RESEARCH ARTICLE

장일처리 광원의 종류 및 광조사 시간에 따른 페튜니아와 팬지의 개화 및 형태학적 반응

오욱[1,2*] · Erik S. Runkle[2]

[1]영남대학교 원예생명과학과, [2]미시간주립대학교 원예학과

Flowering and Morphological Responses of Petunia and Pansy as Influenced by Lamp Type and Lighting Period to Provide Long Days

Wook Oh[1,2*] and Erik S. Runkle[2]

[1]Department of Horticulture and Life Science, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Korea
[2]Department of Horticulture, Michigan State University, East Lansing, MI 48824, USA

*Corresponding author: wookoh@ynu.ac.kr

Abstract

Incandescent (INC) lamps have been commonly used to promote flowering of long-day (LD) plants during short-day (SD) seasons, but production of INC lamps has been prohibited due to their low energy efficiency. One of the light sources replacing INC lamps is a compact fluorescent lamp (CFL). This study was carried out to compare the flowering and morphological responses of LD annuals grown in a controlled environment greenhouse at 20°C with a truncated 9-h SD and a 2- or 4-h night interruption (NI) or 6-h day extension (DE) provided by lighting from INC lamps, CFLs, or a combination of the two (INC + CFLs), in which red (R) to far-red (FR) ratios were 0.60, 8.46, and 0.91, respectively, and their PPFDs were 2.3 ± 0.3 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. After 12 weeks of treatment, *Petunia* ×*hybrida* 'Wave Purple' plants did not flower under the SD photoperiod whereas 100% flowered under all of the LD treatments. Flowering was more rapid under the INC or INC + CFL lighting treatments compared to CFL and DE, and 4-h NI enhanced flowering compared to 2-h NI. In addition, plants under DE and 4h-NI generally flowered earlier than under 2-h NI. All petunia 'Single Dreams Red' plants flowered within 65 days after treatment, and flowering was hastened by some LD lighting regimens and lamp types. Plants under DE and 4h-NI generally flowered earlier than under 2-h NI INC or INC + CFL compared to FL, and flowering time under INC 6-h DE was earliest. In addition, INC lighting promoted stem elongation of both petunia cultivars. In both pansy (*Viola* ×*wittrockiana*) 'Coiossus Yellow' and 'Delta Blue Blotch', LD treatments, especially using INC lamps, promoted flowering whereas the lighting period had little influence on days to flowering. Therefore, INC or INC + CFL with lower R:FR promoted flowering and stem extension and the promoting effect was larger with longer lighting periods. These results suggest that CFLs can be used to provide LDs to promote the flowering of petunia and pansy and to

Korean J. Hortic. Sci. Technol. 34(2):207-219, 2016
http://dx.doi.org/10.12972/kjhst.20160021

pISSN : 1226-8763
eISSN : 2465-8588

Received: August 30, 2015

Revised: September 18, 2015

Accepted: September 24, 2015

Copyright©2016 Korean Society for Horticultural Science.

This research was supported by the Yeungnam University research grants in 2013. We thank the late Mr. Mike Olrich and student employees for their greenhouse assistance, and Sang-Wook Hong, Sungji Publishing Co. Inc.

reduce stem elongation, although the promoting effect on flowering is sometimes less than that of INC lamps alone.

Additional key words: fluorescent lamp, incandescent lamp, long-day plant, night interruption, *Petunia ×hybrida*, red to far-red ratio, *Viola ×wittrockiana*

서 언

일장(daylength)이 한계일장(critical daylength)보다 길어지면 장일식물(long-day plant)의 개화가, 한계일장보다 짧아지면 단일식물(short-day plant)의 개화가 촉진된다(Thomas and Vince-Prue, 1997; Runkle and Heins, 2006). 위도가 높아질수록 늦가을과 겨울은 물론 초봄까지도 자연 일장은 일부 장일식물의 한계일장(critical photoperiod)보다 짧아지게 되므로(Heins et al., 2000), 많은 화단묘나 정원식물의 경우 3-4월의 성수기에 개화된 상태로 출하되려면 자연일장 하에서 재배기간을 늘리거나 인공광원에 의한 장일처리로 유도일장(inductive photoperiod)을 조성하여 수확시기를 앞당긴다(Mattson and Erwin, 2005). 이때 2μmol · m^{-2} · s^{-1} PPFD 정도의 저광도 장일처리는 장일성 화훼류의 개화를 촉진하기 위해 종종 사용된다(Runkle, 2007). 저광도 장일처리 방법에는 명기의 종료시점부터 전조를 시작하는 명기연장(day extension; DE) 전조, 암기의 중간에 전조하는 야파(광중단, night interruption; NI) 전조, 야파처리 중 점멸을 반복하여 전조하는 간헐조명(cyclic lighting), 명기의 시작 전부터 전조하는 predawn lighting 등이 있다(Runkle, 2002, 2007; Runkle et al., 2012; Kim et al., 2015).

장일처리용 인공조명으로는 백열등(incandescent lamp, INC)이 많이 사용되어 왔는데, 적은 설치비용, 설치의 용이성, 그늘의 최소화 등 여러 가지 장점이 있다. 그러나 최근 광전환효율(radient yield)이 낮은 백열등은 생산 자체가 규제되는 상황이므로 이를 대체할 광원이 필요하다(Runkle et al., 2012). 직관형 형광등(fluorescent tube, FL)은 그늘이 많이 생겨 상업적 온실에서의 활용도가 낮고, 고압나트륨램프(high pressure sodium lamp)와 같은 고휘도 방전(high intensity discharge, HID) 램프는 설치비나 그늘, 필요 이상의 광량 등으로 저광도 장일처리용으로는 부적합하며, LED 등 신규 조명은 아직 초기투자비용이 높은 실정이다. 이에 비해 전구형 형광등(compact FL lamp, CFL)은 INC처럼 쉽게 설치할 수 있고 그늘도 거의 안 생기며, 가격도 많이 하락하여 이미 많이 사용되고 있는데, CFL은 INC보다 에너지를 75% 이상 절감할 수 있으며 전구 수명도 길다(Runkle et al., 2012).

하지만, INC와 CFL의 광질은 매우 다른데, 같은 광합성 유효 광량자속(photosynthetic photon flux, PPF)일 경우 CFL은 INC보다 근적외광(far-red, FR; 700-800nm)을 매우 적게 방출한다. 따라서 적색광(red, R; 600-700 nm)과 FR의 비율, 즉 R:RF에 있어서 CFL이 INC보다 상당히 높다. Whitman et al.(1998)은 CFL의 R:FR가 8.8으로 높은 반면, INC의 R:FR가 0.7로 낮았다고 보고하였다. 이러한 광질의 차이는 식물의 개화와 줄기신장 등 광형태형성에 영향을 줄 수 있는데, 특히 낮은 R:FR 환경에서는 절간 신장 증가, 엽면적 감소, 개화 촉진 등의 피음반응(shade avoidance response)이 발생하기도 한다(Franklin, 2008; Halliday et al., 1994; Smith and Whitelam, 1997).

2000년대 들어 전조 광원의 광질이 일장반응형 식물의 개화 및 줄기신장에 미치는 영향에 관한 연구들이 많이 진행되어 왔는데, R:FR가 높은 CFL 하에서 장일식물의 개화 촉진 효과는 INC와 유사하고 초장은 더 짧아져(Moe and Heins, 1990; Whitman et al., 1998; Runkle et al., 2012; Yamada et al., 2008a, 2009) 분화용이나 화단용 식물 재배 시 식물생장억제제(plant growth retardant, PGR)의 사용을 줄일 수 있는 가능성이 발견되었다. 하지만 캄파눌라(*Campanula carpatica*), 코레옵시스(*Coreopsis grandiflora*)와 같은 장일식물에서 FR을 제거하여 R:FR을 높이거나(Runkle et al., 2001), 포복성(spreading type) 페튜니아(Padhye and Runkle, 2011; Runkle et al., 2012), 꽃도라지(*Eustoma grandiflorum*)(Yamada et al., 2008a, 2009)와 같은 일부 장일식물에서는 R:FR가 높은 광원을 야파용으로 사용할 경우 개화가 지연되는 현상이 나타났다.

그리고 그동안의 연구들은 캄파눌라, 코레옵시스, 포복성 페튜니아 등 분화용 및 정원용 식물(Runkle et al., 2001, 2012)과

카네이션, 유스토마 등의 절화용(Harris, 1968; Yamada et al., 2008a, 2009)를 대상으로 하는 연구였다. 따라서 본 연구에서는 장일성 일년초인 페튜니아와 팬지의 촉성재배를 위한 장일처리 시 INC와 CFL의 단독광 및 혼합광이 개화 및 줄기신장에 미치는 효과를 구명하기 위해 실시되었다. 이는 Runkle et al.(2012)의 후속 연구로 진행되었으며, 그 연구와의 비교를 위해 동일한 전조처리를 하였고 광원에 민감하게 반응했던 포복성 페튜니아도 식물재료로 사용하였다.

재료 및 방법

식물 재료

페튜니아(*Petunia* ×*hybrida*) 'Wave Purple'(포복성)와 'Single Dreams Red'(직립성), 팬지(*Viola* ×*wittrockiana*) 'Coiossus Yellow'와 'Delta Blue Blotch'의 어린 실생묘(발아 후 1주일)를 2008년 12월 12일 한 육묘전문 기업(Raker's Acres, Inc., Litchfield, MI, USA)로부터 받아 온실에서 장일처리를 시작하기 전까지 기온 20℃, 일장 9시간(08:00–17:00)으로 유지되는 식물생장상에서 재배하였다. 생장상의 광원은 CFL과 INC였으며, 광도는 식물체 수관 높이에서 100μmol · m^{-2} · s^{-1}의 광합성 유효광량자속밀도(photosynthetic photon flux density, PPFD)로 유지되었다. 생장상 내에서 양액을 관수하였는데 양액 조성(mg · L^{-1})은 다음과 같았다: N, 40; P, 4; K, 40; Ca, 5; Fe, 0.3; Cu, Mn, Zn, 0.2; B, Mo, 0.1 (MSU Special; Greencare Fertilizers, Kankakee, IL, USA).

생장상 재배 1주 후(2008년 12월 19일, 'Wave Purple'은 12월 23일) 품종별로 균일한 식물체를 20개체씩 골라 플라스틱 화분(지름 11cm, 부피 0.6L)에 정식한 후 유리온실 내의 벤치로 옮겼다. 분화용 상토는 피트모스를 주재료로 하는 무토양 배지(Suremix; Michigan Growers Products, Galesburg, MI, USA)를 사용하였다. 온실 내에서도 양액을 관수하였는데 양액 조성(mg · L^{-1})은 다음과 같았다: N, 125; P, 12; K, 100; Ca, 65; Mg 12; Fe, 1.0; Cu, 1.0; Mn, Zn, 0.5; Mo, 0.1 (MSU Special; Greencare Fertilizers).

온실 내에서 모든 식물체들은 9시간(08:00–17:00)의 명기 동안에 자연광을 기본으로 받았는데, PPFD가 낮아지면 약 90μmol · m^{-2} · s^{-1}(식물체 수관 높이에서 측정)의 고압나트륨 램프[high pressure sodium (HPS) lamp]로 보광을 하였다. HPS 램프는 외부 PPFD가 200μmol · m^{-2} · s^{-1} 이하에서 켜지고 400μmol · m^{-2} · s^{-1} 이상에서 꺼지도록 설정하였다. 15시간의 암기(17:00–08:00)는 암막(blackout system)에 의해 조성되었고, 암막 속에는 장일처리용 인공광원이 설치되었다.

장일 처리

각 품목의 품종별로 처리당 20개체(2반복, 반복당 10개체)씩을 6시간 명기연장(6–h DE), 4시간 야파(4–h NI), 2시간 야파(2–h NI)의 3가지 일장조건에 두었다. 자연광에 의한 일장조건 암막을 이용하여 9시간(08:00–17:00)으로 통일하였고 15시간(17:00–08:00)의 암기 중에 다음과 같이 인공광원에 의한 전조를 실시하였다: DE는 9시간의 명기 종료시점부터 6시간(17:00–23:00) 동안 전조하는 처리(총 15시간 일장)였고, 4–h 및 2–h NI는 암기 중심 시간대에 각각 4시간(22:30–02:30)과 2시간(23:30–01:30) 전조하는 처리였다. 각 일장조건은 INC(60W; Philips, Somerset, NJ, USA), CFL[13–W, Model 28913(색온도 2,700K), TCP Inc., Aurora, OH, USA], 그리고 50% INC + 50% CFL을 광원으로 하여 조성되었다. 광원과 식물체의 거리는 0.8m를 유지하면서 각 식물체가 받는 PPFD는 2.3 ± 0.3μmol · m^{-2} · s^{-1}로 균일하게 맞추었다. 추가적으로 전조처리 없이 자연광으로만 9시간 조사하는 단일조건(9–h SD)을 대조구(control)로 두었다.

일장처리 직전 spectroradiometer(Model LI–1800; LI–COR, Lincoln, NE, USA)를 이용하여 각 처리별로 광질 및 광량을 식물체가 놓인 벤치의 5군데에서 측정하였다. 이때 INC, INC + CFL, CFL의 평균 R:FR은 각각 0.60, 0.91, 8.46였다(Table 1).

Table 1. Photon flux densities of red and far red light, R to FR ratio, and photosynthetic photon flux density (PPDF; 400 to 700 nm) under lamps of each long-day treatment using incandescent (INC), compact fluorescent (FL), or a combination of 50% INC and 50% CFL (INC + CFL) lamps. Means of three scans at each location are reported.

Lamp type	Photon flux density ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)			PPFD ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)
	Red (R; 600-700 nm)	Far red (FR; 700-800 nm)	R to FR ratio (R:FR)	
INC	1.51	2.52	0.60	2.3
INC + CFL	1.34	1.47	0.91	2.4
FL	1.10	0.13	8.46	2.2

온실 내 환경 조성 및 기상자료 수집

온실 내 온도는 난방과 자연 및 강제 환기를 자동으로 조절하는 컴퓨터에 의해 설정값을 20℃로 하여 일정 수준을 유지하였다. 기온은 온실환경제어 시스템과는 독립적으로 각 벤치 위에 식물체 초장 높이로 설치된 열전쌍(type E thermocouples, TT-E-40; Omega Engineering, Stamford, CT, USA)으로 측정되었다. 식물체가 놓인 벤치를 암막으로 덮었을 때에는 그 안의 온도를 20℃로 유지하기 위해 벤치 별로 설치된 자동 히터로 추가 난방을 실시하였다. 각 일장처리 하의 광도는 10개의 photodiode를 가진 line quantum sensor(SQ-321, Apogee Instruments, Logan, UT, USA)로 측정하였다. 온도 및 광 센서들은 데이터로거(CR10; Campbell Scientific, Logan, UT, USA)와 연결시켰으며, 데이터는 10초마다 수집되었고 1시간마다 평균값이 컴퓨터에 입력되었다. 실험기간동안 식물체 초장 높이에서 측정된 일평균기온(± S.D.)과 평균 일적산광량(daily light integral)은 각각 20.5 ± 1.1℃와 9.1mol · m^{-2} · d^{-1}였다.

자료 수집 및 통계분석

실험은 품목 및 품종별, 처리별로 2반복으로 수행되었고, 반복 내 샘플은 10개체씩을 두었다. 처리 시작 전 각 개체별로 엽수(마디수)와 초장을 측정하였다. 처리 시작 후 식물체를 매일 관찰하면서 화아분화일(꽃눈을 육안으로 처음 관찰한 날) 및 개화일과 1번화 개화 시의 초장(배지 표면으로부터 정단분열조직 또는 가장 높은 위치의 꽃까지의 길이), 마디수, 엽수, 화아수 등을 기록하였다. 일장처리 후 12주까지 개화하지 않으면 개화가 되지 않은 것으로 간주하였으며, 이때 반복별 개화율을 계산하였다. 일장처리의 종류 및 각 반복(벤치) 내 식물체 배치는 완전임의배치법으로 하였다. 수집된 자료는 SAS(SAS Institute, Cary, NC, USA)를 이용하여 통계분석하였고, 처리평균간 유의차 비교는 Tukey's honestly significant test(p = 0.05)를 사용하였다.

결과 및 고찰

개화 및 화아분화 소요일수

일장처리 12주 후 페튜니아 'Wave Purple'(포복성)의 대조구(9-h SD)를 제외한 모든 품종 및 처리에서 100% 개화되었다(Fig. 1). 페튜니아 'Wave Purple'은 대조구에서 개화하지 않았기 때문에 절대적 장일식물일 가능성이 높고, 페튜니아 'Single Dreams Red'(직립성), 팬지 'Coiossus Yellow'와 'Delta Blue Blotch'는 9시간 단일조건에서도 개화하였지만 장일처리에 의해 개화가 앞당겨졌기 때문에 상대적 장일식물의 특성을 가졌다고 볼 수 있다(Thomas and Vince-Prue, 1997). 다만, 일장처리 12주 후 까지만 개화 여부를 조사하였기 때문에 그 이후 9-h SD 하에서 페튜니아 'Wave Purple'의 개화가 일어난다면 상대적 LDP로 분류될 가능성은 남아 있다.

개화소요일수는 전조 광원 및 광조사주기의 영향을 크게 받았는데, 모든 품종에서 광조사주기에 거의 관계없이 INC 처리가 개화소요일수가 가장 짧은 경향이었고, INC + CFL, CFL, SD 순으로 짧은 경향을 보였다(Figs. 1 and 3). 이 연구의 선행연구를 진행했던 Runkle et al.(2012)은 *P.* ×*hybrida* 'Wave Purple Classic', *Campanula carpatica* 'Pearl Deep Blue', *Coreopsis grandiflora* 'Early Sunrise', 그리고 *Rudbeckia hirta* 'Becky Cinnamon Bicolor'의 최종 개화율은 전조 광원의 영향을 받지 않지만, 페튜니아 'Wave Purple Classic'에 대해 CFL 6-h DE 또는 4-h NI 처리를 하면 동일 시간의 INC 전조처리에 비해 개화가 2-3주 지연되었다고 하였다. 다른 3종에 있어서도 INC 4-h NI(*Campanula*)와 6-h DE(*Coreopsis*, *Rudbeckia*) 처리에서 개화가 조금 빨라지기는 하였으나 페튜니아처럼 크게 나타나지 않았다. 이 연구에서 사용된 INC, INC + CFL, CFL의 R:FR은 각각 0.60, 0.91, 8.64였는데(Table 1), R:FR이 낮은 INC가 그 값이 높은 CFL보다 페튜니아 및 팬지의 각 2품종의 개화를 더 촉진시켰다(Fig. 1). 따라서 장일처리용 전조 광원의 광질은 종 또는 품종에 따라 개화에 다른 영향을 미친다고 볼 수 있으며, 페튜니아와 팬지가 다른 종들보다 민감하게 반응한다고 볼 수 있다. Yamada et al.(2008a, 2008b, 2009)에 의하면 장일식물인 *Eustoma grandiflorum*의 개화가 NI 광원의 광질에 따라 단일조건에 비해 개화가 촉진되기도 하지만 억제되기도 한다고 보고하였는데, 이때 단일처리와 같은 개화소요일수를 보이는 광원의 R:FR은 5.0이었다. LED로 NI 처리를 했던 Craig and Runkle(2012)는 INC(R:FR = 0.59)와 R:FR이 0.66-2.38 및 0.28-1.07인 LED가 각각 *Petunia multiflora* 'Easy Wave White'와 *Antirrhinum majus* 'Liberty Classic Cherry'의 개화를 가장 빨리 유도하였다고 보고하였다. 이 연구들과 비교할 때, 본 연구에 사용된 CFL의 R:FR 8.46은 꽃도라지의 개화를 억제하는 R:FR 5.0을 초과하는 수치였고, INC 및 INC + CFL의 0.60과 0.91은 페튜니아의 개화를 촉진하는 0.66-2.38에 포함된다고 볼 수 있다. 그리고 전조광원의 광질에 따른 개화 촉진 또는 억제 효과는 종이나 품종에 따라 조금 차이가 있었다.

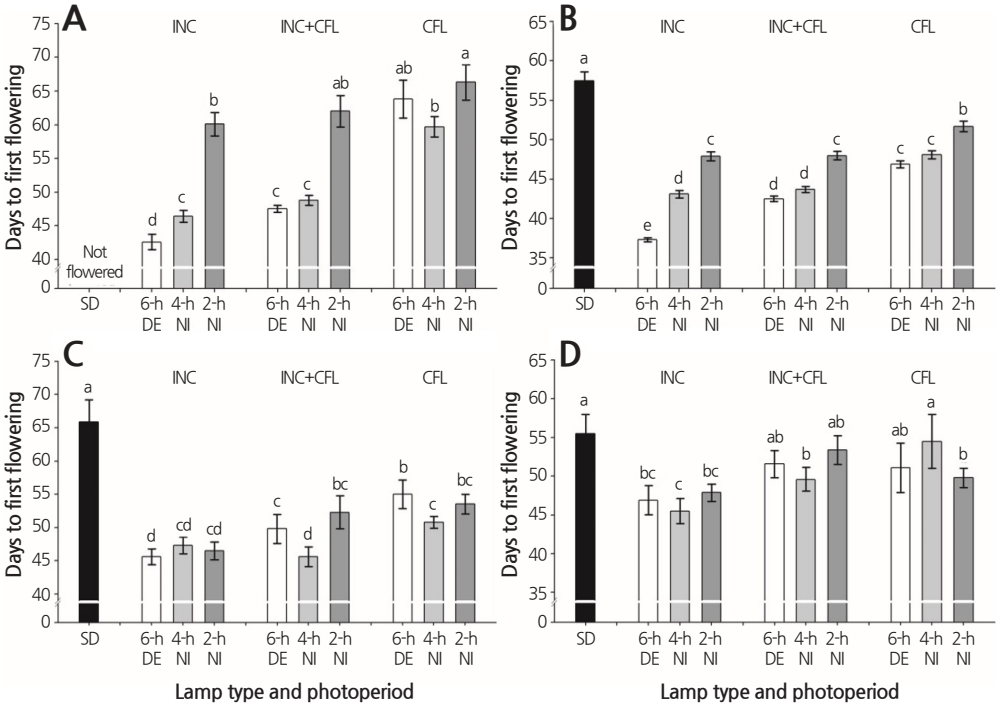

Fig. 1. Days to flower of *Petunia* ×*hybrida* 'Wave Purple' (A) and 'Single Dreams Red' (B), and *Viola* ×*wittrockiana* 'Coiossus Yellow' (C) and 'Delta Blue Blotch' (D) as influenced by lamp type and long-day lighting period. All plants received a 9-h short day (SD) without or with a 2- or 4-h night interruption (NI) or 6-h day extension (DE) with three lamp types: incandescent (INC), compact fluorescent (CFL), or INC + CFL (50% of each). Within-graph means followed by the same letter are not significantly different by Tukey's honestly significant difference test at $p \leq 0.05$.

광조사 주기의 효과에 있어서는 페튜니아 'Wave Purple'과 'Single Dreams Red'의 개화소요일수는 2-h NI보다 4-h NI와 6-h DE(CFL 제외) 처리에서 감소하였다(Figs. 1A and 1B). INC 하에서는 4-h NI와 6-h DE 처리 간에도 차이가 있었는데, 페튜니아 두 품종 모두 6-h DE 처리에서 개화가 더 빨랐다. 팬지 두 품종에서는 일부 광조사주기에 따른 유의차가 있었으나 페튜니아와 같이 일관되게 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다(Figs. 1C and 1D). 일반적으로 NI 처리가 효과적이라고 알려져 있으며 개화조절 효과를 보장하기 위해 4시간 이상 전조하는 것이 상업적으로 활동되는 방법이다(Thomas and Vince-Prue, 1997). 본 연구에서는 NI 처리와 DE 처리의 전조시간이 달라 비교하기는 어려우나 품종이나 광원에 따라 6-h DE 처리가 4-h NI보다 개화를 더 촉진한 경우도 있었는데 2시간 더 전조한 효과로 보인다.

품종간 차이를 보면, 페튜니아 'Wave Purple'와 'Single Dreams Red', 그리고 팬지 'Coiossus Yellow'의 개화소요일수는 램프 종류와 광조사주기의 영향을 크게 받았으나(Figs. 1A, 1B, and 1C), 팬지 'Delta Blue Blotch'에서는 상대적으로 그 차이가 적었는데(Fig. 1D), 이는 장일처리 광원이나 전조시간에 대한 종이나 품종 간의 차이가 있음을 의미한다. 질적 장일식물로 판단되는 페튜니아 'Wave Purple'에 있어서 광조사주기의 효과는 특히 광원의 영향을 많이 받았는데, CFL에서는 4h-NI가 2h-NI보다 개화가 6.6일 빨랐고, 6-h DE는 다른 두 장일처리와 유의차가 없었다(Figs. 1A and 3). 반면, INC + CFL에서는 6-h DE와 4-h NI가 2-h NI보다 각각 14.5일과 13.2일 개화를 앞당겼고, 6-h DE와 4-h NI 간에는 유의차가 없었다. INC 하에서는 6-h DE와 4-h NI가 2-h NI보다 개화를 각각 17.5일과 13.7일 앞당겼으며, 6-h DE가 4-h NI보다 개화소요일수를 3.8일 유의하게 감소시켰다.

양적 장일식물로 보이는 페튜니아 'Single Dreams Red'는 모든 장일처리가 대조구보다 유의하게 개화를 앞당겼는데, 개화가 가장 빨랐던 INC 6-h DE는 대조구 대비 20.2일 개화소요일수를 감소시켰다(Figs. 1B and 3). 그리고 모든 전조 광원 하에서 6-h DE와 4-h NI가 2-h NI보다 개화소요일수를 유의하게 감소시켰는데, 특히 INC 6-h DE는 4-h NI보다 개화를 5.8일 앞당겼다. 동일 광조사주기 내에서 광원의 효과를 비교해 보면, 2-h 및 4-h NI 처리에서는 INC = INC + CFL > CFL 순으로, 6-h DE 처리에서는 INC > INC + CFL > CFL 개화가 빨라서 INC와 INC + CFL 간의 유의차에서 다른 경향을 보였다. 모든 처리를 대상으로 비교해 보면, INC 6-h DE > INC 4-h NI = INC + CFL 6-h DE = INC + CFL 4-h NI > INC 2-h NI = INC + CFL 2-h NI = CFL 6-h DE = CFL 4-h NI > CFL 2-h NI > SD 순으로 개화가 앞당겨졌다. 결국 NI 처리 시 2시간은 충분치 못하였고, CFL은 INC 또는 INC + CFL보다 개화 촉진 효과가 적었다. 그리고 INC 6-h DE는 모든 처리 중 가장 개화를 촉진시켰다.

양적 장일식물로 판단되는 팬지 'Coiossus Yellow'에 있어서 모든 장일처리가 SD의 대조구보다 10.9일 이상 개화를 촉진시켰고, 특히 INC 6-h DE와 INC + CFL 4-h NI는 두 처리 모두 대조구 대비 20.3일 개화를 앞당겼다(Figs. 1C and 3). 광원에 있어서는 INC 하에서 개화소요일수가 가장 짧았고, INC + CFL, CFL, SD 순으로 적게 나타나 그 경향은 페튜니아와 유사하였으나, 광원 간 차이는 페튜니아보다 적게 나타났다(Figs. 1A, 1B, and 1C). 동일 광원 내에서는 INC + CFL과 CFL 하에서 각각 4-h NI가 가장 개화소요일수가 짧아 페튜니아와는 다른 경향이었으며, INC 하에서는 광조사 주기 간 개화소요일수의 유의차가 나타나지 않았다(Fig. 1C). 그리고 6-h DE는 모든 광원에서 2-h NI와 유의차가 없었는데 이 또한 페튜니아와 다른 결과였다. 모든 처리를 대상으로 비교해 보면, INC 6-h DE = INC + CFL 4-h NI ≥ INC 4-h NI = INC 2-h NI ≥ INC + CFL 6-h DE = CFL 4-h NI ≥ INC + CFL 2-h NI = CFL 2-h NI ≥ CFL 6-h DE > SD 순으로 개화가 앞당겨졌다. 결국 2시간의 NI 처리는 INC + CFL 4-h NI나 INC에 비해 개화 촉진 효과가 충분하지 못하였고, 4-h NI 처리가 효과적이었다. 그리고 페튜니아 두 품종 모두에서 가장 효과적이었던 INC 6-h DE는 물론 INC + CFL 4-h NI 처리가 모든 처리 중 가장 개화를 촉진시켰다.

양적 장일식물로 추정되는 팬지 'Delta Blue Blotch'는 페튜니아 두 품종 및 팬지 'Coiossus Yellow'와 비교하여 광원 간 처리 효과의 순서가 INC > INC + CFL > CFL의 경향을 보인 것은 유사하였으나 장일처리의 개화 촉진 효과가 가장 적어서 INC 4-h NI와 SD의 개화소요일수 차이가 10.0일에 그쳤다(Fig. 1D). 특히 CFL 6-h DE, 2-h NI와 CFL 4-h NI, 6-h DE는 SD의 대조

구와 개화소요일수에 있어서 유의차가 없었다. 광원 내에서 광조사주기 간에는 CFL의 4-h NI와 2-h NI를 제외하고는 유의차가 나타나지 않았다. 모든 처리를 대상으로 비교해 보면, INC 4-h NI ≥ INC 6-h DE = INC 2-h NI ≥ INC + CFL 4-h NI = CFL 2-h NI ≥ INC + CFL 6-h DE = CFL 6-h DE = INC + CFL 2-h NI ≥ CFL 4-h NI = SD 순으로 개화가 빨랐다. 결국 INC의 세 가지 장일처리와 INC + CFL 4-h NI, CFL 2-h NI 처리가 대조구에 비해 개화를 촉진시켰으나 그 차이는 5.7-10.0을 앞당기는 데 그쳐 다른 품종보다 장일처리의 개화 촉진 효과가 적었다.

한편 화아분화 소요일수(days to visible bud, DVB)는 개화소요일수와 거의 유사한 경향을 보였으나 처리 간 차이는 조금 적게 나타났다(Table 2). 반면 화아분화 후 개화까지의 소요일수(days from visible bud to first flowering, DVBF)은 페튜니아 두 품종에서는 그 차이가 미세했던 것에 비해 팬지 두 품종에서는 페튜니아보다 차이가 컸다. 즉, 페튜니아 'Wave Purple'에서 FL 2-h NI와 INC 6-h DE 간에 DVB 22.5일, DVBF 1.2일, 'Single Dreams Red'에서 SD와 INC 6-h DE 간에 DVB 17.5일, DVBF 2.7일의 차이가 있었던 반면, 팬지 'Coiossus Yellow'에서는 SD와 INC 6-h DE 간에 DVB 12.7일, DVBF 7.6일, 'Delta Blue Blotch'에서 SD와 INC 4-h NI 간에 DVB 3.1일, DVBF 6.9일의 차이가 있었다(Table 2). 이를 통해 페튜니아에서는 장일처리의 효과가 화아분화에 영향을 많이 준 반면, 팬지에서는 화아분화보다 화아발달에 영향을 더 큰 영향을 준 것으로 볼 수 있다. 팬지 두 품종을 비교해 보면 장일처리의 효과가 더 컸던 'Coiossus Yellow'에서는 처리간 DVB의 차이가 컸던 반면, 장일처리의 효과가 상대적으로 적었던 'Delta Blue Blotch'에서는 화아분화 이후 화아발달기간에 있어서 처리간 차이가 더 컸던 것으로 보인다. 이는 일정기간 이상 개화를 촉진하고 상품성 있는 개화 상태를 유도하기 위해 페튜니아보다 팬지에서 더 오래 유도일장을 유지해야 한다는 것을 암시하는 것인데, 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것이다.

Table 2. Effects of lamp type and long-day lighting period on growth and flowering of petunia and pansy. All plants received a 9-h short-day (SD) without or with a 2- or 4-h night interruption (NI) or 6-h day extension (DE) with three lamp types: incandescent (INC), compact fluorescent (CFL), or INC + CFL (50% of each).

Lamp type	Lighting period	Leaf no.	Flower bud no.	Days to visible bud	Days from VB to first flowering
Petunia 'Wave Purple'					
None	SD	-[y]	-	-	-
INC	2-h NI	23.2 bc	67.8 cd	47.7 a	12.4 ab
	4-h NI	16.9 d	76.7 bc	34.1 b	12.3 ab
	6-h DE	14.8 d	61.7 d	31.1 b	11.5 b
INC + CFL	2-h NI	30.3 a	80.9 b	50.5 a	11.5 b
	4-h NI	19.1 cd	96.9 a	35.8 b	13.0 a
	6-h DE	14.8 d	84.7 ab	34.5 b	13.0 a
CFL	2-h NI	32.6 a	81.1 b	53.6 a	12.7 a
	4-h NI	27.9 ab	87.3 ab	47.6 a	12.1 ab
	6-h DE	30.1 a	95.9 a	52.3 a	11.5 b
Significance					
Lamp type (LT)		*	*	*	NS
Lighting period (LP)		*	*	*	*
LT × LP		*	NS	*	NS
Petunia 'Single Dreams Red'					
None	SD	30.6a[z]	43.9 b	42.5 a	15.0 a
INC	2-h NI	24.4c	50.7 a	33.5 b	14.4 ab
	4-h NI	22.9cd	36.6 cd	28.7 c	14.4 ab
	6-h DE	21.8d	32.2 d	25.0 c	12.3 c
INC + CFL	2-h NI	24.7c	46.3 ab	32.5 b	15.5 a
	4-h NI	24.7c	41.3 bc	29.6 bc	14.1 b

Lamp type	Lighting period	Leaf no.	Flower bud no.	Days to visible bud	Days from VB to first flowering
Petunia 'Single Dreams Red'					
INC + CFL	6-h DE	22.0 d			
CFL	2-h NI	27.0 b	49.2 a	36.6 ab	15.1 a
	4-h NI	24.7 c	44.7 b	32.4 b	15.7 a
	6-h DE	23.6 c	45.6 b	31.2 bc	15.7 a
Significance					
Lamp type (LT)		*	*	*	*
Lighting period (LP)		*	*	*	*
LT × LP		NS	*	NS	*
Pansy 'Coiossus Yellow'					
None	SD	13.7 a	13.0 b	37.9 a	28.0 a
INC	2-h NI	13.7 a	17.7 a	25.3 c	21.2 c
	4-h NI	13.5 a	17.1 a	26.8 bc	20.5 c
	6-h DE	12.7 b	13.6 b	25.2 c	20.4 c
INC + CFL	2-h NI	13.2 ab	15.4 ab	27.4 bc	24.9 ab
	4-h NI	13.5 a	16.1 a	25.2 c	20.4 c
	6-h DE	12.6 b	13.1 b	27.2 b	22.6 bc
CFL	2-h NI	13.3 ab	13.9 b	30.0 b	23.5 bc
	4-h NI	12.9 ab	16.7 a	27.6 bc	23.2 bc
	6-h DE	13.0 ab	12.5 b	31.4 b	23.6 bc
Significance					
Lamp type (LT)		*	NS	*	*
Lighting period (LP)		*	*	*	NS
LT × LP		NS	*	NS	*
Pansy 'Delta Blue Blotch'					
None	SD	15.0 b	22.3 ab	31.6 a	23.9 a
INC	2-h NI	14.6 bc	18.8 bc	28.9 ab	19.0 b
	4-h NI	13.5 c	16.6 c	28.5 b	17.0 b
	6-h DE	14.6 bc	17.9 bc	28.0 b	18.9 b
INC + CFL	2-h NI	16.4 a	24.8 ab	32.2 a	21.2 ab
	4-h NI	15.0 b	20.5 ab	28.8 ab	20.8 ab
	6-h DE	14.9 b	20.1 bc	29.3 ab	22.3 a
CFL	2-h NI	15.6 ab	19.5 bc	28.8 ab	21.0 ab
	4-h NI	16.3 a	29.2 a	31.5 a	23.0 a
	6-h DE	14.7 b	21.1 ab	27.9 b	23.2 a
Significance					
Lamp type (LT)		*	*	*	*
Lighting period (LP)		*	*	*	NS
LT × LP		*	*	NS	*

[z]Letters represent mean separation for each species (cultivar) and parameter by Tukey's honestly significant difference test ($p \leq 0.05$) and are absent when data were similar.
[y]Data not recorded because any plants did not flower under short days without photoperiodic lighting.
*Significant at $p < 0.05$ by ANOVA.

엽수 및 화아수

엽수는 개화가 빨랐던 INC 처리와 4-h NI 및 6-h DE 처리에서 상대적으로 적은 경향이었는데, 페튜니아 두 품종에서는 처리별 차이가 컸던 반면, 팬지 두 품종에서는 차이가 작거나 통계적으로 유의차가 나타나지 않는 경우도 있었다(Table 2). 페튜

니아나 팬지와 같이 경정에서 화아분화가 먼저 이루어지는 유형의 식물에서 엽수가 적다는 것은 화아분화가 빠르고 영양생장기간이 짧았음을 의미한다(Thomas and Vince-Prue, 1997). 페튜니아 두 품종의 엽수는 화아분화 소요일수가 증가할수록 많아져 화아분화가 지연될수록 더 많은 잎이 분화되는 것을 알 수 있었다(Figs. 4A and 4B). 팬지 'Delta Blue Blotch'의 엽수도 개화소요일수와 비례하는 경향을 보였다(Fig. 4C).

개체별 첫 꽃 개화 시에 측정한 화아수는 개화가 빨랐던 INC 처리와 4-h NI 및 6-h DE 처리에서 상대적으로 적은 경향이었는데, 페튜니아 두 품종에서는 처리별 차이가 컸던 반면 팬지 두 품종에서는 차이가 작거나 일부 특정 경향을 찾을 수 없었다(Table 2). 특히 페튜니아 'Single Dreams Red'와 팬지 'Delta Blue Blotch'에서는 화아분화 소요일수와 화아수가 직선적인 비례관계를 보였다(Figs. 4E and 4F). 페튜니아 'Madness Red'와 팬지 'Delta Premium Yellow'에서도 개화가 늦어질수록 개화 시 화아수와 건물중이 증가하는 경향을 보였는데, 이는 화아분화나 개화가 지연됨으로 인해 영양생장기간이 길어져 다수의 잎을 확보하여 광합성을 충분히 할 수 있는 시간이 있었기 때문이다(Oh et al., 2010).

줄기 신장

식물체의 초장은 전조 광원 및 광조사주기의 영향을 크게 받았는데, 종별로 조금 다른 양상을 보였다(Figs. 2 and 3). 직립성인 페튜니아 'Single Dreams Red'와 팬지 'Coiossus Yellow' 및 'Delta Blue Blotch'는 전조 광원의 영향을 크게 받아 INC 하에서 초장이 길었고 CFL 하에서 짧았으며, INC + CFL 하에서 중간 정도를 보였다(Figs. 3B, 3C, and 3D). Runkle et al.(2012)도 INC 하에서 코레옵시스와 루드베키아의 초장이 CFL 하에서 보다 길었다고 보고하였으며, Yamada et al.(2009)도 R:FR이 2.0 이하인 NI 광원 하에서 *E. grandiflorum*의 절간장이 R:FR이 3.0 이상일 때보다 길었다고 하였다. 백색(W) LED가 포함된 혼합광으로 NI 처리를 했던 Kohyama et al.(2014)는 일부 장일식물의 개화 촉진에 FR이 꼭 필요하며, R:FR 0.67의 R + W + FR LED가 53.35의 R + W보다 줄기신장을 크게 촉진하였다고 하였다. *Plectranthus amboinicus*에서도 R:FR이 낮은 할로겐램프 하에서 초장이 증가하였다(Park et al., 2012)

반면, 포복성 페튜니아 'Wave Purple'에서는 화아분화 또는 개화가 늦었던 CFL의 3가지 광조사주기 처리와 INC + CFL 및 INC의 2-h NI 처리에서 초장이 길었으며, 화아분화 또는 개화가 빨랐던 INC + CFL 및 INC의 4-h NI와 6-h DE 처리에서 초장이 짧게 나타나(Table 1 and Fig. 2A) 페튜니아 'Single Dreams Red' 및 팬지 두 품종과는 달리 초장은 개화소요일수와 비례하는 것으로 보였다. 하지만 이것은 절간장 증가가 아닌 마디수 증가에 기인한 것이며 초장을 엽수로 나누어 추정한 절간장은 개화소요일수에 반비례하는 관계를 보였다(Fig. 5A). Runkle et al.(2012)는 INC 4-h NI 및 6-h DE, INC + CFL 6-h DE 하에서 페튜니아 'Wave Purple Classic'의 절간장이 다른 처리들보다 길었으나 마디수가 적었기 때문에 초장은 짧았다고 보고하였다. 즉 R:FR이 상대적으로 낮고 충분한 전조광이 주어지는 처리에서 개화도 빠르고 절간장도 길어졌다고 볼 수 있다. 식물은 다른 식물체의 그늘과 같이 R:FR이 낮은 광환경에서는 절간 신장이 촉진되어 초장이 증가하는 피음반응을 보이는데(Franklin, 2008; Halliday et al., 1994; Smith and Whitelam, 1997), 본 연구에서도 유사한 효과를 보였다.

광조사주기는 전조 광원에 비하여 초장에 미치는 영향이 적었는데, 페튜니아 'Single Dreams Red'의 INC와 팬지 'Delta Blue Blotch'의 CFL 처리에서만 6-h DE와 2-h NI 간에 유의차가 나타났다. 단일처리는 모든 품종에서 초장이 가장 짧았는데, 페튜니아 'Single Dreams Red'의 CFL 처리와 팬지 'Delta Blue Blotch'의 CFL 6-h DE 및 4-h NI와는 통계적 유의차가 없었다. 식물의 절간장 또는 초장이 장일조건에서 증가하고 단일조건에서 감소하는 현상은 매우 자주 관찰되는데(Oh et al., 2013), Hedden(1999)은 장일조건 하에서 *Arabidopsis*의 절간장이 증가하였고 이는 내생 GA 함량의 증가와 관련이 있다고 하였다. 한편 개화소요일수와 초장과의 상관관계로 살펴보면, 개화가 빨랐던 처리, 즉 개화소요일수가 짧았던 처리에서 페튜니아 'Wave Purple'의 절간장이 짧았고(Fig. 5A), 다른 품종에서는 초장은 짧아졌는데(Figs. 5B, 5C, and 5D) 이 또한 절간장 감소에 기인했다고 볼 수 있다.

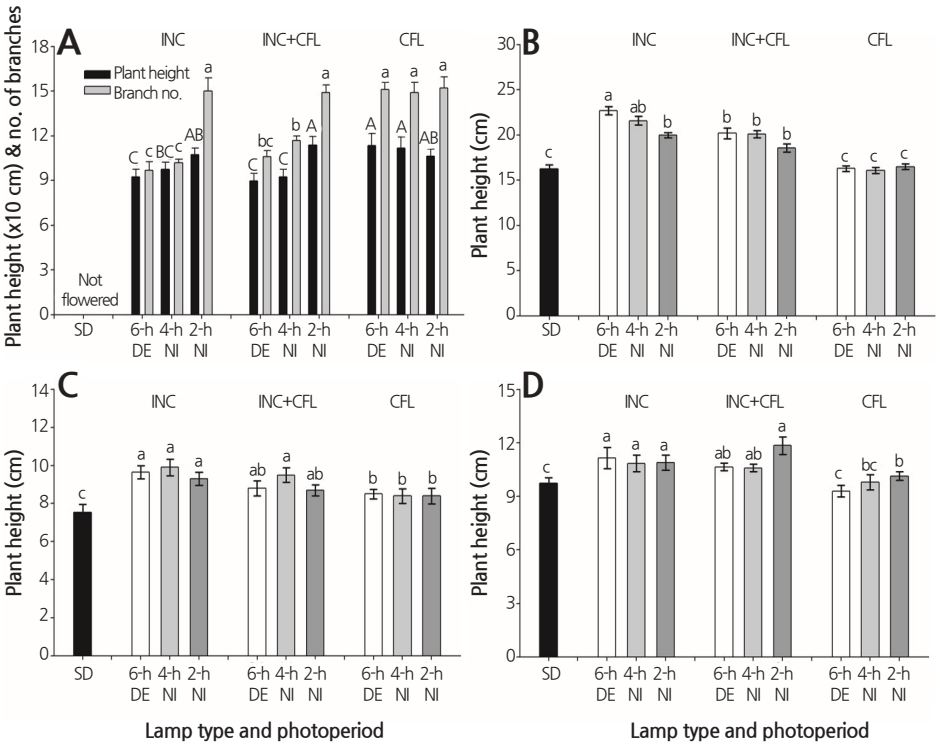

Fig. 2. Plant height and number of lateral branches of *Petunia ×hybrida* 'Wave Purple' (A) and plant heights of *P. ×hybrida* 'Single Dreams Red' (B), and *Viola ×wittrockiana* 'Coiossus Yellow' (C) and 'Delta Blue Blotch' (D) as influenced by lamp type and long-day lighting period. All plants received a 9-h short-day without or with a 2- or 4-h night interruption (NI) or 6-h day extension (DE) with three lamp types: incandescent (INC), compact fluorescent (CFL), or INC + CFL (50% of each). Within-graph means followed by the same letter are not significantly different by Tukey's honestly significant difference test at $p \leq 0.05$.

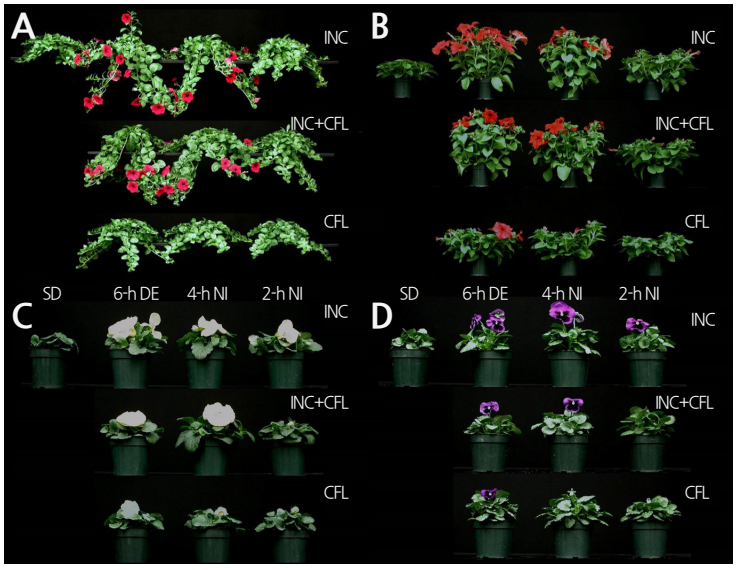

Fig. 3. Growth and flowering of *Petunia ×hybrida* 'Wave Purple' (A) and 'Single Dreams Red' (B) and *Viola ×wittrockiana* 'Coiossus Yellow' (C) and 'Delta Blue Blotch' (D) as influenced by lamp type and long-day lighting period. All plants received a 9-h short-day without or with a 2- or 4-h night interruption (NI) or 6-h day extension (DE) with three lamp types: incandescent (INC), compact fluorescent (CFL), or INC + CFL (50% of each). Photographs were taken at 45 days after light treatment for petunia 'Wave Purple', and at 51 days after treatment for petunia 'Single Dreams Red', pansy 'Coiossus Yellow' and 'Delta Blue Blotch'.

형태적 특성이 페튜니아 'Single Dreams Red' 및 팬지 두 품종과 달랐던 페튜니아 'Wave Purple'에서는 측지수를 측정하였는데, 정도의 차이는 있었지만 초장이 증가할수록 측지수도 증가하는 경향을 보였다. 즉, 초장이 길었던 CFL의 3가지 광조사 주기 처리와 INC + CFL 및 INC의 2–h NI 처리에서 측지수가 많으며, 초장이 짧았던 INC + CFL 및 INC의 4–h NI와 6–h DE 처리에서 측지수가 적게 나타났다(Table 1 and Fig. 2A). 하지만 초장 및 측지수는 피음반응 측면에 볼 때 반대 경향을 보이는데, R:FR이 낮은 환경에서는 분지는 억제되고, 줄기신장은 촉진되므로 페튜니아 'Wave Purple'에서도 INC 하에서 개화 촉진, 측지수 감소, 절간장 증가 등이 함께 나타나는 것을 볼 수 있다. 반면, R:FR가 높은 FL 하에서는 개화 지연(화아분화 소요일수 증가)과 측지수 증가(Fig. 4D)를 관련지어 볼 수 있다.

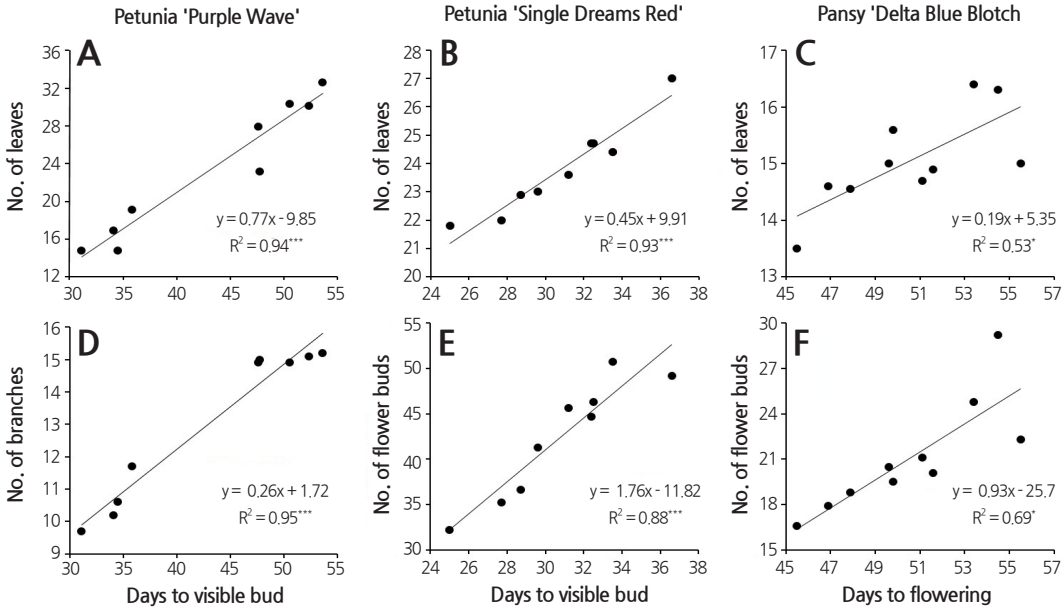

Fig. 4. Relationships between days to visible bud or flowering and number of leaves, branches or flower buds in *Petunia ×hybrida* 'Wave Purple' (A, D) and 'Single Dreams Red' (B, E), and *Viola ×wittrockiana* 'Delta Blue Blotch' (C, F). All data were derived from Table 2 and Fig. 1.

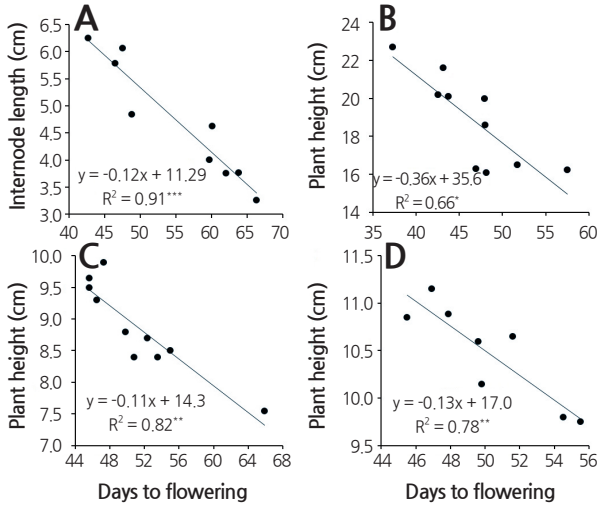

Fig. 5. Relationships between days to flowering and internode length in *Petunia ×hybrida* 'Wave Purple' (A) or plant height in *P. ×hybrida* 'Single Dreams Red' (B), and *Viola ×wittrockiana* 'Coiossus Yellow' (C) and 'Delta Blue Blotch' (D). All data were derived from Table 2 and Fig. 1. Internode length was calculated by dividing of plant height (Fig. 1) by leaf number (Table 2).

결론적으로 페튜니아와 팬지의 개화 촉진을 위한 장일처리 시 CFL을 사용하게 되면 SD에 비해 개화를 촉진하는 효과는 있으나, 관행의 INC보다는 개화가 지연되어 출하가 늦어지는 문제가 생길 수 있다. 반면, CFL 전조 시 줄기 신장이 억제되고 측지수나 화아수가 증가할 가능성이 있어 품질 향상에 도움이 될 것이다. 또한 CFL이 INC에 비해 초장 조절을 위한 PGR 처리 등의 비용과 노력, 환경부하를 줄일 수 있다. 그러나 전조에 소요되는 전기에너지 측면에서는 광전환 효율이 높은 CFL의 사용이 전기 소모를 절감할 수 있으나 작기가 길어져 그 장점이 상쇄될 것이다. 한편, 선행연구와 본 연구에서 보듯이 장일처리 광원의 광질이 개화 및 줄기 신장에 대한 영향은 종이나 품종에 따라 차이가 있으므로 장일처리용 광원 교체 시 종이나 품종 선택에 주의해야 한다. 또한 앞으로 R:FR 설정이 편리한 LED를 활용한 NI용 광원의 개발 및 상업적 활용과 다양한 품종에 대한 적용 연구가 필요하다.

초 록

자연단일기에 장일식물의 개화를 촉진하기 일반적으로 사용되어 온 백열등(INC)이 낮은 에너지 효율 때문에 생산이 금지되었는데, 이를 대체할 수 있는 광원 중 하나는 컴팩트 형광등(CFL)이다. 본 연구에서는 몇 가지 장일식물에 대해 9시간 단일(SD) 조건의 20°C 온실에서 INC, CFL, 그리고 이 둘의 혼합광원(INC + CFL)을 이용하여 2시간(2–h) 또는 4시간(4–h) 야파(NI)나 6시간 명기연장(DE) 처리를 한 후 개화 및 형태학적 반응을 비교하였다. 전조 광원의 적색광(R):원적색광(FR) 비율은 각각 0.60, 8.46, 0.91이었으며, PPFD는 모두 2.3 ± 0.3μmol · m^{-2} · s^{-1}로 맞추었고, 대조구로 9시간 단일처리(9–h SD)를 두었다. 처리 10주 후, 페튜니아 'Wave Purple'는 단일 하에서 전혀 개화하지 않았으며, 모든 장일처리에서는 100% 개화하였다. 개화는 INC 및 INC + CFL 하에서 FL보다 앞당겨졌으며, DE와 4–h NI가 2–h NI보다 개화를 더 촉진하였다. 페튜니아 'Single Dreams Red'는 처리 후 65일까지 모두 개화하였는데, DE와 4h–NI가 2–h NI보다 개화를 더 앞당겼고 INC와 INC + CFL에서 빨리 개화하였으며 INC 6–h DE에서 개화소요일수가 가장 짧았다. 초장은 페튜니아 두 품종 모두 개화가 빨랐던 INC 하에서 가장 길었고, INC + CFL는 중간 정도였다. 팬지 'Coiossus Yellow'와 'Delta Blue Blotch' 두 품종 모두 INC 처리가 FL보다 개화를 촉진시켰는데, 전조시간별 차이는 작게 나타났다. 줄기 신장도 INC가 촉진하였으나 광원 및 전조시간에 따른 차이는 페튜니아보다 작게 나타났다. 결국 R:FR이 낮은 INC나 INC + CFL 하에서 개화 및 줄기신장이 촉진되었으며 장일처리시간이 길수록 그 효과가 더 컸다. 결론적으로, INC의 대체 전조광원으로써 CFL도 페튜니아 및 팬지의 개화를 촉진하였고 줄기신장을 억제하였으나, 개화 촉진 효과는 INC에 비하여 작았다.

추가주요어: *Petunia* ×*hybrida*, *Viola* ×*wittrockiana*, 백열등, 야파, 장일식물, 적색광:원적색광 비율, 형광등

Literature Cited

Craig DS, Runkle ES (2012) Using LEDs to quantify the effect of the red to far-red ratio of night-interruption lighting on flowering of photoperiodic crops. Acta Hortic 956:179-186. doi:10.17660/ActaHortic.2012.956.18

Franklin KA (2008) Shade avoidance. New Phytol 179:930-944. doi:10.1111/j.1469-8137.2008.02507.x

Halliday KJ, Koornneef M, Whitelam GC (1994) Phytochrome B and at least one other phytochrome mediate the accelerated flowering response of *Arabidopsis thaliana* L. to low red/far-red ratio. Plant Physiol 104:1311-1315

Harris GP (1968) Photoperiodism in the glasshouse carnation: the effectiveness of different light sources in promoting flower initiation. Ann Bot 32:187-197

Hedden P (1999) Recent advances in gibberellin biosynthesis. J Exp Bot 50:553-556. doi:10.1093/jxb/50.334.553

Heins R, Cameron A, Carlson W (2000) Firing up perennials: The 2000 edition. Meister Media Worldwide, Willoughby, OH, USA

Kim YJ, Park YJ, Kim KS (2015) Night interruption promotes flowering and improves flower quality in *Doritaenopsis* orchid. Flower Res J 23:6-10. doi:10.11623/frj.2015.23.1.3

Kohyama F, Whitman C, Runkle ES (2014) Comparing flowering responses of long-day plants under incandescent and two commercial light-emitting diode lamps. HortTechnology 24:490-495

Mattson NS, Erwin JE (2005) The impact of photoperiod and irradiance on flowering of several herbaceous ornamentals. Sci Hortic 104:275-292. doi:10.1016/j.scienta.2004.08.018

Moe R, RD Heins (1990) Control of plant morphogenesis and flowering by light quality and temperature. Acta Hortic 272:81-89. doi:10.17660/ActaHortic.1990.272.11

Oh W, Kang KJ, Cho KJ, Shin JH, Kim KS (2013) Temperature and long-day lighting strategy affect flowering time and crop characteristics in *Cyclamen persicum*. Hortic Environ Biotechnol 54:484-491. doi:10.1007/s13580-013-0111-1

Oh W, Runkle ES, Warner RM (2010) Timing and duration of supplemental lighting during the seedling stage influence quality and flowering in petunia and pansy. HortScience 45:1332-1337

Padhye SR, Runkle ES (2011) Use of compact fluorescent lamps to provide a long-day photoperiod to herbaceous perennials. Acta Hortic 886:197-205. doi:10.17660/ActaHortic.2011.886.27

Park IS, Lim TJ, Oh W (2012) Growth responses of interior *Plectranthus amboinicus* and *Fittonia albivernis* influenced by different artificial light sources. Flower Res J 20:179-186. doi:10.11623/frj.2012.20.4.179

Runkle E (2002) Controlling photoperiod. Greenhouse Product News 12(10):90-93

Runkle E (2007) Providing long days. Greenhouse Product News 17(1):66

Runkle ES, Heins RD (2006) Manipulating the light environment to control flowering and morphogenesis of herbaceous plants. Acta Hortic 711:51-59. doi:10.17660/ActaHortic.2006.711.4

Runkle ES, Heins RD, Cameron AC, Carlson WH (2001) Specific functions of red, far-red, and blue light in flowering and stem extension of long-day plants. J Am Soc Hortic Sci 126:275-282

Runkle ES, Padhye SR, Oh W, Getter K (2012) Replacing incandescent lamps with compact fluorescent lamps may delay flowering. Sci Hortic 143:56-61. doi:10.1016/j.scienta.2012.05.028

Smith H, Whitelam GC (1997) The shade avoidance syndrome: multiple responses mediated by multiple phytochromes. Plant Cell Environ 20:840-844. doi:10.1046/j.1365-3040.1997.d01-104.x

Thomas, B, Vince-Prue D (1997) Photoperiodism in plants, 2nd ed. Academic Press, New York, NY, USA

Whitman CM, Heins RD, Cameron AC, Carlson WH (1998) Lamp type and irradiance level for daylength extensions influence flowering of *Campanula carpatica* 'Blue Clips', *Coreopsis grandiflora* 'Early Sunrise', and *Coreopsis verticillata* 'Moonbeam'. J Am Soc Hortic Sci 123:802-807

Yamada A, Tanigawa T, Suyama T, Matsuno T, Kunitake T (2008a) Night break treatment using different light sources promotes or delays growth and flowering of *Eustoma grandiflorum* (Raf.) Shinn. J Jpn Soc Hortic Sci 77:69-74. doi:10.2503/jjshs1.77.69

Yamada A, Tanigawa T, Suyama T, Matsuno T, Kunitake T (2008b) Improvement of *Eustoma grandiflorum* (Raf.) Shinn. cut flower quality for early-autumn shipping with long-day treatment using light sources that delay flower bud formation. J Jpn Soc Hortic Sci 77:296-303. doi:10.2503/jjshs1.77.296

Yamada A, Tanigawa T, Suyama T, Matsuno T, Kunitake T (2009) Red:far-red light ratio and far-red light integral promote or retard growth and flowering in *Eustoma grandiflorum* (Raf.) Shinn. Sci Hortic 120:101-106. doi:10.1016/j.scienta.2008.09.009