

## 지상 원격측정 센서를 활용한 벼의 생체량과 질소 흡수량 추정

공효영 · 강성수<sup>1</sup> · 홍순달\*

충북대학교 환경생명화학과, <sup>1</sup>국립농업과학원

### Estimation of Nitrogen Uptake and Biomass of Rice (*Oryza sativa* L.) Using Ground-based Remote Sensing Techniques

Hyo-Young Gong, Seong-Soo Kang<sup>1</sup>, and Soon-Dal Hong\*

Department of Environmental & Biological Chemistry, Chungbuk National University, Cheongju, 361-763, Korea

<sup>1</sup>National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, 441-707, Korea

This study was conducted to evaluate the usefulness of ground-based remote sensing for the estimation of rice yield and application rate of N-fertilizer during growing season. Dongjin-1, Korean cultivar of rice was planted on May 30, 2006 and harvested on October 9, 2006. Chlorophyll content and LAI (leaf area index) were measured using Minolta SPAD-502 and AccuPAR model LP-80, respectively. Reflectance indices were determined with passive sensors using sunlight and four types of active sensors using modulated light, respectively. Reflectance indices and growth rate were measured three times from 29 days to 87 days after rice plating and at harvesting day. The result showed that values of growing characteristics and reflectance indices were highly correlated. Growing characteristics to show significant correlation with reflectance indices were in order of followings: fresh weight > N uptake > dry weight > height > No. of tiller > N content. Chlorophyll contents measured by chlorophyll meter (SPAD 502) showed high correlation with nitrogen concentration ( $r=0.743^{**}$ ), although the correlation coefficients between remote sensing data and nitrogen concentration were higher. LAI was highly correlated with dry weight ( $r=0.931^{**}$ ), but relationship between LAI and nitrogen concentration ( $r=0.505^*$ ) was relatively low. The data of CC-passive sensor were negatively correlated with those of the near-infrared. NDVI correlation coefficients found more useful to identify the growth characteristics rather than data from single wavelength. Both passive sensor and active sensor were highly significantly correlated with growth characteristics. Consequently, quantifying the growth characteristics using reflectance indices of ground-based remote sensing could be a useful tool to determine the application rate of N fertilizer non-destructively and in real-time.

**Key words:** Biomass, Ground-based remote sensor, NDVI, Nitrogen uptake, Rice

## 서 언

작물의 질소요구량과 토양의 질소 공급능력을 합리적으로 관련지어 해석하는 것은 질소 시비량 관리에 있어서 핵심요인이며 작물의 질소요구량을 파악하여 질소투입을 최적화하는 것이 작물에 바탕을 둔 질소관리방안의 초점이 된다. 작물을 바탕으로 하여 질소관리를 효율적으로 수행하기 위해서는 작물의 질소부족을 용이하게 검출할 수 있어야 하고 아울러 수확량 감소요인이 발생되기 전에 작물 스트레스를 복원하는 기술이 있어야 한다. 따라서 작물을

바탕으로 하여 질소를 효과적으로 관리하기 위해서는 질소 스트레스 검출과정이 현실적이고 적시에 이루어져야 하며, 스트레스 검출 후 복원처리가 짧은 시간에 이루어져야 한다. 작물을 바탕으로 한 질소 스트레스 검출은 최대 질소 흡수 기간 (6월 중순에서 8월 초) 동안에 무기화작용과 질소 손실을 평가함으로써 가능하며, 수량의 증감여부는 재배기간 종료 후에 평가할 수 있다. 작물을 바탕으로 한 질소관리법은 과량의 강우로 질소 손실이 많을 때 수량 손실을 최소화하기 위하여 공간적으로 질소 시비량을 결정하는데 이용될 수 있다. 특히, 화학비료 대신 퇴구비를 이용하는 경우에 작물을 바탕으로 한 질소관리법이 효과적으로 이용될 수 있는데, 이는 퇴구비의 질소 무기화작용에 의한 무기태 질소로의 변환과정 및 양분이동이 작물의 질소요구와 잘 일치되지 않을 수 있기 때문이다.

접수 : 2011. 9. 7 수리 : 2011. 10. 18

\*연락처 : Phone: +82432612564

E-mail: sdhong@chungbuk.ac.kr

경작지 포장에 대한 질소농도의 공간적 변이를 평가하기 위하여 엽록소 측정기 (SPAD), 컬러사진, 혹은 근적외선 반사율 요인들이 평가기술로 개발되었다 (Blackmer and Schepers, 1996; Blackmer et al., 1993, 1994, 1996a, 1996b; Schepers, 1996; Schepers et al., 1992; 1996). 이 평가기술은 동일 포장에 적정하게 시비된 처리구에 대한 이외 처리구의 상대적 비율값로부터 얻은 자료들을 기초로 하여 평가하기 때문에 양분농도와 작물 반사도 사이의 관계, 정밀 센서의 표준화, 자료들을 표면 반사율 요인들로 전환하는 필요성 등의 사전 지식에 대한 습득을 요구하지 않는다. Bausch and Duke (1996)은 관수조건에서 옥수수 작물의 녹색 및 근적외선 반사율로부터 질소 반사율 지표 (NRI)를 개발하였다. 이 NRI는 엽록소 측정기 자료로부터 계산한 질소 총족지수와 밀접한 상관을 보이며 옥수수 식물의 질소상태에 대한 신속한 평가가 가능하였다. 또한 재배 중 식물의 질소상태를 평가하는 NRI를 이용한 최근 연구에서 곡물 수량의 감소 없이 39 kg N kg<sup>-1</sup>의 질소 시비량을 줄이는 결과가 보고되었다 (Bausch and Diker, 2001).

원격측정은 조사개체인 식물생체량의 파괴나 손실 없이 생육 초기에 양분결핍을 진단할 수 있으며 변량시비와 연결될 경우 양분 이용율을 개선시키고 지표수와 지하수 자원의 오염을 경감시키는 필지별 시비방법으로 활용할 수 있다 (Schepers and Francis, 1998). Al-Abbas et al. (1974)은 온실 조건의 양분스트레스 연구에서 무기양분 결핍으로 가시광선 영역의 반사율은 증가된 반면 근적외선 (NIR)과 중적외선 (middle-infrared) 영역의 반사율은 특정무기양분에 따라 변화한다고 하였고, Walburg et al. (1982)은 질소시비량을 4수준으로 처리한 옥수수 포장시험에서 질소시비량이 적어질수록 적색 파장의 반사율은 증가하고 근적외선 파장의 반사율은 감소되었다고 하였다. 그리고 적색 파장의 반사율에 대한 근적외선 파장 반사율의 비율 (RVI)은 질소시비량과 직접적으로 관련되어 있다고 하였으며 Jackson et al. (1981)도 사탕수수의 질소결핍 조건에서 유사한 결과를 보고하였다. 미국 오콜라호마의 연구자들은 NIR과 Red 파장의 입사량과 반사량을 동시에 측정하는 spectroradiometer를 개발하여 측정하였고 측정된 반사율 지표 NDVI는 질소 흡수량, 생체량, 수량과 관련이 있었다고 하였다. Ma et al., (2001)은 지상으로부터 2 m 높이에서 생육중 콩 (*Glycine max*, L)의 반사율을 측정하여 NDVI 지표로 콩의 수량을 예측하였다.

국내의 active 센서를 이용한 연구는 Kim et al. (2006)이 온실조건에서 지상 원격 탐사 센서의 반사율 지표를 이용한 고추의 생체량을 추정하였고, Jung et al. (2006)은 passive와 active 방식의 지상 원격탐사 센서의 유효탐사거리에 대해 조사하여 보고하였다.

본 연구는 비파괴, 비접촉 지상원격측정 센서들의 지표를 활용하여 질소 시비 수준에 따른 벼의 생체량과 질소 흡수량을 추정하고자 수행하였다.

## 재료 및 방법

**재배방법** 공시작물을 벼 (*Oryza sativa* L.) 품종 동진 1호로 하였고, 시험 장소는 충청북도 청원군 내수읍 원동리 소재 논 포장에서 하였다. 이앙은 2006년 5월 30일에 수확은 10월 9일에 하였으며 재식밀도는 30×15 cm로 두었다. 질소시비수준은 제4종 복합비료로 0, 55, 82.5, 110, 137.5 kg N ha<sup>-1</sup>의 5수준과 요소 110 kg N ha<sup>-1</sup>로 1수준을 추가하여 난괴법 3반복으로 배치하였다. 시비량의 50%는 밑거름으로, 20%는 분얼기에, 20%는 유수분화기에, 10%는 등숙기에 웃거름으로 시비하였다. 인산, 칼리, 규산의 시비량은 토양검정에 의해 각각 92 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, 83 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>, 60.5 kg SiO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> 시비량으로 모든 처리에 동일하게 처리하였다. 시험포장의 토성은 양토로 모래, 미사 점토의 함량은 35.7, 24.4, 39.9%였다 (Table 1). 화학적 특성은 작물별 시비처방기준 (NIAS, 1999)의 벼 재배에 적합한 토양화학성 기준과 비교하여 볼 때 약산성을 띠고 있었으며 유기물과 유효인산함량은 낮은 편이었고 유효규산, 칼륨, 칼슘, 마그네슘은 벼 재배에 적절한 수준이었다. 제4종 복합비료의 성분 분석결과는 질소, 인산, 칼륨의 함량이 각각 11.8%, 26.0%, 5.53%이었다.

**생체량 조사 및 질소 분석방법** 잎의 질소함량, 건물중, 생체중, 초장, 분얼수는 무효분얼기인 이앙 후 38일째 (7월 7일), 수잉기인 63일째 (8월 1일), 출수기와 등숙기 사이인 87일째 (8월 25일)에 3차례에 걸쳐 생육조사를 하였다. 수량과 수량구성요소는 10월 9일에 처리구당 7주씩 채취하여 수확 후 생체중, 건물중, 지상부 전질소함량, 질소 흡수량을 조사하였다. 수량은 23주를 취하여 38°C에서 30시간 건조한 후 탈곡한 정조중으로 조사하였고 단위면적당

Table 1. Physico-chemical properties of experimental soil.

soil texture	pH	EC	OM	Avail. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Avail. SiO <sub>2</sub>	Exch. Cation			
						K	Ca	Mg	Na
loam	(1:5)	dS m <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	----- mg kg <sup>-1</sup> -----	-----	----- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----			
	5.7	0.26	12.60	26	102	0.34	4.38	1.92	0.15

이삭수, 한이삭당 벼알수, 등숙비율, 벼알무게를 측정하였다 (박광호 등, 1998). 초장은 지면으로부터 최장엽 선단까지의 길이를 측정하였고, 주간을 포함하지 않은 2엽 이상 출현된 분얼수를 5주 측정하여 평균하였다 (RDA, 2003).

건물중을 측정된 식물체 시료를 분쇄기로 곱게 갈아 전질소 분석용 시료로 조제하였다. 전질소 함량은 식물체 시료 0.2 g을 100 ml 켈달플라스크에 넣고 진한 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5 ml와 분해촉진제를 넣고 block digester (Tecator 2040 digester)를 이용하여 370°C에서 2시간 분해한 후 Kjeldahl 자동증류 적정장치 (Tecator 1030 Analyzer)를 이용하여 측정하였다.

**센서 종류별 특성 및 측정방법** 비파괴적이나 접촉형의 엽록소 측정기인 SPAD-502, 엽면적지수를 측정하는 PAR/LAI Ceptometer (AccuPAR model LP-80), 그리고 지상 원격측정센서인 Crop Circle-passive, Crop Circle-amber & red 센서와 GreenSeeker-red & green 센서로 이앙 후 29, 38, 44, 52, 63, 70, 87일째에 반사율지표를 측정하였다.

SPAD-502 Chlorophyll meter (Minolta) 잎의 엽록소 함량이 높을수록 적색광 650 nm의 흡수량은 증가되어 결국 투과율은 감소되는 측정원리를 가지고 있다. 벼에 대한 측정방법은 완전엽으로 전개된 3개를 선정하여 4회 반복측정한 평균치를 이용하였다.

PAR/LAI Ceptometer (AccuPAR model LP-80) 400에서 700 nm 범위에 있는 광합성에 유효한 광량을 측정한다. 상향센서와 하향센서로 구성되어 있는데 상향센서는 벼 군락의 간섭을 받지 않도록 태양광의 입사량을 측정하고 하향센서인 측정봉을 벼의 주간 중앙 아래에 평행계를 이용하여 수평으로 맞추고 처리구당 2회 측정하여 평균하였다.

Crop Circle™ (Holland Scientific, Lincoln, Nebraska)-passive 표준반사판으로 표준화 과정을 한 후 벼 군락과 센서간의 거리를 80 cm로 유지하면서 스캐닝하여 측정된 약 400개의 반사율 데이터로부터 rNDVI, aNDVI, gNDVI의 식생지수를 계산하여 평가에 이용하였다.

Crop Circle ACS-210 active sensor (Holland Scientific) 센서의 진행방향에 수직으로 모듈레이션 (modulation)된 LED (light-emitting diode)광을 방출하고 검출부에서 자연광과 구별하여 모듈레이션 (modulation)된 반사광을 검출하여 지표값을 나타낸다. 벼 캐노피 위 80 cm 높이에서 스캐닝하여 측정하였으며 관측영역의 폭은 46 cm이었다.

GreenSeeker active sensor (Ntech industries, Inc.) Crop Circle™과 달리 폭 1 cm, 길이 약 60 cm의 인공광을 이용

한다. 광원은 자연광과 구별되도록 변조 (modulation)되어 방출되고 검출부에서는 변조된 광만을 검출하도록 설계되어 있다. 따라서 구름이나 기타 광 환경요인에 의한 영향에 관계없이 측정이 가능한 센서이다. 벼 캐노피 위 90 cm 높이를 유지하면서 스캐닝하여 측정된 500개 이상의 데이터를 평균하여 활용하였다.

**센서의 효율성 평가방법** 질소스트레스에 의한 작물 생체량 변화를 예측할 수 있는 우수한 원격탐사 센서를 선별하기 위하여 질소수준별로 벼의 생산력 요인들과 원격탐사 센서의 반사율지수의 상관 및 회귀관계를 SAS 통계프로그램을 이용하여 분석하였다. 이러한 상관 및 회귀관계는 각각의 생육단계별로 평가하였고 벼 수량과 수확기 건물중, 생체중, 지상부질소농도, 초장, 분얼수 및 질소흡수량을 생육 중반기에 측정된 반사율지표로 평가하여 수량예측 시기 및 방법을 평가하였다.

## 결과 및 고찰

**질소 시비수준별 생장량 및 질소 흡수량** 질소수준을 0, 55, 82.5, 110, 137.5 kg N ha<sup>-1</sup> 5개 수준으로 처리한 벼의 측정시기별 건물중, 지상부의 전질소함량, 질소 흡수량은 Table 2와 같다. 이앙 후 38일에서 87일에 걸쳐 건물중 및 지상부의 전질소함량은 질소 스트레스에 의해 약 1.5배에서 2.5배의 차이를 보였고 질소흡수량은 3-4배의 차이를 보였다. 지상부의 전질소함량은 생육시기가 지나면서 감소하며 건물중, 질소흡수량은 생육시기에 따라 증가하는 추세를 보였다. 평균과 중앙값은 87일째에서 차이가 있었으며 그 중에서 건물중, 질소흡수량에서 차이를 보였으며 다른 생장량에서는 큰 차이가 없었다. 변이계수는 생육시기별로 건물중은 23-31%, 지상부의 전질소함량은 11-15%, 질소흡수량은 33-41%의 범위를 각각 보였다. 이러한 질소수준간의 초장, 분얼수, 생체중, 건물중, 지상부의 전체 질소함량, 질소흡수량은 원격탐사에 의한 반사율 지표와의 상호 관계분석에 이용하였다.

벼의 수확 후 생체중, 건물중, 지상부의 전질소함량, 질소흡수량, 수량은 Table 3과 같다. 생체중, 건물중, 지상부의 전질소함량, 질소흡수량, 수량은 질소 스트레스에 의해 약 1.5배에서 2.5배의 차이를 보였다. 평균과 중앙값은 질소흡수량과 수량에서 차이를 보였으며 다른 생장량에서는 큰 차이가 없었다. 변이계수는 생체중은 23%, 건물중은 20%, 지상부의 전질소함량은 13.1%, 질소흡수량은 31%, 수량은 25%였다. 이러한 질소수준간의 생체중, 건물중, 지상부의 전질소함량, 질소흡수량, 수량은 각 생육시기별로 측정된 원격탐사에 의한 반사율 지표와의 상관 및 회귀 분석을 하여 벼의 질소시비량을 결정할 수 있는 critical

season을 탐색하는데 활용 하였다. Figure 1은 질소 시비 수준에 따른 벼의 수량의 반응을 회귀 관계로 나타낸 것이다. 질소수준이 증가함에 따라 수량이 증가하는 2차 회귀 곡선관계를 보였고, 수량의 변동량의 84%는 질소시비수준에 의한 것으로 설명할 수 있었다.

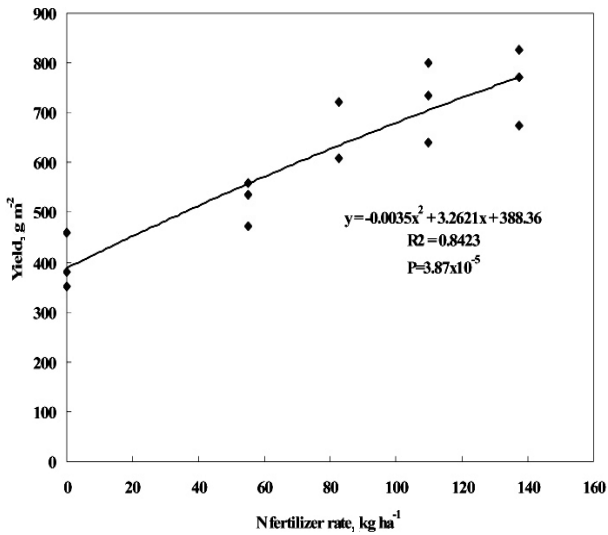


Fig. 1. Relationship between application level of nitrogen and yield of rice.

**생육 단계별 반사율 지표에 의한 생장량 평가** Table 4, 5, 6은 지상원격탐사 센서에 의한 이앙 후 38일째, 63일째, 87일째의 반사율 지표들과 초장, 분얼수, 생체중, 건물중, 지상부 전질소함량 및 질소흡수량 사이의 상관계수를 나타내었다. Crop Circle-passive의 가시광선 반사율인 Green reflectance, yellow reflectance, red reflectance와 생장량과는 부의 상관을 보였으며, 그 외의 지표들과는 정의 상관을 보였다. 이러한 이유는 식물이 성장하는 과정에 있어 식물체내 엽록소는 병충해나 영양분의 불균형 및 수분 스트레스로 인하여 생산량이 감소한다. 따라서 엽록소는 청색과 적색영역을 낮게 흡수하고 녹색파장 영역에서 높은 반사가 일어나게 된다 (Shin et al., 2003). 그러므로 식생이 발달할수록 반사율은 감소하게 된다. 그리하여 가시광선 파장대의 반사율은 부의 상관을 갖게 된다. 사용된 센서들 모두 전반적으로 생체중, 건물중 질소농도와 고도로 유의성 있는 상관을 보였다. 표 4에서 지상 원격측정센서의 반사율 지표값 중 상관계수가 전반적으로 높은 GreenSeeker-red의 지표값인 rNDVI와 생장량 특성간의 상관계수 크기는 생체중, 질소흡수량, 건물중, 초장, 분얼수, 지상부 전질소함량 순이었다. 63일째 반사율 지표와 생육특성과의 상관계수를 나타낸 Table 5에서 앞의 녹색도 측정기인 Chlorophyll meter (SPAD 502)는 상대적으로 다른 생육 특성치들에 비해 지상부질소농도와 높은 상관 ( $r=0.743^{**}$ )

Table 2. Variation of growth characteristics on growth stage.

Statistic	Dry Weight			N concentration in plant			N-uptake		
	38th	63rd	87th	38th	63rd	87th	38th	63rd	87th
	----- g plant <sup>-1</sup> -----			----- g plant <sup>-1</sup> -----			----- g plant <sup>-1</sup> -----		
Min.	3.2	10.9	23.3	1.66	0.96	0.68	55	114	168
Max.	10.1	23.2	58.7	2.45	1.71	1.13	249	369	663
Average	6.0	17.2	38.3	2.00	1.22	0.87	122	213	345
SD <sup>†</sup>	1.9	3.9	9.6	0.21	0.16	0.13	50	70	132
CV <sup>‡</sup>	31.2	22.6	25.1	10.75	13.15	14.60	41	33	38

<sup>†</sup>SD : Standard Deviation.

<sup>‡</sup>CV : Coefficient of variation.

Table 3. Variation of growth characteristics on harvest stage.

Statistic	Fresh weight	Dry weight	N concentration	N-uptake	Yield
	----- g m <sup>-2</sup> -----		%	mg plant <sup>-1</sup>	g m <sup>-2</sup>
Min.	945	389	0.4	66	351.4
Max.	2215	731	0.6	167	842.8
Average	1497	553	0.4	109	639.9
SD <sup>†</sup>	350	108	0.1	34	157.0
CV <sup>‡</sup>	23	20	13.1	31	24.5

<sup>†</sup>SD : Standard Deviation.

<sup>‡</sup>CV : Coefficient of variation.

을 보였지만 원격측정센서보다 낮은 수준이었다. SPAD-502는 측정하는 개체가 한정 되어있다. 그리고 Schepers (1998)가 지적한 것처럼 SPAD-502를 이용할 때 2×3 mm의 작은 부분에서 투과율이 측정되는 특성 때문에 측정시 전체 잎 중 측정 잎의 선택과 선택 잎의 측정 지점 선정에서 오는 차이가 크기 때문으로 생각되었다. 이러한 결과는 고추 생

장량을 예측 평가 (Kim, 2006)한 결과와 비슷한 경향이였다. 따라서 식물 canopy 전체를 측정하는 원격탐사 센서들이 많은 잎들로 이루어진 벼 지상부의 생육상태를 예측하는데 더 효율적임을 보여주었다. 엽면적측정기 (LP-80)는 상대적으로 건물중과 높은 상관 ( $r=0.931^{**}$ )을 보였으며 지상부 질소농도와와의 상관계수 ( $r=0.505^*$ )는 상대적으로 낮았다.

**Table 4. Correlation coefficient between reflectance indices and growth characteristics at the 38th DAT (n=17).**

Sensor	Index	Height	No. of tiller	FW	DW	N content	N uptake
CC-passive	gNDVI	0.900 <sup>**</sup>	0.801 <sup>**</sup>	0.946 <sup>**</sup>	0.903 <sup>**</sup>	0.665 <sup>**</sup>	0.907 <sup>**</sup>
	rNDVI	0.902 <sup>**</sup>	0.811 <sup>**</sup>	0.946 <sup>**</sup>	0.906 <sup>**</sup>	0.677 <sup>**</sup>	0.911 <sup>**</sup>
GreenSeekerT M	rNDVI	0.875 <sup>**</sup>	0.797 <sup>**</sup>	0.947 <sup>**</sup>	0.887 <sup>**</sup>	0.712 <sup>**</sup>	0.904 <sup>**</sup>
	gNDVI	0.829 <sup>**</sup>	0.793 <sup>**</sup>	0.904 <sup>**</sup>	0.847 <sup>**</sup>	0.668 <sup>**</sup>	0.864 <sup>**</sup>
CC-ACS-210	rNDVI	0.861 <sup>**</sup>	0.771 <sup>**</sup>	0.924 <sup>**</sup>	0.878 <sup>**</sup>	0.633 <sup>**</sup>	0.880 <sup>**</sup>
	aNDVI	0.852 <sup>**</sup>	0.768 <sup>**</sup>	0.919 <sup>**</sup>	0.870 <sup>**</sup>	0.654 <sup>**</sup>	0.884 <sup>**</sup>

CC-passive, Crop Circle<sup>TM</sup> passive sensor.  
 CC-ACS-210, Crop Circle<sup>TM</sup> ACS-210 active sensor.

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

**Table 5. Correlation coefficient between reflectance indices and growth characteristics at the 63rd DAT (n=17).**

Sensor	Index	Height	No. of tiller	DW	N content	N uptake
Chlorophyll meter	SPAD reading	0.620 <sup>**</sup>	0.570 <sup>*</sup>	0.598 <sup>*</sup>	0.743 <sup>**</sup>	0.670 <sup>**</sup>
AccuPAR (LP-80)	LAI	0.836 <sup>**</sup>	0.793 <sup>**</sup>	0.931 <sup>**</sup>	0.505 <sup>*</sup>	0.879 <sup>**</sup>
CC-passive	gNDVI	0.851 <sup>**</sup>	0.856 <sup>**</sup>	0.888 <sup>**</sup>	0.724 <sup>**</sup>	0.896 <sup>**</sup>
	rNDVI	0.836 <sup>**</sup>	0.839 <sup>**</sup>	0.866 <sup>**</sup>	0.743 <sup>**</sup>	0.882 <sup>**</sup>
GreenSeeker <sup>TM</sup>	rNDVI	0.894 <sup>**</sup>	0.885 <sup>**</sup>	0.884 <sup>**</sup>	0.780 <sup>**</sup>	0.904 <sup>**</sup>
	gNDVI	0.797 <sup>**</sup>	0.749 <sup>**</sup>	0.795 <sup>**</sup>	0.539 <sup>*</sup>	0.766 <sup>**</sup>
CC-ACS-210	rNDVI	0.885 <sup>**</sup>	0.857 <sup>**</sup>	0.898 <sup>**</sup>	0.733 <sup>**</sup>	0.907 <sup>**</sup>
	aNDVI	0.905 <sup>**</sup>	0.885 <sup>**</sup>	0.918 <sup>**</sup>	0.735 <sup>**</sup>	0.923 <sup>**</sup>

LAI, Leaf area index.  
 CC-passive, Crop Circle<sup>TM</sup> passive sensor.  
 GS, GreenSeeker.  
 CC-ACS-210, Crop Circle<sup>TM</sup> ACS-210 active sensor.

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

**Table 6. Correlation coefficient between reflectance indices and growth characteristics at the 87th DAT (n=17).**

Sensor	Index	Height	No. of tiller	FW	DW	N content	N uptake
SPAD	Reading	0.235	0.263	0.224	0.230	0.405	0.290
CC-passive	gNDVI	0.862 <sup>**</sup>	0.803 <sup>**</sup>	0.0861 <sup>**</sup>	0.861 <sup>**</sup>	0.878 <sup>**</sup>	0.886 <sup>**</sup>
	rNDVI	0.824 <sup>**</sup>	0.787 <sup>**</sup>	0.829 <sup>**</sup>	0.831 <sup>**</sup>	0.857 <sup>**</sup>	0.856 <sup>**</sup>
GS	rNDVI	0.872 <sup>**</sup>	0.765 <sup>**</sup>	0.827 <sup>**</sup>	0.836 <sup>**</sup>	0.866 <sup>**</sup>	0.862 <sup>**</sup>
	gNDVI	0.829 <sup>**</sup>	0.876 <sup>**</sup>	0.892 <sup>**</sup>	0.897 <sup>**</sup>	0.813 <sup>**</sup>	0.893 <sup>**</sup>
CC-ACS-210	rNDVI	0.861 <sup>**</sup>	0.795 <sup>**</sup>	0.848 <sup>**</sup>	0.849 <sup>**</sup>	0.881 <sup>**</sup>	0.877 <sup>**</sup>
	aNDVI	0.873 <sup>**</sup>	0.790 <sup>**</sup>	0.853 <sup>**</sup>	0.853 <sup>**</sup>	0.883 <sup>**</sup>	0.881 <sup>**</sup>

SPAD, Chlorophyll meter (Minolta, SPAD 502).  
 CC-passive, Crop Circle passive sensor.  
 GS, GreenSeeker.  
 CC-ACS-210, Crop Circle ACS-210 active sensor.

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

원격탐사 센서들 중에서 Crop Circle™에 의한 식물생장 지표들은 가장 양호한 상관계수를 보였으며, 특히 rNDVI와 aNDVI는 상관계수 0.8 이상으로 고도로 유의성 있는 정도의 상관을 보였다. 이러한 결과는 옥수수 성장량을 예측 평가한 다른 연구들 (Gitelson, 1996; Hong et al., 2003; Shanahan et al., 2001)과 비슷한 경향이였다. 따라서 생육 중반기인 63일째와 87일째의 지상원격탐사 반사율 지표는 벼의 생체량을 추정하기 위한 지표로 활용 가능할 것으로 생각되었다. 87일째 반사율지표와 생육특성과의 상관계수를 나타낸 Table 6에서 Crop Circle-passive의 경우 가시광선 파장보다 근적외선 파장 반사율의 상관계수가 더 높았고, 반사율보다는 반사율을 이용한 성장지표로 평가하였을 때 상관계수가 증대되었다.

Figure 2, 3, 4, 5는 벼의 생육특성치들과 생육기간 중 측정된 반사율지표와의 상관계수를 나타내었고 Fig. 6, 7, 8, 9는 벼의 생육특성치들과 반사율지표와의 상관계수가

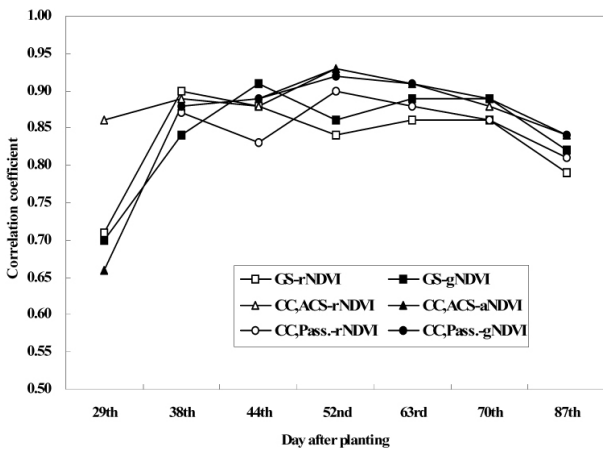


Fig. 2. Changes of correlation coefficient between reflectance indices by remote sensor and dry weight of rice at the harvesting.

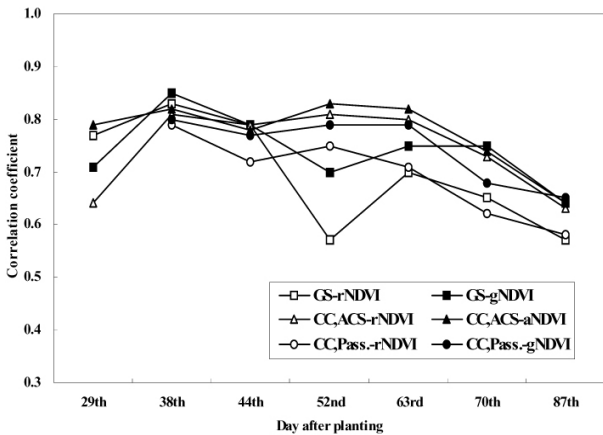


Fig. 3. Changes of correlation coefficient between reflectance indices by remote sensor and N content of rice plant at the harvesting.

높았던 시기 중 우수형성기에 해당하는 63일째의 성장량과 Crop Circle-active amber의 반사율 지표인 aNDVI와의 회귀관계를 나타내었다. Figure 6은 상관계수가 가장 높았던 벼의 지상부의 건물중과 Crop Circle-active amber의 반사율 지표인 aNDVI와의 회귀관계를 나타내었고 84%의 관계를 보였다. Figure 7은 수확 후 벼의 질소흡수량과 설명력이 높았던 Crop Circle-active amber의 반사율 지표인 aNDVI와의 회귀관계를 나타낸 결과 82%의 관계를 보였다. Figure 8은 수확 후 벼의 수량과 설명력이 높았던 Crop Circle-active amber의 반사율 지표인 aNDVI와의 회귀관계를 나타낸 결과 81%의 관계를 보였다. Figure 9는 질소 시비수준과 Crop Circle-active amber의 aNDVI와의 회귀관계로 87%로 매우 밀접한 관계를 보였다. 이로부터 지상원격측정 센서의 반사율지표는 성장량 및 질소 영양상태를 실시간으로 검정하여 시비량을 결정하는데 활용 가능할 것으로 판단하였다.

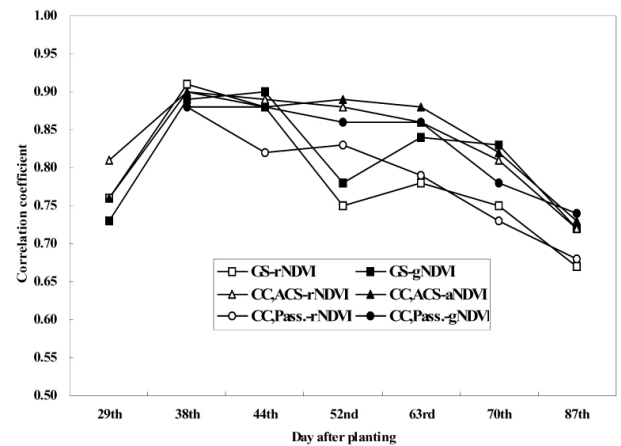


Fig. 4. Changes of correlation coefficient between reflectance indices by remote sensor and N uptake by rice plant at the harvesting.

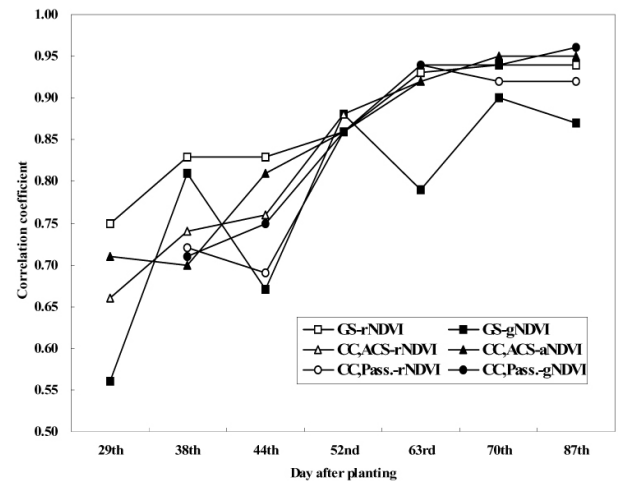


Fig. 5. Changes of correlation coefficient between reflectance indices by remote sensor and yield of rice.

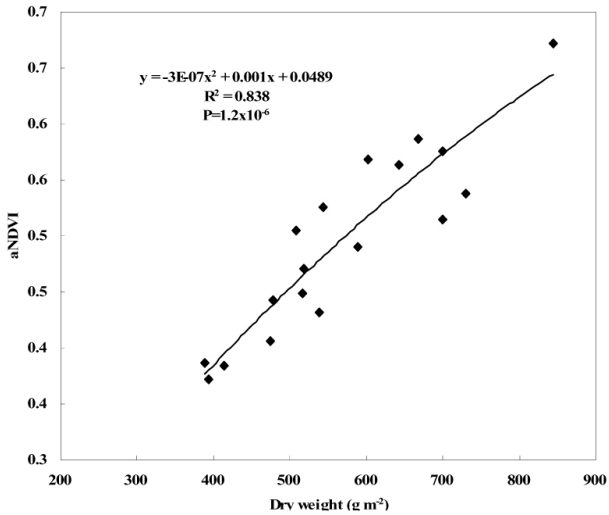


Fig. 6. Relationship between dry weight of rice at the harvesting and aNDVI by Crop Circle ACS-210 at the 63rd day after planting.

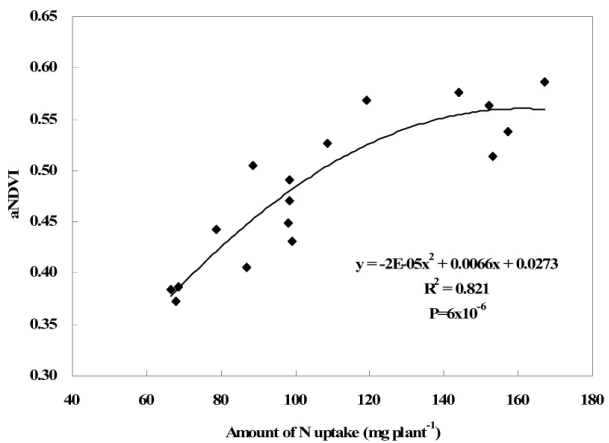


Fig. 7. Relationship between amount of N uptake by rice at the harvesting and aNDVI by Crop Circle ACS-210 at the 63rd day after planting.

생육 시기별 반사율 지표에 의한 벼 수확량과의 상호관계 생육단계별로 측정된 NDVI값과 수확기 생육특성 및 수량 간에는 고도로 유의성 있는 정의 상관관계를 보였다. 6가지 지상원격탐사 지표와 생육특성치들과의 상관계수를 F검정을 통하여 지상원격탐사 지표 간 평균비교로 차이가 있는지 알아보았다. 처리의 자유도는 5이고 오차의 자유도는 210으로 F-분포표에서 분모의 자유도인 오차의 자유도가 범위를 벗어나서 무한대 값인 2.21을 적용하였다. F검정 결과  $F_s=1.129$ 로  $F_{0.05(3,\infty)}=2.21$ 보다 작기 때문에 지상원격탐사 지표 간에 차이가 없음을 알 수 있었다. 지상원격탐사 지표가 어떤 생육특성치와 더 밀접한 관계가 있는지 F검정을 통하여 생육 특성치들 간 평균비교로 차이를 알아보았다. 처리의 자유도는 5이고 오차의 자유도는 234로 F-분포표에서 무한대 값인 2.21, 3.02를 적용하였다. F검정

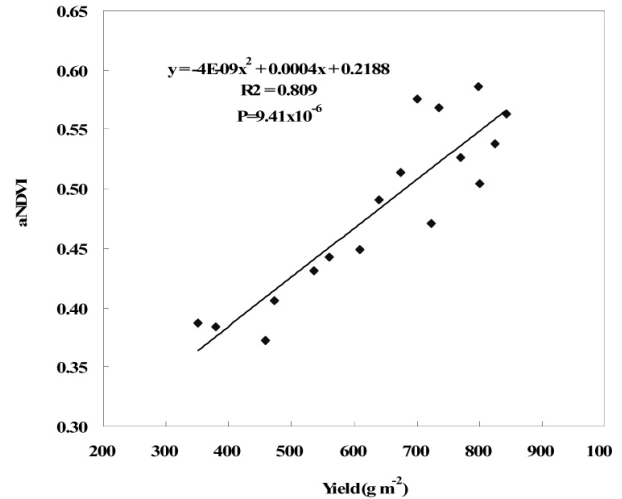


Fig. 8. Relationship between yield of rice and aNDVI by Crop Circle ACS-210 at the 63rd day after planting.

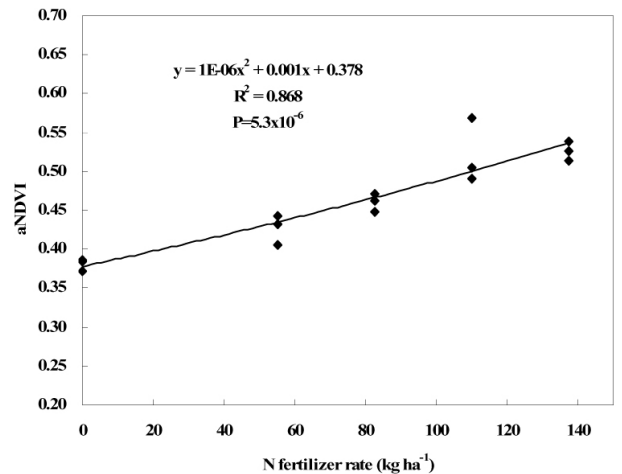


Fig. 9. Relationship between the rate of N fertilizer and aNDVI by Crop Circle ACS-210 at the 63rd day after planting.

결과  $F_s=59.94^{**}$ 로  $F_{0.05(3,\infty)}=2.21$ ,  $F_{0.01(3,\infty)}=3.02$  보다 크기 때문에 생육특성치들 간에 고도로 유의한 차이가 있음을 알 수 있었다. 생육특성치간 평균에 대한 차이를 HSD검정을 통하여 구분한 결과  $\bar{Y}_{DW}^a=0.85$ ,  $\bar{Y}_{N\text{ content}}^b=0.73$ ,  $\bar{Y}_{N\text{ uptake}}^{ab}=0.81$ ,  $\bar{Y}_{Yield}^{ab}=0.83$ ,  $\bar{Y}_{No. of panicles}^b=0.78$ ,  $\bar{Y}_{No. of grain}^c=0.49$ 였다. 상관계수 크기에 대한 평균 비교 결과 건물중, 질소흡수량, 수량이 지상원격탐사 지표들과 가장 좋았다. 지상부 질소함량, 이삭수와도 좋았다. 이삭당 영화수와 지상원격탐사 지표와는 상관계수가 가장 낮았으나 63일째, 70일째, 87일째로 가면서 수량구성요소인 이삭수나 이삭당 영화수와는 상관계수가 증가하는 경향을 보였다. 지상부 자체의 건물중, 질소함량, 질소흡수량은 유수형성기 이후로 상관계수가 점점 감소하는 경향이 있었다. 이유는 지상부는 노화되고 양분이 알곡으로 이동하므로 지상부 자체의 수치는 점점 감소하고 수량을 평가하는 요소의 수치

는 증가하기 때문이었다.

**반사율 지표에 의한 벼의 질소시비수준 추정** 중모 기계이앙 재배시 이삭거름은 이앙 후 41일째에서 56일째 사이에, 알거름은 56일째에서 72일째 사이에 시비하도록 추천되고 있다 (박 등, 1998). 그래서 덧거름 시기에 측정된 반사율 지표중에서 52일째 반사율지표로 시비량을 추정하였다. 그리고 52일째 반사율 지표중에서 가장 설명력이 좋았던 Crop Circle-active 센서의 반사율지표인 aNDVI와 생육특성치 간의 관계는 Crop Circle-active 센서 amber의 반사율지표인 aNDVI가 증가함에 따라 건물중 및 수량의 선형이 증가하는 2차 회귀곡선관계를 보였고, 건물중 및 수량의 변동량은 각각 83%, 75%로 Crop Circle-active 센서 amber의 반사율지표인 aNDVI와 관계가 있음을 설명할 수 있었다. Crop Circle-active 센서 amber의 반사율지표인 aNDVI가 증가함에 따라 지상부 전질소함량, 잎의 질소흡수량의 선형이 증가하는 2차 회귀곡선관계를 보였고, 지상부 전질소함량, 잎의 질소흡수량의 변동량은 각각 68%, 82%로 Crop Circle-active 센서 amber의 반사율지표인 aNDVI와 관계가 있음을 설명할 수 있었고 수량 예측의 가능성을 평가할 수 있었다. 질소시비량과 반사율지표의 상관성이 높게 나타난 52일째에 측정된 aNDVI는 83%의 설명이 가능하였고 이로부터 반사율지표 aNDVI는 질소시비수준을 유의성 있게 구분하여 예측할 수 있을 것으로 생각되었다. 따라서 상관계수가 높았던 Crop circle-active 센서의 지표인 aNDVI로 목표 수량에 대한 적절한 시비량을 예측하였다. aNDVI와 수량과의 회귀식에서 목표수량 ( $y$ )를  $700 \text{ g m}^{-2}$ 로 하여  $y = -7963.4x^2 + 8599.3x - 1549.7$ 을 사용하였다. 목표수량 ( $y$ )에 대한 aNDVI ( $x$ )를 계산한 결과 0.445였다. 목표 수량  $700 \text{ g m}^{-2}$ 에 대한 반사율 지표값 0.445를 적용하여 질소시비량에 따른 aNDVI 회귀식에서 aNDVI ( $y$ )를 0.445로 하여  $y = 0.02x^2 + 0.0095x + 0.3245$ 를 사용하였다. aNDVI ( $y$ )에 대한 질소시비량 ( $x$ )를 계산한 결과  $8.955 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 였다. 결론적으로  $10\text{a}$ 당  $700 \text{ kg}$ 의 수량을 얻으려면 질소시비량을  $8.955 \text{ kg}$ 을 사용해야 한다는 것을 예측할 수 있었다. 그리고 생육중반기인 52일째 aNDVI를 측정하여 반사율지표 기준을 0.445로 하여 수치가 적을 경우에 회귀식을 적용하여 부족분을 시비량을 산출하는데 이용 가능하였다. 따라서 지상원격측정 센서에 의한 우수형성기 반사율지표로 생육중반 벼의 덧거름 시비량을 결정하기 위한 효율적인 도구로 활용 가능할 것으로 판단되었다. 보다 정확한 예상식을 얻으려면 품종에 따른 차이에 대한 반복실험과 연차실험이 필요하며 비효에 대한 적용 시험까지 고려한다면 목표하는 생산량을 수확하고 동시에 환경 친화적인 농업을 지속할 수 있을 것이다.

## 요 약

본 연구에서는 여러 가지 지상원격측정센서의 반사율 지표와 생산량과의 관계를 평가하여 벼 생육중의 질소시비량 결정을 위한 원격측정센서의 활용가능성 및 최종수량과의 상관성을 평가하고자 하였다. 벼 품종은 동진 1호였으며 이앙은 2006년 5월 30일에, 수확은 10월 9일에 하였다.

엽록소 측정을 위해 SPAD502를 이용하였고, AccuPAR model LP-80을 이용하여 엽면적지수를 측정하였다. 반사율지표 측정을 위해 태양광을 이용하는 passive 센서를 이용하였고, 변조된 광을 발산하는 자체광원을 가지고 있는 4종류의 active 센서를 이용하였다. 센서측정은 이앙 후 29일째부터 87일째까지 측정하였으며 생육조사는 3차례 하였고 수확기에 수량을 조사하였다.

세 차례의 생육조사 시기의 센서 측정치와 벼 생육특성치 간에는 매우 높은 유의적 상관성을 나타냈으며 생육특성치의 상관계수 크기는 전반적으로 생체중 > 질소흡수량 > 건물중 > 키 > 분얼수 > 지상부질소농도의 순이었다. Chlorophyll meter (SPAD 502)는 상대적으로 다른 생육특성 변수들에 비해 지상부질소농도와 높은 상관 ( $r=0.743^{**}$ )을 보였지만 원격측정센서보다 낮은 수준이었고, 엽면적측정기 (LP-80)는 상대적으로 건물중과 높은 상관 ( $r=0.931^{**}$ )을 보였으며 지상부 질소농도와의 상관계수 ( $r=0.505^{*}$ )는 상대적으로 낮았다. CC-passive센서의 경우 근적외선광의 부의 상관관계를 보였으며 단일파장의 반사율로 평가하는 것보다는 NDVI 등의 반사율 식생지수로 평가하였을 때 상관계수가 증가하였다. Passive 센서와 active 센서 모두 대등하게 고도로 유의성 있는 상관을 보였다. 따라서 지상원격 측정센서의 반사율 지표들을 이용하여 벼 생육특성들을 정량화 하는 것은 벼 생육중의 질소시비량 결정을 위한 비파괴적이고 실시간 도구로 활용 가능할 것으로 판단하였다.

## 사 사

이 논문은 2010년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 인 용 문 헌

- Al-Abbas, A.H., R. Barr, J.D. Hall, F.L. Crane, and M.F. Baumgardner. 1974. Spectra of normal and nutrient deficient maize leaves. *Agron. J.* 66:16-20.
- Bausch, W.C. and H.R. Duke. 1996. Remote sensing of plant nitrogen status in corn. *Transaction of the ASAE.* 39(5):1869-1875.



- Bausch, W.C. and K. Diker. 2001. Innovative remote sensing techniques to increase nitrogen use efficiency of corn. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 32(7-8):1371-1390.
- Blackmer, T.M., J.S. Schepers, and M.F. Vigil, 1993. Chlorophyll meter readings in corn as affected by plant spacing, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 24(17-18):2507-2516.
- Blackmer, T.M., J.S. Schepers, and G.E. Varvel. 1994. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurement in corn leaves, *Agronomy J.*, 86(6):934-938.
- Blackmer, T.M. and J.S. Schepers. 1996. Aerial photography to detect nitrogen stress in corn. *J. Plant Physiol.* 148(3-4): 440-444.
- Blackmer, T.M., J.S. Schepers, G.E. Varvel, and G.E. Meyer. 1996a. Analysis of aerial photography for nitrogen stress within corn fields. *Agronomy J.* 88(5):729-733.
- Blackmer, T.M., J.S. Schepers, G.E. Varvel, and E.A. Walter-Shea. 1996b. Nitrogen deficiency detection using reflected short wave radiation from irrigated corn canopies, *Agronomy J.*, 88(1):1-5.
- Gitelson, A.A., M.N. Merzlyak, and H.K. Lichtenthaler. 1996a. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. *J. Plant Physiol.* 148:501-508.
- Gitelson, A.A., Y.J. Kaufman, and M.N. Merzlyak. 1996b. Use of green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ.* 58:289-298.
- Hong, S.D. and J.J. Kim. 2003. Agricultural application of ground remote sensing. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 36(2):92-103.
- Jackson, R.D., C.A. Jones, G. Uehara, and L.T. Santo. 1981. Remote detection of nutrient and water deficiencies in sugarcane under variable cloudiness. *Remote Sens. Environ.* 11:327-331.
- Jeong, H.C. 2006. Effective sensing distance for ground-based remote sensor with different leaf distribution. Master's degree thesis, Chungbuk National University. Cheongju, Korea.
- Kang, S.S. 2007. Evaluation for biomass and nitrogen nutrition of crops by reflectance indices of ground-based remote sensors. Ph.D. degree thesis, Chungbuk National University. Cheongju, Korea.
- Kim, H.G. 2006. Estimation for red pepper (*Capsicum annum* L.) biomass by reflectance indices with ground-based remote sensor. Master's degree thesis, Chungbuk National University. Cheongju, Korea.
- 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.
- NIAS. 1999. Fertilizer recommendation for crops. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- RDA. 2003. Standard of analysis and survey for agricultural research. Rural Development Administration, Suwon, Korea.
- Schepers, J.S., D.D. Francis, M. Vigil, and F.E. Below. 1992. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter reading. *Commun. Soil Sci. Plan.* 23(17-20):2173-2187.
- Schepers, J.S., T.M. Blackmer, W.W. Wilhelm, and M. Resende. 1996. Transmittance and reflectance measurements of corn leaves from plants with different nitrogen and water supply. *J. Plant Physiol.* 148(5):523-529.
- Schepers, J.S. and D.D. Francis. 1998. Precision agriculture-What's in our future, *Commun. Soil Sci. Plan.* 29:1463-1469.
- Shin, Y.H. 2003. Vegetation reflectance characteristics of crops growth stage using remote sensing technology. Master's degree thesis, Chungbuk National University, Cheongju, Korea.
- Walburg, G., M.E. Bauer, C.S.T. Daughtry, and T.L. Housley. 1982. Effects of nitrogen nutrition on the growth, yield, and reflectance characteristics of corn canopies. *Agron. J.* 74:677-683.
- 박광호 등 28명. 1998. 알기쉬운 벼 재배기술. p68. 향문사. 서울.