

스탠다드 절화 국화 ‘백마’와 ‘백산’의 시계열에 따른 동적 생육 특성 분석

박규현[†] · 이영분[†] · 이은혜 · 이정현^{*}

전남대학교 원예생명공학과

Analysis of the Time-related Dynamics Growth and Developmental Characteristics of Standard Chrysanthemum Varieties ‘Baekma’ and ‘Iwanohakusen’

Park Gyu Hyeon[†], Young Boon Lee[†], Eun Hye Lee, and Jeong Hyun Lee^{*}

Department of Horticulture, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

*Corresponding author: leetag@jnu.ac.kr

[†]These authors contributed equally to this work.

Abstract

This study sought to analyze and compare the growth parameters of the two standard chrysanthemum varieties of ‘Baekma’ and ‘Iwanohakusen’ using the Gompertz and the expolinear growth function to obtain dynamic growth data for a crop growth model and a big data analysis. The photoperiod was processed for 16 hours for 50 days after planting and then for 11.5 hours until the end of the experiment. The plant height, leaf area, and the number of internodes showed a sigmoid growth pattern over time. The dynamics of growth and development of both cultivars are significantly described in measurement datasets for more than 98% R^2 with the parameters of maximum growth or development (y_{max}), the relative growth or developmental rate (k), number of days to reach maximum growth or the developmental rate (t_{inf}) of the Gompertz growth function. The total fresh weights of both cultivars increase linearly after the exponential increase. The fresh weights for both cultivars over time are significantly described in the measurement data sets by the three parameters of the maximum absolute growth rate (c_m), maximum relative growth rate (r_m), and days to reach the linear growth phase (t_b) of the expolinear growth function ($R^2 > 0.98$). The dynamic changes in the plant height, leaf area, and the number of internodes are well described by the parameters of the Gompertz growth function. The total fresh weight is well explained by the parameters of the expolinear growth function. The Gompertz and expolinear growth functions can be useful statistical tools for analyzing and summarizing growth rates of standard chrysanthemums over time. It is concluded that the growth functions and parameters of the dynamics of growth and development of standard cut chrysanthemums can be used as important growth indicators considering the growth time at production sites.

Received: July 2, 2021
Revised: July 29, 2022
Accepted: August 5, 2022

 OPEN ACCESS



HORTICULTURAL SCIENCE and TECHNOLOGY
41(1):69-80, 2023
URL: <http://www.hst-j.org>

pISSN : 1226-8763
eISSN : 2465-8588

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright©2023 Korean Society for Horticultural Science.

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ 01388302)의 지원에 의해 수행되었음.

Additional key words: *Chrysanthemum morifolium*, expolinear growth function, Gompertz growth function, growth analysis, parameter

서 언

국내 스탠다드 절화 국화는 재배면적, 생산액, 판매량 등에서 국내 화훼시장의 중요한 위치를 차지하고 있다(MAFRA, 2020). 국내에서 재배되고 있는 스탠다드 절화 국화의 대표 품종은 ‘백선(Iwanohakusen)’, ‘신마(Jinba)’, ‘백마(Baekma)’가 있다(Pak et al., 2012; Yoo and Roh, 2015). 특히 ‘백마’는 하추국으로 기존의 품종에 비해 절화수명이 긴 특징으로 주로 수출 재배에 이용된다(Choi et al., 2009; Yoon et al., 2014; Roh and Yoo, 2021). ‘백선’은 하국 또는 하추국으로 무촉지성 특징을 가지고 있어 생력 재배에 적합한 품종으로 알려져 있다(Shin et al., 2005; Hisamura et al., 2016). 스탠다드 국화의 외형적 품질 요소는 꽃의 색깔, 절화장, 생체중 등이 있다(Karlsson and Heins, 1994, Kim et al., 2012; NAQS, 2020). 국화의 절화장은 절간의 수와 평균 절간장에 의해 결정되고(Pearson et al., 1995), 생체중은 광합성량과 수분함량에 의해 영향을 받는다(Kiehl et al., 1992). 국화의 발육량은 마디와 마디 사이를 의미하는 절간(internode)이 출현하기 위한 발육률인 절간 출현율과 최대 절간수와 관련이 있으며, 절간 출현율은 재배 온도에, 최대 절간수는 영양생장 기간에 의존하게 되므로 국화의 발육량은 온도와 장일처리 기간의 조합에 의해 영향을 받게 된다(Carvalho et al., 2002; van der Ploeg et al., 2007). 생체중은 재식밀도와 재배환경인 근권부 수분함량, 수광량 증가에 영향을 받는다(Kiehl et al., 1992; van der Ploeg et al., 2007; Lee et al., 2009). 국내 절화 국화에 관한 주요 연구는 절화품질 및 수명(Yoo and Roh, 2012; Roh et al., 2018), 개화 시기 조절(Kim et al., 2006; Roh and Yoo, 2021) 등에 관한 연구가 수행되었지만, 재배과정에 따른 생육환경 정보 및 생육량의 동적 변화 특성에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 특히 스탠다드 국화 ‘백마’와 ‘백선’은 봄 또는 초여름에 정식하여 여름과 가을에 채화하는 특정 시기를 중심으로 연구되었고, 적절한 생육상태를 유지하고 시장규격에 적합한 절화 생산을 위해 품종, 생육단계, 정식시기 등 다양한 환경조건에서 국화의 동적 생육특성에 대한 연구가 요구되고 있다(Yoo and Roh, 2012, 2014; Kwon et al., 2014; Roh and Yoo, 2016; Yoo et al., 2016; Kim et al., 2020).

국화의 동적 생육에 대한 해석 및 정량화를 위해 묘사적 모델 sigmoid 성장모델인 Gompertz 성장함수, Richards 성장함수, Logistic 성장함수와 지수선형(expolinear) 성장 모델을 이용한 연구가 수행되었다(Goudriaan and van Laar, 1994; Lee et al., 2003; Cha et al., 2014; Kim et al., 2020). 묘사적 성장모델은 시계열에 따른 식물체의 생육량을 해석할 수 있는 파라미터를 추정할 수 있고, 파라미터는 식물의 다이내믹한 생육에 대해 상대 성장률, 최대 성장률 도달한 정식 후 일수, 절대성장률, 선형적 성장으로 전환되기 위해 필요한 일수를 알 수 있다(Goudriaan and Monteith, 1994; Thornley and France, 2007). 재배 환경조건 아래 작물의 동적생육에 관여하는 생육 파라미터 분석을 통해 스탠다드 하국·하추국 절화 국화의 생육과정을 해석하는 것은 국화의 안정적 생산을 위한 작물 성장 모델의 기반 자료로 사용될 수 있다(Lee, 2002; Lee et al., 2009). 최근 시계열에 따른 식물체의 생육 변화량, 재배환경자료 수집, 생육과정 중 이미지 자료 등의 빅데이터를 이용하여 성장량 예측, 품질 예측을 위한 딥러닝 기반 학습모델 개발이 이뤄지고 있다(Na et al., 2017; Yang et al., 2019; Kim et al., 2020; Lee et al., 2020). 이에 대한 기반 자료로 온실의 환경과 식물의 생육은 정적 변수가 아닌 동적 변수에 의해 식물체의 다이내믹 생육 반응에 대한 연구가 활용될 수 있다(Karlsson and Heins, 1994; Lee et al., 2009). 따라서 본 연구는 스탠다드 절화 국화 ‘백마’와 ‘백선’을 동일한 환경조건에서 시계열에 따른 생육 과정을 요약 및 설명하기 위해 생육 함수 Gompertz 성장모델과 지수선형(expolinear) 성장모델을 이용하여 생육량을 추정하고, 각 모델의 생물학적 의미를 가지는 파라미터를 이용하여 품종별 생육 특성을 구명하며, 작물 성장 모형과 빅데이터 분석에 필요한 동적 생육 자료를 확보하고자 수행되었다.

재료 및 방법

작물의 재배관리

작물 생장 모형 분석과 빅데이터 분석에 필요한 스탠다드 절화 국화(*Chrysanthemum morifolium*)의 동적 생육자료를 확보하기 위하여, ‘백마’와 ‘백선’을 연동형 플라스틱 온실에 상시 장일처리(16시간 일장)한 모주에서 삽수를 채취하여 단동 플라스틱 온실(7.0m × 12.5m) 내 설치되어 있는 6개의 재배 베드(베드규격: 높이 20cm × 폭 70cm × 길이 900cm)에 펄라이트(1 – 2mm, KYUNG DONG ONE, Korea)를 충진하고 포습한 후 2019년 8월 27일 64.6주/m²로 삽목하여 발근될 때까지 간헐적으로 두상삽수 하였다. 재배기간 중 온실 내부의 평균 광 투과율은 65%였으며, 온실 내 설치된 주광색(6,500K)과 전구색(3,000K) LED(10W, ELBA, China)를 이용하여 식물체 정단부의 광도를 $6.5 \pm 0.7 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상으로 유지하여 삽목일로부터 50일 간 일장을 16시간(4시 – 20시) 동안 장일처리 하였고, 이후 재배 종료일까지 12시간 30분(19시 – 7시 30분) 동안 암막 스크린(다점부직포, 9m × 12m)을 이용하여 단일처리 하였다. 단일처리에 따른 국화의 화아분화 이후 꽃목의 신장을 억제하고자 삽목 후 80일 Daminozide을 400배로 희석하여 처리하였다. 양액공급은 삽수가 발근된 이후인 삽목 후 7일부터 일출 30분 후부터 15시 30분까지 외부 광량이 100J·cm⁻²마다 점적테이프(드리퍼 간격 10cm, 점적테이프 4줄/베드)를 이용하여 EC 2.0dS·m⁻¹와 pH 6.0의 양액을 드리퍼당 35cc(656cc·m⁻²)의 양으로 양액기(Magma-1000, Green CS, Korea)를 설정하여 공급하였다.

온실 내부의 환경조절은 온실의 양측창과 배기팬을 이용하여 온실 내부의 높은 온도와 습도를 관리하였고, 시설 내부의 낮은 온도는 전기 온수보일러 시스템의 온수(20°C – 50°C)를 FCU(10,000kcal·h⁻¹, 5대)로 보내 난방하여 조절하였다. 온실 내부의 CO₂ 농도는 액화 탄산가스를 이용하여 조절하였으며, 재배 기간 동안 주간 평균 338 ± 24ppm 이었다. 각 시스템의 작동은 외부 환경과 내부 환경을 고려하여 복합환경조절 시스템(Magma, Green CS, Korea)으로 조절하였으며, 일적산광량과 외부 온도, 온실 내부의 온도와 습도 및 CO₂ 농도는 Magma에 저장된 값을 이용하였다(Fig. 1).

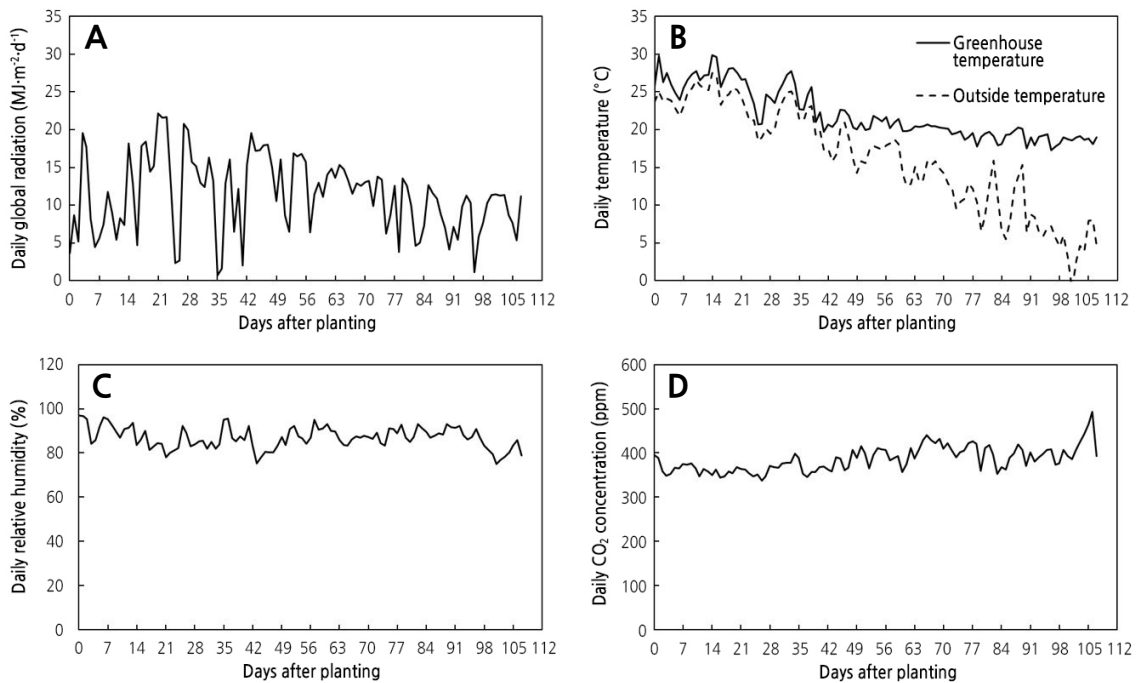


Fig. 1. Environmental conditions of the daily global radiation (A), daily temperature (B), daily relative humidity (C), and daily CO₂ concentration (D) during the growth of the standard chrysanthemums ‘Baekma’ and ‘Iwanohakusen’ from 27 Aug 2019 to 12 Dec 2019.

생육 조사

실험구의 배치는 난괴법으로 3반복 하여 온실 내부의 6베드 중 3베드씩 ‘백마’와 ‘백선’을 삼목하였다. 삼목일을 정식일로 보아 각 베드 당 국화의 발근이 이루어진 정식 후 14일 부터 수확 종료일까지 7일 간격으로 6주의 식물체를 샘플링하여 초장, 절간수, 엽수, 엽면적, 엽, 엽병, 줄기, 화기 등 개별 측정된 기관들의 무게의 합인 총생체중과 총건물중을 측정하였다. 각 처리구의 마지막 생육 조사는 개화 과정까지의 국화의 생육 특성을 파악하고자 설상화의 바깥 꽃잎이 수평적으로 펼쳐진 만개 상태인 2019년 12월 5일(‘백선’)과 2019년 12월 12일(‘백마’)에 조사하였다.

엽면적은 엽면적계(LI-3100C, LI-COR Inc., USA)를 이용하였고, 기관별 건물중은 농산물건조기(KED-132A, Kiturami, Korea)를 이용하여 70°C에서 72시간 이상 완전 건조한 후 실온에서 측정하였다.

생육량 비선형 및 선형 회귀분석

스탠다드 절화국화 ‘백마’와 ‘백선’의 동적 생육 특성을 분석하기 위해 정식 후 일수에 따른 초장, 엽면적, 절간수, 총생체중을 비선형 회귀식 Gompertz 성장모델과 expolinear 성장모델을 이용하였다. Gompertz 성장모델(Gompertz, 1825; Park and Lee 2021; Eqns. 1 and 2)을 이용하여 정식 후 일 수(x)에 따른 초장, 식물체 엽면적과 절간수의 최대 값($y_{max}; y_{ph}, y_{la}, y_i$), 상대 성장률($k; k_{ph}, k_{la}, k_i, d^{-1}$), 최대성장률에 도달한 정식 후 일 수($t_{mf}; t_{ph}, t_{la}, t_i, d$), x 가 $-\infty$ 일 때 y 값(intercept; $y_0; y_{0_{ph}}, y_{0_{la}}, y_{0_i}$)을 추정하여 두 품종을 분석하였다.

Gompertz 성장함수

$$y = y_{max} \cdot e^{-e^{-k \cdot (x - t_{mf})}} + y_0 \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dx} = y_{max} \cdot k \cdot e^{-e^{-k \cdot (x - t_{mf})} - k \cdot (x - t_{mf})} \quad (2)$$

‘백마’와 ‘백선’의 절대 성장률을 분석하기 위해, 정식 후 일수에 따른 초장, 엽면적과 절간수를 이용하여 추정된 Gompertz 성장 모델의 파라미터들을 추정하였고, 도함수(Eqn. 2)를 통해 줄기 신장률(stem elongation rate, $cm \cdot d^{-1}$), 엽면적 확장률(leaf area expansion rate, $cm^2 \cdot d^{-1}$), 절간 출현율(internode appearance rate, $nodes \cdot d^{-1}$)을 분석하였다.

정식 후 일수(x)에 따른 총 생체중은 지수선형 성장함수(Goudriaan and van Laar, 1994; Eqn.3)의 매개 변수인 최대 절대 성장률($c_m, g \cdot plant^{-1} \cdot d^{-1}$), 최대 상대 성장률(r_m, d^{-1}), 선형적 성장으로 전환되기 위해 필요한 일수(t_b, d)를 분석하였다.

지수선형 성장함수(expolinear growth function)

$$y = \frac{c_m}{r_m} \cdot \ln(1 + e^{r_m \cdot (x - t_b)}) \quad (3)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{c_m \cdot e^{r_m \cdot (x - t_b)}}{e^{r_m \cdot (x - t_b)} + 1} \quad (4)$$

정식 후 일수에 따른 생체중의 절대 성장률의 변화는 추정된 지수선형 성장함수의 파라미터들을 도함수(Eqn. 4)를 통해 정식 후 일수에 따른 품종별 총생체중 성장률(plant growth rate, $g \cdot plant \cdot d^{-1}$)을 분석하였다(Goudriaan and Monteith, 1994).

초장의 신장량에 따른 총생체중 증가량의 성장패턴 분석을 위해 선형모형을 이용하여 분석하였다.

통계분석

최종 생육 조사를 한 ‘백마’와 ‘백선’ 두 품종의 생육 특성 분석은 화기를 제외한 영양기관의 성장량(vegetative organs dry weight, g), 측정된 초장을 줄기 생체중으로 나눈 비경장(specific stem length, $\text{cm}\cdot\text{g}^{-1}$), 비경장의 역수인 비경중(specific stem weight, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}$), 개별 엽면적을 엽건물중으로 나눈 비엽면적(specific leaf area, $\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$)을 분석하였다. 동적 생육 특성을 분석하기 위해 정식 후 일수에 따른 초장, 엽면적, 절간수, 총 생체중을 비선형 회귀식 Gompertz 성장모델과 expolinear 성장모델을 이용하여 각 함수의 파라미터를 통계처리 프로그램(SPSS Statistics, IBM, USA)의 비선형 회귀분석으로 추정하였고, 초장의 신장량에 따른 총 생체중의 성장량 증가는 선형 회귀식으로 분석하였다.

결과 및 고찰

정식 이후 장일처리기간 동안 일적산광량은 $12.33 \pm 6.16\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, CO_2 농도 $365.7 \pm 15.6\text{ppm}$, 일평균 온도 $22.2 \pm 3.2^\circ\text{C}$, 일평균 RH $86.6 \pm 5.54\%$ 로 일적산광량은 높은 표준편차로 변화가 심하였으나, 시설 내부의 환경은 일정하게 유지되었다. 단일처리 기간 동안 일적산광량은 $10.55 \pm 3.67\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, CO_2 농도 $402.7 \pm 25.74\text{ppm}$, 일평균온도 $19.54 \pm 1.08^\circ\text{C}$, 일평균 RH $87.1 \pm 4.33\%$ 로 온실 내부의 환경의 변화폭이 안정적으로 관리되었다(Fig. 1).

동일한 환경조건에서 재배된 ‘백마’, ‘백선’의 최종 생육 특성은 서로 상이하였다(Table 1). 단일처리 후 출퇴소요일과 개화소요일은 ‘백마’는 ‘백선’ 보다 각각 5일, 7일 지연되었다. 총생체중과 총건물중은 ‘백마’가 ‘백선’보다 각각 72, 45% 무거웠고, 단위 줄기 무게 당 줄기의 길이를 나타낸 비경장(SSL)의 역수는 줄기의 강도를 간접적으로 나타낼 수 있는 지표로서 (Poorter et al., 2012; Wyka et al., 2019), ‘백마’는 ‘백선’보다 46% 더 높은 강도를 나타냈다. 이는 화성유도와 화아분화가 지연된 ‘백마’가 ‘백선’ 품종보다 영양생장기간이 길어져 만개까지의 정식 후 소요일수가 7일 지연되었으며, 최종생육량에 미치는 결과로 판단된다. 비엽면적(SLA)은 엽의 두께를 간접적으로 나타낼 수 있고(Johkan et al., 2010; Lee and Kim, 2014; Song et al., 2014), 품종에 따른 차이는 없었다(Table 1).

스탠다드 절화 국화는 단일조건에서 화기형성이 되는 대표적인 유한성장형 작물로서 ‘백마’, ‘백선’ 두 품종 모두 장일처리 기간에서 줄기의 신장과, 엽면적의 확장 그리고 절간의 출현은 정식 이후 낮은 생장률을 나타낸 후 생장률이 급속히 증가한 뒤

Table 1. Comparison of budding and flowering by days after the short-day treatment and final characteristics of the plant height, number of internodes, average internode length, leaf area (LA), total fresh weight (TFW), total dry weight (TDW), vegetative organs dry weight (VDW), specific fresh stem length (SSL), specific fresh stem weight (SSW), and specific leaf area (SLA) for the standard chrysanthemums ‘Baekma’ and ‘Iwanohakusen’ from 27 Aug 2019 to 12 Dec 2019

Cultivar	Days to visible flower bud ^z	Days to flowering ^y	Plant height (cm)	Average								
				Number of internodes	internode length (cm)	LA ($\text{cm}^2\cdot\text{plant}^{-1}$)	TFW ($\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$)	TDW ($\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$)	VDW ($\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$)	SSL ($\text{cm}\cdot\text{g}^{-1}$)	SSW ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}$)	SLA ($\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$)
‘Baekma’	23 ^x	47	93.6	47	2.0	770.5	74.7	10.5	9.1	4.5	0.23	252.5
‘Iwanohakusen’	18	40	79.5	45	1.8	550.3	43.5	7.2	6.2	6.6	0.16	246.8

^zFrom the start of the short-day treatment day to a visible flower bud (> 5 mm).

^yFrom the start of the short-day treatment day to a bud with opened with closed petals.

^xThese values are the average of three replicates and were measured at the final destructive measurement: ‘Baekma’ (107 DAP) and ‘Iwanohakusen’ (100 DAP).

단일처리로 인한 화성유도 및 화이분화 이후 완만하게 증가하는 sigmoid형의 신장 패턴을 보였다(Figs. 2 and 3). 절화 국화의 초장과 생체중은 시장의 주요 등급 지표이며(Karlsson and Heins, 1994; Kim et al., 2012) 이는 생육 과정에서 큰 영향을 받는다. 국화의 작물 성장 모형과 동적 생육 특성 분석을 위하여 품종 별 국화의 초장 신장량, 엽면적 확장량, 절간 출현수 그리고 생체중 증가량의 해석이 필요하여, S 성장모델인 Gompertz 성장 함수와 지수생장과 선형생장을 나타내는 expolinear 성장 함수를 이용하여 각 함수의 매개변수를 추정하고 시계열에 따른 성장률을 분석하였다(Goudriaan and van Laar, 1994; Lee, 2002; Park and Lee, 2021). ‘백마’의 초장의 신장, 엽면적의 확장특성은 Gompertz 성장 모형의 매개변수 최대 성장량(y_{max}), 상대 성장률(k)과 최대 절대 성장률에 도달한 정식 후 일수(t_{inj}), intercept(y_0)와 함께 측정값을 98% 이상 유의적으로 설명하였다(Fig. 2 and Table 2). Gompertz 성장 모형은 시그모이드형 성장을 잘 표현할 수 있는 모델로서, 유한생장 식물의 초장 신장 패턴(Cao et al., 2019; Park and Lee, 2021)과 강낭콩과 감자의 엽면적 확장량을 묘사했던 연구 결과와 유사하였다(Fleisher and Timlin, 2006; Singh et al., 2017).

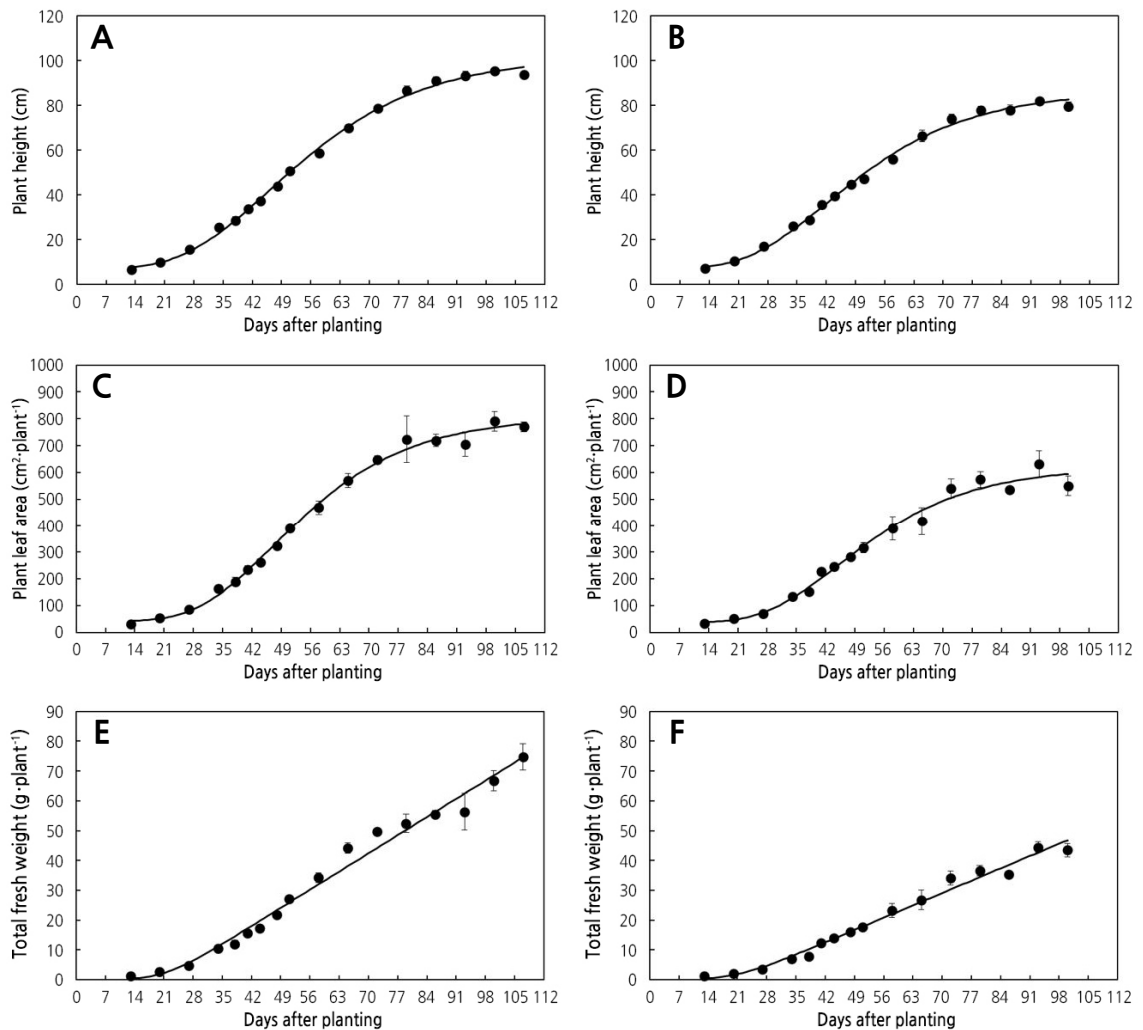


Fig. 2. Dynamics of the plant height (A and B), plant leaf area (C and D), and total fresh weight (E and F) as a function of the number of days after planting the standard chrysanthemums ‘Baekma’ (A, C, and E) and ‘Iwanohakusen’ (B, D, and F) from 27 Aug 2019 to 12 Dec 2019. Lines are the values estimated by the Gompertz growth model (A, B, C, and D) or the expolinear growth model (E and F) with four or three parameters respectively from Table 2. Vertical bars larger than the symbols indicate the standard error of the means of three replications with six samples ($n = 18$).

‘백마’와 ‘백선’의 초장 intercept($y_{0,ph}$)에서는 차이가 없었으나, 재배기간 동안 신장률은 품종 간 상이하였다. ‘백마’의 최대 신장률(MR_{ph})은 단위 일자당 ‘백선’ 보다 11% 더 신장하였으나, 단위일수에 따른 단위 초장당 1cm 신장에 필요한 성장률(k_{ph})은 8% 낮았다. Y_{ph} 의 차이는 장일처리기간 동안 ‘백마’의 절대 신장률이 높았고, MR_{ph} 에 도달하는 일수가 지연됨에 따라 y_{ph} 가 상이하였다(Figs. 2A, 2B, 3A, and 3B; Tables 1 and 2). 또한 ‘백마’의 평균 절간장이 길었으며, 이는 봄, 여름, 가을 작형 모두 채화 시 ‘백마’가 ‘백선’보다 초장이 더 길었던 결과와 일치하며, ‘백마’는 ‘백선’을 모본으로 하고 부분을 ‘신마’로 한 교배 육종된 품종이며, 초장의 신장은 ‘백선’과 유전적 특성 차이의 영향이 미쳤을 것으로 판단된다(Table 1; Karlsson and Heins, 1994; Shin et al., 2005).

스탠다드 절화 국화 ‘백마’의 시계열에 따른 엽면적 확장량에서 매개변수 intercept($y_{0,la}$)는 ‘백선’ 보다 15% 더 높게 추정되었다. 최대 엽면적 확장률에 도달하는 정식 후 일수(t_{la})는 ‘백선’ 보다 ‘백마’가 5.7일 지연되었고, 최대 엽면적 확장률(MR_{la})은 29% 더 높았다(Table 2). 두 품종의 절간 수는 차이가 없었으나 식물체 당 평균 개별 엽면적($cm^2 \cdot leaf^{-1}$)은 ‘백마’에서 34% 더

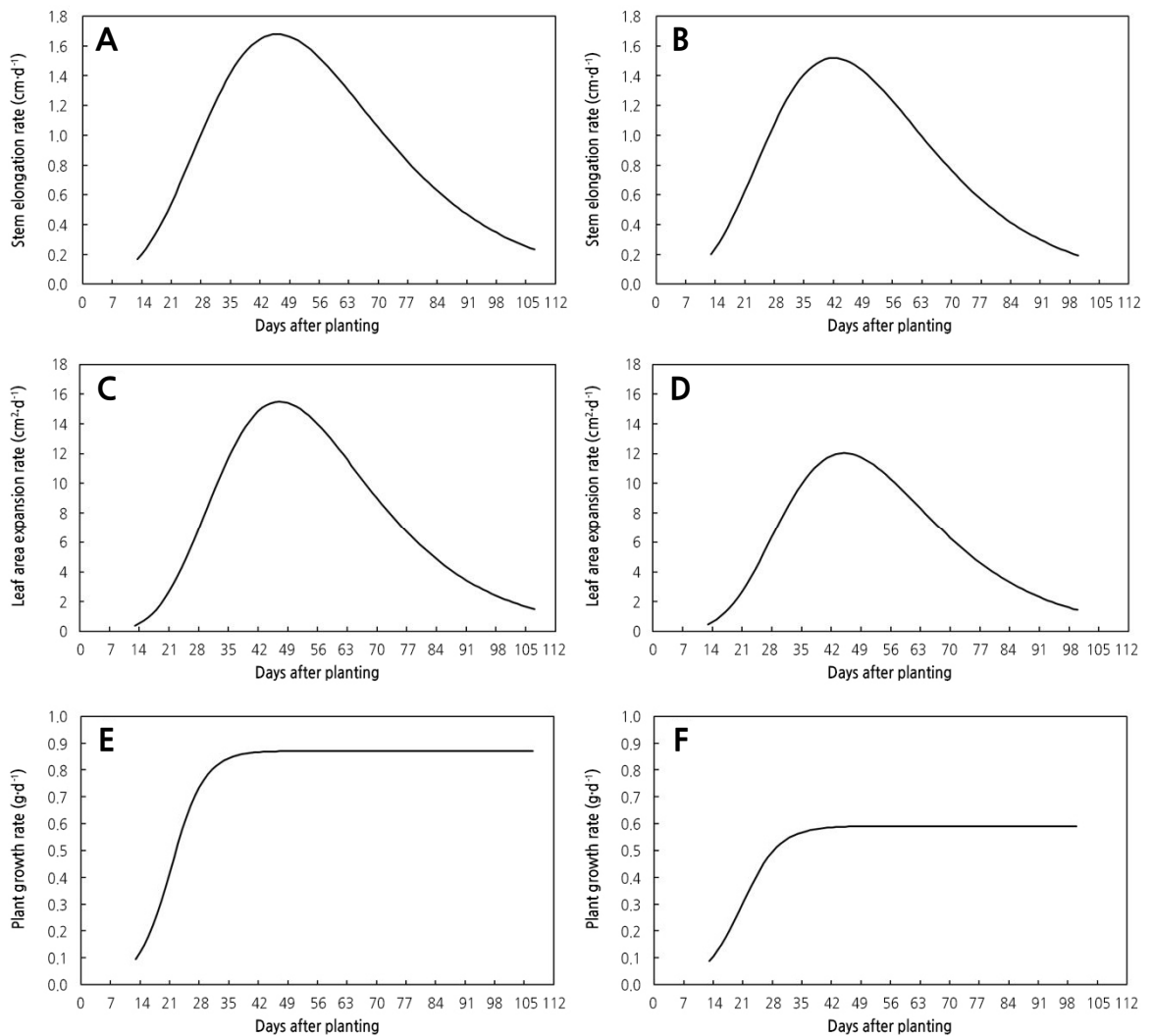


Fig. 3. Dynamics of the stem elongation rate (A and B), leaf expansion rate (C and D), and plant growth rate (E and F) as a function of the number of days after planting the standard chrysanthemums ‘Baekma’ (A, C, and E) and ‘Iwanohakuseri’ (B, D, and F) from 27 Aug 2019 to 12 Dec 2019. Values were calculated by the Gompertz or expolinear growth model derivatives (Eqn. 2 or 4).

넓었다. 스탠다드 절화 국화는 화성유도 및 화아분화 이후 출엽이 되지 않고, ‘백마’ 품종의 엽당 평균 엽면적이 넓어 ‘백선’보다 높은 최대 엽면적 확장량(y_{la})을 나타내었다(Figs. 2C, 2D, 3C, and 3D; Tables 1 and 2). Zandonadi et al.(2018)과 Kim et al.(2020)은 국화의 개별 엽면적의 차이는 품종 특성인 엽의 형태, 출엽된 엽수에 따라 다르다는 결과와 유사하였다.

절화 국화의 총생체중은 외형적 품질 지표 등급으로 경제적 측면에서 재배 환경과의 관계를 표현하는 중요한 요인이다(Kim et al., 2012). 정식 후 절화 총생체중 증가량은 ‘백마’와 ‘백선’에서 정식 후 생육 초기에 지수적 성장을 보인 후 선형적으로 증가하였다(Fig. 2E and 2F). 시계열에 따른 총생체중의 성장률 변화를 지수선형함수의 파라미터 최대 절대 성장률(c_m ; $g \cdot plant^{-1} \cdot d^{-1}$)과 최대 상대 성장률(r_m ; d^{-1}) 그리고 지수성장에서 선형 성장으로 변화되는 정식 후 일수(t_b ; d)의 세 개의 파라미터로 측정값을 98% 이상 유의적으로 설명할 수 있었다(Table 2).

총생체중의 최대 절대 성장률(c_m)은 ‘백마’가 ‘백선’보다 47% 높았고, 지수성장에서 선형 성장으로 변화되는 일 수(t_b)는 두 품종이 유사하였다(Fig. 3E and 3F; Table 2). Lee et al.(2003)은 절화 국화의 성장률을 지수선형함수를 이용하여 광량에 따른 최대 절대 성장률(c_m)과 최대 상대 성장률(r_m)을 예측할 수 있었다. 본 실험에서도 지수선형함수를 이용하여 시계열에 따른 품종 별 총생체중의 성장률을 예측 및 요약할 수 있었고, 국화의 재배환경 정보와 장일처리기간과 정식 시기에 따른 성장률의 분석을 통해 성장 파라미터들을 일반화하여 국화의 성장을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

초장의 성장 패턴과 유사하게 두 품종의 절간 수의 변화는 sigmoid의 형태를 나타냈다(Fig. 4A and 4B; Karlsson and Heins, 1994). 절화 국화의 초장은 평균 절간 수와 평균 절간장에 의해 결정되고(Carvalho et al., 2002), ‘백마’와 ‘백선’의 최대 절간 출현율은(MR_i) 차이를 보이지 않았다. 스탠다드 절화 국화는 단일처리 후 마디의 출현이 이루어지지 않으며, ‘백마’는 단일처리 이후 출리가 지연됨에 따라 ‘백선’은 하국 및 하추국으로 절간 출현율이 하추국인 ‘백마’ 보다 상대 절간 출현율(k_i)이 6% 높았으나, 최대 절간 출현율에 도달하는 정식 후 일수(t_i)에서 ‘백마’가 ‘백선’ 보다 4.2일 지연되었고, 품종 간 최대 절간 수(y_i)는 큰 차이를 나타내지 않았다(Fig. 5A and 5B; Table 3).

Table 2. The growth parameters of the Gompertz or expolinear growth model were estimated with a measurement dataset of the plant height, plant leaf area, and total fresh weight for the standard chrysanthemums ‘Baekma’ and ‘Iwanohakusen’ from 27 Aug 2019 to 12 Dec 2019. The parameters y_{ph} and y_{la} indicate the maximum plant height and maximum plant leaf area, respectively. In addition, k_{ph} and k_{la} (d^{-1}) denote the relative stem elongation rate and the relative leaf area expansion rate; t_{ph} and t_{la} (d) represent the number of days to the reach maximum growth rate (MR_{ph} or MR_{la}) for the maximum stem elongation rate and the maximum leaf area expansion rate, respectively. $y_{0,ph}$ and $y_{0,la}$ are the corresponding values of y when x is minus infinity. MR is calculated by the derivative of Eqn. 2 at t_{mfi} , where c_m denotes the maximum growth rate, r_m is the maximum relative growth rate, and t_b denotes the lost time when reaching the linear phase

Plant height	Cultivar	y_{ph} (cm)	k_{ph} (d^{-1})	t_{ph} (d)	$y_{0,ph}$ (cm)	R ²	MR _{ph} ^z ($cm \cdot d^{-1}$)
		‘Baekma’	95.1 ± 6.6	0.048 ± 0.005	46.0 ± 1.4	7.0 ± 3.6	0.997
	‘Iwanohakusen’	79.4 ± 6.4	0.052 ± 0.007	42.0 ± 1.4	7.0 ± 3.4	0.996	1.52
Plant leaf area	Cultivar	y_{la} ($cm^2 \cdot plant^{-1}$)	k_{la} (d^{-1})	t_{la} (d)	$y_{0,la}$ ($cm^2 \cdot plant^{-1}$)	R ²	MR _{la} ^y ($cm^2 \cdot d^{-1}$)
		‘Baekma’	765.6 ± 35.5	0.055 ± 0.005	47.1 ± 1.2	43.1 ± 21.9	0.995
	‘Iwanohakusen’	583.9 ± 79.8	0.056 ± 0.012	45.0 ± 2.2	37.4 ± 23.6	0.983	12.03
Total fresh weight	Cultivar	c_m ($g \cdot plant^{-1} \cdot d^{-1}$)	r_m (d^{-1})	t_b (d)	-	R ²	-
		‘Baekma’	0.871 ± 0.032	0.252 ± 0.750	21.3 ± 1.4	-	0.984
	‘Iwanohakusen’	0.591 ± 0.039	0.226 ± 0.496	20.7 ± 2.0	-	0.983	-

^zMaximum absolute growth rate for the plant height.

^yMaximum absolute growth rate for the plant leaf area.

비선형 모델의 주요 장점은 간결함, 해석 가능성 및 예측이다(Bates and Watts, 2007). Archontoulis et al.(2014)에 의하면 비선형 모델에서 매개변수 수를 감소시키고 매개변수의 해석 가능한 생물학적 의미가 있다면 선형모델보다 더 간결하게 사용할 수 있다고 보고하였다. 본 연구에서도 비선형 모델을 이용하여 스탠다드 절화 국화 ‘백마’와 ‘백선’ 두 품종의 시계열에 따른 초장, 엽면적, 총 생체중, 절간 수의 생육량을 유의적으로 설명할 수 있었다.

‘백마’와 ‘백선’의 초장에 따른 총 생체중이 유의적인 선형적인 관계($R^2 > 0.96; p < 0.001$)로 나타났고, Kim et al.(2015)의 고추의 생체중과 초장의 선형적 관계와 유사하였다(Fig. 6; Kim et al., 2015). ‘백마’는 1cm의 단위 초장당 총생체중은 ‘백선’

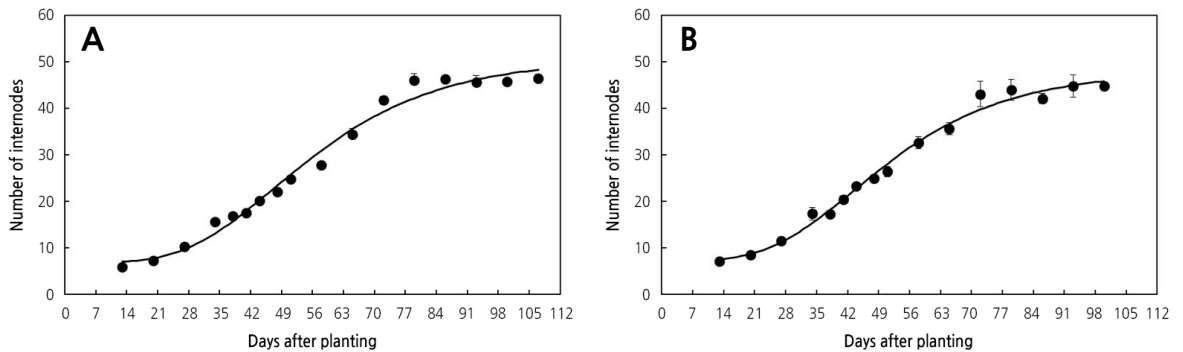


Fig. 4. Dynamics of the number of internodes as a function of days after planting for the standard chrysanthemums ‘Baekma’ (A) and ‘Iwanohakusen’ (B) from 27 Aug 2019 to 12 Dec 2019. Lines represent values estimated by the Gompertz growth model with the four parameters in Table 3. Vertical bars larger than the symbols indicate the standard error of the means of three replications with six samples ($n = 18$).

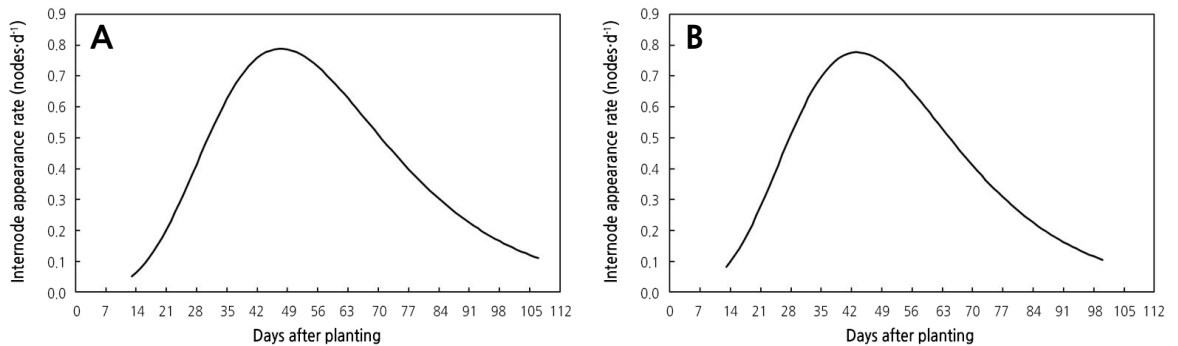


Fig. 5. The dynamics of internode appearance rate as a function of days after planting standard chrysanthemum ‘Baekma’ (A) and ‘Iwanohakusen’ (B) from 27 Aug 2019 to 12 Dec 2019. Values were calculated by Gompertz growth model derivative Eqn. 2.

Table 3. The growth parameters of the Gompertz growth model were estimated with a measurement dataset of the number of internodes on the standard chrysanthemums ‘Baekma’ and ‘Iwanohakusen’ from 27 Aug 2019 to 12 Dec 2019. The parameter y_i indicates the maximum number of internodes, k_i (d^{-1}) denotes the relative internode appearance rate, and t_i (d) represents the number of days to reach the maximum growth rate (MR) for the internode appearance rate. $y_{0,i}$ is the value of y when x is minus infinity. MR_i^z is calculated from the derivative of Eqn. 2 at t_i

Cultivar	y_i (nodes·plant ⁻¹)	k_i (d ⁻¹)	t_i (d)	$y_{0,i}$ (nodes·plant ⁻¹)	R ²	MR _i ^z (nodes·d ⁻¹)
‘Baekma’	43.8 ± 7.5	0.049 ± 0.059	47.5 ± 3.4	6.9 ± 2.6	0.985	0.79
‘Iwanohakusen’	40.6 ± 3.2	0.052 ± 0.009	43.3 ± 1.7	7.3 ± 1.9	0.989	0.78

^zMaximum absolute rate for the number of internodes.

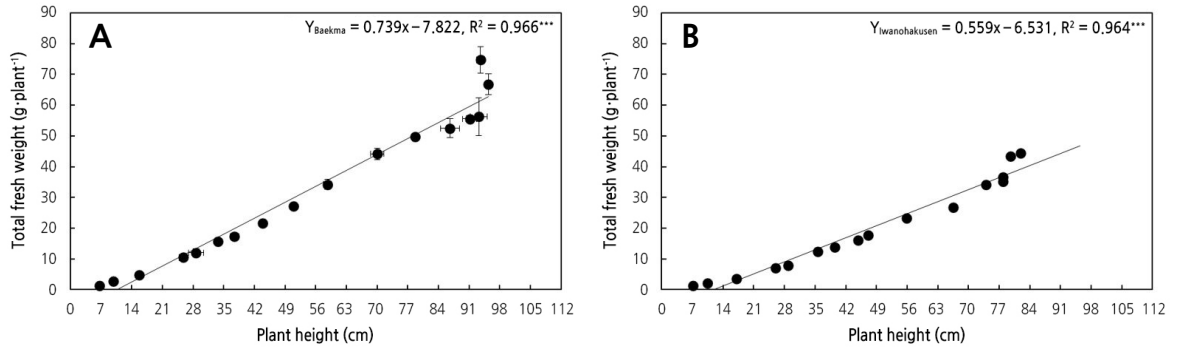


Fig. 6. Relationship between the plant height (cm) and total fresh weight (g·plant⁻¹) of the standard chrysanthemums ‘Baekma’ (A) and ‘Iwanohakusen’ (B) from 27 Aug 2019 to 12 Dec 2019. Vertical bars larger than the symbols indicate the standard errors (SE) of the mean of three replications with six samples (n = 18).

보다 32% 더 무거웠으며, 줄기 1cm당 줄기 생체중(SSW)은 46% 더 무거웠다. 동일한 환경조건에서도 스탠다드 절화 국화의 단위 초장에 따른 줄기 및 총생체중의 차이를 확인할 수 있었으며, 초장에 따른 국화의 절화중을 예측할 수 있었다(Fig. 6 and Table 1).

본 연구에서는 스탠다드 절화 국화 ‘백마’와 ‘백선’의 동적 생육자료를 빅데이터 분석 및 작물 성장 모델의 기초자료로 활용하고자 시계열에 따른 생육 특성을 분석하였다. 동일한 환경조건에서 재배된 두 품종의 최종 생육량은 상이한 결과를 나타냈다. 하지만 품종간 단순 생육 비교가 아닌 묘사적 성장모델인 Gompertz 성장 모델을 이용하여 시계열에 따른 시그모이드 생육을 나타낸 초장, 엽면적과 절간 수의 측정값을 파라미터와 함께 98% 이상 요약 및 설명하였다. 측정된 총생체중은 최대 상대 생장률, 최대 절대 생장률과 지수생장에서 선형생장으로 전환되는 정식 후 일수의 3개 매개변수와 함께 지수선형함수는 측정된 값의 98% 이상 설명 및 요약할 수 있었다. 정식 후 일수에 따른 국화의 동적 생육 반응을 이용하는 것은 재배과정에서의 생육 조절에 대한 의사결정에 중요한 요소이다. 특히 스탠다드 절화 국화에 대한 초장, 생체중의 동적 생육에 대한 정보는 생산 현장에서 정식 일 수와 품종에 따른 중요한 생육 지표로 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 정식 시기별 온도와 일장에 따른 Gompertz 성장함수와 지수선형함수의 파라미터 값 변화 정도를 알기 위해서는 추후 재배작형과 관련된 정식시기 및 장일처리 및 단일처리기간과 환경요인 중 광과 온도환경에 따른 파라미터의 변화에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

초록

본 연구는 작물 성장 모형과 빅데이터 분석을 위한 동적 생육자료 확보를 위해 스탠다드 절화 국화 ‘백마’와 ‘백선’의 시계열에 따른 생육량 측정값을 Gompertz와 expolinear 성장모델을 이용하여 주요 생육지표를 분석하고자 수행되었다. 일장조건은 삼목 이후부터 50일 동안 16시간 장일처리 하였고, 이후 실험 종료일까지 주간의 길이를 11.5시간으로 단일처리 하였다. 시계열에 따른 초장, 엽면적, 절간 수의 변화는 sigmoid형 생육 패턴을 나타냈다. Gompertz 성장 모델의 최대 값(y_{max}), 상대 생장률(k), 최대 절대 생장률에 도달한 정식 후 일수(t_{mf}), intercept(y_0)의 매개변수와 함께 초장, 절간 수, 엽면적 측정값의 98% 이상을 유의적으로 설명하였다. 국화의 시계열에 따른 총생체중의 변화는 지수적 생장 이후 선형적으로 증가하여, 지수선형함수의 파라미터인 최대 절대 생장률(c_m), 최대 상대 생장률(r_m), 지수생장에서 선형 생장으로 변화되는 정식 후 일수(t_b)와 함께 측정된 값의 98% 이상 유의적으로 설명할 수 있었다. 결론적으로 품종에 관계없이 시계열에 따른 초장, 엽면적, 절간 수의 다이내믹한 변화는 Gompertz 성장함수의 파라미터를 이용하여 유의적으로 묘사할 수 있었고, 두 품종의 생육 특성을 분석과 요약하는데 적합한 통계적 도구로 활용할 수 있었다. 또한 품종에 따른 총 생체중의 변화는 expolinear 성장함수의 매개변수를 이용

하여 요약하고 생장률을 분석할 수 있었다. 본 연구에서 사용된 스탠다드 절화 국화의 동적 생육에 대한 생장함수와 각 함수의 파라미터는 절화 국화 생산현장에서 정식 일 수에 따른 중요한 생육 지표로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

추가 주요어: *Chrysanthemum morifolium*, 지수선형 생장함수, 고퍼츠 생장함수, 생장해석, 매개변수

Literature Cited

- Archontoulis SV, Miguez FE, Moore JJ (2014) A methodology and an optimization tool to calibrate phenology of short-day species included in the APSIM PLANT model: Application to soybean. *Environ Model Softw* 62:465-477. doi:10.1016/j.envsoft.2014.04.009
- Bates DM, Watts DG (2007) *Nonlinear regression analysis and its applications*, Wiley Series in Probability and Statistics 365 page ISBN: 978-0-470-13900-4
- Cao L, Shi PJ, Li L, Chen G (2019) A new flexible sigmoidal growth model. *Symmetry* 11:204. doi:10.3390/sym11020204
- Carvalho SMP, Heuvelink E, Cascais R, Van Kooten O (2002) Effect of day and night temperature on internode and stem length in chrysanthemum: Is everything explained by DIF? *Ann Bot* 90:111-118. doi:10.1093/aob/mcf154
- Cha MK, Son JE, Cho YY (2014) Growth model of sowthistle (*Xeris dentata* Nakai) using expolinear function in a closed-type plant production system. *Kor J Hortic Sci Technol* 32:165-170. doi:10.7235/hort.2014.13141
- Choi SY, Hur EJ, Kwon OG, Lim JH (2009) Effect of night minimum temperature during winter season on growth and flowering in chrysanthemum 'Baekma'. *Flower Res J* 17:226-230
- Fleisher DH, Timlin D (2006) Modeling expansion of individual leaves in the potato canopy. *Agric For Meteorol* 139:84-93. doi:10.1016/j.agrformet.2006.06.002
- Gompertz B (1825) On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, pp 513-583. doi:10.1098/rstl.1825.0026
- Goudriaan J, Monteith JL (1994) A mathematical for crop growth based on light interception and leaf area expansion. *Ann Bot* 66:695-701. doi:10.1093/oxfordjournals.aob.a088084
- Goudriaan J, Van Laar HH (1994) *Modelling potential crop growth processes*. Current issues in production ecology. Kluwer Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, pp 78-94. doi:10.1007/978-94-011-0750-1
- Hisamura A, Mine D, Takeda T, Abe T, Hayashi Y, Hirano T (2016) Breeding of summer-autumn flowering chrysanthemum cv. Hakuryo with a little generation of malformed flower. *RIKEN Accel Prog Rep* 49
- Johkan M, Shoji K, Goto F, Hashida S, Yoshihara T (2010) Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *J Am Soc Hortic Sci* 45:1809-1814. doi:10.21273/HORTSCI.45.12.1809
- Karlsson MG, Heins RD (1994) A model of chrysanthemum stem elongation. *J Am Soc Hortic Sci* 119:403-407. doi:10.21273/JASHS.119.3.403
- Kiehl PA, Lieth JH, Burger DW (1992) Growth response of chrysanthemum to various container medium moisture tension levels. *J Am Soc Hortic Sci* 117:224-229. doi:10.21273/JASHS.117.2.224
- Kim JH, Paek KY, Lee JW, Lee CH, Yoon T (2006) Effects of plant growth regulators on safety control of flowering time and harvesting period short of cut flowering in *Dendranthema grandiflorum*. *Flower Res J* 14:95-103
- Kim KD, Suh JT, Lee JN, Yoo dL, Kwon M, Hong SC (2015) Evaluation of factors related productivity and yield estimation based on growth characteristics and growing degree days in highland kimchi cabbage. *Kor J Hortic Sci Technol* 33:911-922. doi:10.7235/hort.2015.15074
- Kim SJ, Kim JH, Park JS (2020) Development and comparison of growth regression model of dry weight and leaf area according to growing days and accumulative temperature of chrysanthemum 'Baekma'. *Protected Hortic Plant Fac* 28:414-420. doi:10.12791/KSBEC.2020.29.4.414
- Kim SJ, Lee SK, Kim KS (2012) Current research trend of postharvest technology for chrysanthemum. *Kor J Plant Res* 25:156-168. doi:10.7732/kjpr.2012.25.1.156
- Kwon YS, You BS, Jung JA, Park SK, Shin HK, Kil MJ (2014) Growth and flowering of standard chrysanthemum according to the light source and light quality in night break treatment. *Protected Hortic Plant Fac* 23:263-268. doi:10.12791/KSBEC.2014.23.4.263
- Lee JH (2002) *Analysis and simulation of growth and yield of cut chrysanthemum*. Ph.D. diss., Wageningen Agricultural University, Wageningen
- Lee JH, Goudriaan J, Challa H (2003) Using the expolinear growth equation for modeling crop growth in year-round cut chrysanthemum. *Ann Bot* 92:679-708. doi:10.1093/aob/mcg195
- Lee JH, Heuvelink E, Bakker MJ (2009) Interaction effects between light level and plant density on plant growth, development and external quality in year-around cut chrysanthemum. *Kor J Hortic Sci. Technol* 27:391-398.
- Lee JK, Oh JW, Cho YJ, Lee D (2020) A research about time domain estimation method for greenhouse environmental factors based on artificial intelligence. *Protected Hortic Plant Fac* 29:277-284. doi:10.12791/KSBEC.2020.29.3.277

- Lee JS, Kim YH (2014) Growth and anthocyanins of lettuce grown under red or blue light-emitting diodes with distinct peak wavelength. Kor J Hortic Sci Technol 32:330-339. doi:10.7235/hort.2014.13152
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (2020) Present condition of flower production 2020. Sejong, Korea
- Na MH, Park Y, Cho WH (2017) A study on optimal environmental factors of tomato using smart farm data. J Kor Data Inf Sci Soc 28:1427-1435. doi:10.7465/jkdi.2017.28.6.1427
- National Agricultural Products Quality Management Service (NAQS) (2020) Chrysanthemum standardization management. NAQS Press Korea
- Pak HS, Lee CW, Kim DC, Choi HG, Jeon NB, Lee YH, Choi BJ, Won MK (2012) The development of cropping system by cultivars of standard type chrysanthemum export farmers in Japanese high pick importing season. Kor J Hortic Sci Technol 30:149-150
- Park GH, Lee JH (2021) Analysis of dynamics of stem elongation on standard cut chrysanthemum 'Baekma' under different photoperiodism. Hortic Sci Technol 39:760-768
- Pearson S, Hadley P, Wheldon, AE (1995) A model of the effect of day and night temperatures on the height of chrysanthemums. Acta Hortic 378:71-79. doi:10.17660/ActaHortic.1995.378.9
- Poorter H, Niklas KJ, Reich PB, Oleksyn J, Poot P, Mommer L (2012) Biomass allocation to leaves, stems, and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. New Phytologist 193:30-50. doi:10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x
- Roh YS, Kim IK, Yoo YK (2018) Improved quality and vase life of cut flowers of the standard chrysanthemum cultivar 'Baekma' using wet shipping solutions with NaOCl and ClO₂. Kor J Hortic Sci Technol 31:863-875. doi:10.12972/kjhst.20180084
- Roh YS, Yoo YK (2016) Changes in soil environment and growth of cut flower by irrigation interval and fertilizer level in soil culture of *Dendranthema grandiflorum* 'Iwanohakusen'. J Korean Soc People Plants Environ 19:191-197. doi:10.11628/kspp.2016.19.3.191
- Roh YS, Yoo YK (2021) Growth and flowering by relighting and daminozide treatment in the flower bud formation stage of *Chrysanthemum morifolium* 'Baekma' Cut Flowers. Kor J Hortic Sci Technol 39:204-212. doi:10.7235/HORT.20210018
- Shin HK, Lim JH, Choi HR, Rhee HK, Kim MS, Bang CS, Kim YA, Kim YJ (2005) A new standard chrysanthemum cultivar, 'Baekma' with large white flower. Korean J Breed 37:119-120
- Singh J, Clavijo Michelangeli JA, Gezan SA, Lee H, Vallejos CE (2017) Maternal effects on seed and seedling phenotypes in reciprocal F1 hybrids of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Front Plant Sci 8. doi:10.3389/fpls.2017.00042
- Song KS, Jeon KS, Kim CH, Yoon JH, Park YB, Kim JJ (2014) Effect of shading level on growth and morphological characteristics of *Ligularia fischeri* seedling. J Bio Environ Control 23:88-94. doi:10.12791/KSBEC.2014.23.2.88
- Thornley JHM, France J (2007) Mathematical models in agriculture: quantitative methods for the plant, animal and ecological sciences, Ed 2nd ed. CABI Pub., Wallingford, UK. doi:10.1079/9780851990101.0000
- van der Ploeg A, Ranathunga JKN, Carvalho SMP, Heuvelink E (2007) Variation between cut chrysanthemum cultivars in response to suboptimal temperature. J Amer Soc Hort Sci 132:52-59. doi:10.21273/JASHS.132.1.52
- Wyka TP, Zadworny M, Mucha J, Żytkowiak R, Nowak K, Oleksyn J (2019) Species-specific responses of growth and biomass distribution to trellis availability in three temperate lianas. Trees 33:921-932. doi:10.1007/s00468-019-01828-3
- Yang MH, Nam WH, Kim T, Lee K, Kim Y (2019) Machine learning application for predicting the strawberry harvesting time. Kor J of Agric Sci 46:381-393. doi:10.7744/kjoas.20190026
- Yoo YK, Roh YS (2012) Effects of cutting condition on growth of rooted cuttings and cut flower in plug cutting of *Dendranthema grandiflorum* 'Baekma'. Kor J Hortic Sci Technol 30:13-20. doi:10.7235/hort.2012.11071
- Yoo YK, Roh YS (2014) Occurrence of white rust and growth of chrysanthemum 'Baekma' under various relative humidity and temperature conditions in the greenhouse. Kor J Hortic Sci Technol 32:803-811. doi:10.7235/hort.2014.14138
- Yoo YK, Roh YS (2015) Effects of shipping temperature and harvesting stage on quality and vase life of cut flowers in *Dendranthema grandiflorum* 'Baekma' for export. Kor J Hortic Sci Technol 33:61-69. doi:10.7235/hort.2015.14082
- Yoo YK, Roh YS, Nam BC (2016) Occurrence of white rust and growth of chrysanthemum 'Baekma' by control of relative humidity with night ventilation and heating in the greenhouse. Kor J Hortic Sci Technol 34:845-859. doi:10.12972/kjhst.20160089
- Yoon JW, Lee ZH, Kang MJ, Lee AK (2014) Maintenance of freshness as affected by pre-treatment and analysis of shipping temperature in cut *Dendranthema grandiflorum* 'Baekma' for export. Kor J Hortic Sci Technol 32:176-182
- Zandonadi AS, Maia C, Barbosa JG, Finger FL, Grosi JAS (2018) Influence of long days on the production of cut chrysanthemum cultivars. Hortic Bras 36:33-39. doi:10.1590/s0102-053620180106