Estimation of Rice Leaf Nitrogen Content and Yield using UAV Image

Kyung-Do Lee¹, Chan-Won Park², Ho-yong Ahn¹, Suk-young Hong², Su-Yong Jang³, Sang-Il Na^{1*}, and Kyu-Ho So²

¹Researcher, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 56365, Korea

²Senior Researcher, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 56365, Korea

³CEO, Hanmaeum Farming Cooperation, Gimje 54425, Korea

*Corresponding author: sangil917@korea.kr

ABSTRACT

Received: August 13, 2020

Revised: August 24, 2020

Accepted: August 31, 2020

Unmanned Aerial Vehicle (UAV)s have a high resolution of around 10 cm and can acquire images with lower cost when we want. The purpose of this study was to estimate the rice leaf nitrogen content and grain yield using UAV image. We collected the time series UAV aerial images at the paddy fields and the data were compared with the rice leaf nitrogen contents and rice yield in the experimental sites. Correlation coefficient (R) between the vegetation indices (NDVI, GNDVI, RVI, GRVI) and rice leaf nitrogen contents were ranged from 0.8 to 0.9 from mid-July to late July. Correlation coefficient between the vegetation indices (NDVI, GNDVI, RVI, GRVI) and rice grain yield were more than 0.9 from mid-July to early August. Using these results, we were able to make the distribution map of the rice leaf nitrogen and yield. In the future, it will be necessary to study to recommend supplemental fertilization to ensure rice yield using UAV images information.

Keywords: UAV, Vegetation index, Remote sensing, Rice yield, Leaf nitrogen content

Distribution map of rice leaf nitrogen contents using UAV imagery.
(N fertilizer level (kg/ha) : Site #1 0, Site #2 135, Site #3 158, Site #4 181, Site #5 204)

Introduction

질소는 작물의 생육과 수량을 결정짓는 중요한 요소로서 질소 영양상태는 다음 생육단계의 성장량을 결정하게 된다 (Agren, 1985). 따라서 질소 영양상태를 정확히 진단하여 질소 양분을 공급하는 것은 비료 사용의 효율성을 높여 줄 수 있다 (Norman et al., 1992). 작물의 질소량을 확인하기 위해서는 채취 후 분석하는 것이 가장 정확하나 많은 시간과 노력, 비용이 소요되는 한계가 있다 (Kim et al., 2005).

원격탐사는 전자기파를 감지하는 각종 센서를 이용하여 지표면, 물, 대기 현상에 대해 비접촉, 비파괴적인 방법으로 필요한 정보를 얻어내는 과학 기술로서 농업분야에서도 농경지 및 작황 정보 생산에 많이 이용되어 왔다. 원격탐사를 활용한 작황 분석은 주로 태양광이 식물체 표면에 도달하여 흡수, 투과, 반사하는 특성이 작물 상태에 따라 달라지는 원리로 수행된다. 식물의 생육이 양호할수록 가시광선 영역 (400~700 nm)의 복사선은 흡수하고 근적외선 영역 (700~1,300 nm)은 반사하게 되는데, 가시광선 영역과 근적외선 영역을 식물의 특성을 잘 드러낼 수 있도록 다양하게 조합하여 식생지수 (Vegetation Index)를 계산함으로써 수치에 기반한 작황 해석이 가능하다.

Kim et al. (2005)은 분광방사계를 활용하여 벼 군락의 반사율을 측정하여 산정한 GRVI 식생지수가 우수형성기 전후 벼의 생육량과 질소영양상태를 잘 추정할 수 있다고 보고한바 있다. Kim and Hong (2007)은 능동형 지상광학센서를 이용하여 식생지수와 벼 군락의 엽 질소 함량을 추정한 결과 GNDVI 식생지수가 이삭거름을 처리하기 전에 질소영양상태를 효과적을 예측할 수 있다고 보고하였다. Kang et al. (2010)은 지상원격측정 센서로 산정한 식생지수와 질소 비료 수준별 벼 질소 흡수량, 생체량 및 수량의 상호관계를 분석한 결과 7월 중순~8월 초에 측정된 센서 식생지수 값이 변량적인 질소 비료량 결정에 활용할 수 있을 것으로 보고하였다. 이처럼 지상센서를 이용하여 벼 군락 단위에서 질소 상태를 진단하고 웃거름을 산정하기 위한 연구가 수행 되었으나 주로 사람이 지상센서를 운반하며 수 m² 이내 소규모 지점을 관측하는 방식으로 필지 전체 및 들녘 단위의 정보 생산에는 한계가 있다. 최근 무인비행체 기술 발전과 보급이 확산되면서 100~300 ha 규모 들녘 단위에 대해 5~10 cm 내외 고해상도 항공 영상 수집이 가능하게 되어 국내외적으로 무인비행체 영상을 활용한 작황 정보 생산 연구가 활발히 진행되고 있다 (Lee et al., 2015). Zheng et al. (2018)은 무인기 영상과 지상 센서를 활용하여 벼 엽 질소 농도를 추정한 바 있으며, Li et al. (2018)은 무인기 영상에 능동형 광학센서를 부착하여 벼 엽 질소 함량을 추정한 바 있다. 국내의 경우, Lee et al. (2015)은 친환경농업단지 95 ha에 대해 무인비행체 영상 식생지수와 표본 쪼갬작물의 질소량을 비교하여 식생지수 기반의 질소량 추정식을 구축하여 필지 별로 쪼갬작물의 질소량 분포를 추정한 바 있다. Lee et al. (2020)은 무인비행체 영상을 활용하여 벼 생육 및 병해 추정 연구를 수행한 바 있다. 그러나 무인비행체 영상 식생지수를 기반으로 벼 질소량 및 수량 추정 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 질소 비료량 수준별 처리 조건에서 무인비행체 영상을 활용하여 벼 엽 질소 함량 및 수량을 추정하고자 수행하였다.

Materials and Methods

본 연구는 전북 김제시 부량면에 위치한 벼 재배포장 (35°44'55"N, 126°52'03"E)에서 2019년 영농기 동안 수행하였다 (Fig. 1). 연구 대상 지역은 곡창지대인 호남평야에 위치하고 있으며, 지형적으로는 충적평야, 토양통은 전북통으로서 주로 논으로 활용되고 있다. 연구지역 들녘에서는 주로 중만생종 일반벼인 신동진 벼와 찰벼인 동진찰벼가 재배되고 있다. 본 연구에서는 신동진 벼 재배 논 5필지 (1.94 ha)를 연구 포장으로 선정하여 2019년 5월 23일 재식밀도

30 × 18 cm로 기계이앙 하였다. 수준별 질소 비료 사용을 위해 농가 관행 비료 사용량을 고려하여 1개 무비구와 밑거름은 같으나 7월말 웃거름이 다른 4개 비료 처리구를 두었다. 4개 비료 처리 구의 질소 밑거름은 측조 시비로 70%를 공급 (질소 성분량 135 kg/ha)하고 웃거름은 관행 대비 0%, 50%, 100%, 150%의 4수준으로 공급하였으며 질소 성분량으로는 각각 0, 23, 46, 69 kg/ha에 해당하였다 (Table 1).

인산과 칼리 성분은 ha 기준으로 각각 45 kg, 36 kg을 사용하였다. 토양 화학성 분석은 국립농업과학원 토양 분석법 (National Institute of Agricultural Sciences, 2010)에 준하여 수행하였다 (Table 2). 채취한 토양을 풍건 후 2 mm 체로 통과시켜 pH는 증류수의 비율을 1:5로 하였다. 유기물은 원소분석기로 분석하였으며, 유효인산은 Landcaster법을 이용하였다. 치환성양이온은 pH 7.0 1N CH₃COONH₄로 치환 후 ICP (Inductively Coupled Plasma)로 분석하였다. 식물체 분석은 필지 별로 생육이 고른 벼 5주를 채취하여 초장을 측정하고 LI-3000 (LI-COR, USA)을 이용하여 엽면적을 측정한 후 70°C에서 24시간 건조하여 건물중을 측정하고 분쇄하여 원소분석기 (Variomax, Elementar, Germany)로 엽 질소 농도를 분석하였다. 엽 질소 함량은 건물중에 엽 질소 농도를 곱하여 산정하였다. 벼 수량 조사는

Fig. 1. Location of study area and experimental sites.

Table 1. Amount of nitrogen fertilizer at experimental sites (unit : kg/ha).

Site number	Basal nitrogen fertilizer	Additional nitrogen fertilizer	Total nitrogen fertilizer
Site #1	0	0	0
Site #2	135	0	135
Site #3	135	23	158
Site #4	135	46	181
Site #5	135	69	204

Table 2. Soil chemical properties of the experimental sites.

Site number	Soil texture	pH	EC	OM	Av. P ₂ O ₅	Av. SiO ₂	K	Ca	Mg
		(1:5)	(dS m ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	----- (cmol _c kg ⁻¹) -----		
Site #1	Silty clay loam	5.8	0.26	30.0	39.6	132.5	0.11	6.08	1.55
Site #2	Silty clay loam	6.0	0.33	26.8	43.4	179.4	0.33	6.72	0.90
Site #3	Silty clay loam	6.1	0.37	26.4	43.2	234.7	0.40	7.36	1.18
Site #4	Silty clay loam	6.1	0.29	29.1	44.8	223.1	0.11	7.15	1.44
Site #5	Silty clay loam	6.4	0.36	23.9	38.3	216.9	0.29	7.65	1.35

2019년 10월 8일에 40주씩 25개구와 60주씩 9개 총 34개구를 채취하였다. 채취한 벼는 탈곡하여 곡물수분측정기 (GMK-303S, 지원하이텍)를 이용하여 수분함량을 측정하였다. 정조 수량은 곡실 수분 함량 15%를 기준으로 재식 간격을 반영하여 계산하였다.

항공영상 수집은 본체 무게가 700 g 내외로 소형 경량이며 비행경로 자동 설정 및 자동 착륙 기능이 탑재되어 있어 안전하고 손쉬운 영상 촬영이 가능한 고정익 무인비행체 (eBee, Parrot, France)를 활용하여 수행하였다 (Lee et al., 2015). 무인비행체 기체에 탑재한 카메라는 가시광선 영역의 경우 녹색, 적색, 청색 영역의 카메라 (WX, Sony, Japan)를 사용하였다. 식생지수 산정을 위해서는 녹색, 적색, 근적외 (중심파장 각 Green 525 nm, Red 625 nm, NIR 850 nm) 영역을 촬영할 수 있는 카메라 (S110, Cannon, Japan)를 탑재하여 촬영하였다 (Lee et al., 2016). 연구 수행을 위해 2019년 5월 31일부터 8월 21일까지 총 10회 촬영하여 항공영상을 수집하였다 (Table 3). 촬영된 무인비행체 영상은 영상전처리 프로그램 (Emotion, Parrot, Swiss)을 활용해 비행체의 고도, 방향 등 위치 정보와 결합하였다 (Image Tagging). 이후 영상 합성 및 반사율 산정은 Pix4D mapper (Pix4D, Swiss) 프로그램을 사용하여 정합 (mosaic) 영상과 반사율 영상을 제작하였다 (Lee et al., 2016). 합성된 무인비행체 항공영상은 광량 등 외부 환경 요건에 따른 영상 값이 변동될 수 있으므로 비율 식을 이용하여 기상, 태양고도 및 카메라 특성에 따른 영상 값 변동을 상쇄하면서도 식생의 활력을 반영할 수 있는 식생지수 (Vegetation Index, Table 4)로 변환하여 엽 질소 및 수량 추정에 활용하였다 (Lee et al., 2020). 합성된 무인비행체 항공영상을 이용하여 식생지수 값 추출 및 지도 작성은 Leica사의 Erdas Imagine 및 ESRI사의 Arcgis Arcinfo 프로그램을 이용하였다.

무인비행체 영상 식생지수와 벼 엽 질소함량 및 수량의 상관성을 분석하기 위해 시계열로 촬영된 무인비행체 영상 식생지수 값과 벼 엽 질소 함량 및 정조 수량의 피어슨 상관계수를 구하여 비교하였다. 상관계수가 높게 나타나는 시기의 무인비행체 영상 식생지수를 독립변수로 하여 벼 엽 질소 및 정조 수량을 추정하기 위해 아래 식과 같이 선형 회귀식을 구축하였다 (Eq. 1).

$$Y = aX + b \cdots \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서, Y는 벼 엽 질소 또는 정조 수량이며, X는 무인비행체 영상 식생지수, a와 b는 계산 상수이다. 상관계수 계산 및 선형회귀식 구축은 엑셀 프로그램 (Microsoft Excel 2010, Microsoft Inc.)을 활용하였다.

Table 3. UAV image collecting dates.

Year (Count)	Month/Day
2019 (10)	May 31 , June 14, June 28, July 12, July 22, July 26, August 2, August 9, August 19, August 21

Table 4. Vegetation indices related to crop growth monitoring.

Name	Equation*	Reference
RVI (Ratio vegetation index)	R_n/R_r	Jordan (1969)
NDVI (Normalized difference vegetation index)	$(R_n - R_r)/(R_n + R_r)$	Tucker (1979)
GNDVI (Green normalized difference vegetation index)	$(R_n - R_g)/(R_n + R_g)$	Gitelson et al. (1996)
GRVI (Green ratio vegetation index)	R_n/R_g	Sripada et al. (2006)

* R_n , R_r , and R_g are the reflectance for NIR, red, green, and blue bands, respectively.

Results and Discussion

무인기 영상 식생지수 기반 벼 엽 질소함량 추정 수준별 질소 처리 포장의 무인비행체 영상 식생지수 변화는 Fig. 2와 같다. NDVI와 GNDVI는 벼 생육과 함께 지속적으로 값이 증가하다 이앙 후 60일~70일이 되는 7월 하순에서 8월 초순까지 최고치를 보였으며 이후 출수기인 8월 중순까지 정체 또는 약간 감소하는 경향을 보였다. 질소 처리구별 식생지수 변화는 질소 204 kg/ha 처리구 (Site #5)가 대체로 가장 높은 값을 보였으며 질소 무비구 (Site #1)가 가장 낮은 값을 보였다. 그러나 질소 158 kg/ha 처리구 (Site #3)가 질소 181 kg/ha 처리구 (Site #4)에 비해 높은 값을 보이기도 하여 질소 처리량과 식생지수가 선형적으로 일치하지는 않았다. 이는 포장 별로 토양, 병해충, 영농관리 등 외부환경 요인의 차이로 벼 생육에 차이가 있었기 때문으로 판단된다 (Lee et al., 2020). RVI와 GRVI도 NDVI 및 GNDVI와 유사하게 7월 하순에서 8월 초순 최고치를 보였으며 이후 8월 중순까지 정체 및 감소하는 경향을 보였다. 그러나 NDVI와 GNDVI에 비해 질소처리구별 식생지수 값의 차이가 컸는데 이는 NDVI 및 GNDVI가 식생지수 값이 -1에서 1까지 범위로 정규화된 반면 RVI와 GRVI의 경우 Red 또는 Green 파장대역 반사 값과 근적외 (Near Infra-Red, NIR) 파장대역 반사 값의 비로 계산되어 값의 범위에 제한이 없어서 질소처리구별 식생지수 값의 차이가 NDVI 및 GNDVI에 비해 크게 나타났기 때문으로 판단된다. RVI, GRVI에서도 이앙 후 36일이 경과한 6월 28일부터 질소 158 kg/ha (Site #3) 처리구의 값이 질소 181 kg/ha (Site #4) 처리구에 비해 높았으며 이러한 경향은 8월 중순까

Fig. 2. Temporal changes in vegetation index (NDVI, GNDVI, RVI, GRVI) values of canopy during the growing season under different nitrogen levels.

지 지속되었다. 7월 29일 질소 웃거름 시용에 따라 질소 204 kg/ha (Site #5) 처리구의 경우 값이 증가하였으나 웃거름 양이 상대적으로 적었던 다른 처리구의 경우 값이 정체되거나 감소하는 경향을 보였다.

영양생장기에서 생식생장으로 질적 변환이 일어나는 유수형성기부터 출수기까지 무인비행체 영상 식생지수와 벼 엽 질소함량의 상관계수는 Table 5와 같았다. 벼 유수형성기(7월 12일)와 수잉기(7월 26일)에 촬영한 영상을 바탕으로 산정한 식생지수와 벼 엽 질소 함량의 상관계수는 NDVI, GNDVI, RVI, GRVI 식생지수에서 모두 0.9 이상의 높은 상관성을 보였다. 8월의 경우 출수 직전인 8월 9일 NDVI, GNDVI 식생지수와 벼 엽 질소함량은 0.9 이상의 높은 상관성을 보였으나 출수기인 8월 20일에는 0.9 미만으로 값이 감소하였다. RVI, GRVI 식생지수도 8월에는 벼 엽 질소함량과의 상관계수 값이 0.9 미만으로 7월에 비해 감소하는 경향을 보였다. 이는 벼 유수형성기에 지상광학센서를 활용하여 측정한 식생지수와 벼 군락의 엽 질소함량이 0.9 이상의 높은 상관계수를 보였다는 보고와 일치한다 (Kim and Hong, 2007; Kang et al., 2010). 식생지수와 벼 엽 질소함량과의 상관계수 값이 가장 높았던 7월 26일의 GRVI 식생지수 값을 기반으로 벼 엽 질소함량 추정식을 구축한 결과 결정계수가 0.98로서 벼 엽 질소 함량의 약 98%를 설명할 수 있었다 (Fig. 3). 무인기 영상 GRVI 식생지수 기반으로 유수형성기에 벼 엽 질소함량 분포지도도를 작성한 것은 Fig. 4와 같았다. 질소 무비구의 엽 질소 함량은 다른 처리구에 비해 낮은 경향을 보였다. 질소 무비구를 제외하고 밀거름이 동일하게 처리된 4개 포장의 경우에도 Site #3, Site #5이 Site #2, Site #4에 비해 높은 값을 보여 포장 간 변이를 보였으며, 포장 내에서도 지점에 따라 엽 질소 분포 함량의 공간적인 변이를 확인할 수 있었다. 유수형성기 이후 식물체 질소 상태는 수량, 수용부위 형성, 쌀 단백질 함량, 맛 등 품질을 좌우한다 (Kim et al., 2005; Kim and Hong, 2007). 따라서 무인비행체 영상을 활용하여 작성한 벼 엽 질소분포 추정 지도는 질소영양 상태 진단을 통한 웃거름 처방에 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 5. Correlation coefficient between N content (g/m^2) in rice plant and vegetation indices by UAV images.

Vegetation index	Date of data collection date			
	12-Jul	26-Jul	9-Aug	21-Aug
NDVI	0.976**	0.930**	0.979**	0.87
GNDVI	0.967**	0.949**	0.964**	0.87
RVI	0.908**	0.970**	0.888*	0.82
GRVI	0.910**	0.991**	0.865	0.83

*, ** Significant at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

Fig. 3. Relationship between rice leaf nitrogen contents and vegetation index (GRVI).

Fig. 4. Distribution map of rice leaf nitrogen contents using UAV imagery.

무인기 영상 식생지수 기반 벼 수량 추정 수확기 벼 수량과 벼 수량 조사구를 기준으로 산정한 시기별 무인 비행체 영상 식생지수의 상관관계 조사 결과는 Table 6과 같았다. 상관계수는 7월 중하순 NDVI 0.817, GNDVI 0.942, RVI 0.891, GRVI 0.899의 최고 값을 보이다 이후 8월 중순까지 감소하는 경향을 보였으며, 7월 22일 GNDVI 식생지수와 벼 수량의 상관성이 가장 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 벼 수잉기에 지상광학센서 식생지수와 벼 수량의 상관성을 분석한 결과 0.9 이상의 높은 상관계수 값을 보였다는 Gong et al. (2011)의 연구 결과 및 질소 비료를 동일하게 공급한 벼 포장에서 영상 GNDVI 식생지수와 벼 수량의 상관성은 수잉기에 가장 높았다는 Lee et al. (2019)의 연구 결과와 일치한다. 무인비행체 영상 식생지수와 벼 수량의 상관계수는 2019년 7월 26일이 가장 높았으나 질소 웃거름을 2019년 7월 29일 시용하였기에 비료의 영향이 있을 것으로 판단되어 웃거름 시용 후인 2019년 8월 2일 무인비행체 영상 GNDVI 식생지수를 바탕으로 벼 수량을 추정하였다 (Fig. 5). GNDVI 식생지수에 기반한 벼 수량 추정식의 결정계수는 0.83으로 수확기 벼 수량의 약 83%를 설명할 수 있었다. GNDVI 영상 식생지수 기반의 벼 수량 추정식을 시험포장 전체에 적용하여 벼 수량분포 지도는 Fig. 6과 같았다. 질소수준별 벼 수량 분포는 질소 웃거름 사용량이 69 kg/ha로 가장 많았던 Site #5 포장에서 가장 높았으며, 질소 무비구인 Site #1 포장에서 가장 낮은 것으로 나타났다. 질소 밑거름 사용량은 같았으나 질소 웃거름 사용량이 23 kg/ha 많았던 Site #4 시험 포장에 Site #3 포장에 비해 낮은 값을 보였는데, 이는 수잉기까지 Site #3 포장의 엽 질소함량이 Site #4에 비해 높았던 것과 Site #4 포장의 경우 이삭목도열병 발생으로 생육 이상이 발생했기 때문으로 판단된다. 또한 동일한 포장 내에서도 지점에 따라 수량

Table 6. Correlation coefficient between rice grain yield and vegetation indices by UAV images.

Vegetation index	Date of data collection date						
	12-Jul	22-Jul	26-Jul	2-Aug	9-Aug	19-Aug	21-Aug
NDVI	0.815**	0.817**	0.817**	0.809**	0.807**	0.789**	0.826**
GNDVI	0.934**	0.942**	0.935**	0.912**	0.797**	0.859**	0.854**
RVI	0.891**	0.888**	0.886**	0.853**	0.814**	0.803**	0.848**
GRVI	0.899**	0.898**	0.897**	0.832**	0.787**	0.798**	0.829**

*, ** Significant at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

의 변이가 발생하는 것으로 나타났다. 유사한 영농관리 방법이 적용되는 포장 내에서도 수량 분포 차이를 보이는 것은 토양양분 분포 및 불균일한 비료 살포 등 세부적인 영농관리 방법의 차이에 기인한 것으로 추정되나 정확한 원인 규명을 위해서는 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다 (Lee et al., 2004, 2019). 대규모 들녘에서 정밀농업을 수행하기 위해서는 작물 수량 등 작황 정보의 공간적 변이를 판별하는 것이 필요하다 (Lee et al., 2004). 그러나 기존 작물 수량의 공간변이 추정 연구는 콤바인에 수확량 모니터링 시스템을 부착하여 수행한 것으로 (Chung et al., 1999) 대규모 들녘을 대상으로 필지 내 수량 분포를 추정하기에는 데이터 수집, 처리 및 수량분포 지도 제작까지 시간과 비용의 소요가 크고, 수확 후에 수량 분포를 추정하여 다음해 영농 설계에 정보를 제공함으로써 당해 연도 영농지원에는 제한이 있었다. 본 연구에서는 벼 유수형성기에서 출수기에 30분 내외로 촬영한 10 cm 이하 고해상도 무인비행체 영상을 활용하여 질소 웃거름 시용 전 벼 엽 질소 함량 및 수확기 수량의 공간 분포를 추정하여 웃거름 시용을 위한 벼 질소 영양상태 진단 가능성을 확인하였다. 추후에는 웃거름 질소 사용량 차이에 따른 수량, 질소이용효율 등을 연차간 반복 실험하여 분석함으로써 영상기반 벼 엽 질소함량 진단을 통한 웃거름 사용량 결정 방법을 확립하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 5. Relationship between rice grain yield and vegetation index (GNDVI).

Fig. 6. Distribution map of rice grain yield using UAV imagery.

Conclusions

무인비행체 영상 식생지수를 활용하여 벼 엽 질소 함량 및 수확기 수량 추정 가능성을 평가하기 위하여 질소비료 수준을 다르게 처리한 농가 포장에서 시계열 무인비행체 영상을 촬영하고 벼 엽 질소함량 및 수확 조사구의 벼 수량과 비교하였다. 그 결과 벼 엽 질소 함량은 유수형성기 및 수잉기에 촬영한 무인비행체 영상 식생지수와 상관계수 0.9 이상의 높은 상관성을 보여 무인비행체 영상으로 벼 엽 질소 함량 추정이 가능함을 확인할 수 있었다. 또한, 수확기 벼 수량과 무인비행체 영상 식생지수의 상관계수도 7월 중하순 및 8월 초순까지 식생지수 별로 0.8~0.9 이상의 높은 상관성을 보였다. 이를 통해 질소비료 처리 수준이 다른 포장뿐 아니라 동일한 질소비료를 사용한 포장 내에서도 벼 엽 질소함량 및 수량 분포의 공간 변이 정보를 생산할 수 있었다. 무인비행체 영상을 활용한 벼 엽 질소 함량 및 수량 추정 분포 공간 변이 정보는 추후 비료 및 농약 등 농자재 사용의 효율성을 높이는 한편 안정적인 벼 수량 확보를 위한 영농작업 계획 수립을 지원할 수 있을 것으로 판단된다. 추후에는 벼 엽 질소함량 및 수량의 공간변이 원인 규명과 함께 웃거름 질소 사용량 차이에 따른 수량, 질소이용효율 등을 연차간 반복 실험하여 영상기반 질소 웃거름 사용량 결정 방법을 확립하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ01383701)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Agren, G.I. 1985. Theory for growth of plants derived from the nitrogen productivity concept. *Physiol. Plant.* 64:17-28.
- Chung, S.O., W.K. Park, Y.C. Chang, D.H. Lee, and W.P. Park. 1999. Yield mapping of a small sized paddy field. *J. Biosyst. Eng.* 24(2):135-144 (in Korean).
- Gitelson, A.A., Y.J. Kaufman, and M.N. Merzlyak. 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ.* 58:289-298.
- Gong, H.Y., S.S. Kang, and S.D. Hong. 2011. Estimation of nitrogen uptake and biomass of rice using ground-based remote sensing techniques. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(5):779-787 (in Korean).
- Jordan, C.F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology.* 50:663-666.
- Kang, S.S., H.Y. Gong, H.C. Jung, Y.H. Kim, S.K. Hong, and S.D. Hong. 2010. Evaluation of biomass and nitrogen status in paddy rice using ground-based remote sensors. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43:954-961 (in Korean).
- Kim, M.H., J.C. Shin, and B.W. Lee. 2005. Applicability of vegetation index and SPAD reading to nondestructive diagnosis of rice growth and nitrogen nutrition status. *Korean J. Crop Sci.* 50:369-377 (in Korean).
- Kim, Y.H. and S.Y. Hong. 2007. Estimation of nondestructive rice leaf nitrogen content using ground optical sensors. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40:435-441 (in Korean).
- Lee, C.K., M. Umeda, I.G. Jung, J.H. Sung, S.C. Kim, W.P. Park, and Y.B. Lee. 2004. Spatial variability analysis of paddy rice yield in field. *J. Biosyst. Eng.* 29(3):267-274 (in Korean).
- Lee, K.D., H.Y. An, C.W. Park, K.H. So, S.I. Na, and S.Y. Jang. 2019. Estimation of rice grain yield distribution

- using UAV imagery. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 61(4):1-10 (in Korean).
- Lee, K.D., S.I. Na, S.C. Baek, K.D. Park, J.S. Choi, S.J. Kim, H.J. Kim, H.S. Choi, and S.Y. Hong. 2015. Estimating the amount of nitrogen in hairy vetch on paddy fields using unmanned aerial vehicle imagery. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 48(5):384-390 (in Korean).
- Lee, K.D., S.M. Kim, H.Y. An, C.W. Park, S.Y. Hong, K.H. So, and S.I. Na. 2020. Yearly estimation of rice growth and bacterial leaf blight inoculation effect using UAV imagery. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 62(4):75-86 (in Korean).
- Lee, K.D., Y.E. Lee, C.W. Park, S.Y. Hong, and S.I. Na. 2016. Study on reflectance and NDVI of aerial images using a fixed-wing UAV "Ebee". *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49(6):731-742 (in Korean).
- Li, S.Y., X.Z. Ding, Q.L. Kuang, S.T. Ata-Ul-Karim, T. Cheng, X.J. Liu, Y.C. Tian, Y. Zhu, W.X. Cao, and Q. Cao. 2018. Potential of UAV-based active sensing for monitoring rice leaf nitrogen status. *Front. Plant Sci.* 9:1834.
- National Institute of Agricultural Sciences. 2010. Methods of soil chemical analysis. Rural Development Administration. Suwon, Korea.
- Norman, R.J., D. Guindo, B.R. Wells, and C.E. Wilson. 1992. Seasonal accumulation and partitioning of N₁₅ in rice. *Soil Soc. Am. J.* 56:1251-1527.
- Sripada, R.P., R.W. Heiniger, J.G. White, and A.D. Meijer. 2006. Aerial color infrared photography for determining early in-season nitrogen requirements in corn. *Agron. J.* 98:968-977.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8:127-150.
- Zheng, H., T. Cheng, D. Li, X. Yao, Y. Tian, W. Cao, and Y. Zhu. 2018. Combining unmanned aerial vehicle (UAV)-based multispectral imagery and ground-based hyperspectral data for plant nitrogen concentration estimation in rice. *Front. Plant Sci.* 9:936.