

## 유수분화기 식생지수와 SPAD값에 의한 벼 질소 수비 시용량 결정

김민호 · 부금동 · 이변우<sup>†</sup>

서울대학교 농업생명과학대학 식물생산과학부

### Determining Nitrogen Topdressing Rate at Panicle Initiation Stage of Rice based on Vegetation Index and SPAD Reading

Min-Ho Kim, Jin-dong Fu, and Byun-Woo Lee<sup>†</sup>

Department of Plant Science, College of Agriculture and Life Science, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

**ABSTRACT** The core questions for determining nitrogen topdress rate (Npi) at panicle initiation stage (PIS) are “how much nitrogen accumulation during the reproductive stage (PNup) is required for the target rice yield or protein content depending on the growth and nitrogen nutrition status at PIS?” and “how can we diagnose the growth and nitrogen nutrition status easily at real time basis?”. To address these questions, two years experiments from 2001 to 2002 were done under various rates of basal, tillering, and panicle nitrogen fertilizer by employing a rice cultivar, Hwaseongbyeo. The response of grain yield and milled-rice protein content was quantified in relation to RVIgreen (green ratio vegetation index) and SPAD reading measured around PIS as indirect estimators for growth and nitrogen nutrition status, the regression models were formulated to predict PNup based on the growth and nitrogen nutrition status and Npi at PIS. Grain yield showed quadratic response to PNup, RVIgreen around PIS, and SPAD reading around PIS. The regression models to predict grain yield had a high determination coefficient of above 0.95. PNup for the maximum grain yield was estimated to be 9 to 13.5 kgN/10a within the range of RVIgreen around PIS of this experiment. decreasing with increasing RVIgreen and also to be 10 to 11 kgN/10a regardless of SPAD readings around PIS. At these PNup's the protein content of milled rice was estimated to rise above 9% that might degrade eating quality seriously. Milled-rice protein content showed curve-linear increase with the increase of PNup, RVIgreen around PIS, and SPAD reading around PIS. The regression models to predict protein content had a high determination coefficient of above 0.91. PNup to control the milled-rice protein content below 7% was estimated as 6 to 8 kgN/10a

within the range of RVIgreen and SPAD reading of this experiment, showing much lower values than those for the maximum grain yield. The recovery of the Npi applied at PIS ranged from 53 to 83%, increasing with the increased growth amount while decreasing with the increasing Npi. The natural nitrogen supply from PIS to harvest ranged from 2.5 to 4 kg/10a, showing quadratic relationship with the shoot dry weight or shoot nitrogen content at PIS. The regression models to estimate PNup was formulated using Npi and anyone of RVIgreen, shoot dry weight, and shoot nitrogen content at PIS as predictor variables. These models showed good fitness with determination coefficients of 0.86 to 0.95. The prescription method based on the above models predicting grain yield, protein content and PNup and its constraints were discussed.

**Keywords** : rice, grain yield, protein content, vegetation index, SPAD, N prescription

벼의 수량은 영양생장기간의 발육 및 질소영양 정도와 유수분화기의 시비량에 의해 결정되는데(Norman *et al.*, 1992; Guindo *et al.*, 1994), 특히 영양생장기에서 생식생장기로의 상 전환이 이루어지는 유수분화기는 새로운 조직과 기관형성을 위한 핵산·단백질·아미노산 등 유기화합물을 구성하는데 필수적인 질소에 대한 요구도가 가장 큰 시기로 알려져 있다(Mae and Ohira, 1981). 또한 벼의 단백질 함량은 품종, 재배환경 및 기상환경에 따라서 달라지는데(Heu *et al.*, 1969; Gomez and De Datta, 1975; Zhai *et al.*, 2001), 품종이나 기상환경 보다는 주로 이앙시기, 지역, 토양비옥도, 질소시비수준, 재식밀도 등 재배여건에 의해 더 큰 영향을 받는다고 한다(허 등, 1974). 그 중에서도 질소시비수준은 단백질 함량에 가장 크게 영향한다고 한다(Islam *et al.*,

<sup>†</sup>Corresponding author: (Phone) +82-2-880-4544  
(E-mail) leebw@snu.ac.kr <Received August 28, 2006>

1996; Perez *et al.*, 1996). 유수분화기를 전후한 질소영양상태는 수량 sink의 형성과 충진에 크게 영향을 뿐만 아니라 미립의 단백질함량, 맛 등 품질을 좌우하는 요인이기 때문에 질소영양진단과 이에 따른 적절한 수비처방기술이 확립되어야 한다(Hinzman *et al.*, 1986; Schneider 2003).

작물의 생육 및 영양상태에 따른 수비시용량을 결정하기 위해서 지금까지 행해온 보편적인 방법은 예취를 통한 측정과 질소분석에 의한 것이었지만 근래에는 근락반사나 엽색도(SPAD 메타) 등에 의한 비파괴적인 방법으로써 시비량 결정 등 재배관리를 하는 추세에 있다. 그 방법 중의 하나가 생체정보를 이용하여 시비량을 결정하는 것으로서 정밀한 재배관리를 하기 위해서는 작물의 생체정보를 정확하게 파악하여야 하고, 그 정보를 바탕으로 적절히 처방을 하여야 한다(Hinzman *et al.*, 1986; Schneider 2003). 시비진단을 하는 이유는 질소가 부족할 경우 작물의 잠재 생장이나 수량이 크게 저해되기 때문이다. 따라서 생체정보를 이용한 시비처방은 이 생체 정보 이외에도 목표수량, 목표품질, 토양의 질소 가용도 등을 고려하여 결정되어야 한다. 지금까지 많은 연구자들이 벼를 대상으로 생육량 및 질소영양상태와 근락반사 특성치와의 관계에 대해서 보고하였지만 이를 시비진단의 방법으로써 이용한 예는 매우 드물다. 또한 Peng 등(1996)은 관행시비시기 대신에 한계 SPAD값(35)을 시비진단의 지표로써 사용한 결과 기존의 40-50%의 시비질소 회수율을 60%까지 높였다고 보고한 반면, Piekielek and Fox(1992)은 SPAD값이 토양의 질소 가용도와 거의 관련성이 없기 때문에 추가적인 시비예측에 사용할 수 없다고 보고하였다. 더욱이 품종과 기상여건이 우리나라와 다르고 또한 한계 SPAD값이 35로 매우 높아 우리나라 현실과는 거리가 멀뿐만 아니라 추비량에 따른 수량성이나 단백질함량에 대한 고려는 전혀 없었다.

그동안 질소 수비 실험들은 주로 질소시비량에 대한 수량이나 단백질함량을 고찰하였는데, 실제 벼에 의해 흡수된 질소량은 토양의 비옥도나 재배·기상환경 차이가 있기 때문에(Cassman *et al.*, 1993; Muchow & Sinclair, 1995), 보다 보편성을 갖기 위해서는 실제로 작물에 축적된 질소량을 정확히 모니터링함으로써 그 결과 얻어지는 수량, 단백질함량 등을 기준으로 시비진단을 하여야 하며(Kropff *et al.*, 1993; Sinclair & Muchow, 1995), 이를 실제 시비 처방에 이용하기 위해서는 실시간으로 간편하게 추정할 수 있어야 한다.

따라서 본 연구에서는 유수분화기 생육 및 질소영양상태를 가장 잘 대표하는 녹색광 비식생지수(RVIgreen; 김, 2005)과 현재 엽색측정에 널리 이용되고 있는 SPAD값을

유수분화기와 유수분화기 1주일 전 측정치 및 유수분화기부터 수확기까지 즉 생식생장기 질소의 지상부 축적량(PNup)을 변수로 하여 수량 및 단백질 예측 회귀모델과 PNup 예측 회귀모델을 작성함으로써 수비질소 시비 처방 가능성을 검토하고자 하였다.

## 재료 및 방법

2001년과 2002년도에 걸쳐 서울대학교 농업생명과학대학 부속농장에서 화성벼를 재식밀도 15 cm × 30 cm로 1주 3분으로 손 이앙하였다. N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O를 12-8-8 kg/10a의 기준시비량으로 한 질소 시비 처리 조건은 표 1과 같다. 질소는 기비 : 분얼비 : 수비를 40 : 30 : 30으로, 인산은 전량기비, 가리는 기비 : 수비를 70 : 30으로 분시하였다. 생육조사는 이앙 후부터 수확기까지 7~14일 간격으로 분얼수, 엽면적, 엽색도(SPAD, Minolta사), 건물중 등을 조사하였으며, 수확시 수량 및 수량구성요소를 조사하였다. 생육조사일에 근락반사와 최상위 완전 전개엽의 SPAD값(Y-leaf)을 조사하였다. 72°C에서 72시간 건조 후 건물중을 칭량한 후 마쇄기로 분쇄하여 Kjeldahl(Auto-Kjeltec 1035 System, Tecator사, Swiss) 법으로 질소를 분석하였다.

근락반사는 분광광도계(GER-1500, GER社)를 사용하였고, Lambertian-panel(reference panel)의 반사율에 대한 작물 근락의 반사율의 비를 이용하였다. 녹색광(520~600 nm, G) 반사율( $\rho_G$ )과, 근적외선(760~900 nm, NIR) 반사율( $\rho_{NIR}$ )을 이용하여 다음과 같이 녹색광 비식생지수(RVIgreen)을 구하였다.

$$RVI_{green} = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_G}$$

유수분화기 지상부 질소함량, 질소영양지수 등 질소영양상태를 대표하고 있는 식생지수 RVIgreen(김, 2005)과 유수분화기 및 유수분화기 1주일 전의 SPAD측정값, 그리고 유수분화기부터 수확기까지의 질소흡수량을 독립 변수로 하는 수량 및 백미 단백질함량에 대한 예측 중회귀 모형을 작성하였다. 중회귀분석은 SAS의 stepwise regression을 적용하였으며, 변수의 선택은 5% 유의수준에서 forward selection 방법을 이용하였다. 중회귀모형식은 식(1)과 같으며, 각 연차 간 변이를 고려하여 Dummy-variable을 두었다. 여기서 X는 RVIgreen 또는 SPAD값, PNup은 유수분화기부터 수확기까지의 질소흡수량을 의미한다.

$$\hat{Y} = \alpha + \beta X + \gamma X^2 + \delta PNup + \varepsilon PNup^2 + \zeta X \times PNup + \eta X \times PNup^2 + \theta X^2 \times PNup + Dummy^\dagger \quad \text{식(1)}$$

(<sup>†</sup> : dummy variable, 2001=0, 2002=1)

**결과 및 고찰**

**수량예측 회귀모형**

유수분화기 및 유수분화기 1주일 전의 RVIGreen과 SPAD 값, 그리고 PNup을 이용하여 얻은 중회귀모형은 어느 경우 에나 모델의 결정계수(R<sup>2</sup>)가 0.9 이상으로 매우 높았다. 수 량은 어느 경우 에나 RVIGreen과 PNup에 대하여 2차 곡선

반응을 나타내었고 이들 간에 상호작용도 인정되었다. 유수 분화기 1주일 전 및 유수분화기 SPAD값에 대하여는 각각 1차 및 2차 곡선 반응을 나타내었으나 RVIGreen에서와 같 이 PNup과의 상호작용은 인정되지 않았다.

표 2에서 얻어진 중회귀모형식을 바탕으로 한 수량의 등치 선 반응 곡선은 그림 1 및 2와 같다. 동일한 수량을 얻기 위 한 생식생장기 질소흡수 요구량은 RVIGreen값이나 SPAD값 이 클 경우 즉 유수분화기 생육량이 많거나 질소 영양상태가 좋을 경우 적어지는 경향을 나타내었다.

표 2의 수량예측 중회귀모형식에서 유수분화기 이후 질 소흡수량이 증가하여도 수량은 더 이상 증가하지 않는 즉,

**Table 1.** Summary of nitrogen application treatments in 2001 (upper) and 2002 (lower).

Treatment	Basal N.	Tillering N.			Total	Panicle N.	Total (kgN/10a)				
		10 DAT	20 DAT	30 DAT			0N, 0.5N, 1N, 1.5N, 2N				
T1	0.00N	0.00N			0.00N	0N, 0.5N, 1N, 1.5N, 2N	0,0	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	0.50N	0.50N			0.50N	"	4,2	6,0	7,8	9,6	11,4
T4	0.75N	0.75N			0.75N	"	6,3	8,1	9,9	11,7	13,5
T5	1.00N	1.00N			1.00N	"	8,4	10,2	12,0	13,8	15,6
T6	1.25N	1.00N	0.25N		1.25N	"	10,5	12,3	14,1	15,9	17,7
T7	1.50N	1.00N	0.50N		1.50N	"	12,6	14,4	16,2	18,0	19,8
T8	2.50N	1.00N	0.50N	0.50N	2.00N	"	16,8	18,6	20,4	22,2	24,0
T9	2.50N	1.00N	1.00N	0.50N	2.50N	"	21,0	22,8	24,6	26,4	28,2

Treatment	Basal N	Tillering N (12DAT)	Panicle N	Total (kgN/10a)					
T1	0N	0.0N	0N, 0.5N, 1N, 1.5N, 2N, 3N	0,0	1,8	3,6	5,4	7,2	10,8
T2	1N	0.0N	"	4,8	6,6	8,4	10,2	12,0	15,6
T3	1N	0.5N	"	6,6	8,4	10,2	12,0	13,8	17,4
T4	1N	1.0N	"	8,4	10,2	12,0	13,8	15,6	19,2
T5	1N	1.5N	"	10,2	12,0	13,8	15,6	17,4	21,0
T6	1N	2.0N	"	12,0	13,8	15,6	17,4	19,2	22,8

DAT=days after transplanting

1N's in basal, tillering, and panicle N fertilizer mean 4.8, 3.6, and 3.6 kgN/10a, respectively.

**Table 2.** Regression equation of grain yield (kg/10a) to RVIGreen and SPAD reading at panicle initiation stage (PIS) and one week before PIS, and shoot nitrogen uptake from PIS to harvest (PNup).

Stage	Parameters	Equation	R <sup>2</sup>
PIS	RVIGreen	$\hat{Y} = 112.29 + 42.438 \times RVIG + 11.066 \times RVIG \times PNup - 0.5455 \times RVIG^2 \times PNup - 0.3098 \times RVIG \times PNup^2 - 110.28 \times Dummy$	0.9509
	SPAD reading	$\hat{Y} = -1754 + 98.615 \times SPAD + 50.805 \times PNup - 1.029 \times SPAD^2 - 2.362 \times PNup^2 - 29.19 \times Dummy$	0.9640
One week before PIS	RVIGreen	$\hat{Y} = 139.47 + 37.689 \times RVIG + 11.4 \times RVIG \times PNup - 0.54 \times RVIG^2 \times PNup - 0.341 \times RVIG \times PNup^2 - 81.27 \times Dummy$	0.9511
	SPAD reading	$\hat{Y} = -625.4 + 29.138 \times SPAD + 53.182 \times PNup - 2.539 \times PNup^2$	0.9442

Dummy variable was set as 0 and 1 in 2001 and 2002, respectively.

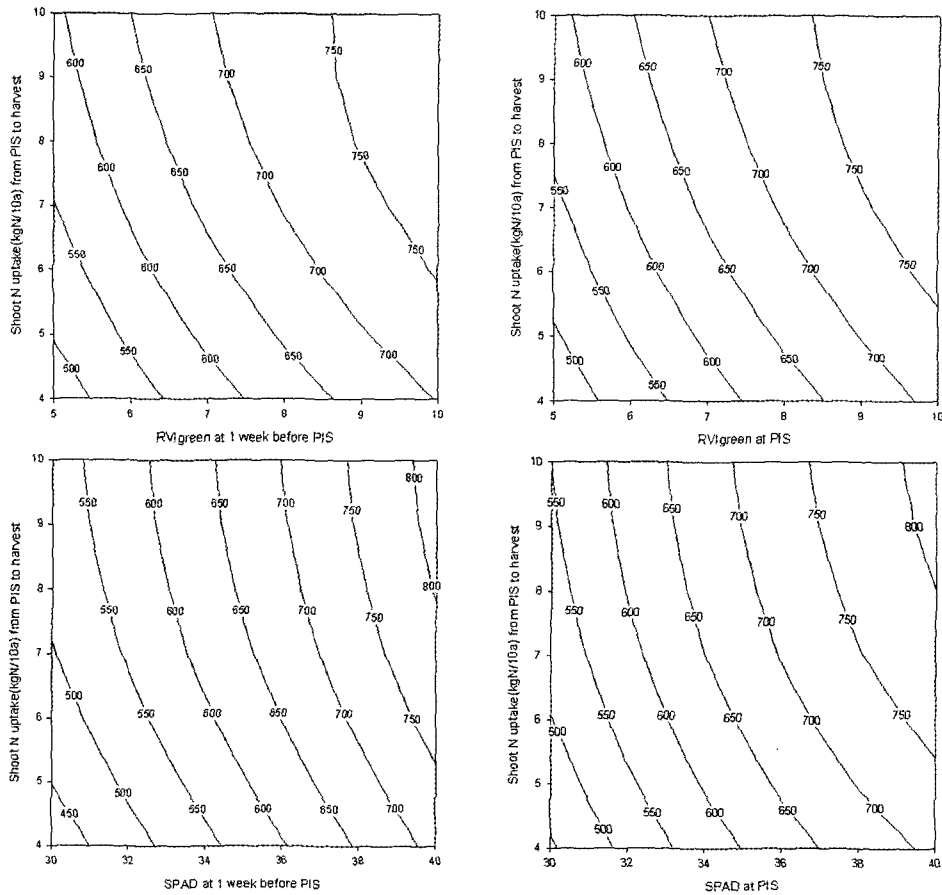


Fig. 1. Isoleth of yield in relation to the RVgreen or SPAD reading at PIS and one week before PIS, and PNup. Graph was drawn from the equation in Table 2.

Table 3. The estimated requirement of shoot nitrogen accumulation from panicle initiation stage to harvest for the maximum grain yield.

Stage	Parameters	PNup <sub>Ymax</sub> <sup>†</sup>
PIS	RVgreen	$\hat{Y} = 17.86 - 0.88 \times RVIg$
	SPAD	$\hat{Y} = 10.755$
One week before PIS	RVgreen	$\hat{Y} = 16.716 - 0.792 \times RVIg$
	SPAD	$\hat{Y} = 10.473$

<sup>†</sup>PNup<sub>Ymax</sub> was estimated from the equations in Table 2.

$\frac{\partial Y}{\partial PNup} = 0$  일 경우 수량을 최대로 하는 질소흡수량이 구해진다(표 3). 유수분화기 RVgreen값이 증가하면, 즉 유수분화기 생육 및 질소영양상태가 좋아지면 수량을 최대로 하는 질소흡수량(PNup<sub>Ymax</sub>)은 감소하는 경향이나 본 연구의 유수분화기 RVgreen의 범위로 보면, PNup<sub>Ymax</sub>는 9~13.5 kg/10a 범위로 추정되었다. 반면 수량을 최대로 하는 유수분화기 이후의 질소흡수량은 유수분화기 SPAD값이나 유수분화기 1주일전의 SPAD값과는 무관하게 약 10~11 kg/

10a로 되었다. 그러나 이것은 수량을 최대로 얻을 수 있는 추정값이며, 김(2004)의 보고에서 보듯이 수량은 유수분화기 이후의 질소흡수량이 5~6 kg/10a까지 거의 직선적으로 증가하나 그 이후의 질소흡수량에 의해서는 수량증가폭이 매우 적은 경향을 보였기 때문에, 5~6 kg/10a 이상의 질소가 흡수될 경우 질소소비량의 증가로 인한 수량 증가는 적은 반면, 환경오염문제가 발생하고 병충해, 풍수해, 도복 등으로 오히려 수량감소를 초래할 위험이 있다.

**미립단백질 함량 예측 회귀모형**

수량예측 중회귀모형과 마찬가지로 식(1)을 이용하여 단백질함량 예측 중회귀모형을 표 4와 같이 구하였다. 어느 경우나 모델의 결정계수(R<sup>2</sup>)는 0.9이상으로 매우 높게 나타났다. 백미 단백질 함량은 PNup에 대하여 어느 경우에도 2차 곡선적으로 증가하는 관계를 보였고, 유수분화기 RVIgreen이나 SPAD값과도 1차 직선 내지 2차 곡선적으로 증가하는 관계를 나타내었을 뿐만 아니라 PNup과의 상호작용관계도

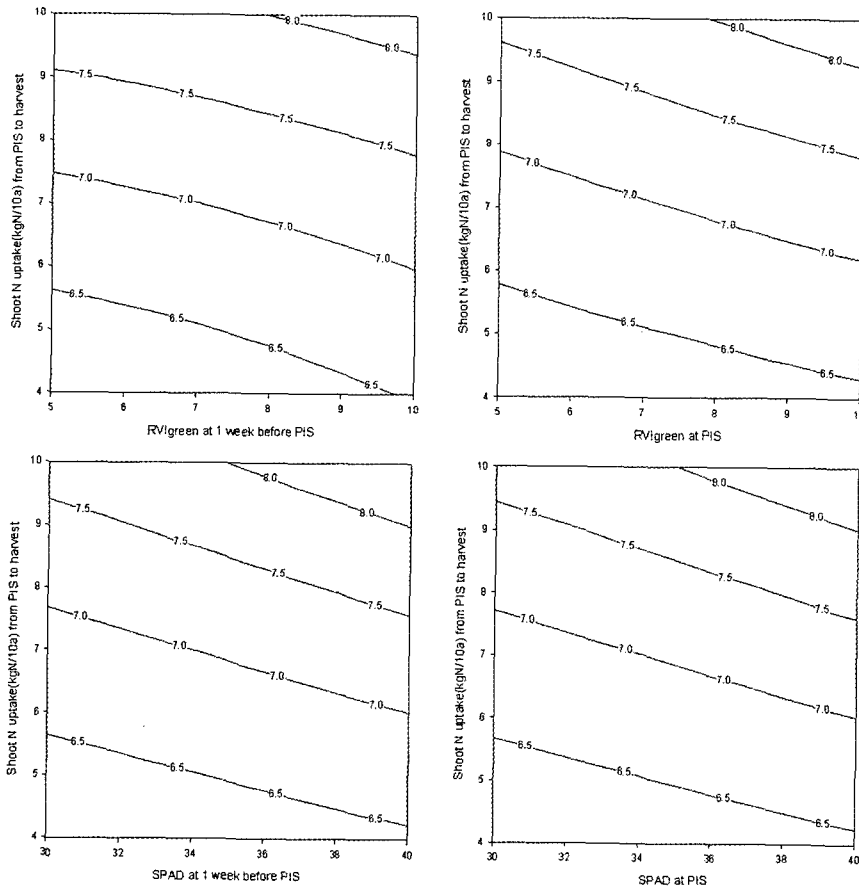
인정되었다. 즉 유수분화기 RVIgreen 또는 SPAD값이 높은 경우 단위 PNup 증가에 따른 미립 단백질함량 증가분이 커지는 관계를 나타내었다.

표 4에서 얻어진 중회귀모형을 바탕으로 등치선 반응곡선을 그림 2와 같이 나타내었다. 동일한 단백질함량을 얻기 위한 생식생장기 질소흡수 요구량은 RVIgreen값이 나 SPAD값이 클 경우 즉 유수분화기 생육량이 많거나 질소 영양상태가 좋아짐에 따라 거의 직선적으로 적어지는 경향

**Table 4.** Regression equation of milled rice protein content (%) to RVIgreen and SPAD reading at panicle initiation stage (PIS) and one week before PIS, and shoot nitrogen accumulation from PIS to harvest (PNup).

Parameters		Equation	R <sup>2</sup>
PIS	RVIgreen	$\hat{Y} = 5.439 + 0.0126 \times \text{PNup}^2 + 0.0133 \times \text{RVIg} \times \text{PNup} + 0.398 \times \text{Dummy}$	0.9202
	SPAD	$\hat{Y} = 5.342 + 0.0116 \times \text{PNup}^2 + 0.0001 \times \text{SPAD}^2 \times \text{PNup} + 0.542 \times \text{Dummy}$	0.919
1 week before PIS	RVIgreen	$\hat{Y} = 5.028 + 0.1396 \times \text{PNup} + 0.0055 \times \text{RVIg}^2 + 0.01 \times \text{PNup}^2 + 0.459 \times \text{Dummy}$	0.9219
	SPAD	$\hat{Y} = 5.328 + 0.0117 \times \text{PNup}^2 + 0.00011 \times \text{SPAD}^2 \times \text{PNup} + 0.569 \times \text{Dummy}$	0.9167

Dummy variable was set as 0 and 1 in 2001 and 2002, respectively.



**Fig. 2.** Isopleth of protein content in relation to the RVIgreen or SPAD reading at PIS and one week before PIS, and PNup. Graph was drawn from the equation in Table 4.

을 나타내었다.

국내 양질미 선별기준은 현미 단백질함량이 7~9%이고 (최, 2002), 우리나라의 평균 단백질함량이 6.8%(손 등, 2002)라고 하지만, 아직까지 고품질 쌀에 대한 백미의 단백질함량의 기준이 설정되어 있지 않다. 고품질 쌀의 단백질함량 기준을 7%이하로 가정하여 이보다 단백질함량이 낮도록 하는 유수분화기 이후의 질소 흡수 요구량을 표 4의 식으로부터 근의 공식을 이용해서 질소흡수량의 한계치를 구한 것이 표 5이다. 단백질함량을 7% 이하로 하는 PNup<sub>protein≤7%</sub>은 6~8 kg/10a로 추정되어 최대수량을 위한 생식생장기 질소흡수량(PNup<sub>Ymax</sub>) 9~13.5 kg/10a보다 크게 낮았다.

미립의 단백질함량이 7% 이하가 되기 위한 생식생장기 질소흡수량과 유수분화기 및 유수분화기 1주일전 RVIgreen 및 SPAD값과의 관계를 나타낸 것이 그림 3이다. 단백질함

량은 2001년도와 2002년도와 차이가 있어 그림 3에서는 dummy variable값을 양 년도의 평균인 0.5로 계상하였다. 그림에서 보는 바와 같이 RVIgreen이나 SPAD값이 증가함에 따라서 미립단백질을 7% 이하로 하기 위한 유수분화기 이후 질소흡수량은 직선적으로 감소하였다. 그러나 RVIgreen 또는 SPAD로 유수분화기 또는 유수분화기 1주일 전에 필요흡수량을 추정할 결과는 큰 차이가 없어서 유수분화기 1주일 전부터 유수분화기 사이의 시기에 RVIgreen이나 SPAD 측정값을 이용하여도 무방할 것으로 판단되었다.

**질소수비량 결정**

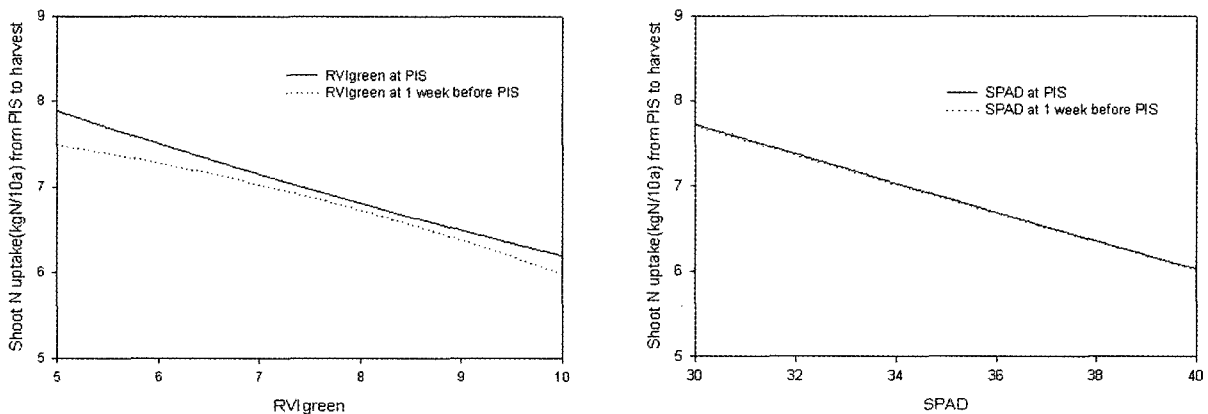
위의 표 2~5에서 얻어진 수량 및 단백질 반응회귀식으로부터 목표 수량 또는 목표 단백질함량을 얻기 위한 생식생장기 질소 흡수 요구량(각각 PNup<sub>yield</sub>, PNup<sub>protein</sub>)을 추정할 수 있다. 그러나 이 두 가지를 동시에 충족할 수

**Table 5.** The estimated requirement (PNup<sub>protein≤7%</sub>) of shoot nitrogen accumulation from PIS to harvest for the milled-rice protein content of below 7%.

Stage	Parameters	PNup <sub>protein≤7%</sub> <sup>†</sup>
PIS	RVIgreen	$\hat{Y} = \frac{-0.0133 \times RVIg + \sqrt{(0.0133 \times RVIg)^2 - 4 \times 0.0126 \times (5.493 + 0.398 \times D - 7)}}{2 \times 0.0126}$
	SPAD	$\hat{Y} = \frac{-0.0001 \times SPAD^2 + \sqrt{(0.0001 \times SPAD)^2 - 4 \times 0.0116 \times (5.342 + 0.542 \times D - 7)}}{2 \times 0.0116}$
One week before PIS	RVIgreen	$\hat{Y} = \frac{-0.1396 + \sqrt{0.1396^2 - 4 \times 0.01 \times (5.028 + 0.0055 \times RVIg^2 + 0.459 \times D - 7)}}{2 \times 0.01}$
	SPAD	$\hat{Y} = \frac{-0.0001 \times SPAD^2 + \sqrt{(0.0001 \times SPAD)^2 - 4 \times 0.0117 \times (5.328 + 0.569 \times D - 7)}}{2 \times 0.0117}$

D means dummy variable that was set as 0 and 1 in 2001 and 2002, respectively.

<sup>†</sup>PNup<sub>protein≤7%</sub> was obtained from the equations in Table 4.



**Fig. 3.** Relationship between shoot N uptake and RVIgreen or SPAD reading at PIS and one week before PIS. Graphs were drawn from the equations in Table 5.

없고 이 두 가지 중 작은 쪽을 택하여 질소 수비량 결정을 위한 생식생장기의 지상부 질소 축적 요구량(PNup\_req)으로 하여야 할 것이다(식 2). 본 연구결과 수량을 최대로 하는 질소흡수량은 9~13.5 kg/10a로, 미립의 단백질함량을 7% 이하로 하는 질소흡수량은 6~8 g/10a로 추정되어 고품질 쌀 생산을 위한 결정시에는 수량보다도 미립의 단백질 함량을 고려해야 되는 것으로 나타났다.

$$PNup\_req = \text{Min} \{PNup\_yield, PN\_protein\} \quad \text{식(2)}$$

이와 같은 과정을 거쳐 유수분화기 또는 그 1주일전에 측정된 RVIgreen 또는 SPAD 값, 목표 수량, 목표 단백질 함량으로부터 유수분화기 이후의 질소축 요구량(PNup\_req)을 결정할 수 있다. 수비의 실제 시비량 (Panicle N)을 결정하는 이론적인 방법은 작물이 흡수한 비료성분의 총량에서 천연적으로 공급된 양을 제외하고, 이를 다시 비료성분의 흡수율(회수율)로 나누어서 계산하는 방식이다(식 3).

$$Panicle\ N \ (kg/10a) = \frac{PNup\_req - \text{Natural supply of N from PIS to harvest}}{\text{Recovery efficiency of panicle N}} \quad \text{식(3)}$$

시비질소회수율은 이앙재배에서 전 생육기간으로 보면 평균 20~40%로 알려져 있으며(De Datta, 1986), 유수형성이 가장 높고, 감수분열기, 분열기, 출수기, 기비 순이라고 한다(조 등, 1995). 본 실험에서의 시비 질소의 회수율은 표 6, 7과 같다. 전반적으로 볼 때, 기비 + 분얼비의 회수율은 2001년이 약 40%, 2002년이 약 34%였는데, 이는 양 년도의 시비량이 다르고 또한 2001년의 경우 T6 이후는 분얼비를 2-3회로 나누어 주었기 때문이다. 동일한 질소 시비 수준에서는 연차 간에 회수율의 차이는 크지 않았다. 기비 + 분얼비의 회수율은 시비수준이 증가할수록 회수율은 감소하는 경향이였다. 평균적인 수비의 회수율은 2001년도가

**Table 6.** Recovery of urea N applied at transplanting, tillering and panicle initiation stage in 2001.

	Basal+tillering N		Panicle N recovery (%)						Total N recovery (%)					
	Level (kg/10a)	Recovery (%)	0	1.8	3.6	5.4	7.2 <sup>†</sup>	Mean	0	1.8	3.6	5.4	7.2 <sup>†</sup>	Mean
T1	0	-	-	53.2	70.4	63.1	54.4	60.3	-	53.2	70.4	63.1	54.4	60.3
T2	2.1	68.3	-	52.5	79.2	65.4	63.8	65.2	68.3	61.0	75.2	66.2	64.8	67.1
T3	4.2	39.8	-	76.3	84.1	78.6	70.0	77.3	39.8	50.8	60.3	61.6	58.9	54.3
T4	6.3	32.6	-	60.8	74.9	63.4	76.7	69.0	32.6	38.9	48.0	46.8	56.1	44.5
T5	8.4	32.7	-	74.0	73.9	77.3	75.4	75.2	32.7	40.0	45.0	50.1	52.4	44.0
T6	10.5	42.2	-	76.5	69.0	65.2	56.6	66.8	42.2	47.2	49.0	49.0	48	47.1
T7	12.6	39.5	-	64.9	64.4	73.2	74.2	69.2	39.5	42.7	45.0	49.6	52.1	45.8
T8	16.8	34.2	-	73	70.7	75.1	63.7	70.6	34.2	37.9	40.6	44.2	43.0	40.0
T9	21.0	29.5	-	71.6	65.2	74.7	78.1	72.4	29.5	32.8	34.7	38.7	41.9	35.5
Mean		39.9		67.0	72.4	70.7	68.1	69.6	39.9	44.9	52.0	52.1	52.4	48.7

<sup>†</sup> : panicle N levels (kg/10a)

**Table 7.** Recovery of urea N applied at transplanting, tillering and panicle initiation stage in 2002.

	Basal+tillering N		Panicle N recovery (%)							Total N recovery (%)						
	Level (kg/10a)	Recovery (%)	0	1.8	3.6	5.4	7.2	10.8 <sup>†</sup>	Mean	0	1.8	3.6	5.4	7.2	10.8 <sup>†</sup>	Mean
T1	0	-	-	70.3	65.1	60.4	65.4	52.9	62.8	-	84.2	72	65	68.9	55.2	69.1
T2	4.8	39.2	-	57.1	53.2	62.6	65.0	55.1	58.6	44.4	47.9	48.2	54	56.8	51.8	50.5
T3	6.6	31.4	-	65.9	56.2	73.0	58.8	56.1	62.0	35.1	41.7	42.6	52.2	47.5	48.2	44.6
T4	8.4	35.9	-	77.1	75.5	65.6	72.1	56.6	69.4	38.9	45.6	49.9	49.3	54.2	48.8	47.8
T5	10.2	31.9	-	64.7	64.9	74.9	72.5	56.3	66.7	34.3	38.9	42.3	48.4	50.1	45.6	43.3
T6	12	31.7	-	78.7	72.1	84.2	83.1	73.2	78.3	33.7	39.8	42.6	49.4	52.2	52.4	45.0
Mean		34.0		69.0	64.5	70.1	69.5	58.4	66.3	37.3	49.7	49.6	53.1	55.0	50.3	50.5

<sup>†</sup> : panicle N levels (kg/10a)

약 70%, 2002년도가 약 66%였으며, 영양생장기에 시비수준을 증가하여 생육을 많이 확보한 시비처리구일수록 수비의 회수율은 높아지는 경향이었으며, 동일한 영양생장이 이루어진 처리구에서는 수비 시비수준이 증가할수록 회수율이 감소하는 경향이였다.

2001년과 2002년에 강우, 관개, 토양 지력질소 등으로부터 천연적으로 공급된 질소량은 표 8과 같다. 영양생장기에 천연적으로 공급된 질소량은 2001년이 2.79 kgN/10a, 2002년이 2.86 kg/10a로 연차간에 차이가 없었다. 유수분화기 이후 천연공급 질소량은 2001년이 평균 4.1 kg/10a로 2002년의 평균 3.13 kg/10a보다 많았다. 그러나 분얼비를 1회만 사용한 2001년의 T1~T5의 평균은 3.65 kg/10a이고, 이에 상응한 양의 기비 + 분얼비를 사용한 2002년의 T1-T4의 평균은 3.4 kg/10a로 연차간에 그 차이가 크지 않았다. 전 생육기간으로 보면 2001년이 평균 6.9 kg/10a, 2002년이 평균 5.95 kg/10a였는데, 기존에 보고된 우리나라의 천연공급량 4.2~7.0 kg/10a(농촌진흥청, 1993) 범위에 속하였다. Schnier 등(1990)도 벼의 전 생육기간 동안 천연공급 질소량은 5~7 kg/10a라고 보고하였다.

위에서 살펴본 바와 같이 유수분화기 이후 지상부 질소 축적량(PNup)은 수비를 주기 직전의 생육 및 영양 상태와 시비량에 따라서 달라진다. PNup을 추정하기 위하여 수비 질소 시비량과 유수분화기 RVIgreen, SPAD값, 건물중, 지상부 질소함량 등 생육 및 질소영양 추정 변수들 및 이들의 2차 제곱 항 등을 추정변수로 하여 단계별 회귀(stepwise regression)에 의하여 모델을 작성한 것이 표 9이다. 단계별 회귀 모델의 변수 도입(entry) 및 유지(stay)의 유의 수준은 모두 5%로 하였다. 수비 질소 시비량과 유수 분화기 지상부 건물중 또는 질소함량을 변수로 한 모델은 결정 계수가 모두 0.94 이상으로 적합도가 매우 높았다. 그러나 유수분화기 생장 및 질소 영양 상태의 직접 측정치 대신에 간접 추정치인 RVIgreen이나 SPAD값을 모델의 변수로 이용한 경우는 결정계수가 다소 낮아졌으며, SPAD값의 경우에는 모델의 변수로 채택이 되지 않았다. 이는 RVIgreen의 경우 생육 및 질소영양상태의 간접 지표이기는 하나 추정의 정확도가 다소 떨어지기 때문이며 SPAD값의 경우는 생육상태를 대표할 수 없을 뿐만 아니라 질소 영양 상태와도 연차, 측정 시기 등에 따라 일정한 관계를 나타내지 않기 때문인

**Table 8.** Natural N supply from transplanting to panicle initiation stage (PIS) and from PIS to harvest in 2001 and 2002.

2001	Natural N supply (kg/10a)			2002	Natural N supply (kg/10a)		
	T.P.~PIS	PIS~harvest	T.P.~harvest		T.P.~PIS	PIS~harvest	T.P.~harvest
T1	2.79	3.36	6.15	T1	2.86	3.05	5.91
T2	"	4.02	6.81	T2	"	3.67	6.53
T3	"	3.61	6.40	T3	"	3.28	6.14
T4	"	3.69	6.48	T4	"	3.60	6.46
T5	"	3.59	6.38	T5	"	2.80	5.66
T6	"	4.90	7.69	T6	"	2.19	5.05
T7	"	4.79	7.58				
T8	"	4.83	7.62				
T9	"	4.22	7.02				
Mean	2.79	4.11	6.90		2.86	3.09	5.95

T.P. : transplanting

**Table 9.** Regression models to predict the shoot nitrogen accumulation (PNup, kg/10a) from panicle initiation to harvest.

Models	R-square
$PNup = 3.61 + 0.84Npi - 0.0249Npi^2$	0.856
$PNup = 4.190 - 0.01RVIgreen^2 + 0.82Npi - 0.022Npi^2$	0.871
$PNup = -1.67 + 2.41NDp - 0.026NDp^2 + 0.83Npi - 0.022Npi^2$	0.944
$PNup = -5.69 + 0.074DWp - 0.00014DWp^2 + 0.83Npi - 0.021Npi^2$	0.948

Npi (kg/10a) : nitrogen rate applied at panicle initiation stage (PIS), RVIgreen : green ratio vegetation index at PIS, NDp (kg/10a) : shoot nitrogen content at PIS (kg/10a), DWp (g/m<sup>2</sup>) : shoot dry weight at PIS



것으로 판단된다(김 등, 2005). 표 9의 모델로부터 판단해 보면 수비로 시용한 질소의 최대 회수율은 약 83%이며 시비량이 1 kg/10a씩 증가함에 따라서 회수율은 약 4.4%씩 저하되고, 유수분화기 이후 천연질소 공급량은 유수분화기 생육 및 질소 영양 상태에 따라서 2.5~4.0 kg/10a이고 평균 3.4 kg/10a 정도인 것으로 판단된다. 그러나 이와 같은 추정치는 토양 상태에 따라서 변할 수 있기 때문에 보다 광범위한 토양 조건에서 질소의 천연공급량을 추정할 수 있는 모델을 구축할 필요가 있다.

이상의 결과를 종합하여 보면 유수분화기 1주일전과 유수분화기 RVIgreen과 SPAD값과 생식생장기 지상부 질소 축적량을 이용한 수량 및 단백질함량 반응 모델 및 유수분화기 이후 지상부 질소 축적량 예측 모델들은 모두 높은 적합도를 보여 수비량 결정에 이용이 가능할 것으로 판단되나, 이 모델 들이 보다 범용적으로 활용될 수 있기 위해서는 보다 다양한 토양 및 기상 조건에서 모델을 검증하고 보완할 필요가 있는 것으로 사료된다.

## 적 요

목표 수량과 단백질함량을 얻기 위한 질소 수비처방을 위해서는 유수형성기 전후 생체정보의 정확한 진단뿐만 아니라 유수형성기 이후 작물의 질소 축적 및 이에 따른 수량 및 미립 단백질 함량 반응이 정량화 되어야 한다. 본 연구에서는 유수분화기 생육 및 질소영양상태를 잘 대표하는 RVIgreen과 현재 널리 이용되고 있는 SPAD값의 유수분화기와 유수분화기 1주일전의 측정치 및 유수분화기부터 수확기까지 즉 생식생장기 지상부 질소 축적량(PNup)을 변수로 하는 수량 및 단백질함량 예측 중회귀 모델과 PNup 예측 회귀모델을 작성하여 이들의 수비 처방에의 이용 가능성을 검토하였다.

1. 유수분화기 및 유수분화기 1주일전의 RVIgreen과 SPAD값, 그리고 PNup을 이용하여 얻은 수량과 단백질함량의 중회귀모형은 어느 경우에도 모델의 결정계수( $R^2$ )가 0.9 이상으로 매우 높았다.

2. 수량을 최대로 하는 생식생장기 질소흡수량(PNup)은 유수형성기 전후 RVIgreen이 증가할수록 감소하는 경향을 보였는데 본 연구의 유수형성기 전후 RVIgreen 범위로 보면 9~13.5 kg/10a 으로 추정되었다. 또한 PNup은 유수형성기 전후 SPAD값과는 무관하게 10~11 kg/10a 범위로 나타났다.

3. 미립의 단백질함량을 7% 이하로 하는 유수형성기 질소흡수량은 유수형성기 전후 RVIgreen과 SPAD값이 증가할수록 감소하는 경향으로 어느 경우에도 6~8 kg/10a로 추정되어 최대수량을 위한 생식생장기 질소흡수량 9~13.5 kg/10a보다 크게 낮았다. 따라서 고품질 쌀 생산을 위한 수비 처방을 위해서는 수량보다도 단백질함량을 기준으로 하여 처방하여야 할 것으로 판단되었다.

4. 본 실험결과 수비질소의 회수율은 53~83%의 변이를 보였는데, 생식생장기 생육량이 많을 수록 회수율이 증가하는 경향이었으며, 수비 시용량이 증가함에 따라서 감소하였다. 생식생장기 천연질소공급량은 3~4 kg/10a 범위였으며 유수분화기 생육량이 많을 경우 증가하는 경향이였다. 수비 질소시비량 및 유수분화기 생육 및 질소 영양 지표들을 예측변수로 하는 PNup 예측모델을 작성하였으며 이 모델들은 적합도가 매우 높았다.

5. 영양생장기 생육 및 질소영양 상태의 비파괴적 측정치를 이용하여 목표 수량과 단백질함량에 달할 수 있도록 수비질소 시용량을 결정할 수 있을 것으로 판단되었다. 그러나 여기서 제시한 모델들이 광범위한 조건에서 이용될 수 있기 위해서는 보다 다양한 품종, 토양, 기상 조건에서 모델의 검증과 보완이 되어야 할 것으로 판단된다.

## 사 사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-4301)의 지원으로 수행되었습니다.

## 인용문헌

- Cassman, K.G., M.J. Kropff, J. Gaunt, and S. Peng. 1993. Nitrogen use efficiency of rice reconsidered: What are the key constraints. *Plant and Soil*. 156 : 359-362.
- 최해춘. 2002. 쌀 품질 고급화 및 고 부가가치화를 위한 육종현황과 전망. *한국작물학회지* 47(S) : 15-32.
- De Datta, S.K. 1986. Improving nitrogen fertilizer efficiency in lowland rice in tropical Asia. *Fertilizer research*. 9 : 171-186.
- Gomez, K.A. and S.K. De Datta. 1975. Influence of environment on protein content in rice. *Agronomy Journal* 67 : 565-568.
- Guindo, D., B.R. Wells, and R.J. Norman. 1994. Cultivar and nitrogen rate influence on nitrogen uptake and partitioning in rice. *Soil Science Society of American Journal* 58 : 840-845.

- Heu, M.H., C.Y. Lee, J.Y. Choe, and S.I. Kim. 1969. Variability of protein content in rice grown at several different environments. *Korean Journal of Crop Science* 7 : 79-84.
- 허문희, 김광호, 서학수. 1974. 수도 고단백 계통육성을 위한 기초적 연구 : III. 질소, 인산, 가리의 시용이 미립내 단백질 함량에 미치는 영향. *한국작물학회* 15 : 123-128.
- Hinzman, L.D., M.E. Bauer, and C.S.T. Daughtry. 1986. Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat. *Remote Sensing of Environment* 19 : 47-61.
- Islam, N., S. Inanaga, N. Chishaki, and T. Horiguchi. 1996. Effect of N top-dressing on protein content in Japonica and Indica rice grains. *Cereal Chemistry*. 42 : 225-235.
- 김민호, 신진철, 이변우. 2005. 식생지수와 SPAD를 이용한 벼 생육 및 질소영양상태의 비파괴적 진단 가능성 검토. *한국작물학회* 50(6) : 369-377.
- 김민호. 2004. 벼 유수분화기 질소영양 및 생육상태의 비파괴적 진단에 의한 질소 수비량 결정에 관한 연구. 서울대학교 박사학위논문.
- Kropff, M.J., K.G. Cassman, H.H. Vanlaar, and S. Peng. 1993. Nitrogen and yield potential of irrigated rice. *Plant and Soil*. 156 : 391-394.
- Mae, T. and K. Ohira. 1981. The remobilization of nitrogen related to leaf growth and senescence in rice plants. *Plant Cell Physiology*. 22 : 1067-1074.
- Muchow, R.C. and T.R. Sinclair. 1995. Effect of nitrogen supply on maize yield : II. Field and model analysis. *Agronomy Journal* 87 : 642-648.
- 농촌진흥청. 1993. 벼 직파재배기술.
- 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., F.V. Garcia, R.C. Laza, A.L. Sanico, M.I. Samson, R.M. Visperas, and K.G. Cassman. 1996. Nitrogen use efficiency of irrigated tropical rice established by broadcast wet seeding and transplanting. *Fertilizer Research*. 45 : 123-134.
- Perez, C.M., B.O. Juliano, S.P. Liboon, J.M. Alcantara, and K.G. Cassman. 1996. Effects of late nitrogen fertilizer application on head rice yield, protein content, and grain quality of rice. *Cereal Chemistry*. 73 : 556-560.
- 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.
- Schneider, K. 2003. Assimilating remote sensing data into a land-surface process model. *International Journal of Remote Sensing* 24 : 2959-2980
- Schnier, H.F., M. Dingkuhn, S.K. De Datta, K. Mengel, and J.E. Faronilo. 1990. Nitrogen fertilization of direct-seeded flooded vs. transplanted rice: I. Nitrogen uptake, photosynthesis, growth, and yield. *Crop Science* 30 : 1276-1284.
- Sinclair, T.R. and R.C. Muchow. 1995. Effect of nitrogen supply on maize yield: I. Modeling physiological responses. *Agronomy Journal* 87 : 632-641.
- 손종록, 김재현, 이정일, 윤영환, 김제규, 황홍구, 문현팔. 2002. 쌀의 품질평가 현황과 금후 연구방향. *한국작물학회지* 47(S) : 33-54.
- Zhai, C.K., C.M. Lu, X.Q. Zhang, G.J. Sun, and K.J. Lorenz. 2001. Comparative study on nutritional value of Chinese and North American wild rice. *Journal of Food Composition and Analysis* 14 : 371-382.