

Estimation of Nitrogen Uptake and Yield of Tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) by Reflectance Indices of Ground-based Remote Sensors

Seong Soo Kang, Yoo-Hak Kim, and Soon-Dal Hong^{1*}

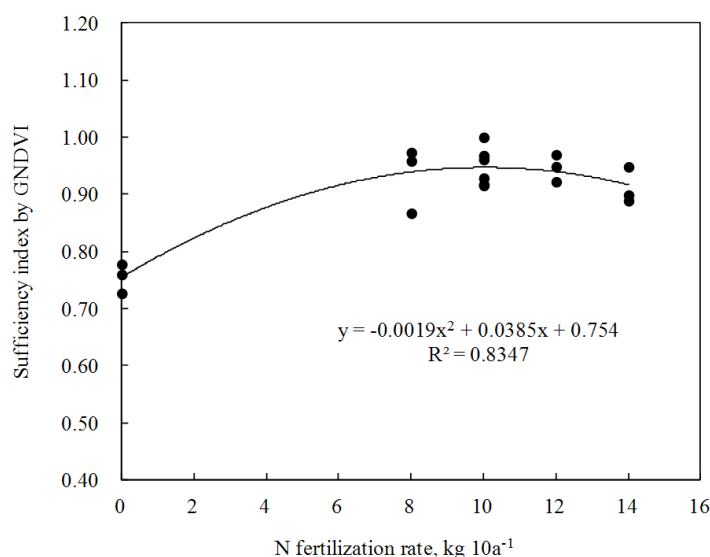
Division of Soil and Fertilizer, RDA-NAAS, Suwon, 441-707, Korea

¹Chungbuk National University, Cheongju, 361-763, Korea

(Received: May 30 2014, Accepted: June 16 2014)

Ground-based remote sensing can be used as one of the non-destructive, fast, and real-time diagnostic tools for predicting yield, biomass, and nitrogen stress during growing season. The objectives of this study were: 1) to assess biomass and nitrogen (N) status of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) plants under N stress using ground-based remote sensors; and 2) to evaluate the feasibility of spectral reflectance indices for estimating an application rate of N and predicting yield of tobacco. Dry weight (DW), N content, and N uptake at the 40th and 50th day after transplanting (DAT) were positively correlated with chlorophyll content and normalized difference vegetation indexes (NDVIs) from all sensors ($P < 0.01$). Especially, Green NDVI (GNDVI) by spectroradiometer and Crop Circle-passive sensors were highly correlated with DW, N content and N uptake. The yield of tobacco was positively correlated with canopy reflectance indices measured at each growth stage ($P < 0.01$). The regression of GNDVI by spectroradiometer on yield showed positively quadratic curve and explained about 90% for the variability of measured yield. The sufficiency index (SI) calculated from data/maximum value of GNDVI at the 40th DAT ranged from 0.72 to 1.0 and showed the same positively quadratic regression with N application rate explaining 84% for the variability of N rate. These results suggest that use of reflectance indices measured with ground-based remote sensors may assist in determining application rate of fertilizer N at the critical season and estimating yield in mid-season.

Key words: Canopy reflectance, Ground-based remote sensing, NDVI, N stress, Sufficiency index, Tobacco



Relationship between N application rate and sufficiency index by GNDVI at 40th DAT.

*Corresponding author : Phone: +82432612564, Fax: +82432715921, E-mail: sdhong@cbnu.ac.kr

§Acknowledgement: This study was carried out with the support of "Research Program for Chungbuk National University" in 2012.

Introduction

질소는 양분 요구량이 많지 않은 유묘기나 생육 초반기보다는 영양생장이 왕성해지는 결정적 생육시기 (critical season)에 효율적인 검정법에 의해 적량의 양분을 적시에 공급하여야 질소 이용률을 높일 수 있다. 대부분의 작물에서 critical season은 연구되어 있으므로 적정시비량을 어떻게 결정하느냐가 질소 이용률을 높일 수 있는 핵심 기술이 된다. 웃거름 양을 결정하기 위한 식물체 검정법으로 식물체의 전질소 또는 줄기나 엽병을 절단하여 즙액의 질산태 질소를 측정하는 방법 (Sabbe and Zelinski, 1990; McConnell et al., 1993; Bundy and Andraski, 1993; Darryl, 1996)이 검토되었으나 식물체를 파괴하는 문제로 조사개체수가 제한되고 분석에 시간과 비용이 많이 드는 문제점이 있었다. 따라서 측정의 간편성과 비파괴 측정의 장점을 가진 엽록소 측정기 (Chlorophyll meter, SPAD502, Japan)로 잎의 상대적 엽록소 농도를 측정하여 시비량 결정에 활용하는 연구가 활발히 이루어졌다 (Schepers et al., 1992; Fox et al., 1994; Darryl, 1996). 그러나 이 엽록소 측정기도 잎과 접촉하여 측정하기 때문에 조사개체수가 제한된다는 단점이 있다.

지상원격탐사에 의한 식물체 검정은 조사 개체수를 전포장으로 확대할 수 있기 때문에 실시간으로 공간적인 변이성을 분석하여 그에 따른 변량시비가 가능한 장점이 있다 (Redelfs et al., 1987; Wiegand et al., 1990, 1991, 1992; Daughtry et al., 1992; Yoder et al., 1995; Cater et al., 2001, 2002; Lihong et al., 2004). 따라서 작물의 질소영양상태를 평가하기 위한 지상원격측정 센서의 개발과 이를 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 태양광을 광원으로 이용하여 반사율을 측정하는 수동형 (passive) 센서는 구름이나 태양각도, 측정각도, 그림자, 주위의 물체 또는 토양과 같은 배경에 의해 영향을 받는다 (Pinter et al., 1985; Tarpley et al., 2000; Rundquist et al., 2004). 이러한 단점을 극복하기 위하여 최근에 개발된 지상원격측정 센서는 자연광과 구별되는 변조된 (modulated) 자체광원을 갖고 있는 능동형 (active) 센서이다. 이러한 센서들은 휴대하거나 트랙터와 같은 농기계에 장착할 수 있고 구름이나 태양각 등의 영향을 받지 않기 때문에 실시간으로 쉽고 편리하게 활용 가능하다. 따라서 관행의 시료채취, 건조, 분쇄, 분석절차 등의 복잡한 조사과정에 비하여 신속하며, 비접촉 및 비파괴적이며, 원하는 시기에 언제나 실시간으로 쉽게 반복 측정할 수

있는 편의성과 경제성을 가지고 있는 새로운 검정방법이다 (Hong and Kim, 2003). Active 센서의 한 종류인 GreenSeeker 센서의 개발과 활용방법을 연구하고 있는 미국 오클라호마 주립대학의 연구팀들은 센서를 트랙터에 장착하여 0.6 m² 단위로 옥수수 군락 (캐노피)의 반사율을 스캐닝함으로써 실시간으로 시비량을 정하여 0.6 m² 단위로 변량시비를 하기 위한 연구를 하고 있다 (Raun et al., 2002). 이러한 원격측정은 통계학적으로 가장 이상적인 전수조사도 가능한 방법이며 정밀농업의 핵심인 시간적 공간적 변이에 따른 위치별 변량적 농작업 관리가 가능한 방법으로 영농규모가 작은 우리의 농업환경에서도 적용 가능한 기술로 생각된다 (Hong and Kim, 2003). 따라서 본 연구는 다양한 질소수준에서 생육한 연초의 생육시기별 생체량, 질소흡수량 및 수량 변수들과 passive와 active 방식의 지상 원격측정 센서로 측정된 반사율 지표와의 상관분석 및 회귀분석을 통하여 연초의 수량 예측과 질소 웃거름 시비량 결정을 위한 도구로서의 활용 가능성을 평가하였다.

Materials and Methods

재배방법 및 시험처리 시험작물로 연초 (*Nicotiana tabacum* L.) 황색종 품종 KF118을 충북대학교 농업생명환경대학 부속농장 내의 사양질계 적황색토인 예산통 (Yesan Series, coarse loamy, mixed, mesic family of Typic Dystrudepts)에서 재배하였다. 2004년 4월 14일에 정식하였고 재식거리는 115 × 45 cm, 시험구의 크기는 5.75 × 3.3 m이었다. 시험처리는 질소 시비수준을 무비구, 80, 100, 120, 140 kg ha⁻¹의 5수준으로 처리하였고, 난괴법 3반복으로 배치하였다. 인산 칼리 등의 시비는 모든 처리구에 동일하게 시비하였다.

시험포장의 시험 전 토양 화학성은 Table 1과 같다. 작물별 시비처방기준 (NIAS, 1999)의 연초재배에 적합한 토양 화학성 기준은 pH가 6.0~6.5, 유기물함량이 20~30 g kg⁻¹, 유효인산이 150~250 mg kg⁻¹, 치환성칼륨 0.45~0.55 cmol_c kg⁻¹의 범위이며, 이와 비교할 때 시험포장은 유기물과 마그네슘, 양이온치환용량 (CEC)이 낮은 편이었다.

생체량 조사 및 전질소 분석 정식 후 40일째와 50일째에 처리구 당 3주씩 시료를 채취하여 지상부의 생체중을 측정하였고 70°C에서 3일간 건조시킨 후 건물중을 측정하

Table 1. Chemical properties of the experimental soil used for tobacco cultivation.

Soil series	Soil texture	pH	EC	OM	T-N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	Avail. P ₂ O ₅	Exch. cations			CEC
									K	Ca	Mg	
	(USDA)	(1:5)	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹			cmol _c kg ⁻¹			
Yesan	SL	6.7	0.32	13.1	0.63	11.8	1.7	360	0.86	4.51	0.77	8.66

였다. 그리고 수확기에 연초수량을 조사하였다. 건물중을 측정된 식물체 시료를 분쇄기로 곱게 갈아 전질소 분석용 시료를 조제하였다. 전질소 함량은 식물체 시료 0.2 g을 100 ml 켈달플라스크에 넣고 진한 H₂SO₄ 5 ml와 분해촉진제를 넣고 block digester (Tecator 2040 digester)를 이용하여 370°C에서 2시간 분해시켰다. 이것을 Kjeldahl 자동증류적정장치 (Tecator 1030 Analyzer)를 이용하여 전질소 함량을 측정하였다.

지상원격측정 센서의 종류와 측정방법 비파괴적 엽록소 측정기인 SPAD502, passive 방식의 지상원격측정센서인 spectroradiometer (LI-1800), Crop Circle-passive 센서, 그리고 active 방식의 GreenSeeker-red 센서를 사용하여 이식 후 35, 40, 50, 70일에 측정을 하였다.

① SPAD-502 Chlorophyll meter (Minolta) : 처리구 당 5개체를 무작위로 선정하여 가장 최근에 완전엽으로 성장한 상위엽의 가장자리 부위에서 1 cm 간격으로 20회 측정하여 평균하였다.

② Spectroradiometer (LI-1800, LI-COR Inc.) : 측정시 흰색의 표준반사판으로 표준화 (normalization) 과정을 반복하였고, 340 nm에서 1100 nm까지 연초의 근적 반사율을 3반복 측정하였다. NDVI (Normalized difference vegetation index) 식생지수의 계산 [(NIR-Red)/(NIR+Red)]에서 Red 파장의 반사율 대신에 녹색 (550 nm), 노란색 (600 nm), 적색 (680 nm) 파장의 반사율을 이용하였고 각각 GNDVI (Green NDVI), ANDVI (Amber NDVI), RNDVI (Red NDVI)로 하였다. 근적외선 파장은 820 nm의 반사율을 이용하였다.

③ Crop Circle-passive (Holland Scientific, Lincoln, Nebraska) : 표준반사판으로 표준화과정을 한 후 연초 근적 반사율을 샘플링 속도 250 ms으로 스캐닝하여 측정하였다. 측정파장은 녹색 (550nm), 노란색 (600nm), 적색 (680nm), 근적외선 (820nm)이며, 각 파장의 반사율을 이용하여 각각의 NDVI 값들을 계산하였다.

④ GreenSeeker-red version (Ntech Industries, Ukiah, California) : 근적외선 파장으로 770±15 nm와 적색 파장으

로 660±15 nm의 모듈레이션된 반사광 (radiance)만을 검출하여 RNDVI 지표를 산출한다. 그리고 센서의 측정높이를 60cm에서 120cm까지 변화해도 관측영역은 1×60cm로 일정하게 유지되는 특징을 갖는다. 연초 근적 위를 100 cm 높이에서 스캐닝하는 방식으로 측정하였다.

평가방법 연초의 성장량 및 질소 영양상태 평가를 위하여 질소 수준별 처리에 의한 연초의 성장특성 변수들과 센서 측정치간의 상관 및 회귀관계를 분석하였다 (SPSS Ver 12.0). 각각의 생육단계별로 연초의 생체량과 반사율지표의 상호관계를 평가하였고 또한 이식 후 120일째 수확기의 연초 수량 및 질소흡수량과 생육 중반기 반사율 지표의 상호관계를 평가하여 수량예측 시기 및 방법을 평가하였다. 그리고 반사율 지표의 충족지수 (최대값에 대한 측정값의 비율)와 시비수준의 상호관계로부터 시비수준 예측 가능성을 평가하였다 (Varvel et al., 1997; Hussain et al., 2000).

Results and Discussion

질소 시비수준별 성장량 및 질소흡수량 질소 시비수준을 무비구, 표준시비량의 80%, 100%, 120% 및 140%로 5수준으로 처리한 연초의 처리구별 성장량은 매 생육단계마다 큰 차이를 보였으며 (Table 2) 수확기까지의 수량은 최소 21.0 kg 10a⁻¹에서 최대 215.8 kg 10a⁻¹의 분포로 변이계수는 34.3%를 나타냈다.

생육시기별 성장량과 반사율 지표의 상호관계 정식 후 40일째의 건물중, 질소흡수량, 질소농도와 센서 반사율 지표간의 상관계수 (Table 3)에서 잎 시료를 아세톤으로 추출하여 측정된 엽록소 함량은 고도로 밀접한 정의 상관 (P<0.01)을 보였으나 SPAD502 엽록소 측정치는 상관의 유의성이 없었다. 지상원격측정 센서로 측정된 지표들은 모두 고도로 밀접한 정의 상관 (P<0.01)을 보였다. 특히 spectroradiometer의 GNDVI가 가장 높은 상관을 보였다. 그리고 50일째 연초의 성장량 변수와 반사율 지표의 상관관계 (Table

Table 2. Statistical summary of dry weight, yield, N uptake and content of tobacco plants grown under various N conditions.

Statistic	DW		Yield	N uptake		N content	
	40th	50th		40th	50th	40th	50th
	----- g plant ⁻¹ -----		kg 10a ⁻¹	----- mg plant ⁻¹ -----		----- % -----	
Maximum	42.1	76.1	215.8	1695	2984	4.3	4.1
Minimum	18.3	23.0	21.0	357	400	1.8	1.4
Mean	30.3	57.3	164.4	1154	2030	3.7	3.4
Median	32.3	62.5	181.5	1260	2256	3.9	3.7
St. Dev.	7.4	14.7	56.5	378	742	0.7	0.8
CV (%)	24.4	25.6	34.3	32.7	36.6	18.7	22.5

Table 3. Correlation coefficients between actual measurement characteristic and reflectance index from sensors at 40th DAT.

Sensor	Reflectance index	DW	N uptake	N content
Arnon's method	Chl. content	0.680**	0.737**	0.632**
SPAD502	Chl. meter reading	0.006	0.076	0.263
Spectroradiometer	RNDVI	0.768**	0.818**	0.687**
	GNDVI	0.785**	0.838**	0.705**
	ANDVI	0.778**	0.827**	0.693**
Crop Circle-passive	RNDVI	0.699**	0.767**	0.669**
	GNDVI	0.759**	0.831**	0.717**
	ANDVI	0.718**	0.796**	0.706**
GreenSeeker-red	RNDVI	0.719**	0.810**	0.752**

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

n=21

Table 4. Correlation coefficients between actual measurement characteristic and reflectance index at 50th DAT.

Sensor	Reflectance index	DW	N uptake	N content
Crop Circle-passive	RNDVI	0.839**	0.844**	0.825**
	GNDVI	0.904**	0.917**	0.915**
	ANDVI	0.884**	0.895**	0.907**
GreenSeeker-red	RNDVI	0.894**	0.879**	0.878**

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

n=21

Table 5. Correlation coefficient between dry weight of aboveground part or yield of tobacco and reflectance indices at different growth stages.

Date	Sensor	Reflectance index	DW	Yield
35th	Crop Circle-passive	RNDVI	0.694**	0.747**
		GNDVI	0.753**	0.756**
		ANDVI	0.697**	0.734**
40th	GreenSeeker-red	RNDVI	0.659**	0.733**
	Arnon's method	Chl. Content	0.815**	0.720**
	SPAD502	Chl. meter reading	0.201	0.324
	Spectroradiometer	RNDVI	0.943**	0.916**
		GNDVI	0.936**	0.923**
		ANDVI	0.942**	0.918**
	Crop Circle-passive	RNDVI	0.839**	0.818**
GNDVI		0.887**	0.870**	
ANDVI		0.868**	0.854**	
50th	GreenSeeker-red	RNDVI	0.907**	0.902**
	Crop Circle-passive	RNDVI	0.838**	0.821**
		GNDVI	0.902**	0.917**
		ANDVI	0.877**	0.895**
70th	GreenSeeker-red	RNDVI	0.890**	0.912**
	Crop Circle-passive	RNDVI	0.837**	0.831**
		GNDVI	0.932**	0.916**
		ANDVI	0.927**	0.897**
	GreenSeeker-red	RNDVI	0.795**	0.771**

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

n=21

4)에서도 센서의 반사율 지표는 모두 고도로 유의성 있는 정의 상관 ($P < 0.01$)을 보였고 상관계수의 크기는 40일째에 비해 더 크게 나타났다. 특히 Crop Circle-passive에 의한 GNDVI 지표는 연초의 건물중, 질소흡수량, 질소농도와 0.9 이상의 상관계수를 보였다. 측정이 빠르고 편리한 active센서인 GreenSeeker-red 센서의 RNDVI는 Kang et al. (2009)이 온실 사경재배 조건에서 실험한 것에 비해 상관계수가 향상된 결과를 보였다. 반사율 지표는 건물중보다는 질소흡수량과 더 높은 상관을 보였는데 이것은 Moges et al. (2004)이 각 생육단계별 passive 센서의 RNDVI와 GNDVI는 지상부 생체량보다는 가을밀 지상부의 질소흡수량과 더 밀접한 상관을 보였다고 한 결과와 일치하였다.

수량과 생육중반기 반사율 지표의 상호관계 정식 후 35일, 40일, 50일, 및 70일째 측정된 반사율 지표들은 모두 연초 수량과 고도로 유의성 있는 상관계수를 보였다 (Table 5). 이러한 결과는 연초 사경재배 조건과 동일하게 지상원격탐사 반사율 지표들은 연초의 생산성을 생육중반기인 정식 후 35일째부터 예측할 수 있음을 시사하였다. 수량과의 높은 상관은 Moges et al. (2004)이 passive 센서의 RNDVI와 GNDVI는 가을밀의 수량 및 곡물의 질소흡수량과 매우 높은 상관을 보였다고 한 것과 같은 경향이였다. 그들은 수량예측에 있어 반사율 지표간의 우열은 나타나지 않았다고 하였으나 본 실험에서는 GNDVI가 다른 지표들에 비해 약간 높은 상관계수를 보였다.

40일째 건물중 및 질소흡수량과 가장 높은 상관관계를 보였고 또한 수량과의 상관관계에서도 가장 밀접한 상관을 보인 spectroradiometer에 의한 40일째의 GNDVI와 연초 수량과의 관계 (Fig. 1)에서 GNDVI는 수량변동의 90%를 설명할 수 있는 관계를 보였다. 그리고 Fig. 1(A)의 회귀식을 이

용하여 GNDVI로 구한 예측수량과 실측 수량과의 관계 (Fig. 1(B))에서 예측수량은 실측수량을 약 90% 설명하는 관계를 보였다. Green 파장의 반사율로 계산하는 GNDVI가 지상부 건물중, 질소흡수량, 및 질소 농도와 밀접한 관계를 보였는데, 이것은 Bronson et al. (2003)의 spectroradiometer로 측정된 반사율 지표를 이용한 9개 포장의 목화에 대한 평가에서 green 파장을 이용한 반사율 지표들은 red 파장을 이용한 반사율 지표보다 잎의 질소농도 및 질소흡수량과 더 많은 포장에서 더 높은 상관을 보였다고 한 결과와 비슷하였으나 그들은 생체량 (biomass) 평가의 경우 red 파장을 이용한 반사율 지표가 더 많은 포장에서 높은 상관을 보였다고 하였다. Ma et al. (2001)은 콩의 수량과 R2, R4, R5 생육단계 NDVI 반사율 지표는 고도로 밀접한 정의 상관을 보였다고 하였으며, Girma et al. (2006)은 생육중반 GreenSeeker의 NDVI 측정치는 가을밀 수량의 예측이 가능하다고 하였다. 또한 Teal et al. (2006)은 생육중반 GreenSeeker 센서의 NDVI는 옥수수 수량을 정확하게 예측할 수 있었다고 하였다. 이러한 결과들은 본 시험의 결과와 비슷한 것으로 지상원격 측정 센서의 반사율 지표를 활용하여 연초의 수량예측이 가능함을 확인하였다.

Critical season 반사율 지표에 의한 연초의 질소 시비 수준 추정 정식 후 40일째 spectroradiometer의 GNDVI로 계산한 총족지수(측정값/최대값)와 연초 수량의 회귀관계는 총족지수가 증가함에 따라 수량 증가가 차차 감소하는 2차 회귀곡선관계를 보였다 (Fig. 2). 그리고 회귀식은 총족지수와 수량 관계의 총변동을 약 90% 설명할 수 있었다. Fig. 3은 시비수준에 따른 총족지수의 반응을 회귀관계로 나타낸 것으로 질소 시비수준이 증가함에 따라 총족지수의 증가는 차차 줄어들다가 질소 시비수준 $10 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 을 정점

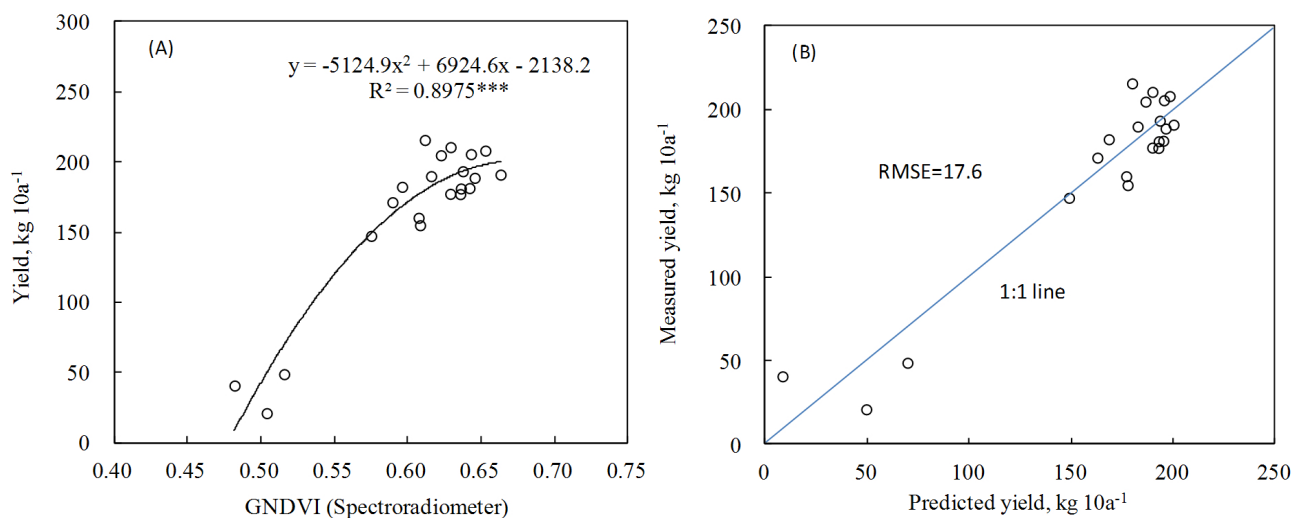


Fig. 1. Relationship between (A) tobacco yield and GNDVI by spectroradiometer at 40th day after transplanting and (B) measured yield at harvesting and predicted yield at 40 DAT.

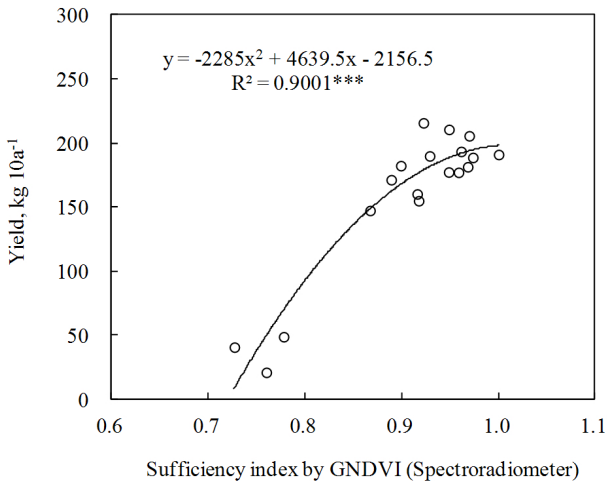


Fig. 2. Relationship between tobacco yield and sufficiency index by GNDVI (spectroradiometer) at 40th DAT.

으로 충족지수가 감소하는 2차 회귀관계를 보였다. 질소시비수준은 충족지수 변동의 83% 설명 가능하였고 이로부터 반사율지표 GNDVI의 충족지수는 질소 시비수준을 구분하여 평가할 수 있을 것으로 판단되었다. 따라서 지상원격측정 센서에 의한 반사율 지표는 생육중반 연초의 웃거름 시비량을 결정하기 위한 효율적인 도구로 활용 가능할 것으로 판단된다.

벼에 있어서 Xue et al. (2004)은 벼 잎의 질소농도 및 흡수량은 RVI (relative vegetation index)와 전 생육기간에 걸쳐서 지속적으로 밀접한 관계를 보였고, NIR/Green 비율 지표 (green vegetative index, GVI)는 잎의 질소 흡수량과 직선적인 관계를 보였다고 하였다. 또한 벼 캐노피의 질소 영양 상태 평가에서 RVI와 NDVI는 결정계수 (R^2) 0.82~0.94의 범위를 보였고, 실증시험에서는 결정계수 (R^2) 0.55~0.70의 범위를 보여 반사율 지표를 활용한 질소영양상태의 모니터링이 가능하다고 하였다. Kim et al. (2009)는 사경재배 고추에 대한 실험에서 Crop Circle의 Amber 파장을 이용하는 NDVI가 질소시비수준을 가장 잘 평가하였다고 하였다. 본 논문에서 충족지수를 이용한 것과는 달리 Mullen et al. (2003)과 Hodgen et al. (2005)은 센서의 NDVI를 이용한 반응지수 (response index: RI)가 웃거름 시비량에 따른 수량반응을 구별할 수 있기 때문에 웃거름 시비량 결정에 활용될 수 있다고 하였다. Raun et al. (2005ab)은 더 나아가 active 센서를 기초로 한 알고리즘을 이용하면 0.4 m²의 해상도로 밀포장의 질소반응과 수량예측이 가능하여 수량을 증가시키고 과량의 질소시비로 인한 환경오염을 줄일 수 있다고 하였다.

Conclusions

지상원격탐사는 작물의 생체량, 수량 및 질소영양상태

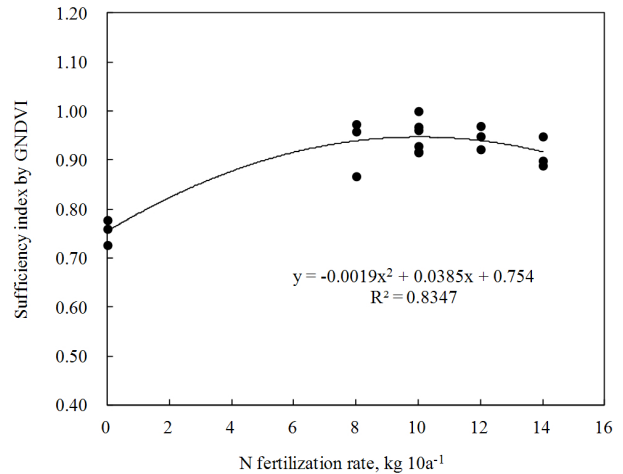


Fig. 3. Relationship between N application rate and sufficiency index by GNDVI at 40th DAT.

등을 비파괴 실시간으로 평가하여 질소비료 웃거름을 추천하는데 유용한 도구로 활용되는 식물체 검정법이다. 본 시험의 목적은 다양한 지상원격측정 센서의 반사율 지표를 이용하여 포장 조건에서 연초의 생체량과 질소영양상태를 진단하고 수량예측 및 질소 웃거름 시비량 추천 가능성을 평가하는 것이다. 이식 후 40일과 50일에 측정된 모든 센서들의 NDVI 반사율지표들은 연초의 건물중, 질소 흡수량, 엽록소함량과 고도로 유의성 있는 상관관계를 보였다 ($P<0.01$). 특히 spectroradiometer와 Crop Circle 수동형센서의 GNDVI 반사율지표는 연초 건물중, 질소함량, 질소 흡수량과 가장 밀접한 상관을 보였다. 또한 각 생육시기에 측정된 이들 반사율지표들은 연초 수량과 고도로 유의성 있는 상관을 보였다 ($P<0.01$). 특히 이식 후 40일째 spectroradiometer의 GNDVI 반사율지표는 연초 수량의 변이를 90% 설명할 수 있는 유의성 있는 곡선회귀를 보였다. 이러한 결과로부터 GNDVI의 최대값에 대한 각 측정값의 비율로 환산한 충족지수는 0.72~1.0의 범위를 보이며 질소 시비량 변이를 84% 설명할 수 있는 곡선회귀를 나타냈다. 따라서 원격탐사 센서의 반사율지표는 생육 중반기 연초의 생체량과 질소영양 상태를 평가하여 수량을 예측할 수 있고 질소비료의 추천을 위한 유용한 도구로 활용 가능할 것으로 생각된다.

References

Bronson, K.F., T.T. Chua, J.D. Booker, J.W. Keeling, and R.J. Lascano. 2003. In-season nitrogen status sensing in irrigated cotton: II. Leaf nitrogen and biomass. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1439-1448.

Bundy, L.G. and T.W. Andraski. 1993. Soil and plant nitrogen availability tests for corn following alfalfa. *J. Production Agriculture.* 6(2):200-206.

Cater, G.A. and A.K. Knapp. 2001. Leaf optical properties in

- higher plants: Linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American Journal of Botany*. 88(4):677-684.
- Cater, G.A. and B.A. Spiering. 2002. Optical properties of intact leaves for estimating chlorophyll concentration. *J. Environ. Qual.* 31:1424-1432.
- Darryl, D.W. 1996. Soil and plant tissue testing for nitrogen availability indexes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:747-750.
- Daughtry, C.S.T., K.P. Gallo, S.N. Goward, S.D. Prince, and W.P. Kustas. 1992. Spectral estimates of absorbed radiation and photo-mass production in corn and soybean canopies. *Remote Sens. Environ.* 39:141-152.
- Fox, R.H., W.P. Piekielek, and K.M. Macneal. 1994. Using a chlorophyll meter to predict nitrogen fertilizer needs of winter wheat. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25:171-181.
- Girma, K., K.L. Martin, R.H. anderson, D.B. Arnall, K.D. Brixey, M.A. Casillas, B. Chung, B.C. Dobey, S.K. Kamenidou, S.K. Kariuki, E.E. Katsalirou, J.C. Morris, J.Q. Moss, C.T. Rohla, B.J. Sudbury, B.S. Tubana, and W.R. Raun. 2006. Mid-season prediction of wheat-grain yield potential using plant, soil, and sensor measurements. *J. of Plant Nutrition*. 29:873-897.
- Hodgen, P.J., W.R. Raun, G.V. Johnson, R.K. Teal, K.W. Freeman, K.B. Brixey, K.L. Martin, J.B. Solie, and M.L. Stone. 2005. Relationship between response indices measured in-season and at harvest in winter wheat. *J. of Plant Nutrition*. 28:221-235.
- Hong, S.D. and J.J. Kim. 2003. Agricultural application of ground remote sensing. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 36(2):92-103.
- Hussain, F., K.F. Bronson, Yadvinder-Singh, Bijay-Singh, and S. Peng. 2000. Use chlorophyll meter sufficiency indices for nitrogen management of irrigated rice in Asia. *Agron. J.* 92:875-879.
- Kang, S.S., H.C. Jeong, S.H. Jeon, and S.D. Hong. 2009. Evaluation of biomass and nitrogen nutrition of Tobacco under sand culture by reflectance indices of ground-based remote sensors. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(2):70-78.
- Kim, H.G., S.S. Kang, and S.D. Hong. 2009. Estimation for Red Pepper (*Capsicum annum L.*) biomass by reflectance indices of ground-based remote sensor. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(2): 29-87.
- Lihong, X., W. Cao, W. Luo, D. Tingbo, and Zhu. 2004. Monitoring Leaf Nitrogen Status in Rice with Canopy Spectral Reflectance. *Agron. J.* 96:135-142.
- Ma, B.L., L.M. Dwyer, C. Costa, E.R. cober, and M.J. Morrison. 2001. Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. *Agron. J.* 93:1227-1234.
- McConnell, J.S., W.H. Baker, D.M. Miller, B.S. Frizzell, and J.J. Varvil. 1993. Nitrogen fertilization of cotton cultivars of differing maturity. *Agron. J.* 85:1151-1156.
- Moges, S.M., W.R. Raun, R.W. Mullen, K.W. Freeman, G.V. Johnson, J.B. Soile. 2004. Evaluation of green, red, and near infrared bands for predicting winter wheat biomass, nitrogen uptake, and final grain yield. *Journal of Plant Nutrition*. 27(8): 1431-1441.
- Mullen, R.W., K.W. Freeman, W.R. Raun, G.V. Johnson, M.L. Stone, and J.B. Solie. 2003. Identifying an in-season response index and the potential to increase wheat yield with nitrogen. *Agron. J.* 95:347-351.
- NIAST. 1988. Fertilizer application recommendations for crop plants, RDA, Suwon, Korea.
- Pinter, P.J., R.D. Jackson, C.E. Ezra and H.W. Gausman. 1985. Sun-angle and canopy-architecture effects on the spectral reflectance of six wheat cultivars. *INT. J. Remote Sensing*. 6(12):1813-1825.
- Raun, W.R., J.B. Solie, G.V. Johnson, M.L. Stone, R.W. Mullen, K.W. Freeman, W.E. Thomason, and E.V. Lukina. 2002. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing variable rate application. *Agron. J.* 94: 815-820.
- Raun, W.R., J.B. Solie, K.L. Martin, K.W. Freeman, M.L. Stone, G.V. Johnson, and R.W. Mullen. 2005a. Growth stage, development, and spatial variability in corn evaluated using optical sensor readings. *J. of Plant Nutrition*. 28:173-182.
- Raun, W.R., J.B. Solie, M.L. Stone, K.L. Martin, K.W. Freeman, R.W. Mullen, H. Zhang, J.S. Schepers, and G.V. Johnson. 2005b. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. *Commun. Soil Sci. Plan.* 36(19/20): 2759-2781.
- Redelfs, M.S., L.R. Stone, E.T. Kanemasu, and M.B. Kirkham. 1987. Greenness-leaf area index relationships for seven row-crops. *Agron. J.* 79:254-259.
- Rundquist, D., R. Perk, B. Leavitt, G. Keydan, A. Gitelson. 2004. Collecting spectral data over cropland vegetation using machine-positioning versus hand-positioning of the sensor. *Computers and Electronics in Agriculture* 43:173-178.
- Sabbe, W.E., and L.J. Zelinski. 1990. Plant analysis as an aid in fertilizing cotton. p. 469-493. In R.L. Westerman(ed.). *Soil testing and plant analysis*. 3rd ed. SSSA Book Series No. 3. Madison, WI.
- Schepers, J.S., D.D. Francis, M. Vigil, and F.E. Below. 1992. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter reading, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 23(17-20):2173-2187.
- Tarpley, L., K.R. Reddy, and G.F. Sassenrath-Cole. 2000. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. *Crop Sci.* 40:1814-1819.
- Teal, R.K., B. Tubana, K. Girma, K.W. Freeman, D.B. Arnall, O. Walsh and W.R. Raun. In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index. 2006. *Agron. J.* 98:1488-1494.
- Varvel, G.E., J.S. Schepers, and D.D. Francis. 1997. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1233-1239.
- Wiegand, C.L., A.H. Gerbermann, K.P. Gallo, B.L. Blad, and D.

- Dusek. 1990. Multisite analyses of spectral-biophysical data for corn. *Remote Sens. Environ.* 31:1-16.
- Wiegand, C.L., A.J. Richardson, D.E. Escobar, and A.H. Gerbermann. 1991. Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sensing of Environment* 35:105-119.
- Wiegand, C.L., S. J. Maas, J.K. Aase, J.L. Hatfield, P.J. Pinter Jr., R.D. Jackson, E.T. Kanemasu, and R.L. Lapitan. 1992. Multisite analyses of spectral-biophysical data for wheat. *Remote Sens. Environ.* 42:1-21.
- Xue, L., W. Cao, W. Luo, T. Dai, and Y. Zhu. 2004. Monitoring leaf nitrogen status in rice with canopy spectral reflectance. *Agron. J.* 96:135-142.
- Yoder, B.J., and R.E. Pettigrew. 1995. Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra(400-2500nm) at leaf and canopy scales. *Remote Sens. Environ.* 53:199-211.