

지상원격측정 센서를 이용한 벼의 생체량 및 질소 영양 평가

강성수 · 공효영 · 정현철 · 김이현 · 홍석영 · 홍순달^{1*}

국립농업과학원, ¹충북대학교 환경생명화학학과

Evaluation of Biomass and Nitrogen Status in Paddy Rice Using Ground-Based Remote Sensors

Seong-Soo Kang, Hyo-Young Gong, Hyun-Cheol Jung, Yi-Hyun Kim,
Suk-Young Hong, and Soon-Dal Hong^{1*}

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

¹Department of Agricultural Chemistry, Chungbuk National University, Cheongju, 361-763, Korea

Ground-based remote sensing can be used as one of the non-destructive, fast, and real-time diagnostic tools for quantifying yield, biomass, and nitrogen (N) stress during growing season. This study was conducted to assess biomass and nitrogen (N) status of paddy rice (*Oryza sativa* L.) plants under N stress using passive and active ground-based remote sensors. Nitrogen application rates were 0, 70, 100, and 130 kg N ha⁻¹. At each growth stage, reflectance indices measured with active sensor showed higher correlation with DW, N uptake and N concentration than those with the passive sensor. NIR/Red and NIR/Amber indices measured with Crop Circle active sensors generally had a better correlation with dry weight (DW), N uptake and N content than vegetation indices from Crop Circle passive sensor and NDVIs from active sensors. Especially NIR/Red and NIR/amber ratios at the panicle initiation stage were most closely correlated with DW, N content, and N uptake. Rice grain yield, DW, N content and N uptake at harvest were highly positively correlated with canopy reflectance indices measured with active sensors at all sampling dates. N application rate explains about 91~92% of the variability in the SI calculated from NIR/Red or NIR/Amber indices measured with Crop Circle active sensors on 12 July. Therefore, the in-season sufficiency index (SI) by NIR/Red or NIR/Amber index from Crop Circle active sensors can be used for determination of N application rate.

Key words: Canopy reflectance, Ground-based remote sensors, NDVI, Nitrogen status, Paddy rice

서 언

질소의 경우 시간적 공간적 변화가 매우 크기 때문에 작물의 질소이용율을 향상시키기 위해서는 작물 생육 단계별로 토양 또는 식물체 검정법을 이용하여 적시에 적량의 웃거름을 시비하는 것이 바람직하다. 따라서 식물체 검정법으로 조직검정 (tissue test), 엽록소측정법, 원격탐사법 등의 방법들이 개발되어 왔다. 조직검정법은 식물체를 절단하여 채취한 후 분석해야하는 문제 때문에 비파괴적 방법인 SPAD-502 엽록소측정기를 이용하는 것이 더 실용적인 방법으로 연구되어 왔다. Balasubramanian et al., (1999)은 벼 포장에서 SPAD 엽록

소 측정기와 잎녹색도 컬러차트 (Leaf Color Chart)를 질소 웃거름 시비량 결정에 이용할 수 있다고 하였고, Yang et al., (2003)은 벼에 대해서 3종류의 잎 녹색도 컬러차트는 질소시비수준과 잎 질소농도와 밀접한 관계를 보여 질소 덧거름 시비에 활용가능하다고 하였다. 엽록소 측정기는 식물의 질소 상태에 대한 정보를 빠르게 얻을 수 있으나 한 번에 한 개체에 대한 정보를 얻을 수 있어 커다란 필지에 대해서 사용하기에는 시간이 많이 걸리게 된다는 단점이 있다 (Bausch and Duke, 1996; Blackmer et al., 1996).

원격탐사는 개체별 식물체 분석없이 충분한 공간해상도로 쉽고 빠르게 커다란 한 포장에 대한 정보를 얻을 수 있는 잠재력을 갖고 있다 (Dellinger et al., 2008). 기본원리는 잎 캐노피로부터의 빛에너지 반사율은 식물의 엽록소 수준과 관계되며, 이것은 차례로 식생의 질소

접수 : 2010. 11. 12 수리 : 2010. 12. 7

*연락처 : Phone: +82432612564

E-mail: sdhong@cbnu.ac.kr

농도와 관련이 있다는 것이다 (Daughtry et al., 2000; Thomas and Gausman, 1977).

Tucker (1979)에 의해 최초로 제안된 normalized difference vegetation index [NDVI=(NIR₈₈₀-VIS₆₇₅)/(NIR₈₈₀+VIS₆₇₅)]는 가시광선 파장과 근적외선 파장간의 빛에너지 반사율 차이의 함수로서 식생의 생체량, 엽록소 함량, 질소영양상태 평가에 널리 사용되고 있는 지표이다. NDVI의 가시광선 부분은 적색파장 (675 nm)의 반사율로서 식생이 쉽게 흡수할 수 있는 파장이기 때문이다 (Gitelson et al., 1996; Shanahan et al., 2001). 그러나 최근연구에서는 이 결과가 단지 낮은 엽록소 함량 조건에서는 잘 맞지만 엽록소함량 변화에 대하여 적색파장의 흡수는 녹색 파장 (560 nm)의 흡수만큼 민감하지 않기 때문에 곡물수량에 대하여 NDVI와 Green NDVI를 비교한 결과에서 NDVI는 GNDVI만큼 수량과 밀접한 상관관계를 보이지 않았다고 보고되었다 (Blackmer et al., 1996; Daughtry et al., 2000; Gitelson et al., 1996; Shanahan et al., 2001).

근래에는 광원으로서 구름과 같은 날씨의 영향을 받는 태양광이 아닌 자체광원으로서 센서가 태양광과 구분하여 인식할 수 있도록 변조된 light emitting diode (LED) 광원을 이용하는 능동형 캐노피 센서 (active canopy sensor)가 개발되어 질소변량시비체계의 입력변수로 평가되고 있다 (Barker and Sawyer, 2010). 이러한 지상원격측정 센서로 얻어진 식물 반사율 식생지표 정보가 식물의 질소상태 평가와 정확한 질소시비량 추천 개발을 위해 성공적으로 이용될 수 있다면, 원격탐사에 의한 효율적인 식물의 질소영양 정보수집이 가능하고 시비추천이 현재의 필지별 단위보다 더욱 작은 단위인 필지 내 위치별로 생육중 적절한 시기에 이루어질 수 있다 (Bausch and Duke, 1996; Scharf et al., 2002).

따라서 본 시험은 질소 시비량 수준별 조건에서 자란 벼의 성장량 변수와 여러 가지 지상원격측정 센서의 캐노피 반사율 지표들과의 관계로부터 수량예측 및 질소 웃거름 시비량 결정을 위한 도구로서의 활용가능성을 평가하였다.

재료 및 방법

재배 및 처리방법 시험작물로 벼 (*Oryza sativa* L.) 품종 추정으로 하여 농촌진흥청 국립식량과학 논포장에서 이앙은 2005년 5월 18일에, 수확은 10월 11일에 하였다. 시험처리는 질소시비수준 0, 70, 100, 130 kg N ha⁻¹의 4수준 3반복으로 하였고 난괴법으로 배치하였다. 시험구의 면적은 48 m², 재식밀도는 30 × 15 cm로 하였다. 질소시비량의 50%는 밑거름으로, 25%는 분얼기에, 25%는 유수분화기에 웃거름으로 요소를 시비하였다. 인산, 칼리의 시비량은 토양검정시비량에 따라 69, 30 kg ha⁻¹의 해당량을 용과린과 염화칼륨으로 모든 처리구에 동일하게 처리하였다. 시험포장의 토양은 화동통 (fine, mixed, mesic family of Aquic Hapludalfs)이며 표토토성은 식양토이었다. 화학적 특성 (Table 1)은 작물별 시비처방기준 (NIAST, 2006)의 벼 재배에 적합한 토양화학성 기준과 비교하여 볼 때 유기물과 유효인산함량, 양이온교환용량이 낮은 편이었다.

시료채취 및 분석방법 토양시료는 풍건 후 2 mm 체에 통과시켜 조제하였고 농업과학기술원 토양 및 식물체 분석법에 준하여 분석하였다 (NIAST, 2000). 식물체 분석은 유수형성기인 7월 12일부터 수확기까지 생장단계마다 측정하였다. 시험구당 생육이 고른 벼 3주를 선택하여 생체중, 초장, 경수를 측정하고 다음 70°C에서 건조한 후 건물중을 측정하고 분쇄하여 분석하였다. 수확기 수량조사는 1×1 m² 면적내 개체를 전수조사하였다. 전질소 함량은 식물체 시료 0.2 g을 100 ml 켈달 플라스크에 넣고 진한 H₂SO₄ 5 ml와 분해촉진제를 넣고 block digester (Tecator 2040 digester)를 이용하여 370°C에서 2시간 분해시킨 후 Kjeldahl 자동증류적정장치 (Tecator 1030 Analyzer)를 이용하여 측정하였다.

지상원격측정센서의 측정방법 지상원격측정 센서를 이용한 벼의 캐노피 상태의 반사율 (canopy reflectance) 및 성장지표 (vegetation index)의 측정은 유수형성기인 7월 12일부터 수확기까지 일주일 간격으로 생장단계마다 측정하였다. 사용된 센서의 종류 및 측정방법은 다음과 같다.

Table 1. Physico-chemical properties of experimental field.

Soil texture	pH	OM	NH ₄ -N	Av. P ₂ O ₅	Av. SiO ₂	Ex. cations			CEC
						K	Ca	Mg	
	(1:5)	g kg ⁻¹	-----	mg kg ⁻¹	-----	----- cmol _c kg ⁻¹ -----			
Clay loam	6.0	18	7	31	135	0.52	7.1	1.50	8.7

Crop Circle-passive sensor (Holland Scientific) 자연광 중에서 녹색 (550 nm), 노란색 (600 nm), 적색 (680 nm), 근적외선 (820 nm) 영역의 반사율을 측정하는 센서이다. 99%의 반사율을 갖는 흰색 반사판으로 표준화 과정을 한 후 벼 캐노피와 센서간의 거리를 80 cm로 하여 스캐닝 하는 방법으로 측정하였고 이 때 원형 관측영역 (field of view)의 직경은 40 cm였다.

GreenSeeker-red & green version (Ntech Industries) GreenSeeker-red 센서는 근적외선 파장으로 770 ± 15 nm와 적색 파장으로 660 ± 15 nm, 그리고 green 버전 센서는 근적외선 파장으로 770 ± 15 nm와 녹색 파장으로 530 ± 15 nm의 모듈레이션된 반사광만을 검출하여 각각 NDVI와 Red/NIR, GNDVI와 Green/NIR 지표를 산출한다. 캐노피 위를 90 cm 높이에서 스캐닝 하는 방식으로 측정하였고 관측영역은 60×1 cm이었다.

Crop Circle-red & amber version (Holland Scientific) Red 버전 센서는 근적외선 파장으로 880 ± 10 nm와 적색 파장으로 650 ± 5 nm, 그리고 amber 버전 센서는 근적외선 파장으로 880 ± 10 nm와 amber 파장으로 590 ± 5.5 nm의 LED광을 이용하며 각각 NDVI와 NIR/Red, ANDVI와 NIR/Amber 지표를 산출한다. 센서와 목표물까지의 거리가 증가할수록 관측영역은 32°×6°의 비율로 증가하게 된다. 따라서 센서와 목표물까지의 거리가 90 cm일 때 관측영역은 50×10 cm가 된다. 캐노피 위를 80 cm 높이에서 스캐닝하는 방식으로 측정하였으며 관측영역의 폭은 46×9.2 cm였다.

자료 분석 질소 시비수준에 따른 벼의 생체량 및 질소영양의 차이를 평가할 수 있는 생육시기 및 효율적 측정 센서를 선발하기 위하여 SPSS 12.0K 프로그램을 이용, 질소수준별 벼의 생장량 지표들과 생육단계별 원격측정 센서 반사율지표의 상관 및 회귀관계를 분석하였다.

결과 및 고찰

생장량 및 질소 흡수량 질소 시비 수준에 따른 벼의 생육시기별 건물중과 질소흡수량은 Table 2와 같이 큰 차이를 보였다. 유수형성기인 7월 12일의 건물중과 질소흡수량의 변이계수가 각각 25%, 37%로 가장 크게 나타났다. 그 이외 생육시기에서는 건물중 13% 질소흡수량 26~35%의 변이계수를 나타냈다. 이러한 차이를 보인 생장량 변수들은 원격측정센서의 반사율 지표들과의 상호관계 분석에 이용되었다.

생육시기별 생체량 지표와 반사율 지표의 상관관계

Table 3은 7월 12일부터 수확기까지 4회 측정된 지상 원격측정센서의 반사율 지표와 지상부 건물중, 엽면적지수 (LAI) 및 조곡중량의 상관관계를 나타낸 것이다. 이들 관계는 전반적으로 밀접한 상관을 보였는데 passive 센서보다는 active 센서가 더 큰 상관계수를 보였다. 이것은 Nguyen and Lee (2004)의 벼 출수기 이전에 spectroradiometer로 측정한 반사율 생장지표 NDVI는 여러 가지 작물 생육 변수들과 높은 상관관계를 보였다는 결과와 같은 것이었다. 건물중과 Crop Circle-passive 센서의 반사율 지표의 상관계수는 출수기 이후에 낮아졌는데 이것은 Hong et al. (1998)이 spectroradiometer를 이용하여 벼의 건물중을 평가한 결과와 같았다. 생육시기별 지상부 건물중, 엽면적지수, 수량과 가장 밀접한 관계를 보인 반사율 지표는 Crop Circle-red로 측정한 NIR/Red 비율과 Crop Circle-amber로 측정한 NIR/Amber 비율이었다. 이 비율값은 근적외선 (NIR) 파장의 반사율을 가시광선 파장의 반사율로 나눈 지표로 relative vegetation index (RVI) 또는 simple ratio (SR)라고도 불린다 (Jordan 1969; Tucker 1979). 특히 유수분화기에 Crop Circle active 센서로 측정한 NIR/Red, NIR/Amber 비율은 7월 12일과 19일의 건물중, 엽면적 지수와 상관계수 0.92 이상의 고도로 유

Table 2. Statistical summary of dry weight and amount of N uptake as affected by nitrogen application levels.

Statistic	12 Jul.		10 Aug.		20 Sep.		11 Oct.	
	DW	N-uptake	DW	N-uptake	DW	N-uptake	DW	N-uptake
	g plant ⁻¹	mg plant ⁻¹	g plant ⁻¹	mg plant ⁻¹	g plant ⁻¹	mg plant ⁻¹	g plant ⁻¹	mg plant ⁻¹
Minimum	16.2	156	44.6	268	34.5	83	34.1	42
Maximum	32.0	449	64.7	583	51.1	192	48.7	134
Median	25.7	310	55.8	434	43.5	140	41.3	96
Average	24.8	303	55.1	426	42.9	142	41.3	91
St. Dev.	6.1	113	7.0	111	5.7	40	5.2	32
CV (%)	25	37	13	26	13	28	13	35

Table 3. Correlation coefficient between dry weight of rice plant and reflectance indices by ground-based remote sensors.

Sensors	Reflectance index	12-Jul		19-Jul		29-Aug		Harvesting	
		DW	LAI	DW	LAI	DW	LAI	DW	DW-grain
CC-passive	GNDVI	0.77**	0.84**	0.87**	0.85**	0.69*	0.71*	0.50	0.55
	ANDVI	0.76**	0.85**	0.84**	0.82**	0.69*	0.71*	0.52	0.58
	NDVI	0.75**	0.85**	0.80**	0.77**	0.48	0.46	0.50	0.58
GS-red	NDVI	0.61*	0.73**	0.87**	0.84**	0.72**	0.74**	0.80**	0.73**
GS-green	GNDVI	0.86**	0.85**	0.87**	0.80**	0.83**	0.72**	0.92**	0.87**
CC-red	NDVI	0.88**	0.93**	0.91**	0.88**	0.83**	0.83**	0.77**	0.76**
	NIR/Red	0.94**	0.95**	0.95**	0.94**	0.87**	0.85**	0.77**	0.75**
CC-amber	ANDVI	0.86**	0.93**	0.92**	0.89**	0.82**	0.83**	0.75**	0.78**
	NIR/Amber	0.92**	0.95**	0.96**	0.94**	0.86**	0.86**	0.76**	0.78**

*, ** Significant at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.
n=12.

Table 4. Correlation coefficient between N content in rice plant and reflectance indices by ground-based remote sensors.

Sensors	Reflectance index	N content				N uptake			
		12-Jul	19-Jul	29-Aug	Harvesting	12-Jul	19-Jul	29-Aug	Harvesting
CC-passive	GNDVI	0.67*	0.82**	0.53	0.57	0.73**	0.84**	0.57	0.54
	ANDVI	0.67*	0.79**	0.53	0.60*	0.72**	0.81**	0.57	0.57
	NDVI	0.66*	0.74**	0.23	0.58*	0.71**	0.77**	0.17	0.55
GS-red	NDVI	0.67*	0.79**	0.83**	0.81**	0.64*	0.85**	0.82**	0.82**
GS-green	GNDVI	0.80**	0.74**	0.79**	0.93**	0.82**	0.82**	0.82**	0.93**
CC-red	NDVI	0.85**	0.84**	0.90**	0.82**	0.87**	0.88**	0.92**	0.79**
	NIR/Red	0.92**	0.91**	0.91**	0.81**	0.94**	0.93**	0.93**	0.79**
CC-amber	ANDVI	0.83**	0.84**	0.89**	0.83**	0.85**	0.89**	0.91**	0.80**
	NIR/Amber	0.90**	0.90**	0.90**	0.83**	0.92**	0.93**	0.93**	0.80**

*, ** Significant at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.
n=12.

의성 있는 정의 상관 ($P < 0.01$)을 보였으며 생육 후반으로 갈수록 상관계수의 크기는 약간 낮아지는 경향이 있었다. 이러한 결과는 벼 유수분화기 캐노피 생체량과 NIR/Red 비율의 상관계수는 최대 0.94를 나타냈다는 것 (Yang and Miller, 1985), GNDVI와 벼 엽 질소함량의 상관계수가 유수형성기인 7월 11일 경에 가장 높았다 (Kim and Hong, 2007)는 결과와 같았다.

각 생육시기별 센서의 반사율지표와 지상부의 질소농도 및 질소흡수량과의 상관계수비교에서 active 센서들은 전 생육기간에 걸쳐 고도로 유의성 있는 정의 상관관계를 보였으며 Crop Circle-passive 센서에 비해 더욱 밀접한 정의 상관관을 보였다 (Table 4). 그리고 active 센서로 측정된 NIR/Red와 NIR/Amber 비율 지표가 더 높은 상관계수를 나타냈으며 생육 후반으로 갈수록 상관계수 크기는 낮아지는 경향이 있었다. Xue et al. (2004)의 잎 질소농도와 질소흡수량은 전 생육기간에 걸쳐 RVI 지표와 유의성 있는 정의 상관관을 보였다고 보고하였다.

Kim et al. (2005)은 잎의 질소농도와 식생지수의 상관관은 유수분화기 이전에는 유의성이 없었으나 이후에는 유의성이 있었으며 유수분화기와 수잉기에 높은 상관관을 보였다고 하였으며, 또한 RVI가 NDVI보다 벼 군락의 생체정보 변수들과 더 밀접한 관련을 보였다고 하며 그 이유로 NDVI는 엽면적지수나 건물중이 증가할수록 포화현상에 도달하기 때문이라고 하였다. 이러한 결과들은 유수형성기가 이삭거름 시비시기이므로 상대적으로 측정이 편리하고 빠른 능동형 지상원격측정 센서의 반사율 지표는 질소영양 평가 및 웃거름 시비량 결정에 효율적 지표로 이용가능할 것으로 판단되었다.

수량과 생육중반기 반사율 지표의 상호관계 수확기 건물중, 질소농도 및 질소흡수량과 생육중반기 각 시기의 반사율 지표의 상관관계에서도 생육시기별 생체량 지표와 반사율 지표의 상관관계와 유사한 높은 상관계수 (data not shown)를 보였으며 Crop Circle active

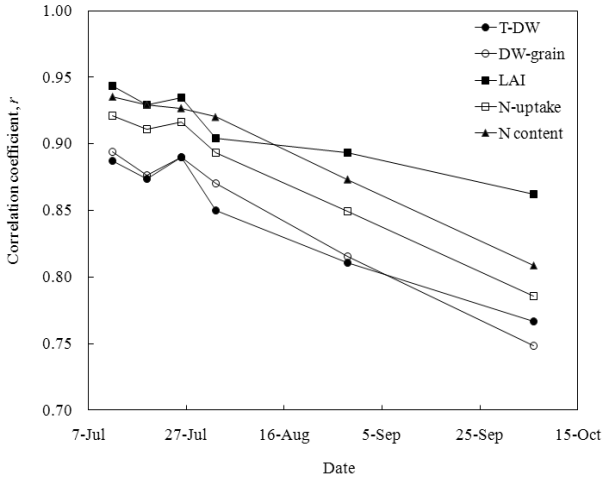


Fig. 1. Change of correlation coefficient between yield characteristics of rice at the harvesting and NIR/Red ratio by Crop Circle-red sensor at different growth stages of rice.

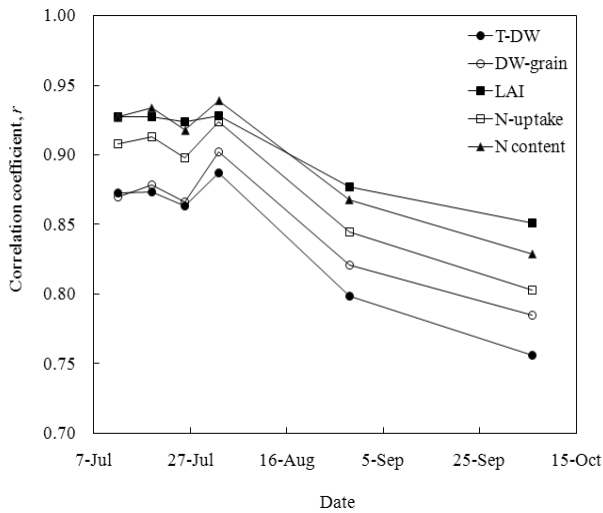


Fig. 2. Change of correlation coefficient between yield characteristics of rice at the harvesting and NIR/Amber ratio by Crop Circle-amber sensor at different growth stages of rice.

센서에 의한 NIR/Red 및 NIR/Amber 비율 지표가 다른 지표들에 비해 더 높은 상관계수를 보였다.

벼 수량 및 수확기 건물중, 엽면적지수, 지상부 질소농도 질소흡수량과 Crop Circle active 센서로 측정된 NIR/Red와 NIR/Amber 비율의 생육시기별 상관계수 변화는 Fig. 1, 2에 각각 나타났다. 관측수 (n)는 12이었고 유의수준 1%에서의 상관계수의 유의성 검정값은 0.708로 모든 시기에서 고도로 밀접한 정의 상관관계 ($P < 0.01$)를 보였다. 특히 이삭거름 시비시기인 7월 중순경과 알거름 시비시기인 7월 말~8월 초 사이의 상관계수는 생육 후반에 비해 더 높았다. 따라서 7월 12일에서 8월 초 사이는 Crop Circle active 센서의 RVI

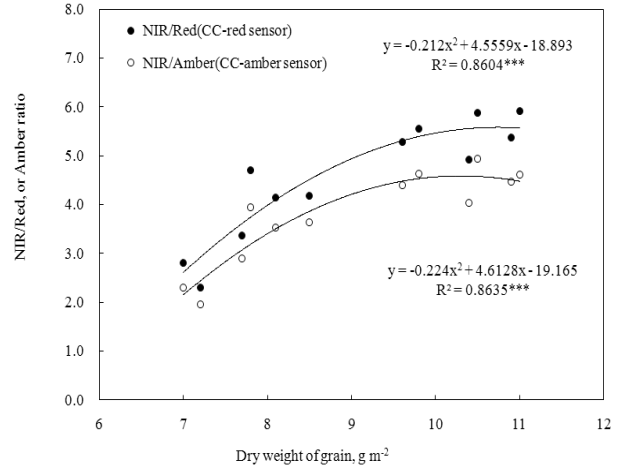


Fig. 3. Relationship between dry weight of grain of rice and reflectance index by Crop Circle-red and amber sensors at the panicle initiation stage (12 July).

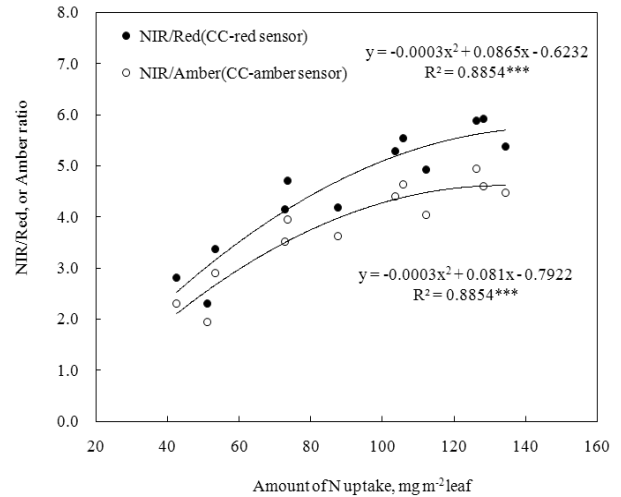


Fig. 4. Relationship between N uptake by rice plant at the harvesting and reflectance index by Crop Circle active sensors at the panicle initiation stage (12 July).

지표로 수확기의 건물중 및 수량, 질소 농도 및 흡수량을 예측하기 위한 적절한 시기로 판단되었다. 이것은 Nguyen and Lee (2004)가 보고한 벼 수잉기 반사율 지표 NDVI가 건물중, 잎 질소농도, 엽면적 지수 등의 작물 성장 변수들보다 수량 및 수량구성요소와 더 높은 상관을 보여 수량예측을 위한 예측자로서 또는 질소시비량 결정을 위한 추정자로서 사용될 수 있다고 한 것과 같은 결과였다. 또한 유수형성기와 출수기 사이의 수잉기 (booting stage)가 벼 군락의 반사율 측정으로 수량예측모델을 개발하는데 가장 좋은 시기라고 한 결과 (Chang et al., 2005)와 유사하였다.

Crop Circle active 센서로 측정된 NIR/Red와 NIR/Amber 비율값과 수량 (Fig. 3) 및 지상부 질소흡수량 (Fig. 4)의 회귀관계에서 반사율 지표 변동량의 86%,

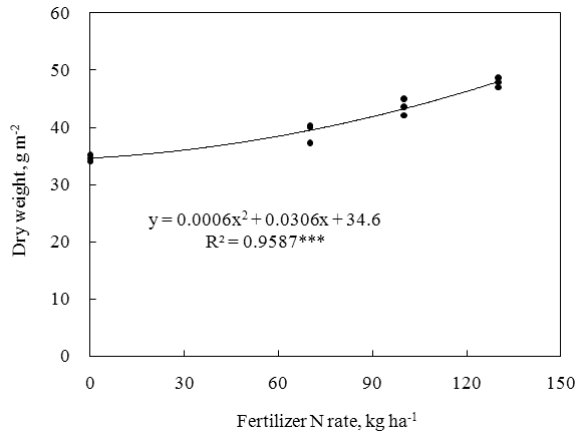


Fig. 5. Dry weight of rice plant at the harvesting applied with different rate of nitrogen fertilizer.

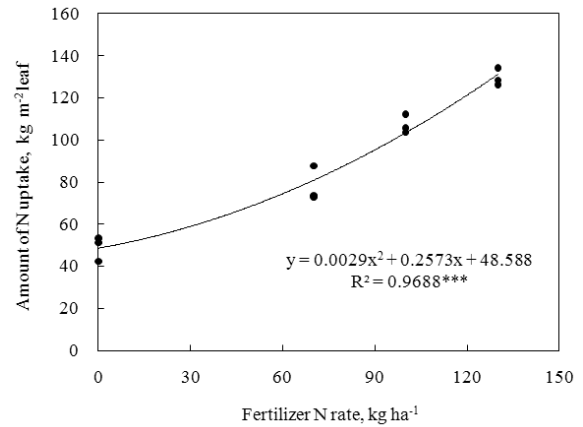


Fig. 7. Amount of N uptake by rice leaves at the harvesting applied with different rate of N fertilizer.

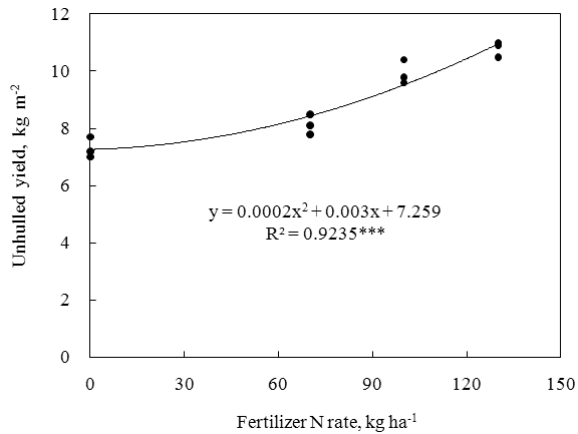


Fig. 6. Unhulled yield of rice applied with different rate of nitrogen fertilizer.

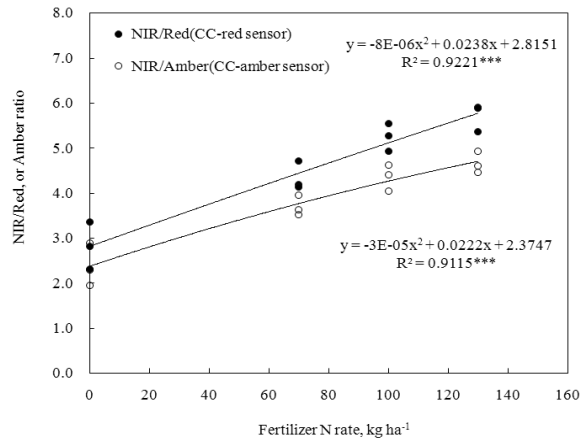


Fig. 8. Reflectance index at the panicle initiation stage (12 July) of rice applied with different rate of N fertilizer.

89%는 각각 수량, 지상부 질소흡수량과의 2차 회귀관계식에 의해 설명 가능하였다.

Critical season 반사율 지표에 의한 수도의 질소 시비수준 추정 중모 기계이앙 재배시 이삭거름은 7월 10일에서 25일 사이에 알거름은 7월 25일에서 8월 10일 사이에 시비하도록 추천되고 있다 (박 등, 1993). Figure 1과 2에서 7월 7일에서 8월 2일 사이의 반사율 지표와 수량 및 수확기 벼 생장량 변수들의 상관관계수가 가장 높았다. 따라서 이 시기를 반사율 지표를 이용하여 이삭거름과 알거름 시비량을 결정할 수 있는 결정적 생육시기로 결정할 수 있다.

질소 시비수준에 따른 수확기 건물중의 반응 (Fig. 5), 수량의 반응 (Fig. 6), 질소흡수량의 반응 (Fig. 7)에서 질소시비량은 건물중, 수량, 질소흡수량을 각각 96%, 92%, 97% 설명할 수 있는 매우 밀접한 관계를 보였다. 그리고 이와 같은 수확기 지상부 건물중 및 수량, 질소흡수량 등의 실측 변수와 밀접한 상관을 보인 Crop

Circle-active 센서의 NIR/Red와 NIR/Amber 반사율 지표의 시비수준에 대한 반응은 모두 2차 곡선회귀관계 (Fig. 8)를 보였고, 회귀곡선은 NIR/Red와 NIR/Amber 변동의 91%, 92%를 각각 설명할 수 있었다.

시비수준 추정을 통한 시비량 결정을 위하여 충족지수 (sufficiency index, SI)를 이용하였다. 충족지수를 이용한 방법은 SPAD502 chlorophyll meter를 활용하기 위한 과정에서 개발되었으며 동일한 포장 내에서 질소영양이 충분한 기준구획 (well-fertilized reference)을 만들어 기준구획의 SPAD502 측정치에 대한 동일 포장 내의 다른 지점의 SPAD502 측정치의 비율로 구하게 되므로 엽록소 측정기의 활용에 있어서 제한 인자들인 서로 다른 재배환경, 재배 품종 등 SPAD502 chlorophyll meter 측정치에 영향을 미칠 수 있는 모든 요인들을 상쇄하게 된다. 원격측정에 의한 반사율 지표를 이용한 질소시비량 결정에도 동일하게 이용되며 보통 충족지수가 0.95보다 작을 때 그 비율만큼 기준구획의 질소시비량에 대하여 부족비율만큼을 질소 웃거름량으

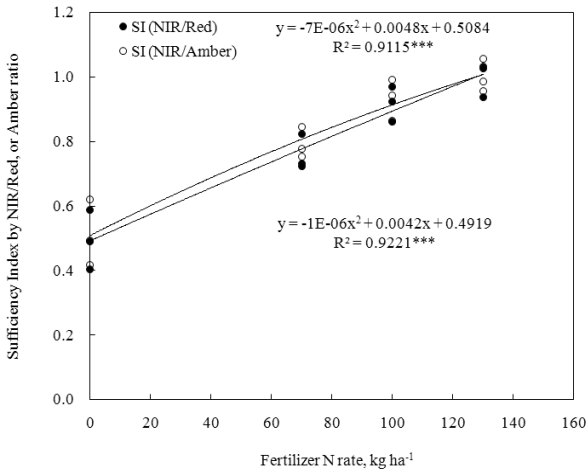


Fig. 9. Sufficiency index by reflectance index at the panicle initiation stage (12 July) of rice applied with different rate of N fertilizer.

로 정하여 시비한다 (Hussain et al., 2000; Peterson et al., 1993; Varvel et al., 1997).

생장량 지표들과 가장 밀접한 관계를 보인 Crop Circle-active 센서의 RVI비율인 NIR/Red와 NIR/Amber 비율로 충족지수를 구하였다. 7월 12일에 측정된 시비수준 130 kg 10a⁻¹ 처리구의 평균 RVI값에 대한 각 처리구의 RVI의 비로 충족지수를 구하여 시비수준과의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. Red와 amber 파장의 반사율로 계산한 두 종류의 RVI 식생지표 모두 각각 결정계수 0.91, 0.92로 매우 높은 설명력을 보였다. Delinger et al. (2008)은 Crop Circle-amber 센서로 옥수수에 대하여 충족지수 1을 기준으로 하여 질소시비 추천식을 만들어 경제성에 기초한 최적 질소 시비량을 추천하였다. 벼에 대해서는 Kim and Hong (2007)은 유수형성기 이후의 GreenSeeker 센서의 GNDVI 지표가 엽 질소 함량 추정에 효과적이었으며 이삭거름량 결정 연구가 필요하다고 제안하였다. 결론적으로 벼 유수형성기부터 출수기 사이의 Crop Circle 능동형 지상원격측정 센서의 반사율 식생지수와 충족지수를 이용한 질소시비량 결정은 벼 재배시 웃거름 시비량 결정에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 실용화를 위해서는 반사율 식생지표에 따른 충족지수로 시비량을 구하여 웃거름 시비량을 달리 하였을 때의 수량, 질소이용율, 경제성 등을 표준시비구나 토양검정시비구와 비교하는 평가가 더 필요하다.

요 약

지상원격측정 센서 반사율 지표는 비파괴적으로 실시간으로 빠르게 생육 중 작물의 생체량, 질소 스트레스

정도를 예측할 수 있는 도구로 연구되고 있다. 본 연구의 목적은 질소 시비량 수준별로 재배된 벼 (*Oryza sativa* L.)의 질소흡수량, 생체량 및 수량과 지상원격측정센서 반사율 지표들의 상호관계로부터 효율적인 반사율 지표를 선발하고 반사율 지표를 통한 벼 생육 중 질소시비수준을 평가하고자 하였다. 질소시비수준 0, 70, 100, 130 kg N ha⁻¹별로 처리된 시험구의 캐노피 반사율을 여러 종류의 수동형과 능동형 지상원격측정 센서로 각 생육시기별로 측정하였고 생체량과 질소흡수량 및 수량을 조사하여 상호관계를 분석하였다. 수동형 센서보다는 능동형 센서가 생육시기별 벼의 지상부 건물중, 수량, 질소농도 및 질소흡수량과 더 밀접한 상관관계를 나타냈으며 생육 후반으로 갈수록 상관계수 크기는 낮아지는 경향이었으나 유의성은 P<0.01 수준이 계속 유지되었다. 가장 밀접한 관계를 보인 반사율 지표는 Crop Circle-active 센서로 측정된 NIR/Red, NIR/Amber 지표였다. 특히 이삭거름 시비시기인 7월 중순의 Crop Circle 센서로 측정된 NIR/Red, NIR/Amber 지표는 건물중, 엽면적 지수와 상관계수 0.92 이상의 고도로 유의성 있는 정의 상관관계 (P<0.01)를 보였다. NIR/Red와 NIR/Amber 지표로 계산한 충족지수의 시비수준에 대한 회귀에서 회귀곡선은 충족지수 변동의 91%와 92%를 각각 설명하였다. 따라서 7월 중순~8월 초에 측정된 반사율지표의 충족지수는 실시간에 비파괴적으로 시비수준을 예측하여 위치별로 변량적인 질소시비량을 결정할 수 있는 방법으로 활용 가능할 것으로 판단되었다.

사 사

이 논문은 2009년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

인 용 문 헌

- Balasubramanian, V., A. C. Morales, R. T. Cruz, and S. Abdulrachman. 1999. On-farm adaptation of knowledge-intensive nitrogen management technologies for rice system. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 53:59-69.
- Barker, D.W. and J.E. Sawyer. 2010. Using active canopy sensors to quantify corn nitrogen stress and nitrogen application rate. *Agron. J.* 102:964-971.
- Bausch, W.C. and H.R. Duke. 1996. Remote sensing of plant nitrogen status in corn, *Transaction of the ASAE*, 39:1869-1875.
- Blackmer, T.M., J.S. Schepers, G.E. Varvel, and E.A. Walter-Shea. 1996. Nitrogen deficiency detection using

- reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. *Agron. J.* 88:1-5.
- Chang, K.W., Y. Shen, and J.C. Lo. 2005. Predicting rice yield using canopy reflectance measured at booting stage. *Agron. J.* 97:872-878.
- Daughtry, C.S.T., C.L. Walthall, M.S. Kim, E.B. De Colstoun, and J.E. McMurtrey. 2000. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sens. Environ.* 74:229-239.
- Dellinger, A.E., J.P. Schmidt, and D.B. Beegle. 2008. Developing nitrogen fertilizer recommendations for corn using an active sensor. *Agron. J.* 100:1546-1552.
- Gitelson, A.A., Y.J. Kaufman, and M.N. Merzlyak. 1996. Use of green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ.* 58:289-298.
- Hong, S.Y., J.T. Lee, S.K. Rim, W.K. Jung, and I.S. Jo. 1998. Estimation of paddy rice growth increment by using spectral reflectance signature. *J. of the Korean Soc. of Remote Sensing.* 14:83-94.
- 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.
- Jordan, C.F., 1969. Derivation of leaf index from quality of light on the forest floor. *Ecology.* 50:663-666.
- Kim, Y.H. and S.Y. Hong. 2007. Estimation of nondestructive rice leaf nitrogen content using ground optical sensors. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40:435-441.
- Kim, M.H., J.C. Shin, and B.W. Lee. 2005. Applicability of vegetation index and SPAD reading to nondestructive diagnosis of rice growth and nitrogen nutrition status. *Korean J. Crop Sci.* 50:369-377.
- NIAST. 2000. Method of Soil and Plant Analysis. RDA, Suwon, Korea.
- NIAST. 2006. Recommendation of the amount of fertilizer for crops. RDA, Suwon, Korea.
- Nguyen, H.T. and B.W. Lee. 2004. Selection of the most sensitive waveband reflectance for normalized difference vegetation index calculation to predict rice crop growth and grain yield. *Korean J. Crop Sci.* 49:394-406.
- 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.
- Scharf, P.C., J.P. Schmidt, N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, S.Y. Hong, J.A. Lory, and J.G. Davis. 2002. remote sensing for nitrogen management. *J. Soil Water Conserv.* 57: 518-524.
- 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.
- Thomas, J.R. and H.W. Gausman. 1977. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops. *Agron. J.* 69:799-802.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8:127-150.
- 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.
- Yang, W.H., S. Peng, J. Huang, A.L. Sanico, R.J. Buresh, and C. Witt. 2003. Using leaf color charts to estimate leaf nitrogen status of rice. *Agron. J.* 95:212-217.
- 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. *J. of Korean Soc. of Remote Sensing.* 1:63-87.
- 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.
- 박광호 외 27명. 1993. 알기 쉬운 벼 재배기술. p 68. 향문사. 서울.