

일장처리에 따른 스탠다드 절화국화 ‘백마’의 동적 줄기 신장 분석

박규현 · 이정현*

전남대학교 원예학과

Analysis of Dynamics of Stem Elongation on Standard cut Chrysanthemum ‘Baekma’ under Different Photoperiodism

Gyu Hyeon Park and Jeong Hyun Lee*

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

*Corresponding author: leetag@jnu.ac.kr

Abstract

The aims of this study were to analyze dynamic stem elongation of standard cut-chrysanthemum (*Dendranthema grandiflorum*) with different photoperiod levels. Standard cut-chrysanthemum cv. Baekma was grown at a 16 hr photoperiod until 23 days after planting, after that different photoperiods of 8, 10, 12, 14, and 16 hr (8H, 10H, 12H, 14H, 16H) were applied using fluorescent lights in a plant factory. The long-day treatments of 14H and 16H produced no flower buds and the 8H treatment was significantly delayed in flower budding initiation compared to the 10H or 12H treatments. The final characteristics of plant height, plant fresh weight, and number of internodes in the 14H and 16H treatments were significantly higher than in the other treatments. Plant height was significantly fitted with parameters of maximum stem length (y_{asm}), relative stem elongation rate (k), and days to reach maximum stem elongation rate (t_{inf}) in the Gompertz growth model as a function of days after planting. As the photoperiod increased longer than 14H, y_{asm} was continuously increased, t_{inf} was delayed in the 12H-16H treatments, and k was increased between the 8H and 12H treatments and decreased with long day treatments. The maximum stem elongation rate (MGR) was $1.15 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ in the 12H treatment, which was the highest stem elongation rate. Plant height and days after planting were translated to relative scales from 0 to 1 and 0 to 1 or 2 respectively. Relative stem length was significantly fitted and described 99% of relative plant height to developmental stage (DVS) with three parameters of maximum relative stem length ($y_{asm,DVS}$), relative stem elongation length (k_{DVS}), and days to reach maximum relative stem elongation rate ($t_{inf,DVS}$) in the adjusted Gompertz growth model. $y_{asm,DVS}$ was no differences between 8H and 12H in short days whereas 14H and 16H were estimated to be 1 and compared to 12H 22% higher at long day treatment. k_{DVS} was higher in the 14H and 16H treatments than in the 12H treatment, which means the long-day treatment increased growth rapidly to different DVS. $t_{inf,DVS}$ was estimated to be between 1.143 and 1.224 in the short day treatment and showed the maximum relative growth rate. Maximum growth ratio to DVS was 68% of plant height in 8H, 10H and 12H whereas 14 and 16H were 62% and 63% of plant height reached at $t_{inf,DVS}$. Our study suggested that the Gompertz growth model can describe and summarize

Received: April 26, 2021

Revised: May 18, 2021

Accepted: May 24, 2021

 OPEN ACCESS



HORTICULTURAL SCIENCE and TECHNOLOGY
39(6):760-768, 2021

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©2021 Korean Society for Horticultural Science.

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ01388302)의 지원에 의해 수행되었음.

the dynamic stem elongation pattern of standard cut chrysanthemum ‘Baekma’ and it is advisable to use a 14H photoperiod in long-day conditions and a 12H photoperiod in short-day conditions during the cultivation of ‘Baekma’.

Additional key words: *Dendranthema grandiflorum*, Gompertz, growth analysis, growth model, photoperiod, plant height

서 언

스탠다드 절화국화의 초장과 생체중은 시장가격을 결정하는 중요한 요소이다(Kim et al., 2010; MAFRA, 2019). 절화국화의 생장량은 재배조건에 따라 달라지며 특히 재배시기에 따라 영양생장량을 증가하기 위한 장일처리 기간, 단일처리 시 일중 평균 광량 및 야파처리 유무, 일중 평균온도와 주간과 야간의 온도 편차, 왜화제 처리와 빈도에 따라 영향을 받게 된다(Mastalerz, 1977; Karlsson and Heins, 1994; Carvalho et al., 2002). 재배기간 중 다양한 환경요인에 따라 작물은 다이나믹한 생육을 나타내고, 국화의 줄기 신장은 온도, 광도, 광질, 일장, 상대습도, CO₂ 농도, 재식밀도와 같은 요인에 의해 영향을 받는다(Carvalho and Heuvelink, 2001; Carvalho et al., 2002). 기상환경에 따른 국화의 생육반응을 이해하는 것은 재배관리에 있어서 매우 중요한 요소이며, 초장의 동적생장을 정량화하고 해석하기 위해서는 묘사적 모델인 생장함수를 이용한 생장해석이 필요하다. 묘사적 모델은 작물의 생장을 해석할 수 있는 유용한 도구로서 생육 측정값들의 정량적인 요약이 가능하며(Marcelis et al., 1998), 측정값을 기반으로(Penning de Vries et al., 1989; Lee, 2002) 시계열에 따른 식물체 혹은 기관의 생장 데이터에 대해 생물학적 의미를 가지고 있는 파라미터를 추정할 수 있다(Thornley and France, 2007; Wardhani and Kusumastuti, 2014). 파라미터는 다이나믹한 식물의 생육 및 수량에 대한 생물학적 반응을 나타낼 수 있어(Venus and Causton, 1979; Goudriaan and Monteith, 1990), 온실 작물의 생장 및 발육을 예측하여 생산자의 의사결정 방향을 제시하는 도구로 사용할 수 있다(Jame and Cutforth, 1996; Cha et al., 2014; Lee et al., 2019). 시그모이드 생장모델 중 Gompertz 모델은 이중지수로 배열된 세개의 파라미터를 가지고 있으며(Richards, 1959; Hunt, 1982; Thornley, 1982; Draper and Smith, 1998), 국화, 검은콩, 녹두, 알팔파, 옥수수, 숙마, 팥(Lee and Chung, 2003; Wardhani and Kusumastuti, 2014; Bem et al., 2017; Cao et al., 2019)과 같은 다양한 작물의 초장의 신장량을 묘사하는데 사용되었으며, 작물의 다이나믹한 생육을 묘사할 수 있고, 실험자료들을 요약할 수 있는 모델로 알려져있다.

스탠다드 절화국화 ‘백마’는 생태적 분류로 만생 하추국에 속하며(Shin et al., 2005), 재배과정은 영양생장을 위한 장일처리 기간, 생식생장을 위한 단일처리기간으로 구분된다. 장일처리기간과 단일처리기간을 나누는 기준은 광주기이며, 광주기는 국화의 영양생장과 생식생장을 조절할 수 있는 주요 환경요인이다(Khodakovskaya et al., 2009). 스탠다드 절화국화를 생산하기 위해 재배환경에 따른 생육조절을 통해 초장의 생장량을 제어할 수 있어야 하나, 시계열에 따른 스탠다드 절화국화의 다이나믹한 생장변화특성, 시설재배환경에 대한 기상정보와 같은 재배기술에 대한 구체적인 연구는 미흡한 실정이다. 따라서, 본 연구는 Gompertz 생장모델을 이용한 스탠다드 절화국화의 다이나믹 초장의 생장 패턴을 분석하여 스탠다드 절화국화 생장 조절기술 및 생육모델에 활용 할 수 있는 기초자료로 활용하고자 수행하였다.

재료 및 방법

실험 재료

스탠다드 절화국화(*Dendranthema grandiflorum*) ‘백마’ 삼목묘를 농가에서 구매하여 전남대학교 농업생명과학대학 식물공장(51.48m²) 내 펠라이트가 충전된 세개의 블록(블록당 60cm × 600cm)에 표준양액 2.5dS·m⁻¹ 을 포습하여 재식밀도 64.6주/m²으로 정식하였다. 처리구의 배치는 3블록으로 나뉘 각 블록에 5개의 처리구를 난괴법으로 60주씩 3반복 배치하였다.

재배 환경 및 일장처리

‘백마’는 순환식 수경재배 시스템을 이용하여 급액을 EC 2.5dS·m⁻¹, pH 5.5–6.0으로 관리하였고, 재배기간 중 식물공장 내부온도는 냉방기 및 시스템 에어컨(LTNW602SP, LG, Korea)을 이용하여 일평균온도 25°C로 설정하였다. 광원은 형광등 (30W, Osram, Germany)을 사용하여, 식물체 정단부에 조사되는 광합성 유효 광량자속 밀도(photosynthetic photon flux density, PPF)를 평균 147.6 ± 14.8 μmol·m⁻²·s⁻¹로 관리하였다. 정식 후 23일 동안 모든 처리구의 일장은 16시간으로 하였고, 각 처리구에 따라 실험종료일까지 8, 10, 12, 14, 16시간(8H, 10H, 12H, 14H, 16H) 동안 광조사하였다. 정식 후 24일 이후 처리구의 일장이 길어질수록 일 적산광량은 증가하였고, 단위시간 당 0.11MJ·m⁻² 적산광량이 증가하였다. 일 평균온도는 25.0 ± 1.0°C – 25.3 ± 1.8°C로 처리구간의 큰 차이를 보이지 않았고, 주야간온도편차 또한 낮았으며, 각 처리구의 온도환경은 유사하게 관리하였다(Table 1).

생육 조사 및 통계분석

정식일부터 최종조사일까지 각 블록 처리구의 5주 샘플을 대상으로 2–4주 간격으로 초장을 조사하였다. 최종조사는 설상화의 바깥꽃잎이 수평적으로 위치할 때를 기준으로 하였고, 개화하지 않은 처리구는 12H 이하 처리구 중 가장 늦게 개화한 처리구와 동일하게 실험을 종료하였다.

처리구별 측정된 ‘백마’의 시계열에 따른 초장은 비선형 회귀식 Gompertz 성장모델(Gompertz, 1825)을 이용하여 모델 함수의 매개변수를 SPSS 통계 프로그램(PASW18, IBM, USA)의 비선형회귀분석으로 추정하였다.

$$y = y_{asm} \cdot e^{-e^{-k \cdot (x - t_{inf})}} + y_0 \tag{1}$$

y_{asm} (cm)는 점근선 곡선의 x가 무한일때의 최대값이며, k (d⁻¹)는 곡선의 형태를 결정하는 상대 성장율, t_{inf} (d)는 최대생장에 도달하는 일수, y_0 (cm)는 x가 -∞일 때 y값을 나타냈다. x (d)는 정식 후 일수이다.

시계열에 따른 줄기의 절대 신장율(absoluted stem elongation rate, cm·d⁻¹)는 Eq. 1의 도함수를 이용하여 계산하였다(Eq. 2).

$$\frac{dy}{dx} = y_{asm} \cdot k \cdot e^{-e^{-k \cdot (x - t_{inf})} - k \cdot (x - t_{inf})} \tag{2}$$

초장은 처리에 따라 개화일이 상이하여, 초장을 발육단계에 따른 Gompertz 성장모델의 매개변수를 추정하기 위해 독립변수를 국화의 발육 단계(development stage, DVS)를 장일처리 동안은 0에서 1.0, 단일처리기간 시작일을 1.0 각 처리구의 실험

Table 1. Averaged daily photosynthetically active radiation (PAR) integral of before (BT) and after (AT) photoperiod treatments by fluorescent lamps and day, night and daily temperature during the standard cut chrysanthemum ‘Baekma’ cultivation period

Photoperiod treatment ^z	BT PAR integral (MJ·m ⁻²)	AT PAR integral (MJ·m ⁻²)	Day temperature (°C)	Night temperature (°C)	Daily temperature (°C)
8H	1.77	0.88	26.1 ± 0.4	24.4 ± 0.4	25.0 ± 1.2
10H	1.77	1.11	26.3 ± 0.8	24.6 ± 0.3	25.3 ± 1.4
12H	1.77	1.33	26.7 ± 1.2	24.4 ± 1.2	25.5 ± 1.8
14H	1.77	1.55	25.5 ± 1.3	24.4 ± 1.3	25.1 ± 1.6
16H	1.77	1.77	25.8 ± 1.5	24.4 ± 1.4	25.3 ± 1.8

^zAll treatments were given 16 hours day-length for 23 days after planting.

종료일은 2.0로 변환하여 회귀모델의 독립변수로 사용하였다. 종속변수 초장은 최대 길이대비 각 측정값을 나눈 비를 0에서 1.0로 변환하였다(Karlsson and Heins, 1994; Lee, 2002; Seo et al., 2016). 14H과 16H 처리구는 재배기간동안 장일처리가 지속되었으므로, DVS 0에서 1.0 사이 값으로 변환하여 DVS에 대한 변환된 Gompertz 성장모델(Eq. 3)의 매개변수를 추정하였다.

$$y_{DVS} = y_{asm.DVS} \cdot \left(1 - e^{-k_{DVS} \cdot (DVS - t_{inf.DVS})}\right) + y_{0.DVS} \quad (3)$$

변환된 파라미터의 단위는 측정값을 상대값으로 변환되었기 때문에 각 파라미터의 단위는 상쇄 되었으며, $y_{asm.DVS}$ 는 점근선 곡선의 발육단계가 무한일때의 최대값이며, k_{DVS} 는 곡선의 형태를 결정하는 상대 성장율, $t_{inf.DVS}$ 는 최대성장율에 도달하는 발육단계, $y_{0.DVS}$ 는 DVS가 -∞일 때 y_{DVS} 값을 나타냈다.

결과 및 고찰

Table 2는 일장처리에 따른 스탠다드 국화 ‘백마’의 최종 생육량에 대해 나타냈다. 일장처리 후 평균 출퇴소요일은 단일조건인 8H 처리구에서 59일로 가장 지연되었고, 14H와 16H 장일 처리구에서는 출퇴하지 않았다. 8H 처리구의 출퇴지연은, 일장처리 후 일적산광량(daily light integral, DLI)이 $0.88\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 로, 일적산광량 $1.0 - 1.5\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 에서는 국화의 화아분화를 위한 소요시간에 광량의 영향은 거의 없지만, 더 낮은 광수준에서 화아분화가 지연된다는 결과와 유사했다(Langton, 1992). 평균 개화소요일은 8H, 10H, 12H 처리구 간에 유의적인 차이는 없었다. 14H와 16H 처리구에서 출퇴되지 않았고 지속적인 생장이 이뤄졌으며 장일은 화아분화억제 효과가 뛰어났고(Kwon et al., 2012), 16시간 이상의 광주기에서는 개화가 되지 않는다는 결과와 유사하였다(Oda et al., 2010). 일장 처리에 따른 최종 초장과 마디 수는 단일 및 중일조건인 8H, 10H, 12H 처리구에서는 유의적인 차이를 보이지 않았고, 12H-16H 처리구까지의 초장과 마디수의 변화는 단위일장 당 각각 14cm, 11마디 증가하였다(Table 2). Carvalho et al.(2003)에 따르면 장일처리기간의 초장 신장량은 절간장의 신장보다는 절간수의 증가에 의해 증가한다고 하였고, 광주기의 증가는 절간수를 증가시켜 국화의 초장을 신장시킨다고 하였다(Cathey, 1974). 처리구의 평균절간장은 1.2 - 1.4cm로 일장처리에 따른 차이를 보이지 않았고, 따라서 장일조건인 14H와 16H 처리구에서 지속적인 마디 출현에 의해 초장과 마디 수가 신장 및 증가한 것으로 Carvalho et al.(2003)과 Cathey(1974)의 결과와 동일하였다. 식물체의 생체중은 단일처리구인 8H와 10H간의 유의적인 차이가 보이지 않았고, 일장의 증가에 따른 10H에서 16H 처리구까지의 식물체 생체중은 선형적인 증가를 나타냈다($y = 9.87x - 57.47, R^2 = 0.961, P = 0.02$).

Table 2. Final characteristics of budding and flowering days after treatment, plant height, plant fresh weight, and number of internodes of standard cut chrysanthemum ‘Baekma’

Photoperiod treatment ^z	Days to budding ^y	Days to flowering ^x	Plant height (cm)	Plant fresh weight (g)	Number of internodes
8H	59 ^w a ^v	92 a	56.0 a	42.22 a	46 a
10H	49 b	83 a	57.1 a	44.89 a	45 a
12H	50 b	100 a	59.5 a	58.29 b	40 a
14H	-	-	90.5 b	74.75 c	69 b
16H	-	-	117.2 c	105.17 d	83 c

^zAll treatments were given 16 hours day-length for 23 days after planting.

^yFrom start of photoperiod treatments day to visible flower bud (>5 mm).

^xFlower bud opened with closed petals.

^wThe values are an average of three replicates and measured at final destructive investigation; 8H(129 DAP); 10H(114 DAP); 12H, 14H, 16H(155 DAP); 8H - 12H was full bloomed; 14H and 16H was no flower bud.

^vMean separation within columns by Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

Fig. 1A는 ‘백마’의 초장신장량을 Gompertz 성장모델의 파라미터 최대줄기신장량(y_{ams}), 상대줄기신장율(k), 최대줄기신장율에 도달하는 일수(t_{inf})를 이용하여 97%이상 유의적으로 묘사할 수 있었다(Fig. 1A and Table 3). 점근선의 최대값인 y_{ams} 의 12H 이하의 단일 조건에서는 각 처리구에 따라 유의적 차이가 없었으며, 최대 생장율에 도달하는 정식 후 일수에 정식 후 28일로 유의적인 차이가 없었다. 반면 Gompertz의 생장율을 결정하는 k 의 단일기간 동안의 일장이 길수록 급격한 생장율은 보였다. 장일 처리구인 14H와 16H 처리구에서 초장은 지속적으로 증가하였으며, 12시간 이상의 일장에서 y_{ams} 의 변화는 장일 처리 1시간당 23cm의 초장이 신장량을 보였다. 장일처리구의 t_{inf} 는 일장이 12H에서 16H까지 증가할수록 최대 생장율에 도달하는 정식 후 일수는 선형적으로 증가하였다($y = 11.65 - 111.17x$, $R^2 = 0.999$, $P = 0.02$). Gompertz 성장량의 변화율에 관여하는 k 값이 14H와 16H 장일처리구에서 12H 처리구 보다 73%, 65% 낮았다(Table 3). 일장에 따른 최대 줄기신장율(MGR)은 처리구 중 12H 처리구에서 1.15 $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 장일처리인 14H와 16H 처리구에 비해 각각 64%와 29% 높았다(Fig. 1B and Table 3). 장일조건인 14H와 16H 처리구가 12H 처리구보다 낮은 MGR을 나타낸 것은 영양생장이 지속

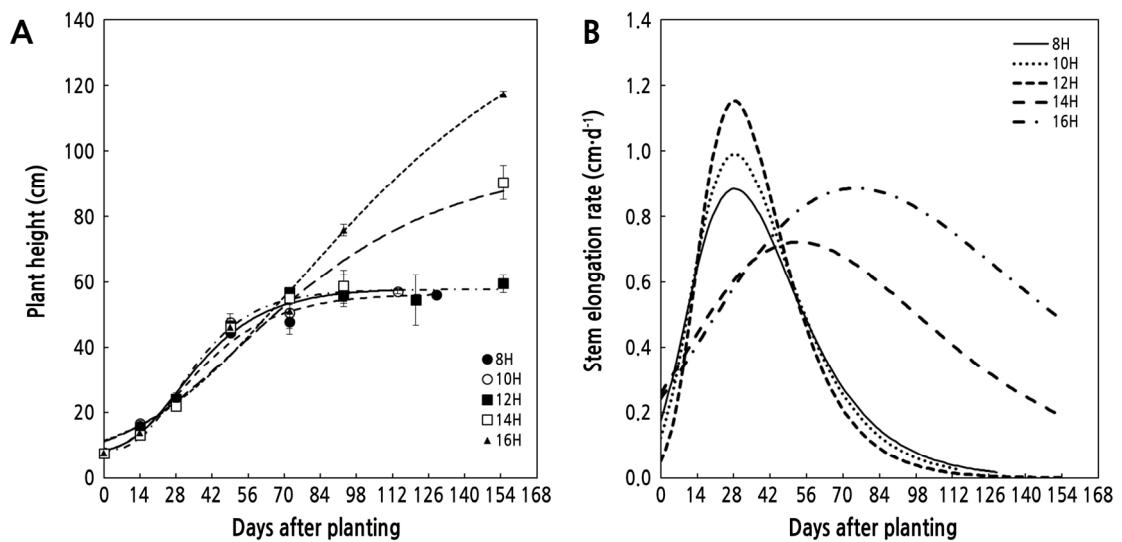


Fig. 1. Effect of day length on plant height (A) and stem elongation rate (B) of standard cut-chrysanthemum ‘Baekma’ grown hydroponically under artificial lighting by fluorescent lamps. Day length imposed for 8, 10, 12, 14, and 16 hours by fluorescent lamps after 16 hours long-day treatment for 23 days after planting. Solid lines were fitted measurement data by Gompertz growth function. Vertical bars bigger than symbols indicate the standard errors (SE) of the mean of three independent blocks ($n = 15$).

Table 3. Estimated parameters of Gompertz growth model fitted the dynamics of measured plant height as function of days after planting (Eq. 1) and maximum absolute stem elongation (MGR) of standard cut-chrysanthemum ‘Baekma’ grown at different photoperiod treatments

Photoperiod treatment ^z	Parameters ^y				R ²	MGR (cm·d ⁻¹)
	y_{ams} (cm)	k (d ⁻¹)	t_{inf} (d)	y_0 (cm)		
8H	49.12 ± 9.29 ^x	0.049 ± 0.036	28.41 ± 7.26	7.30 ± 0.46	0.985	0.89
10H	49.90 ± 13.18	0.054 ± 0.099	28.35 ± 8.75	8.00 ± 0.44	0.982	0.99
12H	49.66 ± 1.59	0.063 ± 0.243	28.23 ± 2.29	8.00 ± 0.39	0.991	1.15
14H	89.29 ± 20.76	0.022 ± 0.017	52.78 ± 13.21	7.50 ± 0.18	0.969	0.72
16H	141.75 ± 47.01	0.017 ± 0.016	74.81 ± 22.16	7.50 ± 0.16	0.986	0.89

^zAll treatments were given 16 hours day-length for 23 days after planting.

^y y_{ams} , asymptotic plant height; k , relative stem elongation rate; t_{inf} , inflection point as day of reached maximum absolute stem elongation rate.

^xSE is standard error of the parameter.

되고 마디 출현이 지속됨에 따라 최대 줄기신장율 및 상대신장율 또한 감소하였다. 단일처리구인 8H에서 12H까지의 절대 생장율은 k 값이 증가할수록 높은 생장율을 나타냈으며, 장일처리구인 14H와 16H 처리구에서는 생장율의 증가는 느슨하였다. 8H, 10H, 12H 처리구에서의 최대 절대 신장율에 도달하였을 때 각 처리구의 초장은 y_{ams} 의 51.6%, 52.8%, 52.9%였지만 14H와 16H의 장일 처리구에서는 y_{ams} 값이 45.2%, 42.1%로 나타났다. 초장의 신장율은 광환경 중 일장 및 광량의 영향을 받았고, Shipley(2002)결과와 유사하였다. 따라서 장일조건인 14H, 16H 처리구와 단일조건인 8H-12H 처리구의 정식 후 일수에 따른 ‘백마’의 초장 신장패턴은 단일처리기간에서는 한계일장을 최대로 유지하는 것이 줄기신장율과 신장량에 높게 유지할 수 있었으며, 한계일장을 넘는 경우 초장의 신장량은 최대 신장율은 낮지만 마디의 출현이 지속되고(Table 2), t_{inf} 가 지연됨에 따라 초장의 신장량이 길어진 것으로 판단된다.

일장처리수준에 따라 정식 후 일수에 따른 평균출퇴소요일, 평균개화소요일 그리고 최종초장은 처리구에 따른 유의적인 차이는 발육량에 따라 상이하였기 때문에 독립변수와 종속변수를 상대적값으로 변환시켜 초장의 신장과정을 비교하기 위해 생육단계에 따른 상대초장의 신장과정은 Fig. 2A에 나타났다. 일장처리에 따른 ‘백마’의 상대초장은 Gompertz 생장모델의 파라미터, 최대상대줄기신장량 $y_{asm,DVS}$, 상대줄기상대신장율 k_{DVS} , 최대상대줄기신장율에 도달하는 $DVS(t_{inf,DVS})$ 를 이용하여 99%이상 유의적으로 묘사하였다(Fig. 2A and Table 4). $y_{asm,DVS}$ 는 8H-12H 단일처리구에서 0.819 - 0.833로 큰 차이를 보이지 않았고, 14H와 16H 처리구는 1을 나타내 12H 처리에 비해 22% 높게 추정되었다. 14H와 16H 처리구의 $y_{0,DVS}$ 는 -0.001과 -0.014로 8H-12H 처리구보다 0에 가까웠으므로 $y_{asm,DVS}$ 가 높게 추정되었다. k_{DVS} 은 14H와 16H 처리구에서 12H 처리구에 비해 곡선의 변화가 급격하였으며 $t_{inf,DVS}$ 는 12H 이하의 단일 처리구에서는 1.14 - 1.224 DVS로 단일처리 이후의 최대 상대 생장율을 나타냈다. 14H와 16H의 장일조건에서는 장일처리기간의 전체 발육단계의 47.8%와 58% DVS에서 최대 상대생장율지수를 나타냈다(Table 4). 최대 상대 생장율지수에 도달시 12H 이하의 단일처리구에서는 상대 초장의 길이는 전체 길이의 68%, 14H와 16H 처리구에서는 총 각각 62%와 63%에 도달하였다.

최대 상대 초장신장율 지수(MGR_{DVS})는 8H와 10H 처리구에서 각각 1.22와 1.19로 낮았고, 12H 처리구는 10H 처리구 대비 1.8배 높았고, 장일조건인 14H, 16H 처리구에서는 각각 1.37과 1.38로 높게 나타났다(Fig. 2B). 발육단계에 따른 상대초장

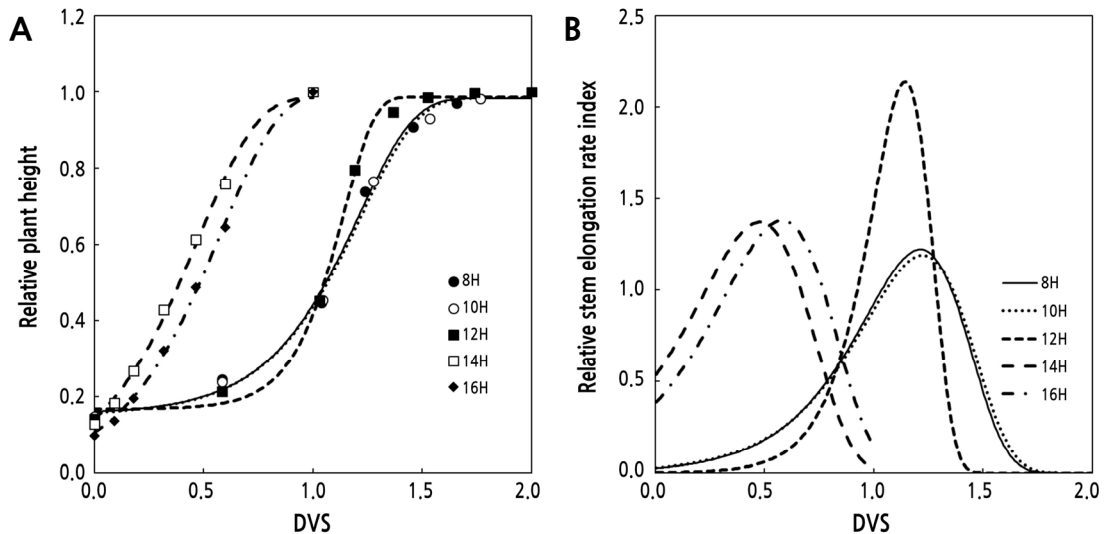


Fig. 2. Effect of day length on relative plant height (A) and relative absolute stem elongation rate (B) of standard cut-chrysanthemum grown hydroponically under artificial lighting by fluorescent lamps. Day length imposed by lighting for 8, 10, 12, 14, and 16 hours after 16 hours long-day treatment for 23 days after planting. Axis scaling based on developmental stage [DVS; planting day set to 0.0 to 1.0 for long day period and set from 1.0 to 2.0 for short day period and relative plant height (maximum shoot length set at 1.0). Solid lines were fitted measurement data by Gompertz growth function (A).

Table 4. Estimated parameters of Gompertz growth model fitted a dynamics of calculated relative plant height as a function of developmental stage and maximum relative stem elongation (MGR_{DVS}) of standard cut-chrysanthemum ‘Baekma’ grown at different photoperiod treatments

Photoperiod treatment ^z	Parameters ^y				R ²	MGR _{DVS}
	$y_{asm,DVS}$	k_{DVS}	$t_{inf,DVS}$ (DVS)	$y_{0,DVS}$		
8H	0.829 ± 0.081 ^x	-4.008 ± 1.044	1.213 ± 0.066	0.154 ± 0.071	0.995	1.222
10H	0.833 ± 0.071	-3.883 ± 0.778	1.224 ± 0.071	0.151 ± 0.057	0.997	1.190
12H	0.819 ± 0.065	-7.112 ± 1.466	1.143 ± 0.042	0.167 ± 0.054	0.996	2.142
14H	1.000 ± 0.092	-3.730 ± 0.524	0.478 ± 0.054	-0.014 ± 0.042	0.997	1.372
16H	1.000 ± 0.108	-3.757 ± 0.392	0.580 ± 0.055	-0.001 ± 0.017	0.999	1.381

^zAll treatments were given 16 hours day-length for 23 days after planting.

^y $y_{asm,DVS}$, maximum relative plant height; k_{DVS} , relative stem elongation rate; $t_{inf,DVS}$, inflection point as day of reached maximum relative stem elongation rate of relative plant height;

^xSE is standard error of the parameter.

의 초장신장패턴을 근거로 장일처리기간에는 14시간 이상의 일장을 유지하고, 단일처리 기간동안 12시간의 일장을 유지하는 것이 줄기신장율을 최대로 높게 유지할 수 있는 것으로 판단되었다. 스탠다드 절화국화 ‘백마’의 14시간 이상의 장일조건과 12시간 이하의 단일조건의 초장의 동적생육은 상이하였으며, 이는 광주기 조건에 따라 국화의 발육기간 지연유무, 화아분화 유무에 따라 달라진 것이다. ‘백마’는 하추국으로 일장에 의해 화아분화를 조절할 수 있는 국화이며(Shin et al., 2005), 정식 후 장일처리기간을 통해 충분한 초장 및 엽수를 확보한 뒤 단일처리를 통해 화아분화를 유도해야 하고, 국화는 단일처리 이후 화아분화 전까지는 초장의 신장이 지속적으로 이루어진다. 그러므로, 장일처리기간은 높은 상대초장신장율을 나타낸 14시간 이상의 일장을 통해 국화의 영양생장을 확보해야 하며, 개화한 처리구 중 최종신장량의 차이가 보이지 않았고, 12H 처리구가 국화의 재배기간을 단축할 수 있어, ‘백마’의 단일처리시간은 12시간이 가장 적합한 것으로 판단된다.

따라서, 본 실험에서 시그모이드 함수인 Gompertz 성장모델의 최대생장량, 상대생장율과 최대줄기 신장율에 도달하는 일수의 파라미터를 이용하여 일장처리에 따른 스탠다드 국화 ‘백마’의 초장신장패턴을 묘사할 수 있었고, 각 처리구의 성장 특성을 비교할 수 있었다. 본 실험은 환경요인 중 광주기에 의한 초장의 생육패턴을 분석하였다. 반면, 작물의 생육은 다양한 환경요인 조합에 의해 영향을 받으므로 절화국화의 초장의 생육모델의 고도화는 일장과 온도조건의 조합에 따른 생육 반응연구가 추가적으로 필요할 것으로 사료된다.

초 록

본 연구는 일장수준에 따른 스탠다드 절화국화의 다이내믹한 초장의 변화과정을 Gompertz 성장 모델을 이용해 분석하고 처리간 생장에 관여하는 파라미터를 비교하였다. 스탠다드 절화국화(*Dendranthema grandiflorum*) ‘백마’는 정식 후 23일까지는 일장을 16시간 처리 이후, 일장의 길이를 8, 10, 12, 14, 16시간(H)으로 달리 처리 완전 밀폐된 식물공장에서 재배하였다. 일장처리에 사용한 광원은 형광등을 이용하였다. 12H 이하의 일장에서의 평균 출퇴소요일이 단일 처리 후 49일에서 59일로 8H 처리구에서 가장 지연되었고, 14시간 이상의 장일조건에서는 출퇴되지 않았다. 정식 후 일수에 따른 초장은 Gompertz 성장모델의 최대줄기신장량($y_{asm,cm}$), 상대줄기신장율(k, d^{-1}), 최대줄기신장율에 도달하는 정식 후 일수($t_{inf,d}$)를 이용하여 유의적으로 측정값의 98%이상 묘사하였다. y_{asm} 는 12H 이하의 조건에서는 유의한 차이가 없었으며, 장일조건인 14H과 16H 처리구에서는 가장 높았다. t_{inf} 는 12H 이하에서는 정식 후 28일에 최대신장율에 도달하였으며, 12H 이상에서는 일장이 길어질수록 지연되었다. k 은 8H-12H 처리구간에서는 일장에 따라 증가하였으며, 12H 이상에서 일장에 따라 감소하였다. 최대줄기 신

장율(MGR)은 12H처리구에서 $1.15\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 로 가장 높았다. 발육단계에 따른 상대 초장은 변환된 Gompertz 성장모델의 매개 변수 최대상대줄기신장량($y_{asm.DVS}$), 상대줄기상대신장량(k_{DVS}), 최대상대줄기신장율에 도달하는 DVS($t_{inf.DVS}$)를 이용하여 99% 이상 유의적으로 묘사할 수 있었다. $y_{asm.DVS}$ 는 8H-12H 단일처리구에서는 범위는 0.014로 큰 차이를 보이지 않았고, 14H와 16H 처리구는 1을 나타내 12H 처리구에 비해 22% 높았다. k_{DVS} 은 14H와 16H 처리구에서 12H 처리구에 비해 곡선의 변화가 급격하였으며 $t_{inf.DVS}$ 는 12H 이하의 단일 처리구에서는 1.143 - 1.224 DVS로 단일처리 이후의 최대 상대 성장율을 나타냈다. 최대 상대 성장율지수에 도달시 12H 이하의 단일처리구에서는 상대 초장의 길이는 전체 길이의 68%, 14H와 16H 처리구에서는 총 각각 62%와 63%에 도달하였다. 본 연구 결과 Gompertz 성장모델은 스탠다드 국화 ‘백마’의 다이내믹한 초장 신장 패턴을 해석하고 요약할 수 있는 도구로 사용될 수 있었으며, 초장의 다이내믹 신장율을 고려한 재배기간 중 ‘백마’의 장일처리 시간은 14시간 이상, 단일처리 시간은 12시간을 유지하는 것이 적합한 것으로 생각된다.

추가 주요어 : *Dendranthema grandiflorum*, 고퍼츠, 성장해석, 성장모델, 일장, 초장

Literature Cited

- Bem C, Cargnelutti Filho A, Facco G, Schabarum D, Silveira D, Simões F, Uliana D (2017) Growth models for morphological traits of sunn hemp. *Semina: Ciências Agrárias* 38:2933. doi:10.5433/1679-0359.2017v38n5p2933
- Cao L, Shi PJ, Li L, Chen G (2019) A new flexible sigmoidal growth model. *Symmetry* 11:204. doi:10.3390/sym11020204
- Carvalho S, Dhonukshe VB, Heuvelink E (2003) Interactive effects of duration of long-day period and plant density on external quality of cut chrysanthemum. *In* International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, *Elegant Science in Floriculture*, pp 335-342. doi:10.17660/ActaHortic.2003.624.46
- Carvalho S, Heuvelink E (2001) Influence of greenhouse climate and plant density on external quality of chrysanthemum (*Dendranthema grandiflorum* (Ramat.) Kitamura): First steps towards a quality model. *J Hort Sci Biotech* 76:249-258. doi:10.1080/14620316.2001.11511359
- 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
- Cathey HM (1974) Participation of phytochrome in regulating internode elongation of *Chrysanthemum morifolium* (Ramat.). *Hemsl J Amer Soc Hort Sci* 99:17-23
- Cha M, Son J, Cho YY (2014) Growth model of sowthistle (*Ixeris dentata* Nakai) using expolinear function in a closed-type plant production system. *Korean J Hort Sci Technol* 32:165-170. doi:10.7235/hort.2014.13141
- Draper NR, Smith H (1998) *Applied regression analysis*, Vol 3rd ed. Wiley-Interscience, NY, USA. doi:10.1002/9781118625590
- 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. *Philos Trans R Soc Lond* 115:513-583. doi:10.1098/rstl.1825.0026
- Goudriaan J, Monteith JL (1990) A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. *Ann Bot* 66:695-701. doi:10.1093/oxfordjournals.aob.a088084
- Hunt R (1982) *Plant growth curves. The functional approach to plant growth analysis*. Edward Arnold Ltd.
- Jame YW, Cutforth HW (1996) Crop growth models for decision support systems. *Can J Plant Sci* 76:9-19. doi:10.4141/cjps96-003
- Karlsson MG, Heins RD (1994) A model of chrysanthemum stem elongation. *J Am Soc Hortic Sci* 119:403. doi:10.21273/JASHS.119.3.403
- Khodakovskaya M, Vaňková R, Malbeck J, Li A, Li Y, McAvoy R (2009) Enhancement of flowering and branching phenotype in chrysanthemum by expression of ipt under the control of a 0.821 kb fragment of the *LEACO1* gene promoter. *Plant Cell Reports* 28:1351-1362. doi:10.1007/s00299-009-0735-x
- Kim SJ, Lee SK, Kim KS (2010) Current research trend of postharvest technology for chrysanthemum. *In*. *Korean Soc Hortic Sci*, pp 122-122. doi:10.7732/kjpr.2012.25.1.156
- Kwon YS, Choi SY, Shin HK, Jung J, A, Park SK, Kil MJ (2012) Effect of different wavelength and treatment time of night break on flowering of chrysanthemum. *In*. *Korean Soc Hortic Sci*, pp 153-154
- Langton FA (1992) Interrupted lighting of chrysanthemums: monitoring of average daily light integral as an aid to timing. *Sci Hortic* 49:147-157. doi:10.1016/0304-4238(92)90151-2
- Lee HB, Lee JH, An SK (2019) Growth characteristics and flowering initiation of *Phalaenopsis* Queen Beer ‘Mantefon’ as affected by the daily light integral. *Hortic Environ Biotechnol* 60:637-645. doi:10.1007/s13580-019-00156-2
- Lee JH (2002) *Analysis and simulation of growth and yield of cut chrysanthemum*. Ph.D. diss., Wageningen University, The Netherland
- Lee JH, Chung SJ (2003) Estimating the growth parameters of plant height using gompertz growth function in cut chrysanthemum. *In*. *Korean Soc Hortic Sci*, pp 88-88

- Marcelis LFM, Heuvelink E, Goudriaan J** (1998) Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Sci Hortic* 74:83-111. doi:10.1016/S0304-4238(98)00083-1
- Mastalerz JW** (1977) *The greenhouse environment*. John Wiley & Sons, NY, USA
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA)** (2019) Agricultural and fishery products quality control act (Act No. 16277).
- Oda A, Sumitomo K, Tsunemi T, Douzono M, Motozu T, Hisamatsu T** (2010) Variations of photoperiodic response of flower buds initiation and development in july and august-flowering small-flowered spray chrysanthemum cultivars. *Hortic Res (japan)* 9:93-98. doi:10.2503/hrj.9.93
- Penning de Vries FWT, Jansen DM, Berge HFMT** (1989) Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. *In*. Pudoc, Wageningen
- Richards FJ** (1959) A flexible growth function for empirical use. *J Exp Bot* 10:290. doi:10.1093/jxb/10.2.290
- Seo BS, Pak HS, Lee KJ, Choi DH, Lee BW** (2016) Modelling the effects of temperature and photoperiod on phenology and leaf appearance in chrysanthemum. *Korean J Agric Forest Meteorol* 18:253-263. doi:10.5532/KJAFM.2016.18.4.253
- Shin HK, Lim JH, Cho 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 Sci* 37:119-120
- Shipley B** (2002) Trade-offs between net assimilation rate and specific leaf area in determining relative growth rate: relationship with daily irradiance. *Funct Ecol* 16:682-689. doi:10.1046/j.1365-2435.2002.00672.x
- Thornley JHM** (1982) The biometry of plant growth. *J Exp Bot* 33:554. doi:10.1093/jxb/33.3.554-a
- 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
- Venus JC, Causton DR** (1979) Plant growth analysis: a re-examination of the methods of calculation of relative growth and net assimilation rates without using fitted functions. *Ann Bot* 43:633-638. doi:10.1093/oxfordjournals.aob.a085674
- Wardhani WS, Kusumastuti P** (2014) Describing the height growth of corn using logistic and Gompertz model. *AJAS* 35:5. doi:10.17503/Agrivita-2013-35-3-p237-241