

등숙기 기온 및 일사량이 벼 종실중 및 종실질소함량에 미치는 영향

이충근*[†] · 김덕수* · 권영업* · 이재은* · 서종호* · 이변우**

*국립식량과학원, **서울대학교 농업생명과학대학

The Effect of Temperature and Radiation on Grain Weight and Grain Nitrogen Content in Rice

Chung-Kuen Lee*[†], Deok-Su Kim*, Young-Up Kwon*, Jae-Eun Lee*, Jong-Ho Seo*, 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 clarify the effects of growth temperature and radiation on grain weight increase and grain nitrogen accumulation in rice. Final grain weight became heavy and grain-filling duration shortened with radiation increase during grain-filling period (GFP). In addition, grain nitrogen accumulated duration during GFP was influenced strongly, but final grain nitrogen content was influenced slightly by accumulated radiation (AR). Accumulated effective temperature (AET) described well variation of grain weight (GW) and grain nitrogen content (GN), but GW and GN showed large variation under different radiation during GFP, when related with AET or AR, indicating that there was a limiting in describing variation of GW and GN by any single factor between AET and AR. However, AET multiplied by AR could describe relatively well the variations of GW and GN regardless of radiation during GFP.

Keywords : rice, temperature, radiation, grain weight, grain nitrogen content

등숙은 개화 수정된 영화에 탄수화물, 단백질 등이 집적되는 과정으로 등숙기간 중의 온도, 일사량 등의 기상 조건과 식물체의 영양 상태에 영향을 받는다. 광합성, 호흡, 전류 등 등숙과 관련된 모든 과정은 생화학적인 반응으로 온도의 지배를 받으므로 종실의 발육 속도와 기간은 온도와 밀접한 관련이 있다(Kobata & Uemuki, 2004). 벼의 등숙 적온은 대체로 21~25°C 범위로 알려져 있으며 품종, 지역 등에 따라 다르다고 하였다(Aimi, 1967).

고온은 벼(Inaba & Sato, 1976), 밀(Hawaker & Jenner, 1993), 보리(Wallwork *et al.*, 1998) 등에서 종실 발육속도를 제한하는데, 고온 피해는 종실의 전분 생성에 관여하는 효소의 활성이 낮아지기 때문이라고 하였다. 더 나아가서 Morita 등(2005)은 밤의 고온이 낮의 고온에 비하여 최종 종실중과 등숙 초중반의 발육속도를 더 억제한다고 하였다. 한편 적당한 저온은 때때로 종실생산에 유리하지만, 종실의 발육속도를 억제하여 등숙기간을 늘리고, 종실의 성숙을 지연시킨다고 하였다(Yoshida, 1981; Egli, 1998; Shimono *et al.*, 2002).

일사량과 등숙과의 관계는 실험조건 충족이 어려워 온도에 비해 많은 연구가 이루어지지 못하였는데, 자연조건하에서 일사량은 광합성의 제한인자로 작용하며, 그 영향 정도는 재식밀도와 엽면적지수에 따라 크게 차이가 있다고 하였다(임, 1966). 松島(1957)는 차광시험을 통하여 감수분열기의 약광은 퇴화영화수를 증가시키며 출수 후의 등숙을 저하시킨다고 하였으며, 강광하에서는 질소시비량이 많으면 수량을 증가시키지만 약광하에서는 오히려 불임률이 증가하여 수량이 감소한다고 하였다.

한편 등숙과정중에서 종실 단백질 집적은 쌀의 품질에 지대한 영향을 미치지만 온도와 일사량이 종실질소함량에 미치는 영향은 거의 검토된 바가 없을 뿐만 아니라 대부분의 연구는 최종산물인 쌀과 관련되어 수행되었으며, 종실의 형성과정에 대한 연구는 매우 드물다(Zhu *et al.*, 2007). 본 연구에서는 등숙기 생육온도와 일사량이 벼 종실중 및 종실질소함량의 형성과정과 이들의 최종산물에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

[†]Corresponding author: (Phone) +82-31-290-6717

(E-mail) leegaka@rda.go.kr <Received August 4, 2008>

재료 및 방법

실험 1 : 등숙기 기온에 따른 벼 종실중 및 종실질소함량 변화

2002년에는 오대벼, 화성벼, 일품벼 및 추청벼를 시험품종으로 하여 4월 29일에 파종하였는데, 뿌리 손실을 방지하기 위하여 1~2 mm 최아시킨 종자를 성묘 포트에 파종한 다음 2주후에 품종별로 1/5000a 와그너 포트에 3분씩 이양하였다. 출수 전까지는 작물과학원 인공기상동 외부에 있는 수조에서 자연 기상조건으로 재배하였으며, 출수기에 이삭별로 표찰을 단 후 18, 21, 24, 27°C, 낮과 밤의 일교차가 8°C인 인공기상동 내 정밀유리실로 옮겨서 각각 생육시켰다. 시비는 성분량으로 질소, 인산, 칼리를 포트당 각각 1.0, 0.5, 0.5 g을 주었으며, 이 때 인산은 전량기비로, 질소는 기비, 분얼비, 수비로 각각 50, 20, 30%, 칼리는 기비, 수비로 각각 70, 30% 분시하였다. 품종과 처리온도에 관계없이 출수 후 7, 14, 19, 21, 26, 31, 41, 51일에 태깅한 이삭을 채취하였으며, 지경을 제거한 후 70°C에서 일주일 이상 충분히 건조한 다음 영화수와 무게를 측정하여 종실중을 계산하였다.

2007년도에는 일품벼를 시험품종으로 하여 6월 1일에 파종한 후 6월 21일에 이양하였다. 등숙기간 중 생육온도 처리 및 재배방법은 2002년 실험에 준하였다. 처리온도별로 출수기부터 적산온도가 일치되는 시기(0, 162~168, 324~336, 504~513, 666~675, 837~846, 999~1008°C)에 각각 7회 표찰을 단 이삭을 채취하였다. 종실중 조사방법은 2002년 실험에 준하였으며, CNS2000(LECO)을 이용하여 추가로 종실질소함량을 측정하였다.

실험 2 : 등숙기 일사량에 따른 벼 종실중 및 종실질소함량 변화

2002년에는 화성벼, 일품벼 및 추청벼를 시험품종으로 하여 수행하였는데, 파종, 재배방법 및 조사방법은 앞서 실험 1에 준하였다. 등숙기 일사량이 종실중에 미치는 영향을 검토하기 위하여 작물과학원 인공조명실에서 총 13.5시간 조명처리를 하였는데, 이때 13.5시간(1200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), 7시간(1200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) + 6.5시간(170 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), 4시간(1200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) + 9.5시간(170 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), 2시간(1200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) + 11.5시간(170 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)으로 각각 처리하여 하루 동안의 일사량을 58, 34, 23, 16 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 로 조절하였다.

2007년도에는 일품벼를 시험품종으로 하였다. 일사량 처리 및 재배방법은 2002년 실험에 준하였으나, 일사량 처리 중 23 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 는 처리하지 않았으며, CNS2000(LECO)을 이용하여 추가로 종실질소함량을 측정하였다. 파종 및 조사

방법은 실험 1과 동일하였으나 표찰을 단 이삭의 채취는 처리에 관계없이 7일 간격으로 하였다.

통계 처리

쌀의 품질은 결국 최종산물에 의하여 반영되므로 기상요인과 최종 종실중 및 최종 종실질소함량과의 관계를 분석하는 것이 필수적이다. 그러나 최종 종실중 및 최종 종실질소함량은 조사과정에서 변이가 발생하며, 또한 언제 조사하느냐에 따라서 이들 값이 상당히 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 조사과정 및 조사시기에 따른 변이를 최소화하기 위해 등숙기간 중 여러 시기에 걸쳐 조사된 종실중 및 종실질소함량과 출수일수, 유효적산온도(Accumulated Effective Temperature, AET), 적산일사량(Accumulated Radiation, AR)과의 관계를 그래프로 나타낸 후 sigmoid 성장함수에 적합시켜 최종 종실중 및 최종 종실질소함량을 추정하였으며 이를 분석에 이용하였다. 본 연구에서 사용한 sigmoid 성장함수는 다음과 같다.

$$Y = a / (1 + \exp(-(x - x_0)/b))$$

여기에서 a , b , x_0 는 sigmoid 성장함수의 파라미터이다. 이중 a 는 이들 함수의 점근선으로써 본 연구에서는 최종 종실중 및 최종 종실질소함량은 $0.95a$ 로 계산하였으며, 최종 종실중 및 최종 종실질소함량에 도달하는 출수일수(GFDfml), 유효적산온도(AETfml) 또는 적산일사량(ARfml)은 $x_0 - b \cdot \ln(1 - 0.95)$ 로 계산하였다. 성장함수 파라미터 추정에는 Sigma-Plot(Systat)을 이용하였다.

결과 및 고찰

등숙기 기온이 종실중에 미치는 영향

角田(1964)은 등숙 최저온도, 즉 임계온도가 품종 간 차이가 있으며 대략 17°C라고 하였으나, Ebata(1990)는 7~8°C라고 하였으며, Nishiyama(1985)도 실험을 통해 이를 지지하였다. 본 연구에서는 임계온도를 여러 온도로 설정하여 유효적산온도를 구한 다음 등숙기 생육온도별로 종실중과의 관계를 검토하였는데, 임계온도를 7°C로 설정하였을 때 가장 잘 적합되었다. 따라서 본 연구에서는 7°C를 임계온도로 하여 출수기부터 유효적산온도를 계산하였는데, 유효적산온도는 실제로 생육속도에 관여하는 온도에 식물체가 반응하는 기간을 의미하므로 생육속도 외에 기타의 다른 온도 효과가 없다면 유효적산온도에 따른 종실중은 등숙기 생육온도간 차이가 없어야 한다. Table 1은 등숙기 생육온도별

Table 1. Parameter estimates for the sigmoidal function relating grain weight to the accumulated effective temperature based on the threshold temperature of 7°C

Year	Varieties	Growth temp.	Estimated parameters			
			a	b	x0	R ²
2002	Odae	18	26.76 (1.10)	71.53 (8.31)	239.71 (10.20)	0.984
		21	27.23 (0.66)	68.18 (6.27)	235.44 (6.46)	0.990
		24	25.53 (0.70)	79.08 (8.88)	258.22 (8.81)	0.983
		27	24.87 (0.71)	89.92 (11.12)	282.04 (10.88)	0.979
		Pooled	25.69 (0.64)	80.12 (7.44)	247.52 (7.81)	0.948
	Hwaseong	18	25.41 (1.11)	79.30 (9.55)	234.73 (11.40)	0.983
		21	26.25 (1.22)	76.67 (12.93)	235.37 (13.10)	0.963
		24	24.90 (0.62)	75.45 (8.31)	232.12 (8.09)	0.983
		27	23.90 (0.72)	62.84 (10.77)	224.82 (11.28)	0.960
		Pooled	24.88 (0.41)	73.04 (4.86)	229.28 (4.98)	0.970
	Ilpum	18	23.60 (0.88)	74.81 (8.60)	210.73 (9.63)	0.985
		21	23.77 (0.75)	80.02 (8.82)	240.50 (9.69)	0.987
		24	22.91 (0.68)	103.18 (11.29)	263.92 (11.59)	0.986
		27	21.52 (0.63)	74.47 (13.10)	219.67 (12.23)	0.966
		Pooled	22.47 (0.51)	82.00 (7.51)	225.61 (7.66)	0.952
	Chucheong	18	23.80 (0.69)	92.44 (6.94)	231.62 (8.10)	0.993
		21	23.15 (0.53)	66.71 (6.32)	207.53 (6.18)	0.988
		24	21.99 (0.68)	69.02 (9.97)	221.97 (9.86)	0.971
		27	20.75 (0.39)	78.16 (7.80)	221.04 (7.61)	0.985
		Pooled	21.93 (0.39)	75.06 (5.66)	213.36 (5.55)	0.961
2007	Ilpum	18	21.27 (3.01)	168.20 (29.61)	388.00 (59.63)	0.988
		21	21.40 (1.95)	167.69 (25.47)	371.56 (43.90)	0.994
		24	17.52 (1.06)	136.77 (23.93)	278.54 (28.63)	0.985
		27	16.42 (1.03)	125.07 (27.91)	259.88 (31.63)	0.975
		Pooled	18.21 (0.75)	145.47 (14.15)	309.52 (18.89)	0.973

Values in parenthesis are standard error of the parameter estimates

로 유효적산온도에 따른 종실중의 변화를 sigmoid 성장 함수에 적합시켜 파라미터를 구한 것으로 등숙기 생육온도별 함수의 파라미터는 고온 특히 27°C에서 다른 온도처리와 차이를 보였으나 그 외에는 차이가 크지 않았다. 등숙기 생육온도별로 구분하지 않고 전체 통합된 자료와 유효적산온도와의 관계를 나타내었을 때, 유효적산온도는 종실중 변이를 94% 이상 설명이 가능하였는데(Fig. 1), 여기에서 생육온도별 종실중 변이는 등숙 초중기에는 적었다가 주로 등숙 후반에 크게 나타났다. 따라서 유효적산온도는 등숙기 누적 일사량에 대한 생육온도의 간접효과 즉 생육온도에 따라 등숙기간이 길고 짧아져 등숙기 누적일사량이 많고 적음에서 오는 영향이 고려된다면 기타의 온도효과를 고려하지 않아

도 종실중 변이를 잘 설명할 수 있는 것으로 판단되었다.

등숙기 기온이 종실질소함량에 미치는 영향

등숙기 벼 생육온도가 벼 종실중에 미치는 영향은 비교적 많이 연구되었으나, 종실질소함량과의 관계는 연구된 바가 적다. 여기에서는 등숙기 생육온도가 벼 종실질소의 집적과정에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

유효적산온도에 따른 종실질소함량 변화를 sigmoid 성장 함수에 등숙기 생육온도별로 적합시켜 파라미터를 구한 후 최종 종실질소함량과 등숙기간을 계산하였을 때, 등숙기 생육온도에 대한 최종 종실질소함량의 반응은 전체적으로 최종 종실중과 유사하여 21°C에서 최대값을 나타내었고 이보

다 온도가 낮거나 높으면 감소하는 경향이였으며, 온도가 높을수록 최대값에 도달하는 시간이 짧아졌다(Table 2). 또한 종실의 질소 집적변화를 나타내는 sigmoid 성장함수의 파라미터는 등숙기 생육온도 간에 차이가 크지 않았으며, 등숙기 생육온도별로 구분하지 않고 전체 통합된 자료와 유효적산온도와와의 관계를 나타내더라도(Table 2, Fig. 2) 종실 질소함량 변이를 97% 이상 설명하였다. 따라서 유효적산온

도는 등숙기 생육온도에 관계없이 종실질소함량 변이를 잘 설명할 수 있는 것으로 판단되었다.

등숙기 일사량이 종실중에 미치는 영향

본 연구에서는 비교적 다양한 일사량 조건을 조성하여 등숙기 일사량이 벼 종실중의 형성과정에 미치는 직접적인 영향을 분석하고자 하였다. 등숙기 생육온도가 21°C인 조건에서 일사량별로 유효적산온도에 따른 벼 종실중 변화는 Fig. 4와 같다. 자연광 인공기상실 조건에서 등숙기 생육온도를 달리한 실험에서 유효적산온도는 등숙기 생육온도에 관계없이 종실중의 변이를 94% 이상 잘 설명하였으나(Fig. 1), 유효적산온도 또는 적산일사량에 따른 종실중은 등숙기 일사량간 큰 변이를 보였다(Fig. 3, Fig. 4). 이것은 유효적산온도는 온도에 의해 결정되는 생육속도를 반영할 수 있었으나 일사량에 의해 결정되는 광합성량을 반영할 수 없었

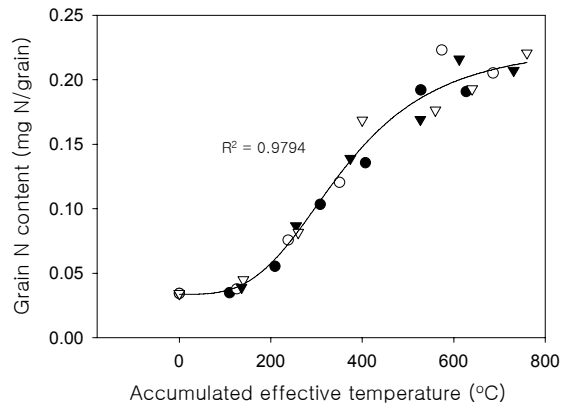
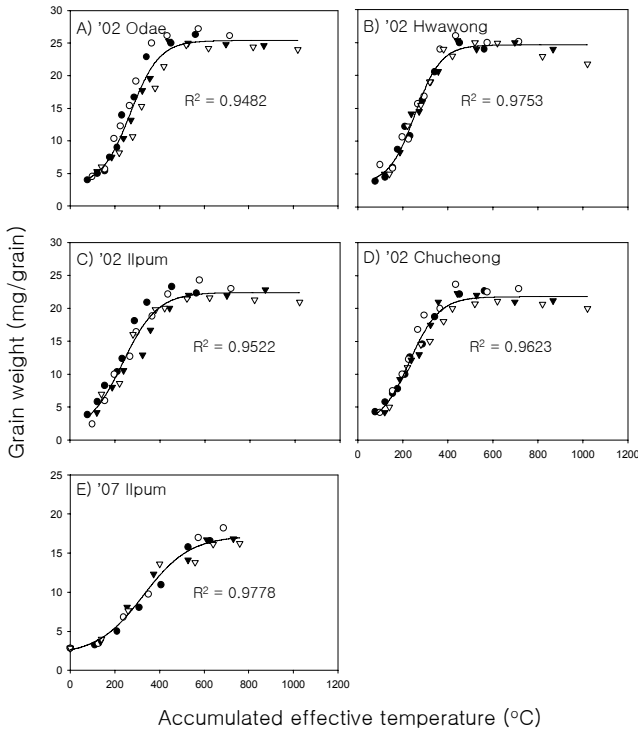


Fig. 1. Sigmoidal grain growth curve (—) fitted to the data pooled across growth temperatures (●, 18°C; ○, 21°C; ▼, 24°C, ▽, 27°C) during grain-filling period. The parameter values of sigmoid curve are presented in Table 1.

Fig. 2. Sigmoidal grain nitrogen accumulation curve (—) fitted to the data pooled across growth temperatures (●, 18°C; ○, 21°C; ▼, 24°C, ▽, 27°C) during grain-filling period. The parameter values of sigmoid curve are presented in Table 2.

Table 2. Parameter estimates for the sigmoidal function relating grain nitrogen content to the accumulated effective temperature based on the base temperature of 7°C, the calculated final grain nitrogen content (GNfnl), and grain-filling duration (GFDfnl)

Growth temp.	Estimated parameters				GNfnl (mg/grain)	GFDfnl (day)
	a	b	x0	R ²		
18	0.225 (0.029)	141.28 (30.99)	337.57 (50.09)	0.9784	0.214 (0.027)	69 (13)
21	0.234 (0.029)	131.18 (40.60)	328.21 (55.21)	0.9720	0.223 (0.027)	52 (13)
24	0.227 (0.021)	146.06 (32.26)	323.54 (43.31)	0.9776	0.216 (0.020)	45 (8)
27	0.218 (0.020)	136.07 (36.37)	298.82 (44.77)	0.9776	0.207 (0.019)	35 (8)
Pooled	0.226 (0.010)	140.29 (14.50)	323.94 (19.82)	0.9705	0.215 (0.010)	-

Values in parenthesis are standard error of the parameter estimates

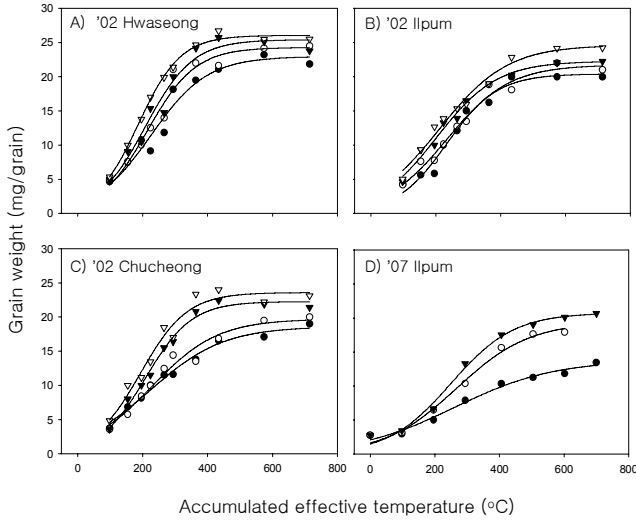


Fig. 3. Sigmoidal grain growth curves (—) fitted to the accumulated effective temperature (base temperature = 7°C) at different radiation conditions (●, 16; ○, 23; ▼, 34, ▽, 58 mol/m²/day) during grain-filling period. The parameters for the sigmoidal function are presented in Table 3.

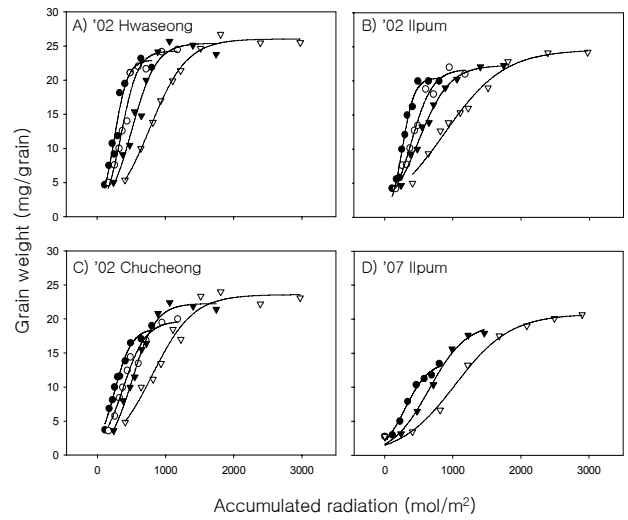


Fig. 4. Sigmoidal grain growth curves (—) fitted to the accumulated radiation (base temperature = 7°C) at different radiation conditions (●, 16; ○, 23; ▼, 34, ▽, 58 mol/m²/day) during grain-filling period. The parameters for the sigmoidal function are presented in Table 4.

Table 3. Parameter estimates for the sigmoidal function relating grain weight with accumulated effective temperature.

Year	Varieties	Radiation (mol/m ² /day)	a	b	x0	R ²
2002	Hwaseong	16	22.942 (1.22)	86.23 (16.35)	226.17 (15.77)	0.953
		23	24.269 (1.04)	73.813 (12.28)	214.83 (11.91)	0.964
		34	25.409 (1.05)	73.023 (12.02)	208.35 (11.53)	0.963
		58	26.032 (0.36)	65.23 (3.96)	186.24 (3.78)	0.995
	Ilpum	16	20.424 (0.79)	77.93 (10.83)	234.17 (10.90)	0.975
		23	21.733 (0.84)	96.22 (12.60)	234.62 (12.19)	0.978
		34	22.281 (0.56)	92.97 (8.84)	203.12 (7.82)	0.988
		58	24.604 (0.79)	84.97 (12.05)	200.37 (10.52)	0.983
	Chucheong	16	18.609 (0.61)	112.86 (12.32)	223.77 (11.08)	0.985
		23	19.715 (0.94)	101.47 (16.26)	228.82 (15.25)	0.968
		34	22.263 (0.52)	70.92 (6.68)	209.48 (6.46)	0.988
		58	23.585 (0.91)	72.05 (11.71)	193.52 (10.96)	0.963
2007	Ilpum	16	13.779 (0.82)	152.90 (22.35)	262.58 (28.12)	0.986
		34	19.416 (1.09)	112.39 (15.54)	268.45 (20.91)	0.991
		58	20.762 (0.63)	97.48 (10.80)	250.07 (12.77)	0.992

Values in parenthesis are standard error of the parameter estimates

며, 반대로 적산일사량은 광합성량을 반영할 수 있었으나 생육속도는 반영할 수 없었기 때문에 생각된다.

등숙기 일사량별로 유효적산온도 및 적산일사량과 종실중과의 관계를 sigmoid 성장함수로 적합시켜(Table 3, Table

4) 최종 종실중과 최종 종실중에 도달하는 출수일수 및 적산일사량을 각각 계산하였다(Table 5). 최종 종실중은 연차 및 품종에 관계없이 등숙기 일사량이 높을수록 큰 경향이었으며, 최종 종실중에 도달하는 출수일수 또한 품종 및 년도

Table 4. Parameter estimates for the sigmoidal function relating grain weight with accumulated radiation.

Year	Varieties	Radiation (mol/m ² /day)	a	b	x0	R ²
2002	Hwaseong	16	22.94 (1.22)	96.56 (18.30)	253.28 (17.66)	0.953
		23	24.27 (1.04)	121.76 (20.25)	354.38 (19.64)	0.964
		34	25.41 (1.05)	178.47 (29.37)	509.22 (28.18)	0.963
		58	26.03 (0.36)	271.71 (16.49)	775.84 (15.72)	0.995
	Ilpum	16	22.94 (1.22)	96.56 (18.30)	253.28 (17.66)	0.953
		23	24.27 (1.04)	121.76 (20.25)	354.38 (19.64)	0.964
		34	25.41 (1.05)	178.47 (29.37)	509.22 (28.18)	0.963
		58	26.03 (0.36)	271.71 (16.49)	775.84 (15.72)	0.995
	Chucheong	16	18.61 (0.61)	126.39 (13.80)	250.60 (12.41)	0.985
		23	19.72 (0.94)	167.39 (26.83)	377.45 (25.16)	0.968
		34	22.26 (0.52)	173.35 (16.32)	512.00 (15.80)	0.988
		58	23.59 (0.92)	300.13 (48.77)	806.17 (45.64)	0.963
2007	Ilpum	16	13.78 (0.82)	174.74 (25.54)	300.09 (32.14)	0.986
		34	19.42 (1.09)	272.95 (37.74)	651.96 (50.78)	0.991
		58	20.76 (0.63)	403.84 (44.73)	1036.0 (52.92)	0.992

Values in parenthesis are standard error of the parameter estimates

Table 5. Final grain weight (GWfnl), grain filling duration (GFDfnl), and accumulated radiation during grain filling (ARfnl) that were estimated from the parameters for sigmoidal grain growth curves in Table 3 and 4

Year	Varieties	Radiation (mol/m ² /day)	GWfnl (mg/grain)	GFDfnl (day)	ARfnl (mol/m ²)
2002	Hwaseong	16	21.8 (1.15)	34.6 (4.6)	542.5 (72.5)
		23	23.1 (0.98)	31.1 (3.5)	719.1 (80.3)
		34	24.1 (1.00)	30.5 (3.4)	1043.9 (116.2)
		58	24.7 (0.34)	27.3 (1.1)	1589.8 (65.1)
	Ilpum	16	19.4 (0.75)	33.4 (3.1)	523.7 (48.5)
		23	20.6 (0.80)	37.3 (3.6)	862.5 (82.3)
		34	21.2 (0.53)	34.4 (2.4)	1177.2 (83.8)
		58	23.4 (0.75)	32.5 (3.3)	2186.3 (194.2)
	Chucheong	16	17.7 (0.58)	40.1 (3.4)	629.2 (53.7)
		23	18.7 (0.89)	38.1 (4.6)	878.9 (105.5)
		34	21.1 (0.50)	30.1 (1.9)	1031.3 (64.7)
		58	22.4 (0.87)	29.2 (3.3)	1705.3 (191.7)
2007	Ilpum	16	13.1 (0.78)	51.5 (6.8)	823.6 (108.7)
		34	18.4 (1.04)	43.2 (4.8)	1469.6 (163.9)
		58	19.7 (0.59)	38.7 (3.2)	2245.8 (186.9)

Values in parenthesis are standard error of the parameter estimates

에 따라 5~13일 짧아지는 경향이였다(Table 5).

앞서 언급하였듯이 유효적산온도는 등숙기 생육온도에 관계없이 종실중 변이를 잘 설명하였으나(Fig. 1), 유효적산

온도 또는 적산일사량 따른 종실중은 등숙기 일사량간 변이가 매우 커 이들 단일 요인으로는 종실중 변이를 설명하는데 한계가 있음을 알 수 있었다(Fig. 3, Fig. 4). 그러나 유효

적산온도 및 적산일사량의 상승적은 Fig. 3과 Fig. 4에 비해 등숙기 일사량에 관계없이 종실중 변이를 잘 반영하였는데, 낮게는 '02년 화성벼의 92%, 높게는 '07년 일품벼의 98% 까지 설명할 수 있었다(Fig. 5). 실제로 이들 관계식이 등숙

기 일사량에 관계없이 종실중을 잘 추정하는지 검증할 필요가 있어 Fig. 5에서 생성된 유효적산온도 및 적산일사량의 상승적과 종실중과의 관계식을 이용하여 종실중을 추정한 후 등숙기 일사량별로 종실중의 실측값과 추정값 간의 단순 회귀식을 구하여 회귀식의 동일성을 농촌진흥청(2000)의 방법으로 검정한 결과 품종 및 연차에 관계없이 F 값이 한계 F 값보다 모두 작았다(Table 6). 즉 등숙기 일사량별 회귀식은 모두 같다고 할 수 있으며, Fig. 5에서 생성된 유효적산온도 및 적산일사량의 상승적과 종실중과의 관계식은 등숙기 일사량에 관계없이 종실중의 변화를 묘사할 수 있는 것으로 판단되었다.

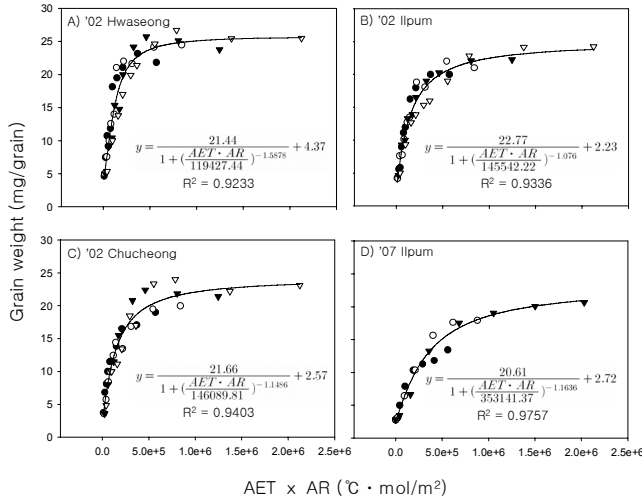


Fig. 5. Relationship between effective accumulated temperature (base temperature = 7°C) multiplied by accumulated radiation and grain weight at different radiations (●, 16; ○, 34; ▼, 58 mol/m²/day) during grain-filling period.

등숙기 일사량이 종실질소함량에 미치는 영향

유효적산온도 또는 적산일사량에 따른 종실질소함량의 변화는 모두 등숙기 일사량별로 매우 큰 변이를 보였다(Fig. 6). 따라서 유효적산온도 또는 적산일사량 단독으로 등숙기 간중 종실질소함량 변이를 설명하는데 한계가 있었다. Fig. 6에서 등숙기 일사량별로 유효적산온도 및 적산일사량과 종실질소함량과의 관계를 sigmoid 함수에 각각 적합시켜(Table 7, Table 8) 최종 종실질소함량과 최종 종실중량에 도달하는 출수 후 일수 및 적산일사량을 각각 계산하였다(Table

Table 6. Statistical difference analysis of linear regressions between observed and estimated grain weight during grain-filling at different radiations by the equations in Fig. 5.

Year	Varieties	Radiation (mol/m ² /day)	Linear regression		n [†]	F-value	Critical F-value
			Intercept	Slope			
2002	Hwaseong	16	0.219	1.045	10	2.91	3.80
		23	-0.398	1.050	10		
		34	-1.090	1.015	10		
		58	-3.169	1.073	10		
	Ilpum	16	0.172	1.026	10	3.72	3.80
		23	-0.016	1.014	10		
		34	-0.369	1.026	10		
		58	-2.265	1.050	10		
	Chucheong	16	0.794	0.980	10	3.19	3.80
		23	-0.393	0.984	10		
		34	-2.002	1.153	10		
		58	-2.562	1.108	10		
2007	Ilpum	16	0.357	0.931	8	2.66	5.84
		34	-0.341	1.073	7		
		58	-0.225	0.965	8		

[†]n: number of data used for statistic analysis.

9). 최종 종실질소함량은 종실중에 비해 0.194~204 mg/립으로 등숙기 일사량 간 큰 차이가 없었으며, 최종 종실질소함량에 도달하는 출수일수는 등숙기 일사량이 양호한 조건에서 40일이었으나 불량한 조건에서는 62일로 길어졌는데 (Table 9), 이는 일사량이 불량한 조건에서는 늦게까지 질소의 축적이 계속되어 부족했던 질소함량을 어느 정도 보충하

였음을 의미한다. 따라서 종실 질소의 축적기간은 등숙기 적산일사량에 크게 영향을 받았으나 최종 종실질소함량은 큰 영향을 받지 않았다.

종실중과 마찬가지로 유효적산온도 및 적산일사량의 상승적은 등숙기 일사량에 관계없이 종실질소함량 변이를 96% 정도 설명할 수 있었으며(Fig. 7), 이들 관계식을 이용하여 등숙기 일사량별로 종실질소함량을 추정할 후 추정값과 실

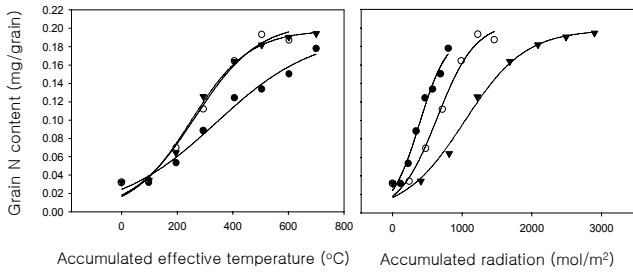


Fig. 6. Sigmoidal grain nitrogen accumulation curves (—) fitted to the accumulated effective temperature (base temperature = 7°C) and the accumulated radiation at different radiation conditions (●, 16; ○, 34; ▼, 58 mol/m²/day) during grain-filling period. Parameter estimates for the sigmoidal curves were presented in Table 7 and 8.

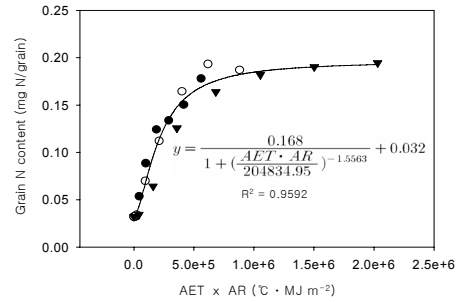


Fig. 7. Relationship between effective accumulated temperature (base temperature = 7°C) multiplied by accumulated radiation and grain N content at different radiation conditions (●, 16; ○, 34; ▼, 58 mol/m²/day) during grain-filling period.

Table 7. Parameter estimates for the sigmoidal function relating grain nitrogen content with accumulated effective temperature.

Radiation (mol/m ² /day)	a	b	x0	R ²
16	0.194 (0.020)	175.824 (30.543)	339.681 (48.517)	0.983
34	0.206 (0.014)	113.094 (19.306)	264.489 (25.789)	0.985
58	0.198 (0.007)	104.882 (13.659)	249.515 (16.204)	0.989

Values in parenthesis are standard error of the parameter estimates

Table 8. Parameter estimates for the sigmoidal function relating grain nitrogen content with accumulated radiation.

Radiation (mol/m ² /day)	a	b	x0	R ²
16	0.194 (0.020)	200.942 (34.906)	388.206 (55.448)	0.983
34	0.206 (0.014)	274.657 (46.887)	642.331 (62.630)	0.985
58	0.198 (0.007)	434.511 (56.587)	1033.706 (67.132)	0.989

Values in parenthesis are standard error of the parameter estimates

Table 9. Final grain nitrogen content (GNfnl), grain filling duration (DAHfnl), and accumulated radiation during grain filling period (ARfnl) that were estimated from the parameters for sigmoidal grain nitrogen accumulation curves in Table 7 and 8.

Radiation (mol/m ² /day)	GNfnl (mg/grain)	DAHfnl (day)	ARfnl (mol/m ²)
16	0.184 (0.019)	61.9 (10.0)	990.2 (160.0)
34	0.196 (0.013)	43.1 (6.0)	1465.1 (203.1)
58	0.188 (0.007)	40.3 (4.1)	2335.4 (236.7)

Values in parenthesis are standard error of the parameter estimates

Table 10. Statistical difference analysis of linear regressions between observed and estimated grain nitrogen content during grain-filling under different radiations by equation in Fig. 7.

Radiation (mol/m ² /day)	Linear regression		n [†]	F-value	Critical F-value
	Intercept	Slope			
16	-0.0004	1.0448	8	3.32	5.84
34	-0.0029	1.0438	7		
58	-0.0022	0.9392	8		

[†]n: number of data used for statistic analysis.

측값 간의 단순회귀식의 동일성을 검정한 결과 이들 단순회귀식 또한 등숙기 일사량 간에 통계적 차이가 없었다(Table 10). 따라서 유효적산온도 및 적산일사량의 상승적과 종실질소함량과의 관계식은 등숙기 일사량에 관계없이 종실질소함량의 변이를 잘 묘사할 수 있는 것으로 판단되었다.

적 요

본 연구는 다양한 등숙기의 온도 및 일사량 조건에서 종실중 및 종실질소 함량 변화를 조사하여 등숙기 생육온도와 일사량이 벼 종실중 및 종실질소함량의 형성과정과 이들의 최종산물에 미치는 영향을 분석하고자 하였던 바 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 최종 종실중은 연차 및 품종에 관계없이 등숙기 일사량이 높을수록 큰 경향이였으며, 최종 종실중에 도달하는 출수일수는 짧아지는 경향이였다.
2. 종실 질소의 축적기간은 등숙기 적산일사량에 크게 영향을 받았으나 최종 종실질소함량은 큰 영향을 받지 않았다.
3. 유효적산온도(임계온도 7°C)는 등숙기 생육온도에 관계없이 종실중 및 종실질소함량 변이를 잘 설명하였으나, 유효적산온도 또는 적산일사량에 따른 종실중 및 종실질소함량은 등숙기 일사량간 변이가 매우 커 이들 단일 요인으로는 등숙기 일사량에 따른 종실중 및 종실질소함량 변이를 설명하는데 한계가 있었다.
4. 유효적산온도 및 적산일사량의 상승적은 등숙기 일사량에 관계없이 종실중 및 종실질소함량 변이를 잘 묘사하였다.

인용문헌

Aimi, R. 1967. Cell-physiological and biochemical aspects in the physiology of ripening. IRC Newsletter special : 106-111.
 Ebata, M. 1990. Effective unit summation and base temperature on the development of rice plant: II. On heading, flowering, kernel development and maturing of rice. Jpn. J. Crop

Sci. 59 : 223-238.
 Hawker, J. S. Jenner, D. F. 1993. High temperature affects the activity of enzyme in the committed pathway of starch synthesis in developing wheat endosperm. Aust. J. Plant Physiol. 20 : 197-209.
 Inaba, K. Sato, K. 1976. High temperature injury of ripening in rice plant. VI. Enzymes activities of kernel as influenced by high temperature. Proc. Crop. Sci. Soc. Jpn. 45 : 162-176.
 Kim, J. J., 1983. Studies on the effect of temperature during the reduction division stage and the grain filling stage in rice plant. II. Effect of air temperature at the grain filling stage in Indica-Japonica crosses. Kor. J. Crop Sci. 28 : 58-75.
 Kobata, T. Uemuki, N. 2004. High temperature during the grain-filling period do not the potential grain dry matter increase of rice. Agron. J. 96 : 406-414.
 Morita, S., Yonemaru, J. Takanashi, J. 2005. Grain growth and endosperm cell size under high night temperature in rice (*Oryza sativa* L.). Ann. Bot. 95 : 695-701.
 Nishiyama, I. 1985. Physiology of cool weather damage in rice. Hokkaido Univ., Sapporo, Japan.
 Tanaka, A., Vergara, B. S. 1967. Growth habit and ripening of rice plants in relation to the environmental conditions in the far east. IRC Newsletter special issue: 26-42.
 Wallwork, M. A. B., Logue, S. J., MacLeod, L. C., Jenner, C. F. 1998. Effects of high temperature during grain-filling on starch synthesis in developing barley grain. Aust. J. Plant Physio. 25 : 173-181.
 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.
 角田公正, 1964. 水溫と稻の生育収量との關係に關する實驗的研究. 農伎研報告. A(11).
 松島省三. 1957. 水稻收量の成立と豫察に關する作物學的研究. 農林技術研究所研究報告 A5 : 1-150.
 林建一. 1966. 水稻品種の光利用效率と栽植密度との關係. 日本作物學會記事 35 : 205-215.
 농촌진흥청. 2000. 농업연구를 위한 통계적 방법. 331-336.