Protected Horticulture and Plant Factory, Vol. 23, No. 1:39-42, March (2014)
DOI http://dx.doi.org/10.12791/KSBEC.2014.23.1.039
pISSN 2288-0992
eISSN 2288-100X

선형, 쌍곡선과 Beta 함수를 이용한 상추의 주요 온도 비교

차미경[1] · 김춘식[2] · Jirapa Austin[2] · 조영열[2,3]*
[1]제주대학교 식물자원환경전공, [2]제주대학교 원예환경전공, [3]제주대학교 아열대농업생명과학연구소

Comparison of Cardinal Temperatures of Lettuce Using Bilinear, Parabolic, and Beta Distribution Functions

Mi-Kyung Cha[1], Chun-Sik Kim[2], Jirapa Austin[2], and Young-Yeol Cho[2,3]*
[1]Major in Plant Resources and Environment, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea
[2]Major in Horticultural Science, Jeju National University, Jeju 696-756, Korea
[3]Research Institute for Subtropical Agriculture and Animal Biotechnology, Jeju National University, Jeju 696-756, Korea

Abstract. The objective of this study was to estimate cardinal temperatures for germination of lettuce (*Lactuca sativar* L.) using bilinear, parabolic, and beta distribution functions. Seeds of lettuce were germinated in a growth chamber at 7 constant temperatures: 10, 14, 16, 20, 24, 28, and 32°C. Four replicates of 100 seeds were placed on two layers of filter paper in a 9 cm petri-dish. Radicle emergence of 1 mm was scored as germination. The time course of germination was modeled using a logistic function. These minimum, optimum, and maximum temperatures were estimated by regression of the inverse of time to 50% germination rate against the temperature gradient. In bilinear function, minimum, optimum, and maximum temperatures were 7.9°C, 23.3°C, and 28.0°C, respectively. In parabolic function, minimum, optimum, and maximum temperatures were 9.7°C, 19.5°C, and 29.4°C, respectively. In beta distribution function, minimum, optimum, and maximum temperatures were 3.7°C, 20.7°C and 32.0°C, respectively. Minimum, optimum, and maximum ranges of temperatures were 3.7~9.7°C, 19.5~23.3°C, and 28.0~32.0°C, respectively.

Additional key words : germination, germination rate, growing degree-days, maximum temperature, minimum temperature, optimum temperature

서 론

온도는 식물의 생육과 발육에 영향을 주는 중요한 환경요인으로, 모든 생물학적 과정은 온도에 반응하며, 최저, 최적 및 최고 온도로 나뉜다(Jami Al-Ahmadi과 Kafi, 2007; Porter와 Gawith, 1999; Tokumasu 등, 1985; Yan과 Hunt, 1999). 최저 온도는 작물의 재배가 시작되는 시기를 결정하며, 최고 온도는 고온기의 재배적 영향을 고려하는데 지표가 된다. 주요 온도(최저, 최적 및 최고 온도)로 식물체의 발육 현상을 예측할 수 있는데, 주로 재배 환경의 변화가 심하지 않은 발아실험을 통해 예측할 수 있다(Roché 등, 1997). 보통, 발아율은 최저와 최적온도 사이에는 증가하다가 최적과 최고 온도 사이에는 감소한다. 그리고 최저 이하와 최고 온도 이상에서는 발아율이 정지된다. 주요 온도는 최저 온도 이하나 최고 온도 이상의 환경을 추정하는데 중요하다(Jami Al-Ahmadi과 Kafi, 2007; Montieth, 1981; Seefeldt 등, 2002). 따라서, 주요 온도는 이상기후 환경에 대한 작물의 반응을 예측하는데 중요한 정보를 제공해 줄 수 있다. 또한 작물의 생육과 발육을 위한 주요 온도는 재배, 생육과 성숙 및 수량을 예측하는데 중요한 정보로 활용될 수 있다.

주요 온도를 예측하는데 모델식을 이용하여 예측하려는 많은 연구들이 진행되어 왔다(Aflakpui 등, 1997; Brown과 Mayer, 1988; Carberry와 Abrecht, 1990; Del Monte와 Tarquis, 1997; Hardegree, 2006; Iannucci 등, 2000; Jami Al-Ahmadi과 Kafi, 2007; Roché 등, 1997; Seefeldt 등, 2002). 선형모델을 이용한 연구(Aflakpui 등, 1997)와 쌍곡선 모델을 이용한 연구(Dumur 등, 1990; Hardegree, 2006; Roché 등, 1997; Seefeldt 등, 2002; Yan과 Hunt, 1999; Yin 등, 1995) 및 비선형함수인 베타함수(beta distribution) 모델을 이용한 연구들이 있었다(Yan과 Hunt, 1999; Yin 등, 1995). 특히, 베타함수는 작

*Corresponding author: yycho@jejunu.ac.kr
Received February 14, 2014; Revised March 7, 2014; Accepted March 10, 2014

물의 온도에 따른 효소 반응처럼 작물 발육량에 따른 온도를 함수로 표현한 것이다(Yan과 Hunt, 1999). 이 함수는 생물학적 과정에 적용될 수 있는 함수로 알려져 있다(Yan과 Hunt, 1999; Yin 등, 1995).

대부분 작물의 최저 온도와 최적 온도는 각각 0~5°C와 20~25°C 범위이다(Monteith, 1981). 상추는 호냉성 작물로, 발아한계 최저 온도는 4°C이고, 최적 온도는 15~20°C, 최고 온도는 25°C이다. 작물 생육에 필요한 주요 온도는 품종별 생육단계별로 요구되며(Del Monte와 Tarquis, 1997; Iannucci 등, 2000; Jami Al-Ahmadi과 Kafi, 2007; Monteith, 1981; Olivier와 Annandale, 1998; Seefeldt 등, 2002; Slafer와 Savin, 1991; Tan 등, 2000), 발아 실험을 통해 주요 온도를 예측할 수 있다.

이 연구의 목적은 상추 발아 실험을 통해 주요 온도(최저, 최적, 최고)를 선형, 쌍곡선 및 베타 함수 등식을 이용하여 예측하고 3가지 함수를 비교하는 것이다.

재료 및 방법

실험 재료는 상추 품종 중 치마상추인 흑상추(Aram Seed. Co.)을 이용하였다. 발아상은 항온항습이 되는 생육상을 이용하였다. 온도 설정은 10, 14, 16, 20, 24, 28, 32와 36°C로 항온조건에서 발아시켰다. 발아실험은 9cm 페트리디쉬에 No. 2 필터페이퍼를 2장 깔고, 그 위에 100개의 종자를 올려놓았다. 증류수 10mL를 넣고 항온항습실에서 발아를 시켰다. 유근이 1mm 나왔을 때를 발아로 정하였으며, 매일 발아한 종자를 제거하였다.

발아는 로지스틱 함수(등식 1)를 이용하여 계수를 찾았다.

$$Y = M \times [1 + \exp(-k \times (t - L))]^{-1} \quad (1)$$

여기에서, Y는 t시간에 총발아한 개수, M는 잠재적인 발아수, L는 시간 상수, 그리고 k는 증가율(Roché 등, 1997)이다. 주요 온도는 온도에 따른 발아율이 50%된 시점의 역수($1/GR_{50}$)로 예측하였다. 주요온도를 예측하기 위해 선형함수, 쌍곡선 함수와 베타함수를 이용하였다(Cho et al., 2009). 함수의 계수들은 Gauss-Newton 알고리즘을 이용하여 예측하였다. 통계분석은 SigmaPlot (SPSS Inc., Korea)와 SAS(Statistical Analysis System) 프로그램을 이용하였으며, 완전임의배치법으로 4반복 실시하였다. 실험결과들은 ANOVA(analysis of variance) 검정하였다.

결과 및 고찰

항온 상태하에서 처리한 상추의 종자 발아 곡선은 Fig. 1과 같다. 온도가 20°C와 24°C 처리구에서 발아속도가 빨랐으며, 32°C 처리구가 빨아속도가 가장 느렸다. 온도 처리별 발아시는 10°C와 32°C 처리구가 3일, 14°C 처리구가 2일, 16°C, 20°C, 24°C, 28°C 처리구가 1일이었다. 28°C와 32°C 처리구를 제외하고 다른 처리구에서 높은 발아율을 보였다.

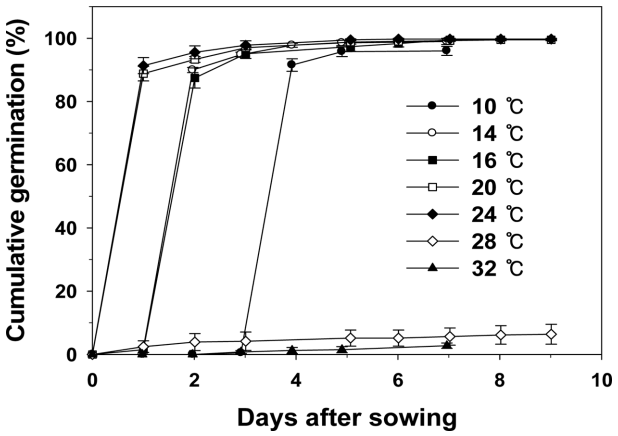

Fig. 1. Changes in cumulative germination of lettuce through time at different constant temperatures. Data are means ± SE of four replications.

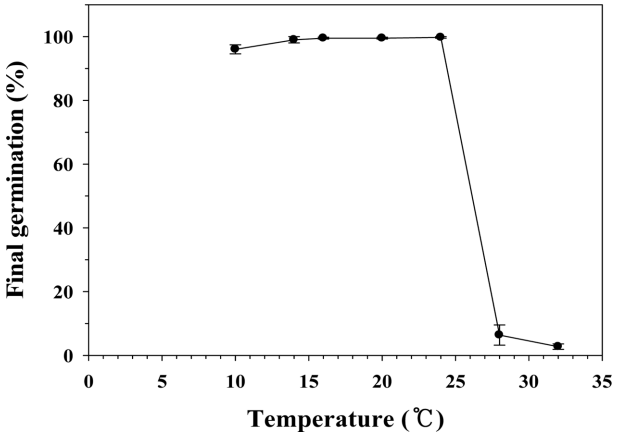

Fig. 2. Changes in final germination percentage of lettuce seeds at seven constant temperatures. Data are means ± SE of four replications.

최종 발아율은 28°C와 32°C 처리구를 제외하고 다른 처리구에서 높은 최종 발아율을 보였다(Fig. 2). 10°C, 14°C, 16°C, 20°C, 24°C 처리구간 최종 발아율의 차이는 없었다. 따라서 10°C에서 24°C까지의 최종 발아율에는 문제는 없으나, 발아시와 발아속도를 고려해 볼 때, 20°C와 24°C가 상추가 발아하는데 적당한 온도라는 것을 알았다. 상추는 호냉성 채소로 알려져 있다. 일반적으로 호냉성 채소의 발아온도는 12.8~18.3°C로 알려져 있다. 상추의 발아한계 최저 온도는 4°C이고, 최적 온도는

Table 1. Coefficients of the germination model on different constant temperatures.

Temp. (°C)	Logistic coefficient[z]			Pr > F
	M	k	L	
10	95.9 ± 0.70	8.3 ± 2.02	3.6 ± 0.09	< 0.0001
14	97.5 ± 0.46	10.7 ± 3.32	1.7 ± 0.72	< 0.0001
16	98.2 ± 0.59	6.2 ± 0.94	1.7 ± 0.05	< 0.0001
20	98.0 ± 0.48	9.9 ± 2.64	0.8 ± 0.61	< 0.0001
24	98.8 ± 0.49	11.0 ± 6.35	0.8 ± 1.32	< 0.0001
28	-	-	-	-
32	-	-	-	-

[z]The time course of germination was modeled using the logistic function; $Y = M \times [1 + \exp(-k \times (t - L))]^{-1}$, where, Y is cumulative percentage germination at time t, M is maximum potential germination, L is time scale (lag related) constant, and k is the rate of increase. Data are means ± SE of four replications.

15~20°C, 최고 온도는 25°C로, 본 연구에서의 최저, 최적, 최고온도 범위는 각각 3.7~7.9°C, 19.5~23.3°C, 28.0~32.0°C이었다. 상추의 주요 온도는 품종별로 다를 것으로 판단되며, 각 품종별 주요 온도를 찾는 것이 재배관리적인 측면에서 중요한 정보를 제공해 줄 것이다.

항온 처리에 따른 발아모델의 계수값들은 Table 1과 같다. 10°C에서 24°C 처리구간을 보면, 최대발아율(M)과 증가율(k)간에는 차이가 없었으나, 시간상수(L)는 10°C 처리구에서 가장 높은 수치를 보였으며, 20°C와 24°C 처리구에서 가장 낮은 수치를 보였다.

각 온도 처리별 50% 발아가 된 시점의 역수를 그래프로 보면, Fig. 3과 같다. 28°C와 32°C 처리구는 50% 발아율을 보이지 않아 28°C 처리구를 0값으로 하여 계산하였다. 등식 2a, 2b, 3, 4a를 이용하여 주요 온도를 조사하였다(Table 2). 3가지 함수를 이용한 경우, 평균 최

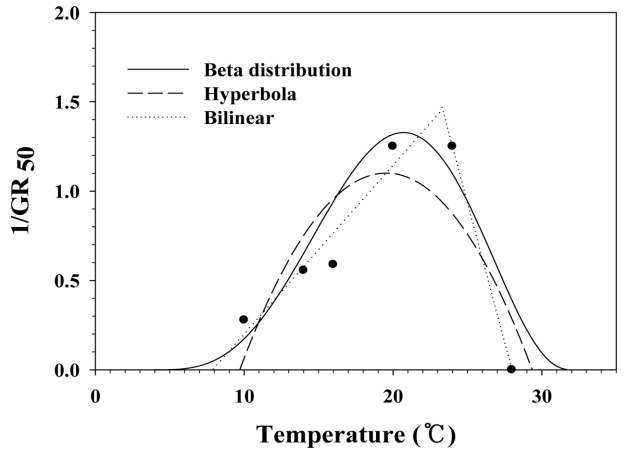

Fig. 3. Three models of germination rate, $1/GR_{50}$ (the inverse of time to 50% germination), for populations of lettuce. Data are means ± SE of four replications.

Table 2. The cardinal temperature for 50% germination of spinach seed using linear, parabolic, and beta distribution equations.

Equation	Temperature[z] (°C)			
	T_{min}	T_{opt}	T_{max}	Difference
Linear	7.9	23.3	28.0	20.1
Parabolic	9.7	19.5	29.4	19.7
Beta distribution	3.7	20.7	32.0	28.3
Mean	7.1	21.2	29.8	22.7

[z]T_{min}, T_{opt}, and T_{max} were minimum, optimum, and maximum temperatures, respectively.

저, 평균 최적, 평균 최고 온도 및 평균 온도범위차는 각각 7.1°C, 21.2°C, 29.8°C, 22.7°C였다. 선형 함수(등식 2a와 2b)를 이용할 경우, 최저, 최적, 최고온도 및 온도범위차는 각각 7.9°C, 23.3°C, 28.0°C, 20.1°C였으며, 쌍곡선 함수(등식 3)를 이용할 경우, 최저, 최적, 최고 온도 및 온도범위차는 각각 9.7°C, 19.5°C, 29.4°C, 19.7°C였으며, 베타 함수(등식 4a)를 이용할 경우, 최저, 최적, 최고 온도 및 온도범위차는 각각 3.7°C, 20.7°C, 32.0°C, 28.3°C였다.

온도는 식물의 생장과 발육 및 수량을 예측하는 모델에 사용되는 환경적인 변수 중 하나이다. 온도에는 주요 온도(최저, 최적, 최고 온도)가 있는데, 주요 온도는 다양한 식물의 생물 계절학, 적응 및 수량을 계산하는데 중요하다(Yan과 Hunt, 1999). 또한 주요 온도는 유효적산온도(growing degree-days, growing degree unit)를 계산하는데 이용된다(McMaster와 Wilhelm, 1997). 이러한 유효적산온도는 생육과 수량을 예측하는데 이용되고(Tei 등, 1996), 시간(년도 또는 날짜)에 따른 생육과 수량 예측 모델 함수를 개량하는데 이용될 수 있다(McMaster와 Wilhelm, 1997). 따라서, 주요 온도는 기후변화예측에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

발아모델에 있어서 선형 함수는 최적 온도를 기준으로 2개의 함수를 얻을 수 있는데, Craufured 등(1998)의 보고에 따르면, 어떤 식물은 최고 온도가 198°C로 예측되었다라고 하였다. 쌍곡선 함수는 최적 온도를 중심으로 좌우대칭으로 최저 온도 근처에서 불안정한 곡선을 보이지 않는다(Yin 등, 1995). 최근 들어 온도에 따른 식물체의 반응에 대해 베타 함수로 표기하는 연구가 진행되고 있다(Yin 등, 1995). 이전의 등식과 비교하여 베타 함수는 몇몇 반응에 대해 실제적인 곡선을 나타내 주는 장점이 있다. 많은 연구들이 이 함수를 이용하고 있다(Yan과 Hunt, 1999; Yin과 Kropf, 1996; Yin 등, 1995, 1996). Yan과 Hunt(1999)는 생식질(germplasm) 조사나 검사, 작물 생육 모델링, 인공광 이용 작물 생산 시스템에 적용될 수 있다고 하였다.

적 요

본 연구의 목적은 선형, 쌍곡선, 베타 함수를 이용하여 상추의 주요 온도를 예측하기 위함이다. 상추 종자를 항온 생육상에서 발아시켰다. 온도처리는 10ºC, 14ºC, 16ºC, 20ºC, 24ºC, 28ºC와 32ºC였다. 100개의 종자를 9cm 페트리디쉬에 필터페이퍼 2장을 깔고 4반복 실시하였다. 유근이 1mm 나왔을 때를 발아로 하였다. 시간에 따른 발아율은 로지스틱 함수로 계산하였다. 최저, 최적, 최고 온도는 50% 발아한 시점의 역수를 온도에 따른 함수로 표기하여 나타내었다. 선형 함수의 경우, 최저, 최적, 최고 온도는 각각 7.9ºC, 23.3ºC, 28.0ºC였으며, 쌍곡선 함수의 경우, 최저, 최적, 최고 온도는 각각 9.7ºC, 19.5ºC, 29.4ºC였으며, 베타 함수인 경우, 최저, 최적, 최고 온도는 각각 3.7ºC, 20.7ºC, 32.0ºC였다. 최저, 최적, 최고 온도 범위는 각각 3.7~7.9ºC, 19.5~23.3ºC, 28.0~32.0ºC이었다.

추가 주제어 : 발아, 발아율, 유효적산온도, 최고 온도, 최저 온도, 최적 온도

사 사

이 연구는 농림수산식품기획평가원 첨단생산기술개발사업의 지원으로 수행되었음.

Literature Cited

Aflakpui, G.K.S., P.J. Gregory, and R.J. Froud-Williams. 1998. Effect of temperature on seed germination rate of *Striga hermonthica* (Del.) Benth. Crop Protection 17:129-133.

Craufurd, P.Q., A. Qi, R.H. Ellis, R.J. Summerfield, E.H. Roberts, and V. Mahalakshmi. 1998. Effect of temperature on time to panicle initiation and leaf appearance in Sorghum. Crop Science 38:942-947.

Cho, Y.Y., M.M. Oh, and J.E. Son. 2009. Modeling approaches for estimating cardinal temperatures by bilinear, parabolic, and beta distribution functions. Korean Journal of Horticultural Science & Technology 27:239-243.

Del Monte, J.P. and A.M. Tarquis. 1997. The role of temperature in the seed germination of two species of the *Solanum nigrum* complex. Journal of Experimental Botany 48:2087-2093.

Hardegree, S.P. 2006. Predicting germination response to temperature. I. Cardinal-temperature models and subpopulation-specific regression. Annals of Botany 97:1115-1125.

Iannucci, A., N. di Fonzo, and P. Martiniello. 2000. Temperature requirements for seed germination in four annual clovers grown under two irrigation treatments. Seed Science and Technology 28:59-66.

Jami Al-Ahmadi, M. and M. Kafi. 2007. Cardinal temperatures for germination of *Kochia scoparia* (L.). Journal of Arid Environments 68:308-314.

McMaster, G.S. and W.W. Wilhelm. 1997. Growing degree-days: One equation, two interpretations. Agricultural and Forest Meteorology 87:291-300.

Monteith, J.L. 1981. Climatic variation and the growth of crops. Quarterly Journal of Royal Meteorology Society 107: 749-774.

Roché, C.T., D.C. Thill, and B. Shafil. 1997. Estimation of base and optimum temperatures for seed germination in common crupina (*Crupina vulgaris*). Weed Science 45:529-533.

Seefeldt, S.S., K.K. Kidwell, and J.E. Waller. 2002. Base growth temperatures, germination rates and growth response of contemporary spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars from the US Pacific Northwest. Field Crops Research 75:47-52.

Tei, F., D.P. Aikman, and A. Scaife. 1996. Growth of lettuce, onion and red beet. 2. Growth modeling. Annals of Botany 78:645-652.

Yan, W. and L.A. Hunt. 1999. An equation for modeling the temperature response of plants using only the cardinal temperature. Annals of Botany 84:607-614.

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.