

지상원격탐사 센서를 활용한 벼의 질소시비수준 및 생체량 추정

심재식 · 이정환¹ · 신수정¹ · 홍순달^{1*}

포천시농업기술센터, ¹충북대학교 농화학과

Estimation for N Fertilizer Application Rate and Rice (*Oryza sativa* L.) Biomass by Ground-based Remote Sensors

Jae-sig Shim, Joeng-hwan Lee¹, Su-jung Shin¹, and Soon-dal Hong^{1*}

Pocheon-city Agricultural Technology Center, Pocheon, Korea

¹Department of Agricultural Chemistry Graduate School, Chungbuk National University, Cheong-Ju, Korea

A field experiment was conducted to selection of ground-based remote sensor and reflectance indices to estimate rice production, estimation of suitable season for ground-based remote sensor and N top dressing fertilizer application rate in 2010. Fertilizer application was determined by "Fertilizer management standard for crops" (National Academy of Agricultural Science, 2006). Four levels of N-fertilizer were applied as 0%, 70%, 100% and 130% by base N-fertilizer application and were fertilized as 70% of basal dressing and 30% as top dressing. Rice (*Oryza sativa* L.) of Chucheong and Joonam (Korean cultivar) were planted on May 22, 2010 in sandy loam soil and harvested on October 6, 2010. Reflectance indices were measured 7 times from July 5 to August 23 by *Crop circle-amber* and *red* version and *GreenSeeker-green* and *red* version. Remote sensing angle from the sensor head to the canopy of rice was adjusted to 45°, 70° and 90° degree because of difference in the density of plant and the sensing angle. The reflectance indices obtained ground-based remote sensor were correlated with the biomass of rice at the early growth stage and at the harvest with 70° and 90° degree of sensor angle. The reflectance indices at the 52th Day After Transplanting (DAT) and the 59th DAT, critical season, were positively correlated with dry weight and nitrogen uptake. Specially NDVI at the 59th was significantly correlated with the mentioned parameters. Based on the result of this study, rNDVI by *GreenSeeker* on 70° degree of angle at the 59th DAT in Chucheong and rNDVI by *Crop Circle* on 70° degree of angle and gNDVI by *GreenSeeker* on 70° degree of angle at the 59th DAT in Joonam can be useful for estimation of dry weight and nitrogen uptake. Moreover, sufficiency index estimated by reflectance index at the 59th DAT can be useful for the estimation of N-fertilizer level application and can be used as a model for N-top dressing fertilizer management.

Key words: Remote sensing, rNDVI, gNDVI, aNDVI, Sufficiency index (SI).

서 론

연구 배경 가계 소득의 증가와 더불어 식생활 습관의 변화에 따라 양질미의 선호도가 높아졌다. 일반적으로 식미와 관련성이 큰 형질은 주로 아밀로스 (amylose)와 단백질이다. 이들은 대체적으로 환경조건 및 재식밀도, 질소 사용량 등의 재배조건에 따라 차이가 난다. Kim et al. (2009)에 의하면 질소시비량이 증가 할수록 단백질 함량은 증가하고 아밀로스 함량은 감소하는 경향을 보인다고 보고하고 있다. Lee (2007)는 질소 시비량이 증가 할수록 품질 요소인 완전미율과 식미가 감소하여 식미가 저하된다고 하였다. 따라서

식미의 증가를 위해 질소 사용량의 결정에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한 토양 및 수질 오염에 대한 관심이 높아지면서 농업에 활용되는 자재 특히 비료에 관한 관심이 높아졌다. 비료의 과다 투입에 의한 농경지 토양의 양분축적량도 해마다 증가하여 침출수에 의한 토양 및 수질 중 질산태 질소 함량의 증가가 우려되었다. 이에 비료물질을 보다 과학적으로 평가하고 작물의 특성에 맞게 적정량을 투입하기 위한 연구가 국내외에서 지속되고 있다 (Kim, 2005; Kim et al., 2001a; Kim et al., 2001b). 정밀농업 (precision agriculture)이란 토양 비옥도와 작황과의 관계를 토대로 하여 환경에 대한 부담을 줄이면서 농산물을 효율적으로 생산하는 농업기술이다. 최근 적정시비량 결정을 위한 토양검정은 구역별 토양 특성을 고려하여 실시하고, 작황분석은 원격탐사기술 (Remote Sensing), 지구위치확정 시스템

접수 : 2012. 8. 1 수리 : 2012. 10. 12

*연락처 : Phone: +82432612564

E-mail: sdhong@cbnu.ac.kr

(Global Positioning System) 및 지리정보 시스템 (Geographic Information System) 등을 활용하는 기술이 꾸준히 연구되고 있다 (Hong, 2001).

원격탐사는 목표물과 물리적인 접촉 없이 목표물에 대한 정보를 얻는 것으로 정의된다. 원격측정은 통계학적으로 가장 이상적인 전수조사가 가능하고 정밀농업의 핵심인 시간적 공간적 변이에 따른 위치별 변량적 농작업 관리가 가능한 방법으로 영농규모가 작은 우리의 농업환경에서도 적용 가능한 기술로 생각된다 (Hong and Kim, 2003). 최근 국내에서도 지상원격탐사를 이용한 작물의 평가에 대한 연구가 계속되고 있다 (Gong, 2007; Kang, 2007; Kim et al., 2009).

연구 목적 본 연구의 목적은 다음과 같다. 첫째, 국민 소득의 향상과 더불어 식생활이 고급화하면서 밥맛이 좋은 양질미를 추구하게 되었고, 아울러 최근 국제 개방화에 따른 쌀의 수입이 증가하면서 우리 쌀의 경쟁력을 증가시키는데 관심을 갖고 있다. 또한 환경오염에 대한 인식이 증가하면서 농업 분야에서는 지상 원격탐사를 이용한 정밀농업의 필요성이 제시되고, 특히 농자재중 질소비료의 적절한 시비 방법에 대한 평가가 필요하게 되었다 (Hong and Kim, 2003). Kang (2007)과 Gong (2007)은 능동적 탐사 장비 (active sensor)의 농업 활용가능성을 제시하였다. 따라서 추청벼와 주남벼의 생산력을 예측할 수 있는 지상 원격측정 센서 및 반사율 지표를 선별하고자 하였다. 둘째, 벼는 생육 초기에 직립형으로 자라는 특성을 갖고 있다. 때문에 담수 상태의 토양이 배경이 되어 식생지표에 영향을 미칠 수 있다는 가정을 하였다. 이에 따라 배경이 되는 토양의 반사율 영향을 줄일 수 있는 방법을 찾고자 하였다. 셋째, 질소는 벼의 영양생장이 왕성해지는 결정적 생육시기(critical season)에 많이 필요하기 때문에 적시에 공급하여야 질소 이용효율을 높일 수 있다. 따라서 이삭거름 질소 시비량 추천을 위한 원격탐사 최적 검정시기를 평가하고자 하였다. 마지막으로, 질소의 효율적 공급은 과다 사용으로 인한 환경오염을 예방할 수 있고 쌀의 단백질과 아밀로스 함량에 영향 주어 미질을 향상시킬 수 있다. 이에 따라 효율적 원격탐사지표에 의한 추청벼 및 주남벼의 질소 시비량 추천 모델을 추정하고자 하였다.

재료 및 방법

센서의 종류

1) GreenSeeker-red and green (Ntech industries, Inc.) 이 측정기는 센서의 진행방향에 비스듬한 수직으로 변조 (modulation)된 LED (light-emitting diode)광을 방출하는 센서이다. 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 변조된 반사광 (radiance)만을 검출하여 각각 RNDVI와 Red/NIR, GNDVI와 Green/NIR 지표를 산출한다. 그리고 센서의 측정높이를 60 cm에서 120 cm까지 변화해도 관측영역은 60×1 cm 로 일정하게 유지되는 특징을 갖는다. 기본 장비는 센서헤드, PDA 및 Control box 등으로 구성되어 있다.

2) Crop Circle-Red and Amber version (Holland Scientific, ACS-210) 이 측정기는 센서의 진행방향에 수직으로 변조 (modulation)된 LED광을 방출하고 검출부에서 자연광과 구별하여 변조된 반사광을 검출하여 지표값을 나타낸다. 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 RNDVI와 NIR/Red, ANDVI와 NIR/Amber 지표를 산출한다. 센서와 목표물까지의 거리가 증가할수록 관측영역은 $32^\circ \times 6^\circ$ 의 비율로 증가하게 된다. 따라서 센서와 목표물까지의 거리가 90 cm일 때 관측영역은 50×10 cm가 된다.

센서의 측정방법 및 효율성 평가 직립형으로 자라는 벼의 특성상 생육 초기에는 담수상태의 토양이 식생보다 더 많이 분포하기 때문에 관측영역 내에 배경으로 작용할 수 있다. 특히 Crop Circle sensor의 경우 측정 거리가 증가함에 따라 방출된 광원의 관측 영역이 $32^\circ \times 6^\circ$ 의 비율로 증가하는 경향을 보이기 때문에 지상원격탐사 센서의 헤드와 작물 캐노피가 형성하는 각도에 따라서 센서가 탐지하는 식생의 밀도가 달라질 수 있어 반사율 지표에 영향을 줄 수 있다는 가정을 하였다. 이러한 가정에 따라 센서의 측정 각도의 변화에 대한 반사율 지표의 반응을 알아보기 위해 센서 헤드와 벼의 캐노피 간 형성되는 측정 각도를 달리하여 반사율 지표를 측정하였다. 측정에 사용된 모든 센서는 벼의 캐노피와 센서 헤드의 검출부와의 거리를 일정하게 유지시키기 위해 90 cm 로 조절된 추를 달았다. 또한 벼의 생체량 평가에 더욱 효율적인 센서의 측정 각도를 평가하기 위하여 방출된 광과 벼의 캐노피간의 형성 각도를 각각 90° , 70° 및 45° 각도로 반사율 지표를 측정하여 벼의 생체량과의 관계를 평가하였다. 반사율 지표의 측정은 분얼기인 7월 5일부터 출수기인 8월 23일까지 7회에 걸쳐 측정하였다.

질소 스트레스에 의한 벼의 생체량을 다중검정 (Duncan's multiple range test) 통해 평가하여 본 연구에 활용 가능한 지 추정하였다. 질소 스트레스에 의한 벼의 생체량을 지상 원격측정센서의 반사율 지표로 평가하였다. 각각의 반사율 지표 측정 시기별로 벼의 생육 중간 건물중, 수확기 건물중 및 질소 흡수량과 반사율 지표간의 상호 관계를 통계적으로 평가 하여 수량예측 시기 및 방법 추정 가능성을 평가하였

다. 아울러 결정적 생육시기의 반사율 지표와 질소 시비수준의 상호관계를 회귀관계로 평가하여 질소 시비 수준 예측 가능 모델을 제시하였다. 또한 반사율 지표로 계산한 충족지수(Sufficiency index)와 시비수준의 상호관계를 평가하여 질소 시비 수준 예측 가능성을 평가하였다. 충족지수를 이용한 방법은 SPAD502 chlorophyll meter 를 활용하기 위한 과정에서 개발되었으며 동일한 포장 내에서 질소영양이 충분한 기준구획을 만들어 기준구획의 SPAD502 측정치에 대한 동일 포장내의 다른 지점의 SPAD502 측정치의 비율로 구하게 되므로 엽록소 측정기의 활용에 있어서 제한 인자들인 서로 다른 재배환경과 같은 요인들을 상쇄하게 된다. (Hussain et al., 2000; Peterson et al., 1993; Varvel et al., 1997)

재배방법 시험작물은 벼 (*Oryza sativa L.*) 추청과 주남 품종으로 하였고, 시험 장소는 충청북도 청주시 흥덕구 신촌동 소재 논 포장에서 하였다. 이앙은 2010년 5월 16일에 수확은 10월 6일에 하였으며 재식밀도는 30 cm X 17 cm 로 하였다. 비료의 시비량은 Recommendation of the amount of fertilizer for crops (NIAST, 2006) 에 의해 결정하였으며, 질소시비수준은 시비처방기준에 의한 질소시비량을 100%로 하여 0%, 70%, 100% 및 130% 의 4수준으로 하여 28 m², 난괴법 3반복 배치하였다. 기준시비량의 70%는 밀거름으로, 30%는 이삭거름으로 시비하였다. 인산 및 가리의 시비량 (Table 1)은 토양검정에 의해 추천된 량으로 모든 처리구에 동일하게 밀거름으로 시비하였다. Table 2는 시험토양의 물리화학적 성을 나타낸 것이다. 토성은 미국 농무부법에 의해 사양토 (Sandy loam)로 분류 되었다. 화학적 특성은 작물별 시비처방 기준의 벼 재배에 적합한 토양화학성 기준과 비교하였을 때 유기물, 인산, 규산, 칼륨 및 마그네슘은 낮은 편이었고 칼슘은 약간 높은 편이었다.

생체량 조사 및 질소 분석방법 벼의 생체량 조사는 이앙 후 68일째인 유수형성기와 138일째인 수확기에 2차례에

걸쳐 조사하였다. 1차 시기에는 처리구당 6주씩 채취하여 벼의 건물중을 조사하였고, 수확기에는 처리구당 30주씩 채취하여 벼의 건물중, 질소 흡수량 및 알곡중량을 조사하였다. 조사된 생체량은 단위면적당 중량 (kg ha⁻¹)으로 환산하였다.

건물중을 측정한 식물체 시료는 분쇄기로 곱게 갈아 전질소 분석용 시료로 조제하였다. 식물체의 전질소 함량은 암모늄태 질소 (NH₄-N)의 형태로 전환하여 정량하는 방법인 Kjeldahl법을 사용하여 측정하였다. 곱게 간 식물체 시료 0.2 g 정도를 칭량하여 정확하게 기제하고 100ml 켈달플라스크에 넣고 진한 황산 5 ml와 분해촉진제를 넣고 Block digester (Tecator 2040 digester, FOSS)에서 온도를 서서히 올려 380℃에서 1시간 더 분해하였다. 분해된 시료액을 상온으로 식히고 증류수 20 ml를 가한 후 다시 상온으로 식히고 Kjeldahl 자동증류적정장치 (Tecator 1030 Analyzer, FOSS)를 이용하여 측정하였다.

결과 및 고찰

질소 시비수준별 생장량 및 질소 흡수량 질소 수준에 따른 벼의 68일째 지상부의 건물중과 수확 후 질소 흡수량, 건물중 및 알곡 수확량은 Table 3과 같다. 추청벼의 이앙 후 68일째 수확한 벼의 지상부 건물중은 130% 질소 처리구가 무질소 처리구에 비해 유의성 있는 차이를 보이며 높았다. 70% 및 100% 질소 처리구의 지상부 건물중은 0% 처리구에 비해 높았고 70% 처리구가 그 차이의 유의성이 인정되었다. 수확기의 질소 흡수량, 건물중 및 알곡 수확량은 130%에서 무처리구에 비해 유의성 있는 차이를 보이며 높았고, 70%와 100% 처리구는 무질소 처리구 보다 높았지만 그 차이의 유의성이 인정되지 않았다. 주남벼의 이앙 후 68일째 수확한 벼의 건물중은 무질소 처리구의 건물중이 다른 처리구의 건물중에 비해 유의성이 있는 차이를 보이며 낮았고 70%, 100% 및 130% 처리구간의 건물중은 다른 값을 보였으나 그 차이의 유의성이 인정되지 않았다. 수확기의 질소 흡수량과 건물중은 무질소 처리구에서 다른 처리구에 비해 유의성 있는 차이를 보이며 낮았고 70%, 100% 및 130% 처리구간의 건물중은 다른 값을 보였으나 그 차이의 유의성이 인정되지 않았다. 알곡 수확량은 130% 질소 처리구에서 무질소 처리구 보다 유의성 있는 차이를 보이며 높았으나 0%, 70% 및 100% 처리구간, 70%, 100% 및 130% 처리구간 비교에서는 그 차이의 유의성이 인정되지 않았다.

Table 1. Recommendation of fertilizer by soil test.

N	P ₂ O ₅	K ₂ O
----- kg ha ⁻¹ -----		
100	47	66

Table 2. Chemical properties of experimental soil.

pH	EC	OM	Avail. P ₂ O ₅	Avail. SiO ₂	Exch. Cation			CEC	Soil Texture
					K	Ca	Mg		
(1:5)	d Sm ⁻¹	g kg ⁻¹	--- mg kg ⁻¹ ---		----- cmol _c kg ⁻¹ -----				
5.8	0.41	8.7	53	93	0.16	7.64	1.15	9.2	Sandy Loam

Table 3. Biomass and amount of nitrogen uptake by rice at the 68 DAT and the harvest.

Cultivar	N application rate	Dry weight at the 68 DAT	Harvest		
			Amount of N uptake	Dry weight	Panicle weight
	%		kg ha ⁻¹		
Chucheong	0	2662a [†]	33a	4855a	5273a
	70	3613b	46ab	6000ab	6541ab
	100	3440ab	43ab	5596ab	6519ab
	130	5015c	55b	6608b	7805b
Joonam	0	2786a	30a	4128a	6197a
	70	4104b	41b	5613b	8029ab
	100	3764b	45b	5249b	7698ab
	130	4311b	48b	5726b	8315b

[†]Duncan's multiple range test

질소 수준별 시비에 따른 수확기 추청벼 및 주남벼의 건물중과 질소 흡수량의 반응을 회귀 관계로 나타내었을 때, 질소 시비 수준이 증가함에 따라 두 품종 모두 건물중 및 질소 흡수량이 증가하는 2차 회귀곡선관계를 보였다. 그림의 회귀식에 따라 건물중 변동량은 추청벼에서 46% (Fig. 1), 주남벼에서 56% (Fig. 2) 가 질소 시비수준에 의한 것으로

설명할 수 있었고, 질소 흡수량 변동량은 추청벼에서 53% (Fig. 3), 주남벼에서 59% (Fig. 4) 가 질소 시비수준에 의한 것으로 설명할 수 있었다.

센서의 측정 각도 차이에 의한 반사율 지표 반응

Figure 5와 6은 지상원격측정 센서인 GreenSeeker와 Crop Circle 의 측정 각도를 비 캐노피의 90° 각도, 70° 각도 그리

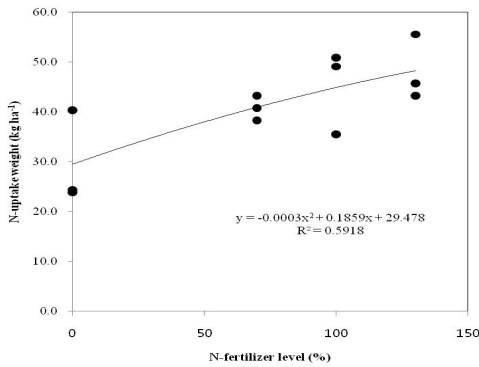


Fig. 1. Relationship between application level of N-fertilizer and dry weight of rice plant, Chucheong, at the harvest.

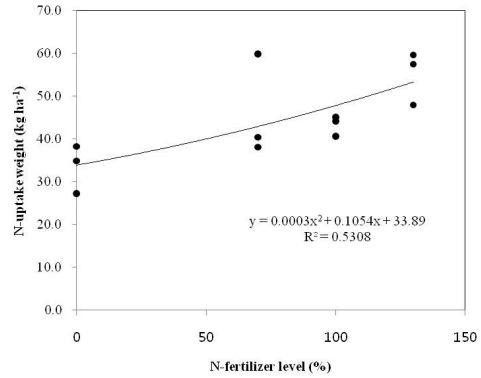


Fig. 2. Relationship between application level of N-fertilizer and dry weight of rice plant, Joonam, at the harvest.

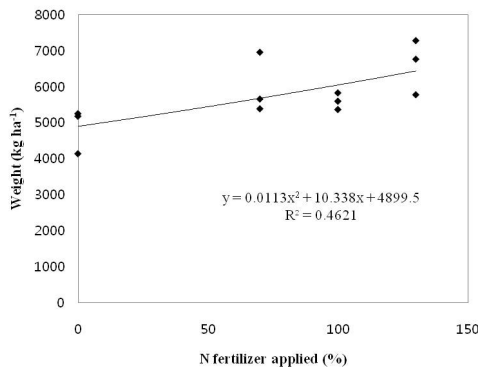


Fig. 3. Relationship between application level of N-fertilizer and N-uptake by rice plant, Chucheong, at the harvest.

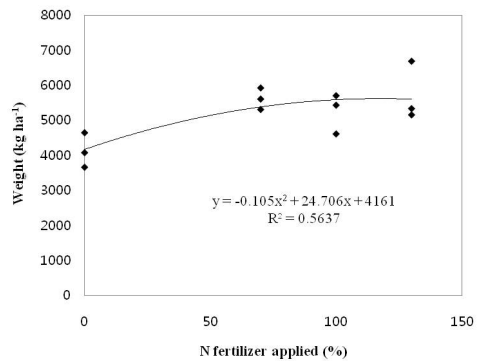


Fig. 4. Relationship between application level of N-fertilizer and N-uptake by rice plant, Joonam, at the harvest.

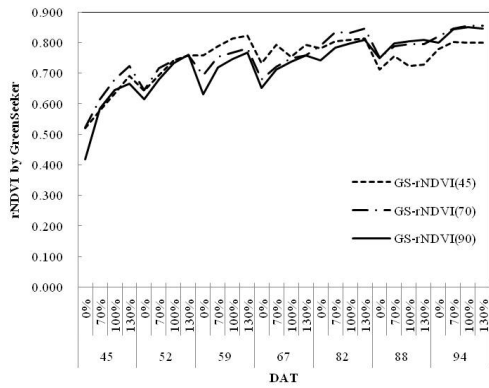


Fig. 5. Reflectance index of GreenSeeker™ sensor affected by different measurement angle during the growth stage of rice.

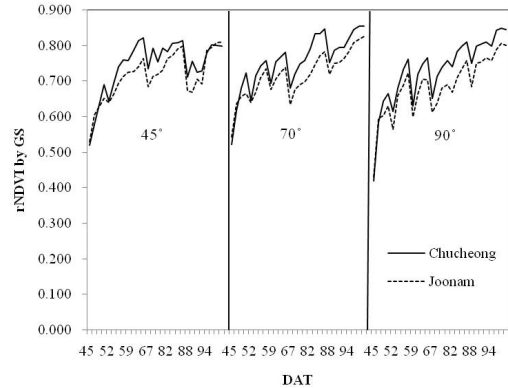


Fig. 7. Difference of reflectance index of GreenSeeker™ sensor affected cultivar during the growth stage of rice.

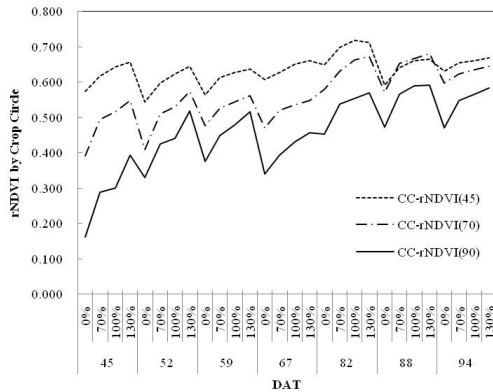


Fig. 6. Reflectance index of Crop Circle™ sensor affected by different measurement angle during the growth stage of rice.

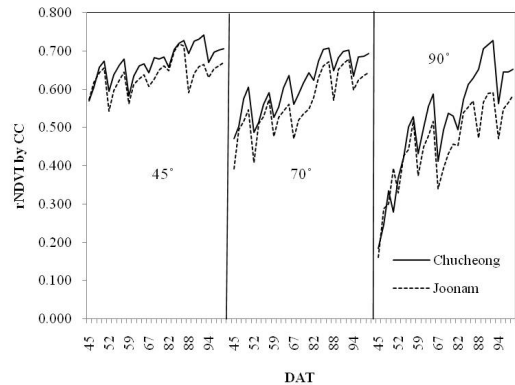


Fig. 8. Difference of reflectance index of Crop Circle™ sensor affected cultivar during the growth stage of rice.

고 45° 각도로 측정된 반사율 지표의 반응을 나타낸 것이다. GreenSeeker로 측정된 NDVI 범위는 90° 각도로 측정하였을 때 0.419~0.849, 70° 각도로 측정하였을 때 0.522~0.855, 45° 각도로 측정하였을 때 0.520~0.822로 측정되었고, Crop Circle로 측정된 NDVI 범위는 90° 각도로 측정하였을 때 0.161~0.592, 70° 각도로 측정하였을 때 0.392~0.679, 45° 각도로 측정하였을 때 0.543~0.719로 측정되었다. 생육 초기 GreenSeeker와 Crop Circle의 반사율 지표는 45° 각도로 측정하였을 때 가장 크게 나왔다. 이는 직립형으로 자라는 벼의 특성에 영향을 받아 45° 각도로 측정하였을 때 관측영역 내 배경이 되는 담수상태의 토양보다 식생이 더 많이 분포하게 되어 센서로 관측되는 식생의 밀도가 증가하기 때문에 다른 각도에 비해 높은 값을 보여주었다고 생각되었다. 그러나 82일째 이후에 GreenSeeker은 90° 각도로 측정된 반사율 지표가 높게 나타났고 Crop Circle은 생육 초기보다 각도의 변화에 따른 반사율 지표 차이의 폭이 감소하는 경향을 보여주었다. 이는 영양생장기가 끝나고 생식생장기에 접어들면서 벼의 잎이 전개됨에 따라 담수상태의 토양 배경은 감소하고 식생의 밀도가 증가되었기 때문에 토양배경에 의한 반사율 지표의 영향이 감소한 것이라 생각

되었다.

Figure 7 과 8 은 GreenSeeker 와 Crop Circle 의 반사율 지표에 대한 품종간 비교를 나타내었다. 두 그림에서 보듯이 측정시기마다 품종간 반사율 지표값의 변화는 유사한 양상을 보였지만, 두 지상원격탐사 센서 모두 추청벼의 반사율 지표가 주남벼의 반사율 지표보다 높아 품종간 반사율 지표에 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 이 차이는 생육 후반기로 갈수록 더 큰 차이를 보이며 GreenSeeker 보다는 Crop Circle이 더 현저한 차이를 보였다. 이러한 결과들은 식생의 종류나 캐노피에 따라 반사율의 특징이 다르다는 연구 (Qin et al., 2002)와 유사한 결과를 나타내고 있다. 이에 따라 벼의 생체량 및 질소 적정 시비량 평가는 품종 및 측정 방법에 따른 다양한 연구가 필요하다고 판단되었다.

생육 시기별 반사율 지표와 생체량의 상호관계 Table 4는 이양 후 45일째부터 유수 형성기인 67일째까지 4회 측정된 지상원격측정 센서의 반사율 지표와 68일째 벼의 지상부 건물중의 상관관계를 나타낸 것이다. 추청벼에서는 67일째 측정된 Crop Circle-amber의 반사율 지표가 측정각도에 관계없이 유의성 있는 상관을 보였으며, 70° 각도로 측

Table 4. Correlation coefficient between reflectance index at early growth stage and dry weight of rice plant at the 68 DAT affected by different measurement angle of sensor.

Sensor	DAT	Chucheong			Joonam		
		45°	70°	90°	45°	70°	90°
CC-amber	45	0.565	0.591*	0.632*	0.734**	0.747**	0.887**
	52	0.540	0.635*	0.610*	0.809**	0.755**	0.840**
	59	-	-	-	-	-	-
	67	0.709**	0.663*	0.745**	0.639*	0.714**	0.788**
CC-red	45	0.503	0.577*	0.315	0.84**	0.775**	0.842**
	52	0.593*	0.640*	0.546	0.752**	0.809**	0.834**
	59	0.633*	0.644*	0.576*	0.617*	0.633*	0.811**
	67	0.580*	0.680*	0.621*	0.564	0.760**	0.821**
GS-green	45	0.418	0.488	0.502	0.267	0.662*	0.755*
	52	0.256	0.518	0.484	-0.005	0.525	0.748**
	59	0.375	0.430	0.467	0.684*	0.754**	0.742*
	67	0.022	0.426	0.475	0.534	0.358	0.618*
GS-red	45	0.703*	0.641*	0.623*	0.864**	0.843**	0.930**
	52	0.535	0.663*	0.641*	0.605*	0.671*	0.736**
	59	0.533	0.714**	0.699*	0.287	0.643*	0.726**
	67	0.405	0.635*	0.691*	0.549	0.718**	0.593*

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

정한 Crop Circle-red와 GreenSeeker-red의 반사율 지표가 가장 밀접한 상관관계를 보여주었다. 주남벼에서는 측정 각도를 70° 각도와 90° 각도로 하였을 때 밀접한 상관관계를 보여주었다. 특히 Crop Circle-amber (70° 및 90°) 와 red (70° 및 90°)의 상관계수는 통계적으로 높은 상관관계를 보여 주었다. 이러한 결과는 반사율 지표에 의한 고추 생체량을 추정한 연구 (Kim et al., 2006), 벼의 생체량을 추정한 연구 (Kang, 2007; Gong, 2007) 및 연초의 생체량을 추정한 연구 (Kang, 2007)와 비슷한 경향을 보여주었다. 따라서 52일째, 59일째와 67일째의 지상원격탐사 반사율 지표는 벼 생육 중반의 생체량을 추정하는데 활용 가능할 것으로 생각되었다.

Table 5는 이앙 후 45일째부터 출수기 94일째까지 7회 측정된 지상원격탐사 반사율 지표와 최종 수확한 벼의 지상부 건물중과의 상관관계를 나타낸 것이다. 추정벼는 Crop Circle-amber와 red, GreenSeeker-red에서 측정된 반사율 지표가 지상부 건물중과 상관을 보였다. 주남벼는 Crop Circle에서 측정된 반사율 지표인 rNDVI와 aNDVI가 측정 각도의 차이에 관계없이 측정된 거의 모든 시기에서 유의성 있는 상관을 보여주었고, GreenSeeker-red는 측정 각도를 70° 각도와 90° 각도로 했을 때, GreenSeeker-Green은 측정 각도를 90° 각도로 했을 때 최종 수확 후 지상부 건물중과 상관을 잘 설명하고 있었다.

중모 기계이앙 재배 시 이삭거름은 이앙 후 7월 10일인

50일에서 7월 25일인 65일 사이에 시비하도록 추천되고 있다 (Park et al., 1993). Table 5에서 유수형성기에 해당하는 52일째와 59일째 측정된 지상원격탐사 반사율 지표는 최종 수확한 벼의 지상부 건물중과 유의성 있는 상관을 보여주었다. 이러한 결과는 유수형성기에 측정된 지상원격탐사 반사율 지표를 활용한 검정으로 최적시기 (critical season)의 이삭거름 시비량 추정에 활용 가능 할 것으로 판단되었다. Table 6과 Table 7은 각각 52일째와 59일째 측정된 지상원격탐사 반사율 지표와 수확기 벼의 지상부 건물중, 질소흡수량 및 알곡수확량과의 상관을 나타내고 있다. Table 6에서 나타난 추정벼의 52일째 반사율 지표와 질소 흡수량 및 건물중과의 상관은 Crop Circle-amber와 GreenSeeker-red는 측정각도에 관계없이 유의성 있는 상관을 보여주었고, Crop Circle-red는 70° 각도에서, GreenSeeker-green은 90° 각도에서 유의성 있는 상관을 보여주었다. 주남벼의 52일째 반사율 지표와 질소 흡수량 및 건물중과의 관계는 45° 각도로 측정된 GreenSeeker sensor를 제외한 다른 부분에서 모두 유의성 있는 상관을 보여주었다. Table 7에서 나타난 추정벼의 이앙 후 59일째 반사율 지표와 질소 흡수량 및 건물중과의 상관은 Crop Circle-red와 GreenSeeker-red가 측정 각도에 관계없이 유의성 있는 상관을 보여주고 있다. 주남벼의 59일째 반사율 지표와 질소 흡수량 및 건물중과의 상관은 Crop Circle-red 와 GreenSeeker-green은 측정각도와 관계없이, GreenSeeker-red는 70° 각도와 90° 각도로

Table 5. Correlation coefficient between reflectance index at early growth stage and dry weight of rice plant at the harvest affected by different measurement angle of sensor.

Sensor	DAT	Chucheong			Joonam		
		45°	70°	90°	45°	70°	90°
CC-amber	45	0.505	0.586*	0.696*	0.527	0.497	0.729**
	52	0.656*	0.652*	0.589*	0.653*	0.674*	0.689*
	59	-	-	-	-	-	-
	67	0.591*	0.426	0.668*	0.720**	0.743**	0.808**
	82	0.629*	0.696*	0.743**	0.740**	0.722**	0.685*
	88	0.704*	0.645*	0.735**	0.738**	0.657*	0.719**
	94	0.712**	0.730**	0.748**	0.752**	0.761**	0.773**
CC-red	45	0.573	0.577*	0.077	0.740**	0.594*	0.799**
	52	0.487	0.619*	0.435	0.603*	0.705*	0.721**
	59	0.722**	0.602*	0.648*	0.691*	0.619*	0.720**
	67	0.392	0.654*	0.653*	0.597*	0.808**	0.736**
	82	0.596*	0.600*	0.675*	0.732**	0.697*	0.780**
	88	0.737**	0.545	0.745**	0.726**	0.746**	0.686*
	94	0.700*	0.707*	0.775**	0.727**	0.542	0.753**
GS-green	45	0.705*	0.565	0.509	0.074	0.410	0.509
	52	0.530	0.473	0.711**	-0.079	0.543	0.765**
	59	0.054	0.358	0.428	0.589*	0.889**	0.667*
	67	-0.120	0.321	0.556	0.515	0.362	0.461
	82	0.235	0.444	0.696*	-0.149	0.412	0.681*
	88	-0.008	0.268	0.168	-0.010	0.313	0.659*
	94	-0.086	0.776**	0.357	0.398	0.486	0.864**
GS-red	45	0.572	0.669*	0.698*	0.797**	0.719**	0.860**
	52	0.722**	0.704*	0.674*	0.416	0.611*	0.668*
	59	0.704*	0.753**	0.796**	0.180	0.746**	0.673*
	67	0.452	0.693*	0.748**	0.345	0.824**	0.688*
	82	0.796**	0.793**	0.765**	0.381	0.680*	0.589*
	88	0.592*	0.807**	0.702*	0.309	0.917**	0.817**
	94	0.574	0.758**	0.665*	0.456	0.815**	0.767**

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

Table 6. Correlation coefficient between reflectance index at the 52 DAT as a critical season for recommendation of panicle topdressing of fertilizer and biomass at the harvest.

Angle	Sensor	Index	Chucheong			Joonam		
			N-uptake	DW	Panicle weight	N-uptake	DW	Panicle weight
45	CC-amber	NDVI	0.665*	0.656*	0.330	0.602*	0.653*	0.523
	CC-red	NDVI	0.473	0.487	0.350	0.593*	0.603*	0.473
	GS-green	NDVI	0.609*	0.530	0.307	0.144	-0.079	-0.142
	GS-red	NDVI	0.768**	0.722**	0.434	0.454	0.416	0.274
70	CC-amber	NDVI	0.636*	0.652*	0.352	0.702*	0.674*	0.536
	CC-red	NDVI	0.676*	0.619*	0.429	0.665*	0.705*	0.551
	GS-green	NDVI	0.494	0.473	0.265	0.608*	0.543	0.621*
	GS-red	NDVI	0.728**	0.704*	0.494	0.670*	0.611*	0.545
90	CC-amber	NDVI	0.639*	0.589*	0.418	0.637*	0.689*	0.570
	CC-red	NDVI	0.472	0.435	0.386	0.666*	0.721**	0.584*
	GS-green	NDVI	0.750**	0.711**	0.308	0.740**	0.765**	0.625*
	GS-red	NDVI	0.736**	0.674*	0.525	0.673*	0.668*	0.581*

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

Table 7. Correlation coefficient between reflectance index at the 59 DAT as a critical season for recommendation of panicle topdressing of fertilizer and biomass at the harvest.

Angle	Sensor	Index	Chucheong			Joonam		
			N-uptake	DW	Panicle weight	N-uptake	DW	Panicle weight
45	CC-amber	NDVI	-	-	-	-	-	-
	CC-red	NDVI	0.761**	0.722**	0.486	0.725**	0.691*	0.552
	GS-green	NDVI	0.060	0.054	0.360	0.652*	0.589*	0.509
	GS-red	NDVI	0.757**	0.704*	0.404	0.261	0.180	0.278
70	CC-amber	NDVI	-	-	-	-	-	-
	CC-red	NDVI	0.655*	0.602*	0.499	0.653*	0.619*	0.465
	GS-green	NDVI	0.380	0.358	0.312	0.886**	0.889**	0.898**
	GS-red	NDVI	0.777**	0.753**	0.531	0.847**	0.746**	0.605*
90	CC-amber	NDVI	-	-	-	-	-	-
	CC-red	NDVI	0.666*	0.648*	0.416	0.669*	0.720**	0.585*
	GS-green	NDVI	0.503	0.428	0.313	0.672*	0.667*	0.661*
	GS-red	NDVI	0.827**	0.796**	0.602*	0.734**	0.673*	0.577*

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

Table 8. Coefficient of determination (R^2) between reflectance index at the 52 and 59 DAT and dry weight of rice at the harvest.

Sensor-reflectance index	DAT	Chucheong			Joonam		
		45°	70°	90°	45°	70°	90°
CC-aNDVI	52	0.587	0.591	0.489	0.443	0.466	0.477
	59	-	-	-	-	-	-
CC-rNDVI	52	0.351	0.562	0.324	0.365	0.502	0.525
	59	0.642	0.445	0.486	0.565	0.383	0.521
GS-gNDVI	52	0.281	0.225	0.505	0.311	0.332	0.605
	59	0.422*	0.513*	0.245	0.353	0.790	0.475
GS-rNDVI	52	0.523	0.637	0.534	0.177	0.382	0.490
	59	0.496	0.751*	0.692	0.056	0.574	0.521

* ; $P < 0.05$

Table 9. Coefficient of determination (R^2) between reflectance at the 52 and 59 DAT and amount of N uptake by rice at the harvest.

Sensor-reflectance index	DAT	Chucheong			Joonam		
		45°	70°	90°	45°	70°	90°
CC-aNDVI	52nd	0.610	0.574	0.580	0.369	0.495	0.410
	59th	-	-	-	-	-	-
CC-rNDVI	52nd	0.377	0.668*	0.427	0.353	0.453	0.444
	59th	0.706	0.542	0.506	0.648	0.450	0.448
GS-gNDVI	52nd	0.374	0.248	0.563	0.113	0.371	0.550
	59th	0.445*	0.631**	0.315	0.426	0.806	0.485
GS-rNDVI	52nd	0.591	0.660	0.622	0.210	0.450	0.480
	59th	0.575	0.783*	0.766	0.088	0.731	0.568

*, ** ; $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

측정하였을 때 양호한 관계를 보여주고 있다.

Table 8에 이양 후 52일째와 59일째에 측정한 반사율 지표와 수확기 벼의 지상부 건물중과의 회귀식에 의한 결정계수를 나타내었다. 추청벼의 경우 52일째에서는 70° 각도로 측정한 GreenSeeker-red의 반사율 지표가 건물중을 64%로 설명하였고 59일째에서는 70° 도 각도로 측정한 GreenSeeker-

red와 45° 각도로 측정한 Crop circle-red 가 지상부 건물중을 각각 75%와 64%로 설명하고 있다.

주남벼의 경우 52일째에서는 반사율 지표와 건물중의 관계를 90° 각도로 측정한 GreenSeeker-green가 60.5%로 설명하는 결과를 보였고, 59일째에서는 70° 각도로 측정한 GreenSeeker-green 의 반사율 지표와 지상부 건물중과의

79%를 설명하는 양호한 관계를 보여주었다. Table 9에는 이
 양 후 52일째와 59일째에 측정한 반사율 지표와 수확기 벼
 의 질소 흡수량과의 회귀식에 의한 결정계수를 나타내었다.
 추청벼의 경우 52일째 70° 각도로 측정한 Crop Circle 과
 GreenSeeker의 rNDVI가 지상부 건물중을 각각 67%와 66%
 로 설명하였고, 59일째에는 45° 각도로 측정한 Crop Circle
 과 70° 각도로 측정한GreenSeeker의 rNDVI가 지상부 건
 물중을 각각 71%와 78%로 설명하는 회귀관계를 보였다. 주
 남벼에서는 59일째에 70° 각도로 측정한 GreenSeeker의
 gNDVI와 Crop Circle의 rNDVI가 질소 흡수량과의 관계를
 각각 80.6%와 65%를 설명하는 가장 양호한 결과를 나타내
 었다.

이러한 52일째와 59일째의 반사율 지표와 각 생체량간의
 상관계수 및 결정계수의 관계를 종합해 볼 때 59일째에 측
 정한 반사율 지표가 수확기의 벼 지상부 건물중과 질소흡수
 량을 가장 잘 설명하는 관계를 보여주었다. 특히 추청벼는
 70° 각도로 측정한 GreenSeeker의 rNDVI가, 주남벼는 45°
 각도로 측정한 Crop Circle의 rNDVI 와 70° 각도로 측정한

GreenSeeker의 gNDVI가 수확기의 생체량을 가장 잘 설명하
 는 관계를 보여 이 시기의 반사율지표와의 회귀식을 활용하
 면 벼의 생체량 측정뿐 아니라 최적 검정시기 이후의 이삭거
 림 시비량을 추정하는데 활용 가능할 것으로 생각되었다.

Figure 9에는 59일째 추청벼의 GreenSeeker 70° 각도
 rNDVI와 지상부 건물중의 회귀식을, Fig. 10에는 주남벼의
 Crop Circle 45° 각도 rNDVI 및 GreenSeeker 70° 각도
 gNDVI와 지상부 건물중의 회귀식을 나타내었다. 각 회귀식
 에서 추청벼의 rNDVI 와 주남벼의 rNDVI 및 gNDVI는 벼의
 수확기 지상부 건물중을 각각 75%, 56% 및 79%로 설명하는
 회귀식을 보였다. Figure 11과 12은 건물중과 회귀관계를
 설명한 지상원격탐사센서의 반사율 지표와 지상부 질소 흡
 수량과의 회귀식을 나타낸 그림이다. 각 회귀식에서 추청벼
 의 GreenSeeker 70° 각도 rNDVI는 78%, 주남벼의 Crop
 Circle 45° 각도 rNDVI와 GreenSeeker 70° 각도 gNDVI는
 각각 65%와 80%로 지상부 질소 흡수량을 설명하는 회귀식
 을 보였다. 각 Figure에서 나타난 회귀식에 따라 최종 수확
 기의 생체량을 추정할 수 있을 것이라 판단되었다. 따라서

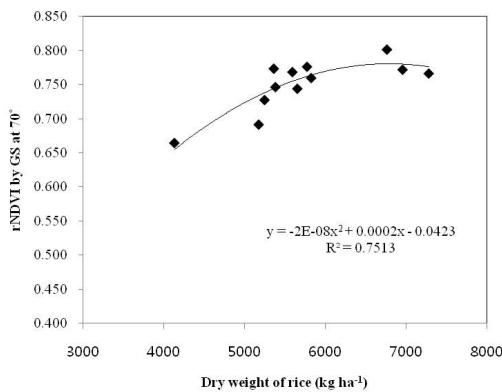


Fig. 9. Interrelationship between rNDVI by GreenSeeker (70°) at the 59 DAT and dry weight of rice, Chucheong, at the harvest (P=0.030).

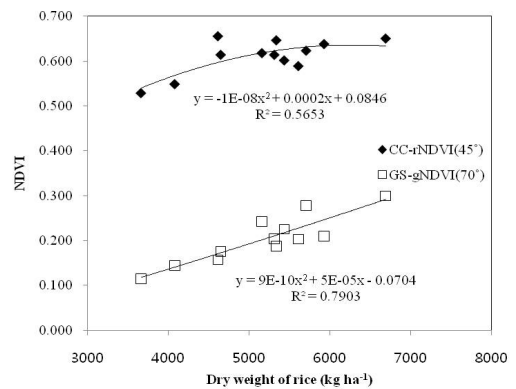


Fig. 10. Interrelationship between reflectance index at the 59 DAT and dry weight of rice, Joonam, at the harvest.

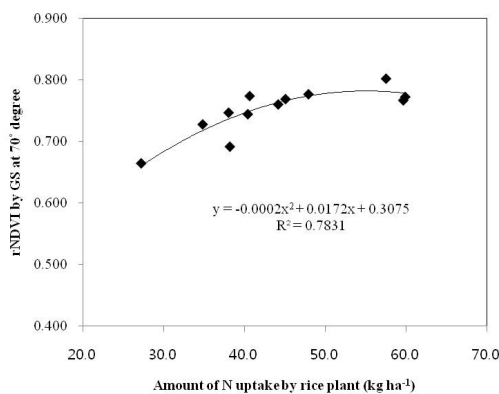


Fig. 11. Interrelationship between rNDVI by GreenSeeker (70°) at the 59 DAT and amount of N uptake by rice plant, Chucheong, at the harvest (P=0.023).

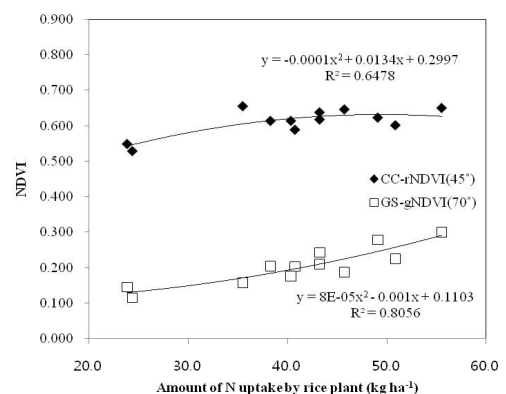


Fig. 12. Interrelationship between reflectance index at the 59 DAT and amount of N uptake by rice plant, Joonam, at the harvest.

이러한 결과로부터 벼 유수형성기의 지상원격탐사 반사율 지표는 총족지수로 평가하여 벼의 시비수준을 예측할 수 있으므로 질소추천시비모델로 활용할 수 있는 기술이 될 것이라 판단되었다.

반사율 지표에 의한 질소 시비수준 추정 추청벼와 주남벼의 질소 시비 수준과 반사율 지표를 이용한 회귀관계를 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다. 반사율 지표에 의한 질소 적정 시비 수준 추천 회귀식은 추청벼와 주남벼가 각각 $y = -0.0282x^2 + 0.1032x + 0.6945$ 와 $y = -0.0222x^2 + 0.5633$ 으로 나타났었다. 두 공식을 비교해 보면 기울기와 y 절편이 다르게 나타났음을 보여주고 있다. 이는 식물에 대한 반사율 지표값은 환경, 기후, 품종 및 연차에 따라 다르게 나타날 수 있기 때문이라 생각하였다. 따라서 반사율 지표값에 대한 절대값을 추정하기란 현실적으로 어렵다고 생각하였고, 이에 따라 상대값에 의한 반사율 지표의 평가가 필요하다고 가정하였다. 반사율 지표를 상대적으로 추정하기 위해 센서의 지표값 중 최대값에 대한 각

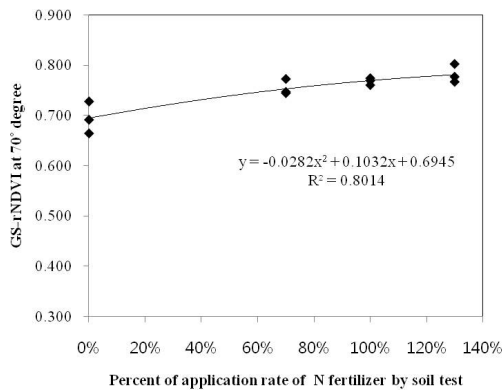


Fig. 13. Interrelationship between rNDVI by GreenSeeker (70°) of rice plant, Chucheong, at the 59 DAT and percent of N fertilizer rate by soil test.

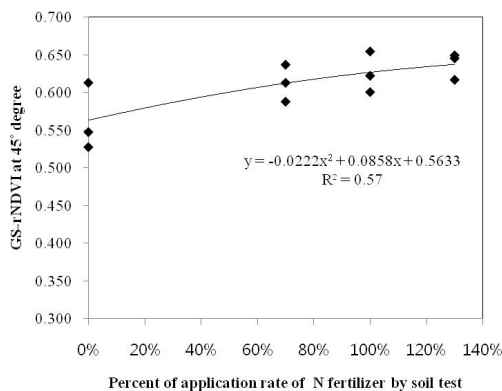


Fig. 14. Interrelationship between rNDVI by Crop Circle (45°) of rice plant, Joonam, at the 59 DAT and percent of N fertilizer rate by soil test.

측정치의 비율로 구한 총족지수를 이용하였다. 총족지수에 의한 추청벼와 주남벼의 질소 시비 수준 예측 회귀식을 Fig. 15에 각각 나타내었다. 추청벼와 주남벼의 지표값과 질소시비수준의 회귀식은 달리 Fig. 15에서 보는 바와 같이 추청벼와 주남벼의 총족지수와 질소시비수준과의 회귀식은 기울기와 y 절편이 유사하게 나타났다. 이에 따라 반사율 지표값을 상대적으로 표시한 총족지수를 이용한다면 두 품종에 대한 질소의 시비 수준을 동시에 추정 가능할 것으로 판단되었다. Figure 16는 반사율 지표에 의한 총족지수를 품종에 따른 구분 없이 질소시비수준과의 회귀관계를 나타낸 것이다. 총족지수와 질소시비수준과의 회귀식은 $y = -0.0347x^2 + 0.1304x + 0.8664$ 로 나타났다. 여기에 나타난 기울기와 y 절편 또한 각 품종별로 비교한 회귀식들과 유사한 경향을 보여주었다. 따라서 이러한 결과로부터 벼 유수형성기의 지상원격탐사 반사율 지표는 총족지수로 평가하여 벼에 대한 질소의 시비수준을 예측할 수 있으므로 질소추천시비모델로 활용할 수 있는 기술이 될 것이라 판단하였다. 총족지수가 0.95미만으로 나타날 때 부족분을 산출하여

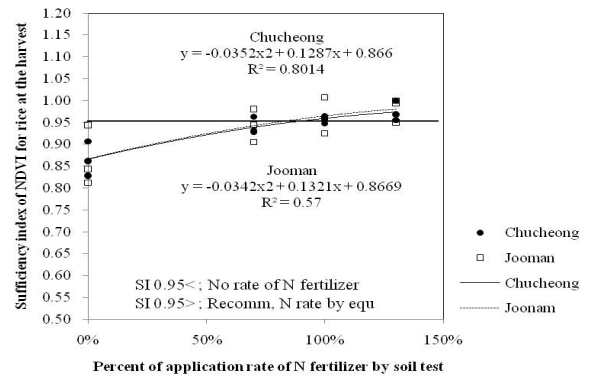


Fig. 15. Interrelationship between sufficiency index of NDVI of rice plant for Chucheong and Joonam respectively at the 59 DAT and percent of N fertilizer rate by soil test.

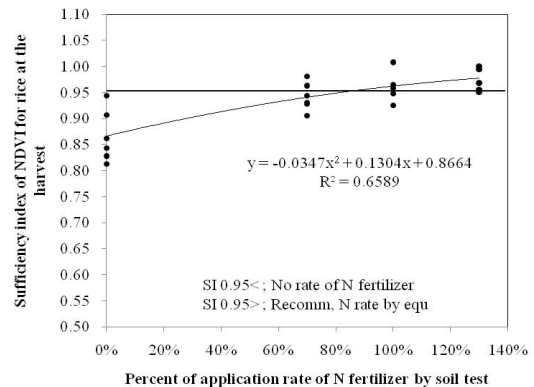


Fig. 16. Interrelationship between sufficiency index of NDVI of rice plant for the both cultivar combination at the 59 DAT and percent of N fertilizer rate by soil test.

토양중 시간적-공간적으로 유동성을 갖는 질소의 시비 수준을 실시간으로 추정 가능할 것으로 판단되었다.

요 약

본 연구는 벼 생산력을 예측할 수 있는 지상원격 측정센서 및 반사율지표를 선별하고, 이삭거름 질소 시비량 추전을 위한 원격탐사 최적 검정시기를 평가하며, 효율적 원격탐사 지표에 의한 이삭거름 질소 시비량 추천모형을 추정하고자 2010년에 포장시험이 수행되었다. 질소 시비량은 작물별 시비처방기준 (NIAS, 2006) 에 의해 결정하였고, 질소 시비 수준은 기준 질소 시비량의 0%, 70%, 100% 및 130%의 4수준으로 하였으며, 밀거름으로 70%, 이삭거름으로 30%로 하여 분시하였다. 벼는 추청과 주남을 공시품종으로 하여 사양토에 5월 22일에 이앙하였고, 10월 6일에 수확하였다. 지상원격탐사 반사율 지표는 Crop Circle-amber와 red, GreenSeeker-green과 red를 이용해 7월 5일부터 8월 23일까지 7회에 걸쳐 측정하였다. 지상원격탐사 센서의 헤드와 작물 캐노피와의 형성 각도에 따라 센서가 탐지하는 식생의 밀도가 달라질 수 있다는 가정 하에 센서 헤드와 작물 캐노피의 측정 각도를 45°, 70° 및 90° 각도로 조정하여 반사율 지표를 측정하였다. 지상원격탐사 센서로 측정된 반사율 지표는 70° 및 90° 각도로 측정하였을 때 전반적으로 양호한 상관을 보여 주었고, 생육 중반기와 수확기의 벼 지상부 건물중과 유의성 있는 상관을 보였다. 결정적 생육시기 (critical season) 인 52일째와 59일째 측정된 반사율 지표는 벼의 지상부 건물중, 질소 흡수량과 밀접한 상관을 보여주었으며, 특히 이앙 후 59일째 측정된 NDVI가 고도로 밀접한 관계가 있음을 보여주었다. 이러한 결과로 추청벼는 59일째 GreenSeeker 70° 각도 rNDVI가, 주남벼는 59일째 Crop Circle 45° 각도 rNDVI 및 GreenSeeker 70° gNDVI가 최종 수확기 벼의 지상부 건물중 및 질소 흡수량을 추정하고, 이들 지표는 충족 지수로 평가하여 질소시비수준을 예측하고 이삭거름 질소 시비추천모형으로 활용할 수 있을 것으로 생각되었다.

사 사

이 논문은 2011년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

인 용 문 헌

- Gong, H.Y. 2007. Estimation of N-fertilizer level and production of rice (*Oryza sativa* L.) using ground-based remote sensor. Master Thesis, Chungbuk National University. Choeng-Ju, Korea.
- Hong, S.D. 2001. Evaluation of soil fertility for precision agriculture. TALS. 1(1):19-25.
- Hong, S.D. and J.J. Kim. 2003. Agricultural application of ground remote sensing. Korean J. Soil Sci. Fert. 36(2):92-103.
- Hussian, 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.
- Kang, S.S. 2007. Evaluation for biomass and nitrogen nutrition of crop by reflectance indices of ground-based remote sensors. Ph.D. Thesis, Chungbuk National University. Choeng-Ju, Korea.
- Kim, B.J., W.C. Park, R.K. Cho, and K.S. Ryu. 2001a. Possible use of NIR spectroscopy for soil testing. Korean J. Soil Sci. & Fert. 34(4):273-227.
- Kim, B.J., W.C. Park, R.K. Cho, and K.S. Ryu. 2001b. Use of NIR soil analyzer for measuring chemical properties of field soil. Korean J. Soil Sci. & Fert. 34(4):278-283.
- Kim, S.J. 2005. Scenario on future infrastructure of precision agriculture. TALS. 3(3):1-11.
- Kim, H.G., S.S. Kang, and S.D. Hong. 2009. Estimation for red pepper (*Capsicum annum* L.) biomass by reflectance indices with ground-based remote sensor. Korean J. Soil Sci. Fert. 42(2):79-87.
- Kim, J.I., H.C. Choi, K.H. Kim, J.K. Ahn, N.B. Park, D.S. Park, C.S. Kim, J.Y. Kim, and J.K. Kim. 2009. Varietal response to grain quality and palatability of cooked rice influenced by different nitrogen applications. Korean J. Crop Sci. 54(1):13-23.
- Lee, S.K. 2007. Effect of nitrogen fertilization on grain quality and palatability in rice cultivars. Master Thesis, Seoul National University. Seoul, Korea.
- NIAS. 2006. Recommendation of the amount of fertilizer for crops. RDA. Suwon, Korea.
- Peterson, T.A., T.M. Blackmer, D.D. Francis, and J.S. Schepers. 1993. Using a chlorophyll meter to improves N management. Nebguide G93-1171A. Coop. Ext. Serv., Univ. of Nebraska, Lincoln.
- Varvel, G.E., J.S. Schepers, and D.D. Francis. 1997. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meter. Soil Sci. Soc. Am. J. 61:1233-1239.
- Qin, W., S.A.W. Gerstl, D.W. Deering, and N.S. Goel. 2002. Characterizing leaf geometry for grass and crop canopies from hotspot observations. Remote Sens. Environ. 80:100-113.