

생육온도에 따른 벼의 출엽양상과 출엽속도 추정모델

이충근¹, 이변우², 윤영환¹, 신진철¹

¹작물시험장, ²서울대학교 농업생명과학대학

Temperature Response and Prediction Model of Leaf Appearance Rate in Rice

Chung Kuen Lee¹, Byun Woo Lee², Young Hwan Yoon¹, and Jin Cheol Shin¹

¹National Crop Experiment Station, RDA, Suwon 441-857, Korea; ²College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea

1. 서언

출엽은 온도에 따른 벼의 발육단계를 알기 위하여 사용될 수 있는 중요한 발육양상중 하나이며, 화본과에서는 지엽이 완전 전개한 후 곧 이삭이 출현하므로, 최종엽수가 알려지면, 출수기는 출엽을 기초로 해서 예측될 수 있다(Grant, 1989; Miller et al, 1993).

일장이 감광성 품종에서 단지 일장감응기(PSP)에만 영향을 주는 것(Collinson et al,)과는 다르게, 온도는 모든 품종에서 출수기까지 전 생육기간에 영향을 주며(Yoshida, 1981), 식물의 생육과 수량을 조절하는 가장 중요한 환경 요인 중 하나로써 모든 생물학적 과정은 온도에 따라 반응속도가 달라지는데, 최저 또는 유효한계온도(T_{min}), 최고온도(T_{max}), 최적온도(T_{opt})의 반응으로 구분될 수 있다(Cross and Zuber, 1972; Shaykewhch, 1995; Yan and Hunt, 1999). 일반적으로 고온은 벼의 출수를 빠르게 하고, 저온은 출수를 지연시킨다(Hanju et al, 1983; Vergara and Chang, 1985).

본 연구에서는 온도가 벼의 출엽양상에 미치는 영향을 검토하였으며, 또한 이를 토대로 하여 벼의 출엽속도 추정모델 설정과 모델의 적용 가능성을 검토하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구는 2000년 1월부터 5월까지 농촌진흥청 작물시험장 인공기상동에서 수행하였고, 공시품종은 작물시험장에서 육성한 광안벼로 하였으며, 재배양식은 담수표면산파로 하였다. 파종방법은 인공기상동에서는 1~2mm 최아시킨 종자를 한 포트에 6립씩 파종하여 본엽 2엽기에 3개체를 제외한 나머지는 솟아내고 생육시켰다.

실험1은 동일일장 조건에서 온도변화가 벼의 출엽 및 출수에 미치는 영향을 검토하기 위한 것으로 출엽양상 및 출엽속도는 주로 온도 및 일장에 의해 영향받으므로, 온도 효과만을 검토하기 위하여 일장이 10시간 정도인 1월 24일 인공기상실에서 파종하여 인공광으로 보광하여 13시간의 동일 일장조건을 만들었으며, 온도처리는 15, 18, 21, 24, 27°C로 하였고, 낮과 밤의 일교차는 6°C로 하였다. 각 처리 온도 별로 4포트를 생육시켜서 일주일 간격으로 엽수를 조사하였고, 이삭이 지엽에서 10cm이상 추출되었을 때를 출수기로 하여 1일 간격으로 조사하였다.

실험2는 발육단계에 따라 온도변화에 의해 반응이 어떻게 나타나는지를 검토하기 위해서 주 생육온도인 24°C와 27°C에서 재배된 식물체를 파종부터 1주일 간격으로 4포트씩 15, 18, 21, 24, 27°C로 옮겨서 7일 동안 온도변화를 준 후 다시 주 생육온도(24, 27°C)에서 생육시켰다. 엽령은 각 온도처리 전과 후에 조사하였다.

출엽모델에 의한 출수기 예측과 적용성을 검증하기 위하여 본 연구에서는 실험1의 자료를 이용하여 유효적산온도와 출엽수와의 관계를 bilinear, quadratic, power, logictic 함수에 적합시켰고, 이 중 가장 추정력이 높은 함수를 출엽속도 추정모델로 설정하였으며, 실험2의 자료를 이용하여 모델의 적합성을 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

지엽이 완전 전개 될 때까지 걸리는 기간은 온도가 높을수록 짧아졌으며, 동일일장조건에서 온도에 의해 최종엽수가 변하지 않았다. 파종후 일수와 출엽과의 관계는 비선형적 관계로 출엽속도가 발육 전 기간에 걸쳐 일정한 것이 아니라 발육단계에 따라서 다르게 나타난다는 것을 의미하며, 파종후 일수가 진전됨에 따라 출엽속도가 감소감소하였는데, 이것은 뒤에 나오는 엽일수록 엽초와 엽신의 길이가 커지기 때문으로 생각된다.

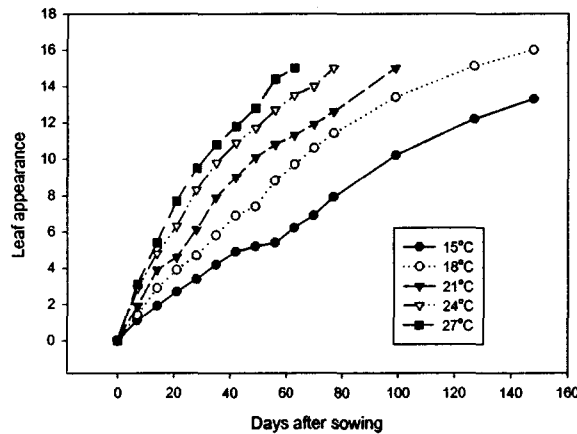


Fig 1. Leaf appearance in relation to the days after sowing under different growth temperatures and constant daylength of 13 hours.

주 생육온도인 24°C와 27°C에서 15, 18, 21, 24, 27°C로 각각 온도변화를 주었을 때 온도가 높아짐에 따라서 출엽속도가 직선적으로 증가하는 관계를 보였으며, 이 관계를 1차 회귀 직선을 이용하여 출엽속도가 0이 되는 임계온도를 추정하였다. 임계온도는 엽령에 따라서 주 생육온도가 24°C에서는 10~14°C, 주 생육온도가 27°C에서는 9~13°C로 비슷한 경향을 보였으며, 대부분의 생육모델에서는 온도에 의해 발육속도 또는 출엽속도를 추정하는 과정에서 임계온도를 고정된 하나의 값으로 가정하였으나, 본 연구에서는 임계온도가 엽령이 진전됨에 따라서 높아지는 관계를 보였다.

유효적산온도(effective accumulated temperature, EAT)는 일평균온도에서 임계온도(T_0)를 뺀 값을 적산한 것으로서 T_0 에 따라서 출엽과 EAT에 의한 출엽수의 추정 정확도가 달라진다. EAT와 출엽과의 관계를 Quadratic, Power 및 Logistic 함수에 적합시켰을 때 모든 함수에서 T_0 가 10°C일 때 가장 잘 적합되었다.

각 함수의 추정 계수들은 고도로 유의하였고 결정계수(R^2)는 0.9928~0.9950으로 비교적 높은 값을 보였으며, 특히 Logistic 함수가 0.9950로 가장 높은 값을 보였다. Logistic 함수 또한 고온에서 최종엽수를 과대 추정하는 경향은 있지만 Bilinear과 Power 함수에 비해 그 정도가 작았으며, 결정계수(R^2)도 가장 높은 수치를 보여서 본 연구에서는 Logistic 함수를 온도에 의한 출엽속도 추정모델로 설정하였다.

온도에 대한 출엽반응은 Logistic 함수에 의해 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$L = f(T_a) = a / (1 + b T_a^c) \quad \text{식(1)}$$

여기에서 L은 엽수, T_a 는 유효적산온도, 그리고 a, b, c는 계수이다. 식(1)을 유효적산온도(T_a)로 미분하면 식(2)가 된다.

$$dL/dT_a = f'(T_a) \quad \text{식(2)}$$

Table 4. Estimated parameters and coefficients of determination of the functions, relating the number of leaves appeared to the effective accumulated temperature using threshold temperature of 10°C.

Function	Equation	Estimated parameter			R ²
		a	b	c	
Bilinear	$y = a_1x + b_1$	0.0180***	0.6383***	-	0.9934
	$y = a_2x + b_2$	0.0105***	4.201***	-	
Quadratic	$y = ax^2 + bx + c$	-7.083e-6***	0.0216***	0.3823**	0.9932
Power	$y = ax^b$	0.1097***	0.7116***	-	0.9928
Logistic	$y = a/(1+bx^c)$	41.8***	1098.38***	-0.9273***	0.9950

** , *** Significant at the probability levels of 1% and 0.1%, respectively.

유효적산온도 T_a 는 일평균온도(T_i)에서 T_0 를 뺀 값이므로 $dT_a = (T_i - T_0) \cdot dt$ 로 표현할 수 있다. 여기에서 t 는 시간으로 단위는 1일이다. 따라서 식(2)는 출엽속도를 나타내는 식으로 다음과 같이 바꿀 수 있다.

$$dL/dt = (T_i - T_0) \cdot f'(T_a) \quad \text{식(3)}$$

식(1)과 식(3)으로부터 T_a 를 소거하면 출엽속도는 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$dL/dt = (T_i - T_0) \cdot (-a^{-1} \cdot b^{1/c} \cdot c \cdot (a-L)^{(c-1)/c} \cdot L^{(c+1)/c}) \quad \text{식(4)}$$

본 연구에서는 1~2mm의 최아종자를 사용하였으므로 파종당시의 엽수를 0.01로 가정하였으며, 파종 당일부터 일평균온도(T_i)와 임계온도($T_0=10^\circ\text{C}$)를 이용하여 출엽속도를 구한 후 이를 적산하면 최종엽수를 추정할 수 있다.

출엽속도 추정모델 설정시와 다른 독립자료를 이용하여 실제조사된 엽수와 출엽속도 추정모델에 의해 추정된 엽수를 비교하였을 때 결정계수(R^2)가 15~27°C 온도처리에서 0.990~0.996의 범위로 모델에 의한 출엽속도 추정 정확도가 매우 높았다.

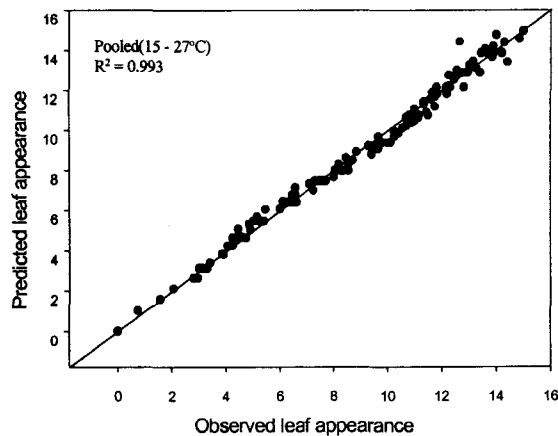


Fig 2. Comparison of observed and predicted number of leaves appeared under different temperature treatments.

인용문헌

- Summerfield, R. J., S. T. Collinson, R. H. Ellis, E. H. Roberts and F. W. T. Penning De Vires. 1992. Photothermal responses of flowering in rice(*Oryza sativa*). Ann. Bot. 69:101-112

- Tollenaar, M., T. B. Daynard and R. B. Hunter. 1979. Effects of temperature on rate of leaf appearance and flowering date in maize. *Crop Science* 19 :363-366
- Vergara, B. S. and T. T. Chang. 1985. The flowering response of the rice plant to photoperiod. A review of the literature, 3rd ed. IRRI, Los Banos, Philippines. 75p
- Yin, X. and M. J. Kropff. 1996a. The effect of temperature on leaf appearance in rice. *Ann. Bot.* 77:215-221
- Yin, X., M. J. Kropff and J. Goudriaan. 1997. Changes in temperature sensitivity of development from sowing to flowering in rice. *Crop Sci.* 37:1787-1794