

식생지수와 SPAD를 이용한 벼 생육 및 질소영양상태의 비파괴적 진단 가능성 검토

김민호* · 신진철** · 이변우*†

*서울대학교 농업생명과학대학 식물생산과학부, ** 농촌진흥청 작물과학원 작물생리생태과

Applicability of Vegetation Index and SPAD Reading to Nondestructive Diagnosis of Rice Growth and Nitrogen Nutrition Status

Min-Ho Kim*, Jin-Chul Shin**, and Byun-Woo Lee*†

*Dept. of Plant Science, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul Nat'l Univ., Seoul 151-742, Korea

**Dept. of Crop Physiology and Ecology, National Institute of Crop Science, RDA, Suwon 441-857, Korea

ABSTRACT : Precise application of topdressing nitrogen (N) fertilizer is indispensable for securing high yield and good quality of rice and minimizing N losses to the environment as well. For precise N management, growth and nitrogen nutrition status (NNS) should be diagnosed rapidly and accurately. The objective of the study was to evaluate the applicability of vegetation index (VI) calculated from hyperspectral canopy reflectance measurement and SPAD reading to nondestructive *in situ* diagnosis of growth and NNS of rice. Canopy reflectance, SPAD reading, growth parameters, and NNS characteristics were measured from various N treatments to evaluate the relationships among them for two cropping seasons from 2001 to 2002. The correlation coefficient of VIs with variables of growth and NNS increased positively as rice canopy became more closed. Regardless of growth stages, VIs had significantly high correlations with LAI, shoot dry weight (DW), shoot N content and nitrogen nutrition index (NNI). Those correlation coefficients increased steadily before heading stage as rice grew up. However, tiller number and leaf N concentration showed significantly high correlations with VIs only at and after panicle initiation stage (PIS). Among the VIs, RVIgreen had significantly higher correlation with the measured parameters than the other VIs; it showed correlation coefficients greater than 0.8 with leaf and shoot N concentration and DW, and much higher coefficients greater than 0.9 with LAI, shoot N content, and NNI. At LAI of below 2.5, VIs had non-significant or low correlations with the growth and NNS indicators due to the background effects. SPAD reading had significantly high correlation with leaf N concentration and NNI at each growth stage. In addition, it had significant correlations with variables of growth and NNS at PIS and booting stage, particularly, at booting stage.

Though SPAD reading had a significantly high correlation value at a given growth stage in each year, it showed very weak relationship with variables of growth and NNS when pooled across growth stages and years. In conclusion, RVIgreen was found to be the most reliable VI to estimate the growth and NNS of rice around at PIS, but SPAD reading had much limitations.

Keywords: rice, growth, nitrogen nutrition, spectral reflectance, vegetation index, SPAD

작물의 생육량과 질소영양상태는 수량을 결정짓는 중요한 요소이다. 주어진 시기의 질소영양상태는 다음 발육단계의 생장량을 결정지으며, 일반적으로 체내 질소농도가 높을 경우 건물생산은 증가하게 된다(Agren, 1985). 따라서 발육단계의 어느 시점에서 생육량과 질소영양상태를 정확하게 진단, 파악하는 것은 작물의 다음 발육단계의 생육량 예측을 가능하게 하여 질소시비의 효율성을 높여준다(Norman *et al.*, 1992).

작물의 생체정보는 예취를 하여 직접 측정하거나 분석하는 것이 가장 정확하나 많은 시간과 노력, 경제적 비용이 소요되고, 또한 광범위한 지역이나 포장내의 공간적 정보를 적시에 얻는 데에는 많은 한계가 따른다. 따라서 최근에는 비파괴적이고 신속하며, 실시간으로 추정이 가능한 SPAD meter나 군락의 반사율로써 작물의 생육량 및 질소영양상태를 추정하고, 이를 시비진단의 도구로 활용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다(Piekielek & Fox, 1992; 홍석영, 1999; Flowers *et al.*, 2003).

SPAD meter는 650 nm(적색역)과 940 nm(근적외역)의 투과율값으로 엽록소함량을 간접적으로 측정하는 기계로, SPAD값을 근거로 질소영양상태를 파악하여 추비 질소량을 예측하려는 시도가 벼(Turner & Jund, 1991), 옥수수(Piekielek & Fox, 1992), 밀(Fox *et al.*, 1994) 등에서 있어 왔다. 그러나

*Corresponding author: (Phone) +82-2-880-4544 (E-mail) leebw@snu.ac.kr
**Received September 13, 2005

SPAD값은 개엽의 특정부위의 엽록소함량만을 대표할 뿐만 아니라, 품종과 생육시기에 따라 엽록소 함량과의 상관 정도가 달라지고, 또한 작물의 생육량을 추정하는 데에는 이용할 수 없기 때문에 단지 질소영양결핍의 지표로만 이용되어야 한다고 하였다(Piekielek *et al.*, 1995). 다만 벼에 있어서는 SPAD 값을 비엽면적 등으로 보정함으로써 엽의 질소상태를 비파괴적으로 정확하게 진단할 수 있다고 하였으나(Peng *et al.*, 1995; Ladha *et al.*, 1998), SPAD 측정 이외에 파괴적으로 비엽면적 등을 측정해야 할 뿐만 아니라, 포장내 질소의 공간 분포나 변이를 파악하기 위해서는 수많은 측정값이 필요하다는 문제점이 있다(Diker & Bausch, 2003).

작물의 생체정보를 얻기 위한 또 다른 방법으로 최근 많이 연구되고 있는 것이 군락 반사측정기술과 같은 원격탐사 기술이다(Ladha *et al.*, 1998). 단일 엽의 반사특성에 관여하는 작물내적 요인은 작물에 따른 엽 색소체의 성분조성과 엽의 크기·두께·세포간극 등의 해부학적 특성 및 수분함량 등이 있으며(Gausman *et al.*, 1969), 작물외적 요인으로는 광의 입사각·반사각 및 측정각도 등이 있다. 군락의 반사를 또한 단일엽의 반사특성과 거의 동일한 반면(Yoder & Pettigrew-Crosby, 1995), 군락구조의 특성에 기인하는 여러 요인들, 예를 들면 초형, 엽면적, 엽의 공간배치 외에 바람, 광량, 측정시기, 센서의 FOV(field of view)에 따른 측정면적, 토양, 물 등에 의한 배경효과(background effect) 등을 새로 고려해야 한다(Rondeaux *et al.*, 1996).

보통 군락반사를 통해 측정하고자 하는 식물체 생체정보를 얻기 위해서 단일파장을 이용하는 경우가 많으나 만일 단일파장에 영향하는 다른 생체정보(건물중, LAI 등)나 요인(일사량의 변화, background effect 등)이 있을 경우에 그 정확도는 낮아질 수밖에 없기 때문에(Daughtry *et al.*, 2000) 근래에는 2개 이상의 파장대를 조합한 여러 식생지수들이 개발되어 널리 사용되고 있다(Rondeaux *et al.*, 1996). 군락반사로써 벼의 생육, 질소영양상태, 수량을 예측하고자 할 경우에는 군락이 어느 정도 형성되어야만 정확도를 높일 수 있는데, 군락의 피복도가 낮은 경우에 측정된 반사특성은 작물보다도 토양과 물 표면 등 배경의 반사 특성의 간섭이 크기 때문이다(Diker & Bausch, 2003).

군락반사는 재배환경, 기상환경, 측정환경 등의 영향을 많이 받기 때문에 각 나라별로 다양한 식생지수 등이 개발되었으며, 동일한 식생지수라 할지라도 파장대의 조합이 다르게 사용되고 있다. 지금까지 비파괴적인 방법으로 벼의 생육정보를 얻고자 하는 연구가 다수 있었으나 대부분이 표준시비조건이나 몇몇 시비수준에서 진행된 연구였기 때문에 실제로 다양한 생육 및 질소영양상태에 대해서도 적용시킬 수 있는지에 대해서는 검토가 필요하다.

따라서 본 연구는 우리나라의 벼 재배 여건하에서 영양생장기 생체정보를 이용한 수비 질소 사용량 측방에 군락반사와

SPAD 측정치의 이용 가능성을 검토하기 위한 첫 단계로서, 기비 및 분열비 질소 시비량을 달리하여 영양생장기 생육 및 질소영양상태를 다양하게 설정하고 이를 군락반사와 SPAD-meter 측정값으로 추정할 수 있는지를 검토하였다.

재료 및 방법

2001년과 2002년 2년에 걸쳐 서울대학교 농업생명과학대학 부속농장에서 화성벼를 공시하여 실험하였다. 실험포장은 유기물함량이 2.0~2.1%로 비교적 낮고, CEC가 12.3~13.1 cmol⁽⁺⁾/kg, pH가 5.5~5.7인 사질식양토(sandy clay loam)였다. 4월 24일(01)과 23일(02)에 기계이앙상자에 최아시킨 종자를 파종, 출아, 녹화시킨 후 비닐보온점충못자리에서 육묘하였고, 5월 22일(01)과 21일(02)에 재식밀도 15×3 0cm로 1주3본 손이양하였다.

$N-P_2O_5-K_2O=12.8-8kg/10a$ 를 기준시비량으로 질소 시비처리 조건은 Table 1과 같다. 질소는 기비:분열비:수비=40:30:30으로 분시, 인산은 전량기비, 카리는 기비:수비=70:30으로 분시하였다. 출수기는 두 해 모두 8월 12일이었다.

생육조사는 이앙 후 7~14일 간격으로 처리당 3주를 예취하여 분열수, 엽면적, SPAD, 건물중 등을 조사하였으며, 수확시 수량 및 수량구성요소를 조사하였다. 생육조사일에 군락반사와 SPAD를 측정하였다. 채취한 식물체는 부위별로 나누어 72°C 건조기에서 72시간 건조한 후 건물중을 칭량한 후, 마쇄기로 분쇄하여 Kjeldahl법(Auto-Kjeltec 1035 System, Tecator社, Swiss)으로 질소를 분석하였다. 질소영양지수(NNI, nitrogen nutrition index)는 Cui *et al.*(2002)에 따라서 계산하였다.

SPAD 측정은 상위 2번쨰 엽(Y-leaf)에서 측정하였다. 군락반사는 GER-1500(GER社) 분광방사계를 사용하였는데, 측정 범위는 350~1050 nm, 측정간격은 1.55nm(512channel), FOV (field of view)는 15°로써 1 m 높이에서 측정폭이 24 cm였다. GER사에서 제공된 Lambertian-panel(15×15cm)은 협소하여 BaSO₄를 도포한 Lambertian-panel을 제작하여 사용하였는데, GER 결과는 약 2% 내외의 반사율오차가 발생하였다. 군락반사 측정은 일사량의 변화가 거의 없는 아주 맑은 날이나 흐린날 오전 11시부터 오후 2시 사이에 측정하였고, 또한 흐린 날 중에서도 일사광이 너무 약한 경우와 바람이 심하게 부는 날은 제외하였다. 군락반사는 약 2 m 높이에서 센서가 직하방향이 되도록 하여 측정하였고, 반사율은 Lambertian-panel(reference panel)의 반사율에 대한 작물-군락의 반사율의 비(bidirectional reflectance factor, BRF)를 이용하였다. 군락의 반사특성에 사용된 파장역은 Landsat TM (Thermatic Mapper)의 7개의 파장역중 청색광(450~520 nm, B), 녹색광(520~600 nm, G), 적색광(630~690 nm, R), 근적외선(760~900 nm, NIR) 등 4개 파장역이었으며, 이들의 파장역에서 얻어진

Table 1. Summary of nitrogen application treatments in 2001 and 2002.

2001	Basal N.	Tillering N.				Panicle N.	Total (kgN/10a)
		10 DAT	20 DAT	30 DAT	Total		
T1	0N	0N			0N	0N, 0.5N, 1N, 1.5N, 2N	0, 1.8, 3.6, 5.4, 7.2
T2	0.25N	0.25N			0.25N	"	2.1, 3.9, 5.7, 7.5, 9.3
T3	0.5N	0.5N			0.5N	"	4.2, 6, 7.8, 9.6, 11.4
T4	0.75N	0.75N			0.75N	"	6.3, 8.1, 9.9, 11.7, 13.5
T5	1N	1N			1N	"	8.4, 10.2, 12, 13.8, 15.6
T6	1.25N	1N	0.25N		1.25N	"	10.5, 12.3, 14.1, 15.9, 17.7
T7	1.5N	1N	0.5N		1.5N	"	12.6, 14.4, 16.2, 18, 19.8
T8	2N	1N	0.5N	0.5N	2N	"	16.8, 18.6, 20.4, 22.2, 24
T9	2.5N	1N	1N	0.5N	2.5N	"	21, 22.8, 24.6, 26.4, 28.2
2002	Basal N	Tillering N		Panicle N		Total (kgN/10a)	
T1	0N	0N		0N, 0.5N, 1N, 1.5N, 2N, 3N		0, 1.8, 3.6, 5.4, 7.2, 10.8	
T2	1N	0N		"		4.8, 6.6, 8.4, 10.2, 12, 15.6	
T3	1N	0.5N		"		6.6, 8.4, 10.2, 12, 13.8, 17.4	
T4	1N	1N		"		8.4, 10.2, 12, 13.8, 15.6, 19.2	
T5	1N	1.5N		"		10.2, 12, 13.8, 15.6, 17.4, 21	
T6	1N	2N		"		12, 13.8, 15.6, 17.4, 19.2, 22.8	

* 1N in basal, tillering, and panicle N fertilizer amount at 4.8, 3.6, and 3.6 kgN/10a respectively.

BRF(ρ)의 평균치를 이용하였다. 각각의 파장역에서 얻어진 반사율을 조합하여 NDVI(normalized difference vegetation index)와 RVI(ratio vegetation index) 등의 식생지수를 다음과 같이 계산하였다.

$$RVI_{blue} = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_B} \quad RVI_{green} = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_G} \quad RVI_{red} = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_R}$$

$$NDVI_{blue} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_B}{\rho_{NIR} + \rho_B} \quad NDVI_{green} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_G}{\rho_{NIR} + \rho_G}$$

$$NDVI_{red} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}$$

결과 및 고찰

생육시기 및 엽면적지수에 따른 군락반사율의 변화

생육초기부터 유수분화기까지 측정한 군락반사율의 변화를 살펴보면(Fig. 1, 2), 2001년과 2002년 모두 생육이 진점됨에 따라서 그리고 시비수준이 증가함에 따라서 가시역의 반사율은 낮아지고 근적외역의 반사율은 점차 커지는 경향 보였는데, 이처럼 가시역의 반사율이 줄어드는 것은 가시역을 흡수하는 엽록소의 공간밀도가 크기 때문이고 NIR 반사율이 증가하는 것 역시 NIR을 투과·반사시키는 잎의 밀도가 커지면 반사율이 커지기 때문이다(Yoder & Pettigrew-Crosby, 1995; 김, 2001).

영양생장기간 동안 가시역의 반사율은 두 해 모두 10% 이하였고 근적외역의 반사율은 20~60% 범위였다. 근적외역의 반사율은 연차 간에 약간 차이를 보여 2001년도에는 유수분

화기전까지 20~50%, 유수분화기에는 40~60% 범위였지만, 2002년도에는 유수분화기전까지 25~55%, 유수분화기에는 40~60% 범위였다. 김(2001)의 질소 시비실험(12~48kgN/10a)에 따르면 가시역의 반사율은 질소시비수준과 시기에 상관없이 20% 미만이었고, 근적외역은 질소시비수준이 높아질수록 높아져 최대 80%에 이르렀다고 한다.

파장대 별로 군락반사율과 엽면적지수와의 관계를 나타낸 것이 Fig. 3이다. 엽면적지수가 증가할수록 청색광과 녹색광 그리고 적색광 등 가시역의 반사율은 점차 줄어드는 경향이었고, 근적외역의 반사율은 점차 커지는 경향이었다. 가시역 중에서 청색광과 적색광의 반사율은 엽면적지수가 2 정도로 될 때까지 급격하게 감소하였으며, 엽면적지수 2 이상에서는 감소율이 다소 줄어들었다. 녹색광의 반사율은 엽면적지수가 커짐에 따라 줄어드는 경향이었으나 감소폭이 상대적으로 적었고 반사율도 엽면적지수에 관계없이 3~10% 내외였다. 영양생장기동안 청색광은 5%, 녹색광은 10%, 적색광은 8% 이하의 반사율을 보였으며, 엽면적지수 2~2.5 이상에서는 청색광과 적색광의 반사율이 각각 3%, 5% 미만이었다.

근적외역의 반사율 또한 엽면적지수 2 정도 이하에서는 반사율이 급격히 증가하다가 그 이상에서는 서서히 증가하는 경향을 보였다. 엽면적지수가 2.5일 경우 지상부건물중은 1.7t/ha 내외였는데, 이 시기가 군락이 폐쇄되는 시기로 판단되었다. 파장별 반사율은 엽면적지수에 따라서 크게 변하지만 엽면적지수 2 이하에서는 배경효과가 커서 군락의 반사율로 군락상태를 파악하기 어렵다고 한다(Daughtry et al., 2000; 김, 2001).

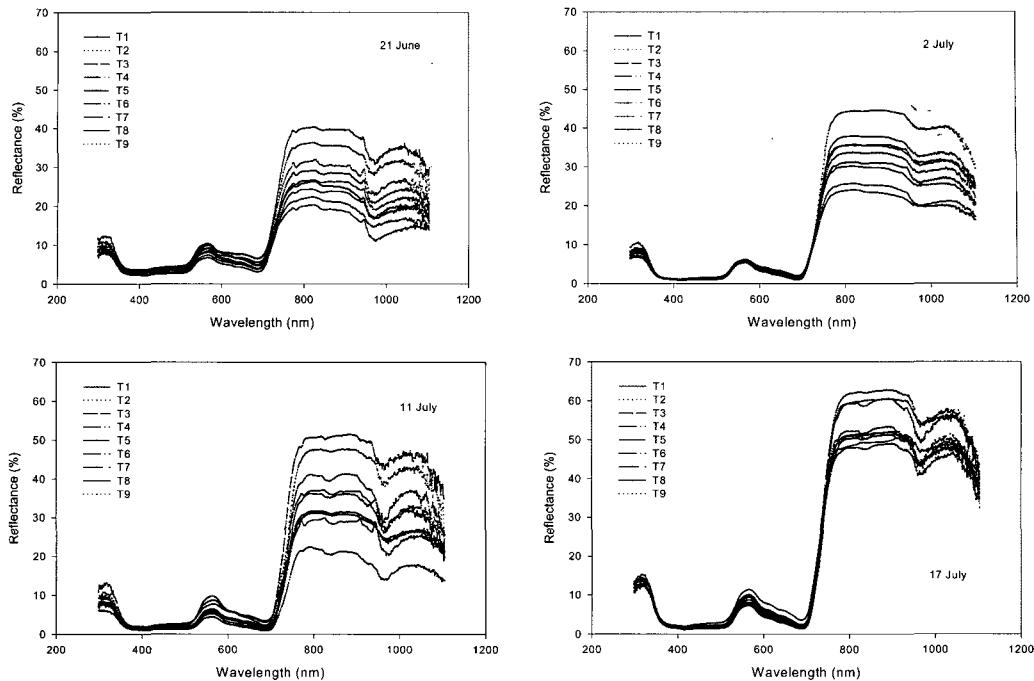


Fig. 1. Seasonal changes in spectral reflectance of rice canopy in 2001.

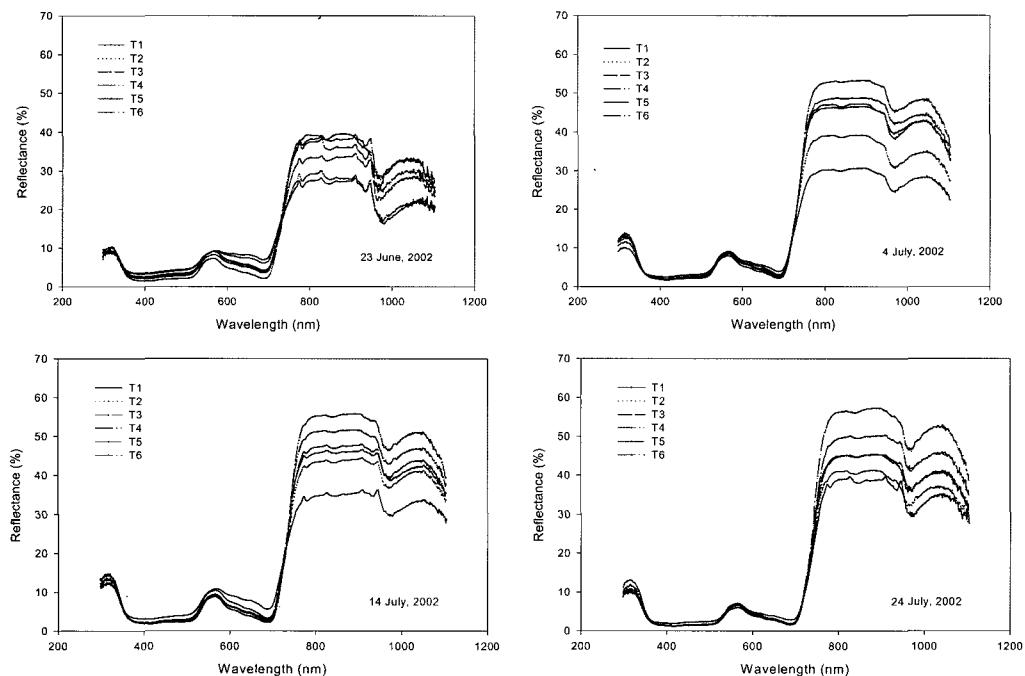


Fig. 2. Seasonal changes in spectral reflectance of rice canopy in 2002.

군락반사와 생육 및 질소영양지표간의 관계

여러 식생지수 중에서 생체정보와 밀접한 관련이 있는 비식생지수(ratio vegetation index, RVI)인 RVI_{blue}, RVI_{green}, RVI_{red} 및 정규회차식생지수(normalized difference vegetation index, NDVI)인 NDVI_{blue}, NDVI_{green}, NDVI_{red}와 생육

및 질소영양 특성치와의 관계를 각 생육시기별로 나타낸 것이 Table 2이다. 이앙 후 30일에는 엽중 질소농도를 제외한 생육 및 질소영양 특성치와 식생지수간에, 이앙 후 42일에서는 분열수와 엽중 질소농도를 제외한 생육 및 질소영양 특성치와 식생지수간에 유의한 상관관계를 보였으며, 유수분화기에는 모

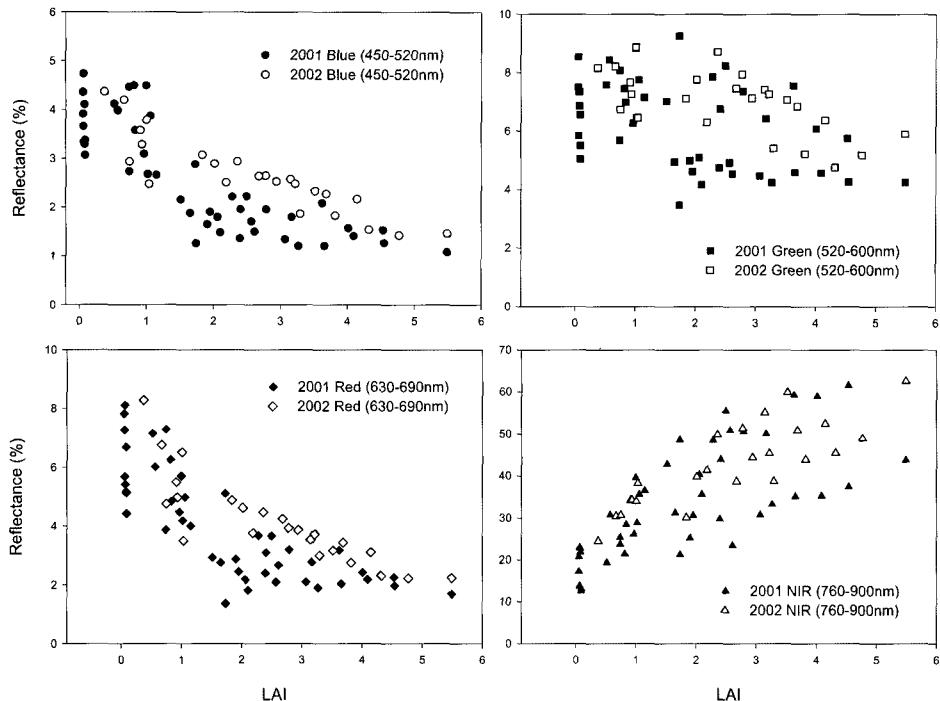


Fig. 3. Canopy reflectance of visible and near infrared (NIR) light in relation to leaf area index (LAI).

든 생육 및 질소영양특성치와 식생지수간에 유의한 상관관계가 존재하였다. 엽중 질소농도의 상관도가 매우 낮은 이유는 이 시기가 벼의 체내 질소 재분배가 본격적으로 일어나는 시기이기 때문으로 판단된다. 엽중 질소농도는 유수분화기 이후에만 식생지수와 유의한 상관을 나타내었다. 특히 출수전 26~32일인 유수분화기를 전후해서 상관도가 매우 높았다.

RVI와 NDVI는 균락의 피복도가 증대됨에 따라 엽면적지수, 지상부건물중, 지상부질소함량, NNI 등과 상관이 높아졌는데, 이는 생육이 진전됨에 따라서 식생지수나 엽면적, 지상부건물중, 지상부질소함량 등이 증가하는 경향성을 갖고 있기 때문이며, NNI는 지상부건물중과 지상부질소농도를 이용한 지수이기 때문에 판단되었다. Yang과 Miller(1985)는 RVIred를 이용하여 시기별로 벼의 건물중과의 관계를 살펴본 결과 유수분화기 때 상관도($r=0.94$)가 가장 높았고 감수분열기($r=0.74$)와 출수기($r=0.28$)는 낮았다고 보고하였다.

식생지수 중에서도 녹색역과 균적외역을 조합해서 얻은 RVIgreen과 NDVIgreen이 생육 및 질소영양특성치와 상관도가 높았으며, 적색역을 이용한 RVIred와 NDVIred가 그 다음이었고, 청색역을 이용한 RVIblue와 NDVIblue는 상관도가 가장 낮게 나타났다. RVIgreen은 대부분의 경우 생육 및 질소영양상태와 밀접한 관련이 있었는데, 특히 유수분화기(출수전 26일) 때의 RVIgreen과 LAI, 지상부 건물중, 지상부 질소함량 및 NNI와는 $r>0.9$ 이상의, 엽 및 지상부 질소농도와는 $r>0.8$ 이상의 높은 정상관을 나타내어 유수분화기경의 생육과 질소영양상태를 진단할 수 있을 것으로 판단되었다. Diker와 Bausch

(2003)는 옥수수에서 RVIgreen을 이용하여 식물체 질소농도를 추정($R^2>0.76$) 할 수 있었다고 한 반면, Daughtry 등(2000)은 파장평균 BRF가 아닌 단일파장을 이용하여 엽록소함량을 추정한 결과 RVIred가 NDVIred나 RVIgreen보다 관련성이 크다고 하였다.

연차나 생육시기에 관계없이 균락이 폐쇄되는 정도에 따라서 균락반사로써 생육량이나 질소영양상태의 추정이 가능한지를 살펴보기 위해 2001년과 2002년 모든 생육시기를 통합하여 식생지수와 생육 및 질소영양 특성치 간의 관계를 엽면적지수에 따라 살펴보았는데(Table 3), 균락이 형성되는 초기 시점인 엽면적지수 1 이상에서는 식생지수와 엽면적, 지상부건물중, 지상부 질소함량 간에 유의하게 높은 상관관계를 보인 반면, 식생지수와 엽중 질소농도 및 지상부 질소농도와는 엽면적지수가 증가함에 따라서 상관값도 증가하였으나 유의하지는 않았다. 질소영양지수는 엽면적지수가 증가함에 따라서 상관도가 높아져 엽면적지수 2.5 이상에서는 0.76 이상의 높은 상관값을 보였다. 생육시기에 관계없이 생육이 진전됨에 따라서 증가하는 경향성을 갖는 엽면적지수, 지상부 건물중, 지상부 질소함량 등이 식생지수와 상관도가 높았으며, 생육시기에 관계없이 엽면적지수 2.5 이상에서 분열과 엽중 및 지상부 질소농도를 제외한 생육 및 질소영양 특성치와 상관도가 높게 나타났다. 이는 앞서 언급한대로 균락반사를 이용하여 비파괴적으로 벼의 생장량 및 질소영양특성을 파악하기 위해서는 균락이 어느 정도 형성되어야만 정확한 추정이 가능하기 때문이다.

Table 2. Correlation of vegetation indices with parameters of growth and nitrogen nutrition parameters at each growth stage in 2001 and 2002.

	Tiller (No./m ²)	Leaf area index	Shoot dry weight (kg/10a)	Leaf N (%)	Shoot N (%)	Shoot N content (kgN/10a)	Nitrogen nutrition index	
30DAT	Range	244.4~563.7	0.38~1.06	22.1~104.9	3.46~4.58	2.55~3.73	0.63~3.63	0.62~0.92
	RVI [†] blue	0.890**	0.742**	0.803**	0.538*	0.616*	0.868**	0.616*
	RVIgreen	0.864**	0.841**	0.773**	0.458	0.721**	0.849**	0.721**
	RVIred	0.812**	0.838**	0.695**	0.364	0.758**	0.789**	0.758**
	NDVIBlue	0.838**	0.811**	0.764**	0.463	0.653**	0.819**	0.653**
	NDVIgreen	0.823**	0.861**	0.741**	0.412	0.722**	0.808**	0.722**
42DAT	NDVIred	0.762**	0.897**	0.653**	0.277	0.787**	0.735**	0.787**
	Range	286.3~685.2	1.01~3.52	69.6~250.7	2.55~4.04	1.98~3.12	1.38~7.01	0.49~0.76
	RVIblue	0.556*	0.737**	0.719**	0.010	0.849**	0.839**	0.849**
	RVIgreen	0.477	0.691**	0.671**	-0.085	0.920**	0.823**	0.920**
	RVIred	0.422	0.635*	0.617*	-0.145	0.919**	0.773**	0.919**
	NDVIBlue	0.557*	0.741**	0.711**	-0.029	0.828**	0.804**	0.828**
PIS (26~32 DBH)	NDVIgreen	0.507	0.723**	0.695**	-0.099	0.917**	0.825**	0.917**
	NDVIred	0.467	0.667**	0.634*	-0.146	0.858**	0.746**	0.858**
	Range	306.7~567.9	1.73~4.53	135.3~349.9	2.35~3.25	1.66~2.32	2.25~7.48	0.41~0.74
	RVIblue	0.513*	0.860**	0.718**	0.693**	0.675**	0.792**	0.805**
	RVIgreen	0.714**	0.931**	0.810**	0.818**	0.801**	0.909**	0.932**
	RVIred	0.606**	0.893**	0.748**	0.771**	0.752**	0.842**	0.866**
Booting stage (19DBH)	NDVIBlue	0.502*	0.814**	0.684**	0.682**	0.653**	0.749**	0.768**
	NDVIgreen	0.721**	0.908**	0.788**	0.818**	0.799**	0.881**	0.912**
	NDVIred	0.623**	0.832**	0.687**	0.784**	0.758**	0.780**	0.825**
	Range	293.3~504.4	1.91~5.49	194.4~494.5	2.00~2.76	1.39~1.95	2.76~8.13	0.36~0.69
	RVIblue	0.956**	0.975**	0.976**	0.936**	0.833*	0.980**	0.977**
	RVIgreen	0.958**	0.959**	0.959**	0.924**	0.811	0.958**	0.964**
19~32 DBH	RVIred	0.952**	0.970**	0.973**	0.937**	0.828*	0.977**	0.973**
	NDVIBlue	0.985**	0.978**	0.970**	0.902*	0.803	0.964**	0.973**
	NDVIgreen	0.955**	0.946**	0.947**	0.889*	0.762	0.939**	0.943**
	NDVIred	0.974**	0.969**	0.967**	0.899*	0.781	0.959**	0.963**
	Range	293.3~567.9	1.73~5.49	135.3~494.5	2.00~3.25	1.39~2.32	2.25~8.13	0.36~0.74
	RVIblue	0.573**	0.865**	0.739**	0.507**	0.468**	0.830**	0.797**
	RVIgreen	0.725**	0.935**	0.842**	0.444*	0.402*	0.896**	0.819**
	RVIred	0.651**	0.892**	0.764**	0.547**	0.506**	0.868**	0.840**
	NDVIBlue	0.567**	0.834**	0.718**	0.489**	0.442*	0.792**	0.763**
	NDVIgreen	0.727**	0.909**	0.812**	0.447*	0.404*	0.864**	0.798**
	NDVIred	0.665**	0.845**	0.719**	0.539**	0.493**	0.809**	0.793**

DAT=days after transplanting, DBH = days before heading

* and ** are significant at 5 and 1 % probability levels, respectively.

본 실험결과 대체로 RVI가 NDVI보다 벼 군락의 생체정보와 관련성이 높았는데, 이는 타 연구와는 달리 생체정보의 변이가 매우 큰 조건에서 이루어진 실험이기 때문인 것으로 판단된다. NDVI가 일반적으로 작물의 생체중이나 엽면적, 질소함량, 화곡류 엽내 엽록소함량 등과 밀접한 관련이 있다고 알려져 있지만(Ma *et al.*, 2001; Pontailler *et al.*, 2003), NDVI는 낮은 엽면적(LAI<3)이나 낮은 건물중에서도 NDVI값

이 1에 근접하는 포화현상(saturation)[†] 발생하는 단점이 있으며(Danson & Plummer, 1995), Hansen과 Schjoerring(2003)은 밀의 경우 LAI>2.5 이상에서도 NDVI의 포화현상이 발생한다고 보고하였다. 따라서 생체정보의 변이가 매우 클 경우에는 NDVI보다는 RVI를 이용하는 것이 추정도를 높일 수 있을 것으로 판단되었다.

Table 3. Correlation of vegetation indices with growth and nitrogen nutrition parameters by group of leaf area index.

	Tiller (No./m ²)	Leaf area index	Shoot dry weight (kg/10a)	Leaf N (%)	Shoot N (%)	Shoot N content (kgN/10a)	Nitrogen nutrition index
LAI>1	Range	286.3~685.2	1.00~5.49	46.7~494.5	2.00~4.58	1.39~3.73	1.38~8.13 0.36~0.92
	RVIblue	0.423**	0.886**	0.820**	-0.227	-0.297	0.865** 0.083
	RVIgreen	0.533**	0.849**	0.773**	-0.047	-0.115	0.892** 0.256
	RVIred	0.478**	0.810**	0.718**	-0.014	-0.085	0.861** 0.267
	NDVIblue	0.428**	0.807**	0.770**	-0.291	-0.377	0.804** -0.088
	NDVIgreen	0.545**	0.826**	0.756**	-0.060	-0.137	0.871** 0.201
	NDVIred	0.501**	0.752**	0.677**	-0.037	-0.120	0.802** 0.170
LAI>1.5	Range	293.2~685.2	1.52~5.49	103.3~494.5	2.00~4.04	1.30~3.12	2.25~8.13 0.36~0.76
	RVIblue	0.366*	0.841**	0.741**	-0.016	-0.062	0.813** 0.427**
	RVIgreen	0.497**	0.798**	0.687**	0.193	0.156	0.854** 0.614**
	RVIred	0.430**	0.738**	0.605**	0.259	0.220	0.808** 0.649**
	NDVIblue	0.380*	0.793**	0.702**	0.014	-0.032	0.781** 0.419**
	NDVIgreen	0.507**	0.769**	0.653**	0.221	0.184	0.828** 0.621**
	NDVIred	0.458**	0.670**	0.533**	0.312*	0.272	0.745** 0.653**
LAI>2	Range	311.1~685.2	2.02~5.49	140.8~494.5	2.06~4.04	1.42~3.12	2.76~8.13 0.36~0.76
	RVIblue	0.199	0.802**	0.680**	0.044	0.002	0.769** 0.482**
	RVIgreen	0.356*	0.751**	0.629**	0.240	0.212	0.817** 0.653**
	RVIred	0.292	0.702**	0.552**	0.300	0.267	0.783** 0.680**
	NDVIblue	0.185	0.731**	0.628**	0.073	0.033	0.721** 0.461**
	NDVIgreen	0.357*	0.722**	0.604**	0.237	0.210	0.787** 0.627**
	NDVIred	0.320	0.648**	0.508**	0.298	0.264	0.728** 0.628**
LAI>2.5	Range	333.3~685.2	2.50~5.49	173.9~494.5	2.11~4.04	1.42~3.12	3.71~8.13 0.44~0.76
	RVIblue	0.573	0.865**	0.739**	0.507	0.468	0.830** 0.797**
	RVIgreen	0.725	0.935**	0.842**	0.444	0.402	0.896** 0.819**
	RVIred	0.651	0.892**	0.764**	0.547	0.506	0.868** 0.840**
	NDVIblue	0.567	0.834**	0.718**	0.489	0.442	0.792** 0.763**
	NDVIgreen	0.727	0.909**	0.812**	0.447	0.404	0.864** 0.798**
	NDVIred	0.665	0.845**	0.719**	0.539	0.493	0.809** 0.793**

* and ** : significant at 5 and 1% probability levels, respectively.

Table 4. Correlation of SPAD reading with growth and nitrogen nutrition parameters at each growth stage in 2001 and 2002.

	Tiller (No./m ²)	LAI	DW (kg/10a)	Leaf N (%)	Shoot N (%)	Shoot N content (kgN/10a)	Nitrogen nutrition index
30DAT	Range	244.4~563.7	0.38~1.06	22.1~104.9	3.46~4.58	2.55~3.73	0.63~3.63 0.62~0.92
	SPAD	0.592*	0.951**	0.440	0.893**	0.912**	0.559* 0.912**
42DAT	Range	286.3~685.2	1.01~3.52	69.6~250.7	2.55~4.04	1.98~3.12	1.38~7.01 0.49~0.76
	SPAD	-0.162	0.099	0.059	0.757**	0.821**	0.286 0.821**
PIS (26~32DBH)	Range	306.7~567.9	1.73~4.53	135.3~349.9	2.35~3.25	1.66~2.32	2.25~7.48 0.41~0.74
	SPAD	0.481*	0.870**	0.731**	0.642**	0.616**	0.783** 0.780**
Booting stage (19DBH)	Range	293.3~504.4	1.91~5.49	194.4~494.5	2.00~2.76	1.39~1.95	2.76~8.13 0.36~0.69
	SPAD	0.983**	0.996**	0.994**	0.920**	0.809*	0.991** 0.985**
19~32 DBH	Range	293.3~567.9	1.73~5.49	135.3~494.5	2.00~3.25	1.39~2.32	2.25~8.13 0.36~0.74
	SPAD	0.472**	0.676**	0.497**	0.691**	0.662**	0.711** 0.797**

DAT=days after transplanting, DBH = days before heading

* and ** : significant at 5 and 1 % probability levels, respectively.

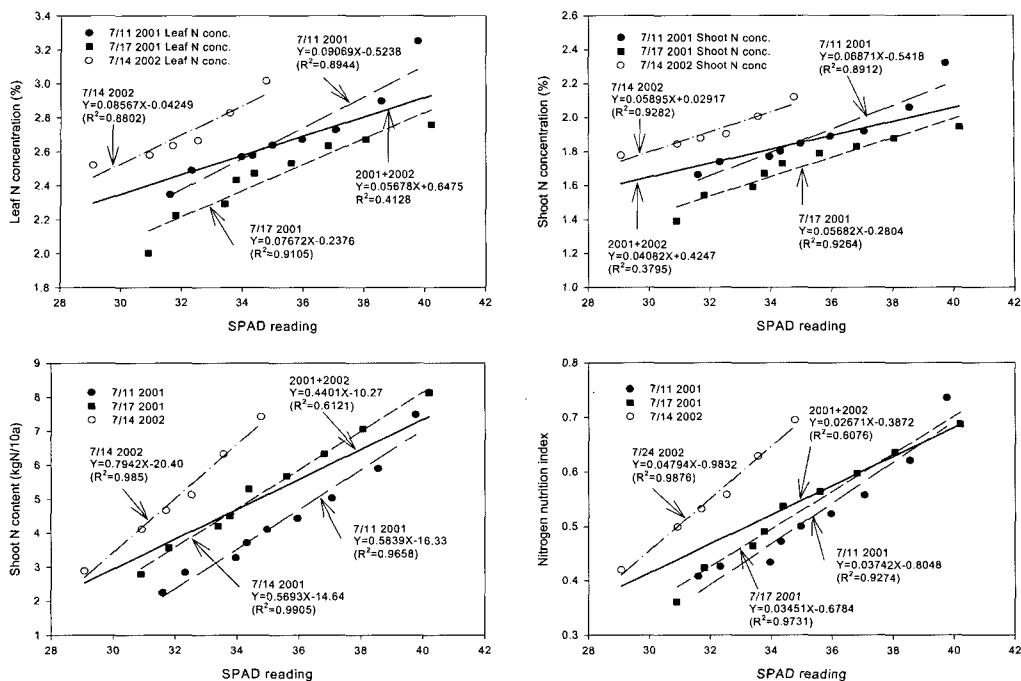


Fig. 4. Relationship of SPAD reading with growth and nitrogen nutrition parameters around panicle initiation stage.

Table 5. Correlation of SPAD reading with parameters of growth and nitrogen nutrition status by group of leaf area index.

	Tiller (No./m ²)	LAI	DW (kg/10a)	Leaf N (%)	Shoot N (%)	Shoot N content (kgN/10a)	Nitrogen nutrition index
LAI>1	Range	286.3~685.2	1.00~5.49	46.7~494.5	2.00~4.58	1.39~3.73	1.38~8.13
	SPAD	0.140ns	-0.081ns	-0.207ns	0.799**	0.788**	0.131ns
LAI>1.5	Range	293.2~685.2	1.52~5.49	103.3~494.5	2.00~4.04	1.30~3.12	2.25~8.13
	SPAD	0.130ns	0.087ns	-0.085ns	0.754**	0.748**	0.318*
LAI>2	Range	311.1~685.2	2.02~5.49	140.8~494.5	2.06~4.04	1.42~3.12	2.76~8.13
	SPAD	0.141ns	0.166ns	-0.015ns	0.702**	0.696**	0.430**
LAI>2.5	Range	333.3~685.2	2.50~5.49	173.9~494.5	2.11~4.04	1.42~3.12	3.71~8.13
	SPAD	0.472ns	0.676ns	0.497ns	0.691**	0.662**	0.711**

* and ** : significant at 5 and 1 % probability levels, respectively.

SPAD와 생육 및 질소영양지표간의 관계

생육시기별로 SPAD값과 생육 및 질소영양지표간의 관계를 살펴보면(Table 4), 이앙 후 30일에는 생육 및 질소영양 특성치와 유의한 상관을 보였지만 이앙 후 42일에는 엽중 및 지상부 질소농도와 NNI 등 질소영양특성치하고만 유의한 상관을 나타내었다. 이후 유수분화기때 생육 및 질소영양지표와 유의한 상관관계를 보이다가 수입기에 가장 높은 상관치를 나타내었다.

SPAD값은 특정년도 특정시기의 질소영양상태 및 생장량과 매우 높은 상관을 보였으나(Fig. 4), 유사한 생육단계일지라도 연도가 다르거나, 같은 연도일지라도 조사일이 다를 경

우 매우 상이한 결과를 나타내었다. 또한 엽면적지수에 따른 SPAD값과 생육 및 질소영양지표와의 관계를 살펴보면(Table 5), 엽면적지수에 관계없이 생육특성과는 관련성이 거의 없었고, 질소영양특성치하고만 유의한 상관관계가 존재하였다. 이는 SPAD값이 생육단계와 환경조건에 따라 달라지기 때문에 질소영양결핍의 지표로만 고려해야 된다는 보고(Piekielek et al., 1995)와 비슷한 결과이다.

적  요

정밀한 재배관리를 위해서는 작물의 영양상태를 빠르고 정

확하게 진단하고 이를 근거로 처방해야 한다. 따라서 본 연구는 우리나라의 벼 재배여건에서 영양생장기 생체정보를 군락반사와 SPAD-meter 측정값으로 추정할 수 있는지를 다양한 영양생장기 생육 및 질소영양상태에서 검토하였다.

1. 생육이 진전됨에 따라서 가시역의 반사율은 줄어들고 근적외역의 반사율은 증가하는 경향이었다. 군락의 반사율은 엽면적지수에 따라 크게 변하였으며, 군락이 폐쇄되어 배경효과가 줄어드는 엽면적지수 2.5 이상에서 측정하는 것이 유효하였다.

2. 군락반사로 얻어진 식생지수 RVI, NDVI는 이앙후 30일 이후부터 작물의 생육량 및 질소영양상태와 밀접한 관련이 있었으며, 특히 엽면적지수, 건물중, 지상부 질소흡수량 및 NNI와 고도로 유의한 상관관계를 나타내었는데, 이는 이들이 생육이 진전됨에 따라서 증가하는 경향을 갖고 있기 때문이었다.

3. RVI가 NDVI보다 생육량 및 질소영양상태와 관련성이 높았는데, NDVI는 낮은 엽면적이나 건물중에서도 1에 근접하는 포화현상이 발생하기 때문에 생체정보의 변이가 큰 조건에서는 RVI가 더 유용하다고 판단된다. 식생지수 중에서는 RVIgreen이 생육량 및 질소영양상태와 관련성이 가장 높았다.

4. SPAD값은 특정년도 특정시기의 질소영양상태 및 생장량과 매우 높은 상관을 보였으나 생육시기나 연도를 통합할 경우 상관이 낮았다. SPAD값은 엽면적지수에 관계없이 생육특성과는 관련성이 거의 없었고, 질소영양 관련 특성치 간에만 유의한 상관관계가 존재하였다.

5. SPAD-meter는 많은 제한조건이 있는 반면, 식생지수중 RVIgreen을 이용할 경우 유수형성기 전후 벼의 생육량이나 질소영양상태를 가장 잘 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 농림기술관리센터의 “벼 생육정보 비파괴적 수집 및 가변시비 처방기술 개발” 연구비지원에 의하여 이루어진 것임.

인용문헌

- Agren, G. I. 1985. Theory for growth of plants derived from the nitrogen productivity concept. *Physiologia Plantarum* 64:17-28.
- Cui, R. X., M. H. Kim, J. H. Kim, H. S. Nam, and B. W. Lee. 2002. Determination of critical nitrogen concentration and dilution curve for rice growth. *Korean Journal of Crop Science*. 47:127-131.
- Danson, F. M. and S. E. Plummer. 1995. Red-edge response to forest leaf area index. *International Journal of Remote Sensing* 16:183-188.
- Daughtry, C. S. T., C. L. Walthall, M. S. Kim, E. Brown de Colstoun, and J. E. McMurtrey III. 2000. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment* 74:229-239.
- Diker, K. and W. C. Bausch. 2003. Radiometric field measurements of maize for estimating soil and plant nitrogen. *Biosystems Engineering* 86(4):411-420.
- Flowers, M., R. Weisz, and R. Heiniger. 2003. Quantitative approaches for using color infrared photography for assessing in-season nitrogen status in winter wheat. *Agronomy Journal* 95:1189-1200.
- Fox, R. H., W. P. Piekielek, and K. M. Macneal. 1994. Using a chlorophyll meter to predict nitrogen fertilizer needs of winter wheat. *Community of Soil Science and Plant Analysis* 25:171-181.
- Gausman, H. W., W. A. Allen, V. I. Myers, and R. Cardenas. 1969. Reflectance and internal structure of cotton leaves, *Gossypium hirsutum* L. *Agronomy Journal* 61:374-376.
- 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 Sensing of Environment* 86:542-553.
- 홍석영. 1999. 원격탐사 자료를 이용한 벼 생육정보 분석 및 재배면적 추정. 경북대학교 박사학위논문.
- 김준환. 2001. 벼의 한계질소농도 구명 및 군락반사율에 의한 질소영양상태 추정연구. 서울대학교 석사학위논문.
- Ladha, J. K., A. Tirol-Padre, G. C. Punzalan, E. Castillo, U. Singh, and C. K. Reddy. 1998. Nondestructive estimation of shoot nitrogen in different rice genotypes. *Agronomy Journal* 90:33-40.
- 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. *Agronomy Journal* 93:1227-1234.
- Norman, R. J., D. Guindo, B. R. Wells, and C. E. Wilson, Jr. 1992. Seasonal accumulation and partitioning of nitrogen-15 in rice. *Soil Science Society of American Journal* 56:1521-1527.
- Peng, S., R. C. Laza, F. V. Garcia, and K. G. Cassman. 1995. Chlorophyll meter estimates leaf area based nitrogen concentration of rice. *Community of Soil Science and Plant Analysis* 26:927-935.
- Piekielek, W. P., R. H. Fox, J. D. Toth, and K. E. Macneal. 1995. Use of a chlorophyll meter at the early dent stage of corn to evaluate nitrogen sufficiency. *Agronomy Journal* 87:403-408.
- Piekielek, W. P. and R. H. Fox. 1992. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress N requirements for maize. *Agronomy Journal* 84:59-65.
- Pontailler, J. Y., G. J. Hymus, and B. G. Drake. 2003. Estimation of leaf area index using ground-based remote sensed NDVI measurements: validation and comparison with two indirect techniques. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29(3):381-387.
- Rondeau, G., M. Steven, and F. Baret. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 55:95-107.
- Turner, F. T. and M. F. Jund. 1991. Chlorophyll meter to predict nitrogen topdressing requirement for semidwarf rice. *Agronomy Journal* 83:926-928.
- Yang, Y. K. and L. D. Miller. 1985. Correlations of rice grain yields to radiometric estimates of canopy biomass as a function of growth stage. *Journal of Korean Society of Remote Sensing* 1:63-86.
- Yoder, B. J. and R. E. Pettigrew-Crosby. 1995. Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra(400-2500nm) at leaf and canopy scales. *Remote Sensing of Environment* 53:199-211.