의 영향을 받은 것으로 예상된다.

엽온과 상대습도는 전체적으로 높은 부의상관을 나타냈다

($r^2 = -0.88$). 이는 대기온도, 일사량 및 엽온이 높은 낮 시간대에는 상대습도가 낮고 대기온도, 일사량 및 엽온이 낮은 야간 시간대에는 상대습도가 높은 영향으로 판단되며, 높은 상대습도 조건은 수분스트레스에 대한 엽온 반응을 방해할 것으로 추정된다.

3. 토양수분에 따른 엽온 변화

복숭아의 엽온은 9시경부터 현저히 상승하였으며, 토양수분장력이 높은 처리구에서 엽온이 높았다. 특히, 대기온도와 일사량이 높은 10~16시 시간대에 토양수분 처리간에 엽온이 크게 차이를 나타냈다(Fig. 3). 엽-대기온도차($TD = T_{canopy} - T_{air}$)와 CWSI도 엽온과 동일하게 10~16시 시간대에 토양수분장력 수준에 따라 현저한 차이를 나타냈다(Figs. 4 and 5). 이로 보아 온도가 높고 일사량이 강한 10~16시 시간대가 토양수분스트레스에 대한 엽온도 반응이 민감한 시기인 것으로 판단된다.

4. 토양수분과 엽온, 엽-대기온도차(TD), CWSI의 상관관계

토양수분장력과 엽온, 엽-대기온도차, CWSI의 상관분석 결과(Table 2), 24시간 시간대에서는 토양수분장력과의 상관계수는 엽온, 엽-대기온도차, CWSI 각각 $r^2 = -0.21, -0.33, -0.27$ 로 낮았으나, 낮 시간대(11~16시)에는 상관계수가 $r^2 = -0.57, -0.71, -0.72$ 로 높은 부의상관을 나타냈다. 이로 보아 낮 시간대(11~16시)에 엽온, 엽-대기온도차, CWSI는 토양수분장력에 대한 복숭아수체 반응을 효과적으로 반영하는 것으로 판단된다. 특히 엽-대기온도차와 토양수분장력과의 부의상

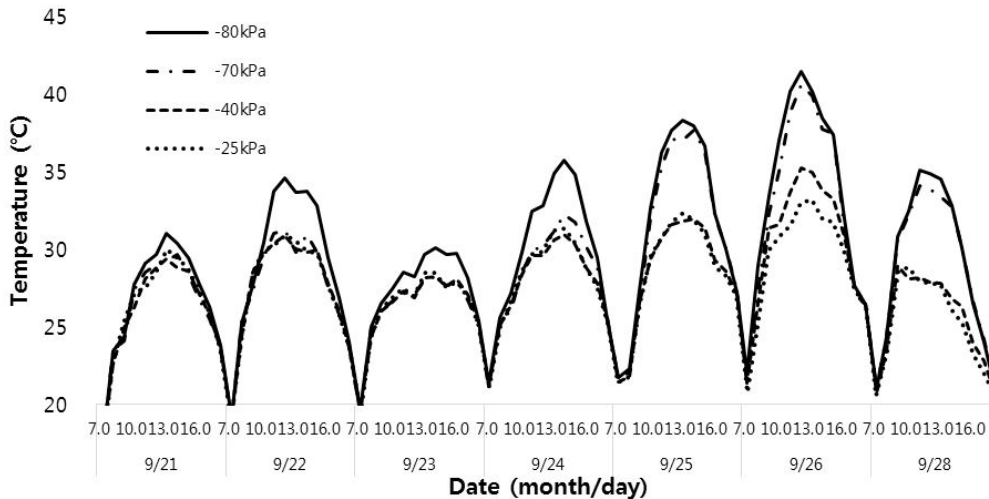


Fig. 3. Canopy temperatures under different soil water conditions (-80, -70, -40, and -25 kPa) during September 21 to 28th, 2018.

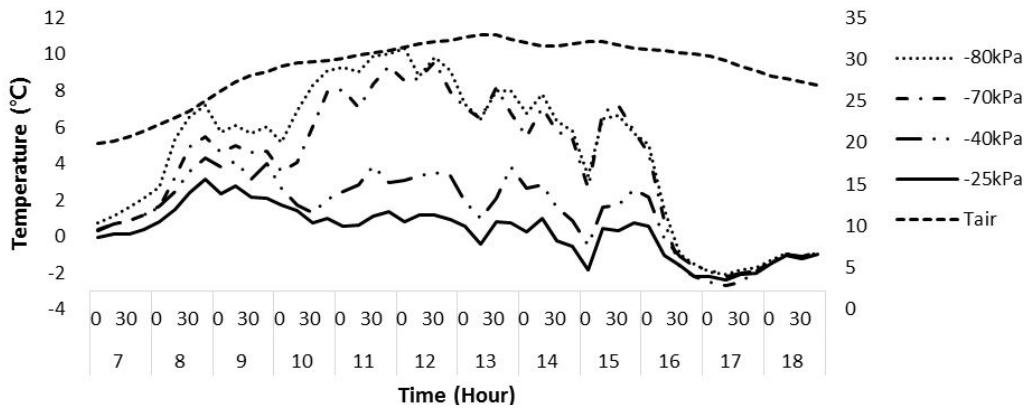


Fig. 4. Temperature differences between canopy and air under different soil water conditions (-80, -70, -40, and -25 kPa) on September 26th, 2018.

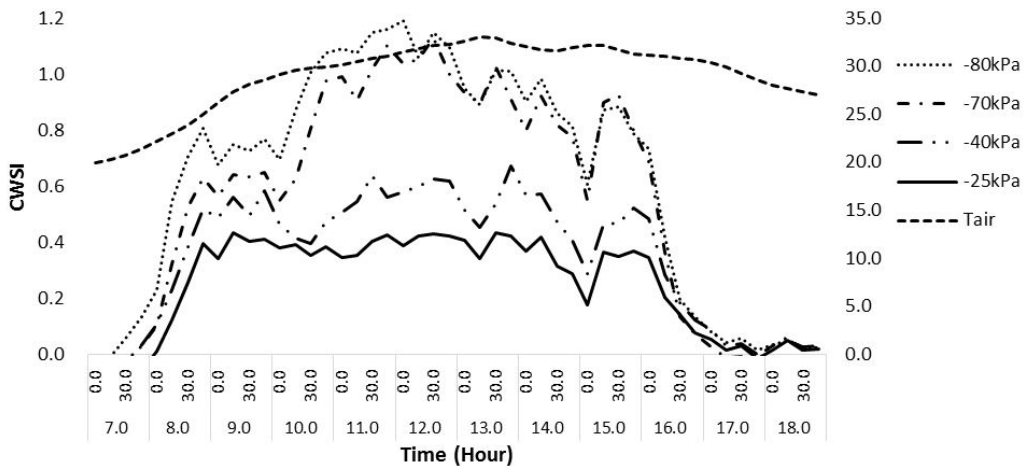


Fig. 5. Crop water stress index (CWSI) under different soil water conditions (-80, -70, -40, and -25 kPa) on September 26th, 2018.

Table 2. Correlation coefficients between soil water potential and canopy temperatures, TD, or CWSI during September 21 to 28th, 2018.

Time (h)	Correlation coefficient (r^2)		
	SWP ^z vs T _{canopy} ^y	SWP vs TD ^x	SWP vs CWSI ^w
00~24	-0.21	-0.33	-0.27
01~06	-0.31	-0.36	-0.39
07~10	-0.20	-0.35	-0.27
11~16	-0.57	-0.71	-0.72
17~18	-0.05	-0.13	-0.20
19~24	-0.36	-0.33	-0.42

^zSWP, soil water potential.

^yT_{canopy}, canopy temperatures.

^xTD, temperature differences between canopy and air.

^wCWSI, crop water stress index.

관은 수확후 관수 부족 처리를 한 조생종 복숭아나무에서도 유사한 경향을 나타냈다(Wang과 Gartung, 2010).

5. CWSI에 대한 영향 요인 분석

CWSI 계산식에 이용되는 엽온, 엽-대기온도차, 토양수분, 대기온도, 일사량, 상대습도 요인의 영향을 살펴보고자, 이들 요인에 대한 상관분석을 실시하였다(Table 3). CWSI와 엽온,

Table 3. Correlation coefficients between crop water stress index (CWSI) and T_{canopy} , TD, SW, T_{air} , SR, or RH during September 21 to 28th, 2018.

Time (h)	Correlation coefficient (r^2)					
	T_{canopy}^z	TD ^y	SW ^x	T_{air}^w	SR ^v	RH ^u
00~24	0.90	0.92	-0.27	0.73	0.65	-0.80
01~06	0.84	0.99	-0.39	0.77	—	-0.56
07~10	0.88	0.95	-0.27	0.68	0.50	-0.73
11~16	0.82	0.99	-0.72	0.15	0.09	-0.26
17~18	0.24	0.85	-0.20	0.12	0.32	-0.14
19~24	0.88	0.85	-0.42	0.83	0.11	-0.83

^z T_{canopy} , canopy temperatures.

^yTD, temperature differences between canopy and air.

^xSW, soil water.

^w T_{air} , air temperatures.

^vSR, solar radiations.

^uRH, relative humidity.

엽-대기온도차의 상관계수는 24시간 기준으로 매우 높았고 ($r^2 = 0.90$, $r^2 = 0.92$), 낮 시간대(11~16시) 기준으로도 매우 높았다($r^2 = 0.82$, $r^2 = 0.99$). 따라서 CWSI는 낮 시간대(11~16시)에도 엽온의 영향을 직접적으로 반영하는 것으로 판단된다. 이러한 CWSI와 엽온의 유사한 변화(높은 상관)는 Wang 과 Gartung (2010)의 연구결과와 유사했다.

CWSI와 토양수분장력의 상관분석에서 24시간 기준으로는 상관관계가 낮았으나($r^2 = -0.27$), 낮 시간대(11~16시)에는 상관관계가 매우 높았다($r^2 = -0.72$). 여러 작물에서 CWSI의 증가와 토양수분스트레스의 증가는 정의상관을 보이는 것으로 보고되었는데(Çolak과 Yazar, 2017; Park 등, 2017), 본 연구의 결과로 볼 때, CWSI는 온도가 높고 일사량이 높은 낮 시간대(11~16시)에 제한적으로 토양수분장력을 반영하는 것으로 판단된다. CWSI에 대한 대기온도, 일사량, 상대습도 상관계수는 24시간 기준으로는 매우 높았으나($r^2 = 0.73$, 0.65 , -0.80), 낮 시간대(11~16시) 기준으로는 매우 낮았다($r^2 = 0.15$, 0.09 , -0.26). 이로 보아 낮 시간대(11~16시)에 CWSI 지수는 토양수분스트레스 및 엽온의 영향은 크게 받지만 상대적으로 대기온도, 일사량, 상대습도의 영향은 적게 받는 것으로 판단된다.

조사되었다. 특히, 11~12시 시간대에 $r^2 = 0.68$ 는 매우 높았으며, 이때 회귀식은 $y = -0.0087x + 0.14$ 였다. 그러므로 토양수분장력에 대한 CWSI 회귀식은 복숭아의 토양수분스트레스 진단에 이용할 수 있을 것으로 예상되며, 일반적인 토양수분스트레스 시점인 -50 kPa 또는 -60 kPa에 해당되는 CWSI는 각각 0.575 , 0.662 로 계산된다. 한편, 본 실험은 토양수분 처리를 위해 비가림 유리온실 조건에서 실시되어 대기온도 및 엽온 값에 있어서 노지 조건과 약간의 차이가 있을 것으로 예상되며 본 연구에서 얻진 CWSI 지수를 노지 조건에 적용하기 위해서는 추가 연구가 필요하다.

이상의 결과에서, 엽온 및 CWSI는 토양수분장력에 대해 높은 상관계수를 나타낸 것으로 보아 복숭아나무의 수분스트레스 진단에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 CWSI를 활용한 토양수분장력 추정 및 수분스트레스 진단은 상관계수 절대값이 높은 낮 시간대(11~16시)가 유리할 것으로 판단된다. 한편, 낮 시간대(11~16시)에 엽온 및 CWSI값은 일사량에 영향을 크게 받을 것으로 생각되었으나, 본 연구에서는 낮 시간대(11~16시)에 오히려 일사량의 영향이 적은 것으로 분석되었다.

6. CWSI를 활용한 토양 수분 스트레스 진단 (적정시간대, 시간대별 회귀분석)

CWSI 지수를 토양수분스트레스 진단에 활용하고자, CWSI와 토양수분장력을 회귀분석한 결과(Fig. 6), CWSI와 토양수분장력의 상관관계 결정계수(r^2)는 조사 시간대에 따라 큰 차이를 보였으며, 7~8시에 $r^2 = 0.02$, 9~10시에 $r^2 = 0.29$, 11~12시에 $r^2 = 0.68$, 13~14시에 $r^2 = 0.66$, 15~16시에 $r^2 = 0.49$ 로

적 요

본 연구는 적외선 열 영상 장치를 이용하여 2년생 ‘유미’ 복숭아나무의 토양수분 수준에 따른 엽온 및 CWSI를 분석하여 수분스트레스 측정 가능성을 검토하였다. 엽온은 대기온도와 유사한 일변화를 보이며 낮 시간대에는 대기온도보다 높은 양상을 보였다. 엽온은 전일(24시간) 기준으로 대기온도($r^2 = 0.95$), 일사량($r^2 = 0.74$), 상대습도($r^2 = -0.88$)와 모두 높은 상

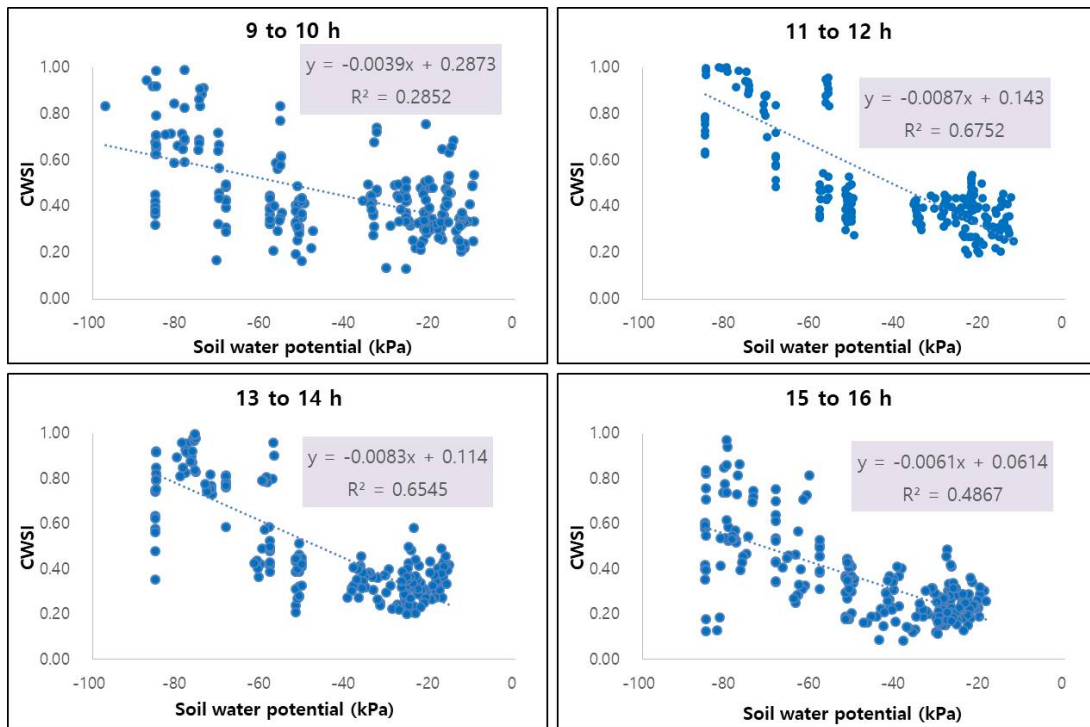


Fig. 6. Regression analysis between soil water condition and crop water stress index (CWSI) under different soil water conditions (-80, -70, -40, and -25 kPa) during September 21 to 28th, 2018.

관계수를 나타냈다. 또한 토양수분장력은 낮 시간대(11~16 시)에 엽온($r^2 = -0.57$), 엽-대기온도차($r^2 = -0.71$), CWSI($r^2 = -0.72$)와 높은 부의상관을 나타냈다. CWSI와 엽온, 엽-대기온도차의 상관관계수는 24시간 기준으로 매우 높았고($r^2 = 0.90$, $r^2 = 0.92$), CWSI와 토양수분장력의 상관분석에서 24시간 기준으로는 상관관계가 낮았으나($r^2 = -0.27$), 낮 시간대(11~16 시)에는 상관관계가 매우 높았다($r^2 = -0.72$). CWSI (y)와 토양수분장력(x)의 상관관계 결정계수(r^2)는 11~12시간대에 가장 높았으며($r^2 = 0.68$), 이때 회귀식은 $y = -0.0087x + 0.14$ 로 조사되었다. 일반적인 토양수분스트레스 시점인 -50 kPa에 해당되는 CWSI는 0.575로 계산된다. 따라서 적외선 열 영상장치를 이용한 엽온 및 CWSI는 토양수분장력에 대해 높은 상관관계수를 나타낸 것으로 보아 복숭아나무의 수분스트레스 진단에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

추가 주제어: 건조, 엽온, *Prunus persica*, 수분부족

사 사

본 연구는 농촌진흥청 FTA 대응경쟁력향상기술개발 복숭아, 사과 수분 스트레스 비파괴 진단 및 평가 과제(과제번호: PJ014433022019)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

- Bellvert, J., J. Marsal, J. Girona, and P.J. Zarco-Tejada. 2015. Seasonal evolution of crop water stress index in grapevine varieties determined with high-resolution remote sensing thermal imagery. *Irrig. Sci.* 33:81-93.
- Çolak, Y.B. and A. Yazar. 2017. Evaluation of crop water stress index on Royal table grape variety under partial root drying and conventional deficit irrigation regimes in the Mediterranean region. *Sci. Hortic.* 224:384-394.
- Farooq, M., A. Wahid, N. Kobayashi, D. Fujita, and S.M.A. Basra. 2009. Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agron. Sustain. Dev.* 29:185-212.
- Fuentes, S., R. De Bei, J. Pech, and S. Tyermen. 2012. Computational water stress indices obtained from thermal image analysis of grapevine canopies. *Irrig. Sci.* 30:523-536.
- 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 Res.* 17:1133-1138.
- Jones, H.G. 2004. Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. *Adv. Bot. Res.* 41:107-163.
- 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. *Agric. Water Manag.* 107:122-132.

- Park, S., D. Ryu, S. Fuentes, H. Chung, E. Hernández-Montes, and M. O'Connell. 2017. Adaptive estimation of crop water stress in nectarine and peach orchards using high-resolution imagery from an unmanned aerial vehicle (UAV). *Remote Sens.* 9:828-842.
- Wang, D. and J. Gartung. 2010. Infrared canopy temperature of early-ripening peach trees under postharvest deficit irrigation. *Agric. Water Manag.* 97:1787-1794.
- Wery, J., S.N. Silim, E.J. Knights, R.S. Malhotra, and R. Cousin. 1994. Screening techniques and sources and tolerance to extremes of moisture and air temperature in cool season food legumes. *Euphytica* 73:73-83.
- Wheaton, A.D., N.C. Cooley, and G.M. Dunn. 2011. Use of thermal imagery to detect water stress during berry ripening in *Vitis vinifera* L. Cabernet Sauvigno. *Acta Hort.* 889: 123-130.