

지상부 원격탐사 센서의 반사율지수에 의한 고추 생체량 추정

김현구 · 강성수¹ · 홍순달^{2*}

충주시 농업기술센터, ¹국립농업과학원, ²충북대학교 농화학과

Estimation for Red Pepper(*Capsicum annum* L.) Biomass by Reflectance Indices with Ground-Based Remote Sensor

Hyun-Gu Kim, Seong-Soo Kang¹, and Soon-Dal Hong^{2,*}

Chungju-si Agricultural Technology Service Center, Chungju 380-080, Korea

¹Soil & Fertilizer Management Division, National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon 441-707, Korea

²Department of Agricultural Chemistry, Chungbuk National University, Sungbong-ro 410, Gaeshin-dong Cheongju-si 361-763, Korea

Pot experiments using sand culture were conducted in 2004 under greenhouse conditions to evaluate the effect of nitrogen deficiency on red pepper biomass. Nitrogen stress was imposed by implementing 6 levels (40% to 140%) of N in Hoagland's nutrient solution for red pepper. Canopy reflectance measurements were made with hand held spectral sensors including GreenSeekerTM, Crop CircleTM, and Field ScoutTM Chlorophyll meter, and a spectroradiometer as well as Minolta SPAD-502 chlorophyll meter. Canopy reflectance and dry weight of red pepper were measured at five growth stages, the 30th, 40th, 50th, 80th and 120th day after planting(DAT). Dry weight of red pepper affected by nitrogen stress showed large differences between maximum and minimum values at the 120th DAT ranged from 48.2 to 196.6 g plant⁻¹, respectively. Several reflectance indices obtained from GreenSeekerTM, Crop CircleTM and Spectroradiometer including chlorophyll readings were compared for evaluation of red pepper biomass. The reflectance indices such as rNDVI, aNDVI and gNDVI by the Crop CircleTM sensor showed the highest correlation coefficient with dry weight of red pepper at the 40th, 50th, and 80th DAT, respectively. Also these reflectance indices at the same growth station was closely correlated with dry weight, yield, and nitrogen uptake of red pepper at the 120th DAT, especially showing the best correlation coefficient at the 80th DAT. From these result, the aNDVI at the 80th DAT can significantly explain for dry weight of red pepper at the 120th DAT as well as for application level of nitrogen fertilizer. Consequently ground remote sensing as a non-destructive real-time assessment of plant nitrogen status was thought to be a useful tool for in season nitrogen management for red pepper providing both spatial and temporal information.

Key words: Reflectance index, Normalized difference vegetation index, Red pepper, Yield, Nitrogen stress

서 언

21세기의 농업은 환경과 조화를 이루며 농업의 생산을 지속가능하게 하는 형태로 농업생산성 확보뿐 아니라 환경보존 및 농산물의 안전성을 동시에 추구하고 있다. 이런 시대흐름에 맞추어 원격탐사기술은 정밀농업의 한 방법으로 꾸준히 연구되어 왔고 농업 응용기술에 무한한 잠재력을 지니고 있다 (Jackson, 1984).

원격탐사는 측정하고자 하는 목표물에 대하여 물리

적인 접촉 없이 유용한 정보를 얻는 것이다. 원격탐사는 옥수수의 질소스트레스에 관한 연구 (Blackmer et al., 1995)와 식물의 수분스트레스에 관한 연구 (Carlson et al., 1995; Moran et al., 1995) 등에 활용되고 있을 뿐만 아니라 사과나무에 대한 진드기의 영향 (Penuelas et al., 1995)과 같이 병충해 예찰 연구까지 확장되고 있다.

식물체의 분광학적 반사율은 식물의 스트레스 정도에 따라 달라지며 생장을 저해하는 환경조건에서 식물 잎의 반사율은 일반적으로 가시광선 영역 (380 - 760 nm) 혹은 적외선 영역에서 증가된다. (Cater and Knapp, 2001). 이러한 잎의 광학적 성질에 대한 원리

접 수 : 2008. 12. 8 수 리 : 2009. 2. 18

*연락처 : Phone: +82432612564,

E-mail: sdhong@cbnu.ac.kr

는 엽록소 농도 및 질소 스트레스에 대한 상대적인 평가에 이용되어 왔다 (Read et al., 2002). 따라서 이러한 원격탐사 측정기술은 작물의 질소 스트레스를 비파괴, 실시간으로 검정하여 적정 시비량 결정을 위한 효율적인 도구로 활용 가능하다 (홍 등, 2003). 이러한 원격탐사방법을 이용하여 목화 (Stephan, 1998; Read et al., 2002; Kevin et al., 2003), 옥수수 (Shanahan., 2001; Osborne et al., 2002) 벼 (Hussain et al., 2000; Singh et al., 2002; Lihong et al., 2004) 그리고 밀 (Singh et al., 2002; Flowers et al., 2003) 등의 작물에 대한 생체량 (biomass)과 질소 및 엽록소 함량, 수확량 평가에 대한 연구가 수행되어 왔다.

원격탐사 기기의 반사율을 활용하여 식물 성장량을 지수화한 것은 근적외선 영역의 반사율을 적색영역의 반사율로 나눈 식물성장지수비율 (Ratio Vegetation Index, RVI)이다. 이 지수의 기본 개념은 식물의 활성에 직접적 연관이 있는 광합성작용에 필수적인 엽록소가 적색영역의 복사선을 많이 흡수하여 낮은 반사율을 나타내는 반면, 근적외선 영역의 복사선은 높은 반사율을 나타낸다는 관계를 활용한 것이다 (Avery and Belin, 1992). 그 이외 식생의 canopy를 특성화하기 위하여 많은 스펙트럼 지수들이 개발되었고 가장 보편적인 것은 녹색 생체량의 평가수단으로 개발된 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)이다 (Tucker, 1979). Rondeaux 등 (1996)은 NDVI는 토양의 배경효과 때문에 작물의 식생을 평가하는데 부적합 할 수 있다는 것을 지적하며 Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index (OSAVI)라는 수정된 지수를 제안하였고, Gitelson 등 (1996)은 Green Normalized Difference Vegetation Index (gNDVI)를 제안했으며 이것은 녹색식물의 canopy 상태에서 생체량의 변이를 평가하는데 NDVI보다 효율적이라고 보고되고 있다 (Schepers et al., 2001; Gitelson et al., 2001). 또한, 계속해서 새로운 지수들이 제안되고 있고 각 지수들의 계산 방법은 다음과 같다.

$$rNDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

$$gNDVI = \frac{(NIR - Green)}{(NIR + Green)}$$

$$aNDVI = \frac{(NIR - Amber)}{(NIR + Amber)}$$

rNDVI: Normalized Difference Vegetation Index

gNDVI: Green Normalized Difference Vegetation Index

aNDVI: Amber Normalized Difference Vegetation Index

NIR: Reflectance of near infrared

Red: Reflectance of red band

Green: Reflectance of green band

Amber: Reflectance of amber band

작물의 덧거름 시비량을 결정하기 위해 적용하는 기술로는 식물체의 전질소나 줄기절단에 의한 수액의 질산태 질소를 측정하는 방법 (Bundy and Andraski, 1993; Darryl, 1996) 등이 검토되었으나 식물체를 파괴하는 문제로 조사개체의 제한을 받아왔다. 그러나 Chlorophyll meter를 이용한 잎의 엽록소 측정법 (Schepers, 1998; Fox et al., 1994; Darryl, 1996)을 활용하는 연구는 작물의 질소 덧거름 시비량 결정에 측정의 간편성과 비파괴 측정의 장점을 부여하였다. 엽록소 측정기는 잎을 접촉하여 측정하기 때문에 조사개체수를 무한대로 증가시킬 수 없는 단점이 있으나, 지상원격탐사에 의한 식물체 검정은 조사개체수를 전 포장으로 확대할 수도 있기 때문에 실시간으로 공간적인 변이성에 따른 변량시비 추천이 가능한 장점이 있다 (Dalal and Henry, 1986; Redelfs et al., 1987; Wiegand et al., 1990, 1992; Daughtry et al., 1992; Yoder and Pettigrew, 1995; Wang et al., 1998; Cater and Knapp; 2001, 2002; Lihong et al., 2004).

본 연구는 다양한 질소스트레스 상태의 고추에 대한 지상 원격탐사 센서의 활용가능성을 평가하기 위하여 생육시기별 고추생체량과 반사율지수의 상호관계를 분석하고, 질소 관리를 위한 효율적인 센서와 반사율 지수 및 검정시기 등을 조사하였다.

재료 및 방법

사경재배방법 공시작물은 고추 (*Capsicum annum* L.)의 으뜸 품종으로 하여 충북대학교 유리온실에서 사경재배 하였다. 사경재배의 모래는 60 mesh를 통과한 중모래를 직경 30 cm, 높이 30 cm의 PVC 포트에 충전시키고, 이 포트는 가로, 세로, 높이의 크기가 45 × 35 × 25 cm인 PVC 상자 내부에 설치하였다. 고추는 묘상에서 30일간 생육한 묘를 5월 3일에 포트당 3주씩 이식하였다. 질소 스트레스 조건은 Hoagland 영양액 (표 1)의 질소농도를 기준으로 하여 40, 60, 80, 100, 120, 140%의 6수준으로 처리하고, 6반복으로 완전임의 배치하였다.

고추묘의 이식은 엽류 장애로 인한 뿌리활착 저해를 방지하기 위하여 이식후 1주까지는 영양액 대신 포트 당 물 3500 cm³를 공급하였다. 그리고 2주 후부터는 영양액을 50% 농도로 공급하였고, 3주 후부터는 100% 농도로 공급하였다. 재배기간 동안 영양액은 포

트가 설치된 상자내부에 공급하여 포트하단에서 상단으로 모관력을 이용하였다. 영양액 공급시기는 3-4일 주기로 교환하였으며 매 교환시기마다 잔류된 염류를 물로 충분히 세척하여 염류장해를 방지하였다. 영양액의 질소처리를 제외한 고추의 모든 재배조건은 동일하게 적용하여 120일간 생육하였다.

생장량 조사는 생체중, 건물중, 질소흡수량, 엽록소 함량, 고추 수확량을 조사하였다. 고추 생체량 시료는 포트 당 3주 중 이식후 30일과 40일에 각각 한 주를 채취하였고 나머지 1주는 계속 생육시켰다. 또한 이식후 80일째에 6반복 중 2반복의 고추 지상부를 채취하여 생체량을 조사하였고 나머지 4반복의 지상부 생체량은 120일째에 조사하였다. 고추 열매는 이식후 40일에 최초 수확하였고, 3-5일 마다 주기적으로 수확하고 합산하여 고추수량으로 생산량 평가에 이용하였다.

Table 1. 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 ₄
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
Na	6.57	NaCl

[†] N concentration varies according to the N treatment.

센서 종류별 특성 원격탐사 측정에 적용한 센서들은 SPAD-502와 Field ScoutTM의 엽록소 측정기 2종과 Spectroradiometer, Crop CircleTM 및 GreenSeekerTM 등 3종으로 고추 이식후 30, 40, 50, 80, 120일에 각각 측정하였으며 세부적인 특성은 다음과 같다.

SPAD-502 엽록소측정기 (Minolta)

이 측정기는 전자기복사선의 분광학적 특성을 활용하는 면에서 원격측정 센서들과 유사한 특성을 가지고 있는 비파괴 검정기이다. 측정부위는 잎의 2×3 mm 면적이며 측정하고자 하는 잎의 상, 하 양면을

센서로 접촉하여 잎의 부위가 외부와 차단된 상태로 650 nm 적색영역의 투과율을 대조기준인 근적외선 940 nm의 투과율에 대한 비율로서 측정한다. 잎의 엽록소 함량이 높을수록 적색광 650 nm의 흡수량은 증가되어 결국 투과율은 감소되는 측정원리를 가지고 있다. 엽록소 측정기는 질소 스트레스를 육안으로 탐지하기 이전에 보다 정밀하게 검출할 수 있는 능력을 가지고 있기 때문에 작물의 질소시비 관리에 많이 사용되어 왔다.

고추 잎에 대한 측정방법은 개체당 여러 개의 잎 중에서 완전엽으로 전개된 상위엽 5개를 선정하여 5회 반복으로 전체 25개 측정치를 이용하였다.

Field ScoutTM 엽록소측정기 (CM1000, Spectrum)

이 측정기는 미국 NASA에서 연구 개발된 것을 Spectrum Tech., Inc.에서 만든 엽록소 측정기로서 적색영역 700 nm와 근적외선 840 nm의 반사율을 측정하여 두 값의 차이를 이용하여 0부터 999사이로 나타낸다. 태양광의 복사선을 이용하는 소극적(passive) 원격탐사기기로서 측정 시 두개의 레이저 빔은 원뿔 형태의 직경 1.10-18.8 cm의 관측영역을 나타내며 측정유효거리는 29-183 cm를 갖는다.

측정방법은 SPAD 502 엽록소 측정기와 동일한 잎에 대하여 즉 완전엽으로 전개된 상위엽 5개를 선정하여 10회 이상 반복으로 전체 50개 측정치를 이용하였다.

분광방사계 (Spectroradiometer; LI-1800, LICOR Inc.)

이 측정기는 복사선의 반사율을 측정하는 것으로 340-1100 nm 범위에서 밴드폭을 1 nm 내외로 측정할 수 있다. 자연광을 사용하는 수동형 센서(passive sensor)이며 표준 반사판을 이용한 표준화 절차가 필요하고 주로 식물체 복사선의 반사율 특성을 이해하

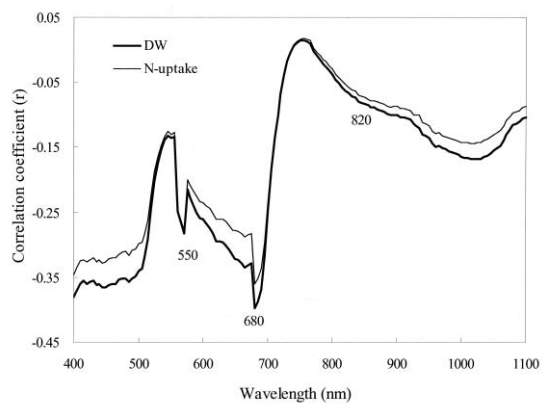


Fig. 1. Correlation coefficient between dry weight and N-uptake by red pepper and reflectance of the wavelength from 400 nm to 1100 nm.

기 위한 연구용으로 사용되고 있다.

고추 식물체 군락에 대한 측정은 포트표면에 빛을 흡수하는 검은색 판을 설치하여 사경재배 모래에 의한 반사간섭을 차단하였다. 측정시마다 흰색의 표준 반사판으로 표준화(normalization) 과정을 반복하였고, 340 nm에서 1100 nm까지 고추식물체 군락의 반사율을 3회 이상 측정하였다. 또한 이들 반사율 특성은 고추 건물중과 상호관계(그림 1)로부터 녹색밴드는 550 nm, 호박색밴드는 600 nm, 적색밴드는 700 nm, 근적외선 밴드는 830 nm를 선정하여 이들 반사율 측정치들로부터 식물생장지수 gNDVI, rNDVI, aNDVI를 각각 계산하여 생체량 평가에 적용하였다.

Crop Circle™ (Holland Scientific, Lincoln, Nebraska)

이 측정기는 작물 군락에 대한 복사선의 반사율을 측정하며, 일정범위의 전체파장을 연속해서 측정하는 Spectroradiometer와 달리 센서 하나로 4개의 복사선 영역, 녹색밴드 (550 nm), 호박색밴드 (600 nm), 적색밴드 (680 nm), 근적외선밴드 (820 nm)의 반사율을 측정한다. 이렇게 측정된 반사율은 식생지수로서 rNDVI, aNDVI, gNDVI 등으로 계산하여 평가에 적용하였다. 이 측정기는 자연광을 이용하는 수동형 센서로 광조건과 토양종류에 따라 반사광의 영향을 받는 문제 때문에 최근에는 인위적 광원을 이용하는 능동형 센서로 수정 보완되고 있다.

측정은 Spectroradiometer와 같은 방법으로 배경에 의한 반사간섭을 줄이고 표준화 과정을 수행하였으며 고추의 군락에 대하여 30회 이상 측정되도록 90cm 높이에 센서를 위치시키고 측정하였다.

GreenSeeker™ (Ntech Industries, Ukiah, California)

이 측정기는 Crop Circle™과 달리 폭 1cm, 길이 약 60 cm의 인공광을 이용한다. 이 측정기의 광원은 자연광과 구별되도록 변조(modulation)되어 방출되고 검출부에서는 변조된 광만을 검출하도록 설계되어 있다. 따라서 구름이나 기타 광 환경요인에 의한 영향에 관계없이 측정이 가능한 센서이다.

측정은 고추 군락 100 cm 높이에서 센서를 30회 이상 반복 측정되도록 매우 느리게 스캔하며 측정하였다.

엽록소 및 질소 분석방법 식물체의 엽록소함량 분석은 가장 최근 전개된 완전엽을 선정하여 직경 1 cm의 편칭으로 시료를 채취하여 Arnon's method로 측정하였다. Arnon's method에서 채취한 시료는 80% 아세톤 약 3 ml를 넣고 분쇄 후 아세톤을 가하여 10 ml로 맞추고, 3000 rpm에서 5분간 원심분리 후 상정액을 취하여 645 nm와 633 nm에서 흡광도(Hitachi model U-2000)를 측정하여 chlorophyll a+b의 양을

계산하였다.

채취된 식물체 시료는 70°C에서 건조 후 건물중을 측정한 후 분쇄하여 질소분석 시료로 사용하였다. 전 질소 함량은 분쇄된 식물체 시료 0.2 g을 100 ml 켈달플라스크에 넣고 여기에 진한 H₂SO₄ 5 ml와 분해 촉진제(K₂SO₄:3g+Se:15mg)를 넣고 block digester (Tecator 2040 digester)를 이용하여 370 에서 2시간 분해시킨 후 Kjeldahl 자동증류적정장치 (Tecator 1030 Analyzer)를 이용하여 측정하였다.

센서의 효율성 평가방법 질소스트레스에 의한 작물 생체량 변화를 예측할 수 있는 우수한 원격탐사 센서를 선별하기 위하여 질소수준별로 고추의 생산력 요인들과 원격탐사 센서의 반사율지수의 상관 및 회귀관계를 SAS 통계프로그램을 이용하여 분석하였다. 이러한 상관 및 회귀평가는 각각의 생육단계별로 수행하였고 또한 이식 후 120일째 수확기의 고추 수량과 건물중은 생육 중반기의 반사율지수와 상호관계를 평가하여 효율적인 측정시기를 구명하였다. 또한 효율적 측정시기의 반사율지수들은 최대값에 대한 비율로 나타내는 충족지수로 전환하여 수확기 고추 생체량과 상호관계를 평가하였다. 충족지수(sufficiency index)는 생체량 평가에 대한 측정값은 측정시차 혹은 환경변화에 의하여 변화되므로 절대지수가 아닌 상대지수 개념으로 옥수수의 시비량 추정등의 지수평가에 적용되는 방법이다(Schepers, 2001). 그리고 이들 반사율지수들의 충족지수는 질소 시비수준과 상호관계도 평가하여 시비수준의 예측 가능성을 조사하였다.

결과 및 고찰

고추 생장량 및 수량 영양액 질소농도 기준으로 40%에서 140%까지 6개 수준으로 처리한 고추의 생육 시기별 건물중과 잎의 질소흡수량은 표 2와 같다. 이식후 30일에서 120일까지 고추 지상부 잎과 줄기의 건물중은 질소 스트레스 처리에 의해 약 2.5배에서 4배의 차이를 보였고 질소흡수량은 3-4배의 차이를 보였다. 건물중과 질소흡수량의 평균과 중앙값은 큰 차이를 보이지 않아 종속변수의 변이분포는 정규분포에 가까운 것으로 생각되었다. 이러한 질소수준간의 건물중 및 질소흡수량은 원격탐사에 의한 반사율 지수와의 상호 관계분석에 활용 하였다.

원격탐사 반사율 지수에 의한 고추 생장량 평가

가시광 영역의 고추 반사율 특성

그림 2는 이식후 50일 spectroradiometer에 의해 측정된 질소시비 수준 40%, 80% 및 140% 조건의 고추 군락 반사율 변화를 가시광선 영역인 340 nm에서 적

Table 2. Variation of dry weight and amount of N-uptake affected by nitrogen stress.

Statistic	Dry weight				N-uptake by leaves			
	30th	40th	80th	120th	30th	40th	80th	120th
DAP [†]								
	----- g plant ⁻¹ -----				----- mg N plant ⁻¹ -----			
Min.	1.0	3.5	20	48	41	148	266	824
Max.	2.6	10.0	52	197	123	490	955	3399
Median	1.7	6.6	35	134	81	303	608	2375
Average	1.7	6.7	36	140	80	305	592	2566
SD [‡]	0.4	1.9	11	37	21	99	238	807
CV [§] (%)	23	28	31	28	26	33	39	34

[†] DAP : Day after planting

[‡] SD : Standard deviation

[§] CV : Coefficient of variation

외선 영역인 1000 nm 까지 비교한 것이다. 가시광선 영역(400-700 nm)의 반사율은 비교적 낮았으나 적색 영역인 700 nm 이후부터 근적외선 영역인 750 nm로 증가될수록 급속하게 증가되어 높아지는 반사율을 나타냈다. 특히 광합성작용에 크게 흡수되지 않는 녹색

광 영역의 반사율은 주로 흡수되는 청색이나 적색광 영역보다 약간 높아지는 전형적인 반사율 변화양상을 보였다(Daughtry et al., 1992). 질소 수준에 따른 반사율 특성을 비교해 볼 때, 청색에서 적색광 영역까지의 반사율은 질소 수준이 높을수록 감소되었으나 잎의 윗타리조직 치밀도와 관련되는(Schepers, 2001) 근적외선의 반사율은 질소 수준이 높을수록 증가되었다.

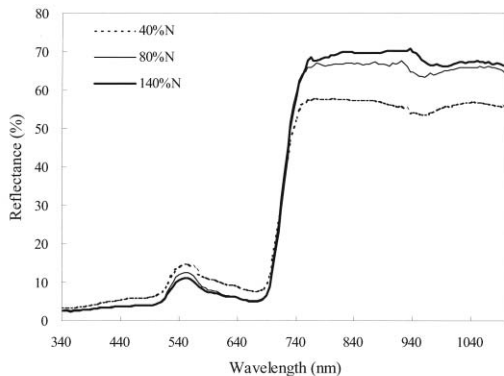


Fig. 2. Reflectance curve from 340 nm to 1100 nm for red pepper canopy on the different levels of nitrogen stress at the 50th DAP.

생육시기별 반사율 지수에 의한 생체량 평가

표 3과 표 4는 이식후 40일째와 80일째 지상원격탐사 센서에 의한 반사율 지수와 생체중, 건물중 및 질소흡수량 사이의 상관계수를 나타냈다. 고추의 생체중, 건물중 및 잎의 질소흡수량은 식생지수들과 유의성 있는 정의 상관을 보였으나 엽록소 함량과 SPAD-502의 엽록소 측정치는 유의하지 않았다. 이는 Schepers (2001)가 지적한 바와 같이 SPAD-502의 측정영역은 2×3 mm로 작은 영역에서 투과율을 측정하기 때문에 엽의 위치 및 측정부위에 의한 오차가 크기 때문으로 생각되었다. 따라서 고추 잎 전체에 대한 균락을 측정하는 원격탐사 센서들은 고추 지상부

Table 3. Correlation coefficient between fresh weight and dry weight of top part, N-uptake by leaves of red pepper and reflectance indices at the 40th DAP (n=36).

Sensor	Index	Fresh weight	Dry weight	N-uptake by leaves
Arnon method	Chlorophyll a+b	0.20	0.20	0.27
Chlorophyll meter	SPAD-502 reading	0.30	0.26	0.36*
Field Scout TM	CM1000 reading	0.64**	0.62**	0.64**
GreenSeeker TM	rNDVI	0.67**	0.71**	0.65**
Crop Circle TM	rNDVI	0.83**	0.81**	0.80**
Crop Circle TM	gNDVI	0.38*	0.33*	0.35*
Crop Circle TM	aNDVI	0.73**	0.69**	0.70**
Spectroradiometer	rNDVI	0.55**	0.57**	0.53**
Spectroradiometer	gNDVI	0.42*	0.37*	0.41*
Spectroradiometer	aNDVI	0.58**	0.56**	0.57**

* Significant at the 0.05 level

** Significant at the 0.01 level

Table 4. Correlation coefficient between fresh weight and dry weight of top part, yield, N-uptake by leaves of red pepper and reflectance indices at the 80th DAP (n=12).

Remote Sensor	Index	Fresh weight	Dry weight	Yield of pepper	N-uptake by leaves
Chlorophyll meter	SPAD-502 reading	0.49	0.52	0.36	0.67*
GreenSeeker™	rNDVI	0.61*	0.64*	0.32	0.70*
Crop Circle™	rNDVI	0.86**	0.84**	0.66*	0.83**
Crop Circle™	gNDVI	0.86**	0.84**	0.66*	0.88**
Crop Circle™	aNDVI	0.85**	0.78**	0.58*	0.79**
Spectroradiometer	rNDVI	0.61*	0.70*	0.48	0.82**
Spectroradiometer	aNDVI	0.38	0.52	0.34	0.66*

* Significant at the 0.05 level

** Significant at the 0.01 level

의 생육상태를 예측하는데 더 효율적이었다.

Spectroradiometer에 의한 반사율지수들은 고추 생체량 및 질소흡수량과 유의성 있는 상관을 보였으나 다른 원격탐사 반사율지수들에 비하여 이식후 40일째와 80일째에 상관계수는 일정하게 양호한 관계를 보이지 않았다. 이는 전용 센서인 다른 지수들보다 측정반복이 적었기 때문으로 생각되었다.

원격탐사 센서들 중에서 Crop Circle™에 의한 반사율지수들은 가장 양호한 상관계수를 보였으며, 특히 rNDVI와

aNDVI는 상관계수 0.8 이상으로 고도로 유의성 있는 정 상관을 보였다. 이러한 결과는 옥수수 생장량을 예측 평가한 다른 연구들 (Gitelson, 1996; Shanahan et al., 2001; 홍 등., 2003)과 비슷한 경향이었다.

생육 중반기 반사율 지수에 의한 수확기 고추 생체량 평가

표 5는 수확기인 이식후 120일째 고추수량, 건물중 그리고 잎의 질소흡수량과 각 생육시기별로 측정된

Table 5. Correlation coefficient between yield, dry weight of top part and N-uptake by leaves of red pepper at the 120th DAP and reflectance indices at the different growth stage.

DAP	Indices & Sensors	at the 120th day after planting		
		Yield	Dry weight	N-uptake by leaves
40th	SPAD-502	0.49*	0.63**	0.64**
	Field Scout™	0.40	0.58**	0.62**
	rNDVI by GreenSeeker™	0.50*	0.59**	0.64**
	rNDVI by Crop Circle™	0.67**	0.73**	0.73**
	aNDVI by Crop Circle™	0.73**	0.71**	0.75**
	rNDVI by Spectroradiometer	0.77**	0.82*	0.86*
50th	SPAD-502	0.32	0.49*	0.62**
	Field Scout™	0.60**	0.69**	0.80**
	rNDVI by GreenSeeker™	0.22	0.36	0.39
	rNDVI by Crop Circle™	0.61**	0.70**	0.73**
	aNDVI by Crop Circle™	0.66**	0.74**	0.78**
	rNDVI by Spectroradiometer	0.55	0.68*	0.70*
80th	SPAD-502	0.50*	0.68**	0.81**
	rNDVI by GreenSeeker™	0.57**	0.70**	0.68**
	rNDVI by Crop Circle™	0.77**	0.85**	0.87**
	aNDVI by Crop Circle™	0.80**	0.89**	0.91**
	rNDVI by Spectroradiometer	0.55**	0.59**	0.72**
	aNDVI by Spectroradiometer	0.57**	0.63**	0.74**
120th	rNDVI by GreenSeeker™	0.27	0.48*	0.47*
	rNDVI by Crop Circle™	0.44*	0.61**	0.55**
	gNDVI by Crop Circle™	0.45*	0.72**	0.71**
	aNDVI by Crop Circle™	0.48*	0.70**	0.69**

* Significant at the 0.05 level

** Significant at the 0.01 level

지상원격탐사 반사율지수와 상관계수를 나타낸 것이다. 수확기인 이식후 120일째 측정된 반사율지수는 고추의 수량 구성요인들과의 상관계수가 생육중반기에 측정된 지수들보다 오히려 낮았다. 각 생육단계별로 조사된 모든 지수들은 고추 수량구성요인들과 유의성 있는 상관을 보였으나 그 중에서도 Crop Circle™에 의한 반사율지수들은 고추 수량구성요인들과 가장 양호한 상관계수를 보였으며 생육시기별로는 이식후 80일째 반사율지수가 가장 양호하였다. 이러한 관계는 고추의 생육중반기에 원격탐사 검정으로 고추의 최종 생산력을 평가할 수 있으며, 또한 이들 지수를 이용하여 고추의 질소 덧거름 시비량을 추정하는데 활용될 수 있음을 시사하고 있다. 즉 이식후 80일째의 원격탐사에 의한 반사율 지수들은 고추 수량의 예측 및 질소 덧거름 시비량 결정을 위한 유효지수로 활용 가능함을 보여주고 있다.

그림 3은 고추 정식후 80일째 측정된 반사율지수와 고추 잎의 질소흡수량의 상호관계를 나타낸 것이다. Crop Circle™ 센서의 반사율지수인 rNDVI와 aNDVI는 GreenSeeker™의 rNDVI보다 질소흡수량을 78%에서 83%까지 설명할 수 있었다.

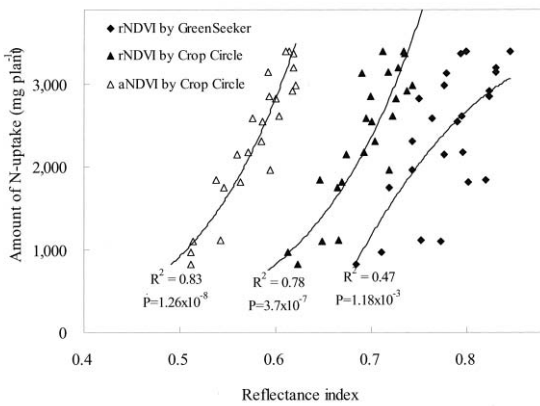


Fig. 3. Relationship between the amount of N uptake by leaves of red pepper at the 120th DAP and reflectance indices at the 80th DAP.

그림 4는 고추 잎의 질소흡수량과 양호한 관계를 보였던 Crop Circle™에 의한 이식후 80일째의 aNDVI와 이식후 120일째 고추의 지상부 건물중의 상호관계를 나타낸 것이다. 건물중의 증가에 따른 aNDVI의 변화는 곡선적으로 증가하는 2차 회귀식의 관계를 보였으며 이 회귀식에서 수확기 고추 건물중은 이식후 80일째 원격탐사 반사율지수에 의하여 79%를 설명하는 양호한 관계를 보였다.

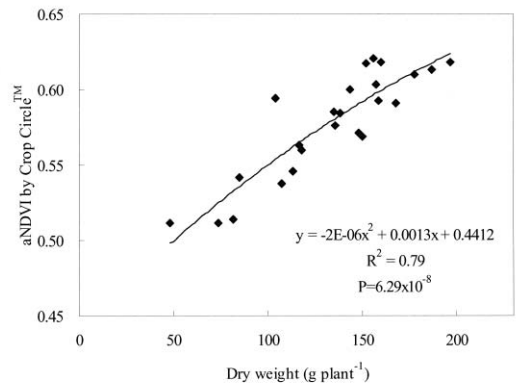


Fig. 4. Relationship between dry weight of top part of red pepper at the 120th DAP and aNDVI by Crop Circle™ at the 80th DAP.

생육 중반기 반사율 지수에 의한 질소 시비수준 예측 그림 5는 이식후 80일째 Crop Circle™ 센서의 aNDVI를 충족지수로 환산하여 120일째의 고추 건물중과의 회귀관계를 나타낸 것이다. 충족지수는 반사율지수의 상대적인 측정치로서 최대지수 값에 대한 비율로, 즉 상대비율로 표현하여 유효지수의 활용성을 높이는 방법이다. 그림 4와 동일한 경향으로 aNDVI에 의한 충족지수의 증가에 따른 고추 건물중의 변화는 곡선적으로 증가되는 2차 회귀식의 관계를 보였으며 aNDVI에 의한 충족지수는 수확기 건물중을 79% 설명하는 관계를 보였다.

질소 시비수준에 따른 고추의 지상부 건물중의 상호관계를 그림 6에 나타냈다. 고추 건물중은 영양액 질소 시비수준이 높아질수록 증가되며 100% 이상 수준에서 포화되는 곡선적인 2차 회귀식($R^2=0.73$)의 관계를 보였다. 유사한 방법으로 그림 7은 질소 시비수준에 따른 이식후 80일째 aNDVI의 충족지수의 상호관계를 나타냈다. 질소 시비수준에 따른 건물중의 관계와 유사하게 시비수준이 증가할수록 aNDVI뿐 아니라 aNDVI의 충족지수도 증가되며 질소 시비수준

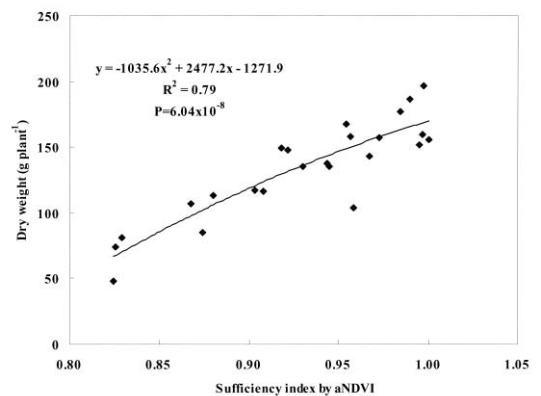


Fig. 5. Relationship between dry weight of top part of red pepper at the 120th DAP and sufficiency index by aNDVI at the 80th DAP.

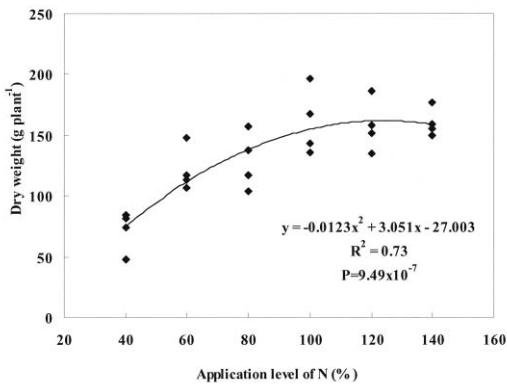


Fig. 6. Relationship between dry weight of top part of red pepper at the 120th DAP and application level (%) of N.

100% 이상에서 포화상태에 도달되는 곡선적인 2차 회귀식($R^2=0.79$)의 관계를 보였다. 이러한 결과는 이식후 80일째 aNDVI의 충족지수로 질소의 시비수준을 79% 예측할 수 있음을 시사하고 있다. 따라서 고추 이식후 80일째 원격탐사 검정은 고추의 질소 시비수준을 효율적으로 예측하며 궁극적으로 고추의 질소비료 덧거름 시비량을 추천하기 위한 효율적 지수로 활용 가능성을 보여 주었다.

이와 같이 지상부 원격탐사 센서를 이용한 반사율 지수는 비파괴적이고 실시간으로 작물의 생육 상태를 파악하여 적기 적량의 질소시비량 결정이 가능하고, 질소의 이용효율을 높여 질소의 과다사용을 방지함으로써 환경오염을 방지할 수 있는 친환경농업의 실천 도구로 활용할 수 있는 것으로 생각되었다.

요 약

지상 원격탐사 센서를 이용하여 질소 스트레스에 의한 고추의 생체량을 평가하기 위하여 사경제배를 이용한 포트실험을 수행하였다. 고추의 질소 스트레스 처리는 Hoagland 영양액 질소농도를 기준으로 40%에서 140% 까지 20% 간격으로 6개 수준으로 하였다. 고추는 이식후 120일 동안 생육시켰고 지상부의 생체중과 건물중, 잎의 질소흡수량과 엽록소 함량 그리고 수량을 조사하였다. 지상 원격탐사의 센서종류는 SPAD-502(Minolta)와 Field ScoutTM(CM1000, Spectrum) 엽록소 측정기, Spectroradiometer(LI-1800, Licor Inc.), Crop CircleTM(Holland Scientific), 그리고 GreenSeekerTM(Ntech Industries)를 사용하였다. 이식후 120일째 고추의 지상부 건물중은 48.2 g/plant에서 196.6 g/plant로 큰 차이를 보였으며 변동계수는 27.8%였다. 이식후 40일, 50일 및 80일째 각 생육시기에서 원격탐사 반사율 지수들은 고추의 지상부 생체중 및 건물중과 유의성 있는 정의 상관을 보였으며,

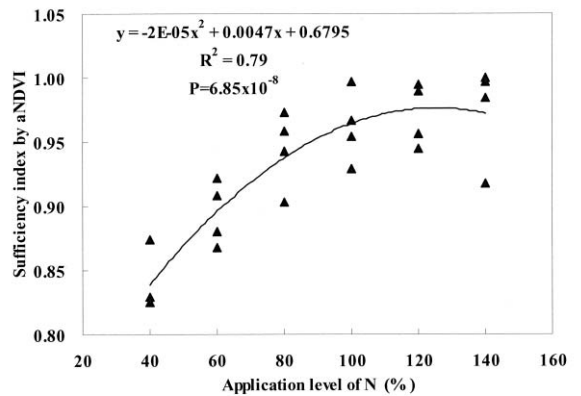


Fig. 7. Relationship between application level of N(%) and sufficiency index by aNDVI at the 80th DAP.

특히 Crop CircleTM에 의한 반사율 지수들이 가장 양호한 상관계수를 보였다. 또한 고추 수확기인 이식후 120일째 고추수량, 지상부 건물중, 그리고 잎의 질소흡수량은 생육중반기 원격탐사 센서의 반사율 지수들과 유의성 있는 정의 상관을 보였고, 특히 이식후 80일째 측정된 Crop CircleTM의 aNDVI는 가장 양호한 상관계수를 보였다. 이러한 결과로부터 이식후 80일째 aNDVI는 수확기 고추의 생체량 및 질소 시비수준을 신뢰성 있게 예측할 수 있었다.

따라서 비파괴 실시간 지상원격 탐사 반사율 지수는 고추의 생육중반기 질소관리를 위한 효율적 도구로 활용 가능할 것으로 생각되었다.

사 사

이 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

인 용 문 헌

- Arnon, D.J. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidases in *Beta vulgaris*. Plant Phys. 24:1-15.
- Avery, T. E. and G. L. Belin. 1992. Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation. 5th ed. Macmillan, New York.
- Blackmer, T. M., J. S. Schepers, and G. E. Meyer. 1995. Remote sensing to detect nitrogen deficiency in corn. p. 505-512. In P.C. Robert, R.H. Rust and W.E. Larson (ed.) Proc. of Site-Specific Management for Agric. Systems, Minneapolis, Minn, 27-30 March 1994. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.
- 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.
- Carlson, T. N., W. J. Capehart, and R. R. Gillies. 1995. A new look at the simplified method for remote sensing of daily evapotranspiration. Remote Sens. Environ. 54 : 161-167.
- Cater, G. A. and A. K. Knapp. 2001. Leaf optical properties in

- higher plants: Linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *Am. J. Bot.* 88 : 677-684
- Dalal, R. C. and R.J. Henry. 1986. Simultaneous determination of moisture, organic carbon and total nitrogen by near infrared reflectance spectrophotometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50 : 120-123.
- 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
- Flowers, M. Randall, W., Ronnine, H., Barry, T., and A. Meijer. 2003. Field validation of a remote sensing technique for early nitrogen application decision in wheat. *Agron. J.* 95 : 167-176
- 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.
- Gitelson, A. A., M.N. Merzlyak, and H. K. Linchtenthaler. 1996. Dictation of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. *J. Plant Physiol.* 148 : 501-508.
- Gitelson, A. A., M.N. Merzlyak, and O. B. Chivkunova. 2001. Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content plant leaves. *Photochem. Photobiol.* 74 : 38-45.
- 홍순달. 2003. 지상원격탐사에 의한 질소시비의 효율적인 관리. 한국토양비료학회. 추계 학술발표회 논문초록집. 23-45.
- Hussain, F., K. F. Bronson, Y. Singh, Bijay-singh, and S. Peng. 2000. Use of Chlorophyll Meter Sufficiency Indices for Nitrogen Management of Irrigated Rice in Asia. *Agron. J.* 92 : 875-879.
- Jackson, R. D. 1984. Remote sensing of vegetation characteristics for farm management. *SPIE* 475 : 81-96.
- Kevin, 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.
- 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.
- Moran, S.M., S.J. Maas, and P.J. Pinter. 1995. Combining remote sensing and modeling for estimating surface evaporation and biomass production. *Remote Sensing Reviews.* 12 : 335-353.
- Osborne, S. L., J. S. Schepers, D. D. Francis, and M. R. Schlemmer. 2002. Use of spectral radiance to estimate in season biomass and grain yield in nitrogen- and water- stressed corn. *Crop Sci.* 42 : 165-171
- Penuelas, J., I. Filella, P. Lloret, F. Munoz, and M. Vilajeliu. 1995. Reflectance assessment of mite effects on apple trees. *Int. J. Remote Sens.* 16 : 2727-2733.
- Read, J. J., L. Tarpley, J.M. Mckinion, and K.R. Reddy. Narrow - Waveband Reflectance Ratios for Remote Estimation of Nitrogen Status in Cotton. 2002. *J. Environ. Qual.* 31 : 1442-1452.
- 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.
- Rondeaux, G., M. Strven, and F. Baret. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 55 : 95-107
- Schepers, J. S., T. M. Blackmer, and D. D. Francis. 1998. Chlorophyll meter method for estimating nitrogen content in plant tissue. In Y.P. Kalra (ed.) *Handbook of reference methods for plant analysis.* P. 129-135. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Schepers, J. S. 2001. Practical applications of remote sensing. Conference proceedings of InfoAg, August 7-9, Indianapolis.
- Shanahan, J. F., J. S. Schepers, D. D. Francis, G. E. Varvel, W. W. Wilhelm, J. M. Tringe, M. K. Schlemmer, and D. J. Major. 2001. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agron. J.* 93 : 583-589.
- Singh, B., Y., Singh, J. K., Ladha, K. F. Bronson, V. Balasubramanian, J. Singh, and C. S. Khind. 2002. Chlorophyll Meter- nad Leaf Color Chart-Based Nitrogen Management for Rice and Wheat in Northwestern India. *Agron. J.* 94 : 821-829.
- Stephan J. M. 1998. Estimating cotton canopy ground cover from remotely sensed scene reflectance. *Agron. J.* 90 : 384-388.
- Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8 : 127-150.
- Wang, K., Z. Q. Shen, and R. C. Wang. 1998. Effects of N nutrition on the spectral reflectance characteristics of rice leaf and canopy. *J. Zhejiang Agric. Univ.* 24 : 93-97.
- 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.
- 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.