

식생지수를 활용한 한반도 해안 간척지 옥수수의 한발스트레스 해석

강석인^{1,†}, 엄태선^{1,†}, 유성영², 강성구³, 김태완^{1,2,*}

¹한경국립대학교 식물자원조경학부, ²한경국립대학교 식물생태화학연구소, ³국립한국농수산대학교 원예학부

Assessment of drought stress in maize growing in coastal reclaimed lands on the Korean Peninsula using vegetation index

Seok In Kang^{1,†}, Tae seon Eom^{1,†}, Sung Yung Yoo², Sung ku Kang³ and Tae Wan Kim^{1,2,*}

¹Department of Plant Resources and Landscape Architecture, Hankyong National University, Anseong 17579, Republic of Korea

²Institute of Ecological Phytochemistry, Hankyong National University, Anseong 17579, Republic of Korea

³Department of Fruit Science, Korea National University of Agriculture and Fisheries, Jeonju 54874, Republic of Korea

Contribution to Environmental Biology

- Drought stress in corn was predicted using the spectral vegetation index.
- The results of this study can contribute to the stable production of corn in reclaimed land.

*Corresponding author

Tae Wan Kim

Tel. 031-670-5080

E-mail. taewkim@hknu.ac.kr

[†] These authors contributed equally to this work.

Received: 8 August 2023

Revised: 29 August 2023

Revision accepted: 15 September 2023

Abstract: The Republic of Korea reclaimed land to increase its food self-sufficiency rate, but the yield was reduced due to abnormal climate. In this study, it was hypothesized that rapid and continuous monitoring technology could help improve yield. Using the vegetation index (VI) analysis, the drought stress index was calculated and the drought stress for corn grown in Hwaong, Saemangeum, and Yeongsan River reclaimed tidal land was predicted according to drying treatment. The vegetation index of corn did not decrease during the last 20 days of irrigation when soil moisture rapidly decreased, but decreased rapidly during the 20 days after irrigation. The reduction rate of the vegetation index according to the drying treatment was in the order of Saemangeum > Yeongsan River > Hwaong reclaimed tidal land, and normalized difference vegetation index (NDVI) decreased by approximately 50% in all reclaimed tidal lands, confirming that drought stress occurred due to the decrease in moisture content of the leaves. In addition, structure pigment chlorophyll index (SIPI) and photochemical reflectance index (PRI), which are calculated based on changes in light use efficiency and carotenoids, were reduced; drought stress caused a decrease in light use efficiency and an increase in carotenoid content. Therefore, vegetation index analysis was confirmed to be effective in evaluating and predicting drought stress in corn growing on reclaimed tidal land corn.

Keywords: drought stress, corn, reclaimed tidal land, vegetation index

1. 서 론

국내 간척 재배단지는 벼 재배를 목적으로 개간되었으나 쌀 소비 감소의 영향으로 발작물 재배로의 전환이 요구됨에 따라 간척지의 범용화를 추구하고 있다(Yoo and Park 2004; Yang *et al.* 2012; Lee *et al.* 2021). 간척지 토양은 작물 생육 시기별 염농도의 변화가 크게 발생할 우려가 있으며 높아 작물에 대한 수분의 이용효율을 감소시키고 양분의 불균형을 초래하여 작물의 발아 및 생장에 악영향을 미치게 되어 생산량을 저하한다. 최근 기후변화에 따른 한발 및 집중 강우 등의 기상이변이 빈번하게 발생하고 있어 보수력이 낮고 염농도가 높은 간척지의 경우 작물의 안정 생산성이 낮아질 우려가 있다(Lee *et al.* 2000; Sohn *et al.* 2010). 옥수수는 주요 발작물 중 하나로 식품, 다양한 산업 및 바이오 에너지 생산 용도로 이용되고 있으나(Cordell *et al.* 2011), 물 부족과 같은 한발스트레스에 매우 취약하다고 보고되었다(Lobell *et al.* 2011). 특히, 옥수수는 건조 조건에서 생육 초기의 식물 발달과 생장이 억제 및 알곡크기, 이삭크기 등 수량에 상당한 영향을 미치며, 광합성률도 감소한다고 알려져 있다(Zlatev and Yordanov 2004; Kim *et al.* 2019).

농업 환경에서 식물의 한발스트레스를 예측하는 데 잎의 분광 반사율을 사용하려는 많은 노력이 있었다(Linke *et al.* 2008). 한발스트레스는 작물의 상태와 피복도에 영향을 미치기 때문에 식생지수는 한발스트레스를 모니터링하는 데 효과적인 지표로 이용될 수 있다고 보고되었다(Ji and Peters 2003). 또한 광합성 활성 방사선 범위의 작물의 잎의 분광 반사율이 물이 충분한 조건보다 물이 부족한 조건에서 더 높고 잎의 수분함량 감소와 분광 반사율 간의 상관성이 높은 것으로 보고되었다(Weber *et al.* 2012). 식물의 분광 반사율은 바이오매스 축적, 광합성 효율 및 비생물학적 스트레스에 노출된 작물의 수확량 등을 빠르고 비파괴적으로 평가할 수 있다(Cabrera-Bosquet *et al.* 2012). 한발스트레스 발생 시 겨울밀의 스펙트럼 반사율이 가시광영역(400~700 nm)에서 증가하였으며(Cong *et al.* 2010), 정규식생지수(NDVI)는 기상을 기반으로 하는 가뭄지수들과 상관관계가 높아 한발에 대한 작물의 스트레스를 예측할 수 있는 효과적인 지표인 것으로 확인되었다(Condorelli *et al.* 2018). 따라서 건조 조건에서 작물의 안정적인 관리와 생산을 위해 생리·생화학적 반응과 잎의

분광 반사율 사이의 관계 및 비파괴적으로 신속하고 정확한 모니터링 기술에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다(Sun *et al.* 2014). 본 연구는 건조스트레스 지표 산정 및 건조스트레스 예측을 목적으로 화옹, 새만금, 영산강 간척지 토양에서 건조처리에 의한 옥수수의 식생지수(VI) 분석을 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재배 및 건조처리

본 연구는 경기도 안성시에 위치한 한경국립대학교 온실에서 옥수수(백옥찰)를 1/2000a 와그너 포트(상부 직경 256 mm, 하부 직경 234 mm, 높이 297 mm)에 파종하여 2022년 5월부터 7월까지 재배 시험을 실시하였다. 포트 시험에 사용된 토양은 화옹(Hwaong, H.W) 간척지, 새만금(Saemangeum, S.M.G) 간척지, 영산강(Yeongsangang, Y.S) 간척지에서 채취하였으며, 채취 지점의 위치정보(GPS)는 화옹 간척지 37°14'23"N, 126°39'52"E, 새만금 간척지 35°84'17"N, 126°69'05"E, 그리고 영산강 간척지는 34°38'31"N, 126°28'34"E이었다. 또한 채취한 토양은 농촌진흥청의 식물체 및 토양분석법(RDA 2000)에 근거하여 토성 분석을 실시하였다. 옥수수의 파종 후 앵글형 드립퍼를 활용하여 포트당 880 mL를 3일 간격으로 점적 관수하였고, 파종 40일 후부터 관수를 중단하여 건조처리를 실시하였다. 그리고 토양수분함량 변화는 옥수수 파종 시 포트에 토양수분센서(WatchDog 1000 Series Watermark Irrigation Stations; Spectrum Technologies, TX, USA)를 설치하여 1시간 간격으로 모니터링하였다. 토양수분함량 측정 데이터는 Pressure plate법(Klute 1986)으로 8단계(0.01 MPa, 0.02 MPa, 0.0333 MPa, 0.05 MPa, 0.1 MPa, 0.2 MPa, 0.5 MPa, 1.5 MPa)에 대한 토양수분특성곡선을 추정하였다(Eom and Yoo 2012).

2.2. 분광 식생지수(VI) 분석

옥수수 파종 후 40일부터 완전히 전개된 잎을 대상으로 PolyPen RP 410 (Photon Systems Instruments Ltd., Drásov, Czech Republic)의 leaf holder로 고정하여 380~790 nm 파장 범위에서 분광 식생지수(Vegetation Index) 측정을 실

Table 1. List of vegetation indices calculated by PolyPen (Photon System Instruments, Czech Republic) and their equations according to the PolyPen user's manual

Vegetation Index	Equation	Reference
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED})$	Rouse <i>et al.</i> 1974
Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index	$OSAVI = (1 + 0.16) \times (R_{790} - R_{670}) / (R_{790} - R_{670} + 0.16)$	Rondeaux <i>et al.</i> 1996
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index	$MCARI = [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 \times (R_{700} - R_{550})] / (R_{700} - R_{670})$	Daughtry <i>et al.</i> 2000
Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance Index	$TCARI = 3 \times [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 \times (R_{700} - R_{550})] / (R_{700} - R_{670})$	Haboudane <i>et al.</i> 2002
Normalized Phaeophytinization Index	$NPQI = (R_{415} - R_{435}) / (R_{415} + R_{435})$	Barnes <i>et al.</i> 1992
Photochemical Reflectance Index	$PRI = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$	Gamon <i>et al.</i> 1992
Normalized Pigment Chlorophyll Index	$NPCI = (R_{680} - R_{430}) / (R_{680} + R_{430})$	Peñuelas <i>et al.</i> 1994
Structure Intensive Pigment Index	$SIPI = (R_{790} - R_{450}) / (R_{790} - R_{650})$	Peñuelas <i>et al.</i> 1995
Renormalized Difference Vegetation Index	$RDVI = (R_{780} - R_{670}) / ((R_{780} + R_{670})^{0.5})$	Roujean and Breon 1995

시하였다. 이때 분광 식생지수 측정 주기는 처리구당 5일 간격으로 총 9회 측정(5반복)하였으며, 측정된 데이터는 Table 1의 방법에 따라 식생지수를 산정하였다. 측정 기간 동안 온실의 온습도를 Testo 174H (Testo SE & Co. KGaA, Titisee-Neustadt, Germany)를 설치하여 1시간 간격으로 모니터링하였다.

2.3. 통계 분석

실험 결과는 SAS (Statistical Analysis Software, Version 9.4) 프로그램의 통계 package를 사용하여 분산 분석(ANOVA)과 Duncan의 다중검정(Duncan's multiple range test)으로 유의성 검정을 실시하였고 선형 분석은 SigmaPlot10프로그램의 Statistics의 Linear 모델로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양수분함량 변화

각각의 간척지구 토성을 분석한 결과 화옹(H.W) 간척지와 새만금(S.M.G) 간척지 토양은 양질사토였으며, 영산강(Y.S) 간척지는 사양토인 것으로 확인되었다(Table 2). 그리고 모든 처리구의 토양염류농도(EC)는 1 ds m^{-1} 미만으로 분석되어 본 연구에서 염류에 의한 피해는 없었던 것으로 판단되었다. 측정 기간 중 평균 온도는 29.9°C 였으며 평균 습도는 73%로 확인되었다. 관수 중단 후의 토양수분함량 변화는 모든 처리구에서 20일까지 급격하게 감소하였고 20일 이후의 토양수분함량의 변화는 크지 않

Table 2. Results of soil texture analysis for each reclaimed land

	Hwaong	Saemangeum	Yeongsangang
Sand (%)	81.56	81.54	56.30
Silt (%)	18.35	18.42	43.29
Clay (%)	0.09	0.04	0.41
Organic matter (%)	0.36	0.43	2.20

았다. 관수 중단 40일 이후 화옹과 새만금 간척지 처리구에서 10% 이하의 토양수분함량을 보였으며, 영산강 간척지 처리구는 10% 이상을 유지하였다. 또한 관수 중단 후 평균 토양수분함량은 영산강 18.2%, 화옹 14.0%, 새만금 12.1% 순으로 확인되어 사양토 조건의 영산강 간척지 처리구의 보수력이 상대적으로 높았던 것으로 판단되었다(Fig. 1A). 건조처리구의 토양수분퍼텐셜을 추정하기 위해 토양수분함량(v/v%) 측정 결과를 토양수분특성곡선에 대입한 결과, 양질사토와 사양토에서 각각 $y = 151.54e^{-0.617x}$, $y = 60.831e^{-0.274x}$ 의 토양수분퍼텐셜 추정모형식이 산정되었다(Fig. 1B).

3.2. 식생지수 분석 및 한발스트레스 예측

관수 중단 후 10일까지의 분광식생지수 변화는 크지 않았으나 20일 이후 대부분의 분광식생지수가 감소하는 경향을 보였다(Fig. 2). 식물은 한발스트레스 발생 시 수분 손실을 줄이기 위하여 기공 폐쇄가 일어나고 CO_2 흡수를 감소시켜 광합성계 II의 광화학반응이 제한되고(Yoo *et al.* 2012), 루비스코의 활동과 ATP의 생성이 억제되어 광합성에 연관된 색소의 함량이 감소하게 된다(Zhao *et al.* 2020).

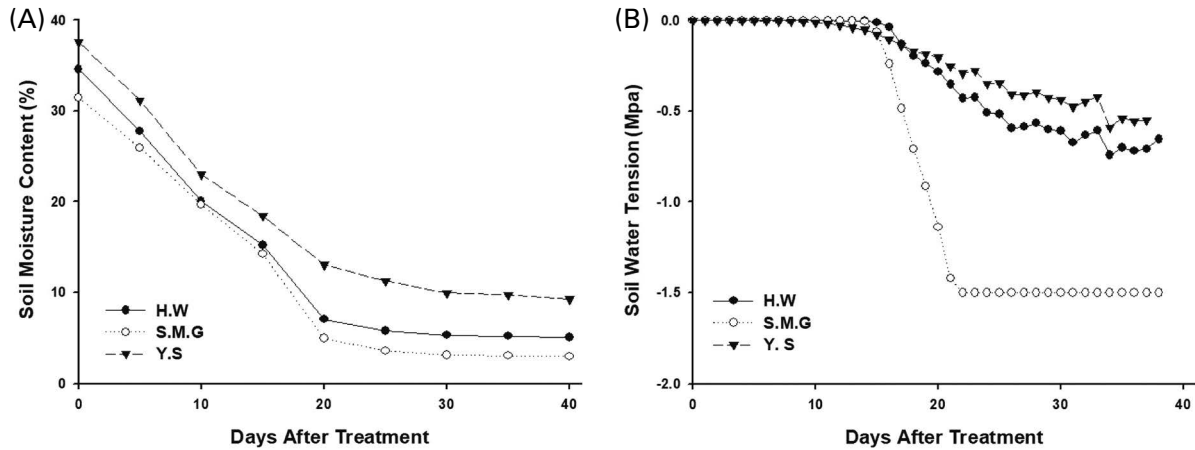


Fig. 1. Decrease in soil moisture content after stopping irrigation. (A) Changes in soil moisture during the growth period, (B) changes in soil water tension (MPa) during the growth period (Abbreviations: H.W, Hwaong; S.M.G, Saemangeum; Y.S, Yeongsangang).

광합성에 연관된 색소의 감소는 식생지수 계산에 이용되는 반사율에 직접적인 영향을 미치는데 대표적으로 엽록소(chlorophyll)는 NIR과 녹색 파장에서는 높은 분광 반사율을 보이고 적색 파장과 청색 파장에서는 높은 흡수율을 보인다(Wu *et al.* 2009). 본 연구에서 영산강 간척지 처리구는 관수 중단 15일 후 3종(PRI, SIPI, OSAVI)의 분광식생지수가 급격히 감소하며 토양수분함량 변화에 광합성 관련 색소가 민감하게 반응한 것으로 판단되었다. 토양수분퍼텐셜과 분광식생지수간 유의성 분석 결과 화옹과 영산강 처리구는 9개의 분광식생지수(NDVI, OSAVI, MCARI, TCARI, PQI, PRI, NPCI, SIPI, RDVI)가 유의한 것으로 확인되었으며, 새만금 처리구는 NPQI를 제외한 8개의 분광식생지수와 유의한 확인되었다(Table 3). 각각의 처리구에서 공통적으로 상관성이 높은 분광식생지수 3종(PRI, NDVI, SIPI)을 대상으로 수분퍼텐셜과의 1차 회귀식을 Fig. 3과 같이 산정하였다. 옥수수의 식생지수는 모든 간척지처리구에서 관수정지 후 지속적으로 감소하였는데 NDVI는 관수정지 후 0일과 40일의 데이터를 비교하였을 때, 화옹 간척지 45%, 새만금 간척지 52%, 영산강 간척지 50% 감소하였다. NDVI는 옥수수 잎의 수분함량이 증가함에 따라 NIR영역에 분광반사율이 증가하는 것으로 밝혀졌으며(Feng *et al.* 2013), 따라서 본 연구 결과의 관수 중단 후 NDVI 감소는 옥수수 잎의 수분함량 감소로 인한 것으로 판단되었다. 또한 한발스트레스 조건에 있는 식물은 탈에폭시화(de-epoxidation) 효소에 의해 비올라크산틴(Violaxanthin) → 안테라크산틴(Antheraxanthin) →

Table 3. Average vegetation index according to drought treatment by different reclaimed soil

Vegetation Index	H.W	S.M.G	Y.S
NDVI	0.516***	0.548***	0.512***
OSAVI	0.618***	0.630***	0.611***
MCARI	0.334***	0.279***	0.317**
TCARI	-0.379***	-0.335***	-0.366**
NPQI	0.013*	0.014 ^{ns}	0.016*
PRI	0.021***	0.023***	0.018***
NPCI	-0.025**	-0.032**	-0.027***
SIPI	0.598***	0.613***	0.590***
RDVI	0.599***	0.610**	0.596***

Note: Means ± SE (n = 3) of measurements on each three samples, Asterisks indicate significant differences (ns: not significance, *: p < 0.05, **: p < 0.01, ***: p < 0.001), Abbreviations can be found in Table 1.

제아크산틴(zeaxanthin) 과정을 거친 후, 비광화학적 소광을 통해 과도한 에너지와 열을 소산시켜 광합성 기구의 손상을 방지하는 역할을 하는 것으로 밝혀졌다(Adams III and Demmig-Adams 1994; Demmig-Adams and Adams III 1996). PRI는 이러한 제아크산틴의 변화를 기반으로 정의된 지수로서 식물의 한발스트레스 예측에 높은 정확도를 보이는 것으로 보고되었다(Rossini *et al.* 2013; Ballester *et al.* 2018; Ihuoma and Madramootoo 2019). 본 연구에서 PRI는 모든 간척지 토양 처리구에서 관수 중단 40일 후 96% 이상 감소한 것으로 확인되어 수분부족 조건에서 제아크산틴 함량 감소로 인해 광합성 기구의 손상을 억제하

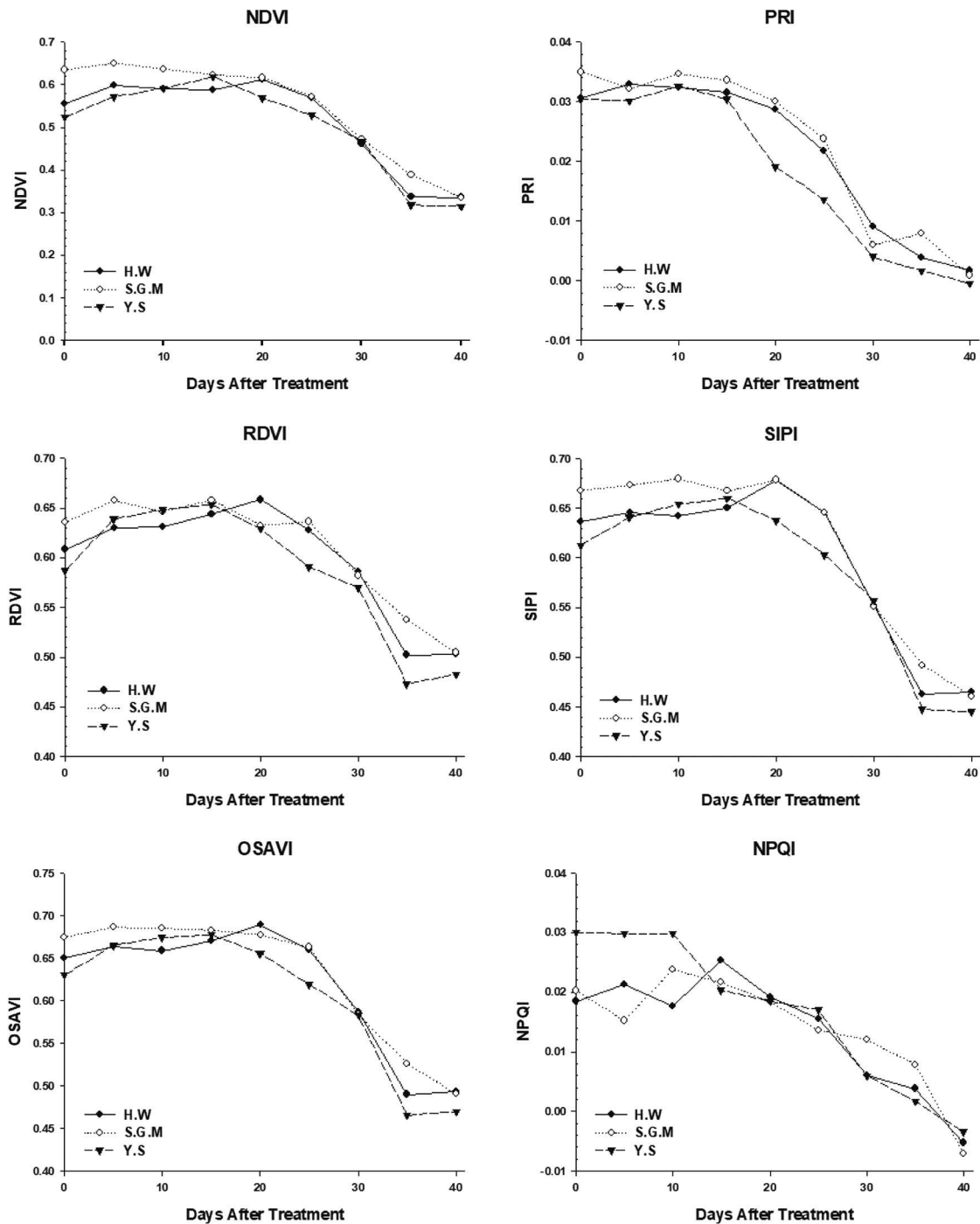


Fig. 2. Comparison of vegetation index in corn leaves by different reclaimed tidal land to drought stress (Abbreviations: H.W, Hwaong; S.G.M, Saemangeum; Y.S, Yeongsangang; The vegetation index can be found in Table 1).

지 못한 것으로 판단되었다. 광합성활성방사선(PAR)의 흡수와 관련이 있는 지수(Peñuelas *et al.* 1995)인 SIPI는 관수 중단 후 모든 처리구에서 감소하는 경향이 나타났으며,

관수 중단 40일 후 화웅 새만금, 영산강 처리구에서 각각 31%, 35% 및 33% 감소하였다. SIPI는 식물의 엽록소에 대한 카로티노이드(carotenoid) 비율의 민감도를 최대화하

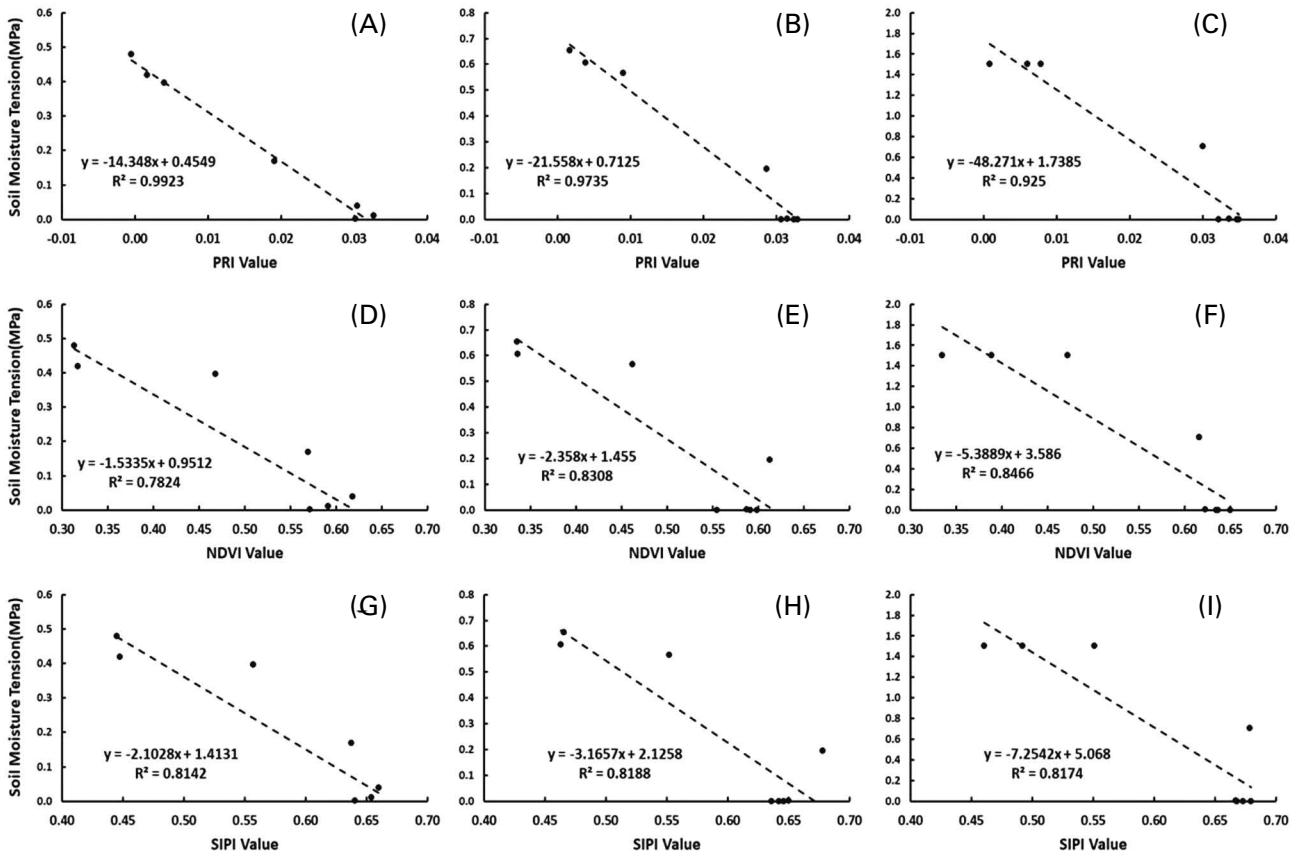


Fig. 3. Prediction of drought stress for *Zea mays* by reclaimed tidal land according to dry treatment using vegetation index. (A) Y.S PRI, (B) H.W PRI, (C) S.M.G PRI, (D) Y.S NDVI, (E) H.W NDVI, (F) S.M.G NDVI, (G) Y.S SIPI, (H) H.W SIPI, (I) S.M.G SIPI (Abbreviations: H.W, Hwa-ong; S.M.G, Saemangeum; Y.S, Yeongsangang; The vegetation index can be found in Table 1).

여 작물의 수확량 및 식물의 수분스트레스 예측에 효율적인 지표이므로(Kureel *et al.* 2022), 관수 중단 후 간척지 토양 처리구의 SIPI 감소는 수분스트레스에 의한 옥수수 수량이 감소할 수 있음을 나타낸다.

본 연구에서 관수 중단 후 20일까지 토양수분함량의 급격한 감소가 발생하였으나 식생지수의 감소가 발생하지 않은 것은 잎의 구조 변화, 제아크산틴 함량 증가, 기공 개폐 조절 등 한발스트레스 방어 기작에 의한 것으로 사료되었다. 그러나 관수 중단이 지속됨에 따라 식생지수의 감소경향이 뚜렷해진 것으로 확인되었으며, 이는 광합성 관련 색소의 감소 및 광화학 기구의 손상을 의미하는 것으로 판단되었다. 결론적으로 NDVI, SIPI, PRI 등 잎의 분광 반사율을 활용한 식생지수는 토양수분퍼텐셜 및 옥수수의 한발스트레스 예측에 활용 가능할 것으로 사료되었다.

적 요

본 연구는 건조처리에 따른 화옹, 새만금, 영산강 간척지 토양에서 키운 옥수수의 한발스트레스를 분광 반사율 분석을 통해 해석하였다. 옥수수의 식생지수는 모든 간척지 처리구에서 토양수분이 급격히 감소하는 관수 정지 20일 후까지는 감소하는 경향이 없는 것이 확인되었으며 이후 급격히 감소하는 경향이 확인되었다. 건조처리에 따른 식생지수의 감소율은 새만금 > 영산강 > 화옹 간척지 순으로 나타났으며, NDVI는 모든 간척지 토양에서 50%가량 감소하여 잎의 수분함량 감소로 인한 한발스트레스가 발생한 것이 확인되었다. 모든 간척지 토양에서 카로티노이드의 변화를 기반으로 계산되는 SIPI와 PRI가 크게 감소하여 한발스트레스로 인한 광이용효율의 감소와 카로티노이드 함량의 증가가 일어난 것으로 판단되었다.

CRedit authorship contribution statement

SI Kang: Methodology, Validation, Investigation, Resources, Writing - Original draft preparation. TS Eom: Methodology, Validation, Investigation, Resources, Writing-Original draft preparation. SY Yoo: Conceptualization, Validation, Writing-Review and editing. TW Kim: Conceptualization, Validation, Writing - Review and editing. SK Kang: Writing - Review and editing.

Declaration of Competing Interest

The authors declare no conflicts of interest.

사 사

본 연구는 2021학년도 한경국립대학교 연구년 경비의 지원에 의한 것임.

REFERENCES

- Adams III WW and BD Adams. 1994. Carotenoid composition and down regulation of photosystem II in three conifer species during the winter. *Physiol. Plant.* 92:451-458. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1994.tb08835.x>
- Ballester C, PJ Zarco-Tejada, E Nicolás, JJ Alarcón, E Fereres, DS Intrigliolo and V Gonzalez-Dugo. 2018. Evaluating the performance of xanthophyll, chlorophyll and structure-sensitive spectral indices to detect water stress in five fruit tree species. *Precis. Agric.* 19:178-193. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9512-y>
- Barnes JD, L Balaguer, E Manrique, S Elvira and AW Davison. 1992. A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls *a* and *b* in lichens and higher plants. *Environ. Exp. Bot.* 32:85-100. [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(92\)90034-Y](https://doi.org/10.1016/0098-8472(92)90034-Y)
- Cabrera-Bosquet L, J Crossa, J von Zitzewitz, MD Serret and J Luis Araus. 2012. High-throughput phenotyping and genomic selection: The frontiers of crop breeding converge. *J. Integr. Plant Biol.* 54:312-320. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2012.01116.x>
- Condorelli GE, M Maccaferri, M Newcomb, P Andrade-Sanchez, JW White, AN French, G Sciarra, R Ward and R Tuberosa. 2018. Comparative aerial and ground based high throughput phenotyping for the genetic dissection of NDVI as a proxy for drought adaptive traits in durum wheat. *Front. Plant Sci.* 9:893. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00893>
- Cong JO, N Li, YJ Xu, W Gu, SQ Huang, B Xi and Y Lei. 2010. Relationship between indices of growth, physiology and reflectivity and yield of winter wheat under water stress. *Chin. J. Eco-Agric.* 18:67-71. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1011.2010.00067>
- Cordell D, A Rosemarin, JJ Schröder and AL Smit. 2011. Towards global phosphorus security: A systems framework for phosphorus recovery and reuse options. *Chemosphere* 84:747-758. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.02.032>
- Daughtry CST, CL Walthall, MS Kim, EB de Colstoun and JE McMurtrey III. 2000. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sens. Environ.* 74:229-239. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00113-9)
- Demmig-Adams B and WW Adams III. 1996. The role of xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis. *Trends Plant Sci.* 1:21-26. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(96\)80019-7](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(96)80019-7)
- Eom KC and SY Yoo. 2012. Water saving irrigation manual of red pepper for the Southern region of Korea. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 45:306-311.
- Feng R, Y Zhang, W Yu, W Hu, J Wu, R Ji, H Wang and X Zhao. 2013. Analysis of the relationship between the spectral characteristics of maize canopy and leaf area index under drought stress. *Acta Ecol. Sin.* 33:301-307. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2013.09.001>
- Gamon JA, J Penuelas and CB Field. 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sens. Environ.* 41:35-44. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90059-S](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90059-S)
- Haboudane D, JR Miller, N Tremblay, PJ Zarco-Tejada and L Dextraze. 2002. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sens. Environ.* 81:416-426. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00018-4)
- Ihuoma SO and CA Madramootoo. 2019. Sensitivity of spectral vegetation indices for monitoring water stress in tomato plants. *Comput. Electron. Agric.* 163:104860. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104860>
- Ji L and AJ Peters. 2003. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sens. Environ.* 87:85-98. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00174-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00174-3)
- Kim SG, JS Lee, HH Bae, JT Kim, BY Son, SL Kim, SB Baek, S Shin and WT Jeon. 2019. Physiological and proteome responses of Korean F1 maize (*Zea mays* L.) hybrids to water-deficit stress during tassel initiation. *Appl. Biol. Chem.* 64:32. <https://doi.org/10.1186/s13765-019-0438-0>
- Klute A. 1986. Water retention: Laboratory methods. pp. 635-662. In: *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical*

- Methods. Second Edition. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26>
- Kureel N, J Sarup, S Matin, S Goswami and K Kureel. 2022. Modelling vegetation health and stress using hyperspectral remote sensing data. *Model. Earth Syst. Environ.* 8:733–748. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01113-8>
- Lee IB, DH Jeong, PHYI, JG Lee and SR Bhandari. 2021. Changes in growth, nutrient uptake and glucosinolate content of Chinese cabbage grown in reclaimed land according to irrigation water salt concentration. *Hortic. Sci. Technol.* 39:572–582. <https://doi.org/10.7235/HORT.20210051>
- Lee SH, SH Ryu, SI Seol, Y An, YS Jung and SM Lee. 2000. Assessment of salt damage for upland-crops in Dae-Ho reclaimed soil. *Korean J. Environ. Agric.* 19:358–363.
- Linke R, K Richter, J Haumann, W Schneider and P Weihs. 2008. Occurrence of repeated drought events: can repetitive stress situations and recovery from drought be traced with leaf reflectance? *Period. Biol.* 110:219–229.
- LOBELL DB, M BÄNZIGER, C MAGOROKOSHO and B VIVEK. 2011. Non-linear heat effects on African maize as evidenced by historical yield trials. *Nat. Clim. Chang.* 1:42–45. <https://doi.org/10.1038/nclimate1043>
- Peñuelas J, JA Gamon, AL Fredeen, J Merino and CB Field. 1994. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. *Remote Sens. Environ.* 48:135–146. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90136-8](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90136-8)
- Peñuelas J, F Baret and I Filella. 1995. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll *a* ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica* 31:221–230.
- RDA. 2000. Soil and Plant Analysis Methods. Agricultural Science and Technology Institute, Rural Development Administration. Wanju, Korea.
- Rondeaux G, M Steven and F Baret. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 55:95–107. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7)
- Rossini M, F Fava, S Cogliati, M Meroni, A Marchesi, C Panigada, C Giardino, L Busetto, M Migliavacca, S Amaducci and R Colombo. 2013. Assessing canopy PRI from airborne imagery to map water stress in maize. *ISPRS-J. Photogramm. Remote Sens.* 86:168–177. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.10.002>
- Roujean JL and FM Breon. 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sens. Environ.* 51:375–384. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00114-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00114-3)
- Rouse Jr. JW, RH Haas, DW Deering, JA Schell and JC Harlan. 1974. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation. Document ID: 19750020419. NASA Technical Reports Server. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19750020419>
- Sohn YM, JD Song, GY Jeon, DH Kim and ME Park. 2010. Effect of soil salinity and culturing condition on the maintenance of ridge and the growth of upland crops in the Saemangeum reclaimed tidal land. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43:407–417.
- Sun P, S Wahbi, TTsonev, M Haworth, S Liu and M Centritto. 2014. On the use of leaf spectral indices to assess water status and photosynthetic limitations in *Olea europaea* L. during water-stress and recovery. *PLoS One* 9:e105165. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105165>
- Weber VS, JL Araus, JE Cairns, C Sanchez, AE Melchinger and E Orsini. 2012. Prediction of grain yield using reflectance spectra of canopy and leaves in maize plants grown under different water regimes. *Field Crop. Res.* 128:82–90. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.12.016>
- Wu C, Z Niu, Q Tang, W Huang, B Rivard and J Feng. 2009. Remote estimation of gross primary production in wheat using chlorophyll-related vegetation indices. *Agric. For. Meteorol.* 149:1015–1021. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.12.007>
- Yang CH, JH Lee, S Kim, JH Jeong, NH Baek, WY Choi, SB Lee, YD Kim, SJ Kim and GB Lee. 2012. Study on forage cropping system adapted to soil characteristics in reclaimed tidal land. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:385–392. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2012.45.3.385>
- Yoo SH and ME Park. 2004. Proposal of land-use planning for agricultural use of the Saemangeum reclaimed land. *J. Soc. Agr. Res. Reclaimed Lands* 2:68–91.
- Yoo SY, KC Eom, SH Park and TW Kim. 2012. Possibility of drought stress indexing by chlorophyll fluorescence imaging technique in red pepper (*Capsicum annuum* L.). *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:676–682. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2012.45.5.676>
- Zhao W, L Liu, Q Shen, J Yang, X Han, F Tian and J Wu. 2020. Effects of water stress on photosynthesis, yield, and water use efficiency in winter wheat. *Water* 12:2127. <https://doi.org/10.3390/w12082127>
- Zlatev ZS and IT Yordanov. 2004. Effects of soil drought on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in bean plants. *Bulg. J. Plant Physiol.* 30:3–18.