Development of Field Scale Model for Estimating Garlic Growth Based on UAV NDVI and Meteorological Factors

Sang-Il Na, Byoung-keol Min¹, Chan-Won Park, Kyu-Ho So, Jae-Moon Park, and Kyung-Do Lee*

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

¹B&T CO., LTD, Anyang 14056, Korea

*Corresponding author: kdlee11@korea.kr

ABSTRACT

Received: September 25, 2017

Revised: November 6, 2017

Accepted: November 6, 2017

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) has several advantages over conventional remote sensing techniques. They can acquire high-resolution images quickly and repeatedly. And with a comparatively lower flight altitude, they can obtain good quality images even in cloudy weather. In this paper, we developed for estimating garlic growth at field scale model in major cultivation regions. We used the NDVI_{UAV} that reflects the crop conditions, and seven meteorological elements for 3 major cultivation regions from 2015 to 2017. For this study, UAV imagery was taken at Taejeon, Changnyeong, and Hapcheon regions nine times from early February to late June during the garlic growing season. Four plant growth parameters, plant height (P.H.), leaf number (L.N.), plant diameter (P.D.), and fresh weight (F.W.) were measured for twenty plants per plot for each field campaign. The multiple linear regression models were suggested by using backward elimination and stepwise selection in the extraction of independent variables. As a result, model of cold type explain 82.1%, 65.9%, 64.5%, and 61.7% of the P.H., F.W., L.N., P.D. with a root mean square error (RMSE) of 7.98 cm, 5.91 g, 1.05, and 3.43 cm. Especially, model of warm type explain 92.9%, 88.6%, 62.8%, 54.6% of the P.H., P.D., L.N., F.W. with a root mean square error (RMSE) of 16.41 cm, 9.08 cm, 1.12, 19.51 g. The spatial distribution map of garlic growth was in strong agreement with the field measurements in terms of field variation and relative numerical values when NDVI_{UAV} was applied to multiple linear regression models. These results will also be useful for determining the UAV multi-spectral imagery necessary to estimate growth parameters of garlic.

Keywords: Field scale model, Garlic growth, UAV, NDVI

Regression equation of garlic growth parameters extracted from NDVI_{UAV} and meteorological factors.

	Regression equation	RMSE	R	R ²	R ² _{adj}	D.W.
Cold	P.H. $y = 89.888\text{NDVI}_{\text{UAV}} + 0.02512T_{\text{max}} - 16.898$	7.948	0.906	0.821	0.807	1.827
	L.N. $y = 10.969\text{NDVI}_{\text{UAV}} - 0.00038R.H. + 7.470$	1.045	0.803	0.645	0.615	1.955
	P.D. $y = 9.343\text{NDVI}_{\text{UAV}} + 0.02468T_{\text{avr}} + 5.408$	3.427	0.786	0.617	0.508	2.017
	F.W. $y = 69.638\text{NDVI}_{\text{UAV}} + 0.08479T_{\text{min}} - 28.219$	5.907	0.812	0.659	0.562	1.727
Warm	P.H. $y = 70.404\text{NDVI}_{\text{UAV}} + 0.03862T_{\text{avr}} + 0.02226R.F. + 0.00303S.M. - 19.846$	16.410	0.964	0.929	0.927	1.501
	L.N. $y = 7.236\text{NDVI}_{\text{UAV}} - 0.00027R.H. - 0.00084\text{Rad.} - 0.00015S.M. + 9.286$	1.119	0.793	0.628	0.618	2.003
	P.D. $y = 17.420\text{NDVI}_{\text{UAV}} + 0.02416R.F. + 0.03679\text{Rad.} + 0.00162S.M. - 58.825$	9.081	0.942	0.886	0.879	1.939
	F.W. $y = 56.561\text{NDVI}_{\text{UAV}} + 0.06605T_{\text{max}} + 0.00468S.M. - 160.275$	19.509	0.701	0.546	0.520	2.097

P.H.: Plant Height, L.N.: Leaf Number, P.D.: Plant Diameter, F.W.: Fresh Weight.

T: Temperature, R.H.: Relative Humidity, R.F.: Rainfall, Rad.: Radiation, S.M.: Soil Moisture.

Introduction

국내에서 마늘은 국민 식생활의 필수 농산물로서 양파, 고추와 함께 가장 중요한 양념채소 중의 하나이다. 마늘은 2002년 자급률이 92%에 해당할 만큼 안정적인 수급을 유지해 왔으나 최근 재배면적의 감소가 빠르게 진행되고 있으며 (KREI, 2017), 재배면적의 감소는 생산량의 감소로 이어지고 있다. 이와 같은 생산량의 감소에도 불구하고 마늘은 단순 양념 개념에서 벗어나 향신료, 의약품 등으로 이용되고 기능성 식품으로 발전 가능성이 높아 앞으로 소비가 증가할 전망이다 (Kim et al., 2016). 그러나 농업 종사자의 노령화, 인건비, 농자재비 상승으로 인해 생산비 증가가 문제되어 국내 마늘 생산량 증가는 어려운 실정이다. 특히, 마늘은 양파와 비슷한 시기에 재배하며 종구비 등을 포함한 생산비가 양파보다 마늘이 높기 때문에 주산지에서도 재배 시기가 비슷한 양파를 선호하며, 상대적으로 노동 투입시간이 적고 노동생산성도 높은 양파의 재배를 늘려나가는 추세이다. 이를 해결하기 위하여 정부는 마늘의 가격 하락 및 상승에 따른 시장 격리, 비축 및 방출, 저율관세할당 (Tariff Rate Quotas, TRQ) 도입 등 다양한 정책을 추진하고 있지만 효과는 크게 나타나지 못하고 있다.

채소류의 효율적인 수급정책 수립을 위해서는 농업관측 조사의 정확성을 기반으로 재배면적 및 생산량에 대한 정확한 예측과 함께 수요에 대응한 생산과 공급 계획이 이루어져야 한다. 실제로 2017년 통계청과 농업관측본부의 마늘 재배면적 조사 결과가 서로 달라 수급상황을 혼란시키는 문제를 발생시켰다. 통계청은 2017년 마늘 재배면적이 총 24,864 ha로 평년대비 1% 증가하였다고 (KOSIS, 2017) 발표한 반면에 농업관측본부에서는 총 22,220 ha로 평년대비 10.6% 감소하였다고 발표했다 (KREI, 2017). 이러한 차이는 마늘의 TRQ 운용에 영향을 미쳐 국내 마늘가격을 크게 하락시킬 가능성이 있다. 따라서 현재 주어진 여건에서의 수급안정 방안은 관측 고도화가 우선되어야 하며, 산지 정보의 정확성을 높이는 것이 선행되어야 한다.

마늘과 같은 월동작물은 생육기간이 길고 주로 노지에서 재배되기 때문에 주위 환경에 많은 영향을 받는다. 특히 월동 전, 후 및 구비대기의 기상조건에 따라 매년 수량성에 차이가 발생하므로 연차별 주기적인 생육 조사 및 작황 모니터링에 의한 자료와 실제 조사한 수량과의 관계를 분석하여 수량예측에 기초자료로 활용할 필요성이 있다. 이에 따라 위성, 항공영상 등 원격탐사 기술을 이용하여 신속하고 객관적인 현장 정보 수집 및 분석 기술 개발 등의 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 국내에서도 원격탐사 기술의 급속한 진전으로 무인비행체 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)를 이용한 새로운 패러다임의 작황 모니터링 방안에 대한 관심이 높아지고 있다.

UAV를 농업관측 분야에 활용하려는 연구는 작황 모니터링을 위한 안정적인 영상 수집 기술 개발 (Johnson et al., 2003; Nebiker et al., 2008; Hunt et al., 2010)을 시작으로 작황 분석 및 생육 추정에 관한 다양한 연구로 확대되었다. Gay et al. (2009)은 농업 및 환경 모니터링을 위한 UAV 영상의 가능성을 보고하였으며, Alderson (2014)은 UAV 영상을 활용하여 양이 소비하는 목초지를 관리하는 방안을 제시하였다. 또한, Bendig et al. (2015)은 UAV 영상에서 추출한 식생지수와 보리의 초고와의 관계를 이용하여 바이오매스 모니터링을 시도하였으며, Candiago et al. (2015)은 UAV의 다중분광센서를 이용하여 취득한 영상을 식생지수를 이용하여 정밀농업에 활용할 수 있는 자료 생성방안을 연구하였다. 국내에서도 Lee et al. (2015)은 UAV 기반의 식생지수와 헤어리베치의 질소 생산량 비교를 통해 재배단지 내 질소 생산량의 공간적 분포 특성을 추정하였으며, 농촌진흥청 국립농업과학원에서는 UAV의 공공활용성 제고를 위하여 배추, 무, 양파, 마늘 고추 등 5대 채소와 동계 맥류 및 조식료 등을 대상으로 UAV를 이용한 작물 생육 모니터링 기술 개발 (Na et al., 2015), 작황 추정식 유도 (Na et al., 2016a), 작황 진단을 위한 생물리모수 추정 (Na et al., 2016b) 및 생육이상 파악 및 분포도 작성 (Na et al., 2016c) 등 작황 평가 기술 개발을 위한 연구를 지속적으로 수행하고 있다.

본 연구에서는 UAV를 활용한 채소 작황 평가 기술 개발의 일환으로 마늘의 주산단지 중 태안군, 창녕군 및 합천군을 대상으로 시계열 UAV 영상에서 추출한 정규화 식생지수 (Normalized Difference Vegetation Index; NDVI)와 기상요인을 이용하여 필지 단위의 마늘 생육인자 추정 모형을 개발하고, 이를 이용하여 UAV 기반의 마늘 작황 모니터링 방안을 제시하고자 한다.

Materials and Methods

연구대상지역 마늘의 품종은 크게 난지형과 한지형으로 구분된다. 난지형은 한지형에 비해 저온단일성이고 휴면기간이 짧으며, 8~9월에 재식하면 곧 싹이 나와 연말까지는 상당히 큰 마늘로 성장한다. 주로 남부의 해안지역을 중심으로 도서지역에서 재배되고 있으며, 전라남도와 경상남도의 도서지역이 주산지이다. 한지형은 난지형에 비해 고온단일성으로 뿌리내림 및 발아가 늦어 대부분 월동기 이후 성장을 시작한다. 대부분의 육쪽마늘이 이에 속하고 내륙 및 고위도 지방에서 재배되며, 충청남도와 경상북도가 주산지이다. 따라서 본 연구에서는 작형에 따른 마늘 주산지를 고려하여 Fig. 1과 같이 충청남도 태안군 및 경상남도 창녕군, 합천군의 마늘 재배지 일대를 대상으로 UAV 촬영 및 현장 조사를 통하여 마늘 작황을 모니터링 하였다. 태안군은 온난 다습한 해양성 기후 지역으로 날씨의 변화가 심하지 않고 연간 일조량이 다른 지역에 비해 풍부하다. 유기물이 풍부한 점토질의 비옥한 황토에서 생산되는 태안 한지형 마늘은 독특한 맛과 향을 지니고 해양성 기후로 바이러스 감염이 적어 종자마늘로 우수하다. 또한 마늘통이 단단하고 병해충이 적어 저장성이 강하다. 반면에 창녕군과 합천군의 마늘은 난지형 중에서도 쪽이 12개 정도인 대서마늘이 주종을 이루고 있어 매운 맛이 약간 덜하며, 쪽분리가 용이하여 깎마늘로 많이 판매되며 대량 소비처인 음식점의 선호도가 높다. 2015년 기준 태안군, 창녕군 및 합천군의 마늘 재배면적은 각각 742 ha, 2,498 ha, 634 ha 로 전국 재배면적 20,638 ha의 18.8%를 차지하고 있다 (KOSIS, 2017).

Fig. 1. Location of research sites in Tae-an-gun, Hapcheon-gun and Changnyeong-gun.

자료 수집 및 처리 촬영에 사용된 UAV (eBee, Sensefly, Swiss)는 고정익으로 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 번갈아 탑재하여 영상을 취득하였다. 마늘의 생육시기에 따라 2월 중순부터 6월 상순까지 2주 간격으로 3년 동안 총 25회에 걸쳐 수행하였으며 (Table 1), 공간해상도 5 cm, 중복도는 종방향 65%, 횡방향 80%로 촬영하였다. 촬영된 영상은 전처리 과정을 거쳐 정사영상으로 제작하였으며 (Na et al., 2016a), 근적외선 영상은 Eq. 1에 적용하여 NDVI를 산출하였다.

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

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.

기상요인은 농촌진흥청 농업기상정보 서비스 홈페이지 (<http://weather.rda.go.kr/>)의 농업 기상관측 자료를 이용하였다. 농촌진흥청은 전국의 농업 기상관측소를 통하여 기온, 습도, 풍향, 풍속, 강수량 및 일조시간 등 기상요인을 무인 관측하여 시간단위 자료로 제공하고 있으며, 농업기상 측정 장비와 연동된 토양수분 관측망을 이용하여 농업가뭄 대응을 위한 전국 단위 토양수분 관측 네트워크를 운영 중에 있다. 본 연구에서는 대상지역의 시군 농업기술센터에 설치된 농업 기상관측소를 대상으로 일별 기상관측 자료를 수집하여 마늘 생육기간 동안의 평균 및 최고/최저 온도, 상대습도, 강수량, 일사량 및 토양수분 등 7개 기상요인을 추출하였다.

생육조사는 UAV로 촬영되는 영상의 NDVI 및 해당 지점의 기상요인과 마늘의 생육인자를 비교하기 위해 수행하였다. 지역별 비교적 작황이 양호한 5개 필지를 무작위로 선정한 후, 각 필지별 생육을 대표할 수 있는 지점에서 20주를 대상으로 초장 (Plant Height, P.H.), 엽수 (Leaf Number, L.N.), 구직경 (Plant Diameter, P.D.) 및 생체중 (Fresh Weight, F.W.) 등 일반 생육 특성을 생육단계별로 UAV 촬영 시점에 맞추어 조사하였다.

Table 1. Study area and description.

Category	Description
Study area	Cold type Inpyeong-ri, Taean-eup, Taean-gun, Chungcheongnam-do
	Warm type Pungjo-ri, Yueo-myeon, Changnyeong-gun, Gyeongsangnam-do Yulji-ri, Deokgok-myeon, Hapcheon-gun, Gyeongsangnam-do
Acquisition date	y2015 : 03/25, 04/07, 04/16, 04/22, 04/28, 05/06, 05/20, 05/28, 06/04 y2016 : 02/17, 03/08, 03/29, 04/14, 04/28, 05/18, 06/08 y2017 : 02/15, 03/02, 03/16, 03/30, 04/13, 04/28, 05/11, 05/22, 06/08
Acquisition area	100~200 ha
Flight altitude	145~150 m
Spatial resolution	5 cm

마늘 생육인자 추정 모형 개발 본 연구에서는 마늘 생육인자 추정 모형 개발을 위하여 다중선형 회귀분석을 수행하고, Eq. 2의 회귀모형을 개발하였다.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{ki} + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{Eq. 2})$$

여기서, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 는 추정되는 편회귀계수 (partial regression coefficient)이고, X_{ji} 는 설명변수 X_j 의 i 번째 관측치로 UAV에서 추출한 필지 단위 NDVI 및 7개 기상요인을 의미하며, Y_i 는 생육인자와 관련된 종속변수 P.H., L.N., P.D., F.W.이다.

먼저, 회귀모형에 포함될 설명변수들을 선택하고 각 회귀모형에서 편회귀계수 추정치를 구하였다. 설명변수 선택은 SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) 프로그램 (Statistics Standard ver. 18, IBM Inc.)에서 제공되는 후진 제거법 (Backward elimination)과 단계적 선택법 (Stepwise selection)을 모두 사용하였으며, 선택 결과 비교 후 결과가 상이할 경우 선행연구 결과를 참고하여 작물 생리학적으로 해석이 용이하거나 보다 논리적인 설명변수를 최종적으로 선택하였다. 또한, 선택된 설명변수에 의하여 추정된 회귀모형은 F-검정을 이용하여 유의성을 판단한 후, 수정 결정계수 (R_{adj}^2)를 고려하여 가장 안정적이고 설명력 높은 모형을 최적모형으로 선택하였다.

필지단위 생육인자 분포도는 농림축산식품부의 스마트 팜 맵 (Smart Farm Map)을 이용하여 UAV 기반 NDVI의 평균값을 필지단위로 산출한 후 모형 검정에서 선택된 생육인자별 회귀모형에 적용하여 작성하였으며, 각 필지별 비교가 가능하도록 마늘 필지에 해당하는 영역만을 마스킹 (masking) 처리하여 제작하였다.

Results and Discussion

마늘 생육시기에 따른 NDVI_{UAV} 및 생육인자 변화 UAV를 이용한 마늘 생육 모니터링을 위하여 UAV 기반의 시계열 NDVI_{UAV}와 마늘 생육기간 동안의 생육인자 변화를 비교 분석하였다. 먼저, 마늘 생육시기에 따른 연평균 NDVI_{UAV}는 Fig. 2(a)와 같이 나타났다. 지역별 NDVI_{UAV}의 범위는 태안에서 0.085~0.371, 창녕에서 0.096~0.523, 합천에서 0.109~0.586로 나타났으며, 동일시기의 필지별 NDVI_{UAV} 비교 결과는 합천 > 창녕 > 태안 순으로 나타났다. 시기별 NDVI_{UAV} 변화 패턴을 살펴보면 생육 초반에는 서서히 증가하다가 월동기 이후 급격히 증가한 후, 구비대기가 지난 후 감소하는 양상을 보였다. 특히, 태안의 경우 창녕 및 합천과 비교하여 상대적으로 NDVI_{UAV}가 낮고, 피크 (peak)에 이르는 시기도 늦게 나타났다. 이는 지역적 특성보다는 품종에 따른 특성으로 판단된다. 일반적으로 한지형 마늘의 경우 보통 10월 하순에서 11월 상순에 파종하기 때문에 싹이 나지 않은 상태에서 월동을 하며, 휴면기간이 길어 난지형 마늘보다 늦게 생장을 시작한다. 또한 외형적인 특징도 난지형 마늘에 비해 상대적으로 초고가 작고 구의 직경 및 무게가 작다. 따라서 마늘 생육시기에 따른 생육인자 변화도 난지형 (창녕군 및 합천군)과 한지형 (태안군)이 명확하게 구분되는 특징을 확인할 수 있으며 (Fig. 2), 생육인자 추정시 품종에 따른 고려가 필요할 것으로 판단된다.

지역별 모든 시험필지를 대상으로 NDVI_{UAV}와 생육인자 변화를 비교한 결과는 Fig. 3과 같다. 초장 (P.H.) 및 엽수 (L.N.)의 변화는 NDVI_{UAV}의 변화와 유사한 패턴을 나타낸 반면에 구직경 (P.D.) 및 생체중 (F.W.)은 구비대기 이후에도 계속적으로 증가하는 패턴을 보였다. 이는 마늘의 생물리적 특성에 기인하는 것으로 해석된다. 마늘의 생육단계는 구비대기를 기점으로 영양생장기와 생식생장기로 구분되는데 영양생장기에서는 지상부 생육인자인 P.H.와 L.N.이 증가하여 NDVI_{UAV}도 증가하는 반면에 생식생장기에서는 지하부 생육인자인 P.D.와 F.W.는 증가하지만 지상부는 생장을 멈추어 NDVI_{UAV}가 감소하게 된다. 따라서 UAV를 활용한 마늘 작황 모니터링을 위해서는 NDVI_{UAV}와 기상요인을 동시에 고려해야 할 것으로 판단되며, 이를 위하여 상관분석을 통해 각 독립변수와 생육인자간의 관련성을 평가하였다.

Fig. 2. Variations of $NDVI_{UAV}$ & garlic growth parameters during the growing period

Fig. 3. Temporal variations of $NDVI_{UAV}$ & garlic growth parameters.

그 결과, 모든 독립변수와 상관성이 가장 높은 생육인자는 P.H.로 나타났으며, 난지형 ($0.652 < R < 0.930$)이 한지형 ($0.602 < R < 0.859$)보다 높게 나타났다. 독립변수 별로 살펴보면, $NDVI_{UAV}$ 는 P.H. 및 L.N.와는 양의 상관관계를, P.D.와 F.W.와는 음의 상관관계를 나타내었으며, 기상요인은 모든 생육인자에 대해 대부분 높은 상관성을 보였다

(Table 2). 또한, 한지형 마늘의 경우 생육인자와 가장 상관성이 높은 독립변수는 $NDVI_{UAV}$ ($R=0.585$)로 나타난 반면에 난지형 마늘에서는 최고온도 ($R=0.676$)가 가장 영향을 미치는 요인으로 나타나 품종간의 차이를 확인하였다. 그러나 본 연구에서 얻어진 결과만으로 품종간 상관관계수의 상대적인 비교는 어려울 것으로 판단된다. 물론 현장에서 측정한 생육인자와 다양한 독립변수를 비교하여 각 생육인자별 가장 영향을 크게 미치는 요인을 확인하는 것에는 의미가 있지만 작황을 직접적으로 평가하고 생육인자를 추정하기 위한 요인을 선택하기 위한 방법으로는 한계가 있다. 대상지역 및 시험포장의 수, 조사횟수 등 한지형과 난지형의 관측치에서 차이가 있고, 조사 필지에 대한 전체 수량을 파악하지 못하였으며, 태안의 기상관측소에는 일사량 관측 장비가 없어 일사량 자료가 누락되었기 때문이다. 따라서 상관분석 결과만으로 독립변수를 선택하는 것보다는 다중선형 회귀분석을 통해 구축된 모형을 검증하고 최적의 모형을 선택하는 단계에서 독립변수를 선택하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

Table 2. Correlation coefficients between $NDVI_{UAV}$, meteorological factors and garlic growth parameters.

	Cold type				Warm type							
	Taean				Changnyeong				Hapcheon			
	P.H. (cm)	L.N. (No.)	P.D. (mm)	F.W. (g)	P.H. (cm)	L.N. (No.)	P.D. (mm)	F.W. (g)	P.H. (cm)	L.N. (No.)	P.D. (mm)	F.W. (g)
$NDVI_{UAV}$	0.606	0.684	-0.542	-0.508	0.798	0.526	-0.613	-0.534	0.835	0.567	-0.705	-0.542
T_{avr}	0.611	-0.469	0.597	0.328	0.873	0.395	0.898	0.760	0.872	0.164	0.781	0.660
T_{max}	0.622	-0.456	0.598	0.317	0.880	0.295	0.918	0.750	0.858	0.187	0.890	0.628
T_{min}	0.602	-0.479	0.582	0.343	0.730	0.568	0.731	0.736	0.694	0.039	0.384	0.653
R.H.	0.828	-0.116	0.240	0.425	0.930	0.420	0.819	0.701	0.915	0.050	0.812	0.684
R.F.	0.859	0.149	0.007	0.404	0.706	0.628	0.247	0.571	0.772	0.144	0.120	0.552
Rad.	-	-	-	-	0.848	0.189	0.880	0.646	0.815	0.198	0.939	0.478
S.M.	0.774	0.168	0.004	0.364	0.855	0.304	0.875	0.681	0.652	0.275	0.464	-0.091

P.H.: Plant Height, L.N.: Leaf Number, P.D.: Plant Diameter, F.W.: Fresh Weight.

T: Temperature, R.H.: Relative Humidity, R.F.: Rainfall, Rad.: Radiation, S.M.: Soil Moisture.

마늘 생육인자 추정 모형 개발 및 적용 모든 독립변수를 이용한 다중선형 회귀분석 결과를 정리하면 Table 3과 같다. 분석 결과, 한지형의 P.D.와 F.W. 모형을 제외한 모든 회귀모형은 0.1% 유의수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 관측치간의 상관관계를 나타내는 더빈-왓슨 (Durbin-Watson; D.W.) 통계량은 한지형의 P.D.와 난지형의 P.H., L.N. 모형에서 일부 정의 상관관계를 나타내는 것으로 나타났으며 ($D.W. < 1.5$), 모든 생육인자의 평균 수정결정계수 (Adjusted R-squared;)는 난지형 ($=0.762$)이 한지형 ($=0.626$) 보다 다소 높은 것으로 나타났다. 또한, 평균온도 및 최고/최저온도 등 기상요인간의 다중공선성이 확인되었고 ($VIF > 10$), 일부 독립변수들은 유의하지 않은 것으로 확인되었다 ($p > 0.10$).

따라서 본 연구에서는 후진 제거법 (Backward elimination)과 단계적 선택법 (Stepwise selection)을 사용하여 각 생육인자별 독립변수를 선택하고 회귀모형을 구축하였다 (Table 4). 그 결과, 전 모형에서 0.1% 유의수준에서 통계적으로 유의하며 잔차간 자기상관성도 작은 것으로 나타났다 ($1.501 < D.W. < 2.097$). 품종별로 살펴보면, 한지형 마늘의 P.H., P.D. 및 F.W.는 최고/최저 및 평균온도가 설명변수로 채택되었으며, 모두 양의 관계가 있는 것으로 나타났다. 또한, L.N.은 상대습도가 음의 관계가 있는 것으로 나타났으며, $NDVI_{UAV}$ 는 모든 생육인자에서 설명변수로 채택되

었다. 각 생육인자와의 결정계수는 P.H. ($R^2=0.821$) > F.W. ($R^2=0.659$) > L.N. ($R^2=0.645$) > P.D. ($R^2=0.617$) 순으로 나타났으며, RMSE는 각각 7.98 cm, 5.91 g, 1.05개, 3.43 mm로 나타났다. 반면에 난지형 마늘의 경우 생육인자에 영향을 미치는 기상요인이 생육인자별로 매우 다양하게 나타났다. 또한, 각 생육인자와의 결정계수는 P.H. ($R^2=0.929$) > P.D. ($R^2=0.886$) > L.N. ($R^2=0.628$) > F.W. ($R^2=0.546$) 순으로 나타났으며, RMSE는 각각 16.41 cm, 9.08 mm, 1.12개, 19.51 g로 나타났다. 지역별로 살펴보면 합천군의 평균 결정계수가 0.759로 생육인자 변이의 75% 이상을 설명할 수 있었으며, 합천군 ($R^2=0.759$) > 창녕군 ($R^2=0.696$) > 태안군 ($R^2=0.686$) 순으로 나타났다 (Table 5). P.H.의 경우 모든 지역에서 0.8 이상의 높은 결정계수를 보였으나, 창녕군의 L.N. 및 합천군의 F.W.는 결정계수가 0.5 이하로 나타나 지역에 따라 생육인자별 설명력에 차이가 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 마늘의 생육인자는 기상요인과 밀접한 관련을 가지고 있으나 특정 기상요인으로 설명할 수 없는 각 지역의 특이성이 나타났다. 따라서 생육인자에 대한 기상요인의 영향을 정량화하기 위해서는 현재 마늘이 재배되고 있는 지역을 대상으로 미기상관측 자료를 이용하여 지역별 기상변이를 파악하고 생육인자에 가장 영향을 미치는 기상요인을 선별하는 과정이 중요할 것으로 생각된다.

Table 3. Results of multiple linear regression analysis using all variables.

	Cold type					Warm type				
	<i>R</i>	R^2	R^2_{adj}	p	D.W.	<i>R</i>	R^2	R^2_{adj}	p	D.W.
P.H.	0.978	0.956	0.942	< 0.001	1.545	0.971	0.942	0.939	< 0.001	1.469
L.N.	0.908	0.825	0.773	< 0.001	2.087	0.867	0.751	0.737	< 0.001	1.338
P.D.	0.789	0.623	0.321	0.224	1.079	0.955	0.912	0.901	< 0.001	1.812
F.W.	0.839	0.705	0.469	0.131	1.784	0.741	0.549	0.469	< 0.001	2.406

P.H.: Plant Height, L.N.: Leaf Number, P.D.: Plant Diameter, F.W.: Fresh Weight.

D.W. : Durbin-Watson.

Table 4. Regression equation of garlic growth parameters extracted from NDVI_{UAV} and meteorological factors.

	Regression equation					RMSE	<i>R</i>	R^2	R^2_{adj}	D.W.
Cold	P.H. $y = 89.888\text{NDVI}_{\text{UAV}} + 0.02512T_{\text{max}} - 16.898$					7.948	0.906	0.821	0.807	1.827
	L.N. $y = 10.969\text{NDVI}_{\text{UAV}} - 0.00038\text{R.H.} + 7.470$					1.045	0.803	0.645	0.615	1.955
	P.D. $y = 9.343\text{NDVI}_{\text{UAV}} + 0.02468T_{\text{avr}} + 5.408$					3.427	0.786	0.617	0.508	2.017
	F.W. $y = 69.638\text{NDVI}_{\text{UAV}} + 0.08479T_{\text{min}} - 28.219$					5.907	0.812	0.659	0.562	1.727
Warm	P.H. $y = 70.404\text{NDVI}_{\text{UAV}} + 0.03862T_{\text{avr}} + 0.02226\text{R.F.} + 0.00303\text{S.M.} - 19.846$					16.410	0.964	0.929	0.927	1.501
	L.N. $y = 7.236\text{NDVI}_{\text{UAV}} - 0.00027\text{R.H.} - 0.00084\text{Rad.} - 0.00015\text{S.M.} + 9.286$					1.119	0.793	0.628	0.618	2.003
	P.D. $y = 17.420\text{NDVI}_{\text{UAV}} + 0.02416\text{R.F.} + 0.03679\text{Rad.} + 0.00162\text{S.M.} - 58.825$					9.081	0.942	0.886	0.879	1.939
	F.W. $y = 56.561\text{NDVI}_{\text{UAV}} + 0.06605T_{\text{max}} + 0.00468\text{S.M.} - 160.275$					19.509	0.701	0.546	0.520	2.097

P.H.: Plant Height, L.N.: Leaf Number, P.D.: Plant Diameter, F.W.: Fresh Weight.

T: Temperature, R.H.: Relative Humidity, R.F.: Rainfall, Rad.: Radiation, S.M.: Soil Moisture.

Table 5. Statistical performance of regional regression model.

	P.H.		L.N.		P.D.		F.W.	
	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2
Taeon	7.948	0.821	1.045	0.645	3.427	0.617	5.907	0.659
Changnyeong	12.402	0.921	0.826	0.391	5.015	0.862	13.608	0.611
Hapcheon	19.549	0.939	1.293	0.745	11.571	0.933	24.141	0.418

P.H.: Plant Height, L.N.: Leaf Number, P.D.: Plant Diameter, F.W.: Fresh Weight.

Fig. 4는 마늘 생육인자 추정 모형의 예측값과 현장 생육조사 결과를 비교한 산점도이다. P.H.의 경우 모든 지역에 서 1:1선에 근접한 결과를 보이고 있어 모형이 마늘의 P.H. 변화 특성을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다. 하지만 L.N.의 경우 P.H.와 비교하여 전체적으로 산발적으로 분포하고 있으며, 생육 초기에는 모형의 예측값이 실측값보다 과대평가되는 경향이 나타났다. 또한, P.D.와 F.W.는 충분한 관측치가 확보되지 않아 모형의 안정성에 대한 정확한 평가에 한계가 있었다. 따라서, 향후 충분한 관측치가 확보된다면 모형의 안정성 및 정확도를 재평가할 필요성이 있는 것으로 생각된다. 이와 같은 결과를 종합해 볼 때, NDVI_{UAV}와 기상요인을 고려한 마늘 생육인자 추정 모형은 대상 지역 및 생육 시기를 파악하고 각 생육인자별 모형의 특성을 고려하여 선택적으로 적용해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 4. Scatter plot of garlic growth model.

NDVI_{UAV}와 기상요인을 이용한 필지 단위 마늘 생육인자 추정 모형을 이용한 마늘 작황 모니터링 방안을 제시하기 위하여 난지형 마늘을 대상으로 창녕군 및 합천군의 필지 단위 생육인자 분포도를 작성하였다. Fig. 5와 같이 각각의 분포도는 필지별 생육인자 분포가 직관적인 형태의 지도 형태로 표현되어 현장 관측 및 조사시 참고자료, 필지별 작황

Fig. 5. Garlic growth parameter map of Changnyeong (Left), Hapcheon (Right) on May 11, 2017.

의 상대 비교, 필지별 수확시기, 출하량 및 출하 가능량 추정, 마늘의 생장 및 단수예측의 기초자료, 생육이상 필지 분석 및 대응 방안 마련을 위한 의사결정 지원 등에 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 연도별 생육인자 분포도가 작성된다면 시계열 분석에 의한 평년 및 전년 대비 작황 판단, 필지별 작물 전환율 추정 및 휴경지 모니터링, 필지별 작황의 변화 추이 파악도 가능할 것으로 기대된다.

Conclusions

마늘의 안정적인 수급 정책 수립 및 합리적 영농계획 수립 지원을 위해서는 과학적이고 신속·정확한 작황정보 제공이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 UAV를 활용한 채소 작황 평가 기술 개발의 일환으로 마늘의 주산지 중 태안군, 창녕군 및 합천군을 대상으로 UAV 기반의 시계열 NDVI와 기상요인을 이용하여 초고 (P.H.), 엽수 (L.N.), 구직경 (P.D.) 및 생체중 (F.W.)을 대상으로 필지 단위의 마늘 생육인자 추정 모형을 개발하고, 이를 이용하여 UAV 기반의 마늘 작황 모니터링 방안을 제시하였다. 그 결과, 품종에 따른 각 생육인자와의 결정계수는 한지형 마늘의 경우, P.H. ($R^2=0.821$) > F.W. ($R^2=0.659$) > L.N. ($R^2=0.645$) > P.D. ($R^2=0.617$) 순으로 나타났으며, 난지형 마늘은 P.H. ($R^2=0.929$) > P.D. ($R^2=0.886$) > L.N. ($R^2=0.628$) > F.W. ($R^2=0.546$) 순으로 나타났다. 지역별로는 합천군의 평균 결정계수가 0.759로 생육인자 변이의 75% 이상을 설명할 수 있었으며, 합천군 ($R^2=0.759$) > 창녕군 ($R^2=0.696$) > 태안군 ($R^2=0.686$) 순으로 나타났다. 또한, 난지형 마늘을 대상으로 필지 단위 생육인자 분포도를 작성한 결과, 각각의 분포도는 필지별 생육인자 분포가 직관적인 형태의 지도 형태로 표현되어 마늘의 품종에 따른 필지별 작황 모니터링의 활용 가능성을 확인하였다. 그러나 각각의 생육인자 정보를 개별적으로 활용하기보다는 다양한 생육인자 분포도를 동시에 활용하는 것이 보다 정확한 작황 모니터링을 위한 방법으로 생각되며, 보다 안정적인 정보 제공을 위한 공간정보 기반의 시스템 구축 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다. 특히, 마늘과 같은 작물은 전국에 걸쳐 주산지가 분포되어 있어 재배기간 동안 각 주산지 단위로 재배현황에 대한 공간정보가 연차적으로 생산될 수 있다. 따라서 위성영상의 활용 등에 의한 광범위한 지역에 대한 다량의 공간정보들을 축적하고, 축적된 정보의 필지별, 시기별 비교 및 제공 서비스를 효율적으로 하기 위한 GIS 기반의 공간정보 기술을 도입하여 확대해 나아가야 할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This study was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (PJ011838022017)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Agricultural Weather Information Service Homepage. <http://weather.rda.go.kr/> Accessed 5 Aug. 2017.
- Alderson, S. 2014. Drone cuts costs on New Zealand sheep farm. Farmers Weekly. Accessed in <http://www.fwi.co.uk/machinery/drone-cuts-costs-on-new-zealand-sheep-farm.htm> on 3 Jul. 2017.
- Bendig, J., K. Yu, H. Aasen, A. Bolten, S. Bennertz, J. Broscheit, M.L. Gnyp, and G. Baretha. 2015. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley, Inter. J. Appl. Earth Observ. & Geoinform. 39:79-87.

- Candiago, S., F. Remondino, M.D. Giglio, M. Dubbini, and M. Gattelli. 2015. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images, *Remote Sens.* 7:4026-4047.
- Gay, A.P., T.P. Stewart, R. Angel, M. Easey, A.J. Eves, N.J. Thomas, D.A. Pearce, and A.I. Kemp. 2009. Developing unmanned aerial vehicles for local and flexible environmental and agricultural monitoring. *Proceedings of RSPSoc 2009 Annual Conference.* 8(11):471-476.
- Hunt, E.R., W.D. Hively, S.J. Fujikawa, D.S. Linden, C.S. Daughtry, and G.W. McCarty. 2010. Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring, *Remote Sens.* 2(1):290-305.
- Johnson, L.F., S. Herwitz, S. Dunagan, B. Lobitz, D. Sullivan, and R. Slye. 2003. Collection of ultra high spatial and spectral resolution image data over California vineyards with a small UAV, In *Proceedings of the 30th ISRS*, 20: 845-849.
- Kim, S.W., S.H. Song, H.Y. Lee, E.S. Han, and S.Y. Kim. 2016. A Study on analysis of the storage condition of condiment vegetables and plans for building an efficient system for stable demand and supply: Focusing on garlic and onions, KREI research report R787.
- Korean Rural Economic Institute Homepage. <http://www.krei.re.kr/> Accessed 17 Jul. 2017.
- Korean Statistical Information Service Homepage. <http://www.kosis.kr/> Accessed 17 Jul. 2017.
- Lee, K.D., S.I. Na, S.C. Baek, K.D. Park, J.S. Choi, S.J. Kim, H.J. Kim, H.S. Yun, and S.Y. Hong. 2015. Estimating the amount of nitrogen in hairy vetch on paddy fields using unmaned aerial vehicle imagery, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 48(5):384-390 (in Korean).
- Na, S.I., S.C. Baek, S.Y. Hong, L.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).
- Na, S.I., C.W. Park, Y.K. Cheong, C.S. Kang, I.B. Choi, and K.D. Lee. 2016a. Selection of optimal vegetation indices for estimation of barley & wheat growth based on remote sensing - An application of unmanned aerial vehicle and field investigation data, *Korean J. Remote Sens.* 32(5):483-497 (in Korean with English abstract).
- Na, S.I., S.Y. Hong, C.W. Park, K.D. Kim, and K.D. Lee. 2016b. 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, and K.D. Lee. 2016c. Application of highland kimchi cabbage status map for growth monitoring based on unmanned aerial vehicle, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49(5):469-479 (in Korean with English abstract).
- Nebiker, S., A. Annen, M. Scherrer, and D. Oesch. 2008. A light-weight multispectral sensor for micro UAV - Opportunities for very high resolution airborne remote sensing, *The international archives of the photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B1):1193-1199.