

## 초분광 영상을 이용한 의사결정 트리 기반 봄감자(*Solanum tuberosum*)의 염해 판별

강경석<sup>1</sup> · 유찬석\* · 장시형<sup>1</sup> · 강예성<sup>1</sup> · 전새롬<sup>1</sup> · 박준우<sup>1</sup> · 송혜영<sup>1</sup> · 이수환<sup>2</sup>

<sup>1</sup>애그로시스템공학전공 (농업생명과학원), <sup>2</sup>농촌진흥청 국립식량과학원  
(2019년 11월 11일 접수; 2019년 12월 2일 수정; 2019년 12월 4일 수락)

### Application of Hyperspectral Imagery to Decision Tree Classifier for Assessment of Spring Potato (*Solanum tuberosum*) Damage by Salinity and Drought

Kyeong-Suk Kang<sup>1</sup>, Chan-Seok Ryu<sup>1\*</sup>, Si-Hyeong Jang<sup>1</sup>, Ye-Seong Kang<sup>1</sup>, Sae-Rom Jun<sup>1</sup>,  
Jun-Woo Park<sup>1</sup>, Hye-Young Song<sup>1</sup> and Su Hwan Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Agro-System Engineering, GyeongSang National University  
(Institute of Agriculture & Life Science), Jinju 52828, Republic of Korea

<sup>2</sup>Nation Institute of Crop Science, Rural Development Administration, 54875, Jeongju, Republic of Korea  
(Received November 11, 2019; Revised December 2, 2019; Accepted December 4, 2019)

#### ABSTRACT

Salinity which is often detected on reclaimed land is a major detrimental factor to crop growth. It would be advantageous to develop an approach for assessment of salinity and drought damages using a non-destructive method in a large landfills area. The objective of this study was to examine applicability of the decision tree classifier using imagery for classifying for spring potatoes (*Solanum tuberosum*) damaged by salinity or drought at vegetation growth stages. We focused on comparing the accuracies of OA (Overall accuracy) and KC (Kappa coefficient) between the simple reflectance and the band ratios minimizing the effect on the light unevenness. Spectral merging based on the commercial band width with full width at half maximum (FWHM) such as 10 nm, 25 nm, and 50 nm was also considered to invent the multispectral image sensor. In the case of the classification based on original simple reflectance with 5 nm of FWHM, the selected bands ranged from 3-13 bands with the accuracy of less than 66.7% of OA and 40.8% of KC in all FWHMs. The maximum values of OA and KC values were 78.7% and 57.7%, respectively, with 10 nm of FWHM to classify salinity and drought damages of spring potato. When the classifier was built based on the band ratios, the accuracy was more than 95% of OA and KC regardless of growth stages and FWHMs. If the multispectral image sensor is made with the six bands (the ratios of three bands) with 10 nm of FWHM, it is possible to classify the damaged spring potato by salinity or drought using the reflectance of images with 91.3% of OA and 85.0% of KC.

**Key words:** Decision tree, Drought, Full width at half maximum, Hyperspectral imagery, Salinity, Spring potato



\* Corresponding Author : Chan-Seok Ryu  
(ryucs@gnu.ac.kr)

## I. 서 론

세계적으로 영토가 작은 나라나 주변에 바다가 있는 나라인 대한민국, 네덜란드, 독일과 일본 등의 국가에서는 국토면적을 넓혀 다양한 용도로 활용하기 위하여 간척사업을 진행하고 있다(Lee *et al.*, 2006). 특히 네덜란드와 대한민국에서는 농지 부족의 이유로 간척 사업을 적극적으로 시행해 왔다. 초기 간척지는 논의 목적으로 벼를 재배해왔는데 논을 경작하게 되면 담수를 이용해 간척지에 있는 높은 염 농도를 효과적으로 낮출 수 있어서 비교적 관리하기 쉽다(Lee *et al.*, 2000). 그러나 최근에는 간척지의 논 중심적인 이용방식을 벗어나서 다양한 발작물 재배에 관한 연구를 진행하고 있다.

간척지에서 발작물 및 사료작물을 재배하는 데에 가장 중요한 요소는 내염성이다. 염 농도가 높은 간척지 토양에서는 삼투압 작용으로 인하여 작물이 수분과 영양분을 정상적으로 흡수하지 못해 작물체가 고사하기 때문이다(Bresler *et al.*, 1982). 이러한 염해는 현장에서 용수와 토양의 염 농도를 측정 후 염 농도가 기준 이상이면 염해라고 판별하고 있다. 그러나 이 방법은 많은 노동력과 시간이 소요되며, 파괴적인 분석 방법을 사용하지 않으면 작물체가 직접 비정상적인 염 농도에 피해를 받았는지에 관한 여부를 파악할 수 없다. 이것은 넓은 간척지에서 적재적소에 제염기술을 투입하거나 피해보상대책을 마련하는데 어려움을 주고 있다. 이 문제를 해결하기 위해 넓은 면적의 간척지를 적은 인력으로 또 비파괴적으로 모니터링할 수 있는 기술이 필수적이다.

최근 비파괴적인 모니터링 시스템으로 원격탐사 기술이 농업 분야에서 다양한 목적으로 적용되고 있다. 농업에서의 원격탐사 기술은 이미지 기반의 센서를 사용하여 작물 캐노피의 분광 정보를 이용하여 작물의 생육을 모니터링 하는 방법이다. 그 중 초분광 이미지 센서는 영상을 구성하는 모든 화소마다 넓은 파장 범위에서 상세한 분광 정보를 얻을 수 있으며, 이를 이용하여 각 식생 영역의 화소에 해당하는 많은 분광 정보를 추출할 수 있다. 가시광에서 적외선 영역의 파장(400-2400 nm)을 10 nm 이하의 분광 해상도로 수십 개 또는 수백 개의 밴드를 취득할 수 있다(Kim *et al.*, 2005). NIR 파장을 이용해 작물체의 수분함량과 토양의 질소 함량을 파악(Dalal *et al.*, 1985)하거나 초분광 카메라와 열화상 카메라를 설치한 무인기로 수분 스트

레스와 작물체의 온도를 측정하여 피해를 방지할 수 있는 방법을 제시하였다(Zarco-Tejada *et al.*, 2012). 그리고 수확 전에 초분광 이미지를 이용해 밀의 곰팡이에 의한 위조병 예방 가능성을 보고하였다(Bauriegel *et al.*, 2011). 정밀농업에서 초분광 영상분석을 통해 식생지수와 생장을 예측할 수 있다는 보고도 있다(Hoboudane *et al.*, 2004).

초분광 이미지에서 추출된 조밀하고 많은 밴드들은 서로 높은 상관성이 있어 작물의 생리적 특징을 파악할 때 불필요하거나 오히려 방해가 될 수 있다. 예를 들어, 염해와 한해의 특성이 비슷하여(Lee *et al.*, 2018), 이들을 구분하는 것은 어렵다. 또한, 너무 많은 밴드와 같은 잠재적 변수는 현장 재현 시 어려움을 줄 수 있다. 그러므로 작물의 생리적 특징을 추정하기 위해 초분광 데이터의 많은 밴드들 중에서 몇 개의 유의한 밴드들을 선정하는 것이 매우 중요하다(Kang *et al.*, 2018). 대체로 파장 추출 방법은 회귀분석 기반의 partial least squares regression (PLSR)과 같은 다변량 분석 기반으로 가중치가 높은 유의한 밴드들을 추출하거나(Kang *et al.*, 2018) 고전적인 stepwise 분석의 유의성 검증에 통과한 밴드들을 추출하는 방법들이 있다. 또한 병충해나 작물 스트레스 유무를 파악하기 위해 분류분석 기반의 기계학습 알고리즘으로 decision tree (DT), random forest (RF) 그리고 support vector machine (SVM)과 같은 불연속형 분석법이 있다. 가장 기초적인 학습 알고리즘의 DT법은 원하는 분류 정보에 대해 초분광 데이터를 정확히 일반화하여 유의한 파장을 직관적으로 추출할 수 있다(Goel *et al.*, 2003). 따라서 특정 작물의 병충해나 작물 스트레스에 특화된 그 유의 파장은 저가형 소형 다중분광 이미지 센서로 개발되어 넓은 농지를 효율적으로 모니터링할 수 있는 다양한 플랫폼(트랙터, 무인기, 항공기와 인공위성 등)과 함께 널리 보급될 수 있다.

본 논문에서는 초분광 영상을 이용하여 봄감자의 생육 시기에 발생하는 염해 및 정상 생육 여부를 판별할 수 있는 유효 파장을 DT법을 이용하여 선택하고 분류 정확도를 OA 및 KC로 나타내었다. 밴드 비를 이용하여 영상촬영 시에 발생하는 광 불균일성의 영향의 최소화 가능성을 검토하였고 상용화된 10 nm, 25 nm, 50 nm의 FWHM (full width at half maximum)을 이용하여 다중분광 이미지 센서 개발 가능성을 검토하였다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 실험 설계

본 시험에 사용된 간척지 토양은 사양질(sandy loam)의 토성(하해혼성층적토, 문포통)으로 새만금 간척지 현장에서 대량 채취 후 운반하여 풍건한 후, 2.0 mm mesh에서 체질한 후 1/2000a 와그너 포트에 충진하였다. 시비는 농촌진흥청 봄감자 표준재배법에 준하여 10-12-10kg/10a (질소-인산-칼리)수준으로 포트 용적에 맞게 변환하여 비료를 표면에 살포 후 포트 토양과 혼합하였다. 시험작물인 봄감자(*solanum tuberosum*)는 수미(superior) 품종을 선택하였고, 씨감자는 30-35 g 크기로 세절하여 포트에 파종하여 발아시킨 후 진행하였다. 관수방법은 증류수를 이용한 정상관수, 작물에 염해를 유발하기 위한 염 관수, 그리고 무관수 조건을 설정하였다. 염(salt) 함유 관개용수의 농도는 2 dS/m, 4 dS/m, 8 dS/m 이었으며, 천일염을 증류수에 용해시켜 stock 용액(3%)을 만든 후 희석하여 시험용 관개수의 염 농도를 조절하였다. 염 처리 전 모든 와그너포트에 정상관수를 실시하여, 토양수분함량과 시험작물의 생육조건을 균일하게 유지하였다. 관수량은 증발산량을 기준으로 작물이 식재되지 않은 포트의 무게를 매일 측정하여 증발 감소된 토양수분 무게만큼을 관수량으로 결정하였다. 본 실험은 농촌진흥청 국립식량과학

원 유리온실에서 실시하였고 봄감자의 영양생장기(Vegetative period:VP), 괴경형성기(Root formative period:RFP) 및 괴경비대기(Root growing period:RGP)를 대상으로 2019년 5월 7일부터 6월 12일까지 총 37일간 매일 12시에 영상촬영을 실시하였다. 각 생육단계에서 관수 처리별로 취득된 봄감자 영상 샘플수를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Number of data conducted by experiment

	VP	RFP	RGP	Sum
Normal	51	63	57	171
No watering	51	51	57	159
Salinity	153	189	171	495
Sum	255	303	285	825

\* Vegetative period (VP), root formative period (RFP), root growing period (RGP)

### 2.2. 초분광 영상 취득 및 처리

초분광 영상은 유리온실에 설치된 자동영상 취득 시스템(cubeEye, Hortizen Ltd, Republic of Korea)을 이용하여 약 50% 차광상태에서 취득되었다. 초분광 이미지 센서는 파장 영역 400-1000 nm, 분광 해상도 5.5 nm로 구성된 224개의 분광 밴드를 가진 초분광 카메라(Spectral Sensor\_FX10e, Specim Spectral

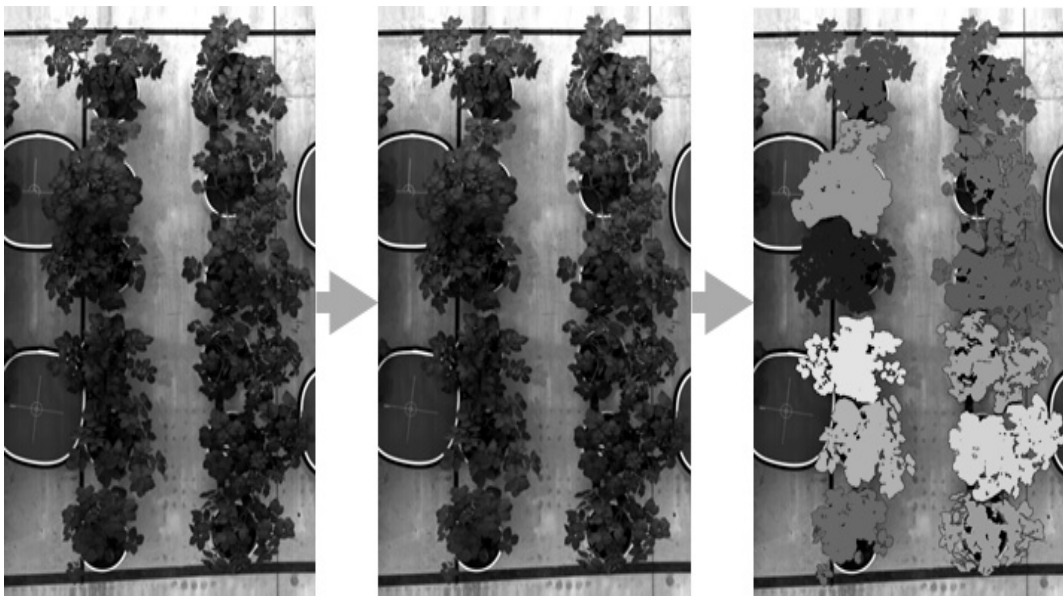


Fig. 1. Post-image analysis process.

imaging Ltd, Finland)를 이용하였다. 시계열에 따른 태양광의 변화를 정규화하기 위해 촬영 시 18% white balance board (EzyBalanceGrey, Lastolite Ltd, England)를 봄감자의 캐노피 높이와 동일하게 배치하였다. 또한, 촬영 전 dark current image를 취득하여 카메라 자체의 열에 의해 발생하는 암전류 노이즈를 제거하였다.

영상처리 소프트웨어(ENVI 5.4, Exelis Visual Information Solution, USA)로 전처리(광 및 암전류) 후에 Eq. 1과 같은 normalized difference vegetation index (NDVI) 식생지수를 적용하여 봄감자 캐노피와 비식생 영역을 분리하였다.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (\text{Eq. 1})$$

NIR 파장은 819 nm를, Red 파장은 620 nm를 각각 입력하였다. Region Of Interest (ROI)로 개체별 봄감자 캐노피 영역의 반사값을 추출하였으며, 그 영상처리는 Fig. 1에 Original영상, 전처리 영상 및 ROI를 이용하여 봄감자 캐노피 영역을 개체화시킨 영상 순서로 각각 나타내었다. 5.5 nm의 FWHM으로 취득된 봄감자 캐노피 영역의 초분광 데이터를 범용으로 사용할 수 있는 소형 다중분광 이미지 센서를 개발하기 위해 상용화된 밴드패스필터 기준인 10 nm, 25 nm 및 50 nm의 FWHM으로 평균화하였다.

### 2.3. 의사결정트리

통계분석은 봄감자를 정상, 염해 및 한해로 구분하기 위해 DT (Decision Tree) 판별 분류법을 사용하였고 분류 알고리즘은 Eq. 2의 엔트로피 기반의 binary recursive partitioning (tree)를 이용하였다. 훈련 및 검증데이터의 비율은 가장 많이 사용하고 있는 7:3으로 설정하였고, 훈련데이터를 이용하여 분류에 유효한 파장을 선택하고 검증데이터에 적용하여 선택된 유효 파장을 이용한 분류 정확도를 평가하였다. 학습 데이터에서 과적합으로 인해 선택된 너무 많은 변수는 정규화되지 못한 복잡성 때문에 실제 현장의 데이터에 재현하기가 까다로워 본래 학습된 성능을 기대하기 어렵다(Cawley *et al.*, 2010). 그렇기 때문에, 의사결정트리에서 발생하는 과적합 문제를 최소화하기 위해 사용된 변수를 줄이고 최대한 일반화 해주는 가지치기를 수행하였다.

$$C_{\alpha}(T) = \sum_{t \in T} i(t) + \alpha |T| \quad (\text{Eq. 2})$$

### 2.4. 분류 정확도

분류 정확도를 평가하기 위해 overall accuracy (OA)와 이산 다변량 기법의 kappa coefficient (KC)를 이용하였다. OA는 전체 클래스 중 실제 클래스와 예측 클래스 사이의 정분류 합으로 Eq. 3과 같다.

$$\text{Overall accuracy (OA)} = \frac{\sum_{i=1}^k x_{ii}}{N} \quad (\text{Eq. 3})$$

여기서  $x_{ii}$ 는 정분류된 클래스의 값, N은 클래스의 총 수이고 k는 행 번호를 나타낸다. KC는 참조 자료와 예측 자료 간의 일치도(agreement)를 측정하는 방법으로 OA에서 오분류할 경우까지 고려한 분류 정도로 수식으로 표현하여 정분류된 클래스의 수와 오분류된 클래스의 합으로 Eq. 4와 같이 계산된다.

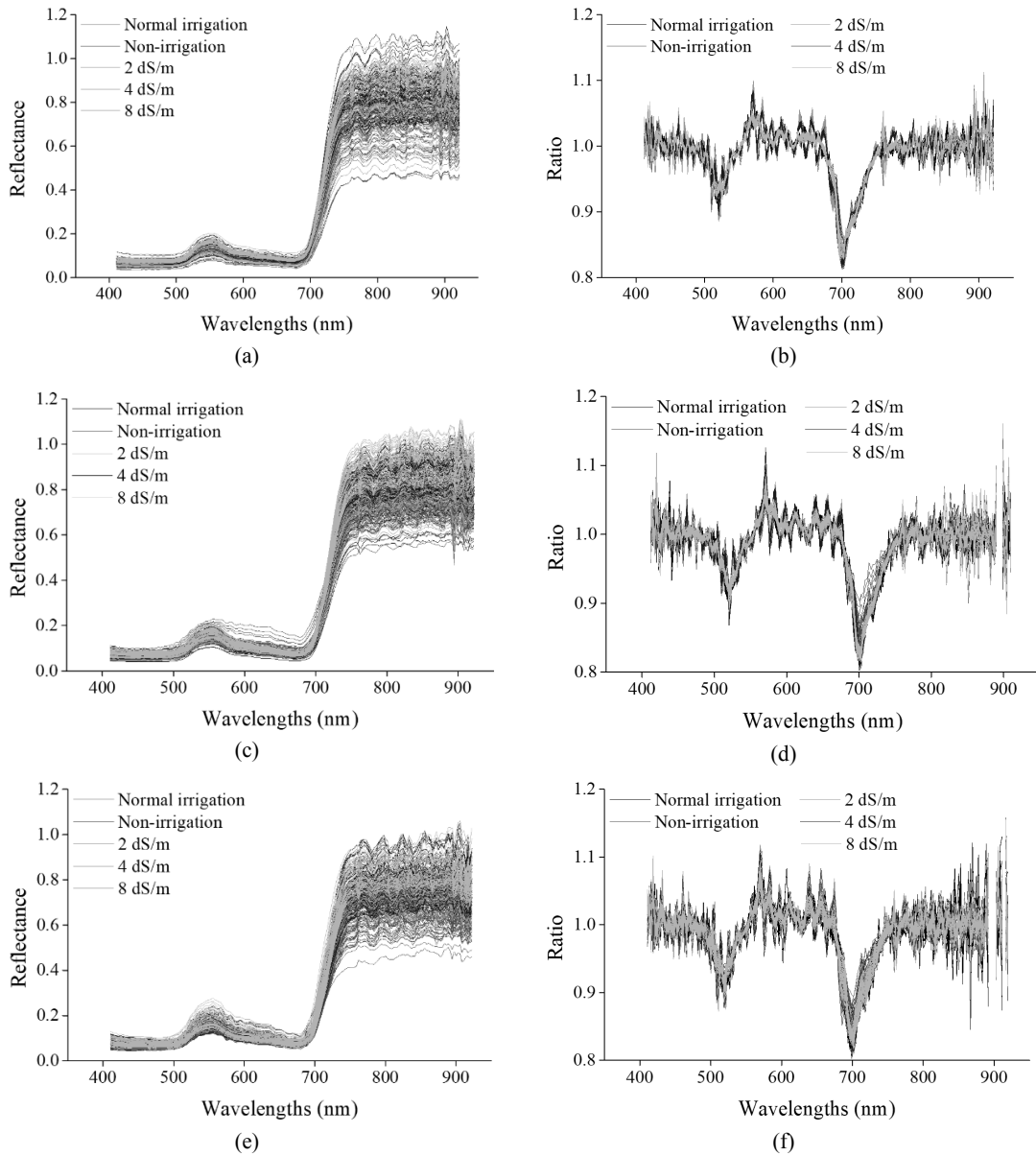
$$\text{Kappa coefficient (KC)} = \frac{N \sum_{i=1}^k x_{ii} - \sum_{i=1}^k (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^k (x_{i+} \times x_{+i})} \quad (\text{Eq. 4})$$

여기서  $x_{ii}$ 는 정분류된 클래스의 값, N은 클래스의 총 수이고 k는 행 번호를 나타낸다. k는 행 번호,  $x_{ii}$ 는 정분류된 클래스의 값,  $x_{i+}$ 와  $x_{+i}$ 는 행과 열의 클래스 값의 합계이고 N은 클래스의 총 수를 나타낸다.

## III. 결과 및 고찰

### 3.1. 단일 밴드 반사 곡선 및 밴드 비 곡선

Fig. 2에 봄감자 캐노피 영역의 반사율 및 밴드 비 곡선을 나타내었다. 태양광을 천창 스크린으로 차광한 상태로 취득한 영상에서 920 nm 이상 영역의 이미지에 노이즈가 발생하여 이를 제거하였다. 일반적으로 작물이 스트레스를 받게 되면 NIR의 반사값이 감소하는데 생육 시기 별 영상에서 Fig. 2 (a), (c) 및 (e)와 같이 4 dS/m과 8 dS/m의 높은 염 농도로 관수한 봄감자의 반사값이 정상 및 2 dS/m의 반사 값보다 더 높게 나타났다. 이는 온실 내 구조물들로 인해 발생한 광의 불균일 현상 때문이라고 판단되었다. 따라서 인접한 밴드 간의 높은 상관성을 가지는 성질을 이용해 광의



**Fig. 2.** Reflectance of vegetative (a), root formative (c) and root growing (e) periods and ratio of bands of vegetative (b), root formative (d) and root growing (f) periods.

불균일 영향을 최소화할 수 있도록 밴드 비로 변환한 값을 Fig. 2 (b), (d), (f)에 나타내었다(Mielikainen *et al.*, 2016). 밴드 비를 이용하였을 경우 4 dS/m.과 8 dS/m의 염농도로 관수한 봄감자의 밴드 비 값은 정상과 2 dS/m에 포함되어 있는 경향을 나타내어 광 불균일이 최소화되었다고 판단하였다. 이를 명확하게 하기 위해 단일 밴드를 이용하여 염해, 한해 및 정상을 구분

하기 위한 DT 분석결과와 밴드 비를 이용한 DT 분석결과를 OA 및 KC값으로 비교하여 밴드 비를 이용하여 광 불균일의 영향을 최소화할 수 있는지에 대해 비교 검증하였다.

**Table 2.** Selected key bands selected for classifying salt and draught damage in each growth stage depending on condition of FWHM based on decision tree

Stage	Single bands (nm)											
	VP				RFP				RGP			
FWHM	5	10	25	50	5	10	25	50	5	10	25	50
1	419	420	430	540	411	490	430	440	411	440	440	440
2	429	450	490	660	421	560	490	450	416	660	480	470
3	458	530	520	850	658	780	540	470	538	720	560	650
4	471	540	530		688		660	540	548	840	620	710
5	551	570	670		705		670	580	656	900	640	730
6	618	630	880		762		850	610	839	910	660	740
7	642	680	900		778		880	660	856		690	
8	669	700			895		670		895		710	
9	680	780			906			720	901		720	
10	713	900						790	917		750	
11	895							880			830	
12											890	
13											900	

\* vegetative period (VP), root formative period (RFP), root growing period (RGP)

**3.2. 반사율을 이용한 분류 결과**

Table 2에 봄감자 캐노피 영역의 반사값을 이용하여 생육단계별로 정상, 한해 및 염해로 분류하기 위해 선택된 유의 밴드를 나타내었다. 염해, 한해 및 정상을 분류하기 위해 선택된 밴드는 최소 3개에서 최대 13개가 선택되었다. 괴경비대기(RGP)에 염해, 한해 및 정상을 분류하기 위해 공통으로 440 nm가 선택되었고 동일 밴드는 아니지만 영양생장기(VP)에는 530 nm 또는 540 nm, 괴경비대기(RGP)에서는 추가로 710 nm 또는 720 nm가 선택되었다. 그 원인은 반사값이 단일 밴드로 구성되어 있어 광 불균일성의 영향을 받기 쉬워 정확히 염해, 한해 및 정상 여부를 판별하기 위한 유의한 정보를 담고 있지 않기 때문이라고 판단된다. 그리고 선택된 밴드가 전 파장 영역(blue, green, red, red edge와 NIR)에 분포하고 많은 밴드가 선택되

어 어떤 밴드가 염해 판별에 유의한 정보를 포함하고 있는지 정확히 식별하기 어려웠기 때문이다 (Mendenhall and Merényi, 2008). 또한, 식생의 구조에 민감한 red edge 및 NIR 밴드의 비율보다 가시광 밴드의 비율이 높아 염 스트레스에 의한 영향을 설명하기에 밴드들의 신뢰도가 부족하다고 판단되었다 (Collins, 1978).

Table 3에 봄감자의 생육단계별 및 FWHM별로 선택된 반사율을 이용한 분류결과의 정확도 OA 및 KC를 나타내었다. 모든 FWHM에서 OA 66.7%와 KC 40.8% 이하의 정확도를 나타내었다. 생식생장기로 접어든 RFP와 RGP는 VP에 비해 높은 정확도를 나타내었으나 상용화가 용이한 10 nm 이상의 FWHM에서 OA 및 KC값이 각각 78.7%, 57.7% 이하로 염해, 한해 및 정상으로 정확하게 분류할 수 있는 가능성이 높지

**Table 3.** Classification accuracy of salt and draught damage using key bands selected in each stage depending on condition of FWHM

Stage	VP				RFP				RGP				
	FWHM	5	10	25	50	5	10	25	50	5	10	25	50
OA (%)		64.0	64.0	66.7	61.3	87.7	64.0	78.7	69.7	78.9	71.1	71.1	62.2
KC (%)		40.8	38.1	29.8	35.8	76.5	42.8	57.7	38.8	60.4	45.4	48.8	34.1

**Table 4.** Selected ratios of key bands for classifying salt and draught damage in each growth stage depending on condition of FWHM based on decision tree

Stage	Band ratios (nm)											
	VP				RFP				RGP			
FWHM	5	10	25	50	5	10	25	50	5	10	25	50
1	499/500	540/550	480/490	450/460	456/457	460/470	480/490	570/580	456/457	580/590	610/620	610/620
2	546/547	770/780	510/520	710/720	834/835	780/790	600/610	600/610	804/805	620/630	770/780	780/790
3		790/800	770/780	780/790			620/630	770/780		800/810	880/890	
4			790/800	790/800			770/780	780/790				
5			880/890	870/880			900/910	880/890				
6			880/890				890/900					

\* vegetative period (VP), root formative period (RFP), root growing period (RGP)

않았다. 일반적으로, 밴드 폭(FWHM)이 넓어질수록 그 분류 정확도는 감소하게 되는데 VP에서 50 nm의 FWHM의 KC가 35.8%로 25 nm의 FWHM의 29.8% 보다 높았고, RFP 및 RGP에서 25 nm의 FWHM이 가장 높은 KC를 각각 57.7% 및 48.8%로 나타내어 불균형 현상을 나타내었다(Kang *et al.*, 2018).

전 파장에서 선택된 많은 유의 밴드들에도 불구하고 높지 않은 분류 정확도와 불균형 현상을 나타낸 원인은 광 불균일성 문제가 영향을 미쳤을 것이라고 판단된다. 따라서 반사율의 광 불균일성을 최소화하기 위해 밴드 비로 변환하여 염해, 한해 및 정상을 분류하기 위한 분석을 제시도해 분류 정확도를 평가하였다.

### 3.3. 밴드 비를 이용한 분류 결과

Table 4에 밴드 비를 이용하여 봄감자의 생육단계 별로 염해, 한해 및 정상을 분류하기 위한 DT 분석결과로 선택된 유의 밴드 비를 나타내었다. 염해, 한해 및 정상을 분류하기 위해 선택된 밴드 비는 최소 2개에서 최대 6개로 Table 2에 비해 밴드 수가 줄었으나 실제로 사용되는 밴드 수는 4개에서 12개로 개선효과가 적었다. 그러나 괴경비대기(RGP)의 경우 선택된 밴드 비가 FWHM에 관계없이 3개 이하로 반사율을

이용한 결과보다 개선효과가 나타났다. 영양생장기에서는 790 nm와 800 nm의 비가 FWHM에 관계없이 모두 선택되었고 동일 밴드는 아니지만 770 nm와 780 nm의 비 또는 780 nm와 790 nm의 비가 추가적으로 선택되었다. 이러한 경향은 괴경형성기(RFP)에서 영양생장기와 동일하게 770 nm와 780 nm의 비 또는 780 nm와 790 nm의 비가 FWHM에 관계없이 선택되었다. 괴경비대기(RGP)에서는 610 nm와 620 nm 및 620 nm와 630 nm의 비와 770 nm와 780 nm, 780 nm와 790 nm 및 800 nm와 810 nm의 비가 선택되었다. Table 2의 결과와 비교하면 선택된 밴드가 RGB 영역보다 red edge 및 NIR 영역에 많이 분포하여 일반적으로 각종 스트레스에 따른 red edge의 기울기 변화(Horler *et al.*, 1983) 및 NIR 영역에서의 반사값의 하락(Kim *et al.*, 2010) 등과 동일한 경향을 나타내었다.

Table 5에 봄감자의 생육단계별 및 FWHM별로 선택된 유의 밴드의 비를 이용한 분류결과의 정확도 OA 및 KC를 나타내었다. 원래 밴드(5 nm FWHM)의 비를 이용할 경우 생육시기 및 FWHM에 관계없이 OA 및 KC가 95% 이상으로 나타나 초분광 영상을 이용하여 봄감자의 염해, 한해, 정상 여부를 판단할 수 있다는 결론을 얻었다. Table 3의 결과와는 다르게 FWHM

**Table 5.** Classification accuracy of salt and draught damage using ratios of key bands selected in each growth stage depending on condition of FWHM

Stage	VP				RFP				RGP				
	FWHM	5	10	25	50	5	10	25	50	5	10	25	50
OA (%)		97.3	92.0	88.0	81.3	98.9	96.6	91.0	94.4	97.8	91.3	83.7	72.8
KC (%)		95.2	85.2	77.0	66.4	98.0	93.8	82.9	89.3	96.1	85.0	69.5	50.0

의 증가에 따라 분류 정확도가 낮아지는 일반적인 경향을 나타내었지만 10 nm의 FWHM을 이용하여 센서를 제작할 경우에도 정분류 클래스만을 고려한 OA는 90% 이상을 나타내었고 정분류 클래스와 오분류 클래스를 고려한 KC도 85% 이상을 나타내었다. 괴경형성기(RFP)에서는 25 nm의 FWHM을 가진 KC를 제외하고 모든 FWHM 조건에서 분류정확도가 약 90% 이상이었으나 영양생장기(VP)와 괴경비대기(RGP)에서는 25 nm 및 50 nm의 FWHM에서는 KC가 급격히 낮아지는 경향을 나타내었다.

대부분 작물의 병해는 수량 유지를 위한 회복 가능성이 가장 큰 초기 단계인 영양생장기(Cho *et al.*, 2000)에서 판별이 중요하기 때문에 3개 이하 밴드 비를 가진 10 nm의 FWHM 밴드패스필터를 사용하는 것이 변수의 영향을 줄이고 경제적인 면에서도 유리하다고 판단된다. 생식생장기로 접어드는 괴경형성기(RFP)에서는 10 nm의 FWHM을 가진 2개의 밴드 비로, 수확기에 가까운 괴경비대기(RGP)에서는 10 nm의 FWHM을 가진 2개의 밴드 비를 이용해서 카메라를 구성하면 봄감자의 염해, 한해 및 정상 여부를 판단할 수 있으리라 생각한다. 모든 생육 시기에서 10 nm의 FWHM에서 3개 이하의 밴드 비를 이용한다면 OA 91.3%와 KC 85.0% 이상의 분류 정확도로 봄감자의 염해, 한해 및 정상 여부 판별이 가능할 것으로 판단된다. 이 결과는 넓은 면적에서 염해 및 한해 피해를 받은 작물 필지를 소형 다중분광 카메라로 판별하여 빠르고 유연하게 제염기술을 투입하거나 그 피해 대책을 위한 정책 활용에 이용될 수 있을 것이다. 추가적으로 염해, 한해 및 정상 여부를 보다 정확하게 구분할 수 있는 유효 밴드를 찾기 위해서는 광간섭 및 광 균일성을 확보하기 위한 차광 및 보조광원 시스템의 기반으로 한 분석이 필요하다고 판단된다. 또한, 노이즈로 인해 제거된 920 nm 이후의 영상에 대하여 다양한 광조건 실험을 실시하여 수분과 관련 있는 951 nm 및 977 nm 밴드(Pu *et al.*, 2016)가 염해, 한해 및 정상 여부의 판별에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다고 생각된다. 또한, 작물이 염해에 저항하여 생성되는 proline과 같은 화학물질을 초분광 이미지로 정량화하여 정확한 염해 수준을 파악할 필요가 있다.

## 적 요

본 연구는 초분광 영상을 이용하여 간척지에서 주로 발생하는 염해 및 한해를 봄감자의 주요 생육단계에서 판별할 수 있는지를 검토하는 것이다. 영양생장기(VP), 괴경형성기(RFP) 및 괴경비대기(RGP)에 취득한 초분광 영상 내 봄감자 캐노피 영역의 반사율과 반사율의 불균일성을 최소화하기 위해 밴드 비로 변환하였다. 소형 다중분광 영상센서 개발을 고려하여 FWHM 5 nm의 단일 밴드를 상용화되어있는 밴드패스필터 기준으로 10 nm, 25 nm와 50 nm 평준화한 후 똑같이 밴드 비로 변환하였다. 의사결정트리법을 이용하여 각 FWHM에서 염해 판별에 유의한 단일 밴드 및 밴드 비를 추출하였고 그 분류 정확도는 OA와 KC로 나타내어졌다. 염해, 한해 및 정상 여부를 분류하기 위해 선택된 밴드는 최소 3개에서 최대 13개로 모든 FWHM에서 OA 66.7%와 KC 40.8% 이하의 정확도를 나타내었다. 괴경비대기(RGP)에서만 공통으로 440 nm가 선택되었고 동일 밴드는 아니지만 영양생장기(VP)에는 530 nm 또는 540 nm, 괴경비대기(RGP)에서는 추가로 710 nm 또는 720 nm가 선택되었다. 영양생장기(VP)에 비해 생식생장기(RFP 및 RGP)에 분류 정확도가 높지만 상용화가 용이한 10 nm 이상의 FWHM에서 OA 및 KC값이 각각 78.7%, 57.7% 이하로 나타났다. 밴드 비를 이용하여 염해, 한해 및 정상을 분류하기 위해 선택된 밴드 비는 최소 2개에서 최대 6개로 원래 밴드(5 nm FWHM)의 비를 이용할 경우 생육 시기 및 FWHM에 관계없이 OA 및 KC가 95% 이상으로 나타났다. 영양생장기에서 FWHM에 관계없이 790 nm와 800 nm의 비가 선택되었고 동일 밴드는 아니지만 각 생육단계에서 Red, Red-edge 및 NIR 영역에서 유사밴드가 선택되었다. 모든 생육 시기에서 10 nm의 FWHM을 가진 3개 이하의 밴드 비를 이용한다면 OA 91.3%와 KC 85.0% 이상의 분류 정확도로 봄감자의 염해, 한해 및 정상 여부 판별이 가능할 것으로 판단된다. 이 결과는 넓은 면적에서 염해 및 한해 피해를 받은 작물 필지를 소형 다중분광 카메라로 판별하여 빠르고 유연하게 제염기술을 투입하거나 그 피해 대책을 위한 정책 활용에 이용될 수 있을 것이다.



## 감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(세부과제명: 영상기법 활용 간척지 작물 염해 예측 기술 개발, 세부과제번호: PJ013884042019)의 지원에 의해 이루어진 것임.

## REFERENCES

- Bauriegel, E., A. Giebel, M. Geyer, U. Schmidt, and W. B. Herppich, 2011: Early detection of Fusarium infection in wheat using hyper-spectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture* **75**(2), 304-312.
- Bresler, E., B. L. McNeal, and D. L. Carter, 1982: Saline and sodic soils. Springer - Verlag Berlin Heidelberg New York, 167-171.
- Cawley, G. C., and N. L. Talbot, 2010: On over-fitting in model selection and subsequent selection bias in performance evaluation. *Journal of Machine Learning Research* **11**(Jul), 2079-2107.
- Cho, J. W., K. S. Park, and S. Y. Lee, 2000: Growth characteristics of different barley cultivars grown on NaCl stress. *Korean Journal of Environment Agriculture* **19**(1), 1-5.
- Collins, W., 1978: Remote sensing of crop type and maturity. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **44**, 43-55.
- Dalal, R. C., and R. J. Henry, 1985: Simultaneous determination of moisture, organic carbon, and total Nitrogen by Near Infrared Reflectance spectrophotometry. *SSSAJ* **50**(1), 120-123.
- Goel, P. K., S. O. Prasher, R. M. Patel, J. A. Landry, R. B. Bonnell, and A. A. Viau, 2003: Classification of hyperspectral data by decision trees and artificial neural networks to identify weed stress and nitrogen status of corn. *Computers and Electronics in Agriculture* **39**(2), 67-93.
- Haboudane, D., J. R. Miller, E. Pattey, P. J. Zarco-Tejada, and I. B. Strachan, 2004: Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and Validation in the Context of Precision Agriculture. *Remote Sensing of Environment* **90**(3), 337-352.
- Horler, D. N. H., M. Dockray, and J. Barber, 1983: The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing* **4**(2), 273-288.
- Kang, Y. S., C. S. Ryu, S. H. Kim, S. R. Kim, S. H. Jang, J. W. Park, T. K. Sarkar, and H. Y. Song, 2018: Yield prediction of Chinese cabbage (Brassicaceae) using broadband multispectral imagery mounted unmanned aerial system in the air and narrowband hyperspectral imagery on the ground. *Journal of Biosystems Engineering* **43**(2), 138-147.
- Kim, S. H., K. S. Lee, J. R. Ma, and M. J. Kook, 2005: Current status of hyperspectral remote sensing: principle, data processing techniques, and applications. *Korean Journal of Remote Sensing* **21**(4), 341-369. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y., D. M. Glenn, J. Park, H. K. Ngugi, and B. L. Lehman, 2010: Hyperspectral image analysis for plant stress detection. In *2010 Pittsburgh, Pennsylvania, June 20-June 23, 2010* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Lee, K. B., M. Xu, J. D. Kim, and K. Y. Jung, 2006: Soil characteristics and utilization on reclaimed land in Jangsu province coastal region of China. *Journal of the Korean Society of International Agriculture*.
- Lee, S. H., S. H. Yoo, S. I. Seol, Y. An, Y. S. Jung, and S. M. Lee, 2000: Assessment of salt damage for upland-crop in Dae-Ho reclaimed soil. *Korean Journal of Environment Agriculture* **19**(4), 358-363. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y. H., H. S. Cho, J. H. Kim, W. G. Sang, P. Shin, J. K. Baek, and M. C. Seo, 2018: Effect of carbon dioxide concentration, temperature, and relative drought on growth responses and yield in spring potato (*Solanum tuberosum* L.). *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **20**(2), 149-158. (in Korean with English abstract)
- Mendenhall, M. J., and E. Merényi, 2008: Relevance-based feature extraction for hyperspectral images. *IEEE Transactions on Neural Networks* **19**(4), 658-672.
- Martinez, J. L., H. Saulo, H. B. Escobar, and J. Leao, 2017: A new model selection criterion for partial least squares regression. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* **169**, 64-78.
- Mielikainen, J., 2006: Lossless compression of hyperspectral images using lookup tables. *IEEE Signal Processing Letters* **13**(3), 157-16.
- Pu, Y.Y., and D. W. Sun, 2016: Prediction of moisture content uniformity of microwave-vacuum dried Mangoes as affected by different shapes using NIR hyperspectral imaging. *Innovative Food*

- Science & Emerging Technologies* **33**, 348-356.
- Song, S., W. Gong, B. Zhu, and X. Huang, 2011: Wavelength selection and spectral discrimination for Paddy Rice with laboratory measurements of hyperspectral leaf reflectance. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **66**(5), 672-682.
- Zarco-Tejada, P. J., V. González-Dugo, and J. A. J. Berni, 2012: Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a Thermal Camera. *Remote Sensing of Environment* **117**, 322-337.