

미립 발육속도 온도반응의 품종간 차이

김다익, 이변우*

서울대학교 식물생산과학부

Genotypic difference in grain development rate response to air temperature during grain filling of rice

D. I. Kim, B. W. Lee*

Department of Plant Science, Seoul National University

(Correspondence: leebw@snu.ac.kr)

1. 서 언

고온조건에서 벼 수량성 저하는 입중저하가 주요인이며, 입중 저하는 고온에 따른 미립 발육속도가 빨라져 등숙기간이 단축되기 때문인 것으로 알려져 있다. 등숙기간 중의 온도는 미립의 발육속도에 영향을 미쳐 벼의 생리적 성숙기를 앞당기거나 지연시킬 수 있지만, 등숙기 온도에 따른 미립발육 속도의 품종간 차이에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 등숙기 온도조건에 따른 미립 발육속도의 품종간 차이를 검토하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 벼 재배 및 온도 처리

서울대학교 농업생명과학대학 부속농장에서 2011년 5월 ~ 10월까지 실험 하였으며, 실험에는 조생종인 운광벼, 오대벼 와 중생종인 안다벼, 화성벼 그리고 중만생인 녹양벼, 동안벼, 추청벼를 사용하였다. 각 품종은 1/5000a Wagner pot에 원형으로 15주를 심어 등숙기 온도 처리 전 까지 야외 기상 조건에서 키웠으며 각 개체의 생육을 동기화 시켜주기 위해 분얼은 나오는 대로 제거하여 주간만을 키웠다. 각 품종은 출수일 부터 실외기온(AT, ambient temperature), AT+1.5℃, AT+3℃, AT+5℃로 조절되는 Plastic house에 품종 당 4개 포트를 옮겨 등숙기 온도처리를 하였다. 각 온실의 온도 데이터는 data logger를 이용하여 기록하였다. 출수 후 5일마다 처리 및 품종별로 4개체를 채취하여 주당 영화수, 종실의 수분함량 및 건물중을 조사하였다.

2.2 발육속도 추정 및 통계처리

미립의 평균 발육속도는 등숙기간(출수에서 생리적성숙기)의 역수로 나타낼 수 있으며, 매일 매일의 발육속도는 일평균기온의 함수로 나타낼 수 있다.

생리적 성숙기(Physiological maturity)는 등숙 경과에 따른 미립중의 변화를 아래와 같은 Beta growth function (Yin, 2003)에 fitting하여 추정하였다.

$$w = w_{\max} \left(1 + \frac{te-t}{te-tm}\right) \left(\frac{t}{te}\right)^{\frac{te}{te-tm}} \quad [\text{식 1}]$$

여기서 W_{\max} 는 생리적 성숙기에서의 립중, te 는 출수기로부터 생리적성숙기까지의 일수, tm 은 발육속도가 최대일 일 때의 출수후일수 그리고 t 는 시간(day)를 나타낸다.

미립발육속도의 온도 반응은 아래와 같은 Beta function(Yin, 1995)으로 표현하였다. 등숙기간 중 매일의 평균 기온을 이용하였으며 등숙기간의 실측치와 예측치간 평방화가 최소화 되도록 simplex법을 이용하여 Beta function의 계수를 추정하였다.

$$DR = DR_{\max} \left[\left(\frac{T - T_b}{T_o - T_b}\right) \left(\frac{T_c - T}{T_c - T_o}\right)^{\frac{T_c - T_o}{T_o - T_b}} \right]^\alpha \quad [\text{식 2}]$$

여기서 DR_{\max} 는 최대 발육속도 (1/day), T_i 는 출수 후 i 일의 일 평균기온, T_b 는 base temperature, T_o 는 optimum temperature 이고 α 는 상수이다.

등숙기간 중의 유효적산온도를 처리별 및 품종별로 다음과 같은 네 가지 방법으로 계산하여 계산방법의 적합성과 등숙 유효적산온도(EAT, effective accumulated temperature)의 품종간 차이를 비교하였다.

$$\text{EAT I} = \sum_{i=0}^n (T_i - T_b), \text{ if } T_i \leq T_b, T_i = T_b \text{ and if } T_i \geq T_o, T_i = T_o$$

$$\text{EAT II} = \sum_{i=0}^n (T_i - T_b), \text{ if } T_i \leq T_b, T_i = T_b \text{ and if } T_i \geq T_o, T_i = T_o - (T - T_o) \frac{T_o - T_{\min}}{T_{\max} - T_o}$$

$$\text{EAT III} = \sum_{i=0}^n (T_i - T_b), \text{ if } T_i \leq T_b, T_i = T_b \text{ and if } T_i \geq T_o, T_i = T_o$$

품종통합(Pooled) T_b , T_o 를 이용하여 계산하였다.

$$\text{EAT IV} = \sum_{i=0}^n (T_i - 8.0), \text{ if } T_i \leq 8.0, T_i = 8.0$$

3. 결 과

3.1 생리적성숙기 및 발육속도 온도 반응

각 품종의 온도 처리별 생리적성숙기(Te) 추정결과는 Table 1과 같다. 전체적으로

처리 온도가 높아질수록 생리적 성숙기가 짧아지는 경향이었으며, 온도 처리에 따른 등숙기간 감소는 동안벼와 화성벼가 작았다.

Table 1. 출수에서 생리적성숙기(Te)까지 일수(등숙기간)의 온도 및 품종가 변이

처리온도	운광벼	오대벼	안다벼	화성벼	녹양벼	동안벼	추청벼
AT	38	37	33	34	39	35	33
AT+1.5°C	37	35	32	33	36	34	34
AT+3°C	35	32	32	35	37	33	34
AT+5°C	-	31	30	32	33	35	29

Table 2는 품종별 미립 발육속도의 온도반응함수(식2)의 계수추정치이다. 품종별 계수 추정치의 RMSE는 최소 0.71에서 최고 3.24 범위로 미립발육속도의 온도 반응은 식 2에 잘 적합되는 것으로 판단된다.

DR_{max} 는 운광벼가 0.028로 가장 낮았으며 안다벼와 추청벼가 0.033으로 가장 높았다. 최저온도(Tb)는 9.3 ~ 10.6°C였으며, 최적온도(To)는 25.0 ~ 26.1°C였고 최고온도(Tc)는 45.6 ~ 44.8°C였다.

상수 α 는 품종에 따라서 0.4 ~ 1.1 범위였으며, 화성벼가 0.4로 가장 낮았고, 다음이 오대벼로 0.7이었으며, 그 외의 품종은 1~1.1로 차이를 보이지 않았다. α 는 온도반응의 민감도를 나타내는 지표로서 낮은 α 값을 나타낸 화성 벼는 미립 발육속도의 온도 반응이 타 품종에 비하여 둔감한 것으로 판단된다.

Table 2. 미립 발육속도 온도 반응 함수(식 2)의 계수 추정 결과

계수	운광벼	오대벼	안다벼	화성벼	녹양벼	동안벼	추청벼	Pooled
DR_{max}	0.028	0.030	0.033	0.029	0.032	0.031	0.033	0.031
Tb (°C)	9.3	10.6	9.3	9.8	9.5	10.2	9.4	9.6
Tc (°C)	44.8	45.6	45.0	45.6	45.5	45.2	45.4	46.2
To (°C)	25.0	25.3	25.2	26.1	25.2	25.1	25.2	25.3
α	1.1	0.7	1.1	0.4	1.0	1.0	1.0	0.7
RMSE(day)	1.73	3.24	1.12	1.12	1.23	0.71	2.12	2.53

3.2 생리적 성숙기 까지 유효적산온도

재료 및 방법에서 제시한 네 가지 방법에 따라 계산된 품종별 유효적산온도는 Table 3과 같다. 유효적산온도의 온도처리가 최소 CV값을 보인 방법은 EAT- I 으로 beta function에 적합시켜서 추정된 Tb 와 To를 각 품종에 개별 적용하였을 때 오차가 작았다. 하지만 EAT- I 은 각 품종마다 Tb와 To값을 추정해야하는 단점이 있어 일반화하여 사용하기에는 어려운 점이 있다. EAT-V방법의 경우 Tb를 일괄적으로 적용할 수 있으며 CV값 역시 비교적 낮게 나와 일반화하여 사용하기에 적합한 것으로 판단된다.

생리적성숙기까지 유효적산온도는 품종간에 유의한 차이가 있었으며, 조생종인 운광벼와 오대벼의 경우 다른 품종들에 비해 유효적산온도(EAT IV)가 유의하게 높았으며

녹양벼를 제외한 나머지 품종간에는 유의한 차이가 없었다.

Table 3. 생리적성숙기까지 품종별 유효적산온도

Method	운광벼	오대벼	안다벼	화성벼	녹양벼	동안벼	추청벼	mean (°C)	CV	F Value	Pr F	>
E A mean	563.4 ^a	494.3 ^b	438.3 ^c	480.1 ^b	392.1 ^d	445.4 ^c	445.6 ^c	465.6	11.6	28	<.0001	
T I CV	2.2	6.3	1.8	2.7	5.0	3.6	4.9					
E A mean	520.8 ^{bc}	437.9 ^c	522.2 ^{bc}	574.6 ^b	693.8 ^a	519.2 ^{bc}	529.2 ^{bc}	542.5	14.4	5.38	0.0019	
T II CV	13.3	18.7	10.7	9.9	12.4	7.7	13.0					
E A mean	571.0 ^a	584.2 ^a	461.5 ^{bc}	502.1 ^b	402.8 ^c	481.2 ^b	455.8 ^{bc}	494.1	13.1	7.93	0.0002	
T III CV	1.1	11.8	10.1	11.2	8.8	8.1	4.0					
E A mean	706.1 ^a	673.8 ^a	537.4 ^b	579.2 ^b	457.8 ^c	573.8 ^b	538.7 ^b	581.0	14.6	20.19	<.0001	
T IV CV	6.7	2.7	5.3	7.1	6.3	8.1	6.7					

인용문헌

Yin, X., M. J. Kropff, G. McLaren, and R. M. Visperas, 1995: A nonlinear model for crop development as a function of temperature. *Agricultural and Forest meteorology* **77**, 1-16.

Yin, X., J. Goudriaan, E. A. Lantinga, J. Vos, and H. J. Spiertz, 2003: A Flexible Sigmoid Function of Determinate Frowth. *Annals of Botany* **91**, 361-371.