

Research Article

## 가뭄과 폭염 조건에서 MTCI와 CCI를 이용한 수분 스트레스 평가

김경민<sup>1)</sup> · 문현동<sup>2),3)</sup> · 조은이<sup>1),4)</sup> · 김보경<sup>1),4)</sup> · 최수빈<sup>1)</sup> · 이유현<sup>5)</sup> ·  
이윤아<sup>5)</sup> · 정희정<sup>6)</sup> · 류재현<sup>7)</sup> · 안호용<sup>8)</sup> · 이성태<sup>9)</sup> · 조재일 <sup>10),11)\*</sup>

### Monitoring of Crop Water Stress with Temperature Conditions Using MTCI and CCI

Kyeong-Min Kim<sup>1)</sup> · Hyun-Dong Moon<sup>2),3)</sup> · Euni Jo<sup>1),4)</sup> · Bo-Kyeong Kim<sup>1),4)</sup> ·  
Subin Choi<sup>1)</sup> · Yuhyeon Lee<sup>5)</sup> · Yuna Lee<sup>5)</sup> · Hoejeong Jeong<sup>6)</sup> ·  
Jae-Hyun Ryu<sup>7)</sup> · Hoyong Ahn<sup>8)</sup> · Seongtae Lee<sup>9)</sup> · Jaeil Cho <sup>10),11)\*</sup>

**Abstract:** The intensity of crop water stress caused by moisture deficit is affected by growth and heat conditions. For more accurate detection of crop water stress state using remote sensing techniques, it is necessary to select vegetation indices sensitive to crop response and to understand their changes

Received December 1, 2023; Revised December 6, 2023; Accepted December 10, 2023; Published online December 31, 2023

- <sup>1)</sup> 전남대학교 응용식물학과 석사과정생(Master Student, Department of Applied Plant Science, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea)
- <sup>2)</sup> 전남대학교 응용식물학과 박사과정생(PhD Student, Department of Applied Plant Science, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea)
- <sup>3)</sup> 전남대학교 IT-Bio 융합시스템농업교육연구단 박사과정생(PhD Student, BK21 FOUR Center for IT-Bio Convergence System Agriculture, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea)
- <sup>4)</sup> 전남대학교 IT-Bio 융합시스템농업교육연구단 석사과정생(Master Student, BK21 FOUR Center for IT-Bio Convergence System Agriculture, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea)
- <sup>5)</sup> 전남대학교 응용식물학과 학부생(Undergraduate Student, Department of Applied Plant Science, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea)
- <sup>6)</sup> 농촌진흥청 국립식량과학원 생산기술개발과 연구사(Researcher, Crop Production Technology Research Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Miryang, Republic of Korea)
- <sup>7)</sup> 농촌진흥청 국립농업과학원 기후변화평가과 박사후연구원(Postdoctoral Researcher, Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju, Republic of Korea)
- <sup>8)</sup> 농촌진흥청 국립농업과학원 기후변화평가과 연구사(Researcher, Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju, Republic of Korea)
- <sup>9)</sup> 농촌진흥청 국립식량과학원 생산기술개발과 연구관(Senior Researcher, Crop Production Technology Research Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Miryang, Republic of Korea)
- <sup>10)</sup> 전남대학교 응용식물학과 부교수(Associate Professor, Department of Applied Plant Science, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea)
- <sup>11)</sup> 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)

Copyright © 2023 by The Korean Society of Remote Sensing. 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.

considering not only soil moisture deficit but also heat conditions. In this study, we measured the MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI) and chlorophyll/carotenoid index (CCI) under drought and heat wave conditions. The MTCI, sensitive to chlorophyll concentration, sensitively decreased on non-irrigation conditions and the degree was larger with heat waves. On the other hand, the CCI, correlated with photosynthesis efficiency, showed less sensitivity to water deficit but had decreased significantly with heat waves. After re-irrigation, the MTCI was increased than before damage and CCI became more sensitive to heat stress. These results are expected to contribute to evaluating the intensity of crop water stress through remote sensing techniques.

**Keywords:** Crop water stress, Growth stage, Irrigation, Heat wave, Vegetation index, Photosynthesis efficiency

**요약:** 작물의 수분 스트레스는 생육 단계와 온도 조건에 따라 달라질 수 있으며, 이는 생육에 부정적이고 생산량에 피해를 줄 수 있다. 원격탐사 기법을 이용한 보다 정확한 스트레스 탐지를 위해서는 수분 결핍의 가뭄뿐만 아니라 폭염 조건도 함께 고려할 필요가 있으며, 작물 반응을 민감히 표현할 식생지수를 선정하고 그 변화 값을 이해해야 한다. 본 연구는 콩을 대상으로 영양생장기와 생식생장기로 구분해 가뭄과 폭염 조건에서의 MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI)와 chlorophyll/carotenoid index (CCI)를 측정하였다. 엽록소 농도에 민감한 MTCI는 가뭄에 민감하게 감소했으며, 폭염이 동시에 발생했을 때는 그 정도가 컸다. 광합성능과 상관성이 있는 CCI는 비교적 가뭄에 민감하지 않으나, 폭염을 동반하면 큰 폭으로 감소했다. 수분 결핍 회복 후 MTCI는 피해 전보다 값이 증가했으며, CCI는 열 스트레스에 민감해졌다. 이러한 결과는 원격탐사를 활용해 콩의 수분 스트레스를 평가하고 관수 일정을 조정하는 데에 기여할 것으로 기대된다.

**주요어:** 가뭄, 폭염, 관수, 수분 스트레스, 식생지수

## 1. 서론

수분은 광, 기온과 함께 식물 생장에 필수적인 자원이다(Elliott et al., 2014). 수분은 식물 세포의 팽압을 발생시켜 식물을 기계적으로 지탱하고, 체내 양분과 대사산물의 이동을 매개하며, 증산을 통해 식물 표면을 냉각하는 등 여러 가지 생리·생육 반응에 중요한 기능을 수행한다(Sauer et al., 2010). 식물 성장과 발육을 위해 물은 끊임없이 공급되어야 하는데, 자연에서는 식물에 공급되는 대부분의 물이 강우에 의존하기 때문에 수분 결핍 상태를 겪을 수 있다. 반면, 수량 증대를 목적으로 하는 농업에서는 관수를 통해 기상과 관계없이 물을 공급함으로써 토양수분이 작물의 생육을 제한하지 않도록 한다(Hanson et al., 2000). 하지만 수자원이 제한되는 정도의 가뭄은 농업에 큰 피해를 줄 수 있다(Liu et al., 2013).

일반적으로 식물은 수분 스트레스를 받으면 증산 작용으로 인한 수분 손실을 막고자 기공을 닫는데(Jeong et al., 2019), 기공이 폐쇄되면 엽온이 증가하고 광합성의 기질인 CO<sub>2</sub>의 공급이 차단되어 광합성 효율이 낮아

진다(Sun et al., 2008). 이러한 수분 결핍이 더 지속되면 광 에너지를 포획하는 엽록소의 합성이 억제되어 광합성은 더욱 감소하여 생육과 생산량에 치명적인 위협이 된다(Silva et al., 2018; Osakabe et al., 2014).

이러한 수분 스트레스는 단순히 수분 부족만으로 결정되지는 않는데, 예를 들어 생육 단계와 환경 조건에 따라 다르게 나타날 수 있다(Cakir, 2004). 대부분의 작물은 개화를 기점으로 영양생장기와 생식생장기로 나뉘며, 개화기 전후에 나타나는 수분 스트레스는 수량에 큰 영향을 미친다. 기온 또한 수분 스트레스에 직·간접적으로 영향을 미친다. 고온 조건은 증발산량을 결정하는 환경요인으로써 토양수분을 낮추고 증산을 높여서 뿌리가 흡수하는 수분보다 잎의 수분 손실이 커지는 전형적인 수분 스트레스를 유발할 수 있으며(Philip, 1966), 그 자체로써 식물체 열 스트레스를 유발하여 광합성능을 저해할 수 있다(Salvucci and Crafts-Brandner, 2004).

식물의 수분 스트레스 상태를 파악하는 관행적인 방법은 건물중(dry biomass), 수분 및 엽록소 함량 등을 측정하는 파괴식 조사 방법 또는 기체교환식의 광합성, 기

공전도도를 측정하는 비파괴 조사 방법이 있다. 이 경우 관측 방법이 번거롭고 다량의 샘플을 파괴하기 부담인 점, 영농현장에 활용하기 어려운 점 등의 단점이 존재한다(Berger et al., 2022). 최근 들어 작물 감시 활용에 관심이 높아지고 있는 원격 탐사 기법은 빠르고 간단하게 식물의 상태를 파악할 수 있고, 드론이나 항공기에 카메라를 설치하면 넓은 면적에 대해서 정보를 획득할 수 있다는 장점이 있다(Moran, 1994; de Lima et al., 2021).

노지 밭에서 관수 시기와 물량을 결정하는 가장 일반적인 방법은 기상 자료 기반으로 추정된 증발산량을 이용하는 것이다(Djaman et al., 2018). 토양에서 수분을 잃는 만큼 관수해주면 된다는 개념으로써 작물이 받는 수분 스트레스보다는 토양수분 조건에 초점이 맞춰져 있다. 하지만 원격탐사 기법을 이용하면 작물의 수분 스트레스를 간접적으로 추정하여 보다 효율적으로 관수 스케줄을 결정할 수 있을 것으로 기대된다(Marques et al., 2023). 이를 위해서는 원격탐사로부터 취득한 분광 정보를 관수 결정에 활용하기 위한 농업 부가가치 정보로 해석 및 가공할 수 있어야 한다.

수분 부족량에 따른 수분 스트레스를 원격탐사를 통해 명확히 이해하기 위해서는 생육 단계별 고온 조건과 함께 이해될 필요가 있으며, 이를 위해 각 조건에 반응하는 식물생리 기반의 식생지수 변화를 분석해야 한다. 이에 본 연구에서는 수분 스트레스를 영양생장기와 생식생장으로 구분하고 폭염 조건도 함께 고려하여 반사도 기반 식생지수인 MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI)와 chlorophyll/carotenoid index (CCI) 변화를 살펴보았다.

## 2. 연구자료 및 방법

### 2.1. 생육 포트 및 환경

광주광역시 전남대학교 광주 캠퍼스에 위치한 농업 실습장 비닐하우스에서 실험을 진행하였다. 생육 포트는 높이가 36.5 cm, 직경은 28.0 cm인 플라스틱 통을 이용하였고, 물 빠짐이 용이하도록 바닥에 지름 5 cm 구멍을 5개 뚫고 부직포로 덮은 후 흙을 채웠다. 2023년 6월 13일에 대찬 품종의 콩을 12개 포트에 각각 3알씩 파종하였다. 토양은 고구마를 재배하는 노지 포장으로부터

가져왔고 농촌진흥청에서 제공하는 작물 표준시비 기준에 맞춰 사용하였다. 파종된 포트는 비닐하우스 내에 두어 강우를 차단하여 관수로 토양수분 조절이 용이하게 하였다. 또한 비닐하우스 입구와 측면 비닐을 모두 개방하여 상시 환기되게 함으로써 내부와 외부 기온의 차이가 발생하지 않게 하였다. 대조구 포트는 기본적으로 매일 관수하여 충분한 수분을 공급하였으나, 농촌진흥청의 농업기상재해 조기경보 시스템(<https://agmet.kr>)을 기준으로 흐리고 습한 날에는 습해를 방지하기 위해 관수하지 않았다.

### 2.2. 수분 스트레스 실험

생육 단계에 따른 수분 스트레스 반응을 관찰하기 위해 처리구를 Fig. 1(a)와 같은 관수 스케줄로 토양수분 환경을 다르게 조성하였다. 실험은 크게 3가지로 수행하였는데, 첫째, 영양생장기에 서로 다른 기온 조건에서 나타나는 토양수분 스트레스 반응 양상을 살펴보았다. 10~12번 포트는 파종 후 31일차인 7월 13일부터 26일까지 관수를 중단하였고, 관수 중단 6일차인 7월 19일과 11일차인 7월 24일에 광합성 규모와 효율에 관련된 지수인 MTCI와 CCI를 관측하여 스트레스를 평가했다. 또한, 뒤이어 기상청이 통지한 폭염이 발생한 기간에 맞춰 7월 27일부터 8~9번 포트에 관수를 중단하였다. 관수 중단 4일차인 7월 31일에 동일한 관측을 함으로써 수분 부족과 폭염이 동시에 발생한 상황을 분석하였다.

둘째, 앞서 관수를 중단했던 10~12번 포트를 7월 26일 이후로 관수를 재개하였다. 이를 통해 작물이 수분 스트레스 이후 회복하는 과정을 시간 흐름에 따른 연속적인 관측을 통해 분석하였다.

셋째, 일반적으로 식물이 개화 이후 생식생장기에 접어들면 동화산물의 분배가 종자 형성에 집중되고 잎의 노화가 시작되는 등 생리적으로 다양한 변화가 발생한다. 따라서 수분 스트레스에 대한 반응도 영양생장기와 다를 것으로 예상하였다. 이를 확인하기 위해 개화기 초반에 해당하는 8월 14일부터 4~7번 포트를 순차적으로 관수 중단하여 수분 부족 기간이 콩의 스트레스에 미치는 영향을 분석하였다.

### 2.3. 토양 및 기상 센서

관수 공급 또는 중단으로 조성되는 토양수분의 변화

를 측정하기 위해 Fig. 1(b)와 같이 각 포트마다 토양수분계(TEROS12, METER Inc., Pullman, WA, USA) 2개를 설치하였다. 5.5 cm 길이의 탐침(probe)이 토양 표면과 수직으로 들어가도록 꽃아 표층 토양의 토양수분함량 ( $m^3/m^3$ )을 측정하였다. 또한 온실 내부에 온·습도계 (ATMOS14, METER Inc., Pullman, WA, USA) 2개를 설치하였고 모든 센서는 데이터로거(ZL6, METER Inc., Pullman, WA, USA)에 5분 간격으로 집록하였다.

### 2.4. 비파괴 작물 관측

식물의 생리적 반응을 직접 파악하는 방법은 식물을 파괴하고 목적으로 하는 물질을 추출하여 그 함량을 측정하는 것이 일반적이다. 본 실험에서는 식물의 분광 반사도 특성 기반의 비파괴 관측 방법을 이용하여 스트레스를 평가하였다. 식물 잎에 존재하는 다양한 색소들(엽록소, 카로티노이드(Carotenoid) 등)은 각각 고유한 파장대의 빛을 흡수하고 나머지는 투과·반사하는 성질을 갖기 때문에 분광 반사도 관측을 통해 생육 및 생리적 변화에 따른 색소 변화를 이해할 수 있다(Gitelson et al., 2002; Kume, 2017; Falcioni et al., 2023). 대부분의 선행 연구들에서는 반사도 자체를 사용하기 보다는 특정 파장의 반사도들을 조합하여 개발된 식생지수(vegetation index)를 연구 목적에 맞춰 사용하고 있다(Moon et al., 2022; Kim et al., 2021; Gao et al., 2020).

수분 스트레스에 대해 엽록소 농도와 광합성능이 민감하게 반응한다고 알려져 있으므로, 엽록소 농도 추정에 사용되는 MTCI와 광합성능과 상관관계가 있다고 알려진 CCI를 관측하였다(Dash and Curran, 2007; Gamon et al., 2016). 엽록소 농도가 증가할수록 MTCI값도 커진다(Banerjee and Krishnan, 2020). 일반적으로 CCI가 증가할수록 높은 광합성능을 나타내는데(Moeremans and Dautrebande, 2000), 이는 카로티노이드에 대한 엽록소 농도비( $[Chl.]/[Car.]$ )가 CCI와 비례하는 것에 기인한다(Cerullo et al., 2002). MTCI와 CCI의 산출식은 아래와 같으며, R은 해당 파장대의 반사도 값을 나타낸다.

$$MTCI = \frac{R_{754\text{ nm}} - R_{709\text{ nm}}}{R_{709\text{ nm}} - R_{681\text{ nm}}} \quad (1)$$

$$CCI = \frac{R_{531\text{ nm}} - R_{650\text{ nm}}}{R_{531\text{ nm}} + R_{650\text{ nm}}} \quad (2)$$

각 잎 샘플에서의 MTCI와 CCI 관측값은 3 반복의 평균을 사용했다. MTCI와 CCI는 하루 중 관측 시간에 따라 유의한 차이를 나타내지 않았지만 주로 오전 관측자료를 사용하였다.

잎 표면에서의 분광 반사도 측정은 휴대용 초분광계(CI710, CID Bio-Science Inc., Camas, WA, USA)를 사용하였다. 측정 파장 범위는 400-950 nm이고 분광 밴드의 수는 3,648개, 해상도는 3,648 pixel, 분광분해능(full width at half maximum)은 약 0.3-10.0 nm이다.

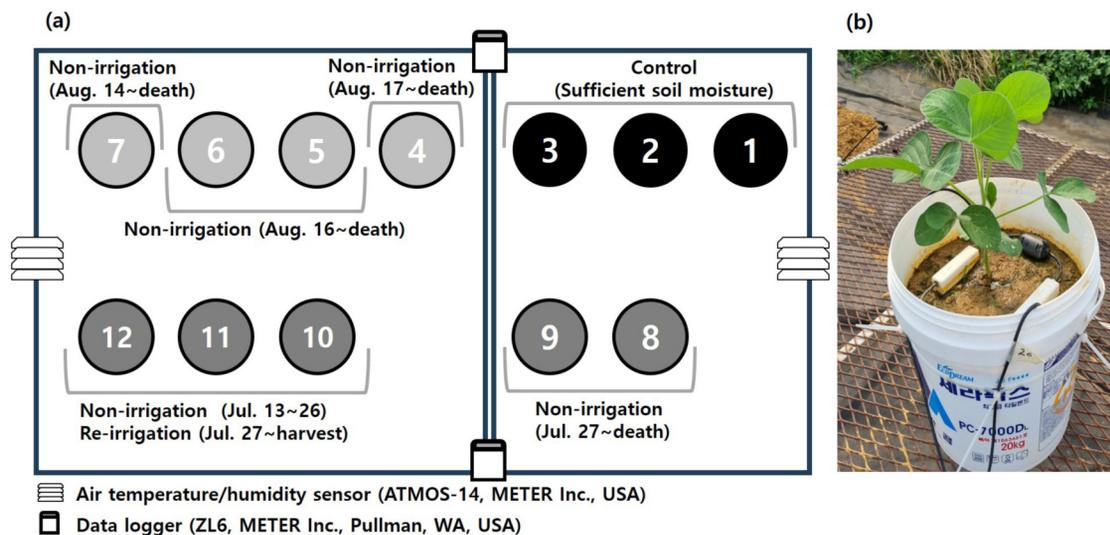


Fig. 1. Diagram of experimental place. (a) A design of soybean pots arrangement and irrigation schedules. (b) Two soil moisture sensors in each pot.

### 3. 연구결과 및 토의

#### 3.1. 영양생장기 가뭄과 폭염 영향

Fig. 2는 영양생장기 콩 포트에 관수를 중단하여 인위적인 가뭄(drought) 조건을 조성하고 MTCI와 CCI를 관측한 결과이다. 가뭄 조건 6일째 콩의 MTCI와 CCI 모두 대조구와 유의한 차이를 보이지 않았다(Figs. 2a, b). 하지만 가뭄 조건 11일째에 MTCI가 감소한 것을 확인하였다. 이것은 잎의 엽록소 농도가 수분 스트레스에 매우 민감하다는 것과 일치한다(Zhang et al., 2011). CCI는 가뭄 조건 11일째까지도 유의한 차이를 보이지 않았는데, 이는 광합성능이 엽록소 농도에 비해 수분 스트레스에 덜 민감하기 때문인 것으로 사료된다. 11일째의 MTCI 값 감소가 실제로 낮아진 엽록소 함량을 나타내는 것이라면, 카로티노이드 농도에 대한 엽록소 농도 비율([Chl.]/[Car.])과 정비례하는 CCI는 변화가 없었으므로 카로티노이드 농도 또한 상대적으로 유사한 크기로

낮아졌다고 추측할 수 있다. 즉, 수분 스트레스 상황에서 카로티노이드 합성도 엽록소와 마찬가지로 부정적인 영향을 받았다고 볼 수 있다. 이는 과도한 광 흡수나 열 스트레스 조건에서 카로티노이드 합성이 증가해 엽록소를 보호한다는 선행연구 경향과는 다른 경향이다(Havaux, 2014). 하지만 Moon et al. (2022)이 보고한 콩의 수분 스트레스 초기에는 엽록소 농도 감소량에 비해 카로티노이드 농도가 더 빠르게 낮아져서 CCI는 증가한 결과와 함께 종합해보면, 수분 스트레스에 대해 카로티노이드는 감소하며 그 변화 속도는 엽록소와 다소 상이할 수 있지만 유사한 비율을 보인다고 할 수 있다.

한편, Figs. 2(c), (d)의 가뭄 실험은 폭염 기간에 이루어졌다. 폭염 기간의 최고온도는 40도를 상회하였으며, 대조구와 가뭄 조건의 토양수분 차이도 상대적으로 작아졌다(Fig. 3). 폭염 기간의 관수 중단은 4일째에 MTCI의 감소와 더불어 CCI의 감소까지 나타났다. 폭염이 없었던 기간에는 관수 중단 6일째에도 MTCI와 CCI 모두

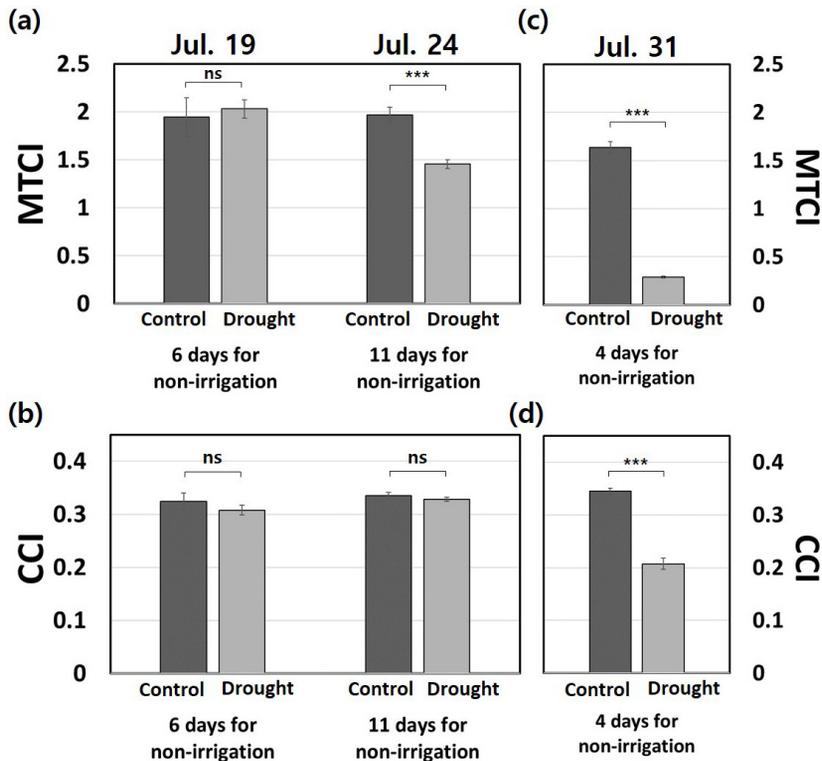


Fig. 2. Changes of MTCI and CCI of the soybean according to different irrigation schedules during the vegetation growth period, particularly under (a, b) mostly cloudy conditions and (c, d) heat waves. Student's T-test was conducted. ns = not significant ( $P \geq 0.05$ ) and  $***P < 0.001$ .

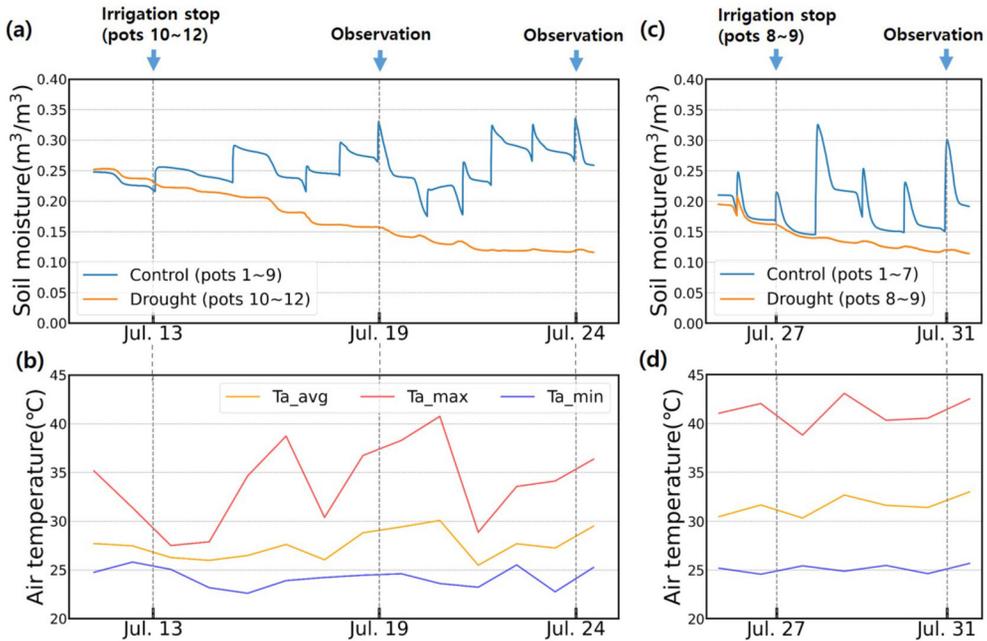


Fig. 3. Averaged soil moisture and air temperature of irrigated and unirrigated pots (Also see the period of Fig. 2).

유의한 변화가 없었던 점을 고려한다면, 수분 스트레스가 강하고 빠르게 발생하였음을 뜻한다. 이는 수분 결핍과 폭염이 작물에 부정적인 상승 작용을 가져왔기 때문으로 사료된다. 사실 폭염의 단독 효과는 크지 않았던 것 같은데, 폭염 직전(7월 24일)과 진행 중(7월 31일)의 대조구를 서로 비교해 보면 MTCI는 다소 감소했으며 CCI는 거의 변하지 않았다.

종합하면 MTCI는 수분과 열 스트레스 각각에 민감하게 반응하며, 가뭄과 폭염이 동시에 발생하면 크게 감소할 것으로 사료된다. CCI는 수분 스트레스 단독의 영향에는 상대적으로 덜 민감하지만, 열 스트레스와 함께 작용할 때 하락하였다.

### 3.2. 영양생장기 수분 결핍 후 관수의 영향

Fig. 4는 영양생장기에 관수를 중단해 수분 결핍을 겪은 후 다시 수분이 공급되었을 때의 MTCI와 CCI 변화를 보여준다. 7월 13일부터 7월 24일까지 진행된 가뭄 조건의 생육 포트에 대해 관수를 다시 재개했는데, 가뭄 기간은 흐린 날이 빈번하여 일반적인 7월 기온이었으나 재관수 기간은 폭염이 있었다.

관수 재개 4일째(7월 31일)에 MTCI와 CCI가 모두 증가하여 실험구의 MTCI 값은 대조구와 비슷하게 나타

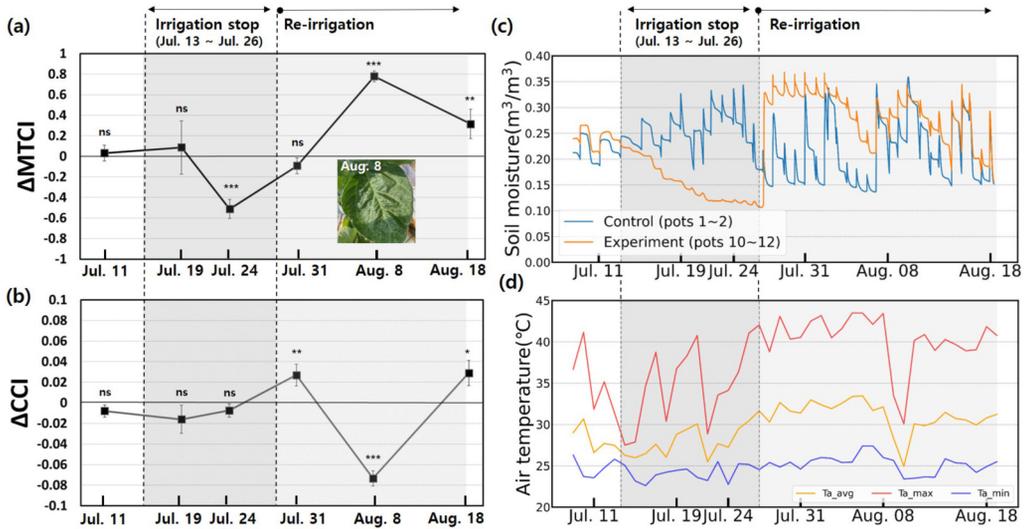
났으며, CCI 값은 재관수한 실험구가 오히려 대조구보다 높아졌다. 수분 스트레스가 회복되는 과정에서 엽록소 농도가 크게 증가했으며, 이로 인해 광합성능을 나타내는 [Chl]/[Car.] 값의 증가로 이어진 것으로 사료된다.

관수 재개 11일째(8월 8일)에 실험구 MTCI는 더욱 증가하여 대조구와의 차이가 커졌다. 실제 육안으로도 잎의 색이 대조구에 비해 더 짙은 녹색을 띠었다. 또한 실험구 잎은 매우 주름진 모습을 보였는데, 모든 재관수 포트에서 동일하게 나타났으므로 병원성 증상은 아닌 것으로 보인다. 즉, 수분 부족(water deficiency)으로 세포가 탈수되거나 수분이 재흡수될 때 원형질막과 세포막의 수축과 팽창 불균형으로 일부 잎 세포들의 기계적 파열이 나타난 것으로 사료된다. 이런 잎의 형태적 변화는 관수 재개 기간의 폭염과 무관하지 않은 것으로 보이는데, 광합성능 관점에서도 재관수 직후에 회복되었던 CCI는 다시 큰 폭으로 하락한 것을 볼 수 있다. 엽록소 농도가 크게 증가하였음에도 CCI가 감소한 것은 열 스트레스에 의한 카로티노이드 농도 증가를 의심해 볼 수 있다.

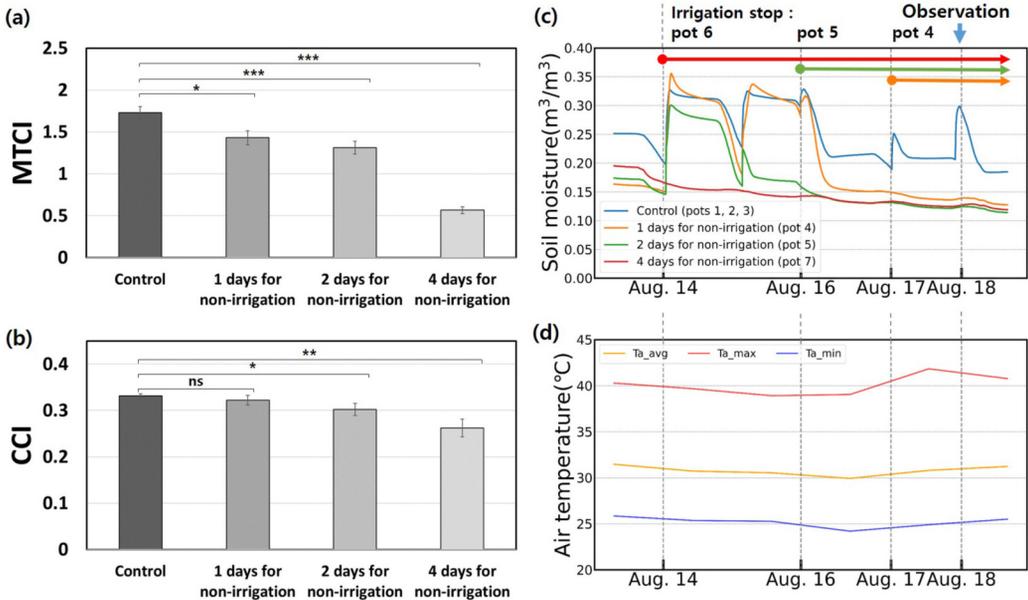
관수 재개 21일째(8월 18일)의 CCI는 다시 큰 폭으로 증가하였는데, 8월 8일과 18일 관측일 사이에 비가 내려 폭염이 크게 꺾임으로써 CCI에 부정적 영향을 미쳤던

열 스트레스가 완화되었기 때문으로 추측된다. 이 때의 MTCI는 여전히 대조구보다는 높지만 앞선 관측 때(8월 8일)보다 다소 낮아진 모습을 볼 수 있는데, 이것은 8월 8일은 잎 수분 부족을 겪은 후 회복된 잎이었고, 8월 18

일에는 회복 잎의 기계적 손상으로 재관수 이후에 전개된 잎을 선택해 측정된 점이 고려되어야 하겠다. 하지만 명백한 점은 재관수 이후의 새 잎은 수분 스트레스를 겪지 않은 대조구의 새 잎보다 엽록소 농도와 광합성능력



**Fig. 4.** Changes of MTCI and CCI of the soybean after re-irrigation. (a, b) Monitoring the difference of MTCI and CCI between control and experimental pots during non-irrigation and re-irrigation. (c, d) Averaged soil moisture and air temperature of the soybean pots. Student's T-test was conducted. ns = not significant ( $P \geq 0.05$ ), \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ , and \*\*\* $P < 0.001$ .



**Fig. 5.** Changes of MTCI and CCI of the soybean according to different irrigation schedules during the reproductive growth period. (a, b) Changes of MTCI and CCI in the soybean pots according to different irrigation schedules after flowering. (c, d) Averaged soil moisture and air temperature of the soybean pots. Student's T-test was conducted. ns = not significant ( $P \geq 0.05$ ), \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ , and \*\*\* $P < 0.001$ .

모두 높았다.

다시 말해, MTCI로 대표되는 엽록소 농도는 수분부족 회복 이후에 높아지는 경향이 있으며, CCI로 나타나는 광합성능은 수분 스트레스가 완화되었음에도 열 스트레스에 여전히 민감한 것으로 사료된다.

### 3.3. 생식생장기 가뭄의 영향

Fig. 5는 개화 이후 생식생장기가 시작된 시점에서의 가뭄 영향을 관수 중단 기간별로 나타낸 것이다. 비록 본 생식생장기 실험 기간(8월 14~18일)은 개화 직후였지만, 잎의 노화가 시작되는 상징적인 시점이므로 수분 결핍에 매우 취약할 것으로 예상하였다. 하지만 두 식생지수의 변화 정도는 영양생장기 때와 크게 다르지 않았다. MTCI와 CCI 모두 수분 부족 기간이 길어짐에 따라 유의한 감소를 보였으며, CCI보다 MTCI가 더 신속하게 반응했다. 이것은 폭염이 없었던 영양생장기 가뭄 조건에 비해서는 큰 폭의 감소이지만, 폭염이 있었던 영양생장기 가뭄 조건과는 유사하거나 다소 못 미치는 감소로 보인다. 더욱이 생식생장기 실험 기간도 영양생장기 7월 31일 폭염에 준하는 상당한 고온이었다는 점을 고려할 때, 영양생장기와 생식생장 초기의 수분 부족 반응이 크게 다르지 않았음을 확인시켜 준다.

## 4. 결론

본 연구에서는 수분 결핍에 대한 분광 반사도 기반의 MTCI와 CCI 식생지수의 반응을 살펴보았다. 더불어 가뭄과 함께 빈번히 발생하는 폭염의 영향도 같이 분석하였다. 가뭄 조건에 대해서 MTCI가 민감하게 감소하였으며, 가뭄과 폭염이 동시에 발생하면 MTCI는 더욱 크게 낮아졌다. CCI는 가뭄 조건만으로는 상대적으로 덜 민감했다. 하지만 이는 수분 부족에서도 광합성을 온전히 유지한다는 의미로 해석될 수는 없으며, 잠재적인 광합성 능력, 특히 광합성에서 광 에너지를 생화학적으로 에너지로 변환하는 광인산화 효율이 떨어지지 않았다고 해석된다. 하지만, Moon et al. (2022)이 열화상 카메라로 확인한 수분 결핍 시 콩 기공이 신속히 닫히는 모습에서 실제 광합성의 총량은 감소한 것으로 추정되므로, CCI 값이 변하지 않는다고 해서 광합성 생산량이 유지

된다고 간주할 수는 없을 것이다. 더불어 가뭄에서는 광합성 효율이 유지되었지만 폭염이 동반하였을 때는 큰 폭으로 낮아졌다.

MTCI와 CCI의 증감을 함께 분석하면, 작물이 가뭄과 폭염에 노출된 상태를 파악하여 관수 시기와 양을 조절하는데 도움이 될 것으로 사료된다. 예를 들어, 정상적인 콩 생육의 경우에 영양생장기와 생식생장 초기에 걸쳐 MTCI는 약 1.5-2.0 그리고 CCI는 약 0.30-0.35 값을 보이는데, MTCI만 낮아진다면 다소 적은 양이지만 신속한 관수가 필요하다. 수분의 빠른 흡수를 위해 토양에 직접 공급되는 형태가 좋겠다. 반면, MTCI와 CCI가 동시에 감소할 때에는 스프링클러 형태로 관수함으로써 엽면을 냉각시키는 동시에 물이 충분히 공급되도록 하는 것이 좋겠다. 한편, 수분 스트레스 회복 후에 MTCI 값은 피해 전보다 높아지는 경향이 있고, CCI는 열 스트레스에 민감해지는 모습을 보이므로 해석에 유의해야 할 것이다. MTCI와 CCI 지수는 영양생장기 전 반과 생식생장기 초기까지 관수 스케줄 계획에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

## 사사

이 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: RS-2022-RD009999)의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

## Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

## References

- Banerjee, K., and Krishnan, P., 2020. Normalized Sunlit Shaded Index (NSSI) for characterizing the moisture stress in wheat crops using classified thermal and visible images. *Ecological Indicators*, 110, 105947. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.>

- 2019.105947
- Berger, K., Machwitz, M., Kycko, M., Kefauver, S. C., Van Wittenberghe, S., Gerhards, M. et al., 2022. Multi-sensor spectral synergies for crop stress detection and monitoring in the optical domain: A review. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113198. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113198>
- Cakir, R., 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*, 89(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.005>
- Cerullo, G., Polli, D., Lanzani, G., De Silvestri, S., Hashimoto, H., and Cogdell, R. J., 2002. Photosynthetic light harvesting by carotenoids: Detection of an intermediate excited state. *Science*, 298(5602), 2395–2398. <https://doi.org/10.1126/science.1074685>
- Dash, J., and Curran, P. J., 2007. Evaluation of the MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI). *Advances in Space Research*, 39(1), 100–104. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.02.034>
- de Lima, I. P., Jorge, R. G., and de Lima, J. L. P., 2021. Remote sensing monitoring of rice fields: Towards assessing water saving irrigation management practices. *Frontiers in Remote Sensing*, 2, 762093. <https://doi.org/10.3389/frsen.2021.762093>
- Djaman, K., O'Neill, M., Owen, C. K., Smeal, D., Koudahe, K., West, M. et al., 2018. Crop evapotranspiration, irrigation water requirement and water productivity of maize from meteorological data under semi-arid climate. *Water*, 10(4), 405. <https://doi.org/10.3390/w10040405>
- Elliott, J., Deryng, D., Müller, C., Frieler, K., Konzmann, M., Gerten, D. et al., 2014. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Science*, 111(9), 3239–3244. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222474110>
- Falcioni, R., Antunes, W. C., Demattê, J. A. M., and Nanni, M. R., 2023. A novel method for estimating chlorophyll and carotenoid concentrations in leaves: A two hyperspectral sensor approach. *Sensors*, 23(8), 3843. <https://doi.org/10.3390/s23083843>
- Gamon, J. A., Huemmrich, K. F., Wong, C. Y., Ensminger, I., Garrity, S., Hollinger, D. Y. et al., 2016. A remotely sensed pigment index reveals photosynthetic phenology in evergreen conifers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(46), 13087–13092. <https://doi.org/10.1073/pnas.1606162113>
- Gao, L., Wang, X., Johnson, B. A., Tian, Q., Wang, Y., Verrelst, J. et al., 2020. Remote sensing algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159, 364–377. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.018>
- Gitelson, A. A., Zur, Y., Chivkunova, O. B., and Merzlyak, M. N., 2002. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. *Photochemistry and Photobiology*, 75(3), 272–281. [https://doi.org/10.1562/0031-8655\(2002\)0750272ACIPL2.0.CO2](https://doi.org/10.1562/0031-8655(2002)0750272ACIPL2.0.CO2)
- Hanson, B., Orloff, S., and Peters, D., 2000. Monitoring soil moisture helps refine irrigation management. *California Agriculture*, 54(3), 38–42.
- Havaux, M., 2014. Carotenoid oxidation products as stress signals in plants. *The Plant Journal*, 79(4), 597–606. <https://doi.org/10.1111/tpj.12386>
- Jeong H., Jeong, R. D., Ryu, J. H., Oh, D., Choi, S., and Cho, J., 2019. Preliminary growth chamber experiments using thermal infrared image to detect crop disease. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 21(2), 111–116. <https://doi.org/10.5532/KJAFM.2019.21.2.111>
- Kim, H., Moon, H. D., Ryu, J. H., Kwon, D. W., Baek, J. K., Seo, M. C. et al., 2021. Crop monitoring technique using spectral reflectance sensor data

- and standard growth information. *Korean Journal of Remote Sensing*, 37(5–1), 1199–1206. <https://doi.org/10.7780/KJRS.2021.37.5.1.29>
- Kume, A., 2017. Importance of the green color, absorption gradient, and spectral absorption of chloroplasts for the radiative energy balance of leaves. *Journal of Plant Research*, 130, 501–514. <https://doi.org/10.1007/s10265-017-0910-z>
- Liu, X., Shao, L., Sun, H., Chen, S., and Zhang, X., 2013. Responses of yield and water use efficiency to irrigation amount decided by pan evaporation for winter wheat. *Agricultural Water Management*, 129, 173–180. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.08.002>
- Marques, P., Pádua, L., Sousa, J. J., and Fernandes-Silva, A., 2023. Assessing the water status and leaf pigment content of olive trees: Evaluating the potential and feasibility of unmanned aerial vehicle multispectral and thermal data for estimation purposes. *Remote Sensing*, 15(19), 4777. <https://doi.org/10.3390/rs15194777>
- Moeremans, B., and Dautrebande, S., 2000. Soil moisture evaluation by means of multi-temporal ERS SAR PRI images and interferometric coherence. *Journal of Hydrology*, 234(3–4), 162–169. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00251-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00251-1)
- Moon, H. D., Jo, E., Cho, Y., Kim, H., Kim, B. K., Lee, Y. et al., 2022. Possibility for early detection on crop water stress using plural vegetation indices. *Korean Journal of Remote Sensing*, 38(6–1), 1573–1579. <https://doi.org/10.7780/KJRS.2022.38.6.1.43>
- Moran, M. S., 1994. Irrigation management in Arizona using satellites and airplanes. *Irrigation Science*, 15, 35–44. <https://doi.org/10.1007/BF00187793>
- Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K., and Tran, L. S., 2014. Response of plants to water stress. *Frontiers in Plant Science*, 5, 86. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00086>
- Philip, J. R., 1966. Plant water relations: Some physical aspects. *Annual Review of Plant Physiology*, 17(1), 245–268. <https://doi.org/10.1146/annurev.17.1.245>
- Salvucci, M. E., and Crafts-Brandner, S. J., 2004. Inhibition of photosynthesis by heat stress: The activation state of Rubisco as a limiting factor in photosynthesis. *Physiologia Plantarum*, 120(2), 179–186. <https://doi.org/10.1111/j.0031-9317.2004.0173.x>
- Sauer, T., Havlík, P., Schneider, U. A., Schmid, E., Kindermann, G., and Obersteiner, M., 2010. Agriculture and resource availability in a changing world: The role of irrigation. *Water Resources Research*, 46(6), W06503. <https://doi.org/10.1029/2009WR007729>
- Silva, M. D. A., Pincelli, R. P., and Barbosa, A. D. M., 2018. Water stress effects on chlorophyll fluorescence and chlorophyll content in sugarcane cultivars with contrasting tolerance. *Bioscience Journal*, 34(1), 75–87. <https://doi.org/10.14393/bj-v34n1a2018-36570>
- Sun, P., Grignetti, A., Liu, S., Casacchia, R., Salvatori, R., Pietrini, F. et al., 2008. Associated changes in physiological parameters and spectral reflectance indices in olive (*Olea europaea* L.) leaves in response to different levels of water stress. *International Journal of Remote Sensing*, 29(6), 1725–1743. <https://doi.org/10.1080/01431160701373754>
- Zhang, Y. J., Xie, Z. K., Wang, Y. J., Su, P. X., An, L. P., and Gao, H., 2011. Effect of water stress on leaf photosynthesis, chlorophyll content, and growth of oriental lily. *Russian Journal Plant Physiology*, 58, 844–850. <https://doi.org/10.1134/S1021443711050268>