

## 등숙기 온도 및 일사량과 생육형질을 이용한 벼 종실중 및 종실질소함량 추정

이충근\* · 김준환\* · 손지영\* · 윤영환\* · 서종호\* · 권영업\* · 신진철\* · 이변우\*\*†

\*국립식량과학원, \*\*서울대학교 농업생명과학대학

## Estimating Grain Weight and Grain Nitrogen Content with Temperature, Solar Radiation and Growth Traits During Grain-Filling Period in Rice

Chung-Kuen Lee\*, Jun Hwan Kim\*, Ji-Young Son\*, Young-Hwan Yoon\*, Jong-Ho Seo\*, Young-Up Kwon\*, Jin-Chul Shin\*, and Byun-Woo Lee\*\*†

\*National Institute of Crop Science, RDA, Suwon 441-857, Korea

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

**ABSTRACT** This experiment was conducted to construct process models to estimate grain weight (GW) and grain nitrogen content (GN) in rice. A model was developed to describe the dynamic pattern of GW and GN during grain-filling period considering their relationships with temperature, solar radiation and growth traits such as LAI, shoot dry-weight, shoot nitrogen content, grain number during grain filling. Firstly, maximum grain weight (GWmax) and maximum grain nitrogen content (GNmax) equation was formulated in relation to Accumulated effective temperature (AET) × Accumulated radiation (AR) using boundary line analysis. Secondly, GW and GN equation were created by relating the difference between GW and GWmax and the difference between GN and GNmax, respectively, with growth traits. Considering the statistics such as coefficient of determination and relative root mean square of error and number of predictor variables, appropriate models for GW and GN were selected. Model for GW includes GWmax determined by AET × AR, shoot dry weight and grain number per unit land area as predictor variables while model for GN includes GNmax determined by AET × AR, shoot N content and grain number per unit land area. These models could explain the variations of GW and GN caused not only by variations of temperature and solar radiation but also by variations of growth traits due to different sowing date, nitrogen fertilization amount and row spacing with relatively high accuracy.

**Keywords** : rice, temperature, radiation, sink, source, grain weight, grain nitrogen content, simulation

**많은** 생물학적 생장은 sigmoid형을 보이는데, 등숙일수에 따른 종실중의 증가는 이러한 sigmoid형을 보이는 대표적인 예이다(Daroch & Baker, 1990). Sigmoid 생장은 처음에는 성장 지체기(lag phase) 또는 지수적 성장기(exponential phase)로 시작해서 직선적 성장기(linear phase)를 거쳐 최종적으로는 성장정체기(leveling-off phase)의 양상을 보인다. 많은 모델에서 종실중 증가를 온도 스트레스에 의하여 수정된 linear phase의 기울기로써 표현하였는데, 이러한 접근방법은 Weir *et al.*(1984)과 Ritchie & Otter(1985)의 밀 생육모델에서 사용되어 왔다. 종실중은 또한 sink와 source의 개념에 의하여 시뮬레이션 되어왔다(Weiss & Moreno-Sotomayer, 2006). Bingham(1967)은 종실중의 증가가 여러 추파밀 품종에서 영화수의 감소와 관련되어 있음을 보여주었으며, 수수에서도 일반적으로 영화수가 감소하면 종실중이 증가한다고 하였다(Ogunlela & Eastin, 1984; Saeed *et al.*, 1986).

질소동태와 관련된 기존 작물 생육모델에서는 식물체에 의한 질소 흡수량은 식물체의 질소요구도와 토양 질소함량 등과 같은 질소 가용성에 제한되며(van Keulen & Seligman, 1987), 식물체의 질소요구도는 식물체에서 발생학적인 최대, 최적 및 최소 질소농도와 그 시기의 생육량에 의해 결정되는 것으로 추정하였다(Gregory *et al.*, 1979). Greartre *et al.*(2003)은 질소 전류의 source-sink 조절에 근거하여 종실 질소 축적을 모델링하기 위하여 종실수량 전체 또는 이삭을

†Corresponding author: (Phone) +82-02-880-4544

(E-mail) leebw@snu.ac.kr < Received January 12, 2010 >

이용하는 것이 아니라 1립을 이용하는 접근 방법을 시도하였으나, 그들의 연구는 종실 질소의 구성성분에 집중되었다. 현재 비교적 널리 이용되고 있는 CERES-Rice와 ORYZA2000과 같은 벼 생육 모델의 경우, 종실에서 질소 농도와 단백질 형성은 대개 질소수확지수(NHI) 개념을 적용하여 식물체에 축적된 최종 질소함량 중 종실에 배분되는 질소의 비율을 계산하여 결정된다(Ritchie *et al.*, 1985; van Keulen & Seligman, 1987; Porter, 1993; Asseng *et al.*, 2002; McCAsn *et al.*, 1996, Bouman & van Laar, 2006). 이 접근 방법은 종실에서 건물과 질소의 축적과 배분에 근거하여 종실질소함량을 어느 정도 예측할 수는 있지만, 종실질소함량의 형성과정을 설명할 수 없으며, 출수전 질소축적 및 질소의 전류와 출수 후 뿌리로부터의 질소흡수 간 상호작용을 간과하고 있다. Zhu *et al.*(2007)은 이를 고려하여 벼 종실질소함량 추정모델을 만들었으나 실제로 이용하는 데 한계가 있는 것으로 판단되었다.

따라서 본 연구에서는 등숙기간 중 종실중 및 종실질소함량의 형성과정을 수식화하는 모형을 구축하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 실험자료

본 연구는 이 등(2009b)의 2007년 실험결과와 2007년도 기상자료를 이용하여 등숙기 온도 및 일사량과 생육형질에 의한 종실중 및 종실질소함량 추정모델을 구축하고자 하였다. 기상자료는 수원기상대의 평균온도와 일사량 자료를 이용하였다. 이 등(2009b)의 2007년도 실험방법은 다음과 같다. 일품벼를 시험품종으로 하였으며, 4월 10일, 4월 25일, 5월 10일에 각각 파종하여 30일 육묘 후 5월 10일, 5월 25일, 6월 9일에 각각 이앙하였다. 질소시비량은 ha당 0 kg, 90 kg, 180 kg으로 하였으며, 기비, 분얼비, 수비로 각각 50, 30, 20% 분시하였다. 인산은 45 kg을 전량 기비로, 칼륨은 57 kg을 기비와 수비로 각각 70%와 30% 분시하였다. 재식밀도는 질소 0 kg/ha 처리에서는 30×7, 30×14 cm를, 90 kg/ha 처리에서는 30×7, 30×14, 30×28 cm, 180 kg/10a 처리에서는 30×14, 30×2 8 cm 재식밀도 처리를 두었으며, 또한 출수기에 0 kg/ha 처리에서는 30×7 cm구, 90 kg/ha 처리에서는 30×7와 30×14 cm구, 180 kg/ha 처리에서는 30×14 cm구 중 일부를 속아내어 재식밀도를 1/2로 조정하였다. 유수분화기와 출수기, 출수 후 10일 간격으로 50일까지 각 처리별로 식물체를 채취하였으며, 이들로부터 엽면적, 각 부위별 건물중 및 질소함량을 조사하였다. 엽면적은 Li-3100(Licor)을 이용하여 조사하였고, 건물중은 70℃의

건조기에서 7일 이상 충분히 말린 후 조사하였으며, 질소는 건물중 조사시료를 40 mesh로 분쇄한 후 CNS2000(LECO)을 이용하여 측정하였다. 본 연구에서 종실중과 종실질소함량은 쌀 품질을 제대로 반영하기 위하여 단위면적당이 아니라 1립의 단위를 사용하였다.

### 분석방법

앞서 언급한 실험자료를 이용하여 등숙기 기상요인(온도 및 일사량)과 생육형질에 의한 벼 종실중 및 종실질소함량 추정모델을 개발하기 위해 여러 가지 분석방법을 이용하였는데, 먼저 최대경계선 분석법(김 등, 2001)을 이용하여 기상요인과 종실중 및 종실질소함량과의 관계를 분석하였으며, stepwise 다중직선회귀분석(REG procedure, SAS institute) 방법으로 등숙기 생육형질과 종실중 및 종실질소함량과의 관계를 분석하였다. 또한 이들 관계를 종합적으로 연결하여 종실중 및 종실질소함량 추정식을 만들기 위하여 다중비선형회귀분석(NLIN procedure, SAS institute) 방법을 이용하였다. 이 방법에 의해 얻어진 종실중 및 종실질소함량 모델 중 최적모델 결정을 위한 통계량으로 결정계수( $R^2$ ) 및 상대 오차평균평방근(RMSE, relative root mean square of error)을 사용하였다(Michele *et al.*, 2003; Wallach & Goffinet, 1987).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}}$$

여기에서,  $P_i$ 는 추정값을  $O_i$ 는 실측값을  $\bar{O}$ 는 실측값의 평균을 의미한다. RMSE는 실측값과 추정값과의 상대적 차이를 측정하며, 10%이하의 값은 매우 좋은, 10~20%는 좋은, 20~30%는 보통, 30% 이상은 불량한 모델로 간주될 수 있다고 한다(Jamieson *et al.*, 1998).

## 결과 및 고찰

### 등숙기 기상(온도 및 일사량)과 생육형질 변이

유효적산온도(accumulated effective temperature, AET)와 적산일사량(accumulated radiation, AR)은 파종기에 따른 출수기 차이에 의하여 등숙기간 중 다양한 변이가 형성되었는데, 등숙기간 중 AET와 AR은 파종기가 빠를수록 모두 큰 경향이였다(그림 1). 출수기는 4월 10일 파종기에서는 8월 17일, 4월 25일 파종기에서는 8월 20일, 5월 10일 파종기에서는 8월 25일 이었다.

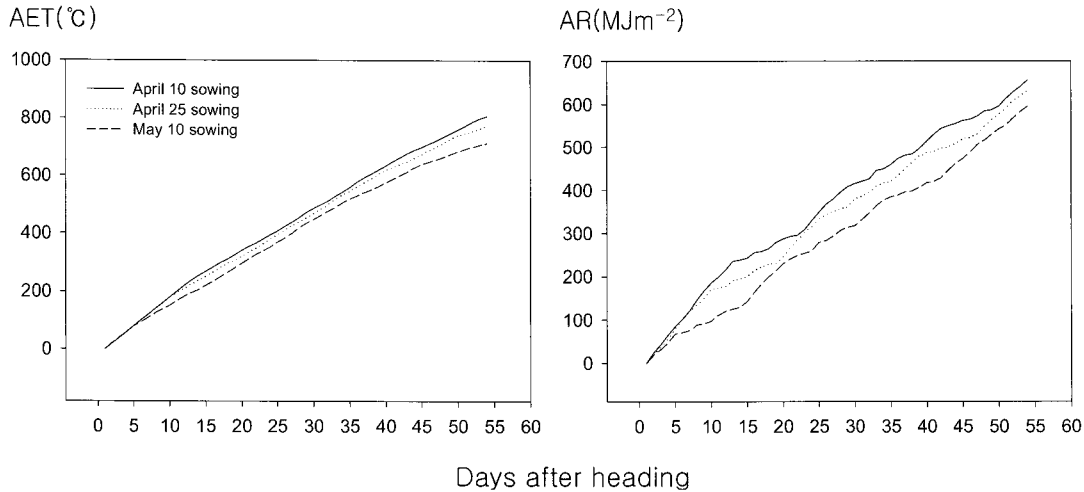


Fig. 1. Changes of AET and AR during grain filling period of a rice cultivar “Ilpumbyeo” sown at different sowing dates.

Table 1. Leaf area index, shoot dry weight, shoot N content at heading, grain number, grain weight, grain N content at harvest of rice sown at different dates, transplanted with different row spacings and fertilized with three N levels.

Variable	Minimum	Maximum	Average	CV <sup>‡</sup> (%)	n <sup>‡</sup>
Leaf area index at heading (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	1.15	6.42	3.69	45.19	33
Shoot dry-weight (g/m <sup>2</sup> )	279.49	944.57	612.44	35.68	33
Shoot N content (g/m <sup>2</sup> )	2.36	13.98	7.82	45.64	33
Grain number(No./m <sup>2</sup> )	9981.08	42627.86	26122.50	39.67	33
Grain weight (mg/grain)	17.72	26.30	21.81	8.99	33
Grain N content (mg N/grain)	0.2212	0.2776	0.2511	5.80	33

<sup>‡</sup>CV : coefficient of variation

<sup>‡</sup>n : number of data used for statistic analysis

다양한 크기의 sink와 source를 얻기 위하여 파종기, 질 소소비량 및 이앙시 재식밀도를 달리하였을 뿐만 아니라 출수직후 솟아내기에 의해 재식밀도를 조정하였다. 출수기의 엽면적지수는 1.2~6.4, 지상부 총건물중은 279.5~944.6 g m<sup>2</sup>, 종실소함량은 2.4~14.0 g m<sup>2</sup>, 영화수는 m<sup>2</sup>당 9881~42628개의 변이를 보여 모델의 독립변수가 다양한 값을 나타나게 되었으며, 또한 모델의 종속변수인 종실중은 17.7~26.3 mg/grain, 종실질소함량은 0.22~0.28 mg/grain의 범위로 폭넓은 변이를 보였다(표 1).

**최대경계선을 이용한 최대 종실중(GWmax) 및 최대 종실 질소함량(GNmax) 추정식**

이 등(2009a)에 따르면 종실중과 종실질소함량은 AET와 AR의 상승적에 의하여 잘 설명되었으며, 이것은 AET가 등속기 생육온도에 의한 변이를, AR이 등속기 일사량에 의한 변이를 잘 설명할 수 있기 때문이라고 하였다. 그러나 동일한 기상조건에서도 상당한 변이가 있었는데, 이것은 이 등

(2009b)이 검토한 바와 같이 등속기 생육형질의 차이에 의해서 발생하는 것으로 판단되었다(그림 2).

특정 자료집합에서 원인과 결과사이에 존재하는 두 변수(독립변수 X, 종속변수 Y)의 관계를 표현할 때, Y가 X에 의하여 영향을 받으면서도 X 이외의 다른 변수들이 고정되어 있지 않을 경우 X에 대한 Y의 반응을 명확하게 해석할 수 없는데, 이 경우 X에 따른 Y의 최대값은 X이외의 다른 변수가 제한인자로 작용하지 않는 조건, 즉 최적 조건에서의 X에 대한 Y의 반응을 나타내는 것으로서 이 최대값을 연결한 함수식을 최대경계선이라 한다(김 등, 2001). Webb(1972)에 의하여 최초로 생물학적 자료 분석에 최대경계선 분석법이 도입된 후, 주로 토양 양분 균형의 최적모형을 구하거나 식물의 성장모형에서 양분의 최적점을 찾는 데 주로 이용되었다(Moller-Nelsen *et al.*, 1976; Walworth *et al.*, 1986). 김 등(2001)은 농업분야와 같이 통제할 수 없는 변수가 많은 경우 최대경계선 분석법이 효율적이라고 하였으며, 작물의 기상반응을 이용한 벼 생육 및 수량예측에

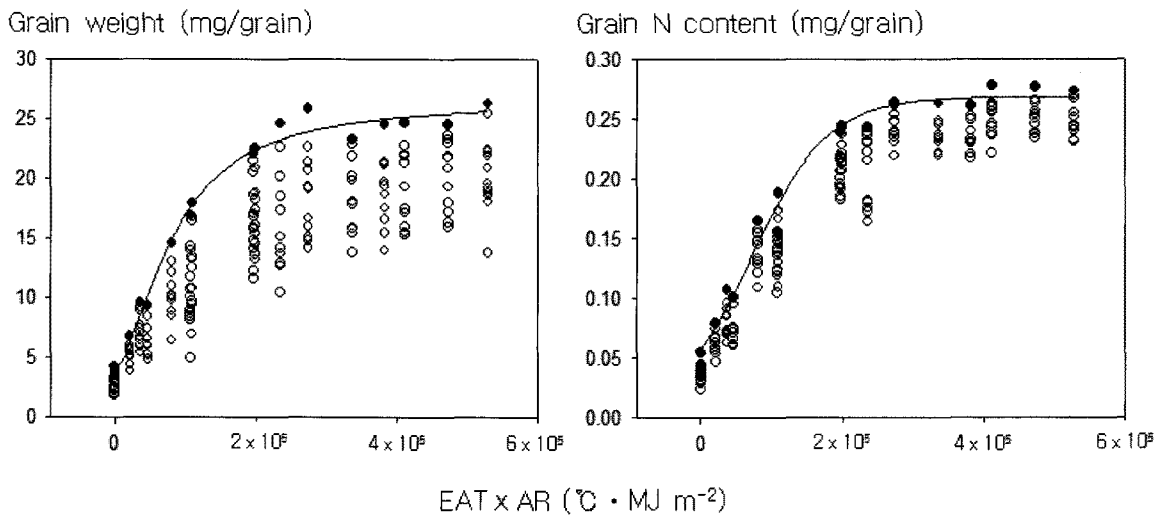


Fig. 2. Scattergram and boundary line of grain weight (left) and grain N content (right) in relation to AET multiplied by AR under different sowing dates, N fertilization rates, and row spacings during grain-filling.

Table 2. Parameter estimates for logistic functions relating GWmax and GNmax to AET multiplied by AR.

Y	Parameter estimates				R <sup>2</sup>
	a	b	x0	y0	
GWmax	22.348(1.059)	-1.730(0.207)	84888.81(6401.51)	4.2084(0.524)	0.990
GNmax	0.249(0.015)	-1.495(0.196)	97541.11(9991.49)	0.0493(0.006)	0.989

Logistic function [Y = a/(1+(EAT×AR/x0)<sup>b</sup>+y0)]

The values in parenthesis are standard error of parameter estimates.

최대경계선 분석법을 이용하였다. 본 연구에서는 각각의 샘플 시기별로 여러 처리 중 종실중과 종실질소함량이 최대인 값을 선정한 후 logistic 함수를 이용하여 최대경계선을 그렸는데, 여기에서 최대경계선은 등숙기 생육형질이 최적일 때의 기상(유효적산온도와 적산일사량) 조건과 종실중 및 종실질소함량의 관계를 각각 나타낸 것이며(그림 2), 기상 조건에 따른 최대 종실중(GWmax)과 최대 종실질소함량(GNmax) 추정식은 표 2와 같다.

**등숙기 생육형질을 이용한 종실중 및 종실질소함량 추정식**

등숙기의 기온과 일사량에 의하여 결정되는 GWmax 및 GNmax와 실측치 간의 차이는 여타의 기상 요소와 식물체 자체 요인의 변인에서 기인되는 것으로 볼 수 있다. 기상환경 이외의 변이의 원인을 찾기 위해서 등숙기간 중 종실중 및 종실질소함량과 생육형질과의 stepwise 다중직선회기분석을 한 결과는 표 3 및 4와 같다. 등숙기 종실중과 종실질소함량의 변이는 출수기 엽면적지수, 등숙기 지상부 총건물중, 영화수 및 지상부 총질소함량에 의하여 각각 87.9와 88.5% 정도 설명이 가능하였다.

앞에서 검토한 sink와 source 관련형질과 GWmax와 GNmax 추정식을 이용하여 종실중과 종실질소함량 추정 모델을 다음과 같이 설정하였는데, 이는 유효적산온도와 적산일사량에 의해 최대 종실중 및 최대 종실질소함량이 결정되고, 이들과 실제 종실중 및 종실질소함량과의 차이는 엽면적지수, 지상부 총건물중, 지상부 총질소함량, 영화수 등 source-sink 관련형질에 의하여 결정되는 것으로 가정한 것이다.

$$GW_E = a \cdot GWmax \cdot LAI^b \cdot TDW^c \cdot GNO^d \cdot TNU^e \quad (1)$$

$$GN_E = f \cdot GWmax \cdot LAI^g \cdot TDW^h \cdot GNO^i \cdot TNU^j \quad (2)$$

여기에서,

GW<sub>E</sub> = 종실중 추정치(mg per grain)

GN<sub>E</sub> = 종실질소함량 추정치(mg per grain)

LAI = 등숙기간 중 엽면적지수(m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>)

TDW = 등숙기간 중 지상부 총건물중(g m<sup>-2</sup>)

GNO = 단위면적당 영화수(개 m<sup>-2</sup>)

TNU = 등숙기간 중 지상부 총질소함량(g m<sup>-2</sup>)

**Table 3.** Relationship between grain weight and source-sink related characters during grain-filling period by stepwise multiple linear regression analysis.

Variable	Parameter Estimate	Partial R-Square	Model R-Square	F Value	Probability
Leaf area index (LAI)	-1.69106	0.3648	0.3648	25.51	<.0001
Shoot dry weight (TDW)	0.0268	0.4288	0.7936	225.01	<.0001
Grain number (GNO)	-0.0008377	0.0786	0.8722	133.19	<.0001
Shoot N content (TNU)	0.6255	0.0070	0.8792	11.12	0.001

**Table 4.** Relationship between grain N content and source-sink related characters during grain-filling period by stepwise multiple linear regression analysis.

Variable	Parameter Estimate	Partial R-Square	Model R-Square	F Value	Probability
Leaf area index (LAI)	-0.02602	0.3179	0.3179	51.89	<.0001
Shoot dry weight (TDW)	0.000231	0.4763	0.7942	143.77	<.0001
Grain number (GNO)	-0.0000094	0.0558	0.8500	144.70	<.0001
Shoot N content (TNU)	0.01548	0.0349	0.8849	58.52	<.0001

**Table 5.** Parameter estimates for the equation (3) to estimate grain weight during grain filling period.

Version	Parameter estimates										R <sup>2</sup>	RMSE (%)
	a		b		c		d		e			
A	2.347	(0.99)	0.0439	(0.02)	0.6674	(0.06)	-0.5173	(0.05)	-0.1895	(0.06)	0.979	7.94
B	2.050	(0.86)	-		0.6141	(0.05)	-0.4717	(0.05)	-0.1573	(0.05)	0.978	8.00
C	12.395	(6.25)	-0.0913	(0.03)	-		-0.3034	(0.06)	0.2057	(0.06)	0.962	10.10
D	0.112	(0.04)	-0.0831	(0.03)	0.4293	(0.07)	-		-0.3969	(0.06)	0.965	9.78
E	7.558	(1.84)	0.0167	(0.02)	0.5353	(0.05)	-0.5823	(0.05)	-		0.977	8.16
F	27.362	(12.65)	-		-		-0.3886	(0.06)	0.2095	(0.06)	0.958	10.42
G	0.077	(0.03)			0.5160	(0.06)	-		-0.5275	(0.05)	0.962	10.07
H	1.012	(0.05)	-0.1456	(0.03)	-		-		-0.0334	(0.03)	0.956	10.73
I	6.557	(0.89)	-		0.5223	(0.04)	-0.5582	(0.04)	-		0.977	8.17
J	2.489	(0.70)	-0.0944	(0.03)	-		-0.0997	(0.03)	-		0.958	10.47
K	0.779	(0.15)	-0.1848	(0.02)	0.0310	(0.03)	-		-		0.958	10.74
L	0.956	(0.01)	-0.1701	(0.02)	-		-		-		0.957	10.77
M	2.114	(0.38)	-		-0.1318	(0.03)	-		-		0.930	12.78
N	5.474	(0.96)	-		-		-0.1839	(0.02)	-		0.953	10.81
O	1.190	(0.05)	-		-		-		-0.1521	(0.02)	0.943	11.66
P	0.850	(0.01)	-		-		-		-		0.924	13.58

The values in parenthesis are standard error of the parameter estimates

a, b, c, d, e = 종실중 추정모델에서 *GWmax*, *LAI*, *TDW*, *GNO* 및 *TNU* 각각의 효과를 나타내는 파라미터

f, g, h, i, j = 종실질소함량 추정모델에서 *GNmax*, *LAI*, *TDW*, *GNO* 및 *TNU* 각각의 효과를 나타내는 파라미터  
 등숙기 생육형질을 다양하게 조합하여 식 (1)과 식 (2)의

파라미터, 결정계수 및 RMSE를 추정한 결과는 각각 표 5와 6과 같다.

등숙기간중 종실중의 변화는 파라미터의 수, 결정계수 및 RMSE를 고려하였을 때 Version I의 경우 파라미터의 수가 3개 이면서도 결정계수(0.977)는 비교적 높고, RMSE(8.17%)

**Table 6.** Parameter estimates for the equation (4) to estimate grain N content during grain filling period.

Version	Parameter estimates										R <sup>2</sup>	RMSE (%)
	f		g		h		i		j			
A	59.543	(24.63)	-0.0418	(0.02)	0.1365	(0.06)	-0.6019	(0.05)	0.4397	(0.06)	0.979	7.59
B	66.765	(27.39)	-		0.1887	(0.05)	-0.6445	(0.04)	0.4073	(0.05)	0.979	7.62
C	84.166	(33.02)	-0.0706	(0.02)	-		-0.5588	(0.05)	0.5214	(0.04)	0.978	7.73
D	1.497	(0.54)	-0.1830	(0.03)	-0.1122	(0.07)	-		0.1707	(0.06)	0.959	10.24
E	3.904	(1.04)	0.0218	(0.03)	0.4353	(0.05)	-0.4448	(0.05)	-		0.972	8.78
F	150.20	(54.71)	-		-		-0.6205	(0.05)	0.5203	(0.04)	0.976	7.92
G	0.598	(0.22)	-		0.0988	(0.07)	-		-0.1303	(0.05)	0.945	11.37
H	0.842	(0.04)	-0.1653	(0.02)	-		-		0.0751	(0.03)	0.959	10.29
I	3.245	(0.49)	-		0.4172	(0.05)	-0.4127	(0.04)	-		0.972	8.81
J	1.481	(0.42)	-0.0776	(0.03)	-		-0.0452	(0.03)	-		0.955	10.44
K	0.656	(0.12)	-0.1376	(0.02)	0.0575	(0.03)	-		-		0.958	10.40
L	0.958	(0.01)	-0.1114	(0.02)	-		-		-		0.955	10.51
M	1.342	(0.22)	-		-0.0599	(0.02)	-		-		0.941	11.55
N	2.824	(0.50)	-		-		-0.1143	(0.02)	-		0.952	10.63
O	1.011	(0.04)	-		-		-		-0.0589	(0.02)	0.943	11.44
P	0.887	(0.01)	-		-		-		-		0.941	11.70

The values in parenthesis are standard error of the parameter estimates

는 낮아서 이를 종실중 추정식으로 선정하였다(표 5).

$$GW_E = 6.557 \cdot GW_{max} \cdot TDW^{0.5223} \cdot GNO^{-0.5582} \quad (3)$$

여기에서 선정된 종실중 추정식(식 3)은 GWmax, 총건물중(TDW) 및 영화수(GNO)를 변수로 하였는데, TDW는 source 관련형질로써 클수록 종실중이 커지며, GNO는 sink 관련형질로써 클수록 종실중이 작아지는 관계를 나타내었다.

등숙기간중 종실질소함량의 변화 또한 파라미터의 수(3개), 결정계수(0.976) 및 RMSE(7.92)를 고려하였을 때 Version F가 가장 적합한 것으로 판단되어 이를 종실질소함량 추정식으로 선정하였다(표 6).

$$GN_E = 150.20 \cdot GN_{max} \cdot TNU^{0.5203} \cdot GNO^{-0.6205} \quad (4)$$

여기에서 선정된 종실질소함량 추정식(식 4)은 GNmax, 총질소함량(TNU) 및 영화수(GNO)를 변수로 하였는데, TNU는 source 관련형질로써 클수록 종실질소함량이 많아지며, GNO는 sink 관련형질로써 클수록 종실질소함량이 작아지는 관계를 나타내었다. 이 등(2009b)의 보고에서 등숙기 생육형질 중 source 관련형질인 엽면적지수, 총건물중 및 총질소함량이 크고, sink 관련형질인 영화수가 적을수록 종실

중이 크고 종실질소함량이 많았는데, 이는 위 결과와 일치하였다.

**종실중 및 종실질소함량 추정 모형구축 및 모형에 의한 추정**

앞서 선정된 식 (3)을 이용하여 실제 종실중을 추정하는 모형을 구축하였는데, 종실중 GW는 식 (5)에서와 같이 출수기 종실중 즉, 왕겨의 무게 GW<sub>0</sub>로부터 종실 생육속도 GFR을 출수후 일수(i)에 따라 매일 적산하여 계산하였다.

$$GW_i = GW_0 + \sum_{i=1}^n GFR_i \quad (5)$$

식 (5)에서의 GFR<sub>i</sub>는 식 (3)을 이용하여 식6과 같이 계산하였다.

$$GFR_i = GW_{Ei} - GW_{Ei-1} \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)에 의하여 종실중을 시뮬레이션 한 후 GWmax 및 실측 종실중과 비교하였을 때 종실중을 일부 과대 또는 과소 추정하였으나 대체적으로 실측값을 잘 시뮬레이션 하였으며, 특히 GWmax를 기준으로 하였을 때 등숙기 생육형질에 의하여 발생한 다양한 종실중 변이를 비교적 잘 추정하였다(그림 3).

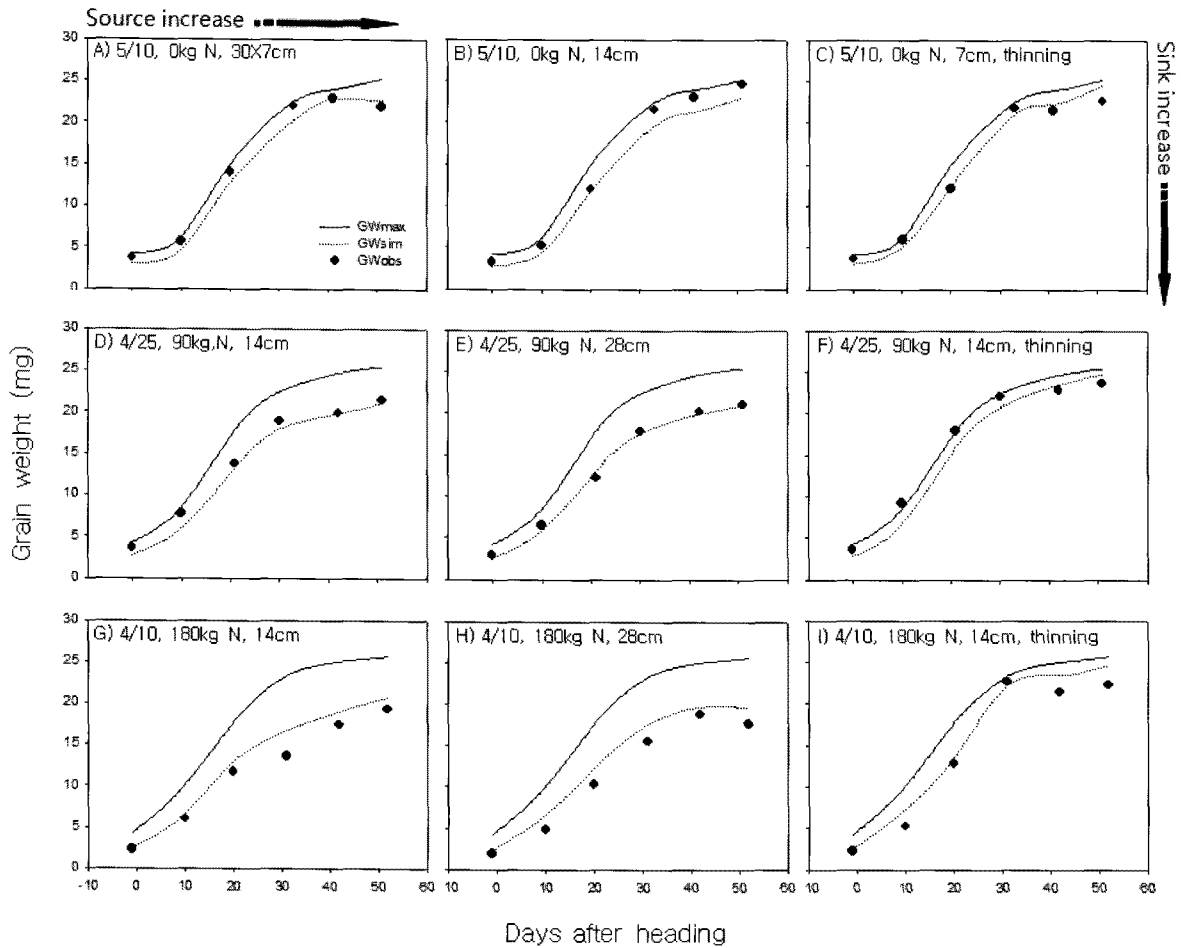


Fig. 3. Comparison of the observed grain weight(●) with the grain weight (.....) simulated by the equation (5) and the equation (6) and GWmax (—) estimated by the equation (1). The treatment such as 5/10, 0 kg, 30×7 cm, thinning means that rice plants were sown at 10th May, fertilized with 0 kg N/ha level, transplanted with 14 cm row spacing and thinned to double row spacing at heading time.

종실중에서와 같이 앞서 선정된 식 (6)을 이용하여 종실 질소함량 추정 모형을 구축하였는데, 종실질소함량  $GN$ 은 식 (7)에서와 같이 출수기 종실질소함량 즉, 왕겨의 질소함량  $GN_0$ 로부터 종실질소의 축적속도  $GNR_i$ 를 출수 후 일수 (i)에 따라 매일 적산하여 계산하였다.

$$GN_i = GN_0 + \sum_{j=1}^n GN R_j \quad (7)$$

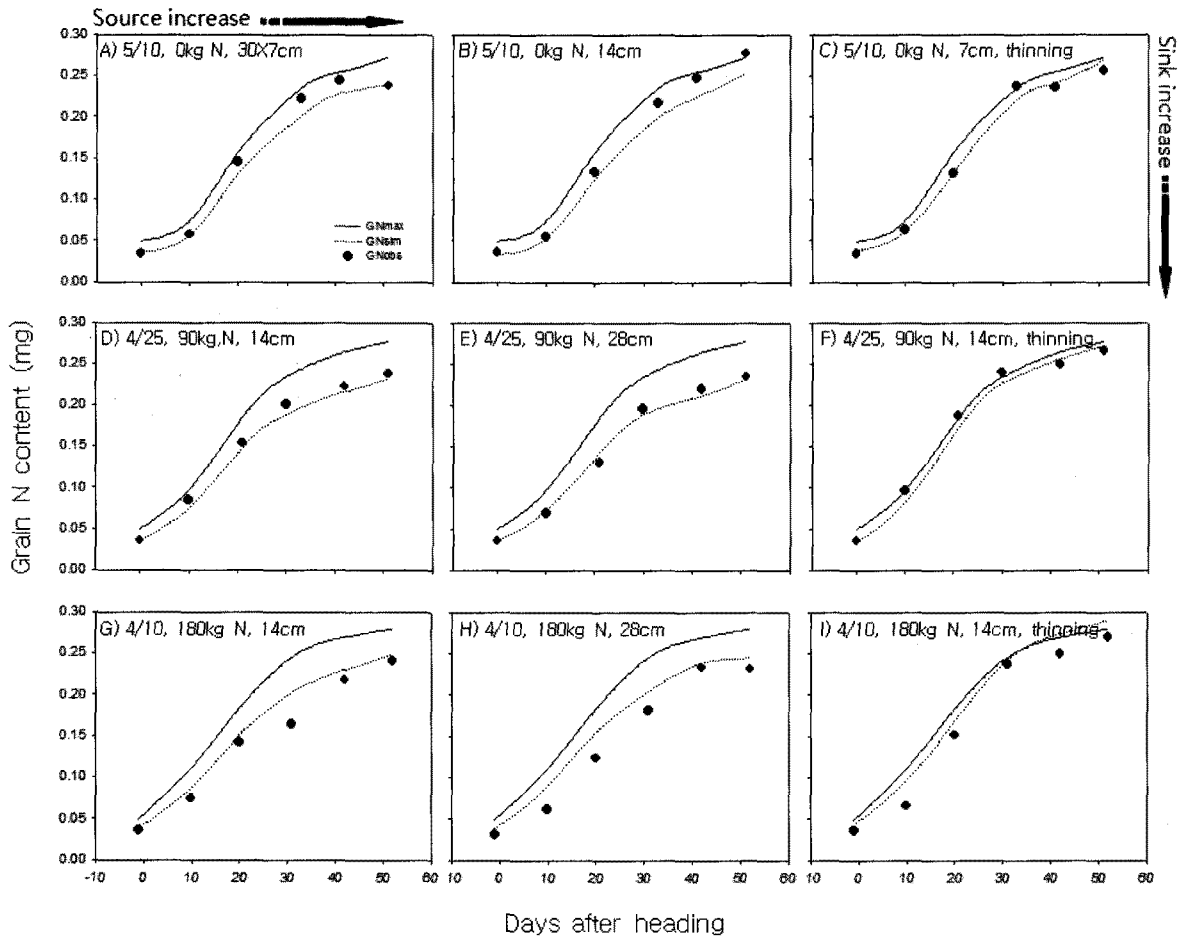
식 (7)에서의  $GNR_i$ 는 식 (4)를 이용하여 식(8)과 같이 계산하였다.

$$GNR_i = GN_{Ei} - GN_{Ei-1} \quad (8)$$

Zhu et al(2007)은 종실질소함량은 토양으로부터 흡수되는 질소와 경엽으로부터 전류되는 질소로 나누어지고, 이들

은 각각 발육단계와 엽면적에 의해 결정된다고 하였다. 또한 이들 질소의 축적속도는 Gao et al(1992)의 결과를 참고하여 생육온도에 의해 영향 받는다고 하였으며, 이를 벼 종실질소함량모델에 반영하였다. 그러나 Zhu et al(2007)의 모델을 구성하는 주요 추정식은 본 연구에서의 실험자료를 이용하여 검토한 결과 적용이 불가능 하였다. 이에 반하여 식 (7)과 식 (8)에 의하여 종실질소함량을 시뮬레이션 한 후  $GN_{max}$  및 실측 종실질소함량과 비교하였을 때 종실질소 함량을 일부 과대 또는 과소 추정하였으나 대체적으로 실측 값을 잘 시뮬레이션 하였으며, 특히  $GN_{max}$ 를 기준으로 하였을 때 등숙기 생육형질에 의하여 발생한 다양한 종실질소 함량 변이를 비교적 잘 추정하였다(그림 4).

본 연구에서 개발한 종실중 및 종실질소함량 추정식은 ORYZA2000과 CERES-Rice와 같은 기존 벼 생육 모델에



**Fig. 4.** Comparison of the observed grain N content (●) with the grain N content (·····) simulated by the equation (7) and the equation (8) and GNmax (—) estimated by the equation (2). The treatment such as 5/10, 0 kg, 30×7 cm, thinning means that rice plants were sown at 10th May, fertilized with 0 kg N/ha level, transplanted with 14 cm row spacing and thinned to double row spacing at heading time.

도입될 경우 등숙기 기상에 따른 벼 품질을 예측하는데 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

**적 요**

이 등(2009b)의 보고에서는 등숙기 기온과 일사량이 종실중 및 종실질소함량에 미치는 영향과 이들 관계를 분석하였고, 이 등(2009a)의 보고에서는 등숙기 생육형질이 종실중 및 종실질소함량에 미치는 영향과 이들 관계를 분석하였다. 본 연구는 종실중 및 종실질소함량과 등숙기 기상(온도, 일사량) 및 등숙기 생육형질과의 관계를 이용하여 등숙기간 중 종실중 및 종실질소함량의 형성과정을 추정하는 모형을 구축하고자 하였다.

1. 출수후 등숙 진전에 따른 유효적산온도(AET, 임계온도 7°C)와 적산일사량(AR)의 상승적에 따른 종실중과 종실질소함량의 변화를 나타내었을 때 동일한 AET × AR에서도 종실 중 및 종실질소함량의 상당한 변이가 존재하였다.
2. Logistic 함수를 이용하여 AET × AR에 따른 종실중과 종실질소함량의 최대경계선을 추정하였으며, 이를 각각 최대 종실중(GWmax)과 최대 종실질소함량(GNmax) 추정식으로 이용하였다.
3. 등숙기 생육형질 중 엽면적지수, 지상부 총건물중, 영화수 및 지상부 총질소함량이 등숙기간 중 종실중과 종실질소함량의 변이에 관여하였으며, 이들 등숙기 생육형질과 GWmax 및 GNmax를 이용하여 다음과 같은 종실중과 종실질소함량 추정식을 설정하였다.



$$GW_E = 6.557GW_{max}TDW^{0.5223}GNO^{-0.5582}$$

$$GN_E = 150.20GN_{max}TNU^{0.5203}GNO^{-0.6205}$$

4. 설정된 종실중 및 종실질소함량 추정 모델식을 이용하여 실제 종실중 및 종실질소함량을 추정하는 모형을 구축하였는데, 종실중 및 종실질소함량을 일부 과대 또는 과소 추정하였으나 대체적으로 실측값과 일치하는 경향이었으며, 등숙기 생육형질에 의하여 발생한 다양한 종실중 및 종실질소함량 변이를 비교적 잘 추정하였다.

### 인용문헌

- Asseng, S., Bar-Tal, A., Bowden, J.W. Keating, B.A., van Herwaarden, A., Palta, J.A., Huth, N.I., Probert, M.E. 2002. Simulation of grain protein content with APSIM-Nwheat. *Eur. J. Agron.* 16, 25-42.
- Bingham, J. 1967. Investigations on the physiology of yield in winter wheat, by comparisons of varieties and by artificial variation in grain number per ear. *J. Agric. Sci. Camb.* 68: 411-422.
- Bouman, B.A.M., Van Laar, H.H. 2006. Description and evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions. *Agricultural Systems* 87, 249-273.
- Darroch, B.A., Baker, R.J. 1990. Grain filling in three spring wheat genotypes : statistical analysis. *Crop Sci.* 30: 525-529.
- Gao L, Jin S., Huang Y., Zhang L. 1992. Rice clock model: a computer model to simulate rice development. *Agricultural and Forest Meteorology* 60: 1-16.
- Gregory, P.J., Crawford, D.V., McGowan. 1979. Nutrient relations of winter wheat. I. Accumulation and distribution of Na, K, Ca, Mg, P, S, N. *J. Agric. Sci. Camb.* 93, 485-494.
- Jamieson, P.D., Semenov, M.A. Brooking, I.R., Francis, G.S. 1998. Sirius: a mechanistic model of wheat response to environmental variation. *Eur. J. Agron.* 8, 161-179.
- Lecoeur, J. Sinclair, T.R. 2001. Analysis of nitrogen partitioning in field pea resulting in linear increase in nitrogen harvest index. *Field Crops Res.* 71, 151-158.
- Martre, P., Porter, J. R. Jamieson, P.D., Triboui, E. 2003. Modeling grain nitrogen accumulation and protein composition to understand the sink/source regulations of nitrogen remobilization for wheat. *Plant Physiol.* 133, 1959-1967.
- McCown, R.L., Hammer, G.L. Hargreaves, J.N.G., Holzworth, D., Freebairn, D.M. 1996. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agric. Syst.* 50, 255-271.
- Michele, R., Nicola, L., Zina, F. 2003. Evaluation and application of the OILCROP-SUN model for sunflower in southern Italy. *Agric. Syst.* 50: 255-271.
- Moller-Nielsen J. and Frijs-Nielsen B. 1976. Evaluation and control of the nutritional status of cereals. *Plant and Soil.* 45: 339-351.
- Ogunlela, V.B., Eastin, J.D. 1984. Effect of elevated night temperature during panicle development on sorghum (*Sorghum bicolor* L.) yield components. *Cereal Res. Comm.* 12: 245-251.
- Porter, J.R. 1993. AFRCWHEAT2: a model of the growth and development of wheat incorporating responses to water and nitrogen. *Eur. J. Agron.* 2, 69-82. Rice Research Institute, Los Banos, Philippines. pp: 21-38
- Ritchie, J. T. Otter, S. 1985. Description and performance of CERES-Wheat: a user-oriental wheat yield model. In: Willis, W.O. (Ed), *ARS Wheat Yield Project*, pp. 159-175(USDA-ARS, ARS 38).
- Ritchie, J.T., Godwin, D.C., Otter-Nacke, S. 1985. CERES-Wheat, AGRISTARS Publication No. YM-U3-04442-JSC-18892, Michigan State University, MI, p.252.
- Saeed, M., Francis, C.A., Clegg, M.D. 1986. Yield component analysis in grain sorghum. *Crop Sci.* 26: 346-351.
- Triboui, E., Triboui-Blondel, A.M. 2002. Productivity and grain or seed compositions: a new approach to an old problem. *Eur.J.Agron.* 16, 163-186.
- Van Keulen, H., Seligman, N.G. 1987. Simulation of Water Use, Nitrogen Nutrition and Growth of a Spring Wheat Crop. *Simulation Monographs*, Pudoc, Wageningen, 310 pp.
- Wallach, D., Goffinet, B. 1987. Mean squared error of prediction in models for studying ecological and agronomic systems. *Biometrics* 43: 561-573.
- Walworth, L.L., Letsch, W.S., Summer, M.E. 1986. Use of boundary line in establishing diagnostic norms. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 123-128.
- Webb, R.A. 1972. Use of the boundary line in the analysis of biological data. *J. Hort. Sci.* 47: 309-319.
- Weir, A.H., Bragg, P.L., Porter, J.R. Rayner, J.H. 1984. A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations *J. Agric. Sci.* 102: 371-382.
- Weiss, A., Moreno-Sotomayer, A. 2006. Simulating grain mass and nitrogen concentration in wheat. *Europ. J. Agronomy* 25: 139-137.
- Zhu Y., Li W., Jing Q., Cao W., Horie T. 2007. Modeling grain protein formation in relation to nitrogen uptake and remobilization in rice plant. *Agric. China* 1(1): 8-16.
- 김창국, 이변우, 한원식. 2001. 최대경계선을 이용한 벼 수량의 기상반응분석과 수량 예측 1. 최대경계선 분석과 수량예측 모형 구축. *한국작물학회지.* 46(3): 241-247
- 이충근, 권영업, 이재은, 서종호, 신진철. 2009b. Sink와 Source 관련형질 변이가 벼 종실중 및 종실질소함량 변이에 미치는 영향. *한국작물학회지* 54(1): 45-54
- 이충근, 김덕수, 권영업, 이재은, 서종호, 이변우. 2009a. 등숙기 기온 및 일사량이 벼 종실중 및 종실질소함량에 미치는 영향. *한국작물학회지* 54(1): 36-44