

Article

열화상 카메라 활용을 위한 토양비료, 차광생육, 유전특성 차이 관련 작물생리 원격탐지

문현동^{1,2)} · 조유나³⁾ · 조은이^{1,2)} · 김현기³⁾ · 김보경¹⁾ · 정희정⁴⁾ · 권동원⁵⁾ · 조재일^{6,7)}†

Applications of Thermal Imaging Camera to Detect the Physiological States Caused by Soil Fertilizer, Shading Growth, and Genetic Characteristic

Hyun-Dong Moon^{1,2)} · Yuna Cho³⁾ · Euni Jo^{1,2)} · Hyunki Kim³⁾ ·
Bo-kyeong Kim¹⁾ · Hyejeong Jeong⁴⁾ · Dongwon Kwon⁵⁾ · Jaeil Cho^{6,7)}†

Abstract: The leaf temperature is principally regulated by the opening and closing of stomata that is sensitive to various kinds of plant physiological stress. Thus, the analysis of thermal imagery, one of remote sensing technique, will be useful to detect crop physiological condition on smart farm system and phenomics platform. However, there are few case studies using a thermal imaging camera on the agricultural application. In this study, three cases are presented: the effect of lime fertilizer on the rice, the different physiological properties of soybean under shading condition, and the screening of soybean breeds for salinity tolerance characteristic. The leaf temperature measured by thermal imaging camera on the three cases was used effectively to the physiological change and characteristics. However, the thermal imagery analysis requires considering the accuracy of measured temperature and the weather conditions that affects to the leaf temperature.

Key Words: Thermal imaging camera, Leaf temperature, Stomata, Smart farm, Phenomics

Received November 7, 2022; Revised November 18, 2022; Accepted November 22, 2022; Published online December 31, 2022

¹⁾ 전남대학교 응용식물학과 석사과정생(Master Student, Department of Applied Plant Science, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea)

²⁾ 전남대학교 IT-Bio 융합시스템농업교육연구단 석사과정생(Master Student, BK21 FOUR Center for IT-Bio Convergence System Agriculture, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea)

³⁾ 전남대학교 응용식물학과 석사후연구원(Post-Master's Researcher, Department of Applied Plant Science, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea)

⁴⁾ 농촌진흥청 국립식량과학원 작물재배생리과 박사과정생(PhD Student, Crop Production and Physiology Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju, Republic of Korea)

⁵⁾ 농촌진흥청 국립식량과학원 작물재배생리과 연구사(Researcher, Crop Production and Physiology Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju, Republic of Korea)

⁶⁾ 전남대학교 응용식물학과 부교수(Associate Professor, Department of Applied Plant Science, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea)

⁷⁾ 전남대학교 IT-Bio 융합시스템농업교육연구단 부교수(Associate Professor, BK21 FOUR Center for IT-Bio Convergence System Agriculture, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea)

† Corresponding Author: Jaeil Cho (chojaeil@jnu.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

요약: 열화상 카메라를 이용해 식물의 엽온을 측정하는 원격탐사 기법은 농업의 작물 감시 또는 선별에 이용될 수 있는 가능성이 80년대부터 제시되어 왔지만, 그 유용성에 비해 다양한 적용 사례가 적어 제대로 활용되지 못하고 있었다. 하지만, 최근 열화상 카메라 하드웨어 기능의 비약적 발전과 보급에 따라 농업에서의 열화상 카메라 활용이 주목받고 있다. 앞으로의 활용성 증대를 위해 다양한 활용 사례 연구 필요성에 부응하여 본고에서는 석회질 비료를 처리한 벼와 차광조건에서 생육 된 콩의 생리적 변화를 탐지하였고, 내염성 계통 콩에 대해서는 염해 감수성 콩 품종과의 엽온 차이가 선별 가능한 수준임을 보였다. 열화상 카메라의 관측 정확도와 기공 개폐 기반의 분석 기술이 더욱 발전한다면, 스마트팜과 표현체 분석 분야에 활용이 많아질 것으로 기대된다.

1. 서론

최근 농업 분야에서 원격탐사 기법의 열화상 카메라 활용에 주목하고 있다(Zia *et al.*, 2013; Mahlein, 2016). 센서 하드웨어 기술의 급속한 발달에 힘입어 상대적으로 가격 하락뿐만 아니라 정확도가 향상된 다양한 열화상 카메라 제품군이 출시된 것도 하나의 이유일 것으로 사료된다. 하지만, 근본적으로는 열화상 카메라로 촬영되는 엽온(leaf temperature)을 이용하여 작물의 환경·생리적 스트레스 상태를 연속적이며 비파괴적으로 분석할 수 있는 학문적 배경이 마련되었고, 이에 따라 실용적인 농업정보(agricultural information) 생산의 기대가 커지기 때문이다(Prashar and Jones, 2014). 열화상 카메라의 구체적인 농업 활용으로는 작물 감시 기법으로써 스마트팜(smart farm) 또는 디지털 농업(digital agriculture) 시스템에서 이용될 수 있으며(Mahlein, 2016), 작물 품종육종 과정에 있어 다양한 유전 자원 중 목표 특성을 신속히 선별(screening)하는 표현체 분석(phenomics)에도 이용될 수 있다(Merlot *et al.*, 2002).

열화상 카메라로 탐지되는 엽온은 근본적으로 잎이 흡수한 에너지로부터 결정된다(Jones, 1992). 식물 잎에 도달한 광 에너지의 약 25%가 반사 또는 투과되고 흡수된 나머지 에너지는 잎에서 이용되는데 그 중 약 4~5%가 광합성의 명반응(light reaction) 과정에 유입되며, 대부분의 에너지는 엽온을 변화시키는 현열(sensible heat) 에너지와 뿌리에서 기공까지 도달한 물을 증산시키는 잠열(latent heat) 에너지로 분배된다(Medina *et al.*, 1978). 이러한 현열과 잠열은 대립균형(trade-off) 관계이며 기상 조건과 기공 개폐가 에너지 분배의 핵심 역할을 하게 된다(Jones, 1992).

기상 조건의 변동이 없다고 가정한다면, 기공 개폐가 엽온 결정에 가장 중요한 역할을 한다. 따라서, 엽온

을 알면 기공 개폐 정도를 효과적으로 진단하며 정량적으로 추정할 수 있다(Leinonen *et al.*, 2006). 더욱이, 식물의 생리적 상태에 민감한 기공 개폐 변화는 다양한 종류의 환경·생리적 스트레스에 대해 작물이 응답하는 지표로써, 엽온 관측 정보를 이용하여 작물의 생리적 상태를 탐지하거나 지속적으로 감시하는 것이 가능하다(Mahlein, 2016; Kim *et al.*, 2014). 하지만, 기상 환경을 완벽히 통제하는 것은 노지뿐만 아니라 온실에서도 어렵기 때문에 기상이 엽온 또는 기공에 미치는 영향을 반드시 이해해야 할 필요가 있다. 예를 들어, 잎에 적외선장과 에너지가 전달될 만큼의 가까운 지점의 기온(near-surface air temperature)은 엽온을 크게 좌우하며, 포화수증기압차(vapor pressure deficit, VPD)로 대표되는 대기 건조도가 심해질수록 기공은 닫는 경향을 보인다(Idso *et al.*, 1981).

엽온 값을 매개로 한 기공 개폐 정도를 통해 작물 상태를 탐지하려는 노력은 오래전부터 시작되었는데, 그 대표적인 예가 crop water stress index (CWSI; Idso *et al.*, 1981)이다. 엽온에 직접 영향을 주는 기온과 기공에 민감한 영향을 주는 VPD를 동시에 고려하는 지수이기 때문에 온전히 작물 스트레스를 표현하도록 정의되어 있다. 비록 작물의 수분 스트레스를 탐지하기 위해 제안된 지수이지만, CWSI는 기공이 반응하는 다양한 작물 스트레스를 탐지할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 예를 들어 노지 작물이 일상적으로 정오 무렵 겪는 광 스트레스를 비롯하여(Zarco-Tejada *et al.*, 2013), 작물 병해 탐지에도 CWSI를 적용한 사례가 있다(Jeong *et al.*, 2019).

열화상 카메라를 이용한 작물 모니터링 원격탐사 기법 발전과 농업 분야에서의 활용 가능성이 확인되어 기대가 높아지고 있지만, 실제로 다양한 영농 또는 재배 환경 조건에서의 엽온 변화 기반 작물생리 특성을 탐지

한 선행연구가 많지 않은 것이 현실이다. 다양한 종류의 선행사례들이 열화상 카메라 활용 확대와 관련 기술 개발에 반드시 필요한 밑거름이라는 점에서 본 연구에서는 열화상 카메라를 이용하여 비료 종류, 차광된 생육 환경, 유전적 특성 차이에 의한 작물 변화 탐지 사례를 소개한다.

2. 재료 및 방법

1) 석회질비료 처리 벼

석회질비료는 주로 산도(pH)가 낮은 산성토양을 개량하여 작물의 영양흡수를 돕기 위해 사용된다(Haynes and Naidu, 1998). 석회(칼슘)가 작물에 흡수되면 세포막의 생성과 강화에 기여하여 병 저항력을 키워주며, 뿌리발육을 촉진시킨다(Meena and Prakasha, 2022).

전남대학교 광주(용봉) 캠퍼스 농업실습장에 있는 유기질 비료가 처리된 포트에서 생육한 벼를 대상으로 석회질비료의 처리 유무에 따른 엽온 차이를 벼 이삭이 패기 전인 2021년 8월 4~5일에 열화상 카메라로 관측하였다. 두 포트를 가까이 두어 열화상 카메라 화면에 모두 찍히도록 하였으므로 두 포트의 벼 엽온은 동일한 기상 조건이라고 볼 수 있다. 촬영은 피사체인 벼 포기 상부에서 직하를 향하는 방향과 카메라가 남쪽을 등지고 피사체의 옆 부분을 바라보는 방향으로 촬영하였다.

열화상 카메라 촬영 후, 두 포트 벼의 기공전도도(stomatal conductance, $\text{mmol}/\text{m}^2/\text{s}$)를 기공확산도 측정기(leaf porometer, SC-1, METER group, USA)로 오전 10시에 측정하였으며, Red와 Near-Infrared (NIR)의 잎 투과도를 기반으로 한 휴대용 엽록소 측정기(SPAD-501, Konica Minolta Inc, Osaka, Japan)를 이용해 엽록소 농도를 유의하게 표현하는 SPAD 값을 관측하였다.

2) 차광조건에서 생육한 콩

전남대학교 광주(용봉) 캠퍼스의 농업실습장 노지밭에 콩을 파종하고 약 80% 차광율을 가지는 차광박스를 3곳에 씌웠다. 차광박스는 내부에 콩이 약 4~5 개체 들어갈 수 있는 크기이며, 생육 33일이 되는 2021년 8월 4일에 차광 박스를 제거했다.

차광 처리한 콩과 바로 옆(남쪽)의 정상 생육 콩이 동

일한 카메라 화면에 보이게 촬영하였다. 피사체인 콩 군락 상부에서 직하를 향하도록 촬영하였으며, 화면에 찍힌 잎들의 온도를 편향성 없이 추출하기 위해서 영상에 일정한 간격(약 5 cm)의 가상 격자를 두어 각 교차지점들의 엽온 중에 이웃한 잎의 그림자가 드리워지지 않은 엽온을 사용하였다.

3) 엽해 내성과 감수성 콩

육종 선별에 사용하기 위해 전남대학교 광주(용봉) 캠퍼스 농업실습장 온실에서 생육 되고 있는 내염성(salinity tolerance) 상위 60 계통과 감수성(salinity sensitivity) 상위 60 계통 중에 내염성 상위 2 계통과 감수성 상위 2 계통을 포트에 파종하여 150 mM NaCl 염분 처리하였다. 콩 파종 후 생육 20일 경에 1차 촬영, 그로부터 1주 후에 2차 촬영이 이루어졌다. 열화상 카메라 촬영 시 군락 상부에서 직하를 향하도록 하여 열화상 이미지를 획득하였다.

4) 열화상 카메라

모든 실험의 열화상 카메라는 FLIR사의 T200 (FLIR System, USA) 제품을 사용하였고 서터 방식으로 촬영되었으며, 촬영된 온도 영상 분석은 FLIR사의 ThermoCAM Research Pro 2.8을 사용하였다.

3. 결과 및 토의

1) 석회질비료 처리 벼의 엽온 차이

석회질비료 처리 토양에서 생육한 벼 잎은 SPAD 값이 대조구보다 상대적으로 큰 것으로 보아 엽록소 함량이 높다고 볼 수 있다(Fig. 1(a)). 일반적으로 엽록소 함량이 높은 잎은 많은 광합성량을 유지하기 위해 기공으로부터 CO_2 가 원활히 공급되어야 하므로 기공전도도가 높아지는 경향이 있다. 본 실험에서도 SPAD 값이 높은 석회질비료 처리 벼 잎의 기공전도도가 상대적으로 높은 것으로 관측되었다(Fig. 1(a), (b)). 이러한 기공전도도의 차이는 기공이 더 크게 열리는 생리적 원인과 기공 밀도 또는 크기가 커진 잎의 해부학적 특징으로 유발될 수 있는데, 실제로 잎의 현미경 영상을 보면 단위 면적당 기공의 개수는 줄었지만 크기가 대체로 커진 것이 확

인되었다(현미경 영상은 보이지 않음).

기공전도도가 높아지면 일반적으로 증산량이 증가하고 현열 에너지가 낮아져 엽온이 내려간다. 석회질비료를 처리한 벼는 기공전도도가 높은 만큼 주간에 엽온이 상대적으로 낮은 모습을 보였다(Fig. 1(c)). 구름이 드리워져서 산란광(diffuse radiation) 비율이 증가한 조건에서는 두 엽온의 차이가 약 2.2°C였으며, 구름이 걷혀 직달광(direct radiation)이 드리운 조건에서는 약 1.35°C 차이가 있었다. 관측을 수행한 13시에서 14시 사이에 두 벼의 엽온 차이는 주로 직달·산란광 비율에 의해 달라졌다. 일반적으로 엽온은 잎의 에너지 밸런스에 직접 영향을 미치는 기온과 약 -2.0~2.0°C 정도의 차이가 있다는 것을 고려하면, 품종과 기상조건이 동일하지만 비료 처리를 달리한 조건에서의 엽온 차이 값은 유의미한 결과로 보인다. 밤에는 석회질비료 처리 유무와 상관없이

기공을 닫으므로 처리 조건에 따른 유의한 차이를 나타내지 않았다(Fig. 1(c)).

2) 차광에서 생육한 콩의 엽온 차이

33일 동안 차광 되어 음지 환경에서 생육한 콩의 SPAD 값은 대조구보다 상대적으로 낮았으며, 이는 상대적으로 낮은 엽록소 함량을 나타낸다(Fig. 2(a)). 또한 줄기가 길어지고 잎이 작아지는 생육 특징도 나타났다(생육 그래프는 보이지 않음). 차광 조건에서 엽록소 함량이 낮아지는 경우는 다양한 실험에서 나타나는데, 식물 생리·생태학에서의 비용·혜택 가설에 따르면 광 에너지를 적게 받는 환경에서는 광합성에 필요한 엽록소 등의 효소 단백질을 만들고 비용(에너지)을 소비하며 유지할 혜택이 적기 때문이다. 이러한 조건에서 광합성에 필요한 CO₂의 요구량이 적어지므로 대체로 기공은

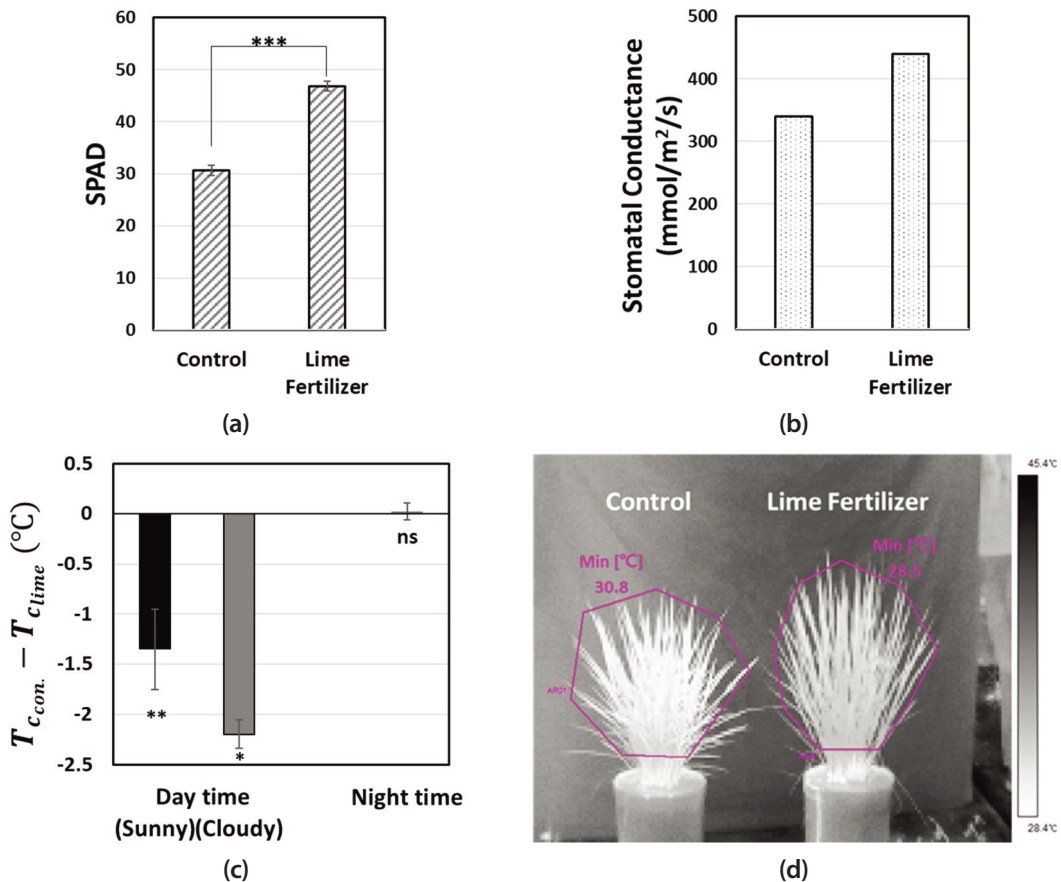


Fig. 1. Comparison of SPAD values (a) and stomatal conductance (mmol/m²/s) (b) on rice according to the treatments of lime fertilizer. Difference of the rice canopy temperatures between control ($T_{Ccon.}$) and lime fertilizer (T_{Clime}) on day and night times (c). Two rice samples were detected at same thermal imagery in outdoors (d).

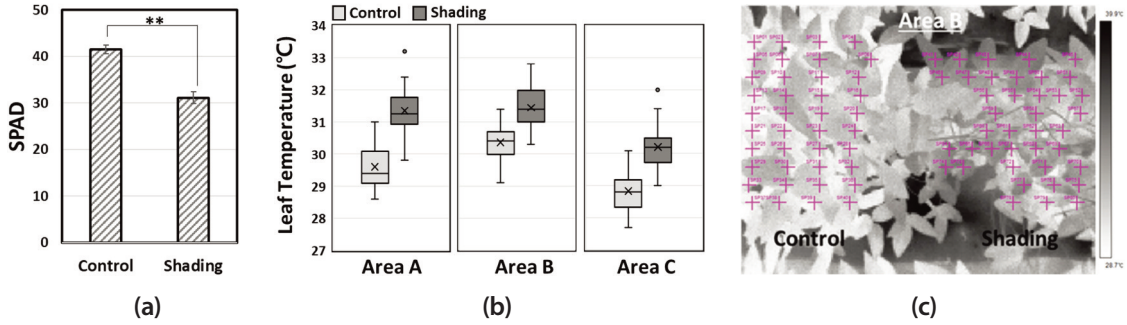


Fig. 2. Comparison of SPAD values (a) and difference of canopy temperatures (b) on soybean according to the treatments of shading growth. Two soybean samples were detected at same thermal imagery in the Area B of outdoors (c).

밀도와 크기가 작아지거나 개폐 기작이 둔화된다. 한편, 기공전도도의 감소는 강한 광 조건에서 급격한 엽온 상승으로 이어질 수 있다. 실제로 동일한 광 조건에서 엽온은 차광 조건에서 생육한 콩이 대조구보다 약 1~2°C 높았다(Fig. 2(b)).

3) 내염성과 염해 감수성 콩의 엽온 차이

내염성과 감수성 콩의 1차 열화상 카메라 촬영 결과를 보면 내염성 계통 콩의 엽온이 높았으며(Fig. 3(a)), 2차 촬영 영상에서는 감수성 계통 콩의 엽온이 더 높았다(Fig. 3(b)). 하지만, 촬영된 시기의 모든 대상 콩들의 SPAD 값에는 유의한 차이가 나타나지 않았다(그래프는 보이지 않음). 1, 2차 모두 엽온 관측을 통해 내염성과 감수성 콩의 구분이 가능했으므로, 작물육종 효율을 높이기 위한 표현체 분석 기술에 열화상 카메라가 적극적으로 이용될 수 있음을 시사한다.

하지만, 내염성과 감수성의 엽온 변화는 1차와 2차 촬영에서 반대로 나타났는데, 이는 1차 촬영이 콩 파종

후 생육 20일째 되는 날에 촬영된 것에 비해 2차 촬영은 1차 촬영 후 1주 후에 이루어진 점을 고려해야 할 것으로 보인다. 일반적으로 내염성 계통 콩은 상대적으로 기공을 닫음으로써 염류 제거 및 수분 증산을 억제하여 내염성을 향상시킨다(Munns and Tester, 2008). 이는 1차 촬영에서 내염성 계통 콩의 엽온이 더 높게 나타난 이유와 일치한다. 하지만, 2차 촬영에서는 반대로 감수성 계통 콩의 엽온이 내염성에 비해 상대적으로 증가한 이유는 염분 환경 노출 시간이 길어짐에 따라 감수성 계통의 피해(damage)가 기공 폐쇄의 형태로 내염성 계통에 비해 본격적으로 진행되었기 때문으로 사료된다.

4. 결론 및 제언

열화상 카메라 기술 발전과 더불어 다양한 방면에서 활용에 대한 관심이 증가하였고, 이와 더불어 농업에서도 구체적이고 다양한 활용 사례들을 기반으로 그 가능

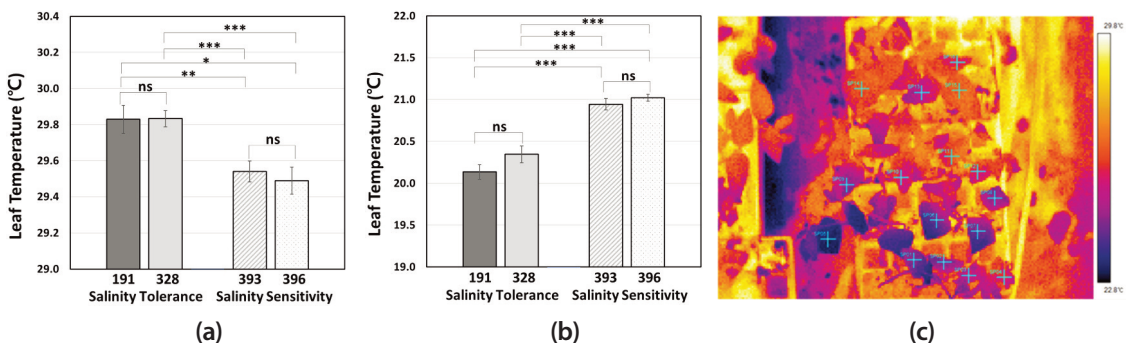


Fig. 3. Different leaves temperature of salinity tolerance and sensitivity soybeans after seeding 20 days (a) and 48 days (b). All soybean samples of salinity tolerance and sensitivity were detected as same thermal imagery (c).

성과 개발 방향을 제시할 시대적 당위성이 더욱 요구되고 있다. 열화상 카메라가 효과적으로 적용될 수 있는 농업 분야로는 크게 두 영역으로 나뉠 수 있겠다. 첫째, 스마트팜 시스템의 성공적인 운용을 위해 노지 또는 온실에서 생육하고 있는 작물의 상태를 지속적으로 모니터링하거나 생육이상과 스트레스를 신속히 탐지하는 것이다. 본고에서 소개한 석회비료 처리와 같이 재배방식에 의한 생육의 변화나 차광실험과 같이 기상변화에 따른 작물의 반응 등을 탐지하여 스마트팜 시스템 내에서 정보화 하여 사용할 수 있다. 둘째, 빠르고 효율적인 작물 육종 과정에 기여할 수 있는 표현체 분석 기술에 열화상 카메라가 활용될 수 있다. 특히 육종 과정에서 수많은 후보 품종 중 목표한 기능을 가지는 개체들을 평가하고 선별하는 작업을 기술적으로 지원한다. 본고에서는 내염성 콩과 감수성 콩의 엽온이 유의한 차이를 나타냄으로써 표현체 분석 기술에서의 활용 가능성을 보였다.

농업 활용에 있어 열화상 카메라의 기술과 분석적 한계도 여전히 존재한다. 열화상 카메라로 관측되는 엽온은 작물 생리적인 원인 외에도 기상의 영향을 크게 받는다. 비록 본고 실험에서는 실험군과 대조군을 같이 촬영하였기 때문에 기상 조건을 고려하지 않았지만, 경작되고 있는 작물 모니터링을 위해서는 주요 기상 조건을 이용한 효과적인 엽온의 정규화 기술이 필요하겠다. 또한 엽온의 변화는 약 $-3.0\sim 3.0^{\circ}\text{C}$ 정도에서 일어나기 때문에 카메라가 높은 정확도로 온도를 측정해야 하는데, 카메라의 하드웨어 수준은 계속 높아지고 있는 반면에 대상 식물의 방사율(emissivity) 값을 유의한 수준으로 반영하거나 피사체 표면 반사로 온도가 높게 측정되는 배경온도(background temperature) 효과를 조도나 습도 조건에 따라 보정할 목적으로 알루미늄 호일을 함께 촬영하는 등의 현재 방법은 불편하며 정교하지 않은 것이 사실이다.

열화상 카메라로 촬영되는 엽온은 식물의 기공 반응을 기반으로 하기 때문에 기공이 반응하지 않는 생육이상이나 스트레스는 탐지하지 못하는 단점이 있다. 비록 대부분의 생리적 스트레스가 기공에 영향을 주지만, 본고에서 내염성 콩의 실험에서 보인 것과 같이 촬영 또는 생육 시기에 따라서 반응 결과가 매우 상이할 수 있으므로 열화상 카메라를 농업에 적용하기 위해서는 관

측 및 보정 기술뿐만 아니라 환경에 대한 기공 반응의 이해를 바탕으로 분석되어야 하겠다.

사사

이 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ015103052022)의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

References

- Haynes, R.J. and R. Naidu, 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 51(2): 123-137. <https://doi.org/10.1023/A:1009738307837>
- 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. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(81\)90032-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(81)90032-7)
- Jeong, H., R.-D. Jeong, J.H. 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 Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5532/KJAFM.2019.21.2.111>
- Jones, H.G., 1992. *Energy balance and evaporation, Plants and Microclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology, 2nd edition*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 106-130.
- Kim, J.W., T.Y. Lee, G. Nah, and D.S. Kim, 2014. Potential of thermal image analysis for screening salt stress-tolerant soybean (*Glycine max*), *Plant Genetic Resources*, 12(S1): 134-136. <https://doi.org/10.1017/S1479262114000422>
- 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. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01528.x>
- 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. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0340-FE>
- Medina, E., M. Sobrado, and R. Herrera, 1978. Significance of leaf orientation for leaf temperature in an Amazonian sclerophyll vegetation, *Radiation and Environmental Biophysics*, 15(2): 131-140. <https://doi.org/10.1007/BF01323262>
- Meena, H.M. and H.C. Prakasha, 2022. The impact of biochar, lime and fertilizer on soil acidity and microbiological properties and their relationship with yield of rice and cowpea in an acidic soil of Southern India, *Journal of Plant Nutrition*, 45(3): 358-368. <http://doi.org/10.1080/01904167.2021.1952225>
- Merlot, S., A.C. Mustilli, B. Genty, H. North, V. Lefebvre, B. Sotta, A. Vavasseur, and J. Giraudat, 2002. Use of infrared thermal imaging to isolate Arabidopsis mutants defective in stomatal regulation, *The Plant Journal*, 30: 601-609. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.2002.01322.x>
- Munns, R. and M. Tester, 2008. Mechanisms of salinity tolerance, *Annual Review of Plant Biology*, 59: 651-681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
- Prashar, A. and H. Jones, 2014. Infra-red thermography as a high-throughput tool for field phenotyping, *Agronomy*, 4(3): 397-417. <https://doi.org/10.3390/agronomy4030397>
- Zarco-Tejada, P.J., V. González-Dugo, L.E. Williams, L. Suarez, J.A. Berni, D. Goldhamer, and E. Fereres, 2013. A PRI-based water stress index combining structural and chlorophyll effects: Assessment using diurnal narrow-band airborne imagery and the CWSI thermal index, *Remote Sensing of Environment*, 138: 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.024>
- Zia, S., G. Romano, W. Spreer, C. Sanchez, J. Cairns, J.L. Araus, and J. Müller, 2013. Infrared thermal imaging as a rapid tool for identifying water-stress tolerant maize genotypes of different phenology, *Journal of Agronomy and Crop Science*, 199(2): 75-84. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2012.00537.x>