

LED 기반 콩[*Glycine max* (L.) Merr.] 세대단축 시스템 구축을 위한 조건 설정박규태<sup>1,§</sup> · 배지현<sup>2,§</sup> · 이주석<sup>3</sup> · 박수권<sup>4</sup> · 김돌이<sup>5</sup> · 문중경<sup>4</sup> · 서미숙<sup>5,†</sup>Establishing Optimal Conditions for LED-Based Speed Breeding System in Soybean [*Glycine max* (L.) Merr.]Gyu Tae Park<sup>1,§</sup>, Ji-Hyun Bae<sup>2,§</sup>, Ju Seok Lee<sup>3</sup>, Soo-Kwon Park<sup>4</sup>, Dool-Yi Kim<sup>5</sup>, Jung-Kyung Moon<sup>4</sup>, and Mi-Suk Seo<sup>5,†</sup>

**ABSTRACT** Plant breeding is a time-consuming process, mainly due to the limited annual generational advancement. A speed breeding system, using LED light sources, has been applied to accelerate generational progression in various crops. However, detailed protocols applicable to soybeans are still insufficient. In this study, we report the optimized protocols for a speed breeding system comprising 12 soybean varieties with various maturity ecotypes. We investigated the effects of two light qualities (RGB ratio), three levels of light intensity (PPFD), and two soil conditions on the flowering time and development of soybeans. Our results showed that an increase in the red wavelength of the light spectrum led to a delay in flowering time. Furthermore, as light intensity increased, flowering time, average internode length, and plant height decreased, while the number of nodes, branches, and pods increased. When compared to agronomic soil, horticultural soil resulted in an increase of more than 50% in the number of nodes, branches, and pods. Consequently, the optimal conditions were determined as follows: a 10-hour short-day photoperiod, an equal RGB ratio (1:1:1), light intensity exceeding 1,300 PPFD, and the use of horticultural soil. Under these conditions, the average flowering time was found to be 27.3±2.48 days, with an average seed yield of 7.9±2.67. Thus, the speed breeding systems reduced the flowering time by more than 40 days, compared to the average flowering time of Korean soybean resources (approximately 70 days). By using a controlled growth chamber that is unaffected by external environmental conditions, up to 6 generations can be achieved per year. The use of LED illumination and streamlined facilities further contributes to cost savings. This study highlights the substantial potential of integrating modern crop breeding techniques, such as digital breeding and genetic editing, with generational shortening systems to accelerate crop improvement.

**Keywords** : early flowering, LED, RGB ratio, soybean, speed breeding

콩(*Glycine max* L.)은 전세계적으로 중요한 식량 작물 중 하나로, 식물성 단백질, 지방 및 다양한 영양소의 공급원으로써 재배가 이루어지고 있다(Franzen, 1999; Natarajan *et*

*al.*, 2013; Rizzo & Baroni, 2018). 우리나라에서는 장류두 부용, 나물용 및 밥밑용 등 다양한 용도에 맞게 품종이 개발되어 현재까지 약 130개 이상의 품종이 개발되었다. 최

<sup>§</sup>Theses authors contributed equally to this work.

<sup>1</sup>농촌진흥청 국립식량과학원 작물기초기반과 박사후연구원 (Ph.D. Researcher, Crop Foundation Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea)

<sup>2</sup>농촌진흥청 국립식량과학원 작물기초기반과 석사과정 (MSc Student, Crop Foundation Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea)

<sup>3</sup>한국생명공학연구원 바이오평가센터 선임연구원 (Senior Researcher, Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology Bio-evaluation Center, Cheongju 28116, Korea)

<sup>4</sup>농촌진흥청 국립식량과학원 작물기초기반과 농업연구관 (Senior Researcher, Crop Foundation Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea)

<sup>5</sup>농촌진흥청 국립식량과학원 작물기초기반과 농업연구사 (Researcher, Crop Foundation Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea)

<sup>†</sup>Corresponding author: Mi-Suk Seo; (Phone) +82-63-238-5326; (E-mail) [sms1030@korea.kr](mailto:sms1030@korea.kr)

<Received 25 September, 2023; Revised 8 November, 2023; Accepted 10 November, 2023>

**Table 1.** List of varieties used in the experiment, grouped according to maturity ecotype and corresponding experimental conditions.

Light quality (R:G:B)	PPFD	Soil	Maturity ecotype	Varieties
1:1:1	400, 900, 1,300	Horticultural soil, Agronomic soil	Early maturity	Maverick
			Mid maturity	Gwangan
				Pungwon
			Daepung	
Late maturity	Soheung-2			
2:1:1	400, 600, 800	Horticultural soil,	Early maturity	Wonhwang
			Mid maturity	Yonpoong
				Daepung
				Gwangan
			Late maturity	Seonbi
				Seonam
	Geomeunbak			
	PI86490			
	Williams82			

근에는 호심콩과 같은 기능성 콩이 개발되어 산업화 소재로 개발되고 있다(Lee *et al.*, 2018). 교배 육종 기술을 통한 품종의 개발과 보급에는 형질의 선발, 교배, 세대 진전 등 다양한 단계를 거쳐 10년 이상의 시간이 소요된다. 따라서, 육종의 효율성을 향상시키고 신품종을 빠르게 개발하기 위한 육종 방법의 현대화가 중요한 과제로 부각되고 있다(Wieczorek & Wright, 2012; Atlin *et al.*, 2017). 이를 위해 전통적인 단주계통법(Single Seed Descent, SSD)에서부터 분자 육종 기법 및 CRISPR-Cas9을 이용하는 형질전환과 같은 현대적인 방법이 도입되며 육종의 효율성이 향상되었다. 그러나 세대 진전을 가속화하여 소요 시간과 노력을 최소화하는 것은 여전히 큰 과제로 남아있다(Ghosh *et al.*, 2018; Ahmar *et al.*, 2020). 최근에는 이러한 문제를 해결하기 위해 LED 조명을 활용한 speed breeding (세대단축) 시스템이 주목받고 있다. 세대단축 시스템은 환경 조건, 특히 광 조건을 제어하여 식물의 세대 진전을 가속화하는 것으로 보고된 바 있다(Wanga *et al.*, 2021). 초기의 세대단축 시스템은 주로 밀(*Triticum aestivum*), 듀럼밀(*Triticum durum*), 보리(*Hordeum vulgare*)과 같은 장일성 작물에 적용되었으나, 최근에는 병아리콩(*Cicer arietinum*), 완두콩(*Pisum sativum*), 유채(*Brassica napus*), 콩(*Glycine max*) 등과 같은 단일성 작물에 적용하여 연간 최대 6번의 세대진전이 가능하게 되었다(Ghosh *et al.*, 2018; Watson *et al.*, 2018; Cazzola *et al.*, 2020; Jähne *et al.*, 2020; Wanga *et al.*, 2021; Song *et*

*al.*, 2022b; Lee *et al.*, 2023). 본 연구는 LED 광량, 광질, 토양 조건 등을 고려하여 세대 진전을 가속화하기 위한 조건을 설정함으로써, 콩의 세대단축 시스템 대한 이해를 높이고, 육종 기간의 단축과 종자 생산의 안정성을 높이는 데 기여하고자 한다.

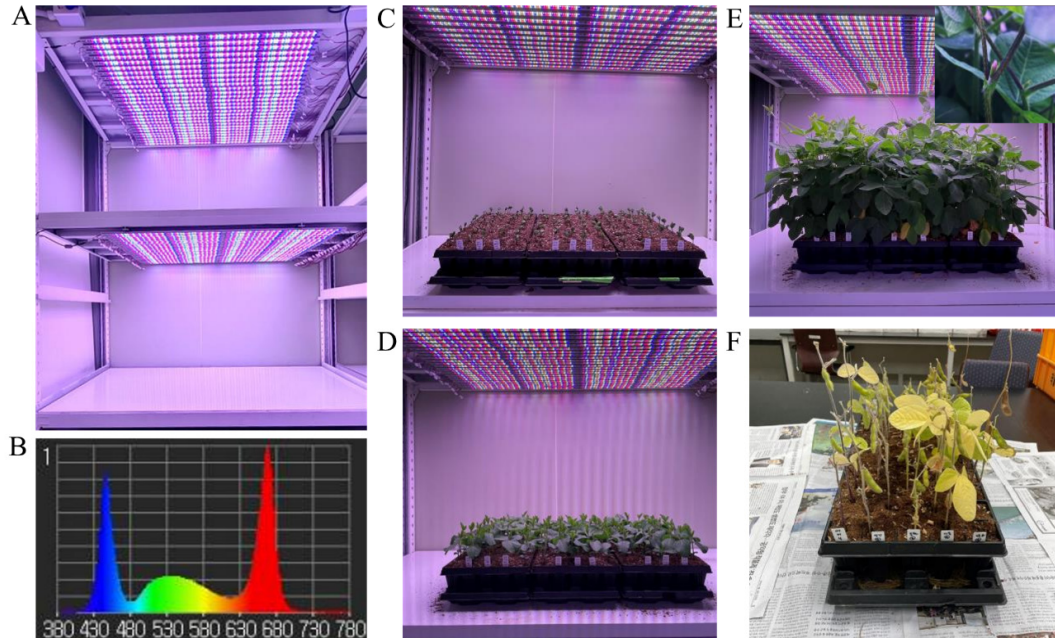
## 재료 및 방법

### 식물 재료 및 생육 조건

본 실험에 사용된 콩은 재배종 핵심집단(Jeong *et al.*, 2019)에서 생태형을 고려하여 선정되었다. 조생종으로 메버릭, 원황콩, 연풍콩, 중생종에는 광안콩, 풍원콩, 대풍콩, 선비콩, 서남콩, 만생종으로는 소흥2호, 검은박콩, PI86490, Williams 82K을 선별하여 총 12품종을 사용하였다. 각 품종별 특성과 실험 조건은 Table 1에 나타내었다. 종자는 28 cm × 54 cm × 11.2 cm 크기의 50공 트레이에 품종 당 10립을 파종하였다. 생육 조건은 10/14h 단일조건으로 10시간 명조건에서는 28°C, 14시간 암조건에서는 22°C로 온도 조건을 설정하여 유지하였다.

### LED 기반 세대단축 시스템 생장 조건

LED 기반 세대단축 시스템의 최적 조건을 구축하기 위해 3가지 생태형을 포함하는 총 12 품종을 이용하여 광질과 광량 및 토양 조건을 조사하였다(Table 1). LED광원은 적



**Fig. 1.** Diagram of the cultivation process using LEDs. (A) shows the arrangement of LED modules and shelf structure; (B) demonstrates the RGB spectrum generated by the used LED diodes. Stages of growth from germination to R7 are represented in panels (C) to (F). Specifically, (E) corresponds to the R1 stage, and (F) corresponds to the R7 stage.

색광(630 nm, 660 nm), 녹색광(530 nm), 청색광(440 nm)으로 구성된 LED모듈을 제작하여 실험에 사용하였다(Wooree bio, Korea) (Fig. 1). 본 실험에서는 독립 변인 3개(광질, 광량, 토양)에 대해 다음과 같이 성장 조건을 설정하였다. 먼저, 광질은 적색광:녹색광:청색광 비율을 1:1:1과 2:1:1의 두 가지 조건으로 설정하였다. 광질 1:1:1비율에서 광량은 광합성 광량 자속 밀도 PPFD (Photosynthetic Photon Flux Density)를 기준으로 400 PPFD, 900 PPFD, 1,300 PPFD의 3단계로 설정하였고, 토양 조건으로는 상토(바로커, 서울바비오)와 배양토(지렁이 토분, 도담)를 사용하였다. 광질 2:1:1에서는 광량 400 PPFD, 600 PPFD, 800 PPFD로 설정하였고, 토양 조건으로는 상토를 사용하였다. 광질 및 광량의 측정은 지면으로부터 30 cm 떨어진 지점으로부터 PG200N spectral PAR meter (UPRtek, Taiwan)를 이용하여 측정하였다.

### 세대단축 시스템 조건에 따른 표현형 분석

생태형, 광질, 광량, 토양 조건에 따른 표현형을 평가하기 위해 개화일수 및 각 조건에 따른 표현형을 분석하였다. 광질 1:1:1비율에서는 메버릭, 광안콩, 풍원콩, 대풍콩, 소흥2호 품종의 개화일수, 평균 절간장, 절수, 경장, 분지 수, 꼬투리 수, 개체 별 종자 수를 측정하였다. 광질 2:1:1비율에서는 원황콩, 대풍콩, 연풍콩, 광안콩, 선비콩, 서남콩, 검은

박콩, PI86490, Williams82K 품종의 개화일수를 측정하였다(Table 1). 개화일수는 각 식물의 주 줄기에서 첫 꽃이 피는 R1 단계에 도달 하는 일수를 측정하였고(Pedersen *et al.*, 2004), 60일을 초과하는 경우 모두 60일로 기록하였다. 평균 절간장, 절수, 경장, 분지 수, 꼬투리 수, 개체 별 종자 수는 각각의 개체에서 한 개 이상의 성숙된 꼬투리를 보이는 R7 단계에서 각 개체 별로 측정하였다(Fig. 1). 식물 생육 측정을 위해 모든 처리에서 품종 당 10개체의 생육을 측정하였으며, 개체 및 처리 구간의 통계 분석은 ANOVA 분석으로 유의성을 검증하였으며, 사후검증으로 던컨의 다중검정(Duncan's multiple range test)을 실시하였다. 모든 통계 분석은 유의수준 0.05 이하를 기준으로 시행하였으며, JAMOVI (<https://www.jamovi.org/>)와 R 통계 소프트웨어를 사용하였다.

## 결과 및 고찰

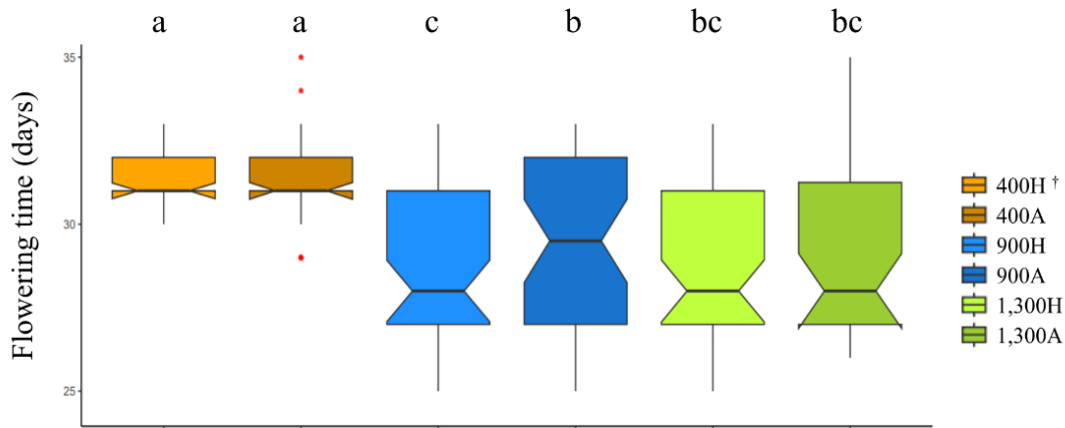
### LED 광량에 따른 개화일수 및 생육 특성

LED 광원을 기반으로 세대단축 시스템 조건 설정을 위하여 광량에 따른 개화일수 단축 효과 및 생육 특성을 조사하였다. 일장은 10시간 단일 조건으로 광질 1:1:1비율에서 광량 400 PPFD, 900 PPFD, 1,300 PPFD 조건으로 각각 설정하였을 때 평균 개화일수는 400 PPFD에서  $29.4 \pm 1.87$ 일,

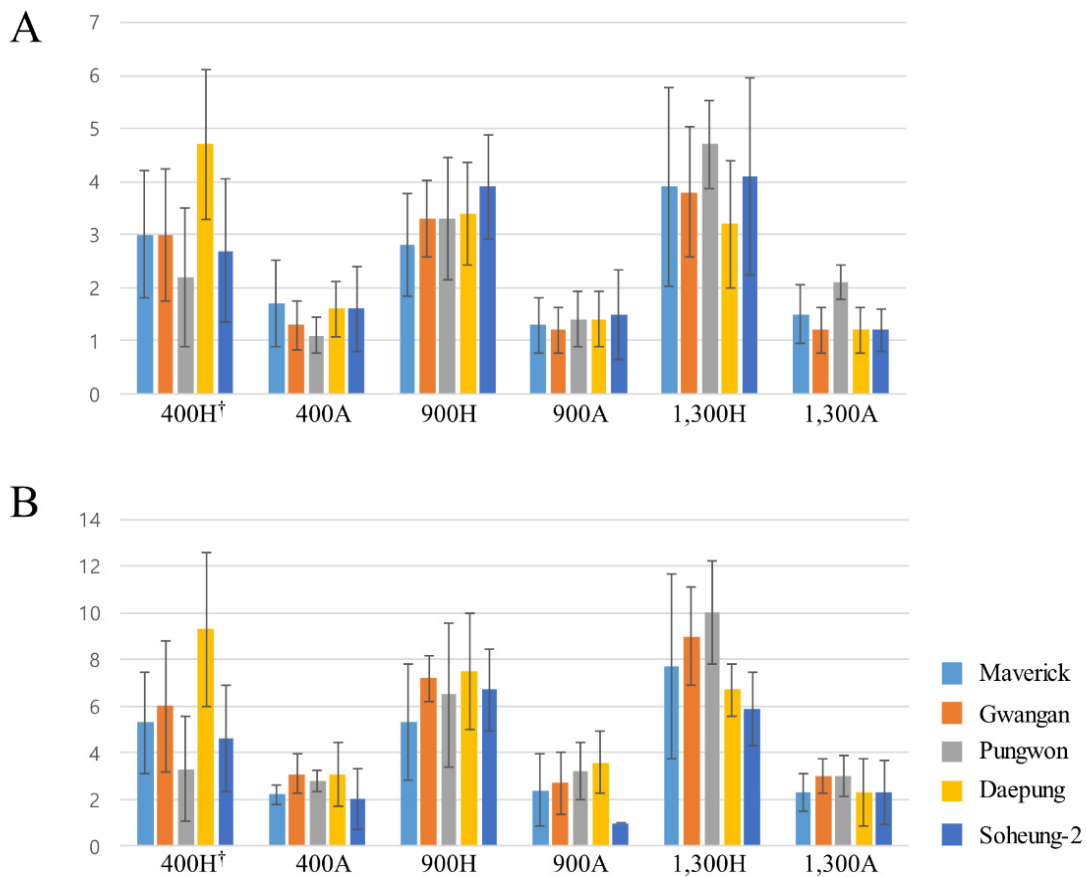
**Table 2.** Growth traits and yield components of soybean obtained under various PPFd and soil conditions with an RGB ratio of 1:1:1.

Traits	Varieties	400 PPFd		900 PPFd		1300 PPFd	
		H <sup>†</sup>	A	H	A	H	A
Flowering time (days)	Maverick	30.0±3.50 <sup>a††</sup>	28.9±2.40 <sup>ab</sup>	29.1±2.70 <sup>ab</sup>	29.1±2.40 <sup>ab</sup>	27.0±2.30 <sup>b</sup>	29.6±2.60 <sup>ab</sup>
	Gwangan	28.7±1.00 <sup>a</sup>	29.1±3.40 <sup>a</sup>	24.9±0.70 <sup>b</sup>	24.7±0.60 <sup>b</sup>	25.1±0.80 <sup>b</sup>	24.5±0.30 <sup>b</sup>
	Pungwon	29.5±0.70 <sup>a</sup>	30.2±1.40 <sup>a</sup>	26.5±0.60 <sup>a</sup>	27.8±1.90 <sup>ab</sup>	26.5±2.00 <sup>b</sup>	27.9±3.20 <sup>ab</sup>
	Daepung	29.1±0.40 <sup>a</sup>	29.6±0.70 <sup>a</sup>	29.0±0.30 <sup>a</sup>	30.2±2.40 <sup>a</sup>	29.7±0.80 <sup>a</sup>	29.2±3.00 <sup>a</sup>
	Soheung-2	29.5±0.50 <sup>a</sup>	29.1±2.50 <sup>a</sup>	24.8±3.60 <sup>b</sup>	27.8±3.70 <sup>ab</sup>	28.2±2.30 <sup>ab</sup>	27.1±3.90 <sup>ab</sup>
	Mean	29.3±1.63 <sup>a</sup>	29.4±2.10 <sup>a</sup>	26.9±2.87 <sup>c</sup>	27.9±3.19 <sup>b</sup>	27.3±2.48 <sup>bc</sup>	27.7±3.52 <sup>bc</sup>
Internode length (cm)	Maverick	4.6±0.86 <sup>a</sup>	4.2±0.75 <sup>ab</sup>	3.6±0.75 <sup>abc</sup>	3.2±1.07 <sup>bc</sup>	3.1±0.64 <sup>bc</sup>	2.6±0.62 <sup>c</sup>
	Gwangan	4.4±0.52 <sup>a</sup>	3.6±0.37 <sup>ab</sup>	3.4±0.50 <sup>bc</sup>	2.6±0.58 <sup>cd</sup>	2.4±0.61 <sup>d</sup>	2.6±0.68 <sup>d</sup>
	Pungwon	4.3±0.34 <sup>a</sup>	3.5±0.23 <sup>b</sup>	3.2±0.79 <sup>b</sup>	2.4±0.38 <sup>c</sup>	2.3±0.65 <sup>c</sup>	2.2±0.34 <sup>c</sup>
	Daepung	5.0±0.32 <sup>a</sup>	4.7±0.68 <sup>ab</sup>	4.1±0.62 <sup>bc</sup>	3.7±0.72 <sup>c</sup>	4.0±0.58 <sup>bc</sup>	3.7±0.37 <sup>c</sup>
	Soheung-2	6.1±0.79 <sup>a</sup>	5.6±0.76 <sup>ab</sup>	3.4±0.87 <sup>c</sup>	3.9±1.10 <sup>bc</sup>	3.2±0.80 <sup>c</sup>	4.0±1.48 <sup>bc</sup>
	Mean	4.9±0.89 <sup>a</sup>	4.2±0.95 <sup>ab</sup>	3.5±0.76 <sup>c</sup>	3.1±0.93 <sup>d</sup>	3.0±0.88 <sup>d</sup>	3.0±1.01 <sup>d</sup>
Number of nodes per plants	Maverick	6.1±0.64 <sup>ab</sup>	4.3±0.52 <sup>b</sup>	5.6±1.13 <sup>b</sup>	5.5±0.55 <sup>b</sup>	7.9±1.07 <sup>a</sup>	4.5±0.84 <sup>b</sup>
	Gwangan	5.9±0.74 <sup>bc</sup>	4.9±0.35 <sup>c</sup>	6.7±0.50 <sup>ab</sup>	5.9±0.57 <sup>bc</sup>	7.4±0.52 <sup>a</sup>	4.7±0.50 <sup>c</sup>
	Pungwon	5.1±0.78 <sup>bc</sup>	4.8±0.44 <sup>c</sup>	6.4±0.70 <sup>ab</sup>	6.2±0.63 <sup>bc</sup>	7.8±0.42 <sup>a</sup>	5.2±0.44 <sup>bc</sup>
	Daepung	6.9±0.60 <sup>ab</sup>	4.9±0.60 <sup>c</sup>	6.9±0.88 <sup>ab</sup>	5.6±0.70 <sup>bc</sup>	7.6±0.73 <sup>a</sup>	4.9±0.60 <sup>c</sup>
	Soheung-2	6.5±1.08 <sup>ab</sup>	5.3±0.76 <sup>b</sup>	5.3±0.88 <sup>a</sup>	6.1±0.90 <sup>b</sup>	6.9±1.20 <sup>ab</sup>	5.9±0.69 <sup>b</sup>
	Mean	6.1±0.97 <sup>c</sup>	4.8±0.59 <sup>d</sup>	6.8±1.16 <sup>b</sup>	5.9±0.70 <sup>c</sup>	7.5±0.86 <sup>a</sup>	4.9±1.05 <sup>d</sup>
Plant height (cm)	Maverick	27.8±3.07 <sup>a</sup>	17.9±2.84 <sup>b</sup>	19.2±2.51 <sup>b</sup>	17.3±4.83 <sup>b</sup>	24.2±5.36 <sup>a</sup>	11.3±1.89 <sup>c</sup>
	Gwangan	25.8±4.77 <sup>a</sup>	17.5±2.39 <sup>b</sup>	22.6±3.41 <sup>a</sup>	15.4±2.55 <sup>b</sup>	17.7±4.27 <sup>b</sup>	11.9±3.33 <sup>c</sup>
	Pungwon	22.0±7.64 <sup>a</sup>	16.5±5.45 <sup>c</sup>	20.6±5.66 <sup>ab</sup>	14.8±1.96 <sup>cd</sup>	18.2±5.14 <sup>bc</sup>	11.4±3.94 <sup>d</sup>
	Daepung	34.3±4.37 <sup>a</sup>	22.7±3.64 <sup>c</sup>	28.4±6.30 <sup>b</sup>	20.5±4.95 <sup>cd</sup>	30.1±5.63 <sup>ab</sup>	18.0±2.29 <sup>d</sup>
	Soheung-2	39.2±6.34 <sup>a</sup>	28.9±2.03 <sup>b</sup>	27.2±5.27 <sup>bc</sup>	23.1±4.37 <sup>bc</sup>	21.9±6.35 <sup>bc</sup>	22.9±8.22 <sup>c</sup>
	Mean	30.0±7.72 <sup>a</sup>	20.6±5.22 <sup>cd</sup>	23.7±5.96 <sup>b</sup>	18.0±4.78 <sup>d</sup>	22.1±6.90 <sup>bc</sup>	15.0±5.92 <sup>e</sup>
Number of branch per plants	Maverick	1.0±0.00 <sup>a</sup>	1.0±0.00 <sup>a</sup>	1.0±0.00 <sup>a</sup>	1.0±0.00 <sup>a</sup>	1.0±0.00 <sup>a</sup>	1.0±0.00 <sup>a</sup>
	Gwangan	1.1±0.32 <sup>ab</sup>	1.4±0.52 <sup>ab</sup>	1.1±0.33 <sup>ab</sup>	1.5±0.53 <sup>ab</sup>	1.0±0.00 <sup>b</sup>	1.7±0.50 <sup>a</sup>
	Pungwon	1.0±0.00 <sup>b</sup>	2.0±0.00 <sup>a</sup>	1.0±0.00 <sup>b</sup>	1.2±0.42 <sup>b</sup>	1.4±0.52 <sup>b</sup>	1.0±0.00 <sup>b</sup>
	Daepung	1.0±0.00 <sup>ab</sup>	1.0±0.00 <sup>ab</sup>	1.0±0.00 <sup>b</sup>	1.5±0.53 <sup>a</sup>	1.3±0.50 <sup>ab</sup>	1.3±0.50 <sup>ab</sup>
	Soheung-2	1.1±0.32 <sup>ab</sup>	1.1±0.38 <sup>a</sup>	1.1±0.32 <sup>a</sup>	1.1±0.38 <sup>a</sup>	1.3±0.48 <sup>a</sup>	1.3±0.49 <sup>a</sup>
	Mean	1.0±0.20 <sup>b</sup>	1.3±0.48 <sup>a</sup>	1.0±0.20 <sup>b</sup>	1.3±0.46 <sup>a</sup>	1.2±0.42 <sup>a</sup>	1.3±0.45 <sup>a</sup>
Number of pods per plant	Maverick	3.0±1.20 <sup>ab</sup>	1.7±0.82 <sup>b</sup>	2.8±0.97 <sup>ab</sup>	1.3±0.52 <sup>b</sup>	3.9±1.86 <sup>a</sup>	1.5±0.55 <sup>b</sup>
	Gwangan	3.0±1.25 <sup>ab</sup>	1.3±0.46 <sup>b</sup>	3.3±0.71 <sup>a</sup>	1.2±0.42 <sup>b</sup>	3.8±1.23 <sup>a</sup>	1.2±0.44 <sup>b</sup>
	Pungwon	2.2±1.30 <sup>bc</sup>	1.1±0.33 <sup>c</sup>	3.3±1.16 <sup>ab</sup>	1.4±0.52 <sup>c</sup>	4.7±0.82 <sup>a</sup>	2.1±0.33 <sup>bc</sup>
	Daepung	4.7±1.41 <sup>a</sup>	1.6±0.53 <sup>bcd</sup>	3.4±0.97 <sup>ab</sup>	1.4±0.52 <sup>cd</sup>	3.2±1.20 <sup>abc</sup>	1.2±0.44 <sup>d</sup>
	Soheung-2	2.7±1.34 <sup>abc</sup>	1.6±0.79 <sup>bc</sup>	3.9±0.99 <sup>ab</sup>	1.5±0.84 <sup>bc</sup>	4.1±1.85 <sup>a</sup>	1.2±0.41 <sup>c</sup>
	Mean	3.1±1.50 <sup>b</sup>	1.4±0.59 <sup>c</sup>	3.4±1.00 <sup>b</sup>	1.4±0.53 <sup>c</sup>	4.0±1.44 <sup>a</sup>	1.5±0.55 <sup>c</sup>
Number of seeds per plants	Maverick	5.3±2.19 <sup>ab</sup>	2.2±0.41 <sup>b</sup>	5.3±2.50 <sup>ab</sup>	2.4±1.52 <sup>b</sup>	7.7±3.95 <sup>a</sup>	2.3±0.82 <sup>b</sup>
	Gwangan	6.0±2.83 <sup>abc</sup>	3.1±0.83 <sup>bc</sup>	7.2±0.97 <sup>ab</sup>	2.7±1.34 <sup>c</sup>	9.0±2.11 <sup>a</sup>	3.0±0.71 <sup>c</sup>
	Pungwon	3.3±2.24 <sup>b</sup>	2.8±0.44 <sup>b</sup>	6.5±3.10 <sup>ab</sup>	3.2±1.23 <sup>b</sup>	10.0±2.21 <sup>a</sup>	3.0±0.87 <sup>b</sup>
	Daepung	9.3±3.28 <sup>a</sup>	3.1±1.36 <sup>b</sup>	7.5±2.51 <sup>a</sup>	3.6±1.35 <sup>b</sup>	6.7±1.12 <sup>ab</sup>	2.3±1.41 <sup>b</sup>
	Soheung-2	4.6±2.27 <sup>abc</sup>	2.0±1.29 <sup>c</sup>	6.7±1.77 <sup>a</sup>	1.0±0.00 <sup>c</sup>	5.9±1.60 <sup>ab</sup>	2.3±1.37 <sup>bc</sup>
	Mean	5.7±3.20 <sup>c</sup>	2.7±1.03 <sup>d</sup>	6.8±2.13 <sup>b</sup>	3.0±1.32 <sup>d</sup>	7.9±2.67 <sup>a</sup>	2.8±0.89 <sup>d</sup>

<sup>†</sup>H: horticultural soil, A: agronomic soil. <sup>††</sup>Means with the same letter are not significantly different at 5% level.



**Fig. 2.** Box plot illustrating the flowering time based on light intensity and soil treatments. The mean flowering time  $\pm$  standard error (SE) is presented, with an RGB ratio of 1:1:1 and various light intensity and soil conditions. Different lowercase letters simultaneously indicate significant differences among treatments (Duncan’s test,  $p < 0.05$ ). †Numbers represent PPFD intensity, H: horticultural soil, A: agronomic soil.



**Fig. 3.** Pod number and seed yield in response to PPFD levels and soil conditions. Data obtained for five different varieties with an RGB ratio of 1:1:1, three light intensities (400 PPFD, 900 PPFD and 1,300 PPFD), and two soil types (horticultural soil and agronomic soil). (A) number of pods per plant. (B) number of seeds per plant. †Numbers represent PPFD intensity, H: horticultural soil, A: agronomic soil.

900 PPFD에서 27.3±3.07일, 그리고 1,300 PPFD에서 27.4±3.00일로 나타났다(Table 2). 비교적 낮은 광량인 400 PPFD보다 900 PPFD 이상의 높은 광량에서 개화일수가 통계적으로 유의하게 단축되었다(Fig. 2). 광량에 따른 평균 절간장은 400 PPFD에서 4.6±0.81 cm, 900 PPFD에서 3.3±0.52 cm, 그리고 1,300 PPFD에서 3.0±0.68 cm로 광량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다(Table 2). 개체 별 절수는 400 PPFD에서 평균 5.5±1.03개였으며, 900 PPFD에서 6.3±1.06개, 1300 PPFD에서 6.3±1.47개로 400 PPFD와 비교하여 900 PPFD와 1,300 PPFD에서 증가하는 경향을 보였다(Table 2). 광량이 증가함에 따라 평균 절간장은 감소하는 반면 절수는 증가하는 것을 확인하였다. 제한된 기내 재배환경에서 식물의 과도한 성장을 제어하기 위해서는 절간장과 절수에 영향을 받는 주경의 길이가 짧은 것이 유리한 것으로 판단된다. 연구 결과, 광도가 400 PPFD에서 900 PPFD, 1,300 PPFD로 증가함에 따라 평균 25.1±8.94 cm, 21.0±6.13 cm, 18.6±7.59 cm로 주경 길이가 통계적으로 유의하게 감소하는 것이 확인되었다. 개체 별 평균 협수는 400 PPFD에서 2.3±1.09개, 900 PPFD에서 2.4±1.08개, 그리고 1,300 PPFD에서 2.7±1.39개였으며, 립수는 400 PPFD에서 4.2±2.23개, 900 PPFD에서 4.6±2.31개, 그리고 1,300 PPFD에서 5.2±2.99개로 광량의 증가에 따라 유의하게 증가하였다(Table 2, Fig. 3). 결과적으로, 광량이 증가함에 따라 개화일수, 평균 절간장, 주경은 감소하는 경향을 보였다. 반면, 개체 별 절수, 협수, 립수는 증가하는 경향을 나타냈다. 세대진전을 빠르게 진행시키기 위해서는 조기 개화는 중요한 요소로 간주된다. 또한, 안정적인 세대진전을 위해서는 충분한 종자 확보가 필요하며, 이에 연관된 형질인 절수, 협수, 립수는 광량 증가에 따라 유의하게 증가하는 경향을 보였다. 따라서, 본 연구에서 광량의 증가는 효율적인 세대단축 시스템을 위해 유리한 것으로 판단된다.

### 토양 조건에 따른 개화일수 및 생육 특성

토양 조건에 따른 세대단축 효과를 조사하기 위해 상토와 배양토에서 생육을 조사한 결과, 절수, 협수, 립수에서 유의한 생육 차이를 보였다. 절수는 상토 조건에서 평균 6.78±1.14개, 배양토에서는 5.3±0.81개로 상토 조건에서 절수가 유의하게 증가하였다(Table 2). 특히 메버릭 품종의 경우 1,300 PPFD의 광량에서 상토로 재배했을 때 평균 7.9±1.07개의 절수를 보였으며, 같은 광량에서 배양토로 재배했을 때는 평균 4.5±0.84개의 절수를 보여, 75%이상의 절수 차이를 나타냈다(Table 2). 토양 조건에 따른 협수를 조사한 결과, 상토 조건에서는 평균 3.5±0.7개, 배양토에서는

1.4±0.26개로 2배 이상 차이를 보였으며, 모든 광량에서 유의한 차이를 보였다(Table 2, Fig. 3). 개체 당 립수 또한 상토에서 재배하였을 때 배양토에 비해 모든 광량 구간에서 립수가 2배이상 차이를 보이며 통계적으로 유의함을 확인하였다. 그러나 토양 조건에 따른 평균 개화일수와 평균 절간장에는 유의미한 차이가 관찰되지 않았다(Table 2). 배양토는 지렁이 퇴비를 추가하여 영양을 강화하였지만 배수 능력은 저하되었다. 콩의 경우 습한 토양 상태에서 산소 부족으로 인해 뿌리의 활력이 떨어진 콩에 비하여 적절한 배수시설 통해 수분을 관리할 경우 10~25%의 수량 증가가 보고되었다(Poole *et al.*, 2009; Jung *et al.*, 2011; Jung *et al.*, 2023). 본 연구에서도 수분 관리가 용이한 상토 조건이 수량 증가에 긍정적인 영향을 미친 것을 확인하였다. 본 연구의 결과로, 세대단축 시스템에서 토양 조건이 종자의 수확량에 관련된 형질에 유의한 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 현재까지 LED 광원을 이용한 세대단축 시스템에서 토양 조건의 영향에 대한 연구 보고는 알려진 바 없다. 본 연구결과에서는 토양 조건에 따라 생육 특성과 종자수확량의 현저한 차이가 확인됨에 따라, 세대단축 시스템 연구에서 광 조건의 조절과 더불어 토양 조건의 검토가 필수적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

### 광질에 따른 개화일수 및 생육 특성

광합성과 광 효소의 활성화에 영향을 주는 것으로 알려진 적색광(630~660 nm)이 개화일수에 미치는 영향을 추가적으로 분석하였다(Casal, 2013). 광질 2:1:1 비율로 설정된 환경에서 900 PPFD를 초과하는 광량은 식물의 과도한 성장을 유발하여 제한된 기내 재배 환경 이상의 공간을 필요로 하였다. 이에 따라, 광질 2:1:1 비율에서는 광질 1:1:1비율에 비하여 낮은 광량인 400 PPFD, 600 PPFD, 800 PPFD로 세분화 하여 비교하였다. 또한, 본 연구에서는 국내에서 형질전환 연구에 널리 사용되는 광안콩을 포함하여 다양한 품종들의 개화 시기에 대한 경향성을 평가하였다(Kim *et al.*, 2017; Cho *et al.*, 2021; Song *et al.*, 2022a). 적색광의 비중을 높여 광질 2:1:1비율 적용 시 모든 품종의 평균 개화일수는 54.0±7.32일로, 광질 1:1:1비율 처리구에 비해 평균 15일 이상 지연되었다(Tables 2, 3). 이 결과는 광질이 개화에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 시사한다. 또한, 광질 2:1:1비율에서 광량 400 PPFD, 600 PPFD, 800 PPFD 조건에서의 개화일수는 각각 55.4±7.41일, 54.2±6.47일, 52.6±7.79일로 나타났으며, 광량 증가에 따른 개화일수 단축이 광질 1:1:1비율에서와 유사하게 확인되었다(Table 3). 따라서 세대단축 시스템에서의 광질과 광량이 개화일수에 큰

**Table 3.** Flowering time of nine soybean varieties under different PPF intensity with an RGB ratio of 2:1:1.

Maturity ecotype	Cultivar	500 PPF	700 PPF	900 PPF
Early maturity	Wonhwang	60.0±0.00 <sup>a†</sup>	55.5±7.26 <sup>a</sup>	54.4±7.24 <sup>a</sup>
	Yonpoong	54.9±7.67 <sup>a</sup>	53.3±7.13 <sup>ab</sup>	49.8±8.82 <sup>b</sup>
Mid maturity	Daepung	60.0±0.00 <sup>a</sup>	58.7±4.11 <sup>a</sup>	58.7±4.11 <sup>a</sup>
	Gwangan	56.1±6.59 <sup>a</sup>	50.1±5.24 <sup>ab</sup>	46.9±4.72 <sup>b</sup>
	Seonbi	48.4±6.43 <sup>a</sup>	56.3±5.96 <sup>b</sup>	47.2±4.73 <sup>a</sup>
	Seonam	54.1±9.17 <sup>a</sup>	48.6±4.03 <sup>a</sup>	49.7±8.91 <sup>a</sup>
Late maturity	Geomeunbak	46.2±7.67 <sup>a</sup>	53.0±6.65 <sup>a</sup>	53.5±8.41 <sup>a</sup>
	PI86490	60.0±0.00 <sup>a</sup>	54.0±8.49 <sup>a</sup>	54.0±8.25 <sup>a</sup>
	Williams82	60.0±0.00 <sup>a</sup>	60.0±0.00 <sup>a</sup>	60.0±0.00 <sup>a</sup>
	Mean	55.4±7.41 <sup>a</sup>	54.2±6.47 <sup>ab</sup>	52.6±7.79 <sup>b</sup>

<sup>†</sup>Means with the same letter are not significantly different at 5% level.

영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다. 이전 연구들에 따르면, 단일 식물의 개화 유도는 광 파장대에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Eskins, 1992; Smith & Whitelam, 1997; Craig & Runkle, 2013). Jähne *et al.* (2020)에서는 콩에서 원적색광과 야간의 추가적인 청색광 조명은 빠른 개화를 유도하지 않았으나, 적색광과 청색광 비율 1:2는 1:1 및 2:1 비율에 비해 더 빠른 개화를 유도하였다. 본 실험 결과에서도 광질 1:1:1비율이 2:1:1비율보다 더 빠른 개화를 보였으며, 결과적으로 낮은 적색광 비율과 높은 광량에서 연간 최대 6회의 세대진전이 가능함을 확인하였다.

### 생태형에 따른 개화일수 및 생육 특성

콩의 생태형에 따른 개화일수 및 생육 특성을 분석한 결과, 다양한 광량, 광질, 그리고 토양조건에서 일관된 경향은 확인되지 않았다(Table 2). 현재까지 알려진 한국 재래종 자원들의 평균 개화일수는 약 70일로, 56일부터 95일 사이에 분포하며, 종자의 성숙기까지의 평균 생육일수는 약 150일로, 101일에서 188일 사이에 분포한다(Kwon *et al.*, 1974; Choi *et al.*, 2014). 본 연구 결과에서 세대단축 시스템을 적용할 경우, 광질 1:1:1 비율 조건에서 모든 생태형에서 평균 개화일수는 28.0±2.91일로 확인되었고, 60일에서 70일 사이에 성숙된 종자를 수확할 수 있었다. 따라서, LED 기반 세대단축 시스템이 기존 연구결과에서 보고된 개화 및 등숙기간을 약 60% 이상 단축시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 특히, 개화일수가 70일 이상 소요되는 만생종인 소흥2호 품종에서 세대단축 시스템을 적용할 경우 30일 이하의 평균 개화일수를 확인하였으므로, 만생종 품종에 세대단축 시스템을 적용할 경우 개화 및 종자 등숙기간

의 단축 효과를 크게 기대할 수 있음을 시사한다. 본 실험의 결과 구축된 콩 세대단축 시스템을 육종에 활용한다면, 향후 농업적 가치가 높은 다양한 콩 품종들의 개발을 가속화하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

## 적 요

본 연구에서는 LED 광원을 이용한 세대단축 시스템을 콩에 적용하기 위한 조건을 설정하고자 하였다. 생태형을 고려하여 선정한 12개 품종을 대상으로 광질, 광량, 그리고 토양 조건을 검토함으로써 콩에 최적화된 세대단축 시스템 프로토콜을 설정하는 것을 목표로 하였고, 그 결과는 다음과 같다.

- 10시간의 단일 광 조건에서, 광질 1:1:1비율일 때, 광량이 400 PPF에서 900 PPF, 1,300 PPF로 증가함에 따라 개화일수, 평균 절간장, 경장은 감소한 반면, 절수, 협수, 립수는 증가하였다.
- 상토에서의 재배는 배양토에 비해 개체 별 절수, 협수, 립수가 50% 이상 증가하였다.
- 광질에서 적색광의 비율이 증가한 2:1:1비율 조건은 1:1:1비율 조건과 비교하여 개화일수가 약 15일 이상 소요되는 것으로 나타났다.
- 상기 조건에 따라 세대단축 시스템을 적용하였을 경우 모든 품종에서 약 30일 내외로 개화가 확인되었으며, 60일에서 70일 이내에 8립 이상의 종자 수확이 가능하였다.
- 본 연구 결과로 구축된 세대단축 시스템을 적용한다면 연간 최대 6세대의 진전이 가능하며, 디지털 육종과 유

전자 편집과 같은 현대적인 작물 육종 기술과의 결합을 통해 새로운 작물 개발을 가속화시킬 수 있을 것이다.

## 사 사

본 논문은 차세대 농작물 신육종기술 개발사업(RS-2022-RD009520)의 지원에 의해 수행된 결과입니다. 연구과제의 실험 진행을 도와 주신 국립식량과학원 기초기반과 강현애, 송지연 선생님께 감사드립니다.

## 인용문헌(REFERENCES)

- Ahmar, S., R. A. Gill, K.-H. Jung, A. Faheem, M. U. Qasim, M. Mubeen, and W. Zhou. 2020. Conventional and molecular techniques from simple breeding to speed breeding in crop plants: recent advances and future outlook. *International Journal of Molecular Sciences*. 21 : 2590.
- Atlin, G. N., J. E. Cairns, and B. Das. 2017. Rapid breeding and varietal replacement are critical to adaptation of cropping systems in the developing world to climate change. *Glob. Food Sec.* 12 : 31-37.
- Casal, J. J. 2013. Photoreceptor signaling networks in plant responses to shade. *Annual Review of Plant Biology* 64 : 403-427.
- Cazzola, F., C. J. Bermejo, M. F. Guindon, and E. Cointy. 2020. Speed breeding in pea (*Pisum sativum* L.), an efficient and simple system to accelerate breeding programs. *Euphytica*. 216 : 178.
- Cho, C., D.-Y. Kim, M. S. Cho, M. Jin, and M.-S. Seo. 2021. Efficient Isolation and Gene Transfer of Protoplast in Korean Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) Cultivars. *Korean Journal of Breeding Science*. 53.
- Choi, Y.-M., M.-C. Lee, N. Ro, S. Lee, J.-G. Gwag, and A. M. -S. Yoon. 2014. Morphological Characteristics and SSR Profilings of Soybean Landraces of Korea. *Korean Journal of Breeding Science*. 46(4) : 353-363.
- Craig, D. S. and E. S. Runkle. 2013. A moderate to high red to far-red light ratio from light-emitting diodes controls flowering of short-day plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 138 : 167-172.
- Eskins, K. 1992. Light-quality effects on Arabidopsis development. Red, blue and far-red regulation of flowering and morphology. *Physiologia Plantarum*. 86 : 439-444.
- Franzen, D. W. 1999. Soybean soil fertility. North Dakota State University Extension Service, SF-1164, Fargo, ND, USA.
- Ghosh, S., A. Watson, O. E. Gonzalez-Navarro, R. H. Ramirez-Gonzalez, L. Yanes, M. Mendoza-Suárez, J. Simmonds, R. Wells, T. Rayner, and P. Green. 2018. Speed breeding in growth chambers and glasshouses for crop breeding and model plant research. *Nature Protocols*. 13 : 2944-2963.
- Jähne, F., V. Hahn, T. Würschum, and W. L. Leiser. 2020. Speed breeding short-day crops by LED-controlled light schemes. *Theoretical and Applied Genetics*. 133 : 2335-2342.
- Jeong, N., K.-S. Kim, S. Jeong, J.-Y. Kim, S.-K. Park, J. S. Lee, S.-C. Jeong, S.-T. Kang, B.-K. Ha, and D.-Y. Kim. 2019. Korean soybean core collection: Genotypic and phenotypic diversity population structure and genome-wide association study. *PLoS One*. 14 : e0224074.
- Jung, K. Y., D. H. Gong, S. Lee, H. C. Chun, C. S. Eun, and J. S. Ho. 2023. Characteristics of Soybean Growth and Yield according to Integrated Irrigation and Drainage Water Management. *Journal of Agriculture & Life Science*. 57(3) : 31-37.
- Jung, K.-Y., E.-S. Yun, C.-Y. Park, J.-B. Hwang, Y.-D. Choi, and K.-D. Park. 2011. Stress day index to predict soybean yield response by subsurface drainage in poorly drained sloping paddy fields. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 44 : 702-708.
- Kim, M.-J., H. J. Kim, J. H. Pak, H. S. Cho, H. K. Choi, H. W. Jung, D. H. Lee, and Y.-S. Chung. 2017. Overexpression of AtSZF2 from Arabidopsis showed enhanced tolerance to salt stress in soybean. *Plant Breeding and Biotechnology*. 5 : 1-15.
- Kwon, S., J. Kim, H. Song, and K. Im. 1974. Characteristics of important agronomic traits of Korean local soybean collections. *Korean J. Breed. Sci.* 6 : 67-70.
- Lee, D., K. Han, J. H. Kim, T. -H. Jun, and J. S. Lee. 2023. Development of Speed-Breeding System for Korean Soybean Varieties [*Glycine max* a (L.) Merr] Using LED Light Source. *Plant Breeding and Biotechnology*. 11 : 49-55.
- Lee, J.-D., M. Kim, K. P. Kulkarni, and J. T. Song. 2018. Agronomic traits and fatty acid composition of high-oleic acid cultivar Hosim. *Plant Breeding and Biotechnology*. 6 : 44-50.
- Natarajan, S., D. Luthria, H. Bae, D. Lakshman, and A. Mitra. 2013. Transgenic soybeans and soybean protein analysis: an overview. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 61 : 11736-11743.
- Pedersen, P., S. Kumudini, J. Board, and S. Conley. 2004. Soybean growth and development. Iowa State University, University Extension Ames, IA.
- Poole, C., R. Skaggs, G. Cheschier, M. Youssef, and C. Crozier. 2009. Effects of drainage water management on crop yields. ASABE Annual International Meeting. Reno, Nevada.
- Rizzo, G. and L. Baroni. 2018. Soy, soy foods and their role in vegetarian diets. *Nutrients*. 10 : 43.
- Smith, H. and G. Whitelam. 1997. The shade avoidance syndrome: multiple responses mediated by multiple phytochromes. *Plant, Cell & Environment*. 20 : 840-844.
- Song, J. H., G. Shin, H. J. Kim, S. B. Lee, J. Y. Moon, J. C. Jeong, H.-K. Choi, I. A. Kim, H. J. Song, and C. Y. Kim. 2022a. Mutation of GmIPK1 gene using CRISPR/Cas9 reduced phytic acid content in soybean seeds. *International Journal of*



- Molecular Sciences. 23 : 10583.
- Song, Y., X. Duan, P. Wang, X. Li, X. Yuan, Z. Wang, L. Wan, G. Yang, and D. Hong. 2022b. Comprehensive speed breeding: a high-throughput and rapid generation system for long-day crops. *Plant Biotechnol. J.* 20 : 13-15.
- Wanga, M. A., H. Shimelis, J. Mashilo, and M. D. Laing. 2021. Opportunities and challenges of speed breeding: A review. *Plant Breeding.* 140 : 185-194.
- Watson, A., S. Ghosh, M. J. Williams, W. S. Cuddy, J. Simmonds, M.-D. Rey, M. Asyraf Md Hatta, A. Hinchliffe, A. Steed, D. Reynolds, N. M. Adamski, A. Breakspear, A. Korolev, T. Rayner, L. E. Dixon, A. Riaz, W. Martin, M. Ryan, D. Edwards, J. Batley, H. Raman, J. Carter, C. Rogers, C. Domoney, G. Moore, W. Harwood, P. Nicholson, M. J. Dieters, I. H. Delacy, J. Zhou, C. Uauy, S. A. Boden, R. F. Park, B. B. H. Wulff, and L. T. Hickey. 2018. Speed breeding is a powerful tool to accelerate crop research and breeding. *Nature Plants.* 4 : 23-29.
- Wieczorek, A. and M. Wright. 2012. History of agricultural biotechnology: How crop development has evolved. *Nature Education Knowledge.* 3 : 9.