

## 지상광학센서를 이용한 쌀 단백질함량 예측

김이현 · 홍석영<sup>†</sup>

농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료관리과

### Estimation of Rice Grain Protein Contents Using Ground Optical Remote Sensors

Yi-Hyun Kim and Suk-Young Hong<sup>†</sup>

National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration

**Abstract :** It is well known that the protein content of rice grain is an indicator of taste of cooked rice in the countries where people as the staple food. Ground-based optical sensing over the crop canopy would provide information not only on the mass of plant body which reflects the light, but also on the crop nitrogen content which is closely related to the greenness of plant leaves. The vegetation index has been related to crop variables such as biomass, leaf nitrogen, plant cover, and chlorophyll in cereals. The objective of this study was to investigate the correlation between GNDVI and NDVI values, and grain protein content at different dates and to estimate the grain protein content using G(NDVI) values. We measured Green normalized difference vegetation index [ $GNDVI = (\rho_{0.80\mu m} - \rho_{0.55\mu m}) / (\rho_{0.80\mu m} + \rho_{0.55\mu m})$ ] and [ $NDVI = (\rho_{0.80\mu m} - \rho_{0.68\mu m}) / (\rho_{0.80\mu m} + \rho_{0.68\mu m})$ ] by using two different active sensors. The study was conducted during the rice growing season for three years from 2005 through 2007 at the experimental plots of National Institute of Agricultural Science and Technology. The experiments were carried out by randomized complete block design with the application of four levels of nitrogen fertilizers(0, 70, 100, 130kg N/ha) and the same amount of phosphorous and potassium content of the fertilizers. After heading stage, relationships between GNDVI of rice canopy and grain protein content showed the highly positive correlation at different dates for three years. GNDVI values showed higher correlation coefficients than that of NDVI during growing season in 2005-07. The correlation between GNDVI values at different dates and grain protein contents was highly correlated at early July. We attempted to estimate the grain protein content at harvesting stage using GNDVI values from early July for three years. The determination coefficients of the linear model by GNDVI values were 0.91 and the measured and estimated grain protein content at harvesting stage using GNDVI values highly correlated( $R^2=0.96^{***}$ ). Results from this study show that GNDVI appeared very effective to estimate leaf nitrogen and grain protein content of rice canopy.

**Key Words :** Vegetation index, GNDVI, NDVI, Correlation coefficients, Grain protein, Heading stage.

**요약 :** 본 연구에서는 광학 센서를 이용한 벼 생육단계별 식생지수와 쌀 단백질함량의 관계를 구명하여 수확기 쌀 단백질함량을 추정하고자 하였다. 인공광원을 사용하는 능동형 광학센서인 GreenSeeker

접수일(2008년 9월 16일), 수정일(1차 : 9월 30일), 게재확정일(2008년 11월 18일).

<sup>†</sup> 교신저자: 홍석영(syhong@rda.go.kr)

(NTech Inc., USA) GNDVI(green normalized difference vegetation index= $(\rho_{0.80\mu m} - \rho_{0.55\mu m}) / (\rho_{0.80\mu m} + \rho_{0.55\mu m})$ )와 NDVI(normalized difference vegetation index= $(\rho_{0.80\mu m} - \rho_{0.68\mu m}) / (\rho_{0.80\mu m} + \rho_{0.68\mu m})$ ) 2종의 센서를 이용하여 벼 군락의 반사특성을 측정하고 동시에 식물체 샘플링을 통한 쌀 단백질함량을 분석하였다. 3년 동안(2005-2007년) 벼 출수 후 식생지수와 쌀 단백질함량의 관계를 조사해 본 결과 모든 시기에 걸쳐 GNDVI가 NDVI보다 상관성이 높았고, 벼 수확기가 가까울수록 상관계수가 높게 나타났다. 수확기 쌀 단백질함량 예측 가능성을 알아보기 위해 벼 유수형성과 출수기 두 시기의 GNDVI값과 수확기 쌀 단백질함량과의 관계를 분석해본 결과, 결정계수가 각각 0.91, 0.81로 특히 이삭거름 주기 전에 측정된 GNDVI를 통하여 수확기 쌀 단백질함량을 예측 할 수 있다는 결론을 얻었다. 이 결과를 바탕으로 유수형성기 GNDVI를 이용한 수확기 쌀 단백질함량 경험 모델식을 구하고 경험 모델식에서 얻어진 추정값과 실측값의 관계를 통해 검증하였다. 2005년과 2006년에서 구한 경험모델식의 쌀 단백질함량 추정값과 2007년도 쌀 단백질함량 실측값을 1:1 line에서 비교해본결과 결정계수가 높게 나타났다( $R^2=0.96^{***}$ ).

## 1. 서론

우리나라 쌀 산업은 시장개방 폭이 확대되면서 외국 쌀과 경쟁이 불가피하게 되었다. 소비자는 이전에 생산된 미질보다 더욱 품질이 우수하고 안정성이 높은 품질을 요구하고 있으며, 농업인들은 높은 수량성을 갖춘 최고 품질 품종을 요구하고 있는 실정이다. 동일한 고품질 품종을 동일지역에서 재배할 경우에도 완전미 비율, 질소비료, 품종 혼입 등에 따라 품질차이가 발생한다. 식미에 영향을 미치는 요인으로는 품종, 시비, 수확시기, 기상조건, 토양조건 등이 있는데 질소와 미질은 반비례한다. 질소는 쌀의 단백질 함량을 높여 완전미율과 투명도가 떨어지며 밥의 점성이나 조식감을 나쁘게 하고, 쌀 전분 세포막 물질을 만들어 밥의 부드러움을 해쳐 미질을 저하시킨다. 수십 년 동안 질소질 비료의 과 투입으로 인한 단백질함량 증가로 쌀의 맛이 떨어져 미질개선이 필요하다.

원격탐사 자료로부터 작물의 생 물리학적 특성을 나타내는 다양한 인자들을 밝혀내기 위해 식생지수(Vegetation Indices)를 이용하는데 식생지수는 단위가 없는 복사값으로 녹색식물의 상대적 분포량과 활동성, 엽면적지수, 엽록소함량, 광합성과 흡수복사량(APAR) 등과 관련된 지표로 사용된다. 최초의 식생지수는 적색과 근적외선 영역에서 반사값을 나눈 단순 식생지수(SR)이며, 그 후 20여종의 식생지수가 개발되어 사용되어지고 있는데 그 중에서 적색과 근적외선의 비를 이용한 정규화 식생지수인 NDVI가 널리 이용되어지고 있다

(Richardson *et al*, 1992).

최근에는 센서를 장착하는 platform이 인공위성이나 항공기가 아닌 트랙터와 같은 농기계나 혹은 휴대용으로부터 발전 전환되면서 원격탐사는 정밀농업을 수행하기 위한 새로운 측정기술로 발전되고 있다. 지상 원격탐사 센서는 측정원리에 의해 크게 2가지로 분류되는데 즉, 입사되는 자연광으로부터 반사되는 비율을 측정하는 수동(passive) 형태와 자연광원과 구분되는 변조된 인공광원을 방출하고 반사율을 검출하는 능동(active) 형태이다. 자연광을 이용하는 passive 형태의 센서는 입사각, 조도, 일기조건, 주간의 시간대 등에 따라 민감하게 영향을 받고 또한 광이 부족하거나 없는 일몰시 혹은 야간에 측정할 수 없는 단점을 가지고 있다. 따라서 최근에는 광의 환경조건에 관계없는 active 센서로 전환 개발되고 있으며 이러한 지상 광학 센서에 의한 측정 기술은 관행의 시료채취, 건조, 분쇄, 분석절차 등의 복잡한 조사과정에 비하여 신속하고, 비 접촉 및 비 파괴적이며 원하는 시기에 언제나 반복적으로 측정할 수 있는 편의성과 함께 경제적인 이점을 가지고 있다.

비파괴적으로 작물의 생육 정보를 분석·평가하는데 원격탐사기술이 이용되고 있고, 최근에는 원격탐사기술을 이용하여 엽 질소 및 쌀 단백질함량을 추정하는 연구들이 진행되고 있다(Best *et al.*, 1985; Baret *et al.*, 1991; Christensen *et al.*, 1993; Babara *et al.*, 1995; Aparicio *et al.*, 2000; Anna *et al.*, 2001; Scharf *et al.*, 2002; Hong *et al.*, 2004; 김이현 *et al.*, 2005; 홍석영 *et al.*, 2005; 김이현 *et al.*, 2006).

일본 북해도 지역에서 수확기 SPOT영상의 NDVI와 쌀 단백질함량과의 관계를 3년간 실험한 결과 상관계수가 높게 나타났고(Asaka *et al.*, 2003), Ryu *et al.* (2005)은 높은 분광분해능으로 분사반사패턴을 연속적으로 측정하는 hyperspectral 센서를 이용하여 엽 질소함량을 추정해본결과 벼 출수기 때 GNDVI(585nm)와 엽 질소함량의 관계가 높게 나타났다( $r=0.91$ ). 따라서 쌀 단백질 함량을 예측하기 위해서는 벼 군락의 분광반사측정을 통하여 생육시기에 따른 반사율지표와 엽 질소함량 등의 식물생육인자의 비교가 필요하다고 판단된다.

본 연구에서는 벼 군락의 분광반사율 지표를 측정할 수 있는 인공광원을 사용하는 2종의 능동형 지상 광학센서(GNDVI, NDVI)에서 얻어지는 식생지수와 생육시기별 쌀 단백질함량과의 관계를 알아보고, 식생지수를 이용한 쌀 단백질함량 추정을 통해 고품질 쌀 생산에 필요한 수확기 쌀 단백질함량을 예측하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 1) 시험 포장 및 처리 내용

본 시험은 농업과학기술원 시험 포장(37° 15' 28.0"N, 126° 59' 21.5"E)에서 2005년부터 2007년까지 3년에 걸쳐 실험을 수행하였고 공시토양은 화동토으로 토성속은 식양질이며, 시험 전 토양이화학성은 Table 1에서 보는 바와 같다. 공시품종으로 추청벼를 사용하였고, 벼 이앙일은 각각 2005년 5월 18일, 2006년 5월 17일, 2007년 5월 17일이었으며 벼 수확일은 각각 2005년 10월 11일, 2006년 10월 12일, 2007년 10월 12일이었다. 질소수준별 시험구 면적은 48 m<sup>2</sup>, 재식밀도는 30 × 15 cm 이었고, 난괴법 3반복으로 시험구 배치를 하였다. 시비처리 는 질소의 경우 요소비료로 0, 70, 100, 130 kg ha<sup>-1</sup> 등

4수준 3반복 처리하였고, 인산은 용과린, 칼륨은 염화칼륨을 사용하여 토양검정 시비량에 따라 처리하였다.

### 2) 시료채취 및 분석방법

채취한 토양은 풍건 후 2 mm 체에 통과한 것을 분석 시료로 하였으며, 토양화학성은 농업과학기술원 토양 및 식물체 분석법에 준하여 분석하였다(NIAST, 2000). 식물체는 시험구당 생육이 고른 벼 3주를 선택하여 생체중, 초장, 경수를 측정한 다음 70℃에서 건조하여 건물중을 측정 후 분쇄하여 분석시료로 사용 하였다. 쌀 단백질함량은 쌀 중 총 질소함량에 단백질 환산계수 5.95를 곱하여 계산하였다.

질소수준별 · 생육시기별 식생지수와 단백질 함량의 관계와 수확기 쌀 단백질함량 추정을 알아보기 위해 SAS 프로그램(Enterprise Guide 3.0)을 이용하여 상관분석 및 회귀분석을 수행하였다.

### 3) 벼 군락의 분광반사 특성

벼 군락의 분광반사 특성을 측정하기 위하여 능동형 광학센서인 Greenseeker (NTech Inc., USA) GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index)와 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)을 이용하였다. 광학센서는 센서 내에 탑재된 인공광으로부터 파장별로 빛을 조사하고 조사된 빛에 대한 적색광/근적외광 또는 녹색광/근적외광의 반사율을 조합하여 식생지수 값을 각각 얻었고, 센서와 작물의 최적거리는 약 80 cm, 파장 검출 유효넓이는 약 60 cm이며(Fig. 1), 센서별 파장 영역은 다음과 같다.

$$NDVI = \frac{NIR_{800nm} - RED_{680nm}}{NIR_{800nm} + RED_{680nm}}$$

$$GNDVI = \frac{NIR_{800nm} - GR_{550nm}}{NIR_{800nm} + GR_{550nm}}$$

Table 1. Soil chemical properties of the experimental plot for fertilizer recommendation

Year	pH	OM	NH <sub>4</sub> -N	Available P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Exchangeable cations			CEC	Available SiO <sub>2</sub>
					K	Ca	Mg		
	1:5	g kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	----- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----			mg kg <sup>-1</sup>	
2005	6.1	22	10.3	34	0.3	6.1	2.3	16.1	149
2006	6.0	18	7	31	0.52	7.1	1.5	16.5	135
2007	5.9	20	9	38	0.50	6.6	1.9	18.1	143

OM : Organic Matter, C.E.C : Cation Exchange Capacity.

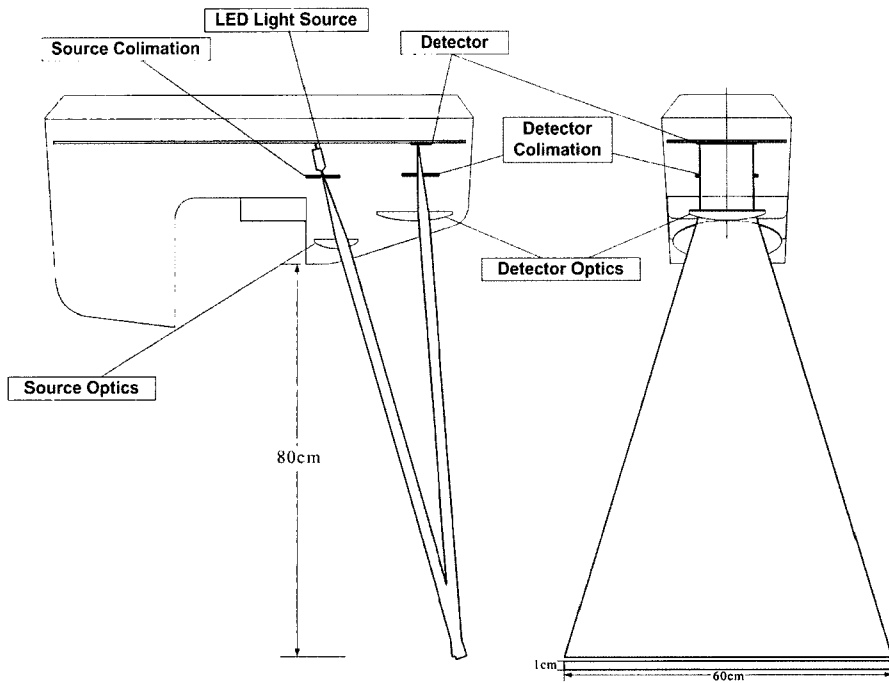


Fig. 1. Greenseeker Optical Geometry(produced by Oklahoma State University Precision Sensing Team).

### 3. 연구결과

#### 1) 생육시기에 따른 식생지수와 쌀 단백질함량 관계

지난 3년(2005-2007)에 걸쳐 벼 출수기에서 수확기 까지 자료를 이용하여 각 시기별 G(NDVI)값과 쌀 단백질함량과의 관계를 분석하였다(Table 2, 3). 2005년의 경우 3시기에 걸쳐 각 시기별 G(NDVI)값과 쌀 단백질함량의 상관관계를 알아보았는데 벼 수확기에 가까워 올수

록 G(NDVI)값과 쌀 단백질함량의 상관관계가 높게 나타났고, GNDVI값이 NDVI값보다 상관계수가 높았다. 벼 수확기(10월 11일)의 경우 GNDVI와 쌀 단백질함량의 상관계수가 0.94, NDVI와 쌀 단백질함량의 상관계수는 0.84였다. 2006년은 8시기동안 GNDVI와 쌀 단백질함량 관계를 분석해본 결과 모든 시기에서 상관관계가 높게 나타났고, 2005년 결과와 마찬가지로 수확기에 상관계수가 높았다. 2007년 역시 시기별 GNDVI가 NDVI

Table 2. Correlation coefficients between GNDVI of rice canopy and grain protein contents at different dates for three years

Date(days after transplanting)	2005	2006	2007
94(Aug. 22)		r=0.88***	
101(Aug. 29)	r=0.90***	r=0.88***	r=0.86***
107(Sep. 5)		r=0.90***	
114(Sep. 12)		r=0.91***	r=0.89***
121(Sep. 19)	r=0.93***	r=0.90***	
128(Sep. 26)		r=0.90***	r=0.90***
136(Oct. 4)		r=0.91***	r=0.92***
144(Oct. 12)	r=0.94***	r=0.93***	r=0.94***

\*\* : level of significance p<0.01  
 \*\*\* : level of significance p<0.001

Table 3. Correlation coefficients between NDVI of rice canopy and grain protein contents at different dates for three years

Date(days after transplanting)	2005	2006	2007
94(Aug. 22)		r=0.85**	
101(Aug. 29)	r=0.77**	r=0.87***	r=0.86***
107(Sep. 5)		r=0.88***	
114(Sep. 12)		r=0.81**	r=0.82**
121(Sep. 19)	r=0.84**	r=0.83**	
128(Sep. 26)		r=0.85**	r=0.83**
136(Oct. 4)		r=0.82**	r=0.83**
144(Oct. 12)	r=0.84**	r=0.81**	r=0.86***

\*\* : level of significance p<0.01  
 \*\*\* : level of significance p<0.001

보다 쌀 단백질함량과의 상관계수가 높게 나타났고 벼 수확기(10월 12일)의 경우 GNDVI와 쌀 단백질함량의 상관계수가 0.94, NDVI와 쌀 단백질함량의 상관계수는 0.86이었다. 벼 생육단계별 3년간의 G(NDVI)값과 쌀 단백질함량과의 관계를 종합해 볼 때 GNDVI가 NDVI 보다 쌀 단백질함량과의 상관관계가 높게 나타났고, 수확기로 갈수록 상관계수가 높게 나타났다.

2) 식생지수를 이용한 쌀 단백질함량 추정

생육시기에 따른 식생지수와 쌀 단백질함량의 관계에서 GNDVI가 상관이 높은 결과를 보여 GNDVI를 이용하여 수확기 쌀 단백질함량을 추정해 보았다. 2005년에서 2007년의 3년간 수확기 GNDVI를 이용하여 수확기 쌀 단백질함량을 추정하였고 그 결과는 Fig. 2와 같다. GNDVI는 수확기 쌀 단백질함량과 1차 직선관계가

성립하였는데, GNDVI와 단백질 함량과는 결정계수 ( $R^2$ )가 0.88로써 단백질함량변이의 약 88%를 설명할 수 있었고, 이 추정식을 이용하여 수확기 쌀 단백질함량 실측값과 추정값을 비교해 본 결과 1:1 line에 근접하게 분포하였다( $R^2=0.86$ ).

3) 식생지수를 이용한 쌀 단백질함량 예측

이 결과를 바탕으로 벼 수확시기 이전에 GNDVI값을 통하여 고품질 쌀 생산에 필요한 수확기 쌀 단백질함량을 예측하고자 3년 동안 벼 생육시기의 주요시기인 유수형성기(유수 분화기 후 약 7~10 일에 영화의 분화가 이루어지고 이삭이 3~5cm 정도 자라서 꽃밥 속에 생식 세포가 나타나는 시기) 및 출수기(이삭이 패는 시기)에 각각 측정된 GNDVI와 수확기 쌀 단백질함량의 관계를

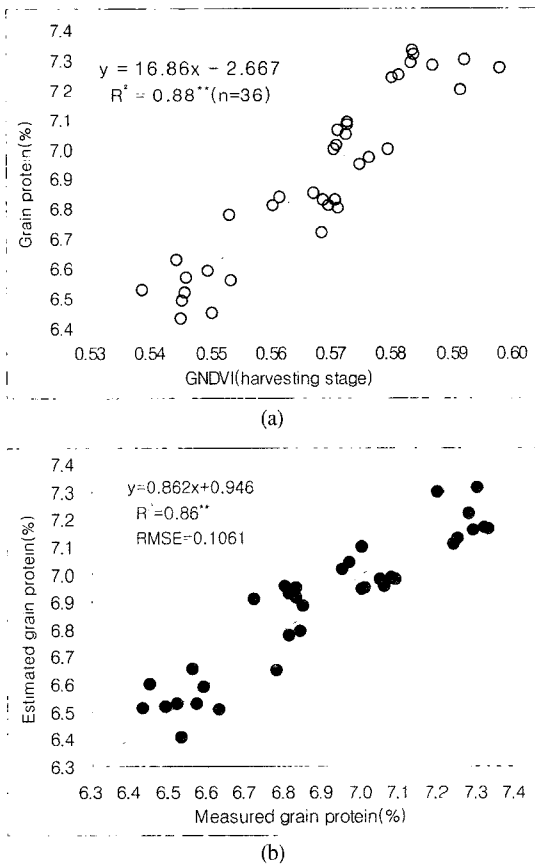


Fig. 2. (a) Relationship between GNDVI and grain protein at harvesting stage for three years from 2005 through 2007. (b) Relationship between Measured and estimated grain protein at harvesting stage.

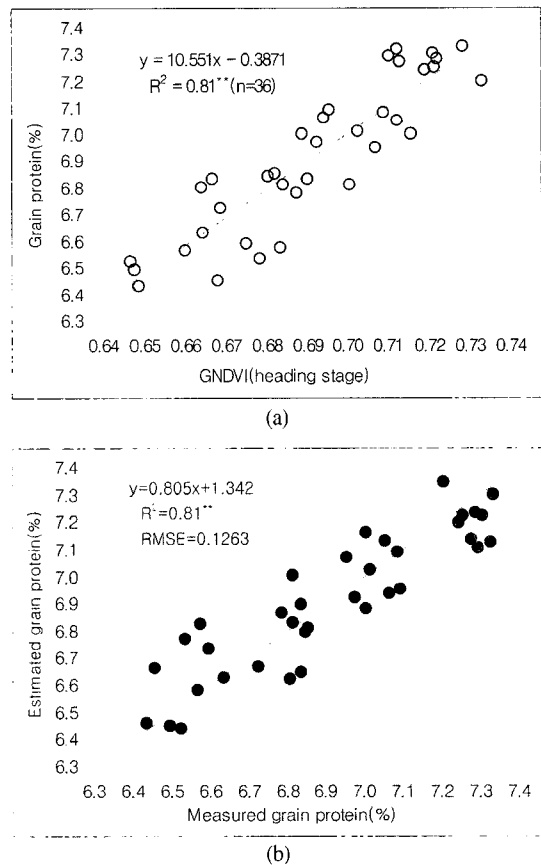


Fig. 3. (a) Relationship between GNDVI of heading stage and grain protein of harvesting stage for three years from 2005 through 2007. (b) Relationship between Measured and estimated grain protein at harvesting stage for three years from 2005 through 2007.

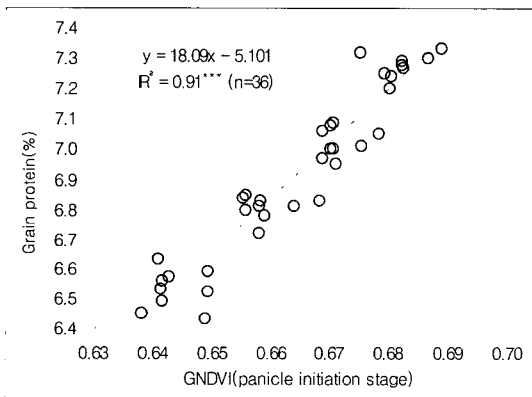
분석하였다.

벼 출수기 때 측정된 GNDVI를 이용하여 수확기 쌀 단백질함량을 예측한 결과 결정계수가  $R^2=0.81$ 로 나타났고, 수확기 쌀 단백질함량 실측값과 추정값을 비교한 결과 결정계수가 역시 0.81로 나타났다(Fig. 3). 또한 이삭거름 주기(7월 26일경) 전 약 2주전 유수형성기 때 측정된 GNDVI를 통하여 수확기 쌀 단백질함량을 예측한 결과는 Fig. 4와 같다. 결과에서 나타난바와 같이 유수형성기 GNDVI를 이용하여 수확기 쌀 단백질함량 변이의 약 91% 설명할 수 있었고, 실측값과 추정값을 비교해본 결과에서도 밀접한 관계를 보였다( $R^2=0.91$ ). 이 결과를 통해 GNDVI가 쌀 단백질함량 추정에 효과적으로 사용할 수 있고, 고품질 쌀 생산에 영향을 미치는 이삭거름 처리 전에 얻어진 식생지수 값을 통해서 수확기 쌀 단백

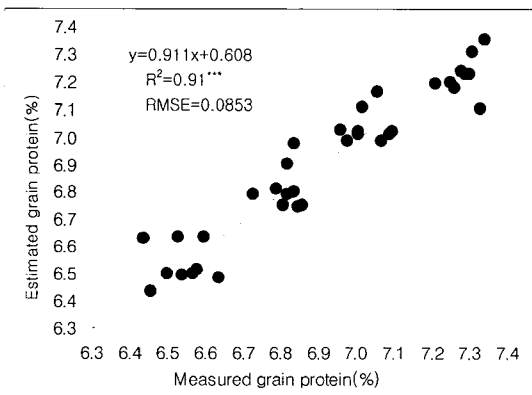
질함량을 예측할 수 있다는 것을 확인 할 수 있었다.

#### 4) 쌀 단백질함량 예측 모델식 검증

유수형성기 GNDVI를 이용하여 수확기 쌀 단백질함량을 예측한 결과 결정계수가 높게 나타났고, 수확기 쌀 단백질함량은 GNDVI와 직선적인 관계를 가진다는 결론을 얻었다. 이 결과를 바탕으로 3년 동안의 유수형성기 GNDVI를 이용한 수확기 쌀 단백질함량 경험 모델식을 구하고 모델식의 유효성을 알아보기 위해 경험 모델식에 얻어진 추정값과 실측값의 관계를 통해 검증하였다(Fig. 5). 2005년과 2006년에서 추정된 경험모델식의 쌀 단백질함량 추정값과 2007년도 쌀 단백질함량 실측값을 1:1 line에서 비교해본 결과 결정계수가 0.96으로 높게 나타나 수확기 쌀 단백질함량 예측 경험모델식이 유효성이 높다는 것이 증명되었다. 향후 연구에서는 경험 모델식을 이용하여 다른 벼 품종에 적용가능성을 확인해 보고, 모델식의 정확도를 높여야 할 것으로 생각된다. 벼 유수형성기의 생육 및 질소영양상태는 생장, 수량 및 쌀의 품질에 큰 영향을 미친다. 고품질 쌀 생산을 위해서는 적정범위의 수확기 쌀 단백질함량(6.5%내외)을 유지해야하는데 여기에 이삭거름이 중요한 인자로 작용한다. 따라서 앞으로 고품질 쌀 생산과 관련해서 이삭거름 주기 전 식생지수와 해당시기 식물체 엽 질소함량 및 토양 내 축적된 질소함량, 수확기 쌀 단백질함량 등을 종합적으로 고려한 이삭거름 양을 제시하는 연구가 필요하다.



(a)



(b)

Fig. 4. (a) Relationship between GNDVI of panicle initiation stage and grain protein of harvesting stage for three years from 2005 through 2007. (b) Relationship between Measured and estimated grain protein at harvesting stage for three years from 2005 through 2007.

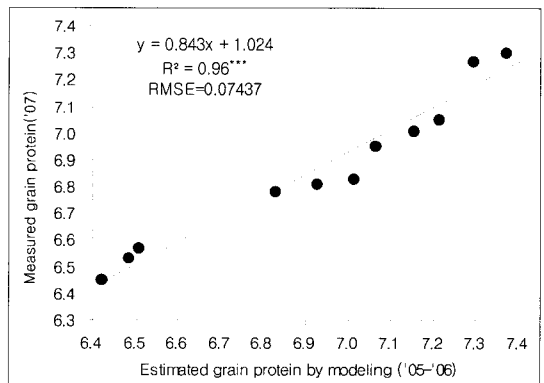


Fig. 5. Comparison between estimated grain protein by modeling and measured grain protein.

## 4. 결론

본 연구에서는 인공광원을 사용하는 능동형 광학센서를 이용하여 벼 생육시기에 따라 광학센서로부터 얻어진 식생지수(GNDVI, NDVI)와 쌀 단백질함량의 관계를 알아보고 상관관계가 높은 센서의 식생지수를 통하여 수확기 쌀 단백질함량을 예측하고자 실험을 수행하였다.

지난 3년 동안 생육별로 두 광학센서에서 얻어진 식생지수와 쌀 단백질함량의 관계를 분석해본 결과, 모든 시기에 걸쳐 GNDVI에서 얻어진 식생지수가 쌀 단백질함량과의 상관관계가 NDVI보다 더 높게 나타났고, 수확기에 가까울수록 상관계수가 높았다. 수확기 쌀 단백질 예측 가능성을 알아보기 위해 벼 유수형성기, 출수기 GNDVI를 이용하여 수확기 쌀 단백질함량과의 관계를 분석해본결과 결정계수가 각각 0.91, 0.81로 특히 이삭 거름 주기 전에 측정된 GNDVI를 통하여 수확기 쌀 단백질함량을 예측 할 수 있다는 결론을 얻었다. 유수형성기 GNDVI를 이용한 수확기 쌀 단백질함량 경험 모델식을 구하고 모델식의 유효성을 알아보기 위해 모델식에 얻어진 추정값과 실측값의 관계를 통해 검증하였다. 2005년과 2006년에서 구한 경험모델식의 쌀 단백질함량 추정값과 2007년도 쌀 단백질함량 실측값을 1:1 line에서 비교해본결과 결정계수가 0.96으로 높게 나타났다.

## 참고문헌

- 김이현, 홍석영, 이지민, 임상규, 곽한강, 2005. 광학센서를 이용한 식생지수와 쌀 단백질함량 관계, 2006 대한원격탐사학회 춘계학술대회, March 31: 193-198.
- 김이현, 홍석영, 2006. 지상광학센서를 이용한 비파괴 벼 엽 질소함량 추정, 한국토양비료학회지, 40(6): 435-441.
- 홍석영, 김이현, 최철웅, 이지민, 이재중, 임상규, 곽한강, 2005. 지상센서와 위성영상을 이용한 벼 군락의 엽 질소함량 추정, 2006 대한원격탐사학회 춘계학술대회, March 31: 218-223.
- Anna, P. and B. Abdou, 2001. Application of hyperspectral remote sensing for LAI estimation in precision farming, Canadian Remote Sensing Symposium.
- Aparicio, N., D. Villegas, J. Casadesus, J. L. Araus, and C. Royo, 2000. Spectral vegetation indices as non-destructive tools for determining durum wheat yield, *Agronomy J.*, 92: 83-91.
- Asaka, D. and H. Shiga, 2003. Estimating rice grain protein contents with SPOT/HRV data acquired at maturing stage, *Journal of The Remote Sensing Society of Japan*, 23(5): 451-457.
- Barbara, J. Y. and R. E. Pettigrew-Crosby, 1995. Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra at leaf and canopy scales, *Remote Sensing of Environment*, 53: 199-211.
- Baret, F. and G. Guyot, 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment, *Remote Sensing of Environment*, 35: 161-173.
- Best, R. G. and J. C. Harlan, 1985. Spectral estimation of green leaf area index of oats, *Remote Sensing of Environment*, 17: 27-36.
- Christensen, S. and J. Goudriaan, 1993. Deriving light interception and biomass from spectral reflectance ratio, *Remote Sensing of Environment*, 43: 87-95.
- Hong, S. Y., K. A. Sudduth., N. A. Kitchen., C. W. Fraisse., H. L. Palm, and W. J. Wiebold, 2004. Comparison of remote sensing and crop growth models for estimating within-field LAI variability, *Korean Journal of Remote Sensing*, 20: 175-188.
- National Institute of Agricultural Science and Technology, 2000. Methods of soil and crop plant analysis, National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Richardson, A. J. and C. L. Weigand, 1992. Using

- Spectral Vegetation Indices to Estimate Rangeland Productivity, *Geocarto International*, 1: 63-77.
- Ryu, C. S., M. Suguri, and M. Umeda, 2005. Estimation the nitrogen contents and the rice quality using hyperspectral remote sensing technology, *European Conference of Precision Agriculture* 2005, pp. 325-330.
- Scharf, P. C., J. P. Schmidt., N. P. Kitchen., K. A. Sudduth, S. Y. Hong, J. A. Lory, and J. G. Davis, 2002. Remote sensing for nitrogen management, *Journal of Soil and Water Conservation*, 57(6): 518-524.