

수직농장에서 약용작물 생산을 위한 8종의 종자 발아 특성

이가운^{1†} · 권혁준^{2†} · 김예린¹ · 강인제³ · 양규식³ · 조주성^{4*} · 손기호^{5,6,7*}

¹경상국립대학교 생명자원과학과 대학원생, ²콜마비엔에이치 책임연구원,

³경상국립대학교 농업생명과학대학 원예과학부 대학원생, ⁴충북대학교 원예과학과 교수,

⁵경상국립대학교 생명자원과학과 교수, ⁶경상국립대학교 농업생명과학대학 원예과학부 교수,

⁷경상국립대학교 농업생명과학연구원

Germination Characteristics of Eight Species for Production of Medicinal Crops in Vertical Farms

Ga Oun Lee^{1†}, Hyuk Joon Kwon^{2†}, Ye Lin Kim¹, In-Je Kang³, Gyu-Sik Yang³,
Ju-Sung Cho^{4*}, and Ki-Ho Son^{5,6,7*}

¹Graduate Student, Department of GreenBio Science, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea

²Ingredient R&D center, HK Kolmar R&D Complex, 61, Heolleung-ro 8-gil, Seocho-gu, Seoul, Korea

³Graduate Student, Division of Horticultural Science, College of Agriculture & Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea

⁴Professor, Department of Horticultural Science, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

⁵Professor, Department of GreenBio Science, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea

⁶Professor, Division of Horticultural Science, College of Agriculture & Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea

⁷Research Institute of Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

Abstract. This study confirmed the effects of seed shape, temperature, and light treatment on the germination of eight species of medicinal crops to produce high-value crops in vertical farms. Eight species of medicinal seeds were selected, and the seed shape, seed length, seed width, seed length/width ratio, and one hundred seed weight were measured. The seed moisture content was confirmed. Eight species of medicinal seeds were sown, and the germination rate, germination energy, mean daily germination, and mean germination time were investigated according to temperature (15, 20, 25, 25/15°C) and light treatment. Each of the eight medicinal seeds showed different seed shapes. The moisture content of the seeds showed a moisture content rate of over 20% in the five medicinal seeds. Medicinal seeds that showed a germination rate of over 50% were *Angelica gigas* Nakai, *Codonopsis lanceolata* (Siebold & Zucc.) Benth. & Hook.f. ex Trautv., and *Achyranthes bidentata* Blume var. *japonica* Miq. seeds. *A. gigas* seed showed a germination rate of $67.34 \pm 4.38\%$ under 25/15°C light conditions, and *C. lanceolata* seed showed a germination rate of over 50% under both temperature and light treatment conditions, especially the highest germination rate of $82.67 \pm 1.46\%$ under 15°C dark conditions. *Peucedanum japonicum* Thunb. seed showed a germination rate of $52.34 \pm 1.77\%$ under dark conditions at 20°C, and the highest germination rate was $51.67 \pm 3.79\%$ under dark conditions at 15°C. The maximum germination energy was $74.00 \pm 4.94\%$ in *C. lanceolata* seed. The maximum mean daily germination was 14.94 ± 0.15 days in *P. japonicum* seed. *Astragalus penduliflorus* Lam. var. *dahuricus* (DC.) X.Y.Zhu seed showed the highest mean germination time of 34.19 ± 4.71 . Through this study, it was determined that *A. gigas*, *C. lanceolata*, and *A. penduliflours* seeds would be suitable for production in vertical farms based on the characteristics of each medicinal seed through analysis of seed germination characteristics.

Additional key words: germination energy, germination rate, mean daily germination, mean germination time

†These authors contributed equally to this work

*Corresponding author: Ju-Sung, Cho, jsc@chungbuk.ac.kr;

Ki-Ho Son, sonkh@gnu.ac.kr

Received April 1, 2024; Revised April 22, 2024;

Accepted April 22, 2024

서론

수직농장은 광, 온도, 습도, 이산화탄소, 양액 등의 식물 재배 환경 조건을 체계적으로 제어하여 밀폐된 공간에서 식물

재배를 위한 첨단 기술을 활용하는 현대식 농업 시스템이다 (Luna-Maldonado 등, 2016; Kozai 등, 2019). 기후 변화에 따라 안정적인 농작물 생산의 위협으로 인해 수직농장에 대한 관심이 높아지고 있다(Heo 등, 2010; Lee와 Cha, 2015; Lee 등, 2016). 수직농장은 인공 조명, 환경 제어 및 정밀한 관개 시스템을 통해 식물 재배에 최적 조건을 조성하여 기후 변화와 관계없이 연중 안정적인 식물을 재배할 수 있으며 운송 및 농약 사용의 필요성을 줄일 수 있다(Kozai와 Niu, 2015; Kalantari 등, 2018; SharathKumar 등, 2020; Kobayashi 등, 2022; Ji 등, 2023). 또한, 태양광이 없는 실내 환경에서 수직의 다층구조로 작물을 재배하는 시스템 특징을 가지고 있어 (Kozai, 2018; van Delden 등, 2021; Bunge 등, 2022), 30cm 미만인 식물에 적합하여 단위 면적당 식물 생산성을 높일 수 있다(Goto, 2012; Kozai와 Niu, 2015).

수직농장은 고부가가치작물 선정 및 최적 재배 환경을 제공하는 기술 개발을 통해 경제성 확보가 필수적이다(Kim과 You, 2013). 그렇기에 수직농장 관련 연구들은 엽채류 재배에서 최근에 약용작물이나 기능성 작물 등의 고부가가치 소재에 대한 연구가 수행되고 있다(Zobayed, 2020). 약용작물인 *Crepidiastrium denticulatum*의 생장과 기능성 증진을 위해 수직농장 내 최적 환경 조건으로 재배가 가능하다(Bae 등, 2017). 그러나 약용작물을 포함한 야생의 식물들은 종자 휴면성의 차이와 깊이에 의해 종자 발아특성이 다를 수 있고 (Baskin과 Baskin, 1998; Nikolaeva, 1999), 환경 조건(온도, 습도, 광) 및 환경 스트레스도 종자 발아에 영향을 준다 (Satendra 등, 2016). 또한 배의 미숙, 종피의 불투수성, 휴면 유도물질의 존재 등 종자 발아를 제한하는 요인은 매우 다양하게 나타난다(Baskin과 Baskin, 1998). 따라서, 작물의 수직농장 도입 및 안정적인 생산을 위해 효율적인 종자 발아 조건을 구명하는 것이 필요하다(Merritt 등, 2007).

본 연구는 수직농장에서 고부가가치 작물인 약용작물을 재배하기 위한 기초 자료로 제공하고자 약용작물의 종자 형태 및 온도, 광 처리에 따른 종자 발아에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 따라서, 수직농장에서 재배에 효율적인 약용작물 선정하기 위해 수직농장에서 기본적으로 종자 발아에 효율적인 종을 선정하고자 본 연구를 실시하였다.

재료 및 방법

1. 실험 재료 및 종자 특성

실험 재료는 감초(*Glycyrrhiza uralensis* Fisch. ex DC., Danong Seed Co., Ltd., Namyangju, Korea), 결명자[*Senna tora* (L.) Roxb., Aram Seed Co., Ltd., Seoul, Korea], 당귀

(참당귀, *Angelica gigas* Nakai, Sungwoo Seed Co., Ltd., Seoul, Korea), 더덕[*Codonopsis lanceolata* (Siebold & Zucc.) Benth. & Hook.f. ex Trautv., Dongwonnongsan Seed Co., Ltd., Yongin, Korea], 식방풍(갯기름나물, *Peucedanum japonicum* Thunb., Dongwonnongsan Seed Co., Ltd., Yongin, Korea), 엉겅퀴[*Cirsium japonicum* Fisch. ex DC. var. *maackii* (Maxim.) Matsum., Aram Seed Co., Ltd., Seoul, Korea], 우슬(쇠무릎, *Achyranthes bidentata* Blume var. *japonica* Miq., Aram Seed Co., Ltd., Seoul, Korea) 및 황기[*Astragalus penduliflorus* Lam. var. *dahuricus* (DC.) X.Y.Zhu, Sungwoo Seed Co., Ltd., Seoul, Korea]로 총 8종의 약용 종자를 시판 구매 후 4°C 냉장고에 보관하여 사용하였다. 종자 특성은 버니어캘리퍼스로 종자의 길이와 폭을 측정하여 비율을 계산하였고, 백립중을 저울(PAG214C, Ohaus, Seoul, Korea)을 이용하여 측정하였다.

2. 수분함량

종별 선별된 100립의 종자를 15mL 갈색 코니컬 튜브에 넣고 증류수를 채워 4°C 냉장고에서 보관하였다. 이후 매일 동일한 시간에 종자 표면의 수분을 제거한 다음 종자의 무게를 저울로 측정하였으며, 7일차 측정 후 70°C에서 72시간 동안 건조(Horizontal Flow Oven, DAIHAN Scientific, Wonju, Korea)하여 종자의 건물중으로 계산하였다. 종자의 건조 전과 후의 무게를 기준으로 일별 측정된 값을 사용하여 수분함량(moisture content)을 다음의 수식으로 계산하였다(Baskin과 Baskin, 2003).

$$\text{Moisture content (\%)} = [(W_h - W_i)/W_i] \times 100$$

(W_h : 각 일자별 백립중, W_i : 종자 건중량)

3. 온도 및 광 처리에 따른 발아율

발아테스트를 위하여 페트리디쉬(90 × 15mm)에 필터 페이퍼(90mm diameter, Toyo Roshi Kaisha Ltd., Tokyo, Japan)를 2장 깔고 증류수를 5mL 공급하였다. 각 페트리디쉬에 선별한 종자를 100립을 파종한 다음 광도 $105.2 \pm 0.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 온도 15, 20, 25°C(12h), 25/15°C(16/8h, light/dark)로 설정된 생장 챔버(VS-91G09M-4R, Vision Scientific Co., Ltd., Daejeon, Korea)에 각각 배치하였다. 암발아 조건은 페트리디쉬에 호일을 감싸주었다. 매일 발아된 개체들을 계수 후 제거하였으며, 수분이 부족할 시 증류수를 1mL 추가 관수하였다. 총 18일간의 발아율을 확인하였으며, 발아율(germination rate), 발아세(germination energy), 평균 발아

일수(mean daily germination), 평균 발아 속도(mean germination time)를 아래의 식으로 계산하였다(Choi 등, 2019; Hwang 등, 2023).

$$\text{Germination rate} = (N/S) \times 100$$

$$\text{Germination energy} = (N_9/S) \times 100$$

$$\text{Mean daily germination} = N/T$$

$$\text{Mean germination time} = \sum(TxNx)/N$$

(N: 총 발아 종자 수, S: 파종한 종자 수, N₉: 9일까지 발아한 총 종자 수, T: 총 조사 일수, Tx: 치상 후 조사 일수, Nx: 조사 당일의 발아 종자 수)

4. 통계처리

종자 특성은 종자의 길이 및 너비를 5반복으로, 백립중은 3반복으로 조사하였으며 수분함량, 온도 및 광 처리에 따른 발아율은 3반복으로 진행하였다. 통계 분석은 SPSS 프로그램 (SPSS 27.0, SPSS IBM, Armonk, USA)을 이용하였으며, 발아세, 평균 발아일수 및 평균 발아속도는 온도와 광 처리 간의 비교를 위해 two-way ANOVA로 실시하였다. 사후 검정은 Duncan's multiple range test를 시행하였다($p < 0.05$).

결과 및 고찰

1. 종자 특성 및 수분함량

약용작물 8종의 종자 형태 특성을 살펴보기 위해 종자의 길이, 너비 및 길이와 너비의 비율과 백립중을 나타내었다(Table 1). 종자의 길이는 당귀(참당귀)가 $5.51 \pm 0.23\text{mm}$ 로 가장 길

었으며, 더덕이 $2.28 \pm 0.10\text{mm}$ 로 가장 짧았다. 감초의 종자 너비는 $2.69 \pm 0.18\text{mm}$ 로 가장 길었으며, 우슬(쇠무릎)의 종자 너비는 $1.24 \pm 0.05\text{mm}$ 로 가장 짧게 나타났다. 당귀에서 종자의 길이/너비의 비율이 3.73 ± 0.17 로 가장 컸으며, 감초에서 1.18 ± 0.02 로 가장 작았다. 종자의 백립중은 결명자가 $1.56 \pm 0.03\text{g}$ 으로 가장 무거웠으며, 더덕과 영경귀에서 0.18g 으로 가장 가벼웠다.

종자 발아의 수분함량을 7일 동안 조사한 결과(Fig. 1), 감초, 결명자, 더덕, 식방풍(갯기름나물) 및 우슬은 초기 수분함량(0일차)이 10% 이하였으며, 모든 약용작물 종자에서 침지 1일차에 종자 수분함량이 유의적으로 증가하였다. 특히 결명자, 우슬 및 황기 종자는 2-3일차에, 이를 제외한 5종의 약용작물 종자에서는 1일차에 급격한 수분함량의 증가를 보였다.

종피의 수분 투과성은 화학적 조성과 구조적 특성에 의해 결정되며(Wada와 Reed, 2011), 발아를 위한 적정 침지 시간은 식물 종에 따라 차이를 보인다(Cho 등, 2014; Choi 등, 2018). 종자의 물리적 휴면은 수분이 종자 내부로 흡수되지 못하여 발아가 지연되는 것으로 24시간 안에 수분함량이 20% 이상의 증가를 보이는 종자는 물리적 휴면이 없는 종자로 판단한다(Baskin과 Baskin, 2003; Ko 등, 2022). 본 연구에서는 약용작물 종자 8종의 적정 침지 시간이 종에 따라 일부 차이를 보였으며, 24시간의 감초(38.65%), 결명자(31.75%), 당귀(43.03%), 더덕(42.96%) 및 식방풍(46.24%) 종자는 초기 수분함량 대비 20% 이상 수분함량의 증가를 보이므로 물리적 휴면이 없는 종자로 판단된다. 24시간의 종자 수분함량은 초기 수분함량 대비 영경귀(16.14%), 우슬(16.43%) 및 황기(19.13%) 종자에서 20% 이상의 수분함량을 보이지 못하므로 물리적 휴면이 있는 종자로 판단된다.

Table 1. Seed characteristics of 8 species of medicinal seeds.

Scientific name	Length (mm)	Width (mm)	Length/width ratio	Weight (g) ^z
<i>Glycyrrhiza uralensis</i> Fisch. ex DC.	3.17 ± 0.16^y	2.69 ± 0.18	1.18 ± 0.02	1.03 ± 0.04
<i>Senna tora</i> (L.) Roxb.	4.60 ± 0.27	2.26 ± 0.26	2.13 ± 0.26	1.56 ± 0.03
<i>Angelica gigas</i> Nakai	5.51 ± 0.23	1.48 ± 0.07	3.73 ± 0.17	0.23 ± 0.01
<i>Codonopsis lanceolata</i> (Siebold & Zucc.) Benth. & Hook.f. ex Trautv.	2.88 ± 0.10	1.64 ± 0.04	1.75 ± 0.06	0.18 ± 0.00
<i>Peucedanum japonicum</i> Thunb.	4.93 ± 0.38	2.53 ± 0.12	1.96 ± 0.15	0.43 ± 0.01
<i>Cirsium japonicum</i> Fisch. ex DC. var. <i>maackii</i> (Maxim.) Matsum.	3.77 ± 0.20	1.52 ± 0.03	2.49 ± 0.10	0.18 ± 0.00
<i>Achyranthes bidentata</i> Blume var. <i>japonica</i> Miq.	4.40 ± 0.06	1.24 ± 0.05	3.56 ± 0.13	0.27 ± 0.00
<i>Astragalus penduliflorus</i> Lam. var. <i>dahuricus</i> (DC.) X.Y.Zhu	3.23 ± 0.10	2.61 ± 0.10	1.24 ± 0.04	0.59 ± 0.02

^zWeight of 100 seeds.

^yMean \pm SD (Length, width, and length/width ratio represent three replications. Weight represents five replications.).

2. 온도 및 광 처리에 따른 발아율

약용작물 8종의 온도 및 광 처리에 따른 발아율은 다르게 나타났다(Fig. 2). 발아율이 50% 이상이 되는 작물은 당귀, 더덕, 식방풍 및 우슬 종자였으며, 특히 당귀 종자는 25/15°C에서만 50% 이상의 발아율을 보였다. 우슬 종자는 15, 25/15°C에서 50% 이상의 발아율을 보였다. 더덕 종자는 모든 온도에서 발아율이 50% 이상으로 나타났고, 식방풍 종자는 15, 20, 25°C에서 50% 이상의 발아율을 보여, 비교적 넓은 발아 범위를 가지고 있다.

감초, 결명자, 당귀, 더덕 및 식방풍 종자는 광 조건에 치상하였을 때 암 조건에 비해 발아율이 높았다. 일반적으로 작물 재배에 유용한 발아 온도인 25/15°C에서 감초, 당귀, 엉겅퀴 및 황기 종자는 각각 $30.34 \pm 7.84\%$, $67.34 \pm 4.38\%$, $15.00 \pm 4.59\%$ 및 $47.67 \pm 4.85\%$ 로 나타났다. 결명자 종자는 25°C에서 발아율이 $23.00 \pm 3.06\%$ 로 가장 높았으며, 더덕, 식방풍 및 우슬 종자는 15°C에서 각각 $82.67 \pm 1.46\%$, $51.00 \pm 13.87\%$ 및 $51.67 \pm 3.79\%$ 로 가장 높은 발아율을 보였다.

광의 유무에 따른 발아율의 차이를 분석한 결과, 감초 및 결

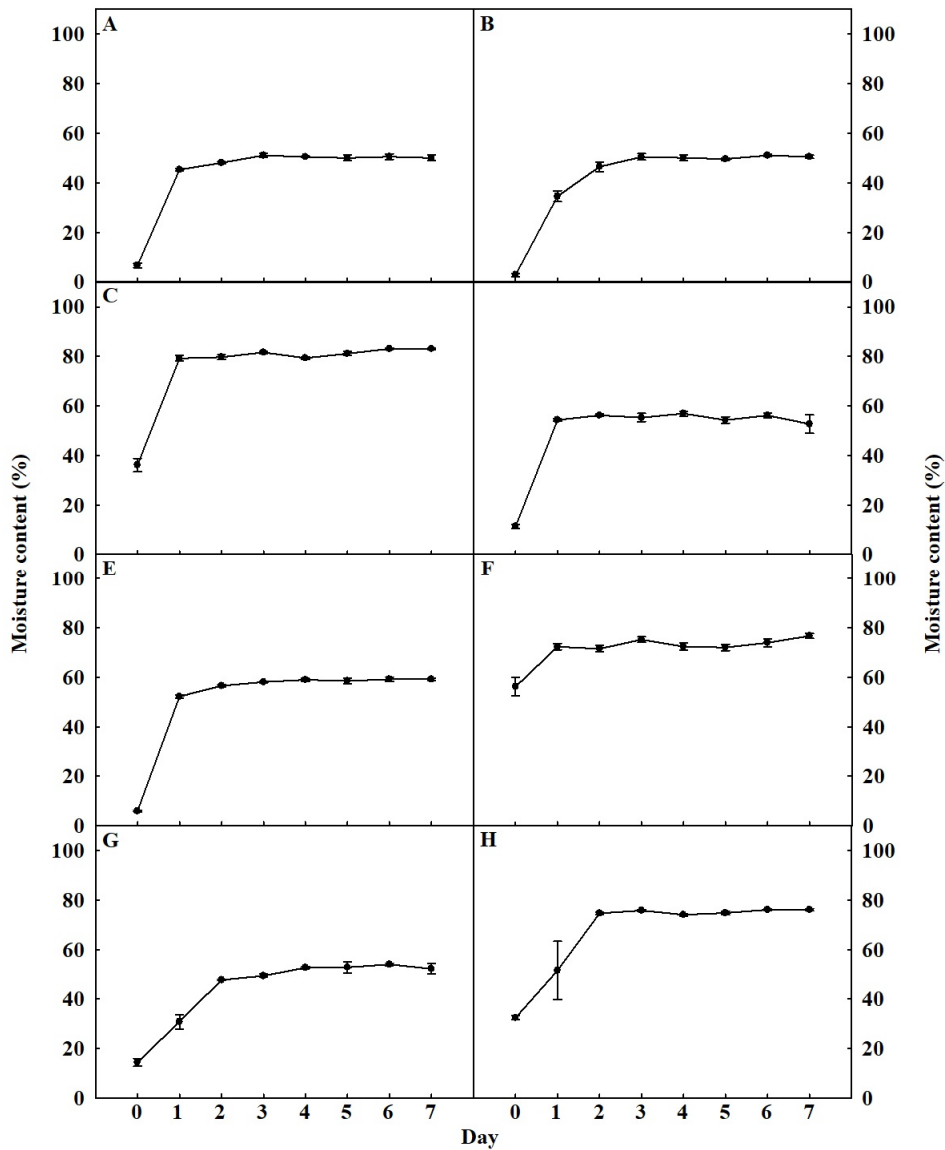


Fig. 1. Moisture content of 8 species of medicinal seeds (n = 3). A: *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. ex DC., B: *Senna tora* (L.) Roxb., C: *Angelica gigas* Nakai, D: *Codonopsis lanceolata* (Siebold & Zucc.) Benth. & Hook.f. ex Trautv., E: *Peucedanum japonicum* Thunb., F: *Cirsium japonicum* Fisch. ex DC. var. *maackii* (Maxim.) Matsum., G: *Achyranthes bidentata* Blume var. *japonica* Miq., and H: *Astragalus penduliflorus* Lam. var. *dahuricus* (DC.) X.Y.Zhu.

명자 종자는 광 조건이 암 조건에 비해 더 높은 발아율을 보였으며, 20°C와 25°C에서 각각 4.33%, 6% 높게 나타났다. 당귀 및 더덕 종자도 25/15°C에서 광 조건이 암 조건에 비해 각각 17%, 7.67% 더 높은 발아율을 보였으며, 식방풍 종자는 25°C에서 광 조건이 암 조건보다 28.67% 더 높은 발아율을 보였다. 반면 영경귀, 우슬 및 황기 종자는 암 조건이 광 조건에 비해 더 높은 발아율을 보였으며, 각각 25°C에서 4.33%, 25/15°C에서 8.33%, 25°C에서 9% 더 높게 나타났다.

가을에 탈리되어 봄 또는 여름에 발아하는 많은 초본 식물은 인공적으로 초여름의 온도를 구현한 25/15°C에서 높은 발아율을 보인다는 것으로 보고되었으며(Baskin과 Baskin, 1998), 본 연구의 결과에서도 8종 중 4종의 약용작물 종자에서 다른 온도에 비해 25/15°C에서 높은 발아율을 보였다. 감초는 20 - 30°C의 광조건에서 31%의 발아율을 보여(Mao 등, 2008), 본 연구 결과와 유사한 발아율을 보였다. 결명자, 더덕 및 우슬은 25°C에서 각각 50%, 90% 및 80% 이상의 발아율을 보였다.

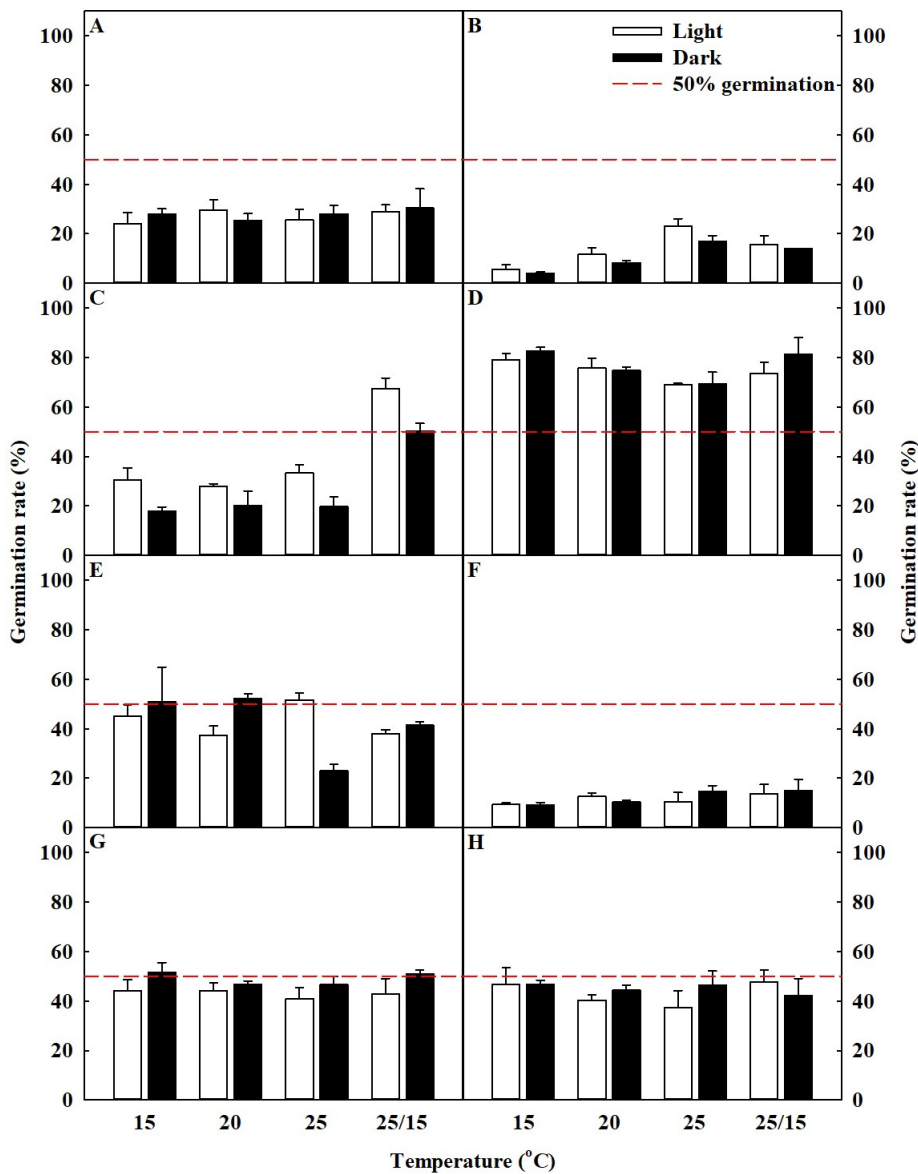


Fig. 2. The germination rate of 8 species of medicinal seeds at the 18-day (n=3). A: *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. ex DC., B: *Senna tora* (L.) Roxb., C: *Angelica gigas* Nakai, D: *Codonopsis lanceolata* (Siebold & Zucc.) Benth. & Hook.f. ex Trautv., E: *Peucedanum japonicum* Thunb., F: *Cirsium japonicum* Fisch. ex DC. var. *maackii* (Maxim.) Matsum., G: *Achyranthes bidentata* Blume var. *japonica* Miq., and H: *Astragalus penduliflorus* Lam. var. *dahuricus* (DC.) X.Y.Zhu.

다(Um 등, 2017; Choi, 2003; Kim 등, 2015). 20°C에서 식방풍 및 엉겅퀴는 각각 24.4%(광 조건) 및 50% 이상(광암 조건)의 발아율을 보였다(Lee 등, 2014; Madakadze 등, 1993). 당귀 종자의 경우는 광 조건에서 암 조건보다 발아가 양호하다는 결과가 보고되어(Yu 등, 1995), 본 연구의 결과와 일치하였다. 한편, 본 연구의 결과(25/15°C, 최대 67.34%)와 달리 일당귀(*Angelica acutiloba* Kitagawa)는 20°C에서 최대 99.5%의 발아율을 보였다(Lee 등, 2019). 또한, 황기 종자는 25°C에서 80%의 발아율을 보였고(Choi 등, 2013), 발아 적합 온도가 20 – 25°C인 광무관계종자로 광 조건이나 암 조건

모두 발아가 양호한 것으로 보고되었다(Kim 등, 2001). 위의 선행 연구들의 결과를 토대로 본 연구에서 사용된 종자는 시판 종자임에도 채종 일자, 종자의 품질 등의 차이로 인하여 보고된 발아율과 상이한 결과를 보인 것으로 판단된다.

3. 온도 및 광 처리에 따른 발아세, 평균 발아 일수 및 평균 발아 속도

온도 및 광 처리에 따른 약용작물 8종의 종자 발아세, 평균 발아 일수 및 평균 발아 속도는 종 및 처리에 따라 다르게 나타났다(Table 2-4). 파종 후 9일 째에 발아세를 분석한 결과, 더

Table 2. Germination energy of 8 species of medicinal seeds under light conditions and different temperatures.

Treatments		<i>Glycyrrhiza uralensis</i> Fisch.	<i>Senna tora</i> (L.) Roxb.	<i>Angelica gigas</i> Nakai	<i>Codonopsis lanceolata</i> ex Trautv.	<i>Peucedanum japonicum</i> Thunb.	<i>Cirsium japonicum</i> Fish.	<i>Achyranthes bidentata</i> Blume	<i>Astragalus penduliflorus</i> Lam.
Light	Temperature (%)								
Light	15	19.00 ± 3.61 ^z	2.67 ± 0.89 e ^z	0.67 ± 0.34 b	63.00 ± 0.58 b	0.00 ± 0.00 b	1.67 ± 0.34 b	39.00 ± 4.59	46.34 ± 6.57
	20	23.67 ± 1.67	9.00 ± 1.74 cd	6.67 ± 1.77 ab	67.34 ± 4.67 ab	5.34 ± 1.21 ab	6.67 ± 0.34 ab	41.67 ± 2.67	40.00 ± 2.52
	25	24.00 ± 3.61	19.34 ± 2.97 a	6.00 ± 2.09 ab	65.34 ± 0.34 ab	10.00 ± 3.79 a	10.00 ± 4.00 a	39.34 ± 3.53	37.34 ± 6.89
	25/15	25.00 ± 2.31	11.67 ± 2.73 bc	7.67 ± 4.26 ab	66.00 ± 1.53 ab	0.34 ± 0.34 b	8.67 ± 1.77 ab	40.00 ± 6.66	47.67 ± 4.85
Dark	15	18.34 ± 0.34	46.67 ± 1.77 e	0.00 ± 0.00 b	73.34 ± 0.89 a	2.67 ± 0.89 b	2.00 ± 1.00 b	46.67 ± 5.90	1.67 ± 0.34
	20	23.34 ± 1.34	44.34 ± 2.03 de	3.34 ± 0.89 ab	68.34 ± 1.86 ab	5.67 ± 0.67 a	7.34 ± 0.89 ab	45.34 ± 1.34	7.67 ± 2.19
	25	25.67 ± 4.06	46.34 ± 5.79 ab	4.67 ± 0.89 ab	66.34 ± 3.72 ab	16.34 ± 2.61 ab	11.67 ± 2.41 a	46.34 ± 3.39	5.67 ± 1.46
	25/15	24.34 ± 4.38	42.34 ± 6.75 bc	10.34 ± 4.49 a	74.00 ± 4.94 a	12.67 ± 0.89 b	11.34 ± 3.39 a	48.67 ± 2.19	1.67 ± 1.21
Significance ^x									
Light (L)		NS	NS	NS	*	NS	NS	*	NS
Temperature (T)		NS	***	**	NS	***	**	NS	NS
L × T		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

^zThe data indicate the mean ± S.E. (n = 3).

^yStatistically significant differences are indicated at $p < 0.05$ by Duncan's test.

^xDifferent letters indicate a significant difference by Duncan's multiple range test at $*p < 0.05$, $**p < 0.01$, and $***p < 0.001$. NS: not significant.

Table 3. Mean daily germination of 8 species of medicinal seeds under light conditions and different temperatures.

Treatments		<i>Glycyrrhiza uralensis</i> Fisch.	<i>Senna tora</i> (L.) Roxb.	<i>Angelica gigas</i> Nakai	<i>Codonopsis lanceolata</i> ex Trautv.	<i>Peucedanum japonicum</i> Thunb.	<i>Cirsium japonicum</i> Fish.	<i>Achyranthes bidentata</i> Blume	<i>Astragalus penduliflorus</i> Lam.
Light	Temperature (%)								
Light	15	6.19 ± 0.26 ^z ab ^y	9.40 ± 2.64 a	13.71 ± 0.39	7.49 ± 0.11 a	14.94 ± 0.15 a	12.92 ± 0.31 a	7.34 ± 0.15 a	2.85 ± 0.22 a
	20	5.29 ± 0.88 bc	5.45 ± 0.64 ab	12.67 ± 0.81	6.07 ± 0.08 c	12.84 ± 0.10 de	8.86 ± 0.17 c	4.74 ± 0.22 b	2.11 ± 0.22 bc
	25	3.38 ± 0.60 d	4.25 ± 0.38 ab	12.75 ± 0.52	5.71 ± 0.11 d	12.14 ± 0.44 ef	6.17 ± 0.23 e	4.02 ± 0.18 cd	1.79 ± 0.16 c
	25/15	4.49 ± 0.63 bcd	5.87 ± 0.71 ab	12.45 ± 0.45	6.40 ± 0.11 bc	13.27 ± 0.28 cd	7.41 ± 0.42 de	4.28 ± 0.21 bcd	1.90 ± 0.16 c
Dark	15	7.61 ± 0.34 a	6.26 ± 3.48 ab	12.99 ± 0.19	6.65 ± 0.11 b	14.32 ± 0.29 ab	11.55 ± 0.20 b	7.17 ± 0.21 a	2.61 ± 0.11 ab
	20	4.50 ± 0.58 bcd	6.70 ± 1.00 ab	12.89 ± 0.19	5.36 ± 0.12 e	11.92 ± 0.36 f	7.68 ± 0.50 d	4.49 ± 0.11 bc	2.08 ± 0.19 bc
	25	3.97 ± 0.40 cd	3.23 ± 0.59 b	12.21 ± 0.30	5.28 ± 0.11 e	12.39 ± 0.20 ef	6.15 ± 0.58 e	3.80 ± 0.24 d	1.90 ± 0.18 c
	25/15	5.06 ± 0.64 bcd	4.36 ± 0.50 ab	12.30 ± 0.56	6.23 ± 0.13 c	13.78 ± 0.20 bc	6.20 ± 0.49 e	4.65 ± 0.02 b	1.73 ± 0.11 c
Significance ^x									
Light (L)		NS	NS	NS	***	NS	**	NS	NS
Temperature (T)		***	NS	NS	***	***	***	***	***
L × T		NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS

^zThe data indicate the mean ± S.E. (n = 3).

^yStatistically significant differences are indicated at $p < 0.05$ by Duncan's test.

^xDifferent letters indicate a significant difference by Duncan's multiple range test at $*p < 0.05$, $**p < 0.01$, and $***p < 0.001$. NS: not significant.

덕 종자는 25/15°C 암 조건에서 74.00 ± 4.94%로 높은 결과를 보였고 당귀 종자는 15°C 암 조건에서 0%로 최저 발아세를 나타냈다(Table 2). 발아세의 광 처리에 따른 통계적인 차이는 더덕 및 우슬에서, 온도에 따른 통계적인 차이는 결명자, 당귀, 식방풍 및 영경귀에서 나타났으며 온도 및 광 처리의 복합적인 요인에 대한 통계적인 차이는 모든 종에서 나타나지 않았다.

발아에 소요되는 평균 발아 일수는 황기에서 가장 짧았으며, 25/15°C 암 조건에서 1.73 ± 0.11일로 나타났다(Table 3). 반면 식방풍 종자 15°C 광 조건에서 14.94 ± 0.15일로 가장 긴 평균 발아 일수를 보였다. 통계적인 차이를 비교한 결과, 더덕 및 영경귀 종자는 온도에 따라 통계적으로 차이를, 감초, 더덕, 식방풍, 영경귀, 우슬 및 황기 종자는 광 처리에 따른 통계적인 차이를 보였다. 한편 더덕 종자는 온도 및 광 처리에 따라 평균 발아 일수에서 통계적으로 차이를 보였다.

평균 발아 속도는 결명자 종자가 15°C 광 조건에서 0.76 ± 0.23으로 가장 빨랐으며, 황기 종자는 25/15°C 광 조건에서 34.19 ± 4.71로 가장 느렸다(Table 4). 평균 발아 속도는 광 처리에 따라 당귀 및 더덕 종자에서 통계적으로 차이를 보였으며, 감초, 결명자, 당귀, 더덕, 영경귀 및 우슬 종자는 온도에 따라 유의적인 차이를 보였다. 식방풍은 온도 및 광 처리의 단일 요인에서는 유의적인 차이가 없었으나 복합적인 요인에 대한 유의적인 차이를 보였다.

결과적으로 본 연구에서 사용된 약용작물의 종자는 온도 및 광 조건에 대한 다양한 발아 특성의 차이를 보였기 때문에, 이러한 종자별 발아 특성 분석은 수직농장에서 생산하기 위한

작물 선정에 반드시 필요한 과정임을 시사한다. 수직농장에서 약용작물 및 기능성 작물 도입을 위한 기초적인 연구들이 수행되고 있으나(Jang 등, 2023; Park 등, 2022), 종자의 발아 특성 연구 보다는 대부분 재배 중점의 연구를 수행하였다. 이와 같이 노지 또는 하우스에서 재배되는 약용작물의 종자 특성, 수분 함량 및 발아 조건을 수직농장에서 재배하기 위한 기본적인 연구가 필요하다. 따라서, 본 연구를 통해 수직농장 내 온도 및 광 조건을 고려한다면 효율적인 종자 발아 관리가 용이한 당귀, 더덕, 황기를 적용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 수직농장에서 고부가가치 작물 생산을 위한 약용작물 8종에 대한 종자의 형태 및 온도, 광 처리에 따른 발아에 미치는 영향을 확인하였다. 약용 종자 8종을 선별하여 종자의 형태를 종자의 길이, 종자의 너비, 종자의 길이/너비의 비율 및 백립중 측정하였으며, 종자의 수분함량을 확인하였다. 약용 종자 8종을 파종하여 온도(15, 20, 25, 25/15°C) 및 광 처리에 따라 발아율, 발아세, 평균 발아 속도, 평균 발아 일수를 조사하였다. 약용 종자 8종에 따라 각기 다른 종자 형태를 보였다. 종자의 수분함량은 약용 종자 5종에서 20% 이상의 흡수율을 보였다. 50%가 넘는 발아율을 보인 약용 종자는 당귀(참당귀), 더덕, 식방풍(갯기름나물) 및 우슬(쇠무릎) 종자였다. 당귀 종자는 25/15°C 광 조건에서 발아율이 67.34 ± 4.38%로 보였으며, 더덕 종자는 온도 및 광 처리 조건 모두에서 50% 이

Table 4. Mean germination time of 8 species of medicinal seeds under light conditions and different temperatures.

Treatments		<i>Glycyrrhiza uralensis</i> Fisch.	<i>Senna tora</i> (L.) Roxb.	<i>Angelica gigas</i> Nakai	<i>Codonopsis lanceolata</i> ex Trautv.	<i>Peucedanum japonicum</i> Thunb.	<i>Cirsium japonicum</i> Fish.	<i>Achyranthes bidentata</i> Blume	<i>Astragalus penduliflorus</i> Lam.
Light	Temperature (%)								
Light	15	5.93 ± 1.30 ^z b ^y	0.76 ± 0.23 b	2.26 ± 0.32 cd	11.22 ± 0.25 c	3.07 ± 0.30 bc	0.78 ± 0.06 b	6.44 ± 0.64 c	21.93 ± 2.71
	20	10.71 ± 2.11 a	3.99 ± 1.47 b	2.39 ± 0.09 cd	13.91 ± 0.84 ab	3.05 ± 0.25 bc	1.70 ± 0.21 ab	11.26 ± 0.59 ab	26.38 ± 3.65
	25	13.43 ± 1.48 a	12.30 ± 2.40 a	2.79 ± 0.33 c	13.35 ± 0.23 ab	4.44 ± 0.08 a	1.95 ± 0.78 ab	13.15 ± 1.71 a	27.93 ± 4.76
	25/15	12.02 ± 0.78 a	5.37 ± 1.70 b	5.67 ± 0.20 a	12.86 ± 0.63 bc	2.97 ± 0.17 bc	2.22 ± 0.47 ab	11.53 ± 2.11 ab	34.19 ± 4.71
Dark	15	5.45 ± 0.38 b	1.34 ± 0.63 b	1.43 ± 0.13 d	13.00 ± 0.35 bc	3.79 ± 0.85 ab	0.83 ± 0.10 b	7.59 ± 0.76 bc	23.93 ± 1.42
	20	9.19 ± 1.44 ab	2.28 ± 0.19 b	1.61 ± 0.46 d	15.36 ± 0.56 a	4.61 ± 0.22 a	1.54 ± 0.15 ab	11.39 ± 0.26 ab	29.56 ± 2.94
	25	13.90 ± 2.03 a	9.99 ± 2.15 a	1.70 ± 0.31 d	14.42 ± 0.80 ab	1.99 ± 0.27 c	3.05 ± 0.52 a	15.20 ± 1.75 a	32.58 ± 6.20
	25/15	12.15 ± 1.73 a	5.42 ± 0.29 b	4.38 ± 0.53 b	14.60 ± 1.00 ab	3.12 ± 0.18 bc	3.05 ± 0.81 a	12.82 ± 0.28 a	31.26 ± 5.41
Significance ^x									
Light (L)		NS	NS	***	**	NS	NS	NS	NS
Temperature (T)		***	***	***	**	NS	**	***	NS
L × T		NS	NS	NS	NS	***	NS	NS	NS

^zThe data indicate the mean ± S.E. (n = 3).

^yStatistically significant differences are indicated at p < 0.05 by Duncan's test.

^xDifferent letters indicate a significant difference by Duncan's multiple range test at **p < 0.01 and ***p < 0.001. NS: not significant.

상의 발아율과 특히 15°C 암 조건에서 82.67 ± 1.46% 가장 높은 발아율을 보였다. 식방풍 종자는 20°C 암 조건에서 52.34 ± 1.77%의 발아율을 보였고, 우슬 종자 15°C의 암 조건에서 51.67 ± 3.79%로 가장 높은 발아율을 보였다. 최대 발아세는 더덕 종자에서 74.00 ± 4.94%였습니다. 식방풍 종자에서 최대 평균 발아 일수는 14.94 ± 0.15일이었다. 황기 종자에서 34.19 ± 4.71로 최대 평균 발아 속도를 보였다. 본 연구를 통해 약용 종자별 특성들을 기초로 수직농장에서 생산하기 위해 종자 발아 특성 분석을 통해 당귀, 더덕, 황기 종자가 적합할 것으로 판단된다.

추가주제어: 발아세, 발아율, 평균 발아 일수, 평균 발아 속도

사 사

본 연구는 농림축산식품부가 지원하는 기술사업화지원 사업(821037031HD020)과 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 ‘월드클래스플러스프로젝트사업’(세부과제번호: P0024386)의 지원을 받아 수행된 연구임.

Literature Cited

- Bae J.H., S.Y. Park, and M.M. Oh 2017, Supplemental irradiation with far-red light-emitting diodes improves growth and phenolic contents in *Crepidiastrum denticulatum* in a plant factory with artificial lighting. *Hortic Environ Biotechnol* 58:357-366. doi:10.1007/s13580-017-0331-x
- Baskin C.C., and J.M. Baskin 1998, Seeds: ecology, biogeography, and, evolution of dormancy and germination. Elsevier.
- Baskin C.C., and J.M. Baskin 2003, When breaking seed dormancy is a problem try a move along experiment. *Native Plants J* 4(1):17-21. doi:10.3368/npj.4.1.17
- Bunge A.C., A. Wood, A. Halloran, and L.J. Gordon 2022, A systematic scoping review of the sustainability of vertical farming, plant-based alternatives, food delivery services and blockchain in food systems. *Nat Food* 3(11):933-941. doi: 10.1038/s43016-022-00622-8
- Cho J.S., J.H. Jeong, S.Y. Kim, and C.H. Lee 2014, Temperature, light and chemical treatment promoting seed germination of *Meterostachys sikokiana* (Makino) Nakai. *Flower Res J* 22:54-59. doi:10.11623/frj.2014.22.2.3
- Choi H., S.Y. Lee, Y.H. Rhie, J.H. Lee, S.Y. Kim, and K.C. Lee 2018, Seed dormancy type and germination characteristics in *Tiarella polyphylla* D. Don native to Korea. *Korean J Plant Res* 31:363-371. doi:10.7732/kjpr.2018.31.4.363
- Choi I.L., L. Wang, J.H. Lee, S.J. Han, Y.W. Ko, Y. Kim, and H.M. Kang 2019, Effect of LED and QD-LED (Quantum Dot) treatments on production and quality of red radish (*Raphanus sativus* L.) sprout. *J Bio-Env Con* 28(3):265-272. doi:10.12791/KSBEC.2019.28.3.265
- Choi J.H., J.G. Lee, E.S. Seong, J.H. Yoo, C.J. Kim, G.H. Lee, Y.S. Ahn, C.B. Park, J.D. Lim, and C.Y. Yu 2013, The germination characteristics of seed by storage and germination temperature in *Astragalus membranaceus*. *Korean J Med Crop Sci* 21(6):461-465. doi:10.7783/KJMCS.2013.21.6.461
- Choi S.K. 2003, Effect of temperature on seed germination and seedling growth in medicinal plants of Campanulaceae. *Korean J Plant Res* 6(2):94-97.
- Goto E. 2012, Plant production in a closed plant factory with artificial lighting. *Acta Hort* 956:37-49. doi:10.17660/ActaHortic.2012.956.2
- Heo J.W., Y.B. Lee, Y.S. Chang, J.T. Lee, and D.B. Lee 2010, Effects of light quality and lighting type using an LED chamber system on *Chrysanthemum* growth and development cultured *in vitro*. *Korean J Environ Agric* 29(4):374-380. doi:10.5338/KJEA.2010.29.4.374
- Hwang H.S., J.H. Hwang, J.H. Yun, S.Y. Hwang, J.E. Park, H.E. Oh, S.J. Lee, J.M. Park, and S.J. Hwang 2023, Seed and germination characteristics of *Allium koreanum* H.J. Choi & B.U. Oh for effective propagation. *J Bio-Env Con* 32(4):359-365. doi:10.12791/KSBEC.2023.32.4.359
- Jang S.N., M.J. Kang, Y.N. Kim, E.J. Jeong, K.M. Cho, J.G. Yun, and K.H. Son 2023, Physiological and biochemical responses of *Limonium tetragonum* to NaCl concentrations in hydroponic solution. *Front Plant Sci* 14:1159625. doi:10.3389/fpls.2023.1159625
- Ji Y., P. Kusuma, and L.F.M. Marcelis 2023, Vertical farming. *Curr Biol* 33(11):R471-R473. doi:10.1016/j.cub.2023.02.010
- Kalantari F., O.M. Tahir, R.A. Joni, and E. Fatemi 2018, Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: a review. *J Landsc Ecol* 11(1):35-60. doi:10.1515/jlecol-2017-0016
- Kim D.H., B.J. Ahn, H.J. Ahn, Y.S. Ahn, Y.G. Kim, C.G. Park, C.B. Park, S.W. Cha, and B.H. Song 2015, Studies on seed germination characteristics and patterns of protein expression of *Achyranthes japonica* by treating plant growth regulators and seed primings. *Korean J Med Crop Sci* 23(1): 13-19. doi:10.7783/KJMCS.2015.23.1.13
- Kim H.R., and Y.H. You 2013, Effects of red, blue, white, and far-red LED source on growth responses of *Wasabia japonica* seedlings in plant factory. *Hortic Sci Technol* 31(4):415-422. doi:10.7235/hort.2013.13011
- Kim Y.G., H.S. Yu, H.W. Park, N.S. Seong, and S.Y. Son 2001, Effects of environment and storage condition on germination of *Astragalus membranaceus*. *Korean J Med Crop Sci* 9(4): 265-268.
- Ko C.H., S.Y. Lee, S.I. Oh, E.H. Park, M. Gil, S.H. Kim, and M.J. Yoon 2022, Seed dormancy and germination in *Iris*

- laevigata* (Iridaceae), a rare species in Korea. Flower Res J 30(2):75-81. doi:10.11623/frj.2022.30.2.05
- Kobayashi Y., T. Kotilainen, G. Carmona-García, A. Leip, and H.L. Tuomisto 2022, Vertical farming: a trade-off between land area need for crops and for renewable energy production. J Clean Prod 379(2):134507. doi:10.1016/j.jclepro.2022.134507
- Kozai T. 2018, Smart plant factory: the next generation indoor vertical farms. Springer. doi:10.1007/978-981-13-1065-2
- Kozai T., and G. Niu 2015, Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban areas. In T Kozai, G Niu, M Takagaki, eds, Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production. Academic Press, London, UK, pp 7-33. doi:10.1016/B978-0-12-801775-3.00002-0
- Kozai T., G. Niu, and M. Takagaki 2019, Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production. Academic press, London, UK.
- Lee E.S., T.J. An, Y.I. Kim, W.T. Park, J.H. Lee, Y.G. Kim, J.K. Chang, and M.M. Oh 2019, Seed germination rate and growth characteristics according to ripening stages in *Angelica acutiloba* Kitagawa. Korean J Med Crop Sci 27(3):167-172. doi:10.7783/KJMCS.2019.27.3.167
- Lee G.J., J.W. Heo, H.H. Kim, C.R. Jung, D.E. Kim, and S.Y. Nam 2016, Effects of artificial light sources on growth and yield of *Peucedanum japonicum* hydroponically grown in plant factory. J Bio-Env Con 25:16-23. doi:10.12791/KSBEC.2016.25.2.77
- Lee H.S., J.W. Lee, S.J. Kim, J.H. Lee, J.S. Sung, M.J. Kang, and K.H. Ma 2014, Effects of temperature, light and chemical reagent on dormancy breaking and seed germination of three species in Apiaceae. Korean J Int Agric 26(4):519-525. doi:10.12719/KSIA.2014.26.4.519
- Lee J.E., and W.C. Cha 2015, An analysis of the professional's cognition regarding the plant factory feasibility. J Digital Converg 13(12):89-97. doi:10.14400/JDC.2015.13.12.89
- Luna-Maldonado A.I., J.A. Vidales-Contreras, and H. Rodriguez-Fuentes 2016, Editorial: Advances and trends in development of plant factories. Front Plant Sci 7:1848. doi:10.3389/fpls.2016.01848
- Madakadze R., M.E. Chirco, and A.A. Khan 1993, Seed Germination of three flower species following matriconditioning under various environments. J Am Soc Hortic Sci 118(3):330-334. doi:10.21273/JASHS.118.3.330
- Mao P.S., Y.H. Wang, X.G. Wang, J.J. Lian, and Y. Huang 2008, Conditions and stimulation for germination in *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. seeds. Agric Sci China 7(12):1438-1444. doi:10.1016/S1671-2927(08)60400-9
- Merritt D.J., S.R. Turner, S. Clarke, and K.W. Dixon 2007, Seed dormancy and germination stimulation syndromes for Australian temperate species. Aust J Bot 55(3):336-344. doi:10.1071/BT06106
- Nikolaeva M.G. 1999, Pattern of seeds dormancy and germination as related to plant phylogeny and ecological and geographical conditions of their habitats. J Russ Plant Physiol 46:369-373.
- Park J.H., J.M. Lee, E.J. Kim, and Y.H. You 2022, The effects of LED light quality on ecophysiological and growth responses of *Epilobium hirsutum* L., a Korean endangered plant, in a smart farm facility. J Ecol Environ 46:16. doi:10.5141/jee.22.021
- Satendra K., D.P. Sharma, and R.L. Sakhwar 2016, Plant growth and reproductive potential of red poppy (*Papaver rhoeas* L.) after iron (FeSO₄) fertilization. Plant Archives 16(1):75-77.
- SharathKumar M., E. Heuvelink, and L.F.M. Marcelis 2020, Vertical farming: moving from genetic to environmental modification. Trends Plant Sci 25:724-727. doi:10.1016/j.tplants.2020.05.012
- Um M., S.Y. Kang, J.W. Lee, and O.R. Lee 2017, Effect of gamma ray on germination, growth and antioxidant activity of *Senna tora*. Korean J Med Crop Sci 25(5):290-295. doi:10.7783/KJMCS.2017.25.5.290
- Van Delden S.H., M. SharathKumar, M. Butturini, L.J.A. Graamans, E. Heuvelink, M. Kacira, E. Kaiser, R.S. Klammer, L. Klerkx, G. Kootstra, A. Loeber, R.E. Schouten, C. Stanghellini, W. Van Ieperen, J.C. Verdonk, S. Violet-Chabrand, E.J. Woltering, R. Van De Zedde, Y. Zhang, and L.F.M. Marcelis 2021, Current status and future challenges in implementing and upscaling vertical farming systems. Nat Food 2:944-956. doi:10.1038/s43016-021-00402-w
- Wada S., and B.M. Reed 2011, Optimized scarification protocols improve germination of diverse *Rubus* germplasm. Sci Hortic 130:660-664. doi:10.1016/j.scienta.2011.08.023
- Yu H.S., B.H. Kang, D.J. Im, C.G. Kim, Y.G. Kim, S.T. Lee, and Y.H. Chang 1995, Effects of temperature, light, GA₃ and storage method on germination of *Angelica gigas* Nakai. Korean J Med Corp Sci 3(1):30-34.
- Zobayed S. 2020, Medicinal components. In T Kozai, G Niu, M Takagaki, eds, Plant Factory, 2nd ed. Academic Press, Cambridge, MA, USA, pp 245-250. doi:10.1016/B978-0-12-816691-8.00017-0