

적외선 촬영 영상 기반의 작물 병해 모니터링 가능성 타진을 위한 실내 감염 실험

정희정¹ · 정래동² · 류재현¹ · 오도혁¹ · 최선웅¹ · 조재일^{*}

¹전남대학교 농업생명과학대학 응용식물학과, ²전남대학교 농업생명과학대학 응용생물학과
(2019년 6월 7일 접수; 2019년 6월 24일 수정; 2019년 6월 24일 수락)

Preliminary growth chamber experiments using thermal infrared image to detect crop disease

Hoejeong Jeong¹, Rae-Dong Jeong², Jae-Hyun Ryu¹, Dohyeok Oh¹, Seonwoong Choi¹, Jaeil Cho^{1*}

¹Department of Applied Plant Science, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro,
Gwangju 61186, Republic of Korea

²Department of Applied Biology, Institute of Environmentally Friendly Agriculture, Chonnam National University,
77 Yongbong-ro, Gwangju 61186, Republic of Korea

(Received June 7, 2019; Revised June 24, 2019; Accepted June 24, 2019)

ABSTRACT

The biotic stress of garlic and tobacco infected by bacteria and virus was evaluated using a thermal imaging camera in a growth chamber. The remote sensing technique using the thermal camera detected that garlic leaf temperature increased when the leaves were infected by bacterial soft rot of garlic. Furthermore, the temperature of leaf was relatively high for the leaves where the colony-forming unit per mL was large. Such temperature patterns were detected for tobacco leaves infected by Cucumber Mosaic Virus using thermal images. In addition, the crop water stress index (CWSI) calculated from leaf temperature also increased for the leaves infected by the virus. The event such that CWSI increased by the infection of the virus occurred before visual disease symptom appeared. Our results suggest that the thermal imaging camera would be useful for the development of crop remote sensing technique, which can be applied to a smart farm.

Key words: Thermal infrared image, Leaf temperature, Crop water stress index, Garlic, Tobacco, Crop disease

I. 서 언

농업과 ICT (Information and Communication Technology)가 융합된 스마트팜(smart farm)은 우리나라 농촌 인력 감소 및 고령화 해법의 하나로 주목 받고 있다(Yeo *et al.*, 2016). 노지 또는 온실의 작물

상태 및 생장 환경에 대해 최적의 조치가 적시에 이루어지는 시스템으로써 기후변화 대응 및 친환경농업 실현 등 지속가능한 농업에도 기여할 것으로 전망된다(Walter *et al.*, 2017). 이러한 스마트팜 시스템은 일반적으로 3단계로 나눌 수 있는데, 첫째 작물 및 환경 상태 탐지, 둘째 탐지 자료의 정보화 및 결정 알고리즘,



* Corresponding Author : Jaeil Cho
(chojaeil@gmail.com)

셋째 현장의 조치·대응이다(Wolfert *et al.*, 2017). 지금까지 우리나라의 스마트팜 연구는 정밀농업의 일환으로 온실 하우스에 설치된 기상·토양 센서에서의 자료를 결정 알고리즘에서 입력 받고 상황을 판단하여, 미기상 환경 제어 및 관수와 양액 투여 등의 조치가 자동으로 수행되는 일련의 과정에 집중되었다(Hwang *et al.*, 2015).

스마트팜을 통한 신속한 영농 대응을 위해서는 무엇보다 작물 생육과 스트레스 상태가 지속적으로 모니터링 되고, 그 자료가 결정 알고리즘에 유용한 입력 정보가 되도록 분석되어야 한다(Jung *et al.*, 2019). 이렇게 연속적으로 작물을 탐지하기 위해서는 비파괴적 방법에 의존할 밖에 없으나(Jackson, 1986), 그 중요성에 비해 주요 스마트팜 선진국에서조차 많은 실용적 연구 성과가 이루어지지 않았다. 대부분의 스마트팜에서는 기상·토양 탐지 자료를 작물생육모형에 실시간으로 입력하여 작물 생육과 스트레스 추정하여 상태를 파악하고 있다(Wolfert *et al.*, 2017). 하지만, 이는 비생물적(abiotic) 원인의 작물 스트레스 파악에는 유용하겠으나, 병해충과 같은 생물적(biotic) 스트레스 상태 파악에는 반드시 작물 자체를 관측하는 비파괴 원격탐지 기술이 필요하다(Basnet and Bang, 2018).

작물 원격탐지 기술로는 잎의 적외복사, 분광 반사도, 엽록소 형광 기반의 기술이 대표적이다(Jackson, 1986). 그 중에서 잎의 적외복사 방출, 즉 엽온(leaf temperature)은 작물의 CO₂ 흡수 광합성과 H₂O 배출의 증산을 관장하는 기공 개폐의 정도를 간접적으로 표현할 수 있다는 점에서 스트레스 평가에 용이하다(Leinonen *et al.*, 2006; Mahlein, 2016). 기본적인 메커니즘은 기공이 닫히면 증산이 감소하여 잎 표면 열에너지 밸런스에 영향을 주고 이는 결국 엽온의 변화로 이어진다는 것이다. 따라서 가뭄 또는 병해에 따른 식물 1차적 피해는 물 부족과 세균 및 바이러스의 생물학적 손상이 아닌 기공 닫힘에 따른 광합성 동화산물 부족이 더 큰 원인임을 감안할 때, 엽온 변화를 이용하여 작물의 스트레스를 빠르게 파악할 것으로 기대할 수 있다.

엽온을 이용한 작물 원격탐지 방법은 그 이론적 배경이 다른 방법에 비해 오래 전에 이미 소개되었으나(Idso *et al.*, 1981), 열전대 및 서미스터 등의 접촉식 온도 센서로는 엽온을 정확하고 지속적으로 모니터링하기 어려운 문제가 있었다. 하지만, 최근 열적외 감지 기술과 열화상 카메라가 발달되고 저렴해짐에 따라 다

양한 연구가 새롭게 진행되고 있으며, 스마트팜에 본격적으로 적용될 것이 기대되고 있다(Prashar and Jones, 2014). 이러한 기술 수요에 부응하기 위해서는 기초적인 연구들이 다양하게 수행되어야 한다. 하지만, 엽온의 변화는 기공 개폐를 기반으로 하기 때문에 여러 종류의 작물 스트레스에 시도해 볼 수 있음에도 불구하고, 대부분의 엽온 탐지 관련 선행연구들은 물 스트레스에 집중되어 있다.

물 부족과 같은 비생물적인 스트레스에 대한 현재 작물의 상태는 수문모형과 결합된 작물생육모형을 이용해 비교적 실시간으로 추정할 수 있다. 하지만 병해충예찰모형 기반의 실시간 정보는 병해의 잠재 발생 가능성에 대한 것이므로 현재 작물의 생물적 스트레스 상태를 나타내기에는 부적합하다. 따라서 현재 작물의 생물적 스트레스를 지속적으로 파악할 수 있는 원격탐사 기술이 스마트팜 시스템에 반드시 필요하다.

본 연구에서는 마늘과 담배에 세균과 바이러스를 실내에서 인위적으로 감염시키고 열화상 카메라를 이용해 시간 경과에 따른 엽온 변화를 관측하였다. 이러한 진단 실험을 통해 스마트팜 시스템 속에서 잎의 열적외 방출 기반으로 비생물학적 스트레스를 탐지할 수 있는 가능성을 타진해 보고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 마늘의 세균 감염 및 엽온 탐지

홍산 마늘을 포트에 2018년 10월 29일 파종하고 야외에서 생육재배 하였다. 겨울의 생육 휴지기를 거쳐 다음해 봄의 생육 재생기인 3월 20일에 마늘 무름병 세균(*Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*)을 10⁸cfu(colony-forming unit)/ml과 10⁹cfu/ml 농도로 각각의 건강한 마늘 잎에 주사기를 이용해 접종하였다. 감염한 후로는 동일한 환경 조건을 유지하기 위해 생육 챔버에 두었다. 챔버의 온도와 습도는 23℃, 40%를 유지하도록 하였다. 또한 생육 챔버에 정상 마늘 개체를 두어 정상 잎과 감염된 잎의 온도를 동시에 촬영하고 비교하였다.

열화상 카메라는 FLIR사의 T200을 사용하였으며 방출율(emissivity)은 0.96으로 설정하였으며, 카메라와 잎 간 거리와 기온, 습도 정보를 카메라에 입력하였다. 또한 잎 바로 옆에 구겨지지 않은 알루미늄 호일 조각을 두고, 그 표면 온도를 반사온도로 하여 엽온을 산출하였다. 열화상 카메라가 일관성 있게 같은 잎의

부위를 바라보며 잎 표면에 대해 촬영 각도가 항상 수직이 되고 모든 샘플 잎이 동일한 광 에너지를 받도록, 아크릴판과 EVA 폼 테이프로 자체 제작한 가로 6cm, 세로 8cm의 ‘ㄷ’자 모양의 잎 집게로 잎을 고정하였다.

2.2. 담배의 바이러스 감염 및 CWSI 산출

소형 포트에 파종한 담배가 3번째 잎 이상 전개한 상태에서, 담배 잎 표면에 고온 철가루를 뿌리고 문질러 상처를 내어 오이 모자이크 바이러스(CMV, Cucumber Mosaic Virus)를 감염시켰다. 실험은 생육 챔버에서 진행되었으며, 온도와 습도는 23°C, 40%를 유지되도록 하였다. 챔버 내 조명은 밤 12시30분에서 아침 8시 30분까지 꺼지도록 설정하였다. 또한 실험 기간 동안 작물이 물 스트레스를 받지 않도록 매일 적정량을 관수하였다.

생육 챔버 내에는 열화상 카메라와 생육 카메라를 설치하여 열화상 이미지와 RGB 이미지를 동시에 촬영하였다. 열화상 카메라는 FLIR사의 A65sc이며, 전용 소프트웨어인 FLIR ResearchIR (버전 4.20.2)이 설치된 노트북과 연결하여 사용하였다. 생육 챔버 안의 담배 잎의 바로 옆에 Vaisala사의 HMP60을 두어 기온과 습도를 측정하였고, 자료는 Campbell사의 CR10X 데이터로거에 집록 되었다. 관측 기간 동안의 기공 전도도(stomatal conductance)는 Decagon사의 휴대용 SC-1으로 관측하였다.

작물의 물 부족에 의해 기공이 닫히며, 이는 엽온 증가로 나타나는 일련의 과정에 착안하여 작물이 처해 있는 물 스트레스의 정도를 표현할 목적으로 CWSI (Crop Water Stress Index)가 개발되었다(Jackson *et al.*, 1981). CWSI은 엽온에서 기온을 뺀 편차값(ΔT)이 포화수증기압차(VPD, vapor pressure deficit)에 대해 형성된 편차값의 최소와 최대 사이에 위치하는 비율로 정의된다. 본 실험에서는 Jonse(1992)가 제안한 방법으로 감염된 담배 잎의 CWSI를 계산하였다. 기공이 최대로 닫힌 상태의 엽온(T_{dry})과 최대로 열린 상태의 엽온(T_{wet})으로 각각의 T_{dry} 를 T_{wet} 를 구한다. 그리고 현재 관측된 엽온 T_{leaf} 를 Eq. (1)에 적용하였다.

$$CWSI = \frac{T_{leaf} - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}} \quad (\text{Eq. 1})$$

T_{dry} 와 T_{wet} 는 일반적으로 엽온을 일정 기간 관측하

여 경험적으로 얻어진 최대·최소 엽온을 통해 산출된다. 본 실험에서는 Jones(1992)의 방법을 사용하였는데, 여과지(filter paper)를 이용하여 마른 상태의 표면 온도를 T_{dry} 으로, 물에 적신 상태의 표면 온도를 T_{wet} 으로 두어 계산에 이용하였다.

III. 결과 및 토의

3.1. 세균 감염 마늘의 엽온 변화

Fig. 1은 세균에 감염된 마늘의 엽온과 정상 마늘 엽온의 차이가 시간 경과에 따라 변화되는 모습을 보이고 있다. 일반적으로 식물의 엽온은, 대기 환경과 잎의 형태적 특성에 따라 그 정도의 차이가 있지만, 기온보다 낮게 형성된다. 감염 7시간 후 첫 촬영의 결과에서는 10⁸cfu/ml과 10⁹cfu/ml 농도로 감염된 모든 잎들의 온도가 증가하였으며, 10⁸cfu/ml 농도 감염 엽온보다 10⁹cfu/ml 농도 감염 엽온이 두 배 가량 더 높았다. 이는 많은 세균 감염량이 더 부정적 식물 생리적 반응을 유발할 수 있으며, 이러한 효과가 기공 개폐와 잎 표면의 열 에너지 밸런스에 영향을 미친 것으로 보인다.

하지만, 감염 29시간째인 두 번째 촬영에서는 두 감염 잎 모두 1°C 내외로 급격히 엽온이 떨어졌다. 이후 곧 엽온의 증가 패턴이 다시 나타났으나, 이러한 순간적인 엽온의 감소는 이와노프 효과(Iwanoff effect; Iwanoff, 1928)와 닮아 있다. 식물이 병에 감염되면 기공을 장기적으로 닫기 전에, 순간적으로 기공을 정상 보다 더 여는 현상을 일컫는 것으로서, 마늘에서 이와노프 효과의 존재 유무 또는 효과의 시기, 강도, 지속시간 등의 관련 문헌이 없고 상세한 실험이 수반되지 않아 본 실험에서 이와노프 효과가 나타났는지는 정확히 알 수 없다. 그러나, 향후 엽온을 이용한 작물 탐지에 있어 스트레스에 따른 엽온의 변화가 예상과 반대로 나타나는 이와노프 효과는 반드시 더 연구되어야 할 것이다.

감염 2일째에서 3일째에 걸쳐서는 10⁹cfu/ml 농도 감염 엽온의 변화 폭은 컸고, 10⁸cfu/ml 농도 감염 엽온은 변화 폭은 작으며, 정상 엽온과 같아지는 수준으로 점차 변화하였다. 3일째 이후로, 10⁹cfu/ml 농도 감염 엽온은 대략 1°C 정도 높은 수준이 지속되었고, 육안으로 확인 가능한 병징이 처음 나타났다. 10⁸cfu/ml 농도 감염 엽온은 정상 엽온과 같은 수준으로 지속되었고 여전히 육안으로 병징이 보이지 않았다.

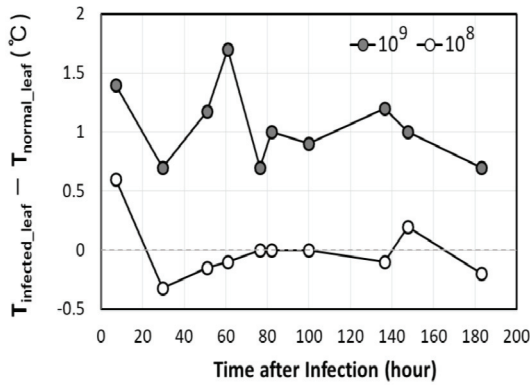


Fig. 1. Temporal change of the difference between normal and bacteria infected garlic leaf temperatures. Gray circle is for 10⁹ cfu/ml infection and white circle is for 10⁸ cfu/ml infection.

3.2. 바이러스 감염 담배의 CWSI 변화

Fig. 2는 바이러스에 감염된 담배의 CWSI 변화를 보이고 있다. CWSI는 값이 클수록 스트레스 강도가 높다는 것을 의미한다. 감염 후 2일째에 CWSI가 다소 낮아졌다. 이 또한 이와노프 효과로 볼 수 있는지는 보다 세밀한 추가 실험이 필요해 보인다. 그 이후로는 감염 잎의 CWSI는 계속 증가하여 거의 1.0에 가까워지는 모습을 보여준다. 반면 정상 잎의 CWSI는 다소 값의 변동은 있었으나 0.55~0.65 사이에서 거의 일정함을 보인다. 정상 잎과 감염된 잎의 본격적인 CWSI 차이는 3일째에 처음 나타났는데, 이는 육안으로 병징이 처음 발견된 감염 4일째 보다 하루 빠른 것이다.

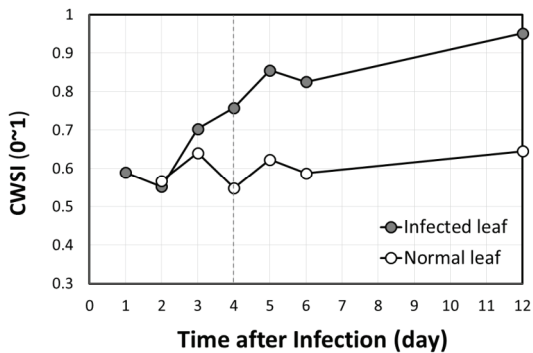


Fig. 2. Temporal changes of the CWSIs of normal leaf and virus infected tobacco leaf. A dotted line indicates the day when disease symptom appeared.

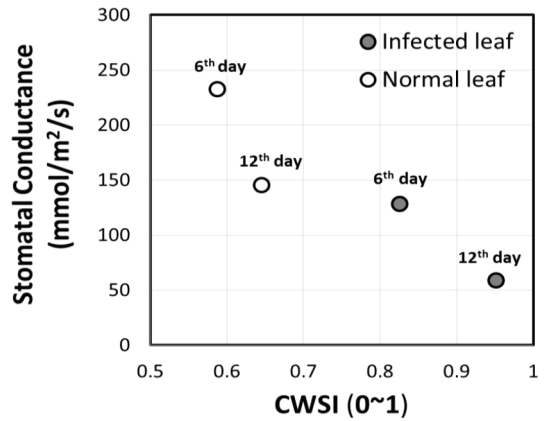


Fig. 3. Relation between CWSI and stomatal conductance for normal leaf.

선행연구에서는, CWSI의 정의가 기공 개폐에 따른 잎 표면 에너지 밸런스의 변화에 기반을 두고 있는 점을 주목하여, 종종 CWSI와 기공 전도도 사이의 상관관을 분석하고 있다. 본 연구에서는 정상 잎과 감염 잎의 CWSI 값 차이가 이미 두드러지게 나타난 감염 6일째와 12일째의 CWSI를 기공전도도와 함께 비교해 보았다. 6일째와 12일째 각각의 관측 날에서 정상 잎에 비해 감염 잎은 기공전도도가 낮았고, CWSI는 높게 나타났다. 이와 같이 기공 전도도가 CWSI와 음의 선형 모습을 보이고 있다(Fig. 3). 비록 자료의 개수가 적어서 유의한 상관관계라고 보기는 어렵지만, 이는 물 스트레스를 대상으로 한 선행연구들 결과와 같은 모습이다(e.g., Möller *et al.*, 2006). 따라서 작물이 물 부족뿐만 아니라 병에 감염되면, 생리적 피해의 하나로 기공이 닫히게 되고, 곧 엽온의 증가로 이어지며, 결국 CWSI 값이 커지는 일련의 동일한 과정을 거친다고 할 수 있다.

IV. 고찰 및 결론

본 연구는 열적 원격탐지 기술 기반의 열화상 카메라를 이용하여 작물의 생물적 스트레스인 세균과 바이러스 감염의 효과적 탐지를 실내 생육 챔버에서 실험하였다. 감염에 의한 엽온의 증가를 확인하였으며, 감염 농도에 따른 엽온 차이도 발견하였다. 이는 스마트팜에서 열적외 센서를 이용한다면, 병해의 탐지뿐만 아니라 피해 등급 또는 병해 경과까지 평가가 가능함을 시사한다. 또한 엽온 기반으로 산출한 CWSI가 물

스트레스 평가뿐만 아니라 병해 탐지에도 유용하다는 것을 확인하였다. 그리고, 육안으로 병징이 확인되기 하루 전에 CWSI로 피해를 보고할 수 있음을 발견하였다. 작물에 따라 차이가 있겠지만, 처음 감염에서 육안으로 병징이 나타나기까지가 3~6일 정도의 짧은 시간이라는 점을 고려할 때, 하루 전 피해 알람은 향후 중요한 의미를 가질 수 있다.

열화상 카메라를 이용한 생물학적 스트레스의 탐지의 가능성을 확인하였으나, 스마트팜 시스템에 적용하기까지는 여전히 앞으로 해결되어야 할 쟁점들이 있다. 첫째, 정확한 엽온의 측정 기술이 필수이다. 비록 열화상 카메라 기기는 발전하였지만, 작물을 촬영하는 기법(예, 잎의 방출률 설정, 카메라 및 태양 각도, 반사 온도 설정, 대기보정)에 따라 정확도가 달라지므로 다양한 조건에 대한 표준화 수립이 필요하다.

둘째, 본 실험에서는 정상 잎을 함께 촬영하여 탐지 대상의 엽온 또는 CWSI 값이 나타내는 스트레스 정도를 평가하였다. 하지만 실제 농장에서는 항상 정상 작물이 준비되기 어려우므로 주어진 기상·토양 환경 계측 정보를 바탕으로 정상기의 기공 전도도와 잎 표면 열에너지 밸런스를 모델링 할 수 있는 기술이 요구된다.

셋째, CWSI는 높은 이용 가치가 확인되었으나, 산출을 위해서는 기공 전도도가 최대·최소일 때의 엽온 값이 필요하다. 이를 위해 특별한 조치(예, 잎에 바셀린을 발라 기공을 막음, 잎에 물을 뿌려 엽온을 최대로 낮춤)를 취하거나 잎을 대신할 물체를 설치(예, 마른 그리고 젖은 여과지)할 수 있다. 또한 잎 표면 열 에너지 밸런스 식으로 엽온을 추정할 때 기공 전도도를 0과 무한대 값으로 두어 계산할 수도 있다. 하지만, 본 단보에는 보이지 않았으나, 각각의 방법에 따라 CWSI 값은 달라지므로 농가 적용을 위해서는 일관성 있는 정보 산출 방법이 고려되어야 한다.

넷째, 이와노프 효과에 대한 보다 세밀한 실험이 작물 별로 필요하다. 병해에 감염되었음에도 불구하고 오히려 엽온이 낮아지는 현상은 스마트팜의 의사결정 단계의 오류를 불러올 수 있다. 따라서 이와노프 효과를 제대로 이해하여 분석하는 것이 정확한 작물 탐지에 필수적이다. 이처럼 열적외 센서를 이용한 작물의 생물학적 스트레스 탐지는 실시간 모니터링 및 조기 감지의 높은 가능성을 가지고 있으며, 앞으로 스마트팜에 적용하기 위해서는 다양한 추가 연구들이 필요할 것으로 사료된다.

적 요

세균과 바이러스에 감염된 작물의 생물학적 스트레스 탐지를 원격탐지 기술 기반의 열적외 센서를 이용하여 실내 생육 챔버에서 실험하였다. 감염으로 인한 엽온의 증가와 감염 농도에 따른 엽온 차이를 확인했다. 또한 엽온 기반으로 산출한 CWSI 값은 감염 앞에서 증가하였고, 그러한 현상은 육안으로 병징을 발견하기 하루 전에 시작되었다. 따라서 스마트팜 시스템의 작물 모니터링에 열적외 센서를 이용한다면, 병해의 탐지는 물론 피해 등급 평가, 조기 알람 등에 활용될 수 있을 것이다. 하지만 실제 스마트팜 적용을 위해서는 향후 엽온 측정 정확도 향상 기술, 자료 해석 방법, 생물·비생물적 스트레스 구별 알고리즘 연구 등이 추가로 필요할 것이다.

감사의 글

이 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ013821032019)의 지원을 받았으며, 이에 감사 드립니다.

REFERENCES

- Basnet, B., and J. Bang, 2018: The state-of-the-art of knowledge-intensive agriculture: a review on applied sensing systems and data analytics. *Journal of Sensors* **2018**, 1-13.
- Hwang, S. I., J. M. Joo, and S. Y. Joo, 2015: ICT-based smart farm factory systems through the case of hydroponic ginseng plant factory. *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences* **40(4)**, 780-790. (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 for environmental variability. *Agricultural Meteorology* **24**, 45-55.
- Iwanoff, L., 1928: Zur Methodik der Transpirationsbestimmung am Standort. *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft* **46**, 306-310.
- Jackson, R. D., 1986: Remote sensing of biotic and abiotic plant stress. *Annual review of Phytopathology* **24(1)**, 265-287.
- 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.
- Jones, H. G., 1992: *Plants and Microclimate* (2nd ed.), Cambridge University Press, Cambridge, 428pp.
- Jung, D.-H., H.-J. Kim, H. S. Kim, J. Choi, J. D. Kim, and S. H. Park, 2019: Fusion of spectroscopy and cobalt electrochemistry data for estimating phosphate concentration in hydroponic solution. *Sensors* **19**(11), 2596.
- Leinonen, I., O. M. Grant, C. P. P. Tagliavia, M. M. Chaves, and H. G. Jones, 2006: Estimating stomatal conductance with thermal imagery. *Plant, Cell & Environment* **29**(8), 1508-1518.
- Mahlein, A. K., 2016: Plant disease detection by imaging sensors-parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant disease* **100**(2), 241-251.
- Möller, M., V. Alchanatis, Y. Cohen, M. Meron, J. Tsipris, A. Naor, V. Ostrovsky, M. Sprintsin, and S. Cohen, 2006: Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of experimental botany* **58**(4), 827-838.
- Prashar, A., and H. Jones, 2014: Infra-red thermography as a high-throughput tool for field phenotyping. *Agronomy* **4**(3), 397-417.
- Walter, A., R. Finger, R. Huber, and N. Buchmann, 2017: Opinion: Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **114**(24), 6148-6150.
- Wolfert, S., L. Ge, C. Verdouw, and M. J. Bogaardt, 2017: Big data in smart farming-a review. *Agricultural Systems* **153**, 69-80.
- Yeo, U. H., I. B. Lee, K. S. Kwon, T. Ha, S. J. Park, R. W. Kim, and S. Y. Lee, 2016: Analysis of Research Trend and Core Technologies Based on ICT to Materialize Smart-farm. *Protected Horticulture and Plant Factory* **25**(1), 30-41. (in Korean with English abstract)