

지상원격측정 센서의 반사율 지표를 활용한 사경재배 연초의 생체량 및 질소영양 평가

강성수* · 정현철 · 전상호 · 홍순달¹

국립농업과학원, ¹충북대학교 농화학과

Evaluation of Biomass and Nitrogen Nutrition of Tobacco under Sand Culture by Reflectance Indices of Ground-based Remote Sensors

Seong-Soo Kang,* Hyun-Cheol Jeong, Sang-Ho Jeon, and Soon-Dal Hong¹

National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon 441-707, Korea

¹Department of Agricultural Chemistry, Chungbuk National University, Sungbong-ro 410, Gaeshin-dong Cheongju-si 361-763, Korea

Remote sensing technique in agriculture can be used to identify chlorophyll content, biomass, and yield caused from N stress level. This study was conducted to evaluate biomass, N stress levels, and yield of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) under sand culture in a plastic film house using ground-based remote sensors. Nitrogen rates applied were 40, 60, 80, 100, 120, and 140 percent of N concentration in the Hoagland's nutrient solution. Sensor readings for reflectance indices were taken at 30, 35, 40, 45, 50 and 60 days after transplanting(DAT). Reflectance indices measured at 40th DAT were highly correlated with dry weight(DW) of tobacco leaves and N uptake by leaves. Especially, green normalized difference vegetation index(gNDVI) from spectroradiometer and aNDVI from Crop Circle passive sensor were able to explain 85% and 84% of DW variability and 85% and 92% of N uptake variability, respectively. All the reflectance indices measured at each sampling date during the growing season were significantly correlated with tobacco yield. Especially the gNDVI derived from spectroradiometer readings at the 40th DAT explained 72% of yield variability. N rates of tobacco were distinguished by sufficiency index calculated using the ratio of reflectance indices of stress to optimum plot of N treatment. Consequently results indicate that the reflectance indices by ground-based remote sensor can be used to predict tobacco yield and recommend the optimum application rate of N fertilizer for top dressing of tobacco.

Key words: Ground-based remote sensors, Nitrogen rate, NDVI, Reflectance indices, Tobacco, Yield prediction

서 언

원격탐사의 농업에 대한 활용분야는 토양특성 및 토지 이용 지도 작성, 작물의 수분상태 및 생육상태 평가, 수량예측, 강과 호수의 수질평가, 그리고 잡초 및 병해충관리, 수리기상학에의 이용, 방목지 관리 등 광범위하게 응용되고 있다. 원격탐사는 토양이나 작물 균락에 입사되는 전자기 에너지(incident radiation energy)에 대한 반사되는 빛(reflected energy)의 비율인 반사율 또는 작물의 방사(emitted thermal radiation)량을 측정하여 작물의 상태를 판단하게 된다. 작물에 대한 가시광선, 근적외광(near-infrared),

열적외광(thermal-infrared), 마이크로파(microwave)의 분광학적 측정으로 생체량(plant biomass), 수분 스트레스, 질소결핍, 재식밀도, 토양수분, 잡초 및 병충해의 발생 등에 대한 정보를 얻을 수 있다(Hatfield and Pinter, 1993).

원격탐사를 위한 장치는 크게 전자기적 반사 신호와 이미지를 감지하는 센서와 측정센서를 탑재하는 플랫폼(platform)으로 구성되어 있다. 원격탐사에 필요한 이러한 장치들은 1960년대 미국 등 선진국의 독점적인 기술로 발전되어 왔기 때문에 우리 농업분야에 대한 활용에는 더 많은 시간이 요구되는 선진기술로 인식되어 왔다. 그러나 최근에는 센서를 장착하는 플랫폼이 인공위성이나 항공기가 아닌 트랙터와 같은 농기계 또는 개인 휴대용으로까지 확대되면서 원격탐사는 우리나라의 농업 조건에서도 정밀농업을 수행하기

접 수 : 2008. 12. 7 수 리 : 2009. 2. 14

*연락처 : Phone: +82312900333,

E-mail: sskang33@rda.go.kr

위한 새로운 측정기술로 연구되고 있다(Hong and Kim, 2003).

태양광을 광원으로 이용하여 반사율을 측정하는 수동형(passive) 지상원격측정 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 모듈레이션(modulation)된 자체광원을 갖고 있는 능동형(active) 측정 센서이다. 이러한 센서들은 휴대하거나 트랙터와 같은 농기계에 장착할 수 있고 구름이나 태양각 등의 영향을 받지 않기 때문에 실시간으로 쉽고 편리하게 활용 가능하다. 따라서 시료채취, 건조, 분쇄, 분석 등 관행의 복잡한 토양분석과정에 비하여 신속하고, 비접촉 및 비파괴적으로 원하는 시기에 언제든지 실시간으로 쉽게 반복 측정할 수 있는 편의성과 경제성을 가지고 있는 검점방법이다. 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 시험은 질소 수준별 연초의 생장량 변수와 지상원격측정 센서의 반사율 지표들과의 관계로부터 수량 추정과 덧거름 시비량 결정을 위한 도구로서의 활용 가능성을 평가하였다.

재료 및 방법

재배방법과 생체량 조사 공시작물을 연초(품종: KF118)로 하여 2004년 4월 21일에 이식하여 70일간 온실조건에서 사경재배하였다. 사용한 포트의 크기는 지름 30 cm, 높이 30 cm이었고 세척한 모래를 포트에 충전한 후 영양액의 저장과 공급을 위한 40×60×30 cm의 PVC 상자 내에 설치하였다. 양분공급은 Hoagland's 영양액으로 하였고(Table 1), 질소 스트레스의 수준별 처리를 위해 Hoagland's 영양액의 질소 농도를 기준으로 40%에서 140%까지 20% 간격으로 6개 수준 7반복 처리하여 온실 내에 완전임의 배치하였다. 이식한 어린 묘는 염류 장해로 인한 뿌리활착 저해를 방지하기 위하여 이식 후 1주까지 영양액을 공급하지 않고, 포트 당 물 3.5 L만을 공급하였다. 이식 후 2주째부터는 영양액 농도의 50%로, 3주째부터는 100%로 영양액 농도를 조절하여 공급하였다. 영양액의 매회 공급량은 3.5 L이었고 생육 초기에는 4~5 일마다, 생육 중반기 이후에는 2~3일마다 영양액을 교환하였다. 양액 교환 시 포트의 상면에 물을 붓고

Table 1. Chemical composition of Hoagland's nutrient solution in the plot of 100% N.

Nutrient	Concentration	Chemicals
	mg L ⁻¹	
N [†]	171.32	KNO ₃ & Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O
P	25.06	KH ₂ PO ₄
K	218.12	KNO ₃ & KH ₂ PO ₄
Ca	149.57	Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O
Mg	21.40	MgSO ₄ · 7H ₂ O
Fe	6.39	FeNa EDTA
Mn	0.22	MnSO ₄ · 7H ₂ O
B	0.22	H ₃ BO ₃
Cl	6.08	NaCl
Zn	0.04	ZnSO ₄ · 7H ₂ O
Cu	0.01	CuSO ₄ · 5H ₂ O
Mo	0.01	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ · 4H ₂ O
S	28.40	Mg, Mn, Zn, Cu-SO ₄
Na	6.57	NaCl

[†] N concentration varies with the N stress treatment level.

포트를 세척하였고 또한 원격측정시마다 포트 상면에 충분한 물을 부어 세척함으로써 양분의 집적을 방지하고자 하였다.

연초 묘를 포트 당 2주씩 이식하여 30일째에 포트 당 1주씩을 시료로 채취하여 생체중을 측정된 후 70 °C에서 3일간 건조한 후 건물중을 측정하였다. 7개 반복 중 3반복은 40일째 시료로 채취하였고 나머지 4반복은 수확기까지 70일 동안 재배한 후에 시료로 채취하여 생체중과 건물중 및 수량을 조사하였다.

엽록소 함량 측정 엽록소 함량 측정을 위한 잎 시료채취는 지름이 10.1 mm인 cork borer를 이용하여 연초의 전개된 잎 중 가장 상위엽에서 엽맥을 피하여 두 곳을 선정하여 채취하였다. 증류수로 세척 후 약 7 ml의 아세톤에 넣어 균질기로 마쇄하여 엽록소를 추출한 후 10 ml로 맞추었다. 25,000 g로 원심분리한 후 상정액을 663 nm와 645 nm에서 흡광도를 측정하여 엽록소 함량을 구하였다(Arnon, 1949).

측정센서 종류와 측정방법 비파괴적, 접촉형 엽록소 측정기인 SPAD-502 엽록소 측정기(Chlorophyll meter, Konica Minolta Sensing, Sakai, Japan)를 사용하였다. 그리고 비접촉 상태로 태양광의 반사율을 측정하는 수동형(passive) 지상 원격측정 센서인 분광방사계(Spectroradiometer, LI-1800, LI-COR, Lincoln, USA)와 Crop Circle-passive sensor(Holland Scientific, Lincoln, USA)를 사용하였다. 그리고 자체광원을 갖고 있는 능동형(active) 센서인 GreenSeeker-red sensor(NTech Industries, Ukiah, USA)를 이용하였다.

이들 센서를 사용하여 이식 후 30, 35, 40, 45, 50, 60 일에 연초의 반사율을 측정하였다. 각 센서별 측정방법은 다음과 같다.

SPAD502 엽록소 측정기 잎에 접촉시켜 광 투과율을 이용하여 엽록소 함량을 측정하는 기기이며 측정 부위는 완전 엽으로 생장한 상위엽의 중앙 가장자리 부위에서 1 cm 간격으로 20회 측정하여 평균하였다.

분광방사계 측정 시 먼저 99%의 반사율을 갖는 흰색의 표준 반사율판을 이용하여 입사광을 반사시켜 입사광량을 인식시키는 과정(normalization)을 수행한 후 대상 물체에 대한 반사광량을 340 nm에서 1100 nm까지 측정하였다. 측정시 식물체 외의 배경효과에 의한 반사간섭을 줄이기 위해 검은 판을 식물체 아래에 둔 상태에서 연초 캐노피의 반사율을 3반복 측정하였다. 분광방사계의 관측영역(field of view, FOV)은 15°이며, 측정높이를 연초 캐노피 최상단으로부터 120 cm 높이에서 측정하였고 이때 측정되는 원의 지름은 32 cm가 되었다.

Crop Circle-passive 이 센서는 분광방사계를 이용한 작물의 반사율에 관한 연구에서 녹색(550 nm), 노란색(600 nm), 적색(680 nm), 근적외선(820 nm) 영역의 반사율을 이용한 생장지표들이 식물체의 엽록소 함량이나 성장량과 밀접한 관계를 갖는다는 결과로부터 이들 4개 파장 태양광의 입사량과 반사량을 동시에 측정할 수 있도록 고안된 원격측정 센서이다. 농업 현장에서의 활용성 증대를 위해 작물의 스트레스와 밀접하게 관련된 이들 4개 파장의 반사율을 이용하여 여러 가지 식생지표들을 계산하여 작물의 생체량과 관련된 특성들을 평가할 수 있는 센서이다. 측정시 표준반사판(reference panel)으로 표준화(normalization)한 후 측정하였으며 배경효과에 의한 복사선의 간섭을 줄이고자 바닥에 검은 판을 둔 상태에서 측정하였다. 관측영역을 구하는 식은 아래와 같으며, 측정 높이를 연초 캐노피 위 90 cm로 하였을 때 관측영역은 원형으로 지름 45 cm가 되었다.

$$\text{관측영역의 직경(feet)} = 2.3 / \text{the length of the FOV hood(inch)} \times \text{Height(feet)}$$

GreenSeeker-red version 이 기기는 근적외선 파장으로 770±15 nm와 적색 파장으로 660±15 nm의 모듈레이션된 자체광원부를 갖고 있다. 그리고 센서는 자연광과 구별되는 이 광원의 반사광(radiance)을 검출하여 red normalized difference vegetation index(rNDVI) 지표를 산출한다. 특히, 센서의 측정높

이를 60 cm에서 120 cm까지 변화해도 관측영역은 1×60 cm로 일정하게 유지되는 특징을 갖는다. 연초 캐노피 위에서 100 cm 높이를 유지하면서 스캐닝하여 측정하였다.

식물체 분석 전질소 분석은 건물중을 측정한 식물체 시료를 분쇄기로 곱게 갈아 조제한 시료를 이용하였다. 식물체 시료 0.2 g을 100 mL 켈달플라스크에 넣고 진한 H₂SO₄ 5 mL와 분해촉진제를 넣고 block digester를 이용하여 370°C에서 2시간 동안 분해한 후 Kjeldahl 자동증류적정장치(Tecator 1030 Analyzer, Foss, Hilleroed, Denmark)를 이용하여 측정하였다.

센서의 측정방법 및 효율성 평가 질소스트레스에 의한 작물 생체량 변화를 예측할 수 있는 우수한 원격측정 센서를 선별하기 위하여 질소처리별로 연초의 생산성 지표와 원격측정 센서 반사율지표의 상관 및 회귀관계를 분석하였다(SPSS Ver 12.0). 각각의 생육 단계별로 연초의 생체량과 반사율지표의 상호관계를 평가하였고 또한 수량과 생육 중반기의 반사율지표의 상관관계로부터 효율적인 수량 예측시기를 판단하였다. 그리고 효과적인 측정시기의 반사율 지표와 수량과의 회귀관계로 수량예측을 위한 회귀식을 구하였다.

시비수준 추정을 통한 시비량 결정을 위하여 충족지수(sufficiency index, SI)를 이용하였다. 충족지수를 이용한 방법은 SPAD502 엽록소 측정기를 활용하기 위한 과정에서 개발되었고 활용에 있어서 제한 인자들인 서로 다른 재배환경, 재배품종 등 SPAD502 엽록소 측정기 측정치에 영향을 미칠 수 있는 모든 요인들을 상쇄한다(Peterson et al., 1993). 충족지수는 한 포장 내에서 질소영양이 충분한 기준구획(well-fertilized reference)을 만들어 기준구획의 SPAD502 측정치에 대한 각각의 다른 지점의 SPAD502 측정치의 비율로 구해지며, 보통 충족지수가 0.95보다 작을 때 질소시비를 한다(Varvel et al., 1997; Hussain et al., 2000).

$$\text{충족지수(SI)} = \frac{\text{처리구 각각의 반사율 지표값}}{\text{측정된 반사율 지표의 최대값}}$$

원격측정에 있어서도 토양, 잡초, 생육시기 등 여러 오차요인이 있으므로 위와 같이 충족지수를 구하여 질소 시비수준과의 회귀관계를 분석하여 시비량 결정을 위한 활용 가능성을 평가하였다.

결과 및 고찰

질소 수준별 연초의 성장량과 질소흡수량 Hoagland's 영양액의 질소농도를 40%에서 140%까지

Table 2. Statistical summary of dry weight, amount of N uptake and N content as affected by nitrogen stress.

Statistic	Dry weight			Yield	Amount of N uptake			N content		
	30th	40th	70th		30th	40th	70th	30th	40th	70th
	----- g plant ⁻¹ -----				----- mg plant ⁻¹ -----			----- % -----		
Minimum	1.6	16.8	93.9	62	62	385	729	3.78	2.56	1.10
Maximum	7.0	38.6	226.0	136	334	1393	2920	4.89	4.66	2.15
Mean	4.1	27.8	176.1	107	184	915	1837	4.44	3.85	1.66
Median	4.1	28.4	182.9	110	186	928	1885	4.51	4.00	1.70
St.Dev.	1.2	6.2	36.4	20	60	322	625	0.29	0.72	0.31
CV (%)	30	22	21	19	33	35	34	6	19	19

6단계 수준에서 재배한 연초의 이식 후 30일째, 40일째, 70일째 건물중, 수량, 질소흡수량, 잎의 질소농도 차이는 Table 2와 같다. 이식 후 70일째인 수확기의 건물중은 최소 93.9 g plant⁻¹에서 최대 226 g plant⁻¹까지 2.43배, 그리고 수량은 2.2배의 차이를 보였다. 질소흡수량은 생육기간에 걸쳐 약 4배 이상의 큰 차이를 보였으며 질소농도는 건물중이나 질소흡수량 차이보다는 낮은 1.3~1.95배의 차이를 보였다. 잎의 질소농도는 생육 후반기로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다. 수확 시 건물중의 변이계수는 21%, 질소흡수량의 변이계수는 34%, 잎 질소농도는 19%였고 잎 질소농도의 변이계수가 약간 낮은 편이었다. 평균과 중앙값은 건물중, 질소흡수량, 질소농도 모두 큰 차이가 없었다. 질소스트레스 수준에 의해 나타난 이러한 생육특성 변이들을 각 생육 단계별 지상원격측정 센서로 측정된 반사율 지표들과의 상관 및 회귀분석에 이용하였다.

생육시기별 성장량과 반사율 지표의 상호관계 분광방사계에 의해 측정된 이식 후 50일째 연초 캐노피의 반사율은 Fig. 1과 같이 녹색 파장영역에서 약간 증가되고 적색영역에서 감소되었으며 질소시비 수준이 높을수록 근적외선 영역의 반사율은 높아지는 전형적인 양상을 보였다. Schlemmer et al.(2005)은 수

분과 질소의 두 요인으로 처리한 시험에서 이와 같은 결과를 보고하였으며 수분 스트레스보다는 질소 스트레스의 영향으로 이러한 반사율 변화를 보인다고 하였다.

각 파장의 처리수준별 반사율과 잎의 엽록소 함량 및 지상부 건물중의 상관관계는 Fig. 2와 같이 가시광선 영역에서는 음의 상관을 보였고 근적외선 영역에서는 정의 상관을 보였다(Thenkabail et al., 2000; Bronson et al., 2003; Hansen and Schjoerring, 2003; Xue et al., 2004, Schlemmer et al., 2005). 상관관계수의 유의성 검정값은 5% 유의수준에서 0.404(자유도=22)로 560 nm 부근과 700 nm 부근에서 유의성 있는 상관($n=24$, $P<0.05$)을 보였다. 그러나 일반적으로 각 파장의 반사율보다는 NDVI(normalized difference vegetation index)와 같은 반사율 성장지표를 구하여 평가하였을 때 상관관계가 증가한다(Jackson, R.D. and A.R. Huete, 1991). 따라서 녹색 파장으로 560 nm, 적색 파장으로 700 nm, 근적외선 파장으로 830 nm를 선정하여 반사율 성장지표 gNDVI(green NDVI)와 rNDVI(red NDVI)를 계산하여 연초 생체량 및 질소 영양상태 평가에 활용하였다.

지상원격측정 센서에 의한 반사율 지표와 연초 성장량 및 질소흡수량 사이의 정식 후 30일째와 40일째

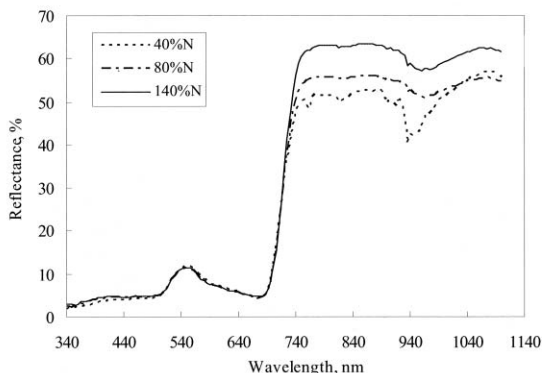
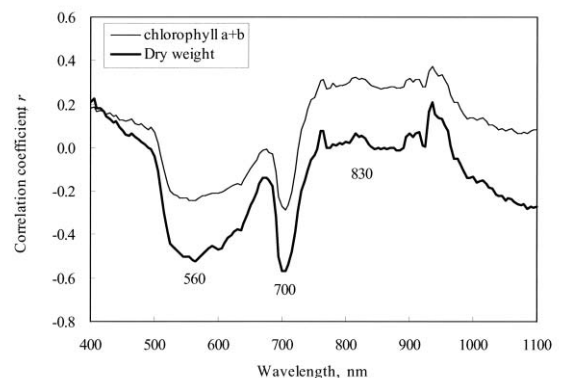
**Fig. 1. Spectral reflectance of tobacco canopy at the 50th day after transplanting.****Fig. 2. Correlation coefficient(r) between canopy reflectance and dry weight of tobacco and chlorophyll content at the 50th day after transplanting($n=24$). Wave bands were selected at 560 nm for green, 700 nm for red edge, and 830 nm for NIR.**

Table 3. Correlation coefficient between reflectance index and DW and N-uptake by tobacco leaves at the 30th day after transplanting(DAT).

Sensor	Reflectance index	n	Dry weight	N-uptake	N content
SPAD502	Chl. meter reading	42	0.354 [*]	0.374 [*]	0.366 [*]
Spectroradiometer	rNDVI	19	0.685 ^{**}	0.686 ^{**}	0.503 [*]
	gNDVI	19	0.747 ^{**}	0.744 ^{**}	0.497 [*]
	aNDVI	19	0.470 [*]	0.481 [*]	0.428
CC-passive	rNDVI	42	0.234	0.221	0.123
	gNDVI	42	0.336 [*]	0.327 [*]	0.128
	aNDVI	42	0.191	0.172	0.052

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

Table 4. Relationship between fresh and DW and N-uptake by tobacco and reflectance indices at the 40th DAT.

Sensor	Reflectance index	DW		N-uptake by leaves	N content in leaves
		Leaf	Leaf+Stem		
Arnon's method	Chl. a+b	0.737 ^{**}	0.745 ^{**}	0.712 ^{**}	0.595 ^{**}
SPAD502	Chl. meter reading	0.826 ^{**}	0.837 ^{**}	0.858 ^{**}	0.825 ^{**}
Spectroradiometer	rNDVI	0.894 ^{**}	0.892 ^{**}	0.914 ^{**}	0.911 ^{**}
	gNDVI	0.919 ^{**}	0.923 ^{**}	0.922 ^{**}	0.894 ^{**}
CC-passive	rNDVI	0.775 ^{**}	0.780 ^{**}	0.827 ^{**}	0.814 ^{**}
	gNDVI	0.802 ^{**}	0.806 ^{**}	0.840 ^{**}	0.809 ^{**}
	aNDVI	0.912 ^{**}	0.914 ^{**}	0.958 ^{**}	0.940 ^{**}
S-red	rNDVI	0.630 ^{**}	0.605 ^{**}	0.637 ^{**}	0.595 ^{**}

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

n=18

의 상관계수는 각각 Table 3, Table 4와 같다. 30일째에는 SPAD502 엽록소 측정치와 Crop Circle-passive 센서에 의한 gNDVI가 건물중 및 질소흡수량과 정의 상관($P<0.05$)을 보였으나 상관계수는 낮았다. 분광방사계의 반사율로부터 계산된 NDVI 지표들이 상대적으로 높은 상관관계를 보였다. gNDVI 지표가 건물중과 가장 높은 상관계수 크기를 나타냈고, 지상부 질소 농도는 분광방사계의 rNDVI와 가장 높은 상관을 보였다.

40일째의 경우 30일째에 비해 전반적으로 상관계수

가 크게 증가되었고 엽록소 농도와 모든 센서 반사율 지표들은 건물중, 잎의 질소흡수량, 잎의 질소농도와 고도로 밀접한 정의 상관을 보였다. 분광방사계의 gNDVI와 Crop Circle-passive 센서의 aNDVI가 가장 높은 상관계수를 보였다. 능동형 센서인 GreenSeeker-red 센서의 경우 다른 원격측정센서에 비해 상관계수는 낮았으나 95% 유의수준에서 높은 상관을 보였다.

연초 정식 후 40일째 측정된 SPAD502 엽록소 측정치는 정식 후 40일째 연초의 지상부 건물중을 70%

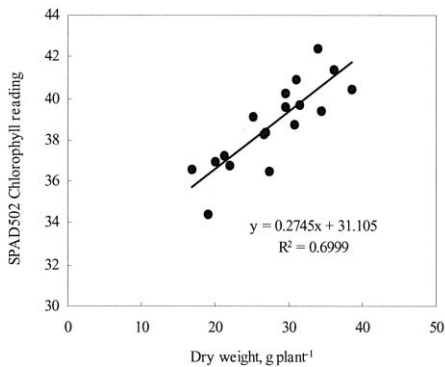


Fig. 3. Relationship between DW of tobacco and SPAD502 chlorophyll meter reading at the 40th DAT.

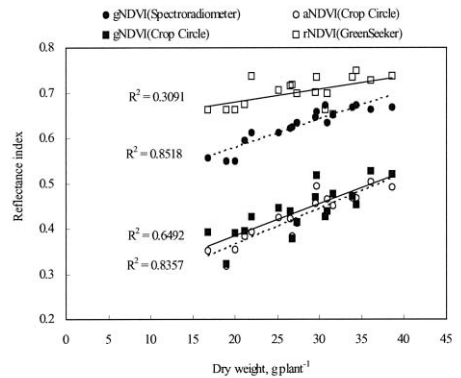


Fig. 4. Relationship between DW of tobacco and reflectance indices at the 40th DAT.

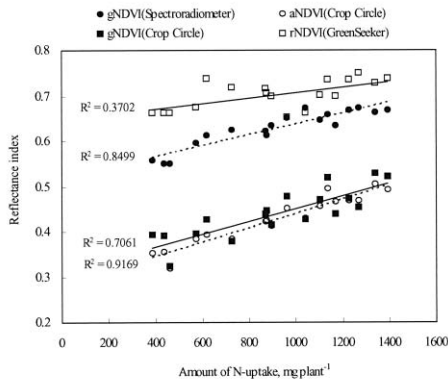


Fig. 5. Relationship between amount of N-uptake by tobacco and reflectance indices at the 40th DAT.

설명 가능한 직선회귀 관계를 나타냈다(Fig. 3). 그리고 연초 정식 후 40일째 지상 원격측정 센서의 반사율 지표들과 건물중 및 질소 흡수량의 회귀관계를 각각 Fig 4와 5에 나타냈다. Figure 4에서 40일째 분광방사계의 gNDVI와 Crop Circle의 aNDVI는 건물중을 각각 85%와 84% 설명하였다. Crop Circle의 gNDVI는 분광방사계의 gNDVI에 비해 설명력이 65%로 낮았다. Figure 5의 질소흡수량과의 관계에서 Crop Circle의 aNDVI는 질소흡수량을 92%, 분광방사계의 gNDVI는 85%를 설명할 수 있는 회귀관계를 보였다. 따라서 생육시기별 연초의 생체량과 질소 영양상태 추정에는 지상원격측정 센서들의 반사율 생장지표가 엽록소 측정기인 SPAD502 엽록소 측정기에 비해 더 좋은 것으로 나타났다. 이러한 관계를 배경으로 수확량 및 질소시비량 결정을 위한 지표로서의 활용가능성을 평가하였다.

수량과 생육시기별 반사율 지표의 상호관계 질소 수준 40%에서 140%까지 6개 수준으로 처리된 연초의 수량 및 잎의 질소 흡수량은 Fig. 6, 7과 같다. 연초 수량은 질소 120% 수준을 정점으로 하는 곡선회귀를 보였으며 질소 흡수량은 질소수준이 40%에서

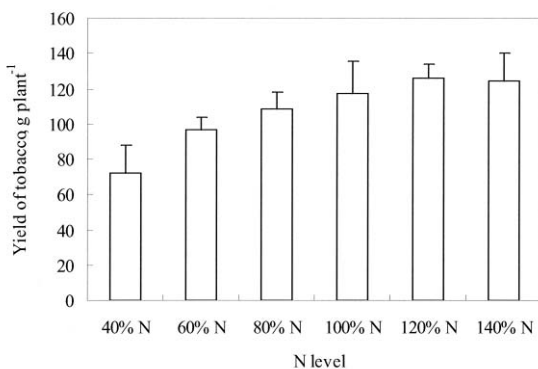


Fig. 6. Yield of tobacco as affected by N stress. Bars are the 95% confidence level.

140%로 증가될수록 직선적으로 증가되는 경향을 보였다. 이와 같은 변화를 보인 수량 및 질소 흡수량 변수와 생육단계별로 측정된 반사율 지표들과의 상관관계를 분석하였다(Table 5). 연초 수확시기의 수량 및 질소 흡수량은 정식 후 35일, 40일, 45일, 50일, 60일째에 측정된 엽록소 측정값 및 반사율 지표들과 고도로 유의성 있는 정의 상관을 보였다.

Table 4와 5에서 자체광원을 갖고 있으며 휴대하여 연초 캐노피 위 100 cm 높이로 스캐닝하듯이 지나가며 측정하는 GreenSeeker-Red 센서의 rNDVI가 수동형의 지상원격측정 센서의 반사율 지표보다 건물중과 수량의 추정에서 상관이 낮았다. 이것은 수동형 센서는 지지대에 고정하여 측정하였으나 능동형 GreenSeeker 센서는 장치를 휴대하고 걸어가면서 측정하여 높이조절, 좌우 상하 흔들림에 의해 오차가 유발된 것으로 생각되며 또한 실험자간 측정상의 개인 편차로 인해 시기별로 큰 차이를 보인 것으로 판단되었다. 휴대하여 측정함으로써 본 연구결과에서는 다른 센서들에 비해 GreenSeeker 센서가 낮은 상관을 보였지만 GreenSeeker 센서의 활용을 위한 연구는 활발히 진행되고 있다. Raun et al. (2005)은 트랙터에 GreenSeeker 센서를 장착하여 측정, 데이터처리, 변량 시비가 동시에 이루어지는 시스템을 적용하여 0.4 m²의 해상도로 밀 포장의 질소수준과 수량예측이 가능하다고 보고하였다. 측정의 편리성과 활용도 측면에서 능동형 GreenSeeker 센서의 활용이 바람직하나 휴대하여 측정할 때 발생할 수 있는 오차 요인에 의하여 GreenSeeker 센서의 재평가가 필요할 것으로 생각된다.

Table 5에서 수량과 가장 높은 상관관계를 보인 40일째가 최종수량을 예측할 수 있는 빠른 시기로 판단되며 또한 40일째 반사율 지표와 수량과의 회귀 관계(Fig. 8)에서 분광방사계의 gNDVI가 수량 변동에 대한 설명력이 가장 높은 결과($R^2=0.72$)를 보여 회귀식은 총변동의 72%를 설명 가능한 관계를 나타냈다. 이

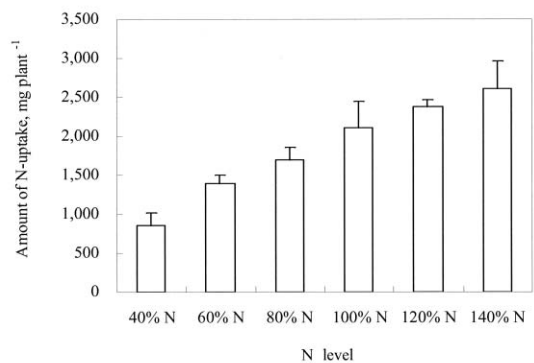
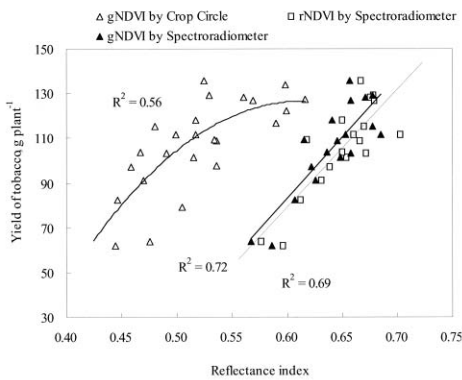


Fig. 7. Amount of N-uptake by tobacco leaves as affected by N stress at the harvesting. Bars are the 95% confidence level.

Table 5. Correlation coefficient between yield and amount of N-uptake by tobacco leaves and reflectance indices at different growth stage.

DAT	Sensor	Reflectance index	n	Yield	N uptake by leaves	N content in leaves
35th	SPAD502	Chl. meter reading	24	0.402	0.354	0.349
		Spectroradiometer	rNDVI	24	0.660**	0.637**
	CC-passive	gNDVI	24	0.704**	0.648**	0.581**
		aNDVI	24	0.673**	0.630**	0.582**
		rNDVI	24	0.563**	0.443*	0.385
		gNDVI	24	0.537**	0.475**	0.407*
		aNDVI	24	0.408*	0.384	0.398
GreenSeeker-red	rNDVI	24	0.631**	0.698*	0.752**	
40th	SPAD502	Chl. meter reading	24	0.473*	0.488*	0.535**
		Spectroradiometer	rNDVI	18	0.833**	0.801**
	CC-passive	gNDVI	18	0.851**	0.807**	0.772**
		rNDVI	24	0.593**	0.531**	0.446*
		gNDVI	24	0.720**	0.662**	0.562**
		aNDVI	24	0.681**	0.627**	0.535**
		rNDVI	24	0.132	0.090	0.061
45th	SPAD502	Chl. meter reading	24	0.706**	0.642**	0.608**
	CC-passive	rNDVI	24	0.575**	0.465*	0.388
		gNDVI	24	0.775**	0.686**	0.615**
		aNDVI	24	0.773**	0.698**	0.635**
	GreenSeeker-red	rNDVI	24	0.710**	0.757**	0.740**
50th	SPAD502	Chl. meter reading	24	0.651**	0.653**	0.667**
		Spectroradiometer	rNDVI	24	0.861**	0.887**
	CC-passive	gNDVI	24	0.841**	0.862**	0.824**
		rNDVI	24	0.662**	0.677**	0.669**
		gNDVI	24	0.746**	0.765**	0.756**
		aNDVI	24	0.706**	0.722**	0.714**
		rNDVI	24	0.405*	0.330	0.255
60th	SPAD502	Chl. meter reading	24	0.833**	0.831**	0.793**
	CC-passive	rNDVI	24	0.149	0.192	0.193
		gNDVI	24	0.339	0.348	0.355
		aNDVI	24	0.226	0.248	0.277
	GreenSeeker-red	rNDVI	24	0.425*	0.503*	0.543**

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

**Fig. 8. Relationship between yield of tobacco and reflectance indices at the 40th DAT.**

는 Ma et al. (2001)이 콩 수량과 R2, R4, R5 생육시기의 NDVI 반사를 지표의 회귀관계에서 R2은 최대 0.80 ($P < 0.01$)이었다고 보고한 것과 유사한 결과였다. 따라서 연초 수량을 생육중반기에 예측할 수 있으며 이식 후 40일째 분광방사계로 측정된 gNDVI는 연초 수량 예측을 위한 유효지표로 활용 가능할 것으로 판단되었다.

결정적 생육시기(critical season)의 반사율 지표에 의한 연초의 질소 시비수준 추정 식물의 질소영양 상태와 잎의 엽록소 함량, 생체량(biomass), 엽면적지수는 서로 매우 밀접한 관계를 갖기 때문에 이와 같은 특성들을 캐노피 조건에서 지상원격측정 센서로 추정하여 작물의 질소영양 상태를 평가할 수 있다(Filella

et al. 1995; Jongschaap 2006). 생육시기별 성장량과 반사율 지표의 상호관계로부터 이식 후 40일째가 작물의 질소영양 상태를 추정하기 위한 결정적 생육시기(critical season)로 판단되었으며 이 시기의 건물중 및 질소흡수량과 가장 밀접한 관계를 보인 분광방사계의 gNDVI 지표를 활용하여 질소시비 수준을 평가하여 시비량 결정에 활용할 수 있다.

시비수준 추정을 통한 시비량 결정을 위하여 충족지수(sufficiency index, SI)를 이용하였다. 충족지수는 측정된 gNDVI의 최대값에 대한 처리구 각각의 gNDVI 값의 비율로 구하였다(Varvel et al., 1997; Hussain et al., 2000). 그리고 질소 시비수준에 따른 40일째 gNDVI의 반응(Fig. 9-A)과 gNDVI의 충족지수 반응(Fig. 9-B)을 비교 검토하였다. 그 결과 Fig. 9-B와 같이 40일째 gNDVI에 의한 충족지수는 질소 40% 수준일 때 0.83, 60%일 때 0.89, 80%일 때 0.92, 100%일 때 0.94, 120%일 때 0.95, 140%일 때 0.94의 값을 보이며 변화하여 $R^2=0.73$ 인 회귀관계를 보였다. 따라서 이식 후 40일째 측정된 gNDVI 반사율 지표의 충족지수를 활용하여 실시간에 비파괴적으로 시비수준에 따른 질소영양 상태를 예측하여 질소 시비량을 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

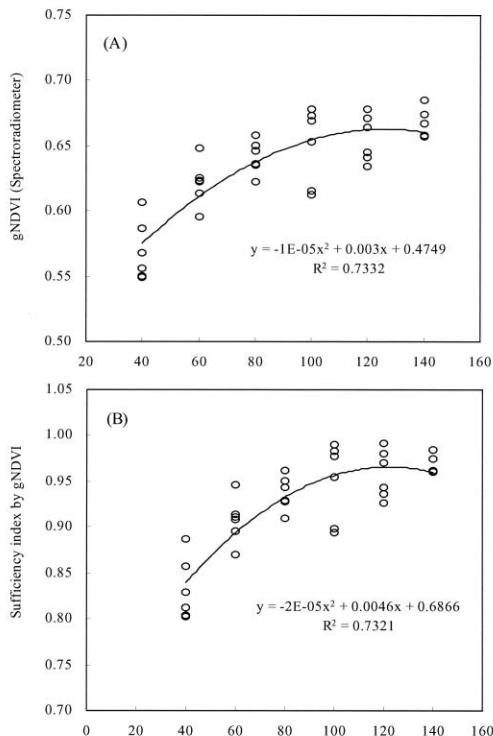


Fig. 10. Relationship between application level of N and gNDVI by spectroradiometer (A) and sufficiency index by gNDVI at the 40th DAT.

요 약

질소 스트레스 조건에서 재배된 연초 (*Nicotiana tabacum* L.)의 생체량 및 질소영양 상태와 원격측정 센서 반사율 지표의 상호관계로부터 센서의 반사율 지표를 활용한 연초의 질소 덧거름 시비량 결정 및 수량 예측을 위한 도구로서의 활용 가능성을 평가하였다.

이식 후 30일째의 rNDVI와 gNDVI, 그리고 40일째의 반사율 지표들은 건물중 및 질소흡수량과 밀접한 정의 상관($P<0.05$)을 보였다. 40일째 분광방사계의 gNDVI와 Crop Circle passive 센서의 aNDVI는 각각 건물중을 85%와 84%, 질소흡수량을 85%와 92% 설명하였다. 수량 및 수확기 질소 흡수량은 정식 후 35일, 40일, 45일, 50일, 수확기에 측정된 엽록소 측정값 및 반사율 지표와 고도로 유의성 있는 정의 상관을 보였다. 정식 후 40일째 분광방사계에 의한 gNDVI 지표는 연초 수량변동의 72% 설명 가능한 관계를 나타냈다. 따라서 연초의 경우 이식 후 40일째에 측정된 gNDVI 반사율 지표는 실시간에 비파괴적으로 수량을 예측할 수 있음을 시사하였다. 그리고 40일째 gNDVI로 계산한 충족지수는 질소시비수준의 73%를 설명할 수 있었다. 따라서 반사율 지표를 이용한 충족지수는 연초의 질소영양상태를 추정하여 위치별 변량시비가 가능한 방법으로 활용 가능할 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 농림부의 “지상원격탐사를 이용한 작물의 질소시비량 추천방법 개발” 과제 수행으로 연구되었으며 이에 감사드립니다.

인 용 문 헌

- Arnon, D.I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta Vulgaris*. *Plant physiology* 24:1-15.
- 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.
- Filella I, I. Serrano, J. Serra, J. Penuelas. 1995. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis. *Crop Sci* 35:1400-1405.
- Hansen, P.M. and J.K. Schjoerring. 2003. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sens. Environ.* 86:542-553.
- Hatfield, J.L. and P.J. Pinter, Jr. 1993. Remote sensing for crop protection. *Crop protection*, 12(6):403-414.
- 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.
- Jackson, R.D., and A.R. Huete. 1991. Interpreting vegetation indices, *Preventive Veterinary Medicine*, 11:185-200.
- Jongschaap REE. 2006. Integrating crop growth simulation and remote sensing to improve resource use efficiency in farming systems. Ph.D Thesis, Wageningen University, Wageningen, the Netherlands.
- 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.
- Peterson, T.A., T.M. Blackmer, D.D. Francis, and J.S. Schepers. 1993. Using a chlorophyll meter to improve N management. Nebguide G93-1171A. Coop. Ext. Serv., Univ. of Nebraska, Lincoln.
- 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, 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.
- 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.
- Schlemmer, M.R., D.D. Francis, J.F. Shanahan, and J.S. Schepers. 2005. Remotely measuring chlorophyll content in corn leaves with differing nitrogen levels and relative water content. *Agron. J.* 97:106-112.
- 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.
- Thenkabail, P.S., R.B. Smith, and E.D. Pauw. 2000. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. *Remote Sens. Environ.* 71:158-182.
- 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.
- 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.