Estimation for Red Pepper Growth by Vegetation Indices Based on Unmanned Aerial Vehicle

Sang-Il Na, Chan-Won Park, Kyu-Ho So, Ho-Yong Ahn, Ki-Deog Kim¹, and Kyung-Do Lee*

Climate Change and Agro-Ecology Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

¹Highland Agriculture Research Center, National Institute of Crop Science, RDA, Pyeongchang 25342, Korea

*Corresponding author: kdlee11@korea.kr

ABSTRACT

Received: September 17, 2018

Revised: December 5, 2018

Accepted: December 5, 2018

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are currently gaining a growing interest for agriculture applications due to its potential in precision agriculture such as the identification of weeds and crop production issues, diagnosing nutrient deficiencies, and the prediction of biomass and yield. This study reports on the development for estimating the growth parameters of red pepper. The red pepper field using UAV was studied, and image analysis technologies were studied to develop growth estimation model from acquired images. We used the normalized difference vegetation index (NDVI) that reflects the crop conditions, and vegetation fraction (VF) for 2 major cultivation regions from 2016 to 2017. For this study, UAV imagery was taken at Goesan and Jeongeup regions ten times from June to September during the red pepper growing season. Two plant growth parameters, plant height (P.H.) and fruit set (F.S.) were measured for ten plants per plot for each field campaign. A multiple linear regression model was carried out by using the NDVI and VF extracted from UAV image. As a result, in the case of the P.H. the coefficient of determination was 0.805 and the root mean squared error of measurement was 8.140 cm. And for the F.S., the coefficient of determination was 0.979 and the root mean squared error of measurement was 2.407. These results will also be useful for determining the UAV imagery necessary to estimate growth parameters of red pepper.

Keywords: Red pepper, Growth, Vegetation indices, UAV

Growth estimation model of red pepper using UAV.

Regression equation	RMSE	R	R ²	R ² _{adj}	D.W.
$P.H. = 438.923NDVI_{UAV} + 121.841VF_{UAV} - 174.651NDVI_{UAV}VF_{UAV} - 160.231$	8.140	0.897	0.805	0.708	1.669
$\Delta F.S. = 1.994\Delta P.H. - 89.321\Delta NDVI_{UAV} - 17.406$	2.407	0.989	0.979	0.968	2.842

P.H.: Plant Height, F.S.: Fruit Set, Δ : Variation by growing stage.

Introduction

고추는 우리나라에서 김치를 비롯한 각종 식단의 기본양념용 채소로 국민 식생활에 필수적인 농산물 중 하나이다. 그러나 주로 소규모 농가의 노지에서 재배되는 관계로 단위면적당 수확량의 변동성이 크고 연차간 수급불균형에 따른 가격 불안정은 생산자는 물론 소비자의 불안요인으로 작용함으로써 국민경제에까지 영향을 미치고 있다. 최근 10년간 전국 건고추의 재배면적은 지속적으로 감소하여 2007년 54,876 ha에서 2017년 28,337 ha로 약 51.6% 수준에 이르렀으며, 기상이변 등으로 인한 단위면적당 수량도 감소하여 생산량은 160,398톤에서 55,714톤으로 약 65.3% 감소하였다 (KOSIS, 2018). 정부는 이를 해결하기 위하여 고추를 대상으로 계약재배사업, 최저가격보장사업, 수매비 축사업 등 정책 사업을 시행하고 있으며 (Lee et al., 2013), 이 외에 산지유통종합자금사업, 도매시장 거래 제도 등 유통과 관련된 정책도 추진하고 있다. 그러나 고추의 수급안정을 위해서는 안정적인 생산과 함께 정기적인 모니터링에 의한 작황 예측이 선행되어야 한다. 농작물의 작황 예측은 생산량 추정을 통한 수급 조절, 가격 예측, 농가 소득 보전을 위한 정책 수립 등에 중요한 판단 자료로 사용되며, 경제 전반에 미치는 파급효과로 인해 경제, 산업적 중요성이 매우 크기 때문이다 (Na et al., 2017a).

고추의 생산량은 재배면적과 단위면적당 수량에 의하여 결정된다. 또한 재배면적은 자연적인 요인보다는 생산농가의 경영적인 요인에 의하여 결정되는 반면에 단위면적당 수량은 품종개량 및 재배기술의 개선 등 기술적인 요인과 작물의 성장에 필요한 기상학적 요인에 의하여 결정된다. 이에 따라 농촌진흥청 국립농업과학원에서는 배추, 무, 양파, 마늘, 고추 등 5대 채소를 대상으로 수급 안정 대책의 기초자료 제공을 목적으로 원격탐사 기술을 활용한 재배면적 및 단수 예측과 관련된 연구를 진행하고 있다. 인공위성 등을 활용한 원격탐사 (Remote Sensing; RS) 기술은 정보기술의 급속한 발전으로 인하여 국내외 광범위한 산업 분야에 활용되고 있으며, 특히 농업분야에서 농업관측사업과 관련하여 활발하게 진행되고 있다 (Lee et al., 2016). 국외의 경우에는 콩 (Doraiswamy et al., 2005), 옥수수 (Rojas, 2007), 밀 (Ren et al., 2008; Becker-Reshef et al., 2010) 등 다양한 작물을 대상으로 연구가 진행되었으며, 국내에서도 벼를 대상으로 한 연구가 진행되었다 (Hong et al., 2012; Na et al., 2012). 그러나 기존의 연구는 대부분 벼, 옥수수, 콩 등 식량작물을 중심으로 진행되어 왔으며, 노지 채소에 관한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 이는 국내 농업여건의 특성과 위성영상이 가지는 공간해상도의 한계에 기인하는 것으로 대규모 경지정리 및 집단화가 완료된 논인 경우 위성영상의 적용이 용이하지만 소규모 다품종 위주의 노지 채소는 위성영상의 적용이 제한적이고, 상대적으로 짧은 생육기간으로 인하여 안정적인 영상 수집이 어렵기 때문이다. 이러한 문제점을 보완할 수 있는 방법으로 무인비행체 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)를 이용한 작황 모니터링에 대한 관심이 높아지고 있다. UAV는 사용자가 원하는 시기에 1 m급 이하의 초고해상도 영상을 신속하게 수집할 수 있어 노지 채소에 대한 작황평가에 유용한 수단으로 활용될 수 있다.

UAV를 활용한 노지 채소의 작황 모니터링에 관한 연구는 일부 연구자에 의해서 이루어져 왔다. Juan et al. (2013)은 UAV를 이용하여 양파의 엽면적지수 (Leaf Area Index; LAI)를 추정하였으며, Rocio et al. (2018)은 UAV 기반의 RGB 영상을 이용하여 양파의 바이오매스 모니터링을 수행하였다. 국내의 경우, Na et al. (2015)는 채소 생육 모니터링을 위하여 UAV에서 취득된 영상을 현장에서 측정한 분광 반사율 데이터를 이용하여 보정하고 식생 지수를 추출하여 정확도를 확인하였으며, 이를 이용하여 고랭지배추 (Na et al., 2016), 양파 (Na et al., 2017a) 및 마늘 (Na et al., 2017b)을 대상으로 UAV 기반의 생육추정 모형을 개발하였다. 또한, Kim et al. (2018)은 UAV와 RGB 카메라를 이용하여 무와 배추의 생육인자 예측 알고리즘을 개발하였으며, Jeong (2018)은 양파와 마늘을 대상으로 UAV 기반의

영상 전처리 기술을 개발하고 이를 이용하여 생체중 예측 모델을 작성하였다.

본 연구에서는 고추를 대상으로 UAV 기반의 식생지수를 이용한 생육추정 모형 개발을 목적으로 하였다. 이를 위하여 고추 주산단지 중 괴산군과 정읍시를 대상으로 생육기간 동안 공간해상도 5 cm의 고해상도 영상을 주기적으로 촬영하고, 근적외선 영상에서 추출한 정규화 식생지수 (Normalized Difference Vegetation Index; NDVI) 및 식생 피복률 (Vegetation Fraction; VF)을 이용하여 고추의 생육 평가 방안을 제시하고자 한다.

Materials and Methods

연구대상지역 본 연구에서는 고추의 주산단지 중 충청북도 괴산군 (2016년) 과 전라북도 정읍시 (2017년)의 농업기술센터에서 운영중인 병해충 관찰포를 대상으로 UAV를 이용하여 고추의 생육상황을 모니터링 하였다. 괴산군은 기후적으로 맑은 날이 많고 발농사가 발달된 중산간지로 구성되어 있으며, 일교차가 크고 토질이 적당하여 양질의 농산물이 생산되는 한강상류의 청정지역이다. 정읍시는 경북 안동, 충북 음성과 함께 전국 3대 고추 명산지로서 2015년 기준 고추재배면적은 536 ha로 연간 13,823톤을 생산하고 있다 (KOSIS, 2018). 지형적 특징으로는 남동쪽으로는 노령산맥과 내장산이 연결되어 있고, 북서쪽으로는 광활한 동진평야가 펼쳐져 있어 북서쪽의 분지형태를 이루고 있으며, 동진강과 내장산에서 흐르는 정읍천이 합류하여 서해로 유입되는 관개지로서 토지가 비옥해 농업에 적합하다.

Fig. 1. Location of research sites and test fields.

병해충 관찰포는 주기적으로 농작물 생육 및 병해충 발생상황에 대한 정확한 예찰을 실시하고 정기방제대책 자료로 활용함으로써 병해충 피해를 최소화하기 위한 목적으로 사용된다. 관찰포는 시군별 농업기술센터에서 5개소 농가 포장을 대상으로 각 1개 필지를 선정하고 시기별 병해충 발생상황을 조사하고 있다. 본 연구에서는 괴산군과 정읍시의 병해충 관찰포 중 포장 면적과 지역적 대표성, 주변 고추 재배필지의 분포 현황 등을 고려하여 Fig. 1과 같이 괴산군 사리면 수암리와 정읍시 정우면 우산리의 관찰포를 선정하였다. 관찰포의 면적은 각각 3,315 m², 2,646 m²이며, 6월 16일을 시작으로 15일 간격으로 9월 16일까지 총 7회에 걸쳐 3.3 m² 당 주수, 초장, 주당 착과수 및 수확량 등의 생육 조사와 역병, 탄저병, 담배나방 및 총채벌레류 등의 병해충조사를 동시에 수행하였다.

UAV 촬영 및 전처리 UAV (eBee, Sensefly, Swiss)는 고정익을 이용하였으며, 탑재 센서는 육안 판독을 위한 가시광선 (Red, Green, Blue) 파장 카메라 (IXUS/ELPH, Cannon, Japan)와 NDVI 산출을 위한 근적외선 (Red, Green, NIR) 파장 카메라 (S110, Cannon, Japan)를 사용하였다. 고추의 생육조사 일자에 맞추어 2년 동안 연도별로 각 5회에 걸쳐 수행하였으며 (Table 1), 촬영 조건은 공간해상도 5 cm, 종방향 및 횡방향 중복도는 각각 65%, 80%로 설정하였다. 날장으로 촬영된 영상은 UAV 운영 프로그램 (eMotion3, senseFly, Swiss)을 이용하여 표정요소와 결합한 후, 전처리 프로그램 (Pix4Dmapper, Pix4D, Swiss)을 이용하여 정사보정 및 반사율 영상을 제작하였으며 (Fig. 2), 근적외선 영상은 Eq. 1에 적용하여 정규화 식생지수 (Normalized Difference Vegetation Index; NDVI) 를 산출하였다 (Fig. 3).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

여기서, NIR은 S110 센서의 파장 850 nm 근적외선 밴드이며, Red는 파장 625 nm의 가시광선 밴드이다. NDVI의 범위는 -1.0에서 1.0까지이며, 증가하는 양수 값은 식생 활력도의 증가를 의미한다.

또한, 단위면적당 식생의 면적 비율로 계산되는 식생 피복률(Vegetation Fraction; VF)은 Fig. 4와 같이 대상 필지의 NDVI를 Jenks Natural Breaks 기법에 적용하여 식생이 차지하는 면적을 추출한 후, Eq. 2를 이용하여 산출하였다. Jenks Natural Breaks 기법은 같은 등급 내 전체 값들의 평균을 기준으로 평균편차는 최소화되고, 각 등급간의 분산은 극대화하는 방법으로 식생지수를 이용하여 식생과 토양을 분리하는데 주로 사용되는 방법이다.

$$VF = \frac{\sum Crop\ area}{\sum Total\ area} \quad (2)$$

고추 생육평가 모형 개발 본 연구에서는 고추 생육평가 모형 개발을 위하여 시계열 NDVI와 VF를 독립변수로 하고, 현장 생육조사를 통해 측정한 초고 (Plant Height; P.H.)와 착과수 (Fruit Set; F.S.)를 종속변수로 하여 Eq. 3과 같이 다중 회귀 모형을 개발하고자 하였다. 다중 회귀 모형은 설명변수 하나만으로는 설명력이 부족하여 하나의 종속 변수의 변동을 두 개 이상의 설명변수를 이용하여 예측하는 모형으로 통계처리는 SPSS(Statistical Package for the Social Sciences) 프로그램(Statistics Standard ver. 18, IBM Inc.)을 사용하였다.

Table 1. Study area and description.

Category	Description
Study area	y2016 : Suam-ri, Sari-myeon, Goesan-gun, Chungcheongbuk-do y2017 : Usan-ri, Jeongu-myeon, Jeongup-si, Jeollabuk-do
Acquisition date	y2016 : 06/16, 06/30, 07/20, 08/18, 09/01 y2017 : 07/17, 08/01, 08/14, 09/01, 09/15
Acquisition area	100~200 ha
Flight altitude	145~150 m
Spatial resolution	5 cm

Jun. 16, 2016

Jun. 30, 2016

Jul. 20, 2016

Aug. 18, 2016

Sep. 01, 2016

Jul. 17, 2017

Aug. 01, 2017

Aug. 14, 2017

Sep. 01, 2017

Sep. 15, 2017

Fig. 2. Temporal RGB imagery of test fields using UAV at Goesan-gun and Jeongup-si.

Fig. 3. Temporal NDVI distribution of test fields using UAV at Goesan-gun and Jeongup-si.

$$y = a_0 + a_1x_{NDVI} + a_2x_{VF} + a_3x_{NDVI}x_{VF} \quad (3)$$

여기서, $a_0 \sim a_3$ 는 회귀계수이고, x_{NDVI} , x_{VF} 는 설명변수로서 UAV 기반의 NDVI와 VF를 의미하며, y 는 고추 생육과 관련된 종속변수이다.

Fig. 4. Jenks Natural Breaks thresholding using NDVI.

Results and Discussion

고추 생육시기에 따른 $NDVI_{UAV}$, VF_{UAV} 및 생육인자 변화 UAV 기반의 근적외선 영상을 이용하여 산출한 시계열 $NDVI_{UAV}$ 및 VF_{UAV} 와 고추 생육기간 동안의 생육인자 변화는 Fig. 5와 같다. 먼저 $NDVI_{UAV}$ 와 VF_{UAV} 의 변화 패턴을 살펴보면, 전체적으로 과산군 (y2016)과 정읍시 (y2017)가 유사한 양상을 보이고 있어 지역별 특성은 나타나지 않는 것으로 판단된다. 그러나 $NDVI_{UAV}$ 의 경우 전 시기에 걸쳐 서서히 증가하는 반면에 VF_{UAV} 는 초반에는 약간 감소하다가 8월 이후 급격히 증가하는 특성을 나타내었다. 또한, 정읍시 (y2017)의 경우 생육 후반에 $NDVI_{UAV}$ 와 VF_{UAV} 가 감소하는 양상이 나타났는데 이는 작물의 성장에 따른 일반적인 변화와는 다른 패턴으로 특정 요인에 의한 생육이상이 반영된 결과로 판단된다. 실제로 정읍시 관찰포의 생육조사 결과를 살펴보면 8월에 탄저병이 최초 발견되어 9월까지 급격히 진행된 것으로 조사되었다. 일반적으로 탄저병은 주로 과실에서 발생하는데 병반부위에 담황색 또는 황갈색의 포자 덩어리가 형성되고 감염된 과실은 비틀어지고 말라버려 초장 및 착과수의 감소로 이어진다. 따라서 본 연구에서 조사된 지역별 생육인자도 과산군과 비교하여 상대적으로 낮게 나타난 것으로 판단된다.

UAV 기반의 고추 생육평가 모형 개발을 위하여 근적외선 영상에서 산출한 시계열 $NDVI_{UAV}$ 와 VF_{UAV} 및 P.H., F.S. 등의 생육인자를 대상으로 상관분석을 통해 각 변수간의 관련성을 평가하였다 (Table 2). 그 결과, P.H.의 경우 각 생육단계별 $NDVI_{UAV}$ 와 VF_{UAV} 모두 높은 양의 상관관계를 나타낸 반면에 F.S.의 경우에는 생육단계에 따른 변화량 ($\Delta F.S.$)을 변수로 하였을 때 $NDVI_{UAV}$ 와 P.H.의 변화량 ($\Delta NDVI_{UAV}$, $\Delta P.H.$)과 상관성이 있는 것으로 나타났다. 즉, 특정 시기에 대한 고추의 P.H.는 해당 시기의 식생지수를 이용하여 추정 가능하지만 F.S.는 관측 시기까지의 식생지수와 생육인자의 모니터링을 통한 변화량을 이용하여야 추정이 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 5. Variations of $NDVI_{UAV}$, VF_{UAV} & growth parameters during the growing period.

Table 2. Correlation coefficients between $NDVI_{UAV}$, VF_{UAV} and growth parameters.

	$NDVI_{UAV}$	VF_{UAV}	P.H.	F.S.
$NDVI_{UAV}$	1.000			
VF_{UAV}	0.902**	1.000		
P.H.	0.849**	0.718*	1.000	
F.S.	0.054	-0.191	0.358	1.000
	$\Delta NDVI_{UAV}$	ΔVF_{UAV}	$\Delta P.H.$	$\Delta F.S.$
$\Delta NDVI_{UAV}$	1.000			
ΔVF_{UAV}	0.063	1.000		
$\Delta P.H.$	-0.189	0.281	1.000	
$\Delta F.S.$	-0.390*	0.144	0.966**	1.000

P.H.: Plant Height, F.S.: Fruit Set, Δ : Variation by growing stage.

** Correlation is significant at the 0.01 level.

* Correlation is significant at the 0.05 level.

UAV 기반 고추 생육평가 모형 고추 생육기간 동안의 UAV 기반의 식생지수와 생육인자간의 상관분석 결과를 바탕으로 고추 초고 (P.H) 및 착과수 (F.S.) 추정 모형을 구축한 결과는 Table 3과 같다. 고추 생육기간 동안의 $NDVI_{UAV}$, VF_{UAV} 및 상호작용항을 독립변수로 하고 현장 생육조사를 통해 측정한 P.H.를 종속변수로 하여 고추의

P.H. 추정 모형을 구축한 결과, $NDVI_{UAV}$ 와 VF_{UAV} 는 P.H.와 모두 양의 관계가 있는 것으로 나타났으며 상호작용항은 음의 관계를 나타내었다. 이는 고추의 성장패턴이 모형에 반영된 결과로 성장이 지속되는 과정에서 $NDVI_{UAV}$ 와 VF_{UAV} 가 증가할수록 P.H.도 증가하다가 VF_{UAV} 가 최대치에 가까워지는 생육 후기 ($VF_{UAV} \approx 1$)에는 P.H.의 증가분이 감소되는 것을 의미한다. 또한, 모형의 결정계수는 0.805, 수정 결정계수는 0.708로 나타나 70% 이상의 설명력을 보였으며, 평균 제곱근 오차는 1.669 cm로 나타났다.

Table 3. Growth estimation model of red pepper using UAV

Regression equation	RMSE	R	R ²	R ² _{adj}	D.W.
$P.H. = 438.923NDVI_{UAV} + 121.841VF_{UAV} - 174.651NDVI_{UAV}VF_{UAV} - 160.231$	8.140	0.897	0.805	0.708	1.669
$\Delta F.S. = 1.994\Delta P.H. - 89.321\Delta NDVI_{UAV} - 17.406$	2.407	0.989	0.979	0.968	2.842

P.H.: Plant Height, F.S.: Fruit Set, Δ : Variation by growing stage.

또한, 고추의 F.S. 추정 모형은 $NDVI_{UAV}$ 와 P.H. 및 F.S.를 변화량으로 변환하여 구축하였으며, 각 독립변수와의 관계를 살펴보면 고추의 F.S.는 P.H.의 증가율이 클수록 증가하지만 $NDVI_{UAV}$ 와는 음의 관계를 보였다. 따라서 고추의 P.H.가 지속적으로 증가하고, 작황이 안정됨에 따라 $NDVI_{UAV}$ 의 변화량이 적을 때 F.S.가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 2017년 정읍시와 같이 생육이상이 발생하여 $NDVI_{UAV}$ 가 급격하게 감소할 경우를 본 모형에 적용하게 되면 F.S.는 오히려 증가하는 결과를 나타낼 수 있다. 따라서 본 연구에서 작성된 F.S. 추정 모형은 정상생육의 필지에서만 제한적으로 적용이 가능하다는 한계가 있으며, 이를 해결하기 위해서는 보다 다양한 조건에서의 데이터를 확보하여 각 변수간 유의성 검토 및 추정 모형의 재검토가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 6은 고추 P.H. 추정 모형의 예측값과 현장 생육조사 결과를 비교한 산점도이다. 대부분 점들이 1:1선에 근접한 결과를 보이고 있어 모형이 고추의 생육 변화 특성을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다. 그러나 위에서 언급한 것과 같이 본 연구는 2년 간의 데이터만을 이용하였기 때문에 충분한 관측치가 확보되지 않아 모형의 안정성에 대한 정확한 평가에 한계가 있다. 따라서, 향후 충분한 관측치를 확보하여 모형의 안정성 및 정확도를 재평가할 필요성이 있는 것으로 생각된다.

Fig. 6. Scatter plot of red pepper growth estimation model.

Conclusions

본 연구에서는 UAV 기반의 식생지수를 이용하여 고추의 생육평가 모형 개발을 목적으로 고추 주산단지 중 괴산군과 정읍시를 대상으로 UAV 영상에서 추출한 식생지수와 생육인자와의 관계식을 도출하고 적용방안을 검토하였다. 그 결과, $NDVI_{UAV}$ 와 VF_{UAV} 의 지역별 특성은 나타나지 않았지만 정읍시 (y2017)의 생육이상이 반영되어 일부 다른 패턴이 나타났으며, 생육인자도 괴산군과 비교하여 상대적으로 낮은 것을 확인하였다. 또한, 시계열 $NDVI_{UAV}$ 및 VF_{UAV} 와 P.H., F.S. 등의 생육인자간의 상관분석 결과를 이용하여 고추 생육평가 모형을 구축한 결과, P.H.의 경우 고추의 성장패턴이 모형에 반영되어 70% 이상의 설명력을 나타낸 반면에 F.S. 추정 모형은 정상생육의 필지에서만 제한적으로 적용이 가능하다는 한계를 확인하였다. 그러나 전체적으로 고추 생육평가 모형이 고추의 생육 변화 특성을 잘 반영하는 것으로 나타났으며, 향후 추가적인 관측치의 확보를 통해 모형의 안정성 및 정확도를 재평가하는 등의 노력이 계속된다면 고추와 같이 소규모 노지 채소를 대상으로 UAV를 활용한 작황 모니터링 수단이 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This study was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (PJ011419012018)" Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Agricultural Weather Information Service Homepage. <http://weather.rda.go.kr/> Accessed 5 Aug. 2017.
- Becker-Reshef, I., E. Vermote, M. Lineman, and C. Justice, 2010. A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data, *Remote Sens. Environ.* 114: 1312-1323.
- Doraiswamy, P.C., T.R. Sinclair, S. Hollinger, B. Akhmedov, A. Stern, and J. Prueger, 2005. Application of MODIS derived parameters for regional crop yield assessment, *Remote Sens. Environ.* 97:192-202.
- Hong, S.Y., J.N. Hur, J.B. Ahn, J.M. Lee, B.K. Min, C.K. Lee, Y.H. Kim, K.D. Lee, S.H. Kim, G.Y. Kim, and K.M. Shim, 2012. Estimating rice yield using MODIS NDVI and meteorological data in Korea, *Remote Sens. Environ.* 128(5):509-520 (in Korean with English abstract).
- Jeong, S.J., 2018. Development of image preprocessing techniques and fresh weight estimation models for onion (*Allium cepa*) and garlic (*Allium sativum*) using UAV-image sensors, Master Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Juan I.C., F.O. Jose, H. David, and A.M. Miguel, 2013. Estimation of leaf area index in onion (*Allium cepa* L.) using an unmanned aerial vehicle, *Biosys. Engineer.* 115(1):31-42.
- Kim, D.W., H.S. Yun, S.J. Jeong, Y.S. Kwon, S.G. Kim, W.S. Lee, and H.J. Kim, 2018. Modeling and testing of growth status for chinese cabbage and white radish with UAV-based RGB imagery, *Remote Sens.* 10(4):563-588.
- Korean Statistical Information Service Homepage. <http://www.kosis.kr/> Accessed 9 Aug. 2018.
- Lee, K.D., Y.E. Lee, C.W. Park, and S.I. Na. 2016. A comparative study of image classification method to classify onion and garlic using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49(6):743-750 (in Korean with English abstract).

- Lee, Y.S., J.H. Han, E.S. Han, H.Y. Lee, J.Y. Kim, and B.I. Ahn, 2013. Distribution and consumer's purchase patterns of chili pepper and garlic, Korean Rural Economic Institute, C2013-47:1-2..
- Na, S.I., J.H. Park, and J.K. Park, 2012. Development of Korean paddy rice yield prediction model (KRPM) using meteorological element and MODIS NDVI, J. Korean Soc. Agric. Engineers. 54(3):141-148 (in Korean with English abstract).
- Na S.I., S.C. Baek, S.Y. Hong, K.D. Lee, and G.C. Jang, 2015. A study on the application of UAV for the onion and garlic growth monitoring, KSSSF spring conference (in Korean with English abstract).
- Na, S.I., S.Y. Hong, C.W. Park, K.D. Kim, and K.D. Lee, 2016. Estimation of highland kimchi cabbage growth using UAV NDVI and agro-meteorological factors, Korean J. Soil Sci. Fert. 49(5):420-428 (in Korean with English abstract).
- Na, S.I., C.W. Park, K.H. So, J.M. Park, and K.D. Lee, 2017a. Monitoring onion growth using UAV NDVI and meteorological factors, Korean J. Soil Sci. Fert. 50(4):306-317 (in Korean with English abstract).
- Na, S.I., B.K. Min, C.W. Park, K.H. So, J.M. Park, and K.D. Lee, 2017b. Development of field scale model for estimating garlic growth based on UAV NDVI and meteorological factors, Korean J. Soil Sci. Fert. 50(5): 422-433 (in Korean with English abstract).
- Ren J.Q., Z.X. Chen, Q.B. Zhou, and H.J. Tang, 2008. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS NDVI data in Shandong, China, Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 10:403-413.
- Rocio B., F.O. Jose, H. David, and A.M. Miguel, 2018. Onion biomass monitoring using UAV based RGB imaging, Preci. Agric. 1-18.
- Rojas, O., 2007. Operational maize yield model development and validation based on remote sensing and agro-meteorological data in Kenya, Int. J. Remote Sens. 28(17):3775-3793.