



무인비행체 영상 기반 연차 간 벼 생육 및 흰잎마름병 병해 추정

Yearly Estimation of Rice Growth and Bacterial Leaf Blight Inoculation Effect Using UAV Imagery

이경도^a · 김상민^b · 안호용^c · 박찬원^d · 홍석영^e · 소규호^f · 나상일^{g,†}

Lee KyungDo · Kim SangMin · An HoYong · Park ChanWon · Hong SukYoung · So KyuHo · Na SangIl

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop a technology for estimating rice growth and damage effect according to bacterial leaf blight using UAV multi-spectral imagery. For this purpose, we analyzed the change of aerial images, rice growth factors (plant height, dry weight, LAI) and disease effects according to disease occurrence by using UAV images for 3 rice varieties (Milyang23, Sindongjin-byeo, Saenuri-byeo) from 2017 to 2018. The correlation between vegetation index and rice growth factor during vegetative growth period showed a high value of 0.9 or higher each year. As a result of applying the growth estimation model built in 2017 to 2018, the plant height of Milyang23 showed good error withing 10%. However, it is considered that studies to improve the accuracy of other items are needed. Fixed wing unmanned aerial photographs were also possible to estimate the damage area after 2 to 4 weeks from inoculation. Although sensing data in the multi-spectral (Blue, Green, Red, NIR) band have limitations in early diagnosis of rice disease, for rice varieties such as Milyang23 and Sindongjin-byeo, it was possible to construct the equation of infected leaf area ratio and rice yield estimation using UAV imagery in early and mid-September with high correlation coefficient of 0.8 to 0.9. The results of this study are expected to be useful for farming and policy support related to estimating rice growth, rice plant disease and yield change based on UAV images.

Keywords: UAV; rice; bacterial leaf blight; vegetation index; remote sensing

1. 서론

2018년 현재 우리나라 농가 인구수는 약 2,315천 명으로 2010년 대비 약 25% 감소했으며, 65세 이상 고령 인구도 약 45%로 높은 비율을 차지하고 있다 (KOSIS, 2018). 가중되고 있는 농촌 인구 감소 및 고령화에 대응하여 안정적인 농업 생산체계를 유지하기 위해서는 농업기술의 패러다임 전환이

필요하다 (Ku et al., 2015). 최근 농업분야에서 농/축산물 생산 및 유통 단계의 효율성, 안전성 및 편리성을 향상시키기 위해 정보통신 기술 (Information Communication Technology: ICT) 을 접목하는 노력이 증가하고 있다 (Kim, 2016). 무인비행체는 100~300 ha 규모 농경지에 대해 10 cm 내외의 고해상도 항공 영상을 원하는 시기에 신속하게 제공할 수 있어 들녘 단위 작황 정보 생산 수단으로서 관련 연구가 증가하고 있다 (Lee et al., 2019). Xiang and Tian (2011)은 무인비행체 영상을 기반으로 작물 초장을 추정하였으며, Torres-Sanchez et al. (2014)은 무인비행체 영상을 활용하여 시계열 밀 피복지도를 작성하였다. Bendig et al. (2014)은 무인비행체에 RGB (Red-Green-Blue) 카메라를 부착하여 영상을 수집하고 작물표고모형(CSM: Crop Surface Model)을 구축하여 보리의 바이오매스를 추정한 바 있다. Qin and Zhang (2005)은 유인 비행기에 다중분광 카메라를 장착하여 벼 잎집무늬마름병 피해 관측 가능성을 보고하였다. Das et al. (2015)은 지상 초분광센서와 벼 흰잎마름병 병해 발생 모니터링을 위한 최적 파장대역을 선정하고 위성영상을 활용하여 피해지역을 추정한 바 있다. 국내의 경우 Lee et al. (2015)는 무인비행체 영상을 기반으로 식생의 활력도를 나타내는 식생지수 (Vegetation Index)를 산정하여 친환경농업단지 필지별로 헤어리베치 질소량을 추정하여 밑거름 사용량 추천에 기초자료로 제공하였다. Na et al.

^a Researcher, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration

^b Researcher, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration

^c Researcher, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration

^d Researcher, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration

^e Researcher, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration

^f Researcher, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration

^g Researcher, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration

[†] Corresponding author

Tel.: +82-63-238-2513, Fax: +82-63-238-3823

E-mail: sangil917@korea.kr

Received: May 12, 2020

Revised: July 21, 2020

Accepted: July 21, 2020

(2016a, b)는 무인비행체 영상을 활용하여 채소, 맥류 등의 작황을 추정하였다. Park and Park (2017)는 무인비행체 영상 기반 논 가뭄 발생 지역을 분석 한 바 있다. Lee et al. (2017, 2019)는 무인비행체 영상을 활용하여 벼 생육을 추정하고, 수량 공간분포 지도를 제작하여 제시하였다. 그러나 기존 무인비행체 영상을 활용한 작황 모니터링 연구는 한 작기 동안의 영상 정보기반 생물리인자 추정 가능성을 검토한 것이 대부분이다. 따라서 연차 간 기상 환경 및 재배관리 등에 따라 변화하는 작황 추정의 재현성 및 지상조사 자료에 의존하지 않고 영상 정보만을 활용한 추정 가능성 검토에 대한 연구는 미흡하다. 또한, 무인비행체 영상을 활용한 벼 병해 평가 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 동일 시험포장 및 벼 품종을 대상으로 2년간 무인비행체 영상을 촬영하고 벼 생육, 병해를 조사하여 연차 간 생육 및 병해 평가 가능성을 분석함으로써 디지털 데이터를 활용한 작황정보 생산의 기초 자료로 제공하고자 수행하였다.

II. 연구방법

1. 연구 지역 및 조사 방법

무인비행체 영상 기반 연차 간 벼 생육 및 병해 평가 연구는 전북 완주군 이서면에 위치한 국립식량과학원 벼 시험포장 (35°50'2"N, 127°2'37"E)에서 수행하였다. 시험 품종은 농경지 재배면적 및 벼 흰잎마름병 저항성 정도를 고려하여 벼 흰잎마름병에 강하나 최근 주로 발생하는 K3a 균계에 감수성을 갖는 신동진벼, 새누리벼와 벼 흰잎마름병에 약한 밀양 23호 (M23)를 선정하였다. 시험구는 품종을 기준으로 1개구의 크기가 2017년은 16 m × 15 m, 2018년은 12 m × 15 m인 총 12개구를 조성하였다 (Fig. 1). 벼는 2017년의 경우 5월 29일 재식거리 30 cm × 15 cm, 2018년의 경우 처리구 크기 조정에 따라 5월 25일 30 cm × 14 cm로 기계 이앙하였다.

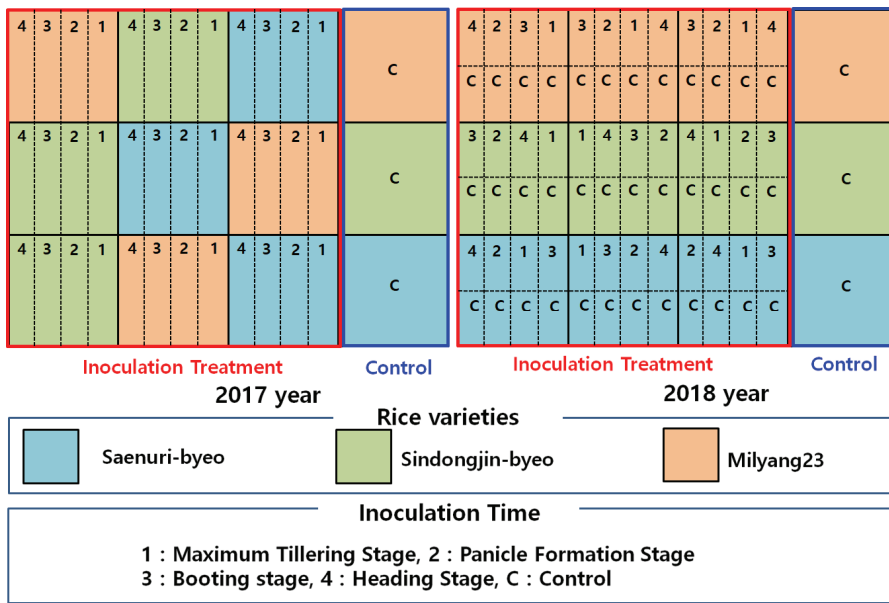
벼 생육조사는 병 처리하지 않은 대조구 (Control)에서 이앙 후 약 2주 간격으로 무인비행체 영상 촬영 일정을 고려하여 품종 당 3주를 채취하여 초장, 건물중, 엽면적지수 (LAI: Leaf Area Index)를 측정하였다. 초장은 벼 생장량 지표로서 채취 후 실험실에서 뿌리 위부터 가장 긴 잎 끝까지의 길이를 측정하여 산정하였다. 엽면적지수는 벼 잎이 주어진 면적을 몇 번 덮을 수 있는지 나타내는 값으로 LI-3000 (LI-COR, USA)을 이용하여 엽면적을 측정하고 재식밀도로 나누어 값을 산정하였다. 벼 건물중은 70°C 드라이 오븐에서 24시간 건조하여 측정하였다.

병 처리는 가위로 벼 잎을 자른 후 약 10^6 CFU 농도 벼 흰잎마름병 배양액을 자른면에 묻히는 절엽 접종으로 하였다. 접종 시기별 병해 발생 양상을 분석하기 위하여 1개 시험구를 4등분하고 최고분얼기 (2017년 7월 5일, 2018년 7월 6일), 유수형성기 (2017년 7월 14일, 2018년 7월 13일), 수잉기 (2017년 7월 27일, 2018년 7월 27일), 출수기 (2017년 8월 10일, 2018년 8월 10일) 4차에 걸쳐 절엽 접종을 진행하였다. 2018년에는 시험구 절반만 절엽 접종 후 남은 절반은 대조구로 남겨 두고 병 전이 여부를 조사하였다. 2017년에 비해 초기 병 발생이 적었던 2018년에는 병 진전을 촉진하고자 출수기 이후 (9월 1주) 고압살수 처리하여 병 진전을 유도하였다. 병 발생정도를 평가하기 위해 병반 면적률은 수확 전 (2017년 9월 26일, 2018년 10월 10일) 각 처리구별로 20주씩 상위 3엽에 대해서 조사하였다. 병 발생에 따른 수량 영향을 평가하기 위해 처리구별로 100주씩 수확하여 탈곡 건조 후 대조구 수량 값으로 나누어 수량지수를 산정하였다.

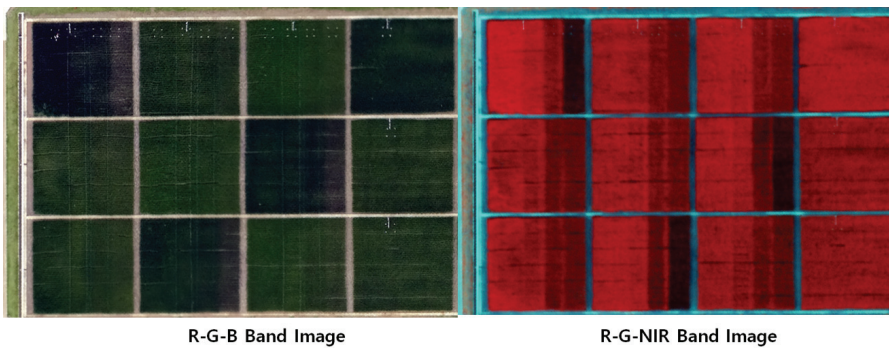
기상 자료는 시험포장에서 직선거리로 약 6.5 km 떨어진 전주기상지청의 측정 자료를 수집하여 활용하였다. 온도의 경우 벼 영양생장기간인 6월부터 8월까지 2017년이 2018년에 비해 다소 낮은 경향을 보였다. 습도 및 강우량의 경우 2017년 7월 중순부터 8월 하순까지 습도가 높고, 강우량이 많은 것으로 나타났다 (Fig. 2).

2. 무인비행체 영상 수집 및 처리

연구에 사용한 고정익 무인비행체 (eBee, Parrot, France)는 기계 무게가 700 g 내외로 소형 경량이며 비행경로 자동 설정 및 자동 착륙 기능이 탑재되어 있어 안전하고 손쉬운 영상 촬영이 가능하다 (Lee et al., 2015). 2017년부터 2018년까지 2년 동안 병 접종, 생육조사 일정 및 주요 생육시기를 고려하여 Table 1과 같이 오전 10시에서 11시 사이에 항공영상을 촬영하였다. 파장대역별 병 발생 차이 분석 및 식생지수 산출을 위해 고정익 무인비행체 (Ebee, Sensefly, Swiss)에 청색, 녹색, 적색밴드 카메라 (WX, Sony)와 녹색, 적색, 근적외 (중심파장 각 Green 525 nm, Red 625 nm, NIR 850 nm) 밴드 카메라 (S110, Cannon)를 번갈아 탑재하여 횡중복도 60%, 종중복도 75%로 설정하여 항공영상을 획득하였다. 날장으로 촬영된 고정익 무인비행체 항공 영상은 영상전처리 프로그램 (Emotion, Sensefly, Swiss)을 통해 촬영 당시 비행체의 고도, 방향 등 위치 정보와 결합한 후 영상 합성 프로그램 (Pix4Dmapper, Pix4D, Swiss)을 통해 한 판의 합성영상과 반사율 영상으로 제작하였다. 합성된 무인비행체 항공영상에서 식생지수 값 추출은 Leica사의 Erdas Imagine 및 ESRI사의 Arcgis Arcinfo 프로그램을 이용하였다.



(a) Study site layout



(b) Aerial photo (August 1, 2017)

Fig. 1 Study site layout and aerial photo

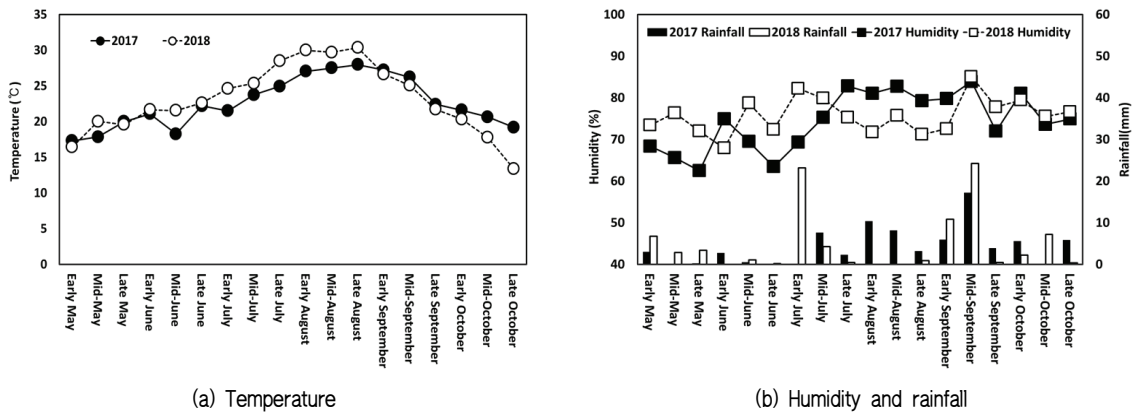


Fig. 2 Change of temperature, humidity, and rainfall during research period

Table 1 UAV image collecting dates

Year (Count)	Month/Day
2017 (15)	June 2, June 12, June 20, June 29, July 11, July 17, August 7, August 14, August 22, August 25, August 28, September 4, September 18, September 25, October 10
2018 (15)	June 11, June 20, June 25, July 10, July 23, August 6, August 10, August 17, August 29, September 3, September 10, September 17, September 27, October 2, October 11

Table 2 Vegetation indices related to crop growth monitoring

Name	Equation*	Reference
RVI (Ratio vegetation index)	Rn/Rr	Jordan (1969) and Pearson and Miller (1972)
NDVI (Normalized difference vegetation index)	$(Rn-Rr)/(Rn+Rr)$	Rouse et al. (1974) and Tucker (1979)
GNDVI (Green normalized difference vegetation index)	$(Rn-Rg)/(Rn+Rg)$	Gitelson et al. (1996)
GRVI (Green Ratio vegetation index)	Rn/Rg	Sripada et al. (2006)

* Rn, Rr, Rg, and Rb are the reflectance for NIR, red, green, and blue bands, respectively.

농경지와 작물의 상황을 정성적으로 분석하거나 한 시기의 영상만을 이용할 경우 촬영된 항공 영상 그대로를 이용할 수 있다. 그러나 시계열적 작물 변화 상황을 정량적으로 분석하기 위해서는 촬영 시점의 기상, 태양 고도, 카메라 특성 등 다양한 촬영 환경에 따라 촬영된 영상 데이터 값 (DN: Digital Number)이 변화 될 수 있다. 따라서 이러한 영향을 최소화하기 위해서 비울 식을 이용하여 광량 등 외부 환경 요건에 따른 영상 값 변동을 상쇄하면서도 식생의 특성을 반영할 수 있는 식생지수 (Vegetation Index)를 선정하여 활용할 필요가 있다 (Cohen, 1991; Lee et al., 2016). 본 연구에서는 Table 2와 같이 무인비행체 영상을 활용한 병 발생 추정 가능성을 평가하기 위해 병 접종 벼 잎에 대한 분광반사율 측정 값 중에서 최근 농작물 작황평가에 많이 활용되고 있는 무인비행체 탑재 카메라의 중심 파장에 해당하는 값을 활용하여 산정 가능하고, 기존 위성 및 유인 비행체를 활용한 병해 탐지 연구 (Das et al., 2015; Qin and Zhan, 2005)에 사용된 식생지수를 선정하여 벼 생육 및 병해 평가에 활용하였다.

벼 생장 단계는 출수기를 기준으로 영양 생장기와 생식 생장기로 나눌 수 있다. 생육 전반기에 해당하는 영양 생장기 벼 작황 평가는 초장, 건물중, 엽면적지수 등 생육인자의 건전성으로 평가할 수 있으며 후반기인 생식 생장기의 경우 병해 및 고온 등 기상이변 발생 유무가 큰 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 무인비행체 영상 식생지수와 벼 생육인자의 상관성 분석은 식생지수가 최고점으로 올라가는 영양생장기 (이앙기부터 수잉기)까지의 자료를 이용하였다. 벼 병해 평가를 위한 상관성 분석은 병 접종시기인 우수형성기부터 병 발현이 구분되는 등숙기까지의 자료를 이용하였다.

무인비행체 영상 식생지수를 활용해 벼 생육을 추정하기

위해서는 식생지수를 독립변수로, 생육인자를 종속변수로 하여 회귀식을 구축하여야 한다. 본 연구에서는 원격탐사 기술을 활용해 작물 생육모니터링을 수행한 기존 연구 (Lee et al., 2017)에서 사용된 선형, 지수, 다항, 거듭제곱 이상 4종의 회귀 모형을 대상으로 벼 생육인자와 상관성이 높은 회귀 모형을 선정하였다. 단년도에 구축한 영상 식생지수 기반 생육인자 추정 모형의 차년도 적용 가능성을 검토하기 위해 2017년 구축한 모형을 기반으로 2018년 생육을 추정하고 실측값과 추정값의 RMSE (Root Mean Square Error) 및 RRSEM (Relative Root Mean Square Error)를 구하여 비교하였다.

무인비행체 영상을 활용한 병 병해 평가를 위해 병 발생지점의 식생지수와 정상 생육 지점의 식생지수를 비교하여 병 발생에 따른 식생지수 차이의 통계적 유의성은 T-test를 통해 분석하였다. 또한 병 발생 지점의 식생지수와 병반 면적률 및 수량 조사 결과를 비교하여 피어슨 상관계수 (Correlation Coefficient)를 산정하고 무인비행체 영상 기반 병해 조사 가능성을 평가하였다.

III. 결 과

1. 무인비행체 영상을 활용한 연차 간 벼 생육 추정

병 접종을 하지 않은 대조구를 대상으로 벼 영양생장기 초장, 건물중, 엽면적지수 및 무인비행체 영상 식생지수 (NDVI) 변화 조사 결과는 Fig. 3과 같다. 초장, 건물중, 엽면적지수는 영양생장기 동안 지속적으로 증가하였으며, 2017년이 2018년에 비해 높은 값을 보였다. 기온은 2018년이 2017년에 비해 높았으나 초기 생육은 2018년이 2017년에 비해 다소 부진한

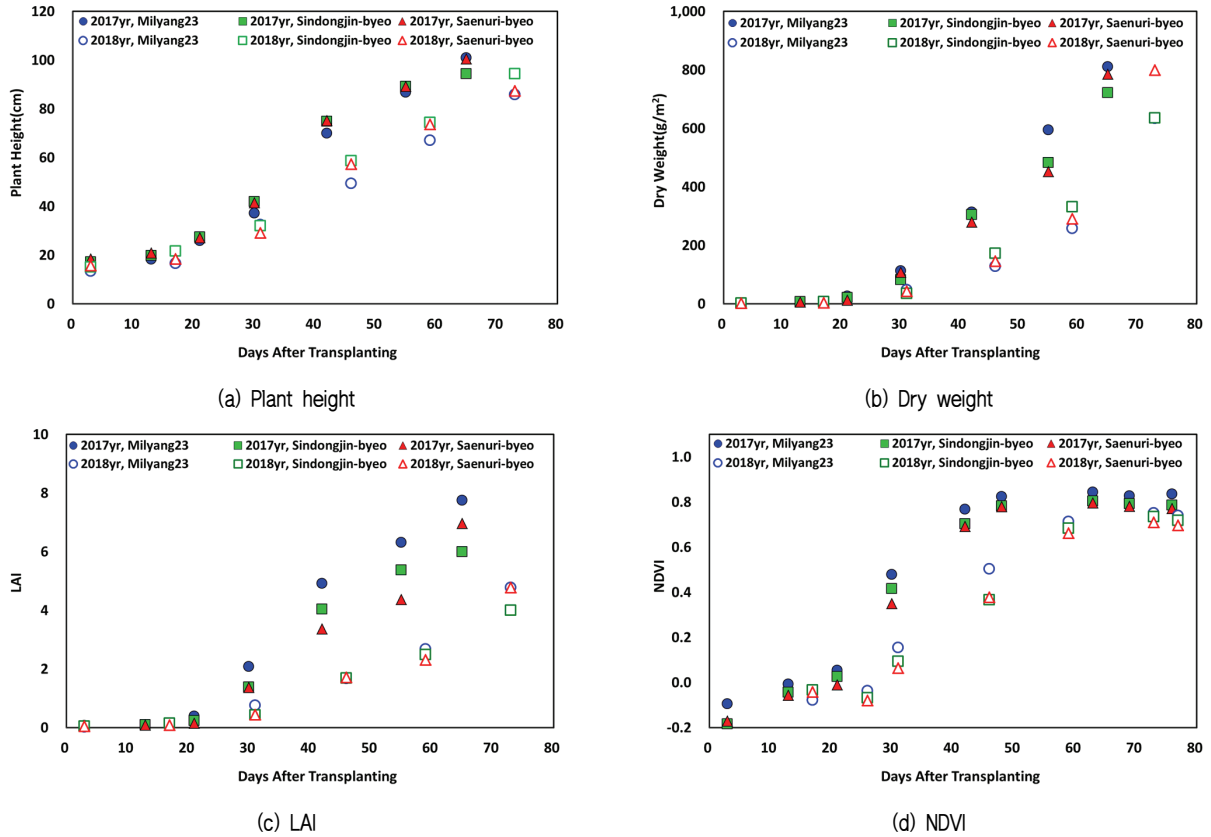


Fig. 3 Temporal variations of plant height, dry weight, LAI and vegetation index (NDVI) from 2017 to 2018

Table 3 Estimation model of rice growth from 2017 to 2018 (x: Vegetation Index, y: Growth Factor)

Growth factor	Rice varieties	Year	Vegetation index			
			NDVI	GNDVI	RVI	GRVI
Plant height	Milyang23	2017	$y=19.66e^{1.88x}$, $R^2=0.95$	$y=18.5e^{2.09x}$, $R^2=0.96$	$y=8.45x+11.89$, $R^2=0.96$	$y=11.03x+9.02$, $R^2=0.96$
		2018	$y=20.96e^{1.76x}$, $R^2=0.97$	$y=20.63e^{2.01x}$, $R^2=0.99$	$y=9.76x+14.64$, $R^2=0.96$	$y=9.76x+14.64$, $R^2=0.96$
	Sindongjin-byeo	2017	$y=23.08e^{1.81x}$, $R^2=0.97$	$y=22.24e^{2.06x}$, $R^2=0.97$	$y=10.58x+13.42$, $R^2=0.93$	$y=15.48x+7.79$, $R^2=0.93$
		2018	$y=25.84e^{1.74x}$, $R^2=0.95$	$y=25.05e^{2.08x}$, $R^2=0.96$	$y=11.27x+19.86$, $R^2=0.91$	$y=11.27x+19.86$, $R^2=0.91$
	Saenuri-byeo	2017	$y=24.61e^{1.76x}$, $R^2=0.98$	$y=23.73e^{2.03x}$, $R^2=0.98$	$y=10.77x+14.66$, $R^2=0.97$	$y=16.52x+7.87$, $R^2=0.97$
		2018	$y=23.37e^{1.89x}$, $R^2=0.95$	$y=22.63e^{2.23x}$, $R^2=0.97$	$y=12.30x+16.03$, $R^2=0.92$	$y=18.74x+8.04$, $R^2=0.94$
Dry weight	Milyang23	2017	$y=7.75e^{5.52x}$, $R^2=0.95$	$y=6.65e^{6.06x}$, $R^2=0.94$	$y=8.38x^{1.95}$, $R^2=0.94$	$y=7.61x^{2.22}$, $R^2=0.93$
		2018	$y=10.35e^{5.13x}$, $R^2=0.93$	$y=9.76e^{5.83x}$, $R^2=0.96$	$y=11.42x^{2.0}$, $R^2=0.90$	$y=10.63x^{2.41}$, $R^2=0.94$
	Sindongjin-byeo	2017	$y=9.11e^{5.59x}$, $R^2=0.97$	$y=8.13e^{6.35x}$, $R^2=0.97$	$y=9.07x^{2.13}$, $R^2=0.96$	$y=8.31x^{2.57}$, $R^2=0.96$
		2018	$y=14.97e^{5.11x}$, $R^2=0.93$	$y=13.48e^{6.14x}$, $R^2=0.95$	$y=16.98x^{1.98}$, $R^2=0.89$	$y=14.94x^{2.57}$, $R^2=0.92$
	Saenuri-byeo	2017	$y=8.98e^{5.80x}$, $R^2=0.97$	$y=7.96e^{6.66x}$, $R^2=0.97$	$y=8.91x^{2.22}$, $R^2=0.95$	$y=8.07x^{2.73}$, $R^2=0.95$
		2018	$y=11.97e^{5.66x}$, $R^2=0.88$	$y=10.41e^{6.83x}$, $R^2=0.92$	$y=13.17x^{2.27}$, $R^2=0.85$	$y=11.36x^{2.91}$, $R^2=0.90$
LAI	Milyang23	2017	$y=0.15e^{4.71x}$, $R^2=0.96$	$y=0.13e^{5.15x}$, $R^2=0.93$	$y=0.64x-0.27$, $R^2=0.98$	$y=0.83x-0.48$, $R^2=0.97$
		2018	$y=0.24e^{3.81x}$, $R^2=0.93$	$y=0.23e^{4.32x}$, $R^2=0.96$	$y=0.64x-0.32$, $R^2=0.92$	$y=0.91x-0.68$, $R^2=0.96$
	Sindongjin-byeo	2017	$y=0.14e^{4.86x}$, $R^2=0.99$	$y=0.13e^{5.51x}$, $R^2=0.98$	$y=0.75x-0.49$, $R^2=0.99$	$y=1.10x-0.90$, $R^2=0.99$
		2018	$y=0.25e^{3.81x}$, $R^2=0.93$	$y=0.23e^{4.55x}$, $R^2=0.94$	$y=0.60x-0.18$, $R^2=0.93$	$y=0.97x-0.66$, $R^2=0.95$
	Saenuri-byeo	2017	$y=0.13e^{5.13x}$, $R^2=0.98$	$y=0.12e^{5.90x}$, $R^2=0.98$	$y=0.92x-0.74$, $R^2=0.96$	$y=1.41x-1.29$, $R^2=0.95$
		2018	$y=0.20e^{4.36x}$, $R^2=0.89$	$y=0.18e^{5.23x}$, $R^2=0.92$	$y=0.77x-0.45$, $R^2=0.88$	$y=1.18x-0.98$, $R^2=0.91$

경향을 보였다. 무인비행체 영상 식생지수는 이앙 후 지속적으로 증가하다 이앙 후 60일이 되는 7월말 경부터 8월 초까지 완만한 증가 경향을 보였다. 2017년에 비해 2018년은 낮아진 값을 보여 연차 간 벼 생육 변화를 추세적으로 반영하는 것으로 나타났다. 따라서 벼 생육 변이를 야기한 요인은 특정할 수 없으나 동일 포장에서 같은 품종을 재배 시 무인비행체 영상 모니터링을 통해 연차 간 생육 변화 추세를 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

무인비행체 영상 식생지수 기반 벼 생육의 정량적 추정을 위해 식생지수별로 결정계수가 높은 생육 추정 모형을 구축한 결과는 Table 3과 같다. 밀양23호 품종의 경우 수잉기까지 초장과 NDVI, GNDVI 식생지수는 지수적인 관계를 보였으며 결정계수 0.95 이상을 보여 식생지수로 벼 초장 변화를 95% 이상 설명할 수 있는 것으로 나타났다. RVI, GRVI 식생지수는 벼 초장과 선형적인 관계를 보였으며 결정계수는 0.91에서 0.97의 범위로 나타났다. 이처럼 밀양23호 초장 추정을 위한 식생지수 회귀식은 식생지수 별로 형태는 달랐으나 연차별 회귀식의 기울기 및 인자 값이 유사한 경향을 보였다. 밀양23호 품종의 건물중은 4가지 식생지수 모두 지수 또는 멱함수 등의 곡선적 관계를 보였다. 회귀식의 결정계수는 0.90에서 0.95로 초장에 비해 약간 낮았다. 밀양23호 품종의 엽면적지수의 경우 초장과 유사한 경향을 보였는데, NDVI와 GNDVI는 엽면적지수와 지수적인 관계를 보였으며, RVI와 GRVI는 선형적인 관계를 보였다. 식생지수로 구축한 엽면적지수 추정 회귀식의 결정계수는 0.92에서 0.98로 92% 이상의 설명력을 보였다.

식생지수와 벼 생육인자의 관계는 밀양23호 뿐 아니라 신동진벼 및 새누리벼에서도 유사한 결과를 보였다. 무인비행체 영상의 식생지수로 벼 출수기 전까지 구축한 생육인자 추정 회귀식의 결정계수가 0.88 이상의 높은 값을 보였다. 또한 건물중을 제외하고 벼 초장 및 엽면적지수의 경우 연차 간 생육인자 추정 회귀식이 대체로 유사한 경향을 보였다. 이는 무인비행체 영상으로 2016년 4개 품종에 대해서 벼 생육을 추정한 Lee et al. (2017) 연구와도 일치하는 결과이다. 따라서 품종 및 연차에 관계없이 무인비행체 영상과 현장 표본 조사로 생육인자 추정 회귀식을 구축할 경우 약 90% 신뢰수준에서 벼 생육을 해석할 수 있었다.

2017년 구축한 생육추정 모형을 기반으로 2018년 생육인자를 추정한 결과는 Fig. 4와 같았다. 초장의 경우 밀양23호는 NDVI와 GNDVI 기반 식에서 RRMSE 8.6~10.1%의 값을 보여 2017년 식을 2018년에 적용해도 10% 이내의 오차를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 신동진벼, 새누리벼의 경우 RRMSE가 19.4%~29.0%값을 보여 밀양23호에 비해 오차를

이 증가하여 품종 간 차이를 보였다. 이처럼 품종 간 추정결과 차이는 엽록소 함량에 따른 엽색 등 품종 특성에 기인한 것으로 추정되며 향후 영상기반 벼 생육추정을 위해 고려해야 할 것으로 판단된다. RVI, GRVI 식생지수 기반 생육 추정식의 경우 추정값과 실측값의 선형적인 경향성은 보이나 NDVI, GNDVI 기반 식에 비해 정량적인 오차 값은 더 증가하는 것으로 나타났다. 건물중의 경우 품종별로 차이는 있으나 대략 40~90%의 RRMSE 값을 보여 2017년 추정식으로 2018년 건물중을 추정하는 것에는 한계가 있는 것으로 판단된다. 엽면적지수의 경우 RRMSE가 20~80% 값을 보여 건물중 보다는 양호한 결과를 보였으나 초장에 비해서는 정확도가 낮은 것으로 나타났다.

2. 무인비행체 영상 기반 벼 병해 추정

벼 흰잎마름병 처리 및 대조구의 2017년과 2018년 병 접종 시기별 무인비행체 영상 NDVI 식생지수 변화 및 대조구와 처리구의 식생지수 차이에 대한 t-테스트 p-value는 각각 Fig. 5, Table 4와 같다. 밀양23호의 경우 최고분얼기인 2017년 7월 5일 병 접종 후 6일이 경과한 7월 11일부터 5% 수준에서 유의한 차이를 보이다 31일이 경과한 8월 7일부터 9월 중순까지 1% 유의수준에서 차이를 보였다. 유수형성기 및 수잉기 병 접종은 각각 24일, 10일 경과한 시점부터 5% 이하 유의수준에서 차이를 보였는데 8월말부터는 대조구와 처리구의 차이가 줄어드는 것으로 나타났다. 출수기 경우 접종 후 15일이 경과한 8월 25일부터 대조구와 병 처리구의 식생지수에 5% 이하 유의수준의 차이가 관측되었으며 이후 9월초부터는 유의수준이 1% 이하로 낮아졌다. 2018년의 경우 최고분얼기 접종구의 식생지수는 병 접종 후 5일 이후부터 5% 수준의 차이를 보였으며 접종 후 31일이 경과한 8월 6일부터 1% 유의수준 차이를 보이다 이후 9월 들어 다시 5% 유의수준의 차이를 보였다. 유수형성기 접종은 경우 2017년과 유사하게 접종 후 24일이 경과한 8월 6일부터 5% 수준의 유의한 차이를 보였으나 9월 이후 차이가 줄어들었다. 수잉기 접종은 경우 병 접종 후 14일이 경과한 8월 10일부터 등숙기까지 1~5% 수준의 유의한 차이를 보였다. 출수기 접종은 경우 8월 10일 절엽에 의한 식생지수 차이를 제외하면 병 접종 후 19일이 경과한 8월 29일부터 등숙기까지 지속적으로 1% 유의수준에서 차이를 보였다. 밀양23호의 경우 대체적으로 최고분얼기 및 출수기 접종에서 대조구와 뚜렷한 식생지수 값 차이를 보였는데 이는 7월 중하순 유수형성기와 수잉기 접종 시에는 새로운 잎이 성장하여 병징이 뚜렷하지 못한 반면 최고분얼기 접종은 경우 초기 분얼이 고사하여 전체적인 생육이 저

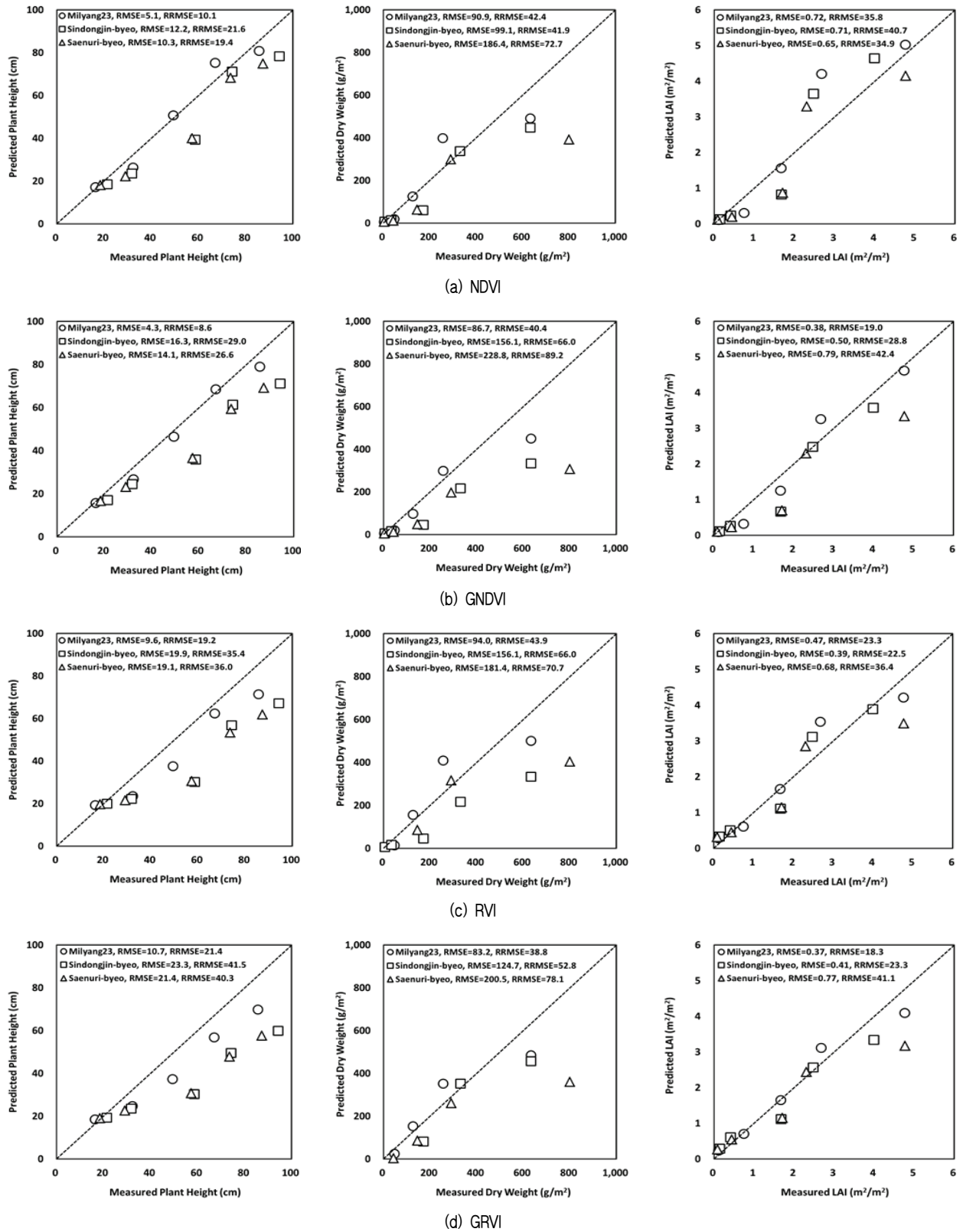


Fig. 4 Relationship between measured and estimated rice growth factors by vegetation index

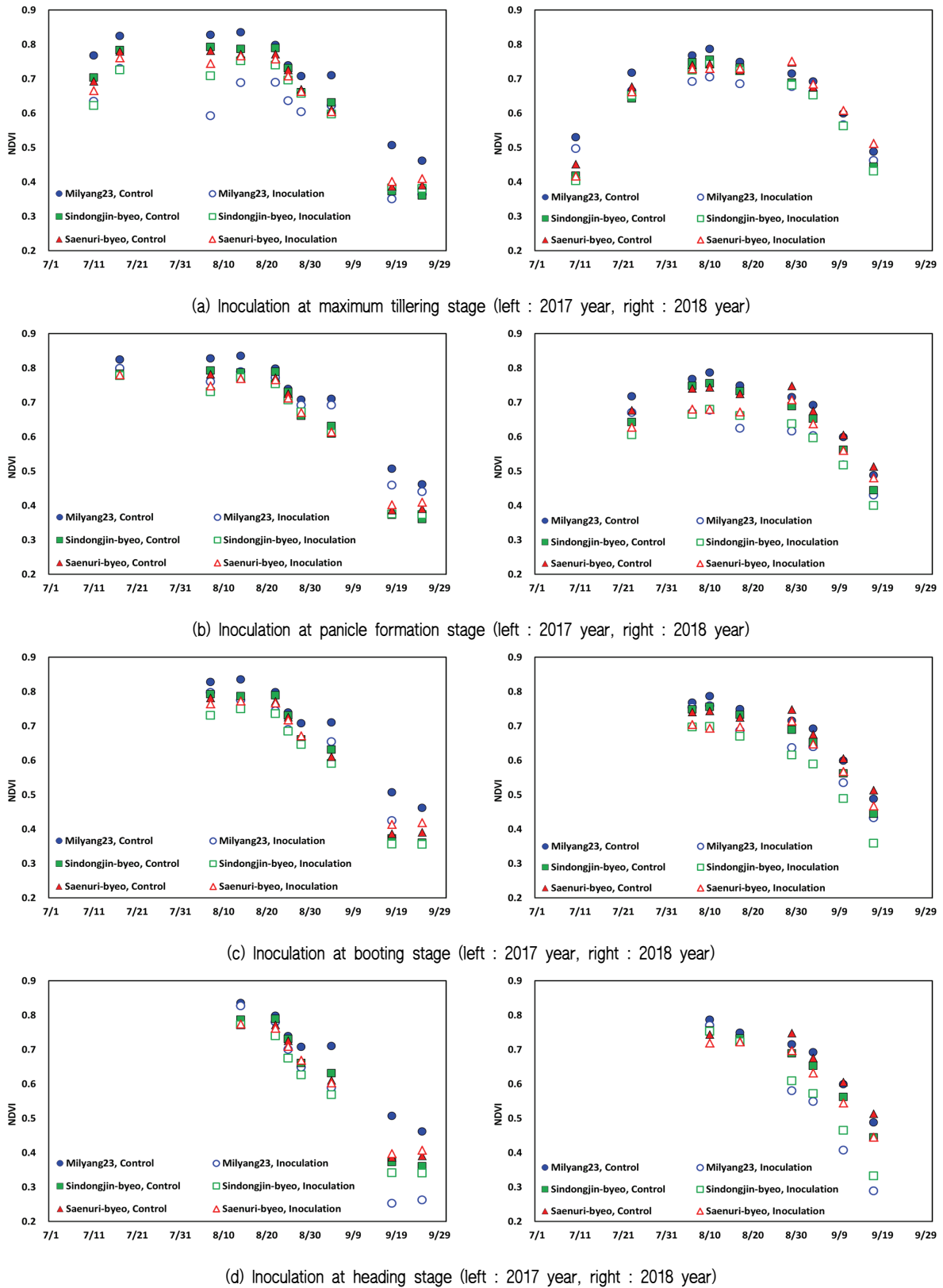


Fig. 5 Temporal variations of vegetation index (NDVI) by bacterial leaf blight inoculation

Table 4 p-value of NDVI t-test between control and bacterial leaf blight inoculation treatment (■ : 5% significant level, □ : 1% significant level)

Year	Rice varieties	Growth stage	p-value								
			7/11	7/17	8/7	8/14	8/22	8/25	8/28	9/4	9/18
2017	Milyang23	Maxium tillering	0.030	0.012	0.008	0.0031	0.001	0.001	0.002	0.004	0.003
		Panicle formation		0.144	0.005	0.052	0.023	0.023	0.158	0.061	0.042
		Booting			0.006	0.009	0.002	0.008	0.023	0.020	0.051
		Heading				0.349	0.140	0.027	0.027	0.007	0.001
	Sindongjin-byeo	Maxium tillering	0.044	0.070	0.005	0.041	0.019	0.014	0.266	0.033	0.047
		Panicle formation		0.381	0.005	0.040	0.022	0.013	0.018	0.0764	0.427
		Booting			0.011	0.019	0.015	0.003	0.063	0.017	0.044
		Heading				0.016	0.022	0.016	0.062	0.024	0.008
	Saenuri-byeo	Maxium tillering	0.206	0.261	0.044	0.420	0.116	0.054	0.137	0.390	0.254
		Panicle formation		0.496	0.071	0.469	0.353	0.094	0.475	0.429	0.187
		Booting			0.191	0.475	0.345	0.099	0.396	0.441	0.072
		Heading				0.462	0.317	0.149	0.484	0.395	0.309
Year	Rice varieties	Growth stage	p-value								
			7/10	7/23	8/6	8/10	8/17	8/29	9/3	9/10	9/17
2018	Milyang23	Maxium tillering	0.032	0.012	0.007	0.006	0.003	0.009	0.013	0.018	0.038
		Panicle formation		0.148	0.019	0.017	0.038	0.043	0.070	0.084	0.126
		Booting			0.100	0.037	0.001	0.011	0.008	0.015	0.031
		Heading				0.042	0.063	0.006	0.005	0.008	0.007
	Sindongjin-byeo	Maxium tillering	0.247	0.334	0.011	0.070	0.060	0.175	0.470	0.466	0.234
		Panicle formation		0.093	0.028	0.031	0.094	0.129	0.136	0.140	0.022
		Booting			0.006	0.002	0.002	0.002	0.003	0.008	0.010
		Heading				0.458	0.191	0.001	0.004	0.011	0.019
	Saenuri-byeo	Maxium tillering	0.198	0.250	0.194	0.135	0.290	0.325	0.040	0.387	0.438
		Panicle formation		0.124	0.068	0.020	0.156	0.190	0.230	0.190	0.119
		Booting			0.059	0.012	0.038	0.033	0.018	0.025	0.012
		Heading				0.066	0.350	0.022	0.004	0.006	0.008

조해진 것과 출수기 집중의 경우 지엽이 감염되어 등숙기 이후 식생지수 값의 차이가 컸기 때문에 판단된다. 연차 간에는 2017년의 경우 7월 중순 이후 잦은 강우로 9월 중순까지 80% 내외의 높은 습도를 유지하면서 최고분얼기 집중 시 병 확산이 양호하여 2018년에 비해 대조구와 처리구의 식생지수 값 차이가 더욱 컸던 것으로 판단된다. 2018년은 7~8월 고온이 지속되다 9월 이후 강우가 증가하면서 습도가 높아져 출수기 병 집중의 경우 등숙기 동안 식생지수 차이가 컸던 것으로 판단된다.

신동진벼 품종은 2017년의 경우 밀양23호에 비해 식생지수 차이가 크지 않았으나 대체적으로 대조구 및 병 처리구의 식생지수가 5% 이내의 유의한 차이를 보였다. 그러나 2018년의 경우 최고분얼기, 유수형성이 집중에서는 대조구와 처리구의 뚜렷한 차이를 보이지 않았으나 이후 수잉기 및 출수기 병 집중에서는 유의한 차이를 보였다. 이는 밀양23호에 비해 병 저항성이 강한 신동진벼의 경우 7~8월 고온 조건에서 새로운 잎 발생이 왕성한 7월 초·중순에는 회복이 되었으나 7월 말, 8월 초 수잉기, 출수기 병 집중의 경우 새로운 잎의 회복에 한계가 있었던 반면 고온에 따라 병 집중 개체 내에서의 병

확산 속도는 2017년에 비해 더 빨랐기 때문에 판단된다.

새누리벼 품종은 2017년의 경우 최고분얼기 1회를 제외하고는 대조구와 처리구의 식생지수에 유의한 차이를 나타내지 않아 밀양23호 및 신동진벼에 비해 병 확산에 강한 것으로 나타났다. 2018년의 경우 수잉기 및 등숙기 집중 시 식생지수의 유의한 차이를 보였는데 이는 신동진벼와 같은 경향으로 판단된다.

2017년과 2018년 2년 동안 무인비행체 영상 식생지수 (NDVI)와 수확 직전 조사한 병반률의 상관관계 변화는 Fig. 6과 같다. 2017년의 경우 밀양23호의 상관관계수는 8월 20일 이후 감소하여 9월 이후 0.8이하의 값을 보였다. 신동진벼 경우에도 8월 20일과 9월 28일을 제외하고는 0.7이하의 값을 보여 병반률 증가에 따라 식생지수 값이 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 2018년의 경우 밀양23호와 신동진벼의 병반률 조사 값과 식생지수 상관관계수는 8월 20일 이후 0.9 이하의 높은 음의 상관관계를 보여 9월 초·중순 무인비행체 영상 식생지수를 활용한 병반률 조사 가능성을 확인할 수 있었다. 그러나 새누리벼의 경우 무인비행체 영상 식생지수와 병반률 조사 간의 상관성을 확인할 수 없었다.

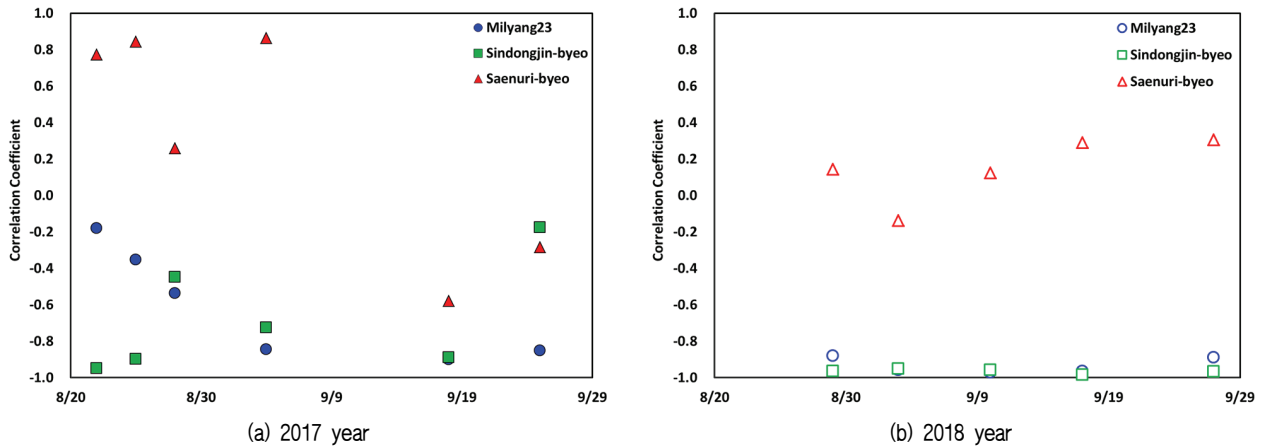


Fig. 6 Correlation coefficient between UAV NDVI and infected leaf area ratio from 2017 to 2018

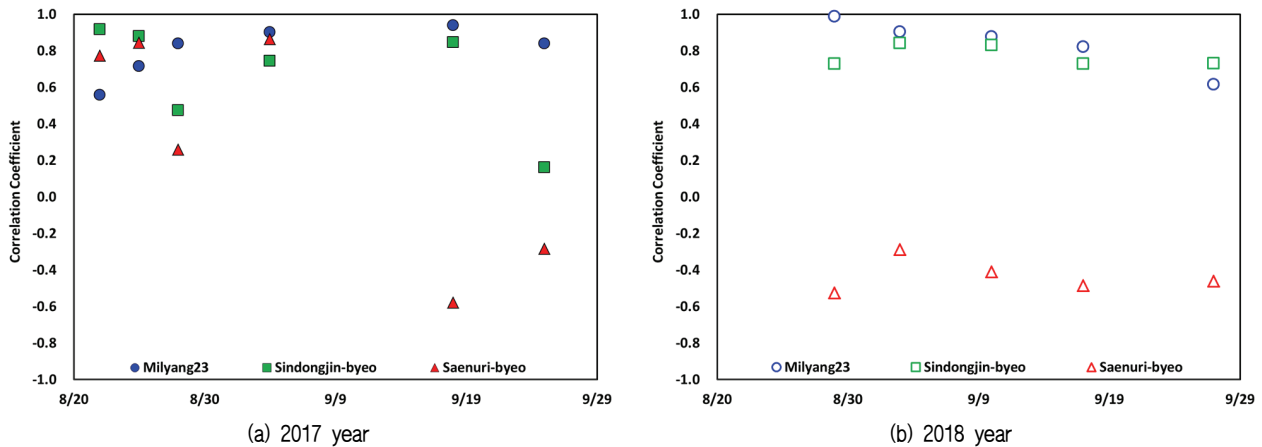


Fig. 7 Correlation coefficient between UAV NDVI and rice yield index from 2017 to 2018

무인비행체 영상 식생지수 (NDVI)와 벼 수확 후 대조구 수량 대비 병 처리구 수량의 비로 계산한 수량지수의 상관계수 변화는 Fig 7과 같았다. 2017년의 경우 밀양23호의 상관계수는 8월 20일 이후 증가하여 9월 이후 0.8이상의 값을 보였다. 신동진벼는 8월 20일과 9월 28일을 제외하고는 0.7이상의 값을 보여 병반률과는 반대로 수량지수가 증가할수록 식생지수 값이 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 2018년의 경우 밀양23호는 8월 29일 상관계수 0.99 이후 9월말 0.62까지 완만하게 감소하는 경향을 보였다. 신동진벼는 8월 29일 상관계수 0.73에서 9월 초순 0.84까지 증가하다 이후 9월말까지 완만히 감소하는 경향을 보여 병반률 조사 결과와 같이 9월 초·중순 무인비행체 영상 식생지수를 활용하여 벼 흰잎마름병 발생에 따른 수량 감소 추정이 가능할 것으로 판단되었다. 그러나 새누리벼의 경우 병반률 조사 결과와 같이 2년간 조사에서 특정한 경향을 찾을 수 없었다.

IV. 결론

본 연구는 벼 흰잎마름병에 대해 저항성이 다른 밀양23호, 신동진벼, 새누리벼 3개 벼 품종을 대상으로 2년간 무인비행체 영상을 촬영하여 생육 전반기 벼 생육 및 후반기 병해 평가 가능성을 분석하였다. 그 결과 무인비행체 영상 식생지수를 활용하여 동일 포장에서 같은 품종을 재배 시 연차 간 생육 변화 추세를 정성적으로 평가할 수 있음을 확인하였다. 정량적 평가를 위해 2017년 구축한 생육추정 모형을 기반으로 2018년 생육인자를 추정된 결과는 초장의 경우 밀양23호는 10% 이내의 오차를 보여 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 그러나 신동진벼, 새누리벼의 경우는 19.4~29.0%값을 보여 밀양23호에 비해 오차율이 증가하여 품종 간 차이를 보였다. 건물중 및 엽면적지수는 각각 40~90%, 20~80% 값을 보여 추후 정확도 개선을 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 주요 생육시기별로 벼 흰잎마름병 병 접종 후 영상 NDVI 식생

지수 변화를 분석한 결과 병 진단에 따른 유의한 차이는 대체로 2~4주후부터 분석 가능하여 병 집중 직후 조기 진단은 어려운 것으로 나타났다. 그러나 밀양23호, 신동진벼 품종의 경우는 9월 초 · 중순 무인비행체 영상 식생지수와 수확기 병 반률 면적조사 및 수량 조사 결과와 높은 상관성을 보여 영상 기반 병해 평가가 가능함을 확인할 수 있었다. 금후 병해 조기 진단에 대한 연구를 통해 방제 계획 수립 등 영농작업 효율화에 기여하기 위한 기술 개발이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호: PJ012071012018)의 지원에 의해 이루어진 결과로 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Bendig, J., A. Bolten, S. Bennertz, J. Broscheit, S. Eichfuss, and G. Bareth. 2014. Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. *Remote Sens.* 6(11): 10395-10412. doi:10.3390/rs61110395.
- Cohen, W. B., 1991. Response of vegetation indices to change in three measures of leaf water stress. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57(2): 195-202.
- Das, P. K., B. Laxman, S. V. C. Kameswara Rao, M. V. R. Seshasai, and V. K. Dadhwal, 2015. Monitoring of bacterial leaf blight in rice using ground-based hyperspectral and LISS IV satellite data in Kurnool, Andhra Pradesh, India. *International Journal of Pest Management* 61(4): 359-368. doi:10.1080/09670874.2015.1072652.
- 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 Sensing of Environment* 58: 289-298. doi:10.1016/S0034-4257(96)00072-7.
- Jordan, C. F., 1969. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50: 663-666. doi:10.2307/1936256.
- Kim, S. H., 2016. A study on the diffusion of Korean agricultural ICT and role of the agricultural cooperative federation using the theory of technology adoption life cycle and chasm. *Cooperative Management Review* 45: 1-27. (in Korean).
- KOSIS, 2018. Korean Statistical Information Service Homepage. <http://www.kosis.kr/> Accessed 1 May 2020. (in Korean)
- Ku, H. S., J. H. Min, and J. Y. Park, 2015. Survey of ICT-agriculture convergence. *Electronics and Telecommunications Trends* 30(2): 49-58. (in Korean)
- Na, S. I., S. Y. Hong, C. W. Park, K. D. Kim, and K. D. Lee, 2016a. Estimation of highland Kimchi cabbage growth using UAV NDVI and agro-meteorological factors. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 49(5): 420-428 (in Korean). doi:10.7745/KJSSF.2016.49.5.420.
- Na, S. I., C. W. Park, Y. K. Cheong, C. S. Kang, I. B. Choi, and K. D. Lee, 2016b. 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 Journal of Remote Sensing* 32(5): 483-497 (in Korean). doi:10.7780/kjrs.2016.32.5.7.
- 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 Journal of Soil Science and Fertilizer* 48(5): 384-390 (in Korean). doi:10.7745/KJSSF.2015.48.5.384.
- 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 Journal of Soil Science and Fertilizer* 49(6): 731-742 (in Korean). doi:10.7745/KJSSF.2016.49.6.731.
- Lee, K. D., C. W. Park, K. H. So, and S. I. Na, 2017. Selection optimal vegetation indices and regression model for estimation of rice growth using UAV aerial images. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 50(5): 409-421 (in Korean). doi:10.7745/KJSSF.2017.50.5.409.
- 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. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 61(4): 1-10 (in Korean). doi: 10.5389/KSAE.2019.61.4.001.
- Park, J. K., and J. H. Park, 2017. Analysis of rice field drought area using unmanned aerial vehicle (UAV) and geographic information system (GIS) Methods. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(6): 91-97 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2017.59.3.021.

16. Pearson, R. L., and L. D. Miller, 1972. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie. In *Proceedings of the Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 1357-1381. Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI.
17. Torres-Sanchez J., J. M. Pena, A. I. de Castro, and F. Lopez-Granados, 2014. Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. *Computers and Electronics in Agriculture* 103: 104-113. doi:10.1016/j.compag.2014.02.009.
18. Tucker, C. J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8: 127-150. doi:10.1016/0034-4257(79)90013-0.
19. Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering, 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Freden, S. C., E. P. Mercanti, M. Becker (Eds.), Technical Presentations, NASA SP-351.
20. 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. *Agronomy Journal* 98: 968-977. doi:10.2134/agronj2005.0200.
21. Xiang, H., and L. Tian, 2011. Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). *Biosyst. Eng.* 108(2): 174-190. doi:10.1016/j.biosystemseng.2010.11.010.
22. Qin, Z., and M. Zhang, 2005. Detection of rice sheath blight for in-season disease management using multispectral remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 7(2): 115-128. doi: 10.1016/j.jag.2005.03.004.