

ORIGINAL ARTICLE

온도기반의 Beta Distribution Model 을 이용한 후지 사과 성숙기 예측

최인태* · 심교문 · 김용석 · 정명표

농촌진흥청 국립농업과학원 기후변화생태과

Predicting Harvest Maturity of the 'Fuji' Apple using a Beta Distribution Phenology Model based on Temperature

In-Tae Choi*, Kyo-Moon Shim, Yong-Seok Kim, Myung-Pyo Jung

Division of Climate Change & Agroecology, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

Abstract

The Fuji variety of apple, introduced in Japan, has excellent storage quality and good taste, such that it is the most commonly cultivated apple variety in Gunwi County, North Gyeongsang Province, Korean Peninsula. Accurate prediction of harvest maturity allows farmers to more efficiently manage their farm in important aspects such as working time, fruit storage, market shipment, and labor distribution. Temperature is one of the most important factors that determine plant growth, development, and yield. This paper reports on the beta distribution (function) model that can be used to simulate the the phenological response of plants to temperature. The beta function, commonly used as a skewed probability density in statistics, was introduced to estimate apple harvest maturity as a function of temperature in this study. The model parameters were daily maximum temperature, daily optimum temperature, and maximum growth rate. They were estimated from the input data of daily maximum and minimum temperature and apple harvest maturity. The difference in observed and predicted maturity day from 2009 to 2012, with optimal parameters, was from two days earlier to one day later.

Key words : Beta distribution model, Fuji apple, Harvest maturity, Phenology

1. 서론

작물의 성장 속도는 주로 온도에 비례하며, 열-시간 (thermal time) 개념으로 설명할 수 있다(Yin et al., 1995). 작물 성장을 온도와 관련하여 광범위하게 사용되어온 모델 중의 하나가 생장도일모델(GDD, Growing

Degree Days) 이며, 이 모델은 작물의 성장에 실제로 영향을 줄 수 있는 종 고유의 기준온도(base temperature) 이상에서는 온도에 따른 선형의 관계를 보여주고 기준온도 이하의 온도는 성장에 기여하지 않는다고 가정한다. GDD모델이 성장과정을 비교적 잘 예측하고 계산의 단순성으로 인해 오랜 기간 동안

Received 5 September 2017; Revised 13 November, 2017;

Accepted 14 November, 2017

*Corresponding author: In-Tae Choi, Division of Climate Change & Agroecology, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea
Phone:+82-63-238-2521
Email: 1rednif@gmail.com

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

많이 활용되어 왔으나, 수년간 여러 문제점을 제기 받아왔다(Yin et al., 1995). 예를 들면, 옥수수(*Zea mays* L.) 묘목의 생장률이 최적온도(optimum temperature)를 넘었을 때는 급격히 감소되었으나, GDD모델로는 이러한 결과를 설명하기 어려워서 생장부분과 감소생장부분에 해당하는 별도의 두 개의 선형모델(BLM, Bilinear Model)을 이용하기도 하였다(Yan et al., 1999). 비록 BLM이 GDD보다 옥수수 신장률을 잘 설명하였지만, 생물의 복잡한 생육과정을 잘 반영하지는 못했다(Yin et al., 1995). 옥수수의 온도에 대한 생장률은 낮은 온도에서는 급격히 증가하고 이후 선형적으로 증가하고 그리고 최적온도 이상에서는 급격히 생장이 감소하는 부분 등으로 표현되는 종 모양의 비대칭적 곡선으로 나타난다. 따라서 이러한 종 모양의 작물생장을 부드러운 곡선 형태를 묘사하기 위한 다양한 모델들이 개발되어왔다(Yan et al., 1999). 2차방정식 형태의 모델은 종 모양의 대칭적인 포물선 곡선을 나타내지만 자연적인 생물 생장의 비대칭적 형태의 포물선을 나타내지는 못했으며, 이러한 비대칭적 제한을 극복한 것이 Rice Clock Model (RCM)이며, 이로부터 Beta Distribution Model (BDM)이 유도되었다(Yin et al., 1995). BDM을 구동하여 카사바(*Manihot esculenta* Crantz)와 옥수수에 대한 최대생장속도(maximum development rate)를 계산하였는데 최적 온도와와의 관계에서 결정계수는 0.990~0.998로서 모델의 적합도가 높게 나왔다(Yin et al., 1995). 온도 영향에 따른 벼(*Oryza sativa* L.) 잎의 출현속도(LAR, Leaf Appearance Rate)를 BDM을 이용하여 예측한 연구도 수행되었다. 파종 후의 날짜와 출현하는 잎의 수와의 관계를 BDM으로 나타내어 잎의 출현 수를 예측하기도 하였다(Yin et al., 1996). FAO-WMO에서 개최한 ‘CROP-YIELD WEATHER MODELLING’ 세미나에서는 BDM을 작물 모델링의 교육자료로 활용하기도 하였다(Gommes, 1998). 지금까지 살펴본 앞선 연구에서 작물의 생장을 설명할 수 있는 온도 기반의 모델이 계속 개발되어 왔으며, 개발된 모델을 활용하여 작물의 옥수수의 신장률, 벼 잎의 출현 속도 등을 예측하였다. 본 연구의 대상 작물인 후지 사과는 일본에서 도입한 품종으로서 맛이 좋고 저장성이 우수하여 일본, 중국뿐만 아니라 한반도에서도 가장 많

이 재배하고 있는 사과 품종 중의 하나이며, 미국이나 유럽에서도 재배면적이 증가하고 있는 추세이다(RDA, 2013). 통계청 국가통계포털(<http://kosis.kr>)에 따르면 2016년 사과 생산면적이 33,300 ha, 생산량은 576,369 ton이며, 사과 재배 농가의 약 80%가 후지 품종을 재배하는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 BDM을 활용하여 우리나라에서 많이 재배하고 있는 대표적인 사과 품종인 후지 사과의 성숙기를 예측하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. Model 구동 입력 자료 수집

Beta distribution model을 구동하여 모델파라미터를 구하고 모델을 검증하기 위한 입력 자료로는 기온 자료와 후지 사과의 생육자료를 이용하였다. 기온자료는 기상청에서 2005년부터 2012년까지 수집한 군위지역의 일별 최고 및 최저 기온자료를 이용하였다(Table 1). 후지 사과의 생육자료는 기상자료를 수집한 위치와 일치시키기 위하여 국립원예특작과학원 군위사과시험연구소에서 재배하고 있는 후지 품종의 2005년부터 2012년까지의 발아기, 만개기 및 성숙기에 관한 자료를 이용하였다(Table 2).

2.2. Beta distribution model 선정 및 구현

온도는 작물의 생장, 생장 및 수확량을 결정하는 가장 중요한 요인 중의 하나이며, 모든 생물학적 과정의 응답형태는 일반적으로 최저기온, 최고기온 및 최적기온으로 단순화하여 설명할 수 있다(YAN et al., 1999). 온도를 주요 변수로 하는 수학적 모델은 여러 가지가 있다. 간단한 모델로는 제한된 온도 범위 내에서 작물 생장과 온도와의 1차 선형함수로 나타나는 linear 모델이 있는데 대표적인 것이 서론에서 언급한 GDD 모델이다. 그러나 GDD 모델은 작물이 생장에 적합한 최적온도를 넘었을 경우의 생장감소나 지연을 제대로 설명할 수 없으므로 최적온도에서의 생장과 최적온도를 벗어나는 온도에서의 생육 지연을 설명하기 위한 두 개의 선형식으로 구성된 식(1)의 형태인 bilinear 모델이 개발되었다(Yin et al., 1995).

Table 1. Daily maximum and minimum temperature of Gunwi province from Korea Meteorological Administration (Table 1)

Date	Daily maximum temperature (°C)	Daily minimum temperature (°C)
2005-01-01	0.3	-10.8
2005-01-02	5.7	-10.7
2005-01-03	10.8	-7.1
2005-01-04	4.7	-8.7
2005-01-05	2.8	-13.9
2005-01-06	6.1	-4.2
2005-01-07	3.3	-6.9
2005-01-08	2.0	-12.7
2005-01-09	-1.2	-12.8
2005-01-10	0.9	-14.1

- Omitted below -

$$r_1 = a_1 + b_1 T \quad (T < T_{opt}) \quad (1)$$

$$r_2 = a_2 + b_2 T \quad (T > T_{opt})$$

$$r = R_{max} - b(T - T_{opt})^2 \quad (2)$$

그러나 linear 모델 또는 bilinear 모델은 온도에 따른 작물의 성장형태가 직선형으로 나타나므로 실제 작물 생장의 형태인 부드러운 곡선형이 아니다. 그래서 도입된 모형이 exponential 모델과 polynomial 모델이다. exponential 모델은 저온과 중온에서는 온도에 대한 작물생장의 모의가 효과적이거나 작물생장의 최적온도 근처의 고온에서는 작물생장의 감소를 모의하기가 어려우며, 식(2)와 같은 2차 방정식 형태의 polynomial 모델은 작물생장이 최고 성장속도를 중심으로 양쪽으로 대칭인 포물선의 형태로 나타나는데 실제 작물생장이 양쪽 대칭의 포물선 형태를 보이는 작물은 거의 없다(YAN et al., 1999).

식(3)의 BDM은 최저온도와 최고온도의 범위 내에서 최적온도의 위치에 따라 비대칭형의 단일 포물선 형태를 갖는 곡선으로서 이전의 모델에 비해 실제 작물의 생육의 형태를 잘 묘사할 수 있는 모형이다. BDM의 온도를 최저기온 0°C에서 최고기온 40°C까지의 범위 내에서 최적온도를 각각 15°C, 20°C, 25°C, 30°C로 하였을 경우의 모델의 온도 응답곡선을 Fig. 1에 나타내었다.

$$\frac{r}{R_{max}} = \left(\frac{T_{max} - T}{T_{max} - T_{opt}} \right) \left(\frac{T}{T_{opt}} \right)^{\frac{T_{opt}}{T_{max} - T_{opt}}} \quad (3)$$

r : daily rate of growth

R_{max} : maximum rate of growth

Table 2. Fuji apple phenology data of Gunwi province in South Korea

Year	Blooming time	Full blooming	Harvest maturity
2005	April 26	April 26	October 26
2006	April 24	April 28	October 30
2007	April 24	April 27	October 27
2008	April 20	April 23	October 30
2009	April 14	April 20	October 26
2010	April 14	April 20	October 26
2011	April 28	May 01	October 31
2012	April 25	April 28	October 29

T_{max} : maximum temperature
 T_{opt} : optimum temperature

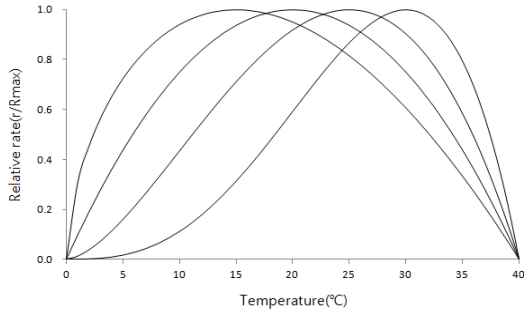


Fig. 1. The shape of temperature response curves derived by applying a beta distribution equation. The minimum and maximum temperatures are fixed at 0 and 40°C and the optimum temperature are 15, 20, 25, 30°C respectively.

Fig. 1 은 BDM이 작물 생육이 가장 왕성한 최적온도를 중심으로 최적온도가 될 때까지는 완만한 또는 급격한 생장을 하고 최적온도보다 높은 온도에서는 완만한 또는 급격한 생장 감소를 하는 형태를 보여주며 작물 생육에 적용가능하다는 것을 보여준다. 실제 작물생육 속도와 유사한 성장패턴을 찾아서 작물 생육과정을 모의할 수 있다. 모델에 사용할 기상자료 및 후지 사과 생육자료의 입력부터 모델 파라미터의 추정과 추정된 파라미터를 이용한 수확일 예측과정의 개략도는 Fig. 2와 같으며 파이썬(Python) 프로그래밍 언어로 작성하였다.

2.3. Model parameter 추정 및 수확일 예측

본 연구에 사용된 BDM은 식(3)의 형태로서 모델의

파라미터는 일 최고기온(T_{max} , maximum temperature), 일 최적기온(T_{opt} , optimum temperature) 및 최대생장속도(R_{max} , maximum rate of growth at T_{opt})이다. 모델 파라미터의 초기값을 설정하기 위하여 농촌진흥청(RDA, 2013)에서 온도 관련 생육정보와 기상청의 2005년부터 2012 동안의 월별 최고기온과 월별 평균기온자료를 이용하였다(Table 3).

문헌에 따르면 사과 과실의 비대기는 20°C 전후에서 잎의 광합성 능력이 가장 높으며, 성숙기의 적온은 20~25°C가 적당하며 이보다 낮으면 성숙이 늦어지고, 27°C 전후에서는 빨라지며, 30°C 이상이 되면 호흡작용이 왕성해져서 탄수화물 생성량보다 호흡에 의한 소비량이 많아 물질의 축적이 이루어지지 않아 과실비대가 불량해지고, 꽃눈형성도 나빠지게 된다. 후기 품종은 만생종으로서 10월 하순에 수확하며 만개 후 성숙기 도달 기간이 약 170~180일 정도이다(RDA, 2013). 사과 생육기간 동안의 기온분석은 2005년부터 2012년까지 군위 지역의 만개기에 해당하는 4월에서 성숙기에 해당하는 10월까지의 월별 최고기온과 평균기온을 기상청 웹사이트로부터 수집하였다(Table 3). Table 3에서 월별 최고기온의 범위는 대략 20~35°C이며, 월별 평균기온의 범위는 대략 10~25°C이었다. 문헌자료와 생육기간 동안의 기온자료를 참조하여 모델 파라미터인 일 최고기온의 입력값은 40, 35, 30°C로 각각 설정하고 일 최적기온은 20, 15°C로 각각 설정하였다. 일 최대생장속도는 작물생장이 최대로 이루어지는 환경조건에서의 생장으로서는 하루 최대생장속도를 1이라고 할 때 초기값을 180, 170, 160으로 설정하였다. 2005년부터 2008년까지의 후지 사과 생육자료와 기온자료를 이용하여 일 최고기온과

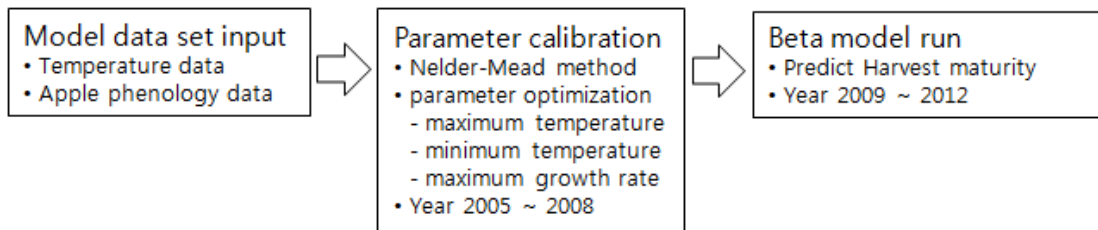


Fig. 2. The flow chart of predicting harvest maturity and estimating model parameter with model input data for beta distribution model.

Table 3. Monthly maximum and mean temperature of Gunwi province from 2005 to 2012

Month	Temperature (°C)	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
4	T_{max}	21.7	18.1	19.2	21.2	21.9	15.7	18.2	19.8
	T_{mean}	13.3	11.2	11.6	12.9	13.0	8.7	10.3	11.8
5	T_{max}	25.4	24.5	25.6	26.1	27.7	24.4	22.9	24.7
	T_{mean}	17.4	17.5	17.8	17.8	18.6	16.2	16.0	16.8
6	T_{max}	30.0	29	28.4	26.8	30.0	30.0	28.4	27.6
	T_{mean}	23.2	21.9	21.9	20.5	22.9	22.1	21.7	21.2
7	T_{max}	30.9	27.8	29.2	34.0	30.3	30.4	29.6	30.4
	T_{mean}	25.1	23.2	23.7	27.3	24.3	24.9	24.6	25.1
8	T_{max}	30.9	33.5	32.6	31.6	30.9	31.7	29.0	31.3
	T_{mean}	25.1	26.7	26.7	24.7	24.6	26.3	24.0	25.7
9	T_{max}	26.8	25.3	26.0	28.4	27.7	26.5	26.1	25.2
	T_{mean}	20.9	18.1	21.1	21.0	19.9	20.1	19.4	18.8
10	T_{max}	20.4	24.0	21.8	22.9	22.0	19.7	19.5	20.3
	T_{mean}	12.5	15.1	14.1	14.1	12.7	12.3	11.3	11.3

일 최적기온 및 최대생장속도의 초기값을 변화시켜가며 관측한 수확일과 예측한 수확일의 오차를 최소화 하는 파라미터를 추정하였다. 각 파라미터는 비선형 함수를 최적화시켜 목적함수의 최대값 또는 최소값을 찾는 일반적인 수치해석 방법인 Nelder-Mead method 를 이용하여 후지 사과 성숙기의 관측일과 예측일의 차이가 최소값을 가지도록 하는 최적화 과정을 거쳐

구하였다. 이렇게 구한 파라미터를 이용하여 2009년부터 2012년까지의 후지 사과의 수확일을 예측하였다(Table 4).

3. 결과 및 고찰

2005년부터 2008년까지의 후지 사과 생육자료와

Table 4. Estimation of parameter from 2005 to 2008 and prediction of harvest maturity from 2009 to 2012

NO.	Input parameter			Estimated parameter			Prediction of harvest maturity			
	T_{max} (°C)	T_{opt} (°C)	R_{max}	T_{max} (°C)	T_{opt} (°C)	R_{max}	Year			
1	40	20	180	43.0	20.5	169.9	24	28	5	4
							-OCT	-OCT	-NOV	-NOV
2	40	20	170	41.6	19.9	168.3	23	29	4	3
							-OCT	-OCT	-NOV	-NOV
3	35	20	180	37.8	20.3	162.7	22	30	4	4
							-OCT	-OCT	-NOV	-NOV
4	35	20	170	38.4	17.7	162.5	23	26	1	30
							-OCT	-OCT	-NOV	-OCT
5	30	20	160	32.9	19.6	147.8	24	30	30	29
							-OCT	-OCT	-OCT	-OCT
6	30	15	170	33.1	15.3	142.9	21	25	28	27
							-OCT	-OCT	-OCT	-OCT

Table 5. Estimation of parameter from 2005 to 2008 and prediction of harvest maturity from 2009 to 2012

No.	Error (Predicted - Observed)				Parameter evaluation			
	Year				Total of error	Mean of error	Maximum of error	RMSE
	2009	2010	2011	2012				
1	-2	+2	+5	+6	15.0	3.8	6.0	4.2
2	-3	+1	+4	+5	13.0	3.3	5.0	3.6
3	-4	+4	+4	+6	18.0	4.5	6.0	4.6
4	-3	0	+1	+1	5.0	1.3	3.0	1.7
5	-2	+4	-1	0	7.0	1.8	4.0	2.3
6	-5	-1	-3	-2	11.0	2.8	5.0	3.1

기온자료를 이용하여 관측한 수확일과 예측한 수확일과의 오차가 최소가 되게 하는 일 최고기온, 일 최적기온, 최대생장속도를 추정하였고 이렇게 추정된 파라미터를 이용하여 2009년부터 2012년의 후지 사과의 수확일을 예측하였다. 추정된 각 파라미터의 평가를 위하여 예측한 수확일과 관측한 수확일과의 차이를 오차(Error)로 두고 어떤 파라미터가 최적의 파라미터 인지를 평가하기 위하여 오차의 절대값들의 합계, 절대값들의 산술평균, 절대값들의 최대값과 평균제곱근 오차(RMSE, Root Mean Square Error)을 구하였다 (Table 5). Table 5에서 오차의 음(-)의 부호는 예측한 수확일이 관측한 수확일보다 날짜가 앞서게 모사한 것이며, 양(+)의 부호는 예측한 수확일이 관측한 수확일보다 날짜가 늦게 모사한 경우이다.

Table 5의 No. 4의 경우, 일 최고기온은 38.4℃, 일 최적기온이 17.7℃이고 누적최대생장량이 162.5일 때 오차의 절대값들의 합계, 산술평균, 최대값과 평균제곱근오차가 최소로서 다른 추정 파라미터를 이용한 수확일 예측보다 관측한 수확일에 더 가깝게 모사되었다. 일 최고기온이 높은 No. 1과 No. 2의 경우와 최적기온이 높은 No. 3의 경우 2010년에서 2012년 동안 관측한 수확일보다 예측한 수확일이 늦게 모사되었다. 이것은 문헌의 고온에서의 생육감소와 Fig. 2의 최적기온 이상의 고온에서의 생육속도의 감소경향과도 일치한다. 식 (3)에서 일 최고기온이 너무 높으면 식의 분자항의 값이 증가하게 되어 수확일이 늦어지게 예측하고 일 최적기온이 높은 경우에는 분모항에 해당

하는 일 최고기온과 일 최적기온의 차가 작아지게 되어 수확일이 늦어지게 예측한다.

4. 결론

본 연구는 BDM을 이용하여 군위 지역의 2005년부터 2008년까지의 일별 최고 및 최저기온과 군위 지역에서 재배한 후지 사과의 관측한 수확일을 입력자료로 하여 초기 파라미터인 일 최고기온, 일 최적기온, 최대생장속도를 추정하여 2009년부터 2012년까지의 후지 사과의 수확일을 예측하였다. BDM을 사용하여 2005년부터 2008년까지의 관측한 수확일과 예측한 수확일의 오차를 최소화 시킬 수 있는 파라미터인 일 최고기온 38.4℃, 일 최적기온 17.7℃, 누적최대생장량 162.5를 추정하였다. 추정된 파라미터를 이용하여 2009년부터 2012년까지의 후지 사과의 수확일을 예측하였으며, 예측한 수확일과 관측한 수확일의 오차의 절대값은 2009년 3일, 2010년 0일, 2011년 1일, 2012년 1일로서 다른 추정 파라미터를 이용하여 예측한 수확일보다 관측한 수확일에 더 가깝게 모사되었다. 과수의 정확한 수확일의 예측은 재배 농가로 하여금 수확 전·후의 농작업 시기 결정, 노동력 배분, 과실 저장 및 시장 출하 계획 등 농장관리를 효율적으로 계획할 수 있게 하므로 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 BDM을 이용하여 사과 과수 작물의 수확일 예측 가능성을 확인하였으며, BDM을 이용한 수확일 예측이 사과 작물 재배에 유용할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ01000703)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Choi, I. T., Shim, K. M., Kim, Y. S., Jung, M. P., 2015, Predicting harvest maturity of the 'Fuji' apple at the Gunwi province of the South Korea using DTS phenology model, *J. Environ. Sci. Int.*, 24, 1547-1550.
- Gommes, R., 1998, Crop-yield weather modeling, In lecture notes and exercise for WMO/FAO Roving Seminar.
- Korean Statistical Information Service, 2016, <http://kosis.kr>.
- Rural Development Association (RDA), 2013, *Apple Cultivation*, 15, 34-35, 322.
- Yan, W., Hunt, L. A., 1999, An Equation for modeling the temperature response of plants using only the cardinal temperature, *Annals of Botany*, 84, 607-614.
- Yin, X., Kropff, M. J., 1995, The effect of temperature on leaf appearance in rice, *Annals of Botany*, 77, 215-221.
- Yin, X., Kropff, M. J., McLaren, G., Visperas, R. M., 1995, A Nonlinear model for development as a function of temperature, *Agriculture and Forest Meteorology*, 77, 1-16.
- Yin, X., Kropff M. J., Goudriaan, J., 1996, Differential effects of day and night temperature on development of flowering in rice, *Annals of Botany*, 77, 203-213.