

온도와 일장에 따른 국화의 식물계절과 출엽 예측 모델 개발

서범석¹ · 박하승³ · 이규종² · 최덕환¹ · 이변우^{1*}

¹서울대학교 식물생산과학부, ²서울대학교 농업생명과학연구원,

³충청남도 농업기술원 예산국화시험장

(2016년 11월 3일 접수; 2016년 11월 30일 수정; 2016년 12월 13일 수락)

Modelling the Effects of Temperature and Photoperiod on Phenology and Leaf Appearance in Chrysanthemum

Beom-Seok Seo¹, Ha-Seung Pak³, Kyu-Jong Lee², Doug-Hwan Choi¹ and Byun-Woo Lee^{1*}

¹Department of Plant Science, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

²Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

³Chrysanthemum Experiment Station ChungNam Province RDA, Yesan, 340-910, Korea

(Received November 3, 2016; Revised November 30, 2016; Accepted December 13, 2016)

ABSTRACT

Chrysanthemum production would benefit from crop growth simulations, which would support decision-making in crop management. Chrysanthemum is a typical short day plant of which floral initiation and development is sensitive to photoperiod. We developed a model to predict phenological development and leaf appearance of chrysanthemum (cv. Baekseon) using daylength (including civil twilight period), air temperature, and management options like light interruption and ethylene treatment as predictor variables. Chrysanthemum development stage (DVS) was divided into juvenile (DVS=1.0), juvenile to budding (DVS=1.33), and budding to flowering (DVS=2.0) phases for which different strategies and variables were used to predict the development toward the end of each phenophase. The juvenile phase was assumed to be completed at a certain leaf number which was estimated as 15.5 and increased by ethylene application to the mother plant before cutting and the transplanted plant after cutting. After juvenile phase, development rate (DVR) before budding and flowering were calculated from temperature and day length response functions, and budding and flowering were completed when the integrated DVR reached 1.33 and 2.0, respectively. In addition the model assumed that leaf appearance terminates just before budding. This model predicted budding date, flowering date, and leaf appearance with acceptable accuracy and precision not only for the calibration data set but also for the validation data set which are independent of the calibration data set.

Key words: Chrysanthemum, Phenology, Leaf appearance, Simulation model

I. 서 론

단일식물인 국화의 꽃눈이 분화되기 위해서는 일정

시간 이하의 단일 조건이 필요한데(Adams *et al.*, 1998a), 국화의 꽃눈 분화 한계일장과 최적일장은 생태형에 따라 다르다. Kawata *et al.*(1987)은 7, 8, 9, 10월 개화 품종



* Corresponding Author : Byun-Woo Lee
(leebw@snu.ac.kr)

들을 이용한 실험에서 한계일장은 14시간이상이고, 최적일장은 12시간에서 14시간 사이며, 늦게 개화하는 품종일수록 한계일장과 최적일장이 모두 짧아지는 경향이 있다고 하였다. 한계일장과 최적일장 사이의 일장조건에서는 일장이 길어질수록 개화가 늦어진다(Hakuzan and Kooriyama, 2014). 발육 이후의 일장 반응은 발육 이전의 꽃눈 분화 단계에서 일장 반응과 다른데, Oda *et al.*(2010)은 18시간 이상 일장에서는 발육율이 감소하고 16시간 이상의 일장에서는 개화가 되지 않았다고 하였다.

국화 개화에는 일장뿐만 아니라 온도의 영향도 크다. 개화시기를 단축시키는 최적 온도는 17~22°C 사이로 알려져 있으며, 이보다 낮은 온도에서는 개화 시기가 지연이 된다(Ploeg and Heuvelink, 2006). 적은 이상에서는 개화가 늦어지는데 Nagasuga *et al.*(2013)은 평균 30.8°C의 대기온도를 연무냉각을 이용하여 27.7°C로 냉각시킨 경우에 국화 백선의 개화기가 단축됨을 확인하였으며, 또한 Nagasuga *et al.*(2008)은 발육 이후 고온(30/25°C, 33/28°C)에서도 발육에서 개화까지 기간이 지연됨을 보고하였다.

국화의 개화기를 조절 하기 위한 처리는 다양하지만 야간전조처리와 에세폰(Ethephon) 처리가 실용적으로 이용되고 있다. 야간전조처리는 야간에 빛을 비추어 연속암기를 일정 시간 이하로 양분하여 장일처리와 같은 효과를 내어 단일식물의 개화를 지연시키는 방법인데, 그 효과는 광원의 파장(Hakuzan and Nagayoshi, 2013)과 전조처리를 하는 시간(Hakuzan and Kooriyama, 2013) 등의 영향을 받는다. 전조처리 등을 하기 힘든 환경에서는 에세폰 처리를 이용하여서 개화를 조절하기도 한다. 백선 등 국화 품종을 이용한 실험에 의하면 에세폰을 처리를 하면 최종 엽수가 증가하며 꽃눈 발달과정이 지연되는데(Sugiura and Fujita, 2003b; Park, 2007), 처리 농도가 증가 할수록 이러한 현상은 더욱 심화된다고 한다(Sugiura and Fujita, 2003a). 또한 Tsuchiya(2001)가 국화 품종 백선에 에세폰 처리 횟수를 조절하면서 실험한 결과에 따르면 에세폰 최종 처리 일이 늦어 질수록 개화기가 뒤로 늦어지는 경향을 보인다고 하였다.

국화의 출엽 속도는 온도와 일사량의 영향을 받는다. 출엽 최저온도는 4°C 정도이고 최적온도는 21~25°C이며, 일사량 3.5mol m² day⁻¹ 이상의 일사량에서는 출엽 속도가 증가 하지 않는다고 한다(Hiden and Larsen, 1995). 기상요인과 재배관리에 따른 출엽, 생장, 발육, 개화 등의 국화 생육을 예측할 수 있다면 환경조절을 통한

품질관리, 수확기 조절, 적정 수확시기 결정 등 재배 관리 전반에 필요한 의사 결정에 도움이 될 것이다. 국화 생육의 환경반응을 고려하여 생육을 예측할 수 있는 다양한 국화 생육 모델들이 개발되었다. Charles-Edwards *et al.*(1979)은 국화의 개화예측 모델을 개발하였으며, Willits *et al.*(1992)은 국화의 양분 흡수 예측 모델을 개발하였다. 그 밖에 줄기 신장에 관한 모델(Karlsson and Heins, 1994), 일사와 재식밀도에 대한 국화의 영양산물 분배를 예측하는 모델(Lee *et al.*, 2002), 일사와 온도를 이용하여 화경의 발달을 예측 하는 모델(Nothnagl *et al.*, 2004), 일사와 온도 조건을 이용하여 엽 전개, 엽면적, 초장, 절간장 및 화경 등 외관적 품질을 예측 하는 모델(Yang *et al.*, 2007), 잎의 기공 전도도에 대한 모델(Li *et al.*, 2012) 등이 개발되었다. 이와 같이 다양한 모델이 개발되었음에도 불구하고, 개화기 조절을 위해 지역과 작기를 고려하여 다양하게 적용되고 있는 재배기술을 반영한 모델은 아직 없는 실정이다.

본 연구에서는 국화 백선 품종의 온도 및 일장 환경과, 전조처리 및 에세폰 처리에 대한 생육 반응을 예측할 수 있는 모델을 개발하여 그 성능을 검증하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

국화의 출엽 및 개화기 예측 모델은 백선 품종을 대상으로 하였다. 국내에서 많이 재배되는 백선은 자연조건에서 7, 8, 9월에 꽃이 피는 하추국형 스탠다드 국화이다. 개화까지 걸리는 시간은 7~9주로 추국보다 개화 반응이 빠르며 고온에 의한 개화 지연 또는 이상화 발생이 적다고 알려져 있다(Park, 2007).

다음과 같은 가정과 설계에 기반하여 온도, 일장, 전조처리, 에세폰처리 등에 대한 백선 품종의 반응을 수식화하고 프로그램 언어 Java로 구현하였으며, 문헌 수집자료와 실험자료를 이용하여 모델의 parameter를 추정하고 검증하였다.

2.1. 모델 가정

국화의 발육 단계 예측을 위해 우선 모델 개발에 필수적인 발육단계를 결정하고, 각 발육단계에 대한 구분 기준을 설정하였다. 국화의 상적발육단계(Phasic development stage, DVS)는 로제트기(Rosette Phase), 유약기(Juvenile Phase), 감광기(Photoperiod sensitive Phase), 성숙기(Ripening Phase) 4단계로 나눌 수 있으며, 이에 상응하는 외형적 발육 상태는 로제트 생장기(Rosette growth

stage), 줄기신장기(Stem elongation stage), 발뢰기(Flower bud initiation stage), 화기발달기(Floral organ development stage), 개화기(Flowering stage)로 구분할 수 있다(Kawata *et al.*, 1987). 본 연구에서는 삼목 재배가 일반적인 국내의 재배 현실을 고려하여 로제트기는 모델의 예측 범위에서 제외하고 국화의 발육단계를 유약기, 유약기~발뢰기, 발뢰기~개화기 3부분으로 나누어 모델을 구성 하였다. 유약기는 일장이 화아 분화에 영향하지 않는 기간이며, 유약기 이후부터 일장이 화아 분화와 발달에 영향을 한다. 따라서 화아 분화와 개화 예측을 위해서는 유약기의 종료 시점을 설정해야만 한다. 본 연구에서는 일정 수준 이상의 출엽수에 도달하면 화아 분화가 일장에 민감하게 반응하는 것으로 가정하였다. 감광기는 유약기가 끝난 이후부터 발뢰기까지 구간과 발뢰기에서 개화기까지의 구간으로 구분하였다.

Hakuzan and Kooriyama(2014)은 백선을 포함한 여러 국화 품종의 일장 반응 실험을 통하여 일장이 길어짐에 따라 최종 엽수가 증가함을 확인하였으며, Kawata *et al.*(1987)은 백선과 개화 특성이 유사한 7월, 8월, 9월, 10월 개화형 품종을 대상으로 한 실험에서 발뢰기와 개화기 모두 일장에 영향을 받는 것을 확인하였다. 한편, Park(2007)은 백선 품종에 대해 동일한 일장조건에서 온도 조건을 달리한 실험을 통하여 단일 처리 이후 발뢰기 도달 기간과 발뢰 이후 개화기 도달 기간 모두 온도에 대한 영향이 있었음을 보고하였다. 상기의 연구 결과를 기반으로 본 연구에서는 유약기가 종료된 후부터 발뢰기까지, 발뢰 이후 개화기까지의 기간들은 온도와 일장 모두에 반응을 하고, 이 반응은 누적이 되는 것으로 가정하였다. 다만, 발뢰 이전과 이후의 온도와 일장에 대한 반응 정도는 다른 것으로 가정하였다.

앞의 원기는 발뢰 이전까지 발생하므로(Ploeg and Heuvelink, 2006) 출엽수는 발뢰시까지 증가를 한다고 가정을 하여 최종 엽수를 계산을 하였다.

위 모델의 입력 변수인 온도는 개화 반응이 야간 온도보다는 일 평균 온도에 반응 하기 때문에(Adams *et al.*, 1998b) 일 평균온도를 이용하였으며, 일출 전과 일몰 후의 시민박명시간을 포함하는 일장은 재배지역의 위도를 이용하여 계산하여 이용하였다.

2. 2. 모델 설계

상기 기술된 모델에 대한 가정을 바탕으로 하추형 스탠다드 품종인 백선에 대한 출엽 및 개화기 예측 모델을 설계하였다. 출엽 및 개화 예측 모의를 위한 모델의 입력

변수는 환경조건과 재배조건으로 나눌 수 있는데, 환경 조건에 대한 입력변수는 일 평균 온도 및 일장이며, 재배 조건에 대한 입력변수는 정식일, 야간 전조처리 여부 및 기간, 에세폰 처리 여부 및 처리 횟수와 처리 시기 이다. 모델은 모의 결과로서 일별 출엽수 및 최종 엽수, 유약기가 끝나는 시기, 발뢰기, 개화기를 출력하도록 설계하였다.

모델의 모의 과정은 3단계로 구분할 수 있다. 첫째는 유약기 기간을 추정하는 것으로 온도반응 함수를 통해 엽수를 계산하여 유약기의 길이를 추정한다. 두번째는 발뢰기 추정 단계로 온도 함수와 일장 함수의 곱으로 그 기간을 예측을 한다. 일장함수와 온도함수는 일 단위의 발육속도(development rate, DVR)를 계산하며 그 값을 적산하여 발육단계(development stage, DVS)를 산출한다. 본 연구에서 유약기 종료 시점의 DVS를 1로 설정하고 DVS 값이 1.33이 되면 발뢰가 된 것으로 설정을 하였으며 발뢰가 되면 엽 발달도 중지된 것으로 계산을 하였

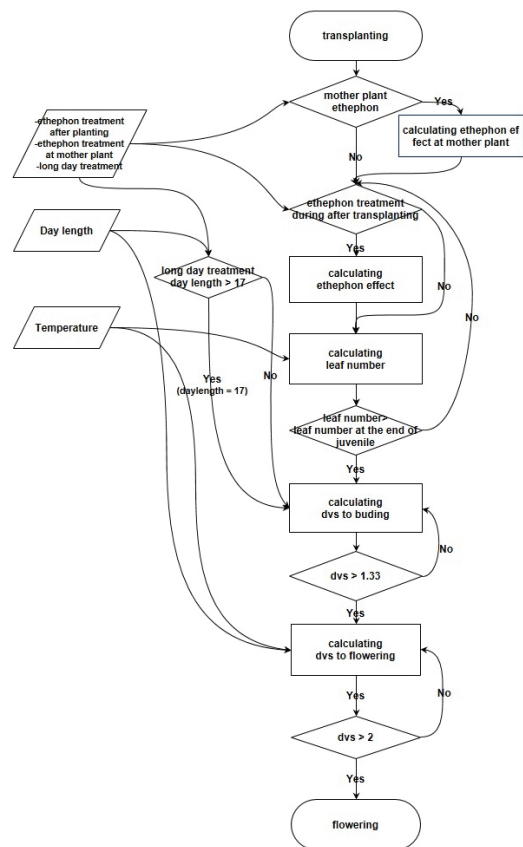


Fig. 1. Flowchart of chrysanthemum phenology and leaf appearance model.

다. 마지막 단계는 개화기 예측 단계로 개화기까지 온도와 일장 함수의 곱으로 계산을 하며 DVS 값이 2가 되면 개화가 된 것으로 계산을 하였다. 모델의 모의 과정은 Fig. 1에 순서대로 나타내었다.

2.3. 출엽 및 유약기 종료일 예측

유약기 동안 온도에 따른 출엽속도(L_T , leaf number/day)는 다음과 같은 베타 함수(Hiden and Larsen, 1995)의 식을 이용하였다.

$$L_T = \begin{cases} 0, & T \leq T_{Lb} \\ LA(1 - e^{-L\beta(T-T_{Lb})})(1 - e^{-L\gamma(T_{Lm}-T)}), & T_{Lb} < T \leq T_{Lm} \\ 0, & T \geq T_{Lm} \end{cases} \quad (1)$$

여기서, LA, L β , L γ 는 계수이며 T_{Lb} 는 출엽 최저온도, T_{Lm} 은 출엽 최고 온도이다. 이중 L β 는 국화를 재배하는 T_{Lb} 이상의 온도구간에서 온도의 상승이 L γ 는 T_{Lm} 이하의 온도에서 온도의 하강이 각자 출엽에 주는 긍정적인 영향을 반영하는 계수이다. 국화의 발달은 야간 온도가 아니라 일 평균온도에 영향을 받기 때문에(Adams et al., 1998b) 본 연구에서 온도 T는 일 평균온도를 이용하였다. 시점 t에서의 출엽수(Leaf number $_t$)는 다음과 같이 계산하였다.

$$Leaf\ number_t = Leaf\ number_{t-1} + L_T \quad (2)$$

최종 엽수는 노화되어 소실된 하위 엽을 포함하여 발생한 모든 엽을 누적하여 계산하였다. 한편, 누적 엽수가 특정 엽수에 도달하게 되면 유약기가 종료되는 것으로 가정하였다.

2.4. 유약기 이후 개화까지 소요 일수 예측

유약기 종료 이후 국화의 발달이 온도와 일장에 영향을 받는다는 모델의 가정에 기반하여 온도함수와 일장함수의 곱의 형태인 Hiden and Larsen(1994)의 식을 이용하였다(식 (3)). 식 (3)에서 f_{DL} 은 일장 반응 함수, f_T 는 온도 반응 함수, α 는 계수이다.

$$f_{DL,T} = \alpha \times f_{DL} \times f_T \quad (3)$$

$f_{DL,T}$ 는 발육속도(DVR, day $^{-1}$)이며 국화의 발달과정은 누적된다는 가정에 따라 식 (4)과 같이 발육단계(DVS)를 계산한다.

$$DVS_t = DVS_{t-1} + f_{DL,T} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)의 일장반응 함수(f_{DL})는 Kawata et al.(1987)의 연구 결과로부터 유도하였다. Kawata et al.(1987)은 7월, 8월, 9월, 10월 개화형 국화품종의 일장반응 실험을 통하여 정식 후 발육까지 기간과 개화까지 기간 모두 일정한 일장 이상에서 일장이 길어짐에 따라 기하급수적으로 증가함을 확인하였다. 여기서 발육속도(DVR)는 기간의 역수이므로 f_{DL} 함수의 결과 값은 일정한 일장 이상에서 그 값이 급격하게 감소하여야 하므로 이를 식으로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$f_{DL} = \begin{cases} 1/(a(DL - DL_c)^2 + length), & DL > DL_c \\ \frac{1}{length}, & DL_c \geq DL \end{cases} \quad (5)$$

식 (5)에서 DL_c 는 임계일장으로 이보다 긴 일장에서는 발달속도가 느려지고 그 이하의 일장에서 발육속도(DVR) 값은 $1/length$ 로 일정하다.

식 (3)과 식 (4)의 온도 반응 함수(f_T)는 식 (6)과 같으며, 이는 식물생장에 대한 온도 반응을 나타내는데 많이 쓰이는 베타성장함수(Beta growth function)이다.

$$f_T = \begin{cases} 0, & T \leq T_b \\ A(1 - e^{-\beta(T-T_b)})(1 - e^{-\gamma(T_m-T)}), & T_b < T \leq T_m \\ 0, & T \geq T_m \end{cases} \quad (6)$$

A, β , γ 는 계수이며 T_{Lb} 는 최저온도, T_{Lm} 은 최고온도이다. β , γ 는 국화발달에 온도가 미치는 영향을 모사하기 위한 계수이다.

2.5. 국화 재배기술의 반영

국화의 조기 발육을 방지하고 국화 품질 향상을 위해 에세폰 처리와 전조 처리 등 다양한 재배관리 기술이 적용되고 있다. 실용적인 모델을 구현하기 위해서는 이러한 처리들의 영향이 모델 모의에서 고려되어야 할 것이며, 이에 본 모델은 에세폰 처리와 전조처리의 영향을 반영하도록 구성되었다.

2.5.1. 에세폰(Ethephon) 처리

조기 발육을 방지하기 위한 에세폰 처리는 정식 전 모 주 처리와 정식 후 처리로 나눌 수 있다. 삽수를 채취하기 전에 모주에 에세폰을 처리하면 개화가 지연되고 최종 엽수 또한 증가하는 것으로 알려져 있다(Park, 2007). 따라서 모델에서는 에세폰 처리가 유약기를 연장시키는 것으로 가정하여 유약기 종료시 엽수(Fln), 즉 일장을 감응하기 시작하는 엽수가 에세폰 처리로 인해 증가하는 것으로 모델에 반영하였다. 식 (7)에서 Fln_{init} 은 에세폰 처리가 없는 경우 추정된 유약기 종료시 엽수이며, a 는 에세폰 처리에 따라 증가하는 엽수를 나타내는 계수이다. 즉, 정식 전 모주에 에세폰을 처리한 경우 모델은 유약기 종료를 결정하는 엽수(Fln_{me})를 Fln_{init} 보다 계수 a 만큼 증가시켜서 산출한다.

$$Fln_{me} = Fln_{init} + a \quad (7)$$

정식 후 에세폰 처리 또한 생육기간의 증가와 조기 발육 방지의 효과를 나타내며, 이에 따라 개화일이 지연된다. 정식 이후의 에세폰 처리가 모주에 대한 에세폰 처리와 구별되는 점은 처리시기 및 처리농도에 따라 영향 정도가 다르게 나타난다는 점이다. 처리의 횟수가 많아질수록 개화일이 더 늦어지며(Sakamoto and Tsuchiya, 2007), 처리 농도가 높을 경우 개화일의 지연은 더욱 크게 나타나는 것으로 알려져 있다(Sugiura and Fujita, 2003a). 본 모델에서는 정식 후 에세폰 처리 농도에 따른

영향은 고려하지 않았으며, 처리시기에 따른 영향만을 고려하였다. 식 (8)은 정식 후 에세폰 처리에 따른 최종 엽수(Fln_{et})를 나타낸 것이다.

$$Fln_{et} = Fln_{init} + (b \times Ln) \quad (8)$$

여기서, Ln 은 에세폰 처리 시점의 엽수며, b 는 에세폰 처리 후 엽수 증가분 추정을 위한 계수이다.

2.5.2. 전조처리

국화는 단일식물이므로 화아 분화 유도에는 일정시간 이상의 연속암기가 필요하다. 따라서 암기 중간에 일정 시간 이상 조명을 하는 전조처리(light interruption)를 하면 화아 분화가 지연된다. 절화 생산용 하추국인 백선은 절화장 확보를 위하여 생육 초기에는 전조처리를 하여 장일 조건에서 생육시키고 그 후 단일 조건에서 생육시켜 화아 분화를 유도하는 것이 일반적인 재배방법이다. 모델은 일 단위의 입력자료를 이용하도록 개발되어, 실제 전조 처리 시간을 반영하는 것은 어렵다. 그러므로 본 모델에서는 전조처리가 장일 조건을 만드는 처리임에 기초하여 전조처리 기간을 장일(본 모델에서는 20시간)로 설정하여 전조처리 효과를 반영하도록 하였다.

2.6. 모델 계수 추정 및 검증용 데이터 수집

모델의 계수 추정과 검증에는 기 발표된 문헌으로부터 수집한 자료와 국화 재배농가에서 2016년에 직접

Table 1. Summary of data sets used for model calibration and validation.

Year	Equation	Temperature condition	Day length	Light interruption	Ethephon treatment	Reference and remark
2006	Equation (1) (5) (6) calibration	20/12°C 23/16°C 26/20°C 29/24°C	12hours	Yes	Mother plant (No) After planting (Yes)	Park(2007)
2006	Equation (5) Calibration (2006)	Green house	Natural day length	Yes	Mother plant (Yes) After planting (Yes)	Kim <i>et al.</i> (2008)
2006	Equation (7)(8)	Green house	Natural day length	Yes	Mother plant (Yes) After planting (Yes)	Park(2007)
2015	Model validation	Green house	Natural day length	Yes	Mother plant (No) After planting (No)	Experiment for this paper
2007 2008	Model validation	Green house	Natural day length	Yes	Mother plant (Yes) After planting (Yes)	Kim <i>et al.</i> (2008)
2016	dho rmfsModel validation	Green house	Natural day length	Yes	Mother plant (No) After planting (No)	Experiment for this paper

조사한 자료를 이용하였다. 모델의 개발과 검증에 사용된 자료의 내용과 출처를 Table 1에 정리하였다.

2015년과 2016년에는 예산 소재 농가의 국화 재배 하우스에서 두 작기에 국화 생육 조사 실험을 수행하였다. 정식 이후 주기적으로 출엽수, 발되기, 개화기를 조사하였고, 하우스 내외부의 온도와 일사 환경을 HOBO logger(Onset Inc.)와 수평면일사계(CMP3, Kipps and Zonen, Holland)를 이용하여 계측하였다. 출엽 조사는 엽장이 1cm 이상 될 때 출엽으로 판정하였고, 발되기는 꽃봉오리 크기가 1cm 이상인 개체가 조사 개체의 50% 이상 되는 시기로 판정하였으며, 개화기는 가장 외각의 꽃잎이 90도 이상 벌어진 개체가 조사 개체의 50% 이상 되는 시기로 판정하였다.

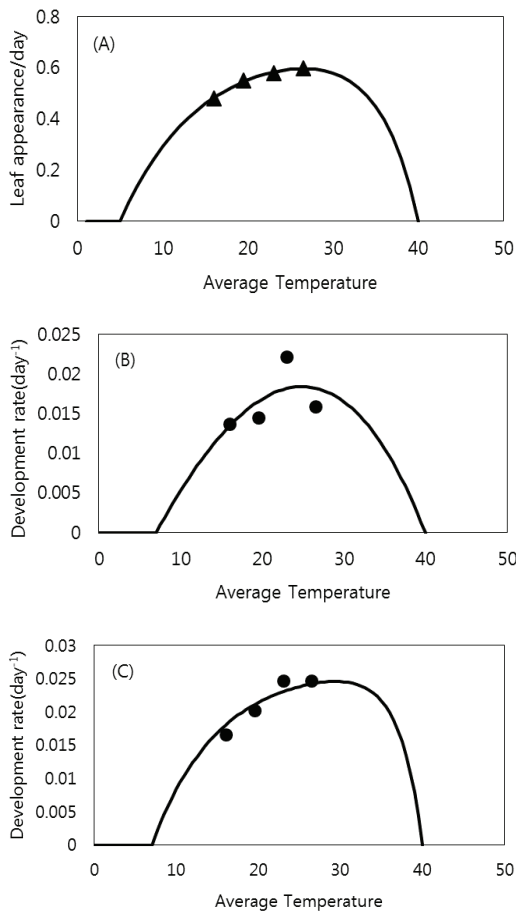


Fig. 2. Temperature responses of daily leaf appearance rate (A), development rate (day⁻¹) before budding (B), and development rate (day⁻¹) from budding to flowering (C) at optimal daylength condition (12h).

III. 결 과

3.1. 모델 계수 추정

식 (1)부터 식 (8)까지의 모델 식의 각 계수 값들은 Table 2에 제시된 모델 calibration data를 이용하여 Java 코드로 구현된 simplex method와 MatLab 프로그램으로 추정하였으며 추정 계수 값을 Table 2에 정리하였다.

출엽속도의 온도 반응식(식 (1))의 각 계수 값은 Park(2007)의 백선 품종에 대한 온도 반응 연구 데이터를 이용하여 산출하였다. 국화의 생육 온도 범위를 고려하여 T_{Lb}와 T_{Lm} 값을 각각 5°C와 40°C로 설정한 후 LA, Lβ, Lγ 값을 추정하였다. A 값은 0.693이며 이는 최적조건에서 1일동안 최대 0.693엽이 출엽됨을 의미한다. β, γ의 값 중 γ의 값이 크기 때문에 최적온도보다 고온부에서 저온부보다 더 크게 출엽속도가 감소하는 것으로 추정되었다(Fig. 2(A)). 식 (2)는 모델 가정 및 설계에 따라 정식 후 발되기까지의 출엽수를 산출하도록 구성하였다. 유약기 종료 시점을 결정하기 위해서는 우선 종료 기준 엽수(Fln)를 결정을 하여야 하는데, 15.5엽으로 추정되었다. 일장 반응에 대한 식 (5)의 계수 값에서 length 값은 최적조건에서 각 스테이지(유약기~발되기, 발되기~개화기)의 기간과 관련이 있다. 그 값은 Park(2007)의 12시간 조건에서의 실험 값을 이용하여 구하였으며, a, DLc는 2006년에 수행된 충청북도 농업기술원 시험연구보고서 자료를 활용하였으며, 유약기부터 발되기까지의 일장반응과 발되기부터 개화기까지의 일장반응을 분리하여 각 계수 값을 산출하였다. DLc는 한계일장으로 13.5 시간으로 발되와 개화 반응 모두

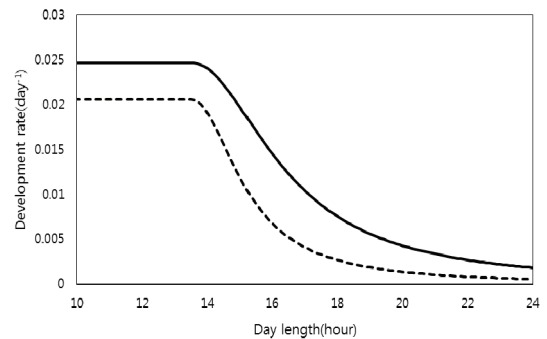


Fig. 3. Daily development rate response curve to daylength before budding (dotted line) and from budding to flowering (solid line). Y-axis value is f_{dt}(coefficient of equation[5]) that is development rate(day⁻¹) at optimal temperature condition.

Table 2. Parameter estimates of component model equations

Equation	Parameter	Estimate	Description	Unit
Equation(1)	LA	0.693	-	-
	$L\beta$	0.110	Effect of temperature increasing on budding time	-
	$L\gamma$	0.224	Effect of temperature decreasing on budding time	-
	T_{Lb}	5.0	Minimum temperature for leaf development	°C
	T_{Lm}	40.0	Maximum temperature for leaf development	°C
Equation(5) Budding	a	16.0	-	-
	DLC	13.5	Critical day length	hr
	$length$	48.5	Relative length from end date of juvenile stage to budding	-
Equation(5) Flowering	a	4.6	-	-
	DLC	13.5	Critical day length	hr
	$length$	40.5	Relative length from budding to flowering	-
Equation(6) Budding	A	1	-	-
	β	0.0033	Effect of temperature increasing on budding time	-
	γ	0.0255	Effect of temperature decreasing on budding time	-
	T_b	7.0	Minimum temperature for budding	°C
	T_m	40.0	Maximum temperature for budding	°C
Equation(6) Flowering	A	0.0268	-	-
	β	0.1243	Effect of temperature increasing on budding time	-
	γ	0.3603	Effect of temperature decreasing on budding time	-
	T_b	7.0	Minimum temperature for flowering	°C
	T_m	40.0	Maximum temperature for flowering	°C
Equation(7)	a	11.36	Effect of mother plant ethephon treatment	-
Equation(8)	b	0.519	Effect of ethephon treatment during juvenile stage	-

에서 차이가 없었고 a 의 값이 발육반응을 할 때 큰데 이는 일장에 발육 반응이 더욱 민감하게 반응을 하는 것을 의미한다(Fig. 3). 온도 반응에 대한 식 (6)의 계수 값 추정에는 Park(2007)의 온도 반응 연구 자료를 이용하였으며, 국화의 발육에 대한 온도범위를 고려하여 T_b 와 T_m 값을 각각 7°C와 40°C로 설정을 하였고, 식 (5)와 마찬가지로 유약기부터 발육기까지의 온도반응(Fig. 2(B))과 발육기부터 개화기까지의 온도반응(Fig. 2(C))을 분리하여 각 계수 값을 산출하였다. 추정된 계수를 볼 때 온도에 대한 반응은, 특히 고온부에서 개화시보다 발육시에 더욱 민감하게 반응을 하였다. 에세폰 처리시의

엽수 추정을 위한 식 (7)과 식 (8)의 계수 값 추정에는 Park(2007)의 에세폰 처리 연구 자료를 이용하였으며, 식 (7)의 계수 a 는 11.36엽, 식 (8)의 계수 b 는 0.5185로 추정되었다.

계수값 추정 후 Java 프로그램 언어를 이용하여 각 식들을 통합된 형태의 모델로 구현하여 모델의 발육기와 개화기 예측 성능을 계수 값 추정 자료(Calibration data)를 이용하여 검토하였다(Fig. 4). 개화기의 모의치(x)와 실측치(y) 간에는 $y = 0.995x$ 이고 결정계수(r^2)는 0.949로 비교적 정확하게 발육단계를 모의하였다.

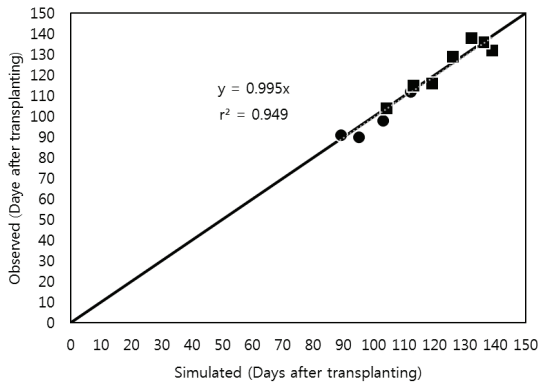


Fig. 4. Comparison between the observed and simulated flowering date in model calibration data sets (Rectangle (■) is data from Kim et al. (2008). Circle (●) is data from Park(2007)).

3.2. 모델 검증

모델 검증에는 모델의 계수 추정에 이용하였던 자료와는 별개의 자료를 이용하였다. 즉, 모델 검증에는 2007년 및 2008년에 수행된 충청북도 농업기술원 연구자료, 2015년 예산국화시험장 연구자료, 2016년 예산소재 농가 2개소(A, B로 구분함) 관측 자료를 이용하였다.

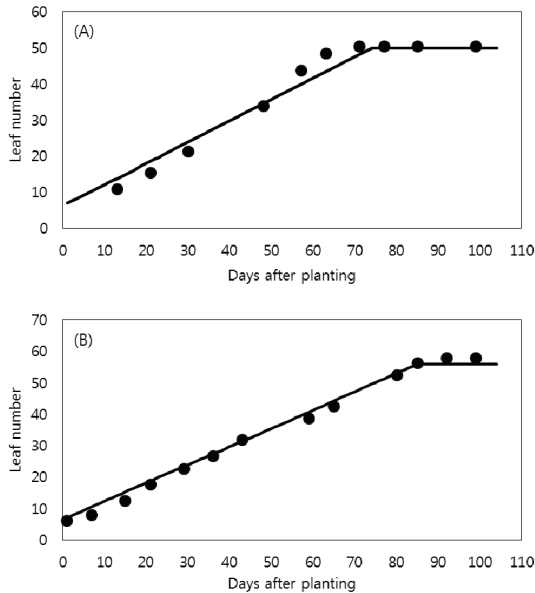


Fig. 5. Comparison between the observed (solid circle) and simulated (line) leaf numbers of chrysanthemum which was planted on May 12 (A) and July 7 (B), 2016 in a farm located in Chungnam province.

모델의 엽수 모의를 검증하기 위해서 2016년 예산 농가 A 자료를 이용하였는데 두 정식기(2016년 5월 12일, 2016년 7월 7일)에서 모두 생육진전에 따른 출엽수와 최종엽수를 비교적 정확하게 추정하였다(Fig. 5).

한편 2016년 예산 농가 2개소 관측자료, 2007년 및 2008년도 충청북도 농업기술원 재배시기 이동 실험자료를 이용한 검증에서 발육기 및 개화기의 모의치(x)와 실측치(y) 간에는 $y = 1.00x$ 이고 결정계수(r^2)는 0.94 이상이고 평균평방오차(RMSE)는 5.3일로 비교적 정확하게 발육단계를 모의할 뿐만 아니라(Fig. 6) 모델 calibration 에 이용한 자료를 이용한 검증(Fig. 4)과도 대등한 수준의 정확도(Accuracy)를 나타내어 모델의 정밀도(Precision)도 우수하였다.

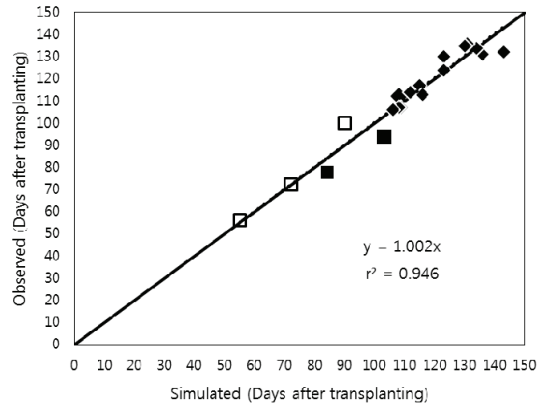


Fig. 6. Comparison between the observed and simulated budding and flowering date in model validation data sets. Rectangles (■, □) indicate data which were obtained from the plantings on May 12 and July 7, 2016 in a farm located in Chungnam province. Diamond(◆) is data from Kim et al. (2008). Open and closed symbols indicate budding and flowering dates, respectively.

IV. 고 찰

2016년 예산 농가에서 조사한 자료를 이용하여 출엽과 최종 엽수 모의의 성능을 검증한 결과는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 전체적으로는 높은 정확도를 나타내었으나 기간별로 나누어 비교해보면 생육 초기에는 엽수를 다소 과대 모의하고 후기에는 과소 모의하는 경향을 나타냈다. 이러한 초기의 엽수 과대모의는 정식으로 인한 스트레스를 모델에서 반영하지 못했기 때문으로 보이며, 후기의 과소 모의는 최종 엽들이 발육 직전 일시에 전개

하는 생육 특성을 반영하지 못했기 때문으로 판단된다. 따라서 향후 모델의 규모를 확장하고 입력자료의 종류를 확대할 경우, 온도 이외의 스트레스 요인을 고려하여 모델이 이를 반영할 수 있도록 설계가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 또한 Fig 2(A)에서 보는 바와 같이 적은 보다 높은 고온 조건에서의 실험자료가 부족하여 고온 조건이 국화의 출엽에 미치는 영향에 대한 결론은 추가적인 실험과 분석이 필요할 것으로 사료된다.

모델은 발육기와 개화기 모의에서 비교적 좋은 모의 성능을 나타냈다(Fig. 4; Fig. 6). 하지만 다양한 정식시기에 대한 모의에서 예측 정확도가 떨어지는 경우가 있었는데, 예를 들면 조기 정식한 국화의 개화일과 만기 정식한 국화의 개화일 비교에서 모델은 항상 조기 정식한 국화가 먼저 개화하는 것으로 모의하였다. 그러나 실제 관측 자료에서는 조기 및 만기 정식 간 개화일 차이가 없는 경우가 다수 발견되었다. 실제 관측 자료와 같은 현상이 나타나는 원인은 조기 정식한 하추국의 경우 생육초기에 받는 단일 감응이 생육 중간에 장일 환경에 놓이게 되면 소멸되고, 결국 후기에 받는 단일 감응만이 개화에 영향을 미치게 되기 때문으로 추정된다. 그러나 모델에서는 이러한 단일 감응의 소멸 현상을 반영하지 않고 DVR 값을 누적하여 실제보다 일찍 개화하는 것으로 모의하는 것으로 판단된다. 이런 현상을 모델로 구현을 하기 위해서는 DVS 값을 초기화 시키거나 일정 값으로 돌리는 구조가 필요하다. 하지만 본 모델에서는 이러한 반응을 수치적으로 구현할 자료의 미비로 인해 반영하지 못하였다. 그리고 이외에서 관측자에 따른 식물계절의 조사 및 판단의 차이 등도 모델의 정확도를 낮게 보이게 하는 요인으로 작용을 할 수 있다.

결론적으로 엽수 추정을 위한 모델식을 더욱 정교하게 만들기 위해서는 고온조건의 실험 등을 통해 더욱 넓은 온도 범위에 대해 예측이 가능하도록 개선이 필요하며, 이 밖에도 정식 후 발생할 수 있는 다양한 스트레스와 발육 직전의 동시 출엽 특성과 같은 시기별 출엽 특성을 모의에 반영할 수 있도록 개선해야 할 것이다. 또한 발육기와 개화기 모의 성능 향상을 위해서는 국화의 단일 및 장일 감응에 대한 생리적 특성을 반영할 수 있는 개선이 이루어져야 할 것이다.

적 요

단일식물인 국화의 생육은 온도, 일장, 일사량 등 기상 환경과 재배관리 조건에 영향을 받는다. 기상환경과 재배관리를 고려한 국화의 생육예측모델은 국화 재배 시 의사결정을 위한 도구로 이용될 수 있을 것이다. 이 연구에서는 국화 생육모델 구축을 위한 기초 작업으로 온도와 일장뿐만 아니라 에세폰 처리, 야간 전조처리 등 재배관리 정보를 입력변수로 하여 국화 품종 백선의 출엽과 식물계절을 예측할 수 있는 모델을 개발하였다. 모델은 국화의 생육시기를 유약기(Juvenile phase), 유약기 이후 발육기까지 기간, 발육기부터 개화기까지의 기간의 기간으로 구분하여 계산을 하도록 구성하였다. 유약기는 출엽속도의 온도 반응 곡선과 유약기의 종료를 결정하는 기준 엽수를 이용하여 추정하도록 구성하였다. 한편 모주와 이식 후 식물체에 대한 에세폰 처리가 유약기 종료시점의 엽수를 증가시키는 것으로 가정하여 모델에 반영하였다. 유약기 이후에는 온도와 일장에 관한 함수를 이용하여 발육속도를 계산하여 발육기와 개화기를 예측하도록 하였는데 야간전조 처리는 임계일장 이상의 장일로 가정하여 모델에 반영하였다. 그리고 최종 엽수는 잎의 출엽이 발육 직전까지 진행되는 것으로 가정하여 예측하였다. 위와 같이 구성된 모델의 계수는 온도 반응 실험과 정식시기 실험 등을 이용하여 추정하였고 프로그램 언어인 Java를 이용하여 구현하였다. 모델의 계수 추정에 이용한 자료(calibration 자료)뿐만 아니라 이와는 별개의 자료(validation 자료) 모두에 대하여 모델이 비교적 정확하게 발육기와 개화기를 예측할 뿐만 calibration에 비하여 validation의 정확도가 떨어지지 않았다. 한편 생육시기에 따른 출엽수와 최종엽수를 모델이 비교적 정확하게 예측하였으나 생육시기에 따라 다소 과소 또는 과대 예측을 하여는 경향을 보여, 온도 이외의 요인을 반영할 수 있는 실험을 통해 개선할 필요가 있는 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ0105492016)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Adams, S. R., S. Pearson, and P. Hadley, 1998a: An appraisal of the use of reciprocal transfer experiments: assessing the stages of photoperiod sensitivity in chrysanthemum cv. Snowdon (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.). *Journal of Experimental Botany* **49**(325), 1405-1411.
- Adams, S. R., S. Pearson, and P. Hadley, 1998b: The effect of temperature on inflorescence initiation and subsequent development in chrysanthemum cv. Snowdon (*Chrysanthemum*×*morifolium* Ramat.). *Scientia Horticulturae* **77**(1), 59-72.
- Charles-Edwards, D. A., K. E. Cockshull, J. S. Horridge, and J. H. M. Thornley, 1979: A model of flowering in *Chrysanthemum*. *Annals of Botany*, **44**(5), 557-566.
- Hakuzan, R. and Kooriyama, K., 2013: Effect of Night-break Treatment at Different Times on Inhibition of Flower Bud Initiation in Chrysanthemum. *Horticultural Research (Japan)*, **12**(4), 427-432
- Hakuzan, R. and Kooriyama, K., 2014: Relationship between Critical Day Length and Effective Night-break Time in Chrysanthemum. *Horticultural Research (Japan)*, **13**(4), 357-363.
- Hakuzan, R. and Nagayoshi, S., 2013: Effects of Night-break Light Quality on Floral Inhibition of Chrysanthemum. *Horticultural Research (Japan)*, **12**(2), 173-178
- Hidden, C., and R. U. Larsen, 1994: Predicting flower development in greenhouse-grown Chrysanthemum. *Scientia Horticulturae* **58**(1-2), 123-138.
- Karlsson, M. G., and R. D. Heins, 1994: A model of chrysanthemum stem elongation. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **119**(3), 403-407.
- Larsen, R. U., and C. Hidden, 1995: Predicting leaf unfolding in flower induced shoots of greenhouse-grown chrysanthemum. *Scientia Horticulturae* **63**(3-4), 225-239.
- Lee, J. H., E. Heuvelink, and H. Challa, 2002: Simulation study on the interactive effects of radiation and plant density on growth of cut chrysanthemum. *Acta horticulturae* **593**.
- Li, G., L. Lin, Y. Dong, D. An, Y. Li, W. Luo, X. Yin, W. Li, J. Shao, Y. Zhou, J. Dai, W. Chen, and C. Zhao, 2012: Testing two models for the estimation of leaf stomatal conductance in four greenhouse crops cucumber, chrysanthemum, tulip and liliun. *Agricultural and forest meteorology* **165**, 92-103.
- Nagasuga, K., T. Yano, K. Inamoto, and H. Yamazaki, 2013: Flowering and floret formation of summer-to-autumn flowering-standard type Chrysanthemums (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) under mist cooling during flower bud differentiation and developmental phase. *Horticultural Research (Japan)* **12**(3), 289-295.
- Nagasuga, K., H. Yano, H. Yamazaki, K. Inamoto, and A. Yamasaki, 2007: Influence of temperature during reproductive phase on flowering and floral morphology in summer-to-autumn flowering-type 'Iwa-no-hakusen' and autumn flowering-type 'Jinba' chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.). *Horticultural Research (Japan)* **6**(3), 479-485.
- Nagasuga, K., T. Yano, H. Yamazaki, K. Inamoto, and A. Yamasaki, 2008: The stages of flower bud development sensitive to low and high temperatures for flowering of summer-to-autumn flowering-type 'Iwa-no-hakusen' chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.). *Horticultural Research (Japan)* **7**(1), 103-109.
- Nothnagl, M., A. Kosiba, and R. U. Larsen, 2004: Predicting the effect of irradiance and temperature on the flower diameter of greenhouse grown chrysanthemum. *Scientia Horticulturae* **99**(3-4), 319-329.
- Oda, A., Sumitomo, K. Sumitomo, T. Tsunemi, M. Douzono, T. Motozu, and T. Hisamatsu, 2010: Variations of photoperiodic response of flower buds initiation and development in July- and August-flowering small-flowered spray chrysanthemum cultivars. *Horticultural Research (Japan)* **9**(1), 93-98.
- Ploeg, A. V. D., and E. Heuvelink, 2006: The influence of temperature on growth and development of chrysanthemum cultivars. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* **8**(2), 174-182.
- Sakamoto, H., and T. Tsuchiya, 2007: Influence of spraying ethephone on the flowering of non-branching type chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) cultivars. *Horticultural Research (Japan)* **6**(3), 411-416.
- Sugiura, H., and M. Fujita, 2003a: Effect of ethephon applications on growth and morphology of summer-to-autumn-flowering chrysanthemums [*Dendranthema morifolium*] in open culture. *Horticultural Research (Japan)*.
- Sugiura, H. and Fujita, M., 2003b: Effect of ethephon on leaf primordium and involucre formation in summer-to-autumn-flowering chrysanthemum. *Journal of Pesticide Science (Japan)*.
- Tsuchiya, T., 2001: Techniques for growth and flowering in August on chrysanthemum cv. 'Iwanohakusen'. *Bulletin of the Fukui Agricultural Experiment Station (Japan)*.
- Willits, D. H., P. V. Nelson, M. M. Peet, M. A. Depa, and J. S. Kuehny, 1992: Modeling nutrient uptake in

- chrysanthemum as a function of growth rate. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **117**(5), 769-774.
- Yang, Z. Q., W. H. Luo, F. D. Chen, J. J. Gu, X. M. Li, Q. F. Ding, C. B. Zhao, and Y. F. Lu, 2007: Quality prediction model of greenhouse standard cut chrysanthemum based on light-temperature effect. *Ying yong sheng tai xue bao= The journal of applied ecology/Zhongguo sheng tai xue xue hui, Zhongguo ke xue yuan Shenyang ying yong sheng tai yan jiu suo zhu ban* **18**(4), 877-82.
- Kim, T. I., S. C. Lim, B. K. Kang, and G. J. Lee, 2008: 무측지성국화 상품화 향상 연구. Chunbuk Agricultural Research and Extension Services.
- Park, H. S., 2007: Effect of temperature and plant growth regulator on the growth and flowering in 'non-branching' type *Dendranthema grandiflorum* Ramat. Ph.D. dissertation, Dankook University.
- Kawata, J., T. Toyoda, M. Uda, M. Okimura, M. Shibata, T. Kamenno, M. Amano, Y. Nakamura, and T. Matsuda, 1987: Factors controlling the flowering time of chrysanthemums. *Bulletin of the National Research Institute of Vegetables, Ornamental Plants and Tea. Series A* **1**, 187-222.