



시설 내 환경조건에 따른 고추 재배 시 화분매개곤충의 방화활동 특성과 혼합 투입 밀도 평가

이선영*, 박보경¹, 안재욱, 안철근

경상남도농업기술원 딸기연구과, ¹채소화훼연구소

Foraging Activity Characteristics and Evaluation of Mixed Stocking Densities of Insect Pollinators According to Greenhouse Microclimate in Pepper (*Capsicum annuum* L.)

Sun-Young Lee*, Bo-Kyung Park¹, Jae-Uk An and Chul-Geon An

Strawberry Research Division, Gyeongsangnam-do Agricultural Research and Extension Services, Jinju 52733, Republic of Korea

¹Vegetable and Floriculture Research Institute, Gyeongsangnam-do Agricultural Research and Extension Services, Changwon 51126, Republic of Korea

Abstract

Insect pollinators are widely used in greenhouse pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivation in Korea, where the honeybee (*Apis mellifera* L.) has traditionally been preferred. However, climate-driven instability in the honeybee supply and species-specific responses to the greenhouse microclimate have made a single-species strategy unreliable through the long cropping period. Because foraging depends strongly on greenhouse temperature and light, the species mainly contributing to pollination may shift with season and weather. Over two consecutive cropping seasons, we first selected a suitable pollinator by comparing the honeybee, the bumblebee (*Bombus terrestris* L.) and their mixture, and then evaluated the mixed stocking density in relation to foraging activity and microclimate. Plant growth and fruit characteristics did not differ among treatments. Marketable yield was highest in the bumblebee (8,275 kg 10a⁻¹) and mixture (8,255 kg 10a⁻¹) treatments and lowest with the honeybee alone, because honeybee foraging fell sharply under low temperature and low light on cloudy days whereas bumblebees stayed active; the mixture matched the bumblebee yield with fewer colonies. Foraging was dominated by the bumblebee in winter and by the honeybee as temperature and light rose toward spring, so the two species were complementary and buffered pollination against weather variability. Combining the standard honeybee density with a doubled bumblebee density gave the highest marketable yield (8,286 kg 10a⁻¹, +10%), whereas excessive bumblebee density was associated with reduced honeybee foraging and tended to lower fruit set. Thus, the most favourable stocking density reflects the balance between the two species rather than stocking number, providing practical guidelines for pollinator use in greenhouse pepper.

Keywords

Apis mellifera, *Bombus terrestris*, *Capsicum annuum*, Foraging activity, Greenhouse microclimate, Stocking density

서론

화분매개곤충은 전 세계 주요 작물의 상당수에서 결실에 관여하는 등 작물 생산과 생태계 유지에 필수적인 역할을 한다(Greenleaf and Kremen, 2006; Klein *et al.*, 2007). 그러나 최근 서식지 감소와 기후변화 등으로 화분매개곤충의 다양성과 개체수가 감소하고 있으며(Goulson *et al.*, 2008; Rao and Stephen, 2010), 이에 따라 화분매개 서비스의 경제적 가치와 그 취약성에 대한 관심이 높아지고 있다(Gallai *et al.*, 2009; Konuma and Okubo, 2015). 특히 자연 방화곤충의 유입이 제한되는 밀폐된 시설재배에서는 사육 화분매개곤충을 이용한 안정적인 작물 생산 기술이 더욱 중요하다.

고추(*Capsicum annuum* L.)는 우리나라의 대표적인 조미채소로 재배면적과 소비량이 큰 주요 원예작물이다. 전국 고추 재배면적은 약 30,147 ha이며, 이 중 시설재배 면적이 약 3,717 ha를 차지한다(Statistics Korea, 2024). 고추는 한 꽃에 암술과 수술을 함께 갖는 양성화 작물로 약 70%가 자가수분에 의해 수정되는 것으로 알려져 있으나(RDA, 2020), 시설 내에서는 바람과 방화곤충의 출입이 제한되어 화분 이동이 원활하지 않으면 착과율과 과실 품질이 저하되기 쉽다. 이에 따라 시설 고추 재배농가에서는 착과 안정과 품질 향상을 위해 인공 진동수분이나 화분매개곤충을 이용하고 있으며, 노동력 절감 효과가 커 그 이용이 꾸준히 늘고 있다(Yoon *et al.*, 2017, 2021).

국내 원예작물의 화분매개곤충 이용현황 조사에 따르면 채소류의 이용률은 60% 이상으로 높고 이용 봉군의 대부분을 꿀벌과 뒤영벌이 차지하나, 고추의 이용률은 약 38.9%로 다른 시설 과채류에 비해 낮은 편이다(Yoon *et al.*, 2013, 2017, 2021). 시설 고추의 화분매개곤충은 과거 사육과 공급이 용이한 꿀벌(*Apis mellifera* L.)로 한정하여 이용되어 왔으나, 최근 기후변화에 따른 봉군 폐사와 월동 실패 등으로 꿀벌의 안정적인 공급이 어려워지고 있다(Kang *et al.*, 2024; Rahimi and Jung, 2025). 반면 서양뒤영벌(*Bombus terrestris* L.)은 봉군 단위로 공급되어 관리가 비교적 용이하고 경험이 적은 농가에서도 다루기 쉬워, 시설 고추에서 그 이용이 늘고 있다.

꿀벌은 소문 출입과 방화활동량이 많은 반면 저온·저조도 조건이나 밀폐된 시설 환경에서는 활동성이 떨어지는 단점이 있다(Lee *et al.*, 2007, 2008). 이에 비해 서양뒤영벌

은 저온·저조도 조건에서도 비교적 활발히 활동하고 꽃밥에 진동을 가해 화분을 터뜨리는 진동수분(buzz pollination) 능력이 있어(Buchmann and Hurley, 1978) 시설 과채류의 화분매개에 널리 이용되고 있으나(Kwon and Saeed, 2003; Velthuis and van Doorn, 2006), 봉군 수명이 상대적으로 짧아 주기적인 교체가 필요하다(Lee *et al.*, 2004). 이처럼 꿀벌과 뒤영벌은 온도·조도 등 시설 미기상에 대한 반응이 서로 달라, 계절과 기상 변화에 따라 화분매개에 주로 기여하는 곤충의 종류와 활동 양상이 달라질 수 있다. 따라서 저조도기를 포함하는 시설 고추의 장기 재배에서 단일 화분매개곤충만으로는 기상 조건에 따라 방화활동이 불안정해져 수확 말기까지 안정적인 수량을 유지하기 어려울 수 있으며, 서로 다른 활동 특성을 지닌 두 곤충을 함께 이용하여 상호보완적으로 화분매개를 확보하는 전략이 요구된다.

고추에 대한 화분매개곤충 이용 연구는 국외에서 다수 수행되어 서양뒤영벌 이용 시 착과율과 과실 품질 및 수량이 향상된다고 보고되었다(Shipp *et al.*, 1994; Dag and Kammer, 2001; Ercan and Onus, 2003; Roldán Serrano and Guerra-Sanz, 2006). 국내에서도 시설 고추와 피망을 대상으로 꿀벌과 뒤영벌의 소문 출입활동과 화분매개 효과가 비교된 바 있으며(Kim *et al.*, 2004), 방울토마토, 참다래, 딸기, 참외, 배, 백향과 등 다양한 과채류에서 두 곤충의 방화활동과 화분매개 효과가 비교되어 왔다(Lee *et al.*, 2004, 2008, 2010, 2020; Kim *et al.*, 2005). 그러나 대부분의 연구가 단일 곤충의 이용 효과에 집중되어 있어, 시설 고추에서 꿀벌과 뒤영벌을 함께 투입하였을 때의 종류별 화분매개 효과와 시설 미기상에 따른 활동 특성, 그리고 적정 투입 밀도에 대한 실용적 정보는 아직 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 시설 고추 재배에 적합한 화분매개곤충을 선발하기 위하여 꿀벌, 뒤영벌 및 두 곤충의 혼합 이용에 따른 화분매개 효과를 비교하고, 선발된 조합을 대상으로 시설 미기상(온도·습도·조도) 변화와 곤충의 방화활동 특성을 연계하여 분석함으로써 안정적인 수량 확보에 필요한 적정 투입 밀도를 구명하고자 하였다. 이를 통해 시설 고추 화분매개곤충 이용의 기초 자료를 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

본 연구는 경상남도 진주시(북위 35°12'24", 동경 128°09'28")에 위치한 시설하우스에서 2개 작기에 걸쳐 연속적

으로 수행하였다. 먼저 시설 고추 재배에 적합한 화분매개 곤충을 선발하기 위해 꿀벌, 뒤영벌, 두 곤충 혼합 시 화분 매개 효과를 비교하는 시험을 수행하였고, 그 결과 유리한 것으로 나타난 꿀벌과 뒤영벌 혼합 조건을 대상으로 적정 투입 밀도를 구명하는 시험을 수행하였다.

1. 시험 장소 및 재배 관리

재배는 두 작기 모두 시설 내 토경재배로 하였다. 화분매개 곤충 선발 시험은 고추 ‘청양’을 2020년 8월 중순에 정식 하여 2020년 10월부터 2021년 6월까지 수확하였으며 재식 밀도는 2,300주 10a⁻¹로 하였고, 화분매개곤충 혼합 투입 밀도 평가 시험은 2021년 8월 중순에 정식하여 2021년 10월부터 2022년 6월까지 수확하였다. 시험곤충으로는 꿀벌 (*Apis mellifera* L.)과 서양뒤영벌 (*Bombus terrestris* L.)을 사용하였으며, 꿀벌은 1봉군당 소비 4매(약 8,000마리), 뒤영벌은 봉군당 100마리를 기준으로 하였다. 시험에 사용한 꿀벌 봉군은 경남 의령군 소재 양봉농가에서 구입하였고, 뒤영벌은 화분매개곤충 전문 생산업체인 강한벌(강원도 원주시)에서 구입하여 사용하였다. 봉군은 시험기간 중 세력이 약해진 봉군을 새 봉군으로 교체하는 방식으로 관리하였으며, 두 작기 모두 월동기에는 난방을 실시하여 시설 내부 기온을 15°C 이상으로 유지하였다.

2. 시험 화분매개곤충 및 시험구 처리

화분매개곤충 선발 시험은 꿀벌, 뒤영벌, 꿀벌과 뒤영벌 혼합 3처리로 수행하였으며, 화분매개곤충은 개화 후 착과기인 2021년 1월 20일부터 투입하였다. 화분매개곤충 투입 밀도 시험은 꿀벌과 뒤영벌 혼합 조건에서 투입량을 달리한 4처리로 구성하였다(Table 6). 꿀벌 기준량은 고추 1주당 3.0마리(8,000마리 10a⁻¹), 뒤영벌 기준량은 1주당 0.04마리(100마리 10a⁻¹)로 하였으며, 화분매개곤충은 1차로 2021년 12월 5일, 2차로 2022년 1월 18일에 투입하였다. 이 중 처리 3은 뒤영벌을 1차에 1주당 0.02마리 투입하였고, 2차 투입 시기에 1주당 0.12마리로 조정하였다. 2차 투입일을 기점으로 처리 내용을 구분하고 화분매개곤충의 활동량 조사도 1차와 2차로 나누어 실시하였다. 각 처리는 약 1,600 m² 규모의 격리된 독립 온실에 처리당 1동씩 배치하였고(선발 시험 3개 동, 투입 밀도 시험 4개 동), 각 온실 내부를 3개 구역으로 나누어 구역을 반복으로 하여 조사하였다.

3. 시설 내부 환경 조사

시설 내부의 미기상 환경(온도, 습도, 광량)은 데이터로거(aM-21ALS, Wisefarm, Korea)를 이용하여 10분 간격으로 측정하였으며, 조도(Lux)는 광량(PPF, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)에 환산계수 54 (Thimijan and Heins, 1983)를 곱하여 환산하였다. 아울러 시설 외부의 기상(기온, 습도, 강수량, 일조시간, 강우일수)은 인근 기상관측 자료를 이용하여 함께 검토하였다.

4. 화분매개곤충 활동 조사

화분매개곤충의 활동은 소문 출입활동과 방화활동으로 구분하여 조사하였다(Kim *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2025b). 소문 출입활동은 봉군 소문 앞에서 벌통으로 들어가는 입소 개체수와 나오는 출소 개체수를 계수기로 계수하였으며, 활동이 활발한 시간대에 오전과 오후로 나누어 반복 조사하였다. 방화활동량은 시설 내 일정 면적(300 m²)을 대상으로 단위시간당 꽃을 방문하는 개체수를 조사하였으며, 조사 시각의 시설 내부 온도·조도를 함께 기록하여 시설 미기상과 방화활동의 관계를 분석하였다.

5. 착과·수량 조사

화분매개곤충 선발 시험에서는 1주당 착과수와 생육 특성(초장, 주경장, 엽장, 엽폭, 마디수, 경경) 및 과실 특성(과장, 과경, 평균과중)을 조사하고 월별 상품수량 및 총수량을 2021년 2월 25일부터 6월 30일까지 조사하였다. 화분매개곤충 투입 밀도 시험에서는 착과율을 1차 및 2차 투입 후 온실 내 3개 구역에서 구역당 20개체씩 각각 조사하였고, 상품수량은 1차(2021년 12월 23일~2022년 1월 24일)·2차(2022년 2월 3일~6월 7일) 및 전체 수확기간으로 구분하여 조사하였다. 두 작기 모두 처리별 봉군 투입량(봉군수)을 함께 조사하였다. 생육과 수량은 온실 내 3개 구역을 반복으로 하여 구역당 10주씩 조사하였다.

6. 경제성 분석

화분매개곤충 종류 및 투입 밀도에 따른 경제성은 상품수량에 시설 고추 평년 가격(kg당 3,101원, 2022년 농축산물소득자료집)을 곱한 조수입에서 봉군 구입비, 노동비, 포장비를 제외한 추정수익액으로 산출하였다. 1봉군 구입비는 꿀벌 130,000원, 뒤영벌 60,000원, 포장비는 상자당

Table 1. Monthly greenhouse microclimate and outdoor weather (2021)

Month	Temp. (°C)	RH (%)	PPF [†] ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Max. illum. (Lux)	Low-light days (d) [‡]	Rainfall (mm) [§]	Rainy days (d) [§]
Feb.	21.0 ± 3.2	85.3 ± 9.9	325.5 ± 223.4	17,577	5	24.9	5
Mar.	22.8 ± 5.4	80.2 ± 17.1	509.9 ± 369.4	27,535	7	159.2	11
Apr.	24.4 ± 6.0	76.7 ± 19.5	587.3 ± 437.8	31,714	3	82.2	5
May	24.8 ± 7.2	78.6 ± 18.0	468.2 ± 407.4	25,283	7	116.9	10
Jun.	26.6 ± 8.2	75.9 ± 18.8	437.5 ± 380.2	23,625	2	101.7	10

Note. Temperature, RH, PPF and illuminance are greenhouse (indoor) monthly means (mean ± SD). [†]PPF, photosynthetic photon flux ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); illuminance = $54 \times \text{PPF}$ (Thimijan and Heins, 1983). [‡]Low-light days, number of overcast days inside the greenhouse with a daily light integral (DLI) < 16 $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (about half the clear-day level), computed from hourly greenhouse PPF (2021). [§]Outdoor rainfall and rainy days from a nearby weather station. Heating period Nov. 2020~early Apr. 2021

2,000원을 적용하였으며, 노동비는 농촌진흥청 농축산물 소득자료집을 기준으로 하였다.

7. 통계분석

모든 조사 자료는 분산분석(ANOVA)을 실시하였으며, 처리 간 평균 비교는 SPSS (ver. 18.0, SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 이용하여 Duncan의 다중검정 (Duncan's multiple range test, DMRT; $P=0.05$)으로 하였다. 생육, 착과율, 수량은 처리당 3반복($n=3$)을 실험 단위로 일원분산 분석하였으며, 표에 제시한 값은 평균 ± 표준편차(mean ± SD)이다. 시설 미기상 조건(온도, 조도)과 방화활동량·소문 출입량의 관계는 전체 조사 자료($n=292\sim294$)를 이용하여 Pearson 상관분석 및 회귀분석으로 검토하였다.

결과 및 고찰

1. 시설 내 미기상 환경 변화

두 작기 모두 시설 하우스는 월동기(2020년 11월~2021년 4월 초, 2021년 11월~2022년 3월)에 난방을 실시하여 시설 내부 기온을 15°C 이상으로 유지하였다(Tables 1 and 2). 그러나 광합성 유효광량(PPF)과 조도는 계절과 날씨의 영향을 크게 받아, 일조가 부족한 겨울철과 강우가 잦은 시기에 뚜렷하게 낮아졌다. 화분매개곤충 선발 시험인 1작기에서는 월평균 PPF가 2월 $325.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 4월 $587.3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 까지 증가하였으나 강우의 영향으로 5월에 다시 $468.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 낮아졌으며(Table 1), 2작기인 화분매개곤충 투입 밀도 시험에서는 12월($238.6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)과 1월($267.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)에 광량이 가장 낮

Table 2. Monthly microclimate inside the greenhouse (2021~2022)

Month	Mean temp. (°C)	Mean RH (%)	Mean PPF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Max. illum. (Lux)
Dec.	21.1 ± 3.2	81.1 ± 10.4	238.6 ± 30.4	12,885
Jan.	21.6 ± 3.7	81.4 ± 11.5	267.7 ± 37.5	14,456
Feb.	22.0 ± 4.2	79.6 ± 14.0	361.2 ± 48.9	19,507
Mar.	23.3 ± 5.6	79.6 ± 16.5	446.0 ± 73.6	24,085
Apr.	24.6 ± 6.8	77.9 ± 19.0	482.4 ± 175.5	26,050
May	25.5 ± 6.8	75.9 ± 20.6	448.7 ± 359.8	24,232

Note. Heating period inside the greenhouse: Nov. 2021~Mar. 2022. Values are monthly means ± SD. Illuminance = 54 (conversion factor) $\times$ PPF (Thimijan and Heins, 1983).

았고 이후 봄철로 갈수록 꾸준히 증가하였다(Table 2). 특히 2021년 시설 내 광량을 시간별로 분석하여 주간 일적산 광량(DLI)이 낮은 흐린 날($\text{DLI} < 16 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)의 일수를 집계한 결과, 3월과 5월에 각각 7일로 4월(3일)보다 2배 이상 많아(Table 1), 이 시기에 저조도 조건이 자주 나타났음을 확인하였다. 즉 시설 내부는 난방으로 온도는 어느 정도 확보되더라도 겨울철과 흐린 날에는 조도가 크게 떨어지는 특성을 보였으며, 이러한 미기상의 변동은 화분매개곤충의 종류별 방화활동과 수량에 직접적인 영향을 미쳤다.

2. 시설 고추 재배에 적합한 화분매개곤충의 선발

화분매개곤충(꿀벌, 뒤영벌, 꿀벌과 뒤영벌 혼합)을 1월 하순부터 투입한 결과, 처리 간 고추의 생육 특성에는 유의적인 차이가 나타나지 않았고(Table 3), 과실 특성도 과장 10.5~10.7 cm, 과경 16.0~17.5 mm, 평균과중 11.9~12.4 g으로 처리 간 뚜렷한 차이가 없었다. 1주당 착과수는 꿀

Table 3. Growth characteristics of pepper by insect pollinator species

Pollinator	Plant height (cm)	Stem length (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	No. of nodes	Stem diam. (mm)
Honeybee	173.9 ± 12.9	21.7 ± 2.4	10.8 ± 0.7	4.3 ± 0.3	22.9 ± 1.8	13.5 ± 1.4
Bumblebee	168.2 ± 11.3	20.6 ± 3.9	10.7 ± 1.0	4.5 ± 0.5	19.3 ± 3.5	13.4 ± 0.8
Honeybee + Bumblebee	166.6 ± 12.6	21.2 ± 1.7	11.6 ± 0.9	4.3 ± 0.3	21.1 ± 1.8	13.0 ± 1.5

Note. Pollinator introduction: Jan. 20, 2021; growth survey: Feb. 23, 2021. Values are means ± SD (n = 3, 10 plants per replicate). No significant difference among treatments by one-way ANOVA and DMRT (P < 0.05).

Table 4. Monthly and total marketable yield by insect pollinator species

Pollinator	Marketable yield (kg 10a ⁻¹)					
	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Total
Honeybee	403	2,073	1,410	2,253	1,111	7,250 b
Bumblebee	498	1,321	2,306	2,153	1,997	8,275 a
Honeybee + Bumblebee	394	1,220	2,637	1,583	2,421	8,255 a

Note. Yield survey: Feb. 25~Jun. 30, 2021. Means followed by different letters within a column are significantly different by one-way ANOVA and DMRT (P < 0.05).

별 처리구가 가장 많았으나, 최종 상품수량은 오히려 뒤영벌 및 꿀벌과 뒤영벌 혼합 처리구에서 높게 나타나 착과수가 곧바로 상품수량으로 이어지지 않았다.

시설 고추의 상품수량은 뒤영벌 처리구에서 8,275 kg 10a⁻¹로 가장 높았으며 꿀벌과 뒤영벌 혼합 처리구(8,255 kg 10a⁻¹)와는 통계적 유의차가 없었다(Table 4). 반면 꿀벌 단독 처리구는 총수량이 가장 낮았는데(7,250 kg 10a⁻¹), 특히 4월과 6월의 수량이 저조하였다. 이는 실측 시설 내 광량에서 주간 일적산광량이 낮은 흐린 날이 3월에는 7일, 5월에는 7일로 4월(3일)의 2배 이상이었고, 외부기상에서도 강우일수가 3월에 11일, 5월에 10일로 다른 달보다 많아(Table 1) 이 시기에 흐린 날이 잦았던 것과 관련된다. 흐린 날에는 시설 내 조도가 크게 낮아지는데, Table 1과 같이 PPF의 표준편차가 평균의 60~80%에 이를 정도로 날짜별 변동이 크다. 꿀벌은 이러한 저조도 조건에서 방화활동이 위축되므로, 흐린 날이 잦았던 3월과 5월의 활동 저하가 약 1개월 뒤인 4월과 6월의 수량 저하로 이어진 것으로 판단된다. 이러한 결과는 꿀벌이 저온·저조도 조건에서 활동성이 크게 저하되는 반면 뒤영벌은 이러한 환경에서도 안정적으로 활동한다는 기존 보고(Kwon and Saeed, 2003; Lee *et al.*, 2007, 2008) 및 서양뒤영벌 투입이 시설 고추의 착과와 수량을 향상시킨다는 연구(Shipp *et al.*, 1994;

Table 5. Number of introduced colonies by pollinator treatment

Pollinator	Number of colonies (colonies 10a ⁻¹)		
	Honeybee	Bumblebee	Total
Honeybee	4.0	—	4.0
Bumblebee	—	12.0	12.0
Honeybee + Bumblebee	2.3	4.6	6.9

Note. Introduction period: Jan. 20~May 20, 2021. Colony size: honeybee ca. 8,000 bees colony⁻¹, bumblebee ca. 100 bees colony⁻¹.

Ercan and Onus, 2003; Roldán Serrano and Guerra-Sanz, 2006)와 부합한다. 즉 꿀벌 단독 투입은 맑은 날에는 방화활동이 왕성하나 흐린 날이 잦은 시기에 활동이 급감하여 작기 전체로는 수량이 불안정해지는 반면, 뒤영벌은 저조도기에도 활동을 유지하여 수량 안정성이 높은 것으로 나타났다.

한편 처리별 봉군 투입량을 비교한 결과, 뒤영벌 단독 처리구는 10a당 12.0봉군을 투입하여 봉군수가 가장 많았던 반면, 혼합 처리구는 꿀벌 2.3봉군과 뒤영벌 4.6봉군으로 뒤영벌 단독보다 적은 봉군으로 대등한 수량을 확보하였다(Table 5). 즉 뒤영벌 단독 투입은 수량은 우수하나 다수의 봉군이 필요하고, 꿀벌 단독 투입은 저조도기 활동 저하로 수량이 낮은 반면, 꿀벌과 뒤영벌 혼합 투입은 두 곤충

의 장점을 살려 더 적은 봉군으로 안정적인 수량을 확보할 수 있었다. 이는 시설 고추에서 화분매개곤충을 혼합 이용하는 것이 유리함을 시사하며, 단일 곤충보다 혼합 이용의 이점을 보고한 연구(Dag and Kammer, 2001; Roldán Serrano and Guerra-Sanz, 2006)와도 맥을 같이한다. 따라서 이후의 화분매개곤충 투입 밀도 시험에서는 꿀벌과 뒤영벌 혼합 조건을 선발 조합으로 하여 적정 투입 밀도를 구명하였다.

3. 꿀벌과 뒤영벌 혼합 투입 시 적정 밀도

꿀벌과 뒤영벌을 혼합 투입하면 안정적인 수량 확보에 유리한 것으로 나타남에 따라, 2작기에는 꿀벌과 뒤영벌 혼합 조건에서 투입 밀도를 달리하여 적정 밀도를 구명하였다(Table 6). 착과율은 12월 1차 투입 시 꿀벌 기준량과 뒤영벌 기준량 처리구와 꿀벌 기준량과 뒤영벌 0.5배량 처리구에서 각각 79.4%, 79.6%로 높은 편이었으나, 1월 2차 투입에서는 뒤영벌을 3배량으로 늘린 처리 3에서 51.6%로 가장 낮은 경향을 보였다(Table 7). 다만 두 시기 모두 처리 간 착과율의 차이는 통계적으로 유의하지 않았다(1차 $P=0.111$, 2차 $P=0.084$). 2차 투입 후 처리 3의 낮은 착과율은 뒤영벌 밀도가 과도하게 높아지면서 꿀벌의 방화활동이 감소하였을 가능성이 있는 것으로 판단된다.

상품수량은 12월 1차 투입 후 꿀벌 기준량과 뒤영벌 2배량 처리구에서 기준 대비 7% 증수되었고, 1월 2차 투입 이후에도 동일 처리구에서 기준 대비 10%의 증수 효과가 확인되었다(Table 8). 반면 뒤영벌 0.5배량 처리구는 1차 수확에서 기준 대비 36% 감소되었고, 뒤영벌 3배량 처리구는 2차 수확에서 방화활동량은 급증하였으나 꿀벌 활동이

현저히 감소하여 기준 대비 2% 감소되었다. 전체 수확기간(2021. 12. 23~2022. 6. 7)의 상품수량을 종합한 결과, 꿀벌 기준량과 뒤영벌 2배량 처리구가 8,286 kg 10a⁻¹로 가장 높아 기준 대비 10% 증수된 반면(Table 8), 꿀벌을 2배로 늘린 처리구(7,861 kg 10a⁻¹)는 봉군 투입량이 2배로 증가한 데 비해 증수 효과가 크지 않았다. 따라서 시설 고추에서 화분매개곤충 혼합 투입 시에는 꿀벌은 기준량(8,000 마리 10a⁻¹)을 유지하고 뒤영벌을 기준량의 2배(200마리 10a⁻¹)로 투입하는 것이 착과율과 수량 측면에서 가장 유리한 것으로 나타났다. 이때 상품수량은 뒤영벌의 투입 밀도가 기준량에서 2배량까지 늘어남에 따라 증가하였으나 3배량에서는 오히려 감소하여, 방화활동량과 수량이 단순 비례하지 않고 두 곤충 간 상호작용에 의해 적정 밀도가 결정됨을 보여주었다.

Table 7. Fruit set according to pollinator stocking density treatment

Treatment	Fruit set (%)	
	1st introduction (Dec. 5, 2021)	2nd introduction (Jan. 18, 2022)
Treatment 1	79.4 ± 5.3 ns	63.7 ± 6.6 ns
Treatment 2	71.0 ± 7.1 ns	61.5 ± 6.6 ns
Treatment 3	79.6 ± 3.5 ns	51.6 ± 8.6 ns
Treatment 4	69.1 ± 6.4 ns	70.2 ± 7.9 ns

Note. Treatment 1, Honeybee standard + Bumblebee standard; Treatment 2, Honeybee 2 × standard + Bumblebee standard; Treatment 3, Honeybee standard + Bumblebee 0.5 × standard (1st) and 3 × standard (2nd); Treatment 4, Honeybee standard + Bumblebee 2 × standard. Fruit set was surveyed after each introduction. Values are means ± SD (n = 3, 20 plants per replicate). ns, not significant difference among treatments by one-way ANOVA (1st: $F=2.77$, $P=0.111$; 2nd: $F=3.19$, $P=0.084$) and DMRT ($P<0.05$).

Table 6. Stocking densities of insect pollinators by treatment

Treatment	Stocking density of pollinator (bees plant ⁻¹)		
	Honeybee	Bumblebee (1st)	Bumblebee (2nd)
Treatment 1	3.0	0.04	0.04
Treatment 2	6.0	0.04	0.04
Treatment 3	3.0	0.02	0.12
Treatment 4	3.0	0.08	0.08

Note. Treatment 1, Honeybee standard + Bumblebee standard; Treatment 2, Honeybee 2 × standard + Bumblebee standard; Treatment 3, Honeybee standard + Bumblebee 0.5 × standard (1st) and 3 × standard (2nd); Treatment 4, Honeybee standard + Bumblebee 2 × standard. Standard: honeybee 3 bees plant⁻¹ (8,000 bees 10a⁻¹), bumblebee 0.04 bees plant⁻¹ (100 bees 10a⁻¹). 1st introduction: Dec. 5, 2021; 2nd introduction: Jan. 18, 2022.

Table 8. Marketable yield and colony introduction by pollinator stocking density

Treatment	Marketable yield (kg 10a ⁻¹)			No. of colonies (colonies 10a ⁻¹)	
	1st	2nd	Total	Honeybee	Bumblebee
Treatment 1	1,324 a	6,218 b	7,542 b	2	4
Treatment 2	1,179 a	6,682 a	7,861 ab	4	4
Treatment 3	851 b	6,123 b	6,974 c	2	14
Treatment 4	1,412 a	6,874 a	8,286 a	2	8

Note. Treatment 1, Honeybee standard + Bumblebee standard; Treatment 2, Honeybee 2 × standard + Bumblebee standard; Treatment 3, Honeybee standard + Bumblebee 0.5 × standard (1st) and 3 × standard (2nd); Treatment 4, Honeybee standard + Bumblebee 2 × standard. Harvest period: 1st, Dec. 23, 2021~Jan. 24, 2022; 2nd, Feb. 3~Jun. 7, 2022. Means followed by different letters within a column are significantly different (DMRT, $P<0.05$).

4. 시설 미기상에 따른 방화활동 패턴과 화분매개곤충의 상호보완성

화분매개곤충의 소문 출입량은 두 곤충 모두 투입량에 비례하여 증가하여, 꿀벌은 꿀벌 2배 처리구에서, 뒤영벌은 뒤영벌 3배 처리구에서 각각 가장 많았다(Fig. 1). 그러나 실제 방화활동량의 시기별 변화는 투입 밀도뿐 아니라 시설 미기상의 계절적 변화와 밀접하게 연동되었다(Fig. 2). 뒤영벌 밀도가 과도하지 않은 처리구 1, 2, 4에서 꿀벌의 방화활동량은 투입 초기인 저온·저조도기(12월~1월)에는 뒤영벌과 큰 차이가 없거나 낮게 유지되다가, 시설 내 온도와 조도가 상승하는 2월 하순~3월 초에 뚜렷한 최대치를 보인 뒤 봄철로 갈수록 안정적으로 유지되었다. 반면 뒤영벌은 저온·저조도기에도 꾸준한 방화활동을 유지하여, 꿀벌의 활동이 낮은 겨울철에 화분매개를 보완하는 양상을 보였다.

즉 시설 내 조도와 온도가 낮은 겨울철과 흐린 날에는 뒤영벌이 주된 방화곤충으로 작용하고, 광량과 온도가 높아지는 봄철 맑은 날에는 꿀벌의 방화활동이 크게 증가하여, 계절과 날씨에 따라 화분매개에 주로 기여하는 곤충의 종류가 바뀌는 상호보완적 패턴이 관찰되었다. 이는 시설 내 온도·광 등 미기상 조건이 화분매개곤충의 방화활동에 크게 영향을 미친다는 보고(Kwon and Saeed, 2003; Lee and Yoon, 2017; Huang *et al.*, 2024; Kim *et al.*, 2024) 및 식재 밀

도와 미기상 등 환경 요인이 방화활동과 착과율에 유의하게 작용한다는 보고(Lee *et al.*, 2025a)와 일치한다. 특히 최근 연구에서도 화분매개곤충은 종류에 따라 선호하는 온도·광 조건이 달라 미기상에 대한 반응이 종 특이적임이 보고되었고(Bartholomé *et al.*, 2025), 시설에서 뒤영벌의 방화활동이 주간 기온 상승과 함께 증가하다가 과도한 고온에서는 오히려 감소한다는 보고(Huang *et al.*, 2024)가 있어, 본 연구에서 저온·저조도기에는 뒤영벌이, 고온·고광기에는 꿀벌이 우세하게 나타난 종류별 방화활동의 시기적 분화를 뒷받침한다.

조사 시각의 시설 내부 온도·광량과 방화활동량 간의 관계를 상관분석으로 검토한 결과, 꿀벌의 방화활동량은 온도($r = +0.20$, $P < 0.001$) 및 광량($r = +0.32$, $P < 0.001$)과 약한 정(+)의 상관을 보인 반면, 뒤영벌은 온도와는 유의한 관계가 없었고($r = +0.09$, $P = 0.115$) 광량과는 약한 상관($r = +0.16$, $P < 0.01$)만을 보였다(Table 9). 다만 이들 상관계수는 크지 않아 온도·광량이 방화활동량의 변이를 설명하는 비율은 낮았으며($R^2 = 0.04 \sim 0.10$), 이는 시설 내 방화활동이 미기상 외에도 개화량(Mahon and Hodge, 2022), 봉군 세력(Evans *et al.*, 2026) 등 여러 요인의 영향을 함께 받기 때문으로 판단되며, 뒤영벌의 활동이 꿀벌에 비해 기상 조건에 덜 의존한다는 보고(Karbassioon *et al.*, 2023)와도 부합한다. 소문 출입량에서도 같은 경향이 나타나, 꿀벌은 온도·광량과 정의 상관(각각 $r = +0.23$, $+0.32$, $P <$

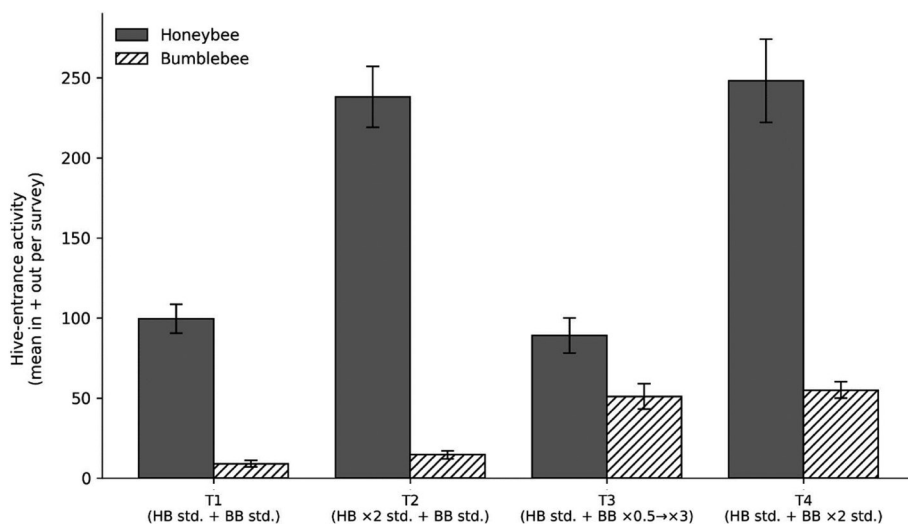


Fig. 1. Mean hive-entrance activity (in + out per survey) of honeybees and bumblebees by stocking-density treatment. Error bars are standard errors. Hive-entrance activity increased with the stocking density of each species. HB, honeybee; BB, bumblebee. Survey period: 1st Dec. 10, 2021~Jan. 12, 2022; 2nd Jan. 20~May 19, 2022.

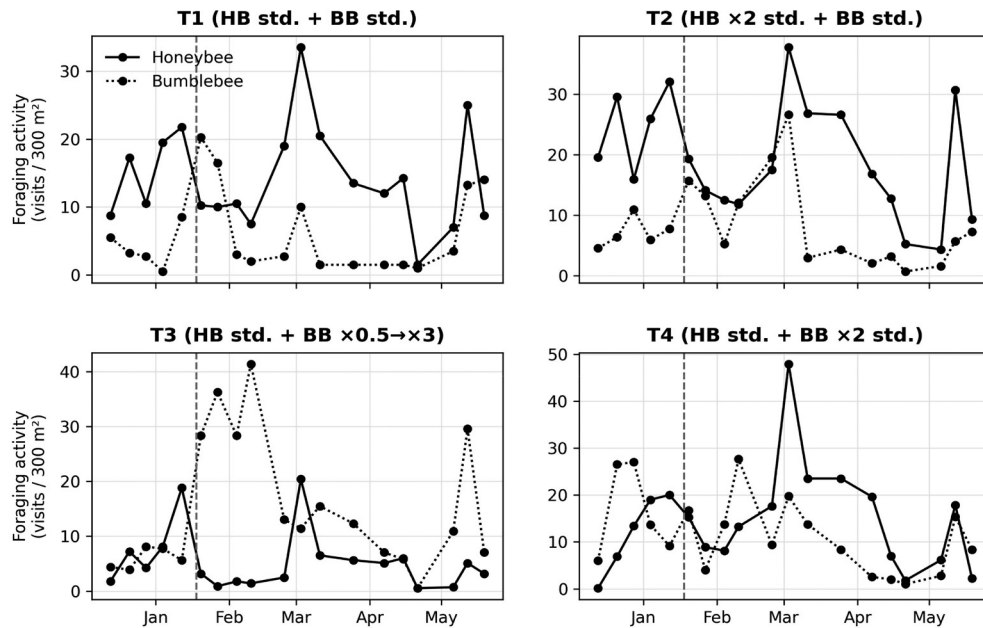


Fig. 2. Seasonal changes in flower-visiting (foraging) activity of honeybees and bumblebees by stocking-density treatment (survey area 300 m²). Values are the mean of the daily survey rounds. Bumblebees dominated during the low-temperature, low-light period of winter, whereas honeybee activity peaked as temperature and light rose toward spring; in the excessive-bumblebee treatment (T3), honeybee activity remained low. Dashed line indicates the 2nd colony introduction (Jan. 18, 2022). Survey period: Dec. 13, 2021~May 19, 2022.

0.001)을 보인 반면 뒤영벌은 온도($r = +0.03$, $P = 0.578$) 및 광량($r = +0.09$, $P = 0.114$)과는 유의한 상관관이 없었다 (Table 9). 즉 꿀벌의 활동은 온도·광량이 높아질수록 다소 증가하는 경향을 보인 데 비해, 뒤영벌은 미기상 변화와 무관하게 비교적 일정한 활동을 유지하였다. 이러한 종류별 반응 차이는 계절에 따라 주 방화곤충이 바뀌는 위의 패턴 (저온·저조도기 = 뒤영벌, 고온·고광기 = 꿀벌)을 정량적으로 뒷받침한다. 따라서 시설 고추와 같이 저조도기를 포함하는 장기 재배에서는 특정 시기의 날씨에 관계없이 화분매개를 안정적으로 유지하기 위하여 두 곤충을 함께 투입하는 것이 수량 안정화에 효과적이며, 이러한 상호보완성이 앞서 혼합 처리구가 적은 봉군으로 안정적인 수량을 확보한 결과의 배경이 되는 것으로 판단된다. 한편 두 곤충 모두 소문 출입량(x)과 방화활동량(y) 사이에 상관관계가 있고 유의한 선형 회귀관계가 인정되어 (꿀벌 $y = 0.064x + 2.92$, $R^2 = 0.46$, $P < 0.001$; 뒤영벌 $y = 0.157x + 4.93$, $R^2 = 0.39$, $P < 0.001$), 소문 출입 조사가 실제 방화활동을 잘 반영함을 확인하였다.

한편 뒤영벌을 기준량의 3배로 과도하게 투입한 처리구 3에서는 투입 초기인 1월 중순부터 3월 초까지 뒤영벌의

Table 9. Correlation between greenhouse microclimate, foraging activity and hive-entrance traffic of honeybees and bumblebees, pooled across the four treatments and all survey times

Pollinator	Factor	Correlation coeff. (r)	P
Foraging activity			
Honeybee	Temperature (°C)	+0.202	<0.001
	Light (PPF)	+0.323	<0.001
Bumblebee	Temperature (°C)	+0.092	0.115 (ns)
	Light (PPF)	+0.159	0.006
Hive-entrance traffic			
Honeybee	Temperature (°C)	+0.233	<0.001
	Light (PPF)	+0.330	<0.001
Bumblebee	Temperature (°C)	+0.033	0.578 (ns)
	Light (PPF)	+0.093	0.114 (ns)

Note. Greenhouse temperature (°C) and light intensity (PPF, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) recorded at each survey. Foraging activity, flower visits per 300 m²; hive-entrance traffic, number of bees entering plus leaving the hive per survey. $n = 292\sim 294$. r, Pearson correlation coefficient; ns, not significant.

방화활동량이 급격히 증가한 반면 꿀벌의 활동량은 매우 낮게 유지되어 (Fig. 2), 다른 처리구에서 꿀벌의 방화활동

Table 10. Estimated economic returns by pollinator treatment in the pollinator selection and stocking density trials

Treatment	Yield (kg 10a ⁻¹)	No. of colonies (HB/BB)	Economic analysis (thousand won 10a ⁻¹)		
			Gross income	Colony cost	Net income
Pollinator selection trial (2020~2021)					
Treatment 1-1	7,250	4.0/ –	22,482	520	18,661
Treatment 1-2	8,275	–/12.0	25,661	720	21,172
Treatment 1-3	8,255	2.3/4.6	25,599	575	21,265
Stocking density trial (2021~2022)					
Treatment 2-1	7,542	2.0/4.0	23,387	500	19,453
Treatment 2-2	7,861	4.0/4.0	24,376	760	20,037
Treatment 2-3	6,974	2.0/14.0	21,626	1,100	17,350
Treatment 2-4	8,286	2.0/8.0	25,695	740	21,182

Note. Treatment 1-1, Honeybee; Treatment 1-2, Bumblebee; Treatment 1-3, Honeybee + Bumblebee (selection trial); Treatment 2-1, Honeybee standard + Bumblebee standard; Treatment 2-2, Honeybee 2× standard + Bumblebee standard; Treatment 2-3, Honeybee standard + Bumblebee 0.5× standard (1st) and 3× standard (2nd); Treatment 2-4, Honeybee standard + Bumblebee 2× standard (density trial); HB, honeybee; BB, bumblebee; Gross income = yield × normal-year price (ca. 3,101 won kg⁻¹); colony cost from honeybee 130 and bumblebee 60 thousand won·colony⁻¹; net income = gross income – (colony cost + labor cost (1,300 thousand won 10a⁻¹) + packaging cost (2,000 won box⁻¹)). Values are estimates calculated from the treatment mean marketable yield (Tables 4 and 8) and colony numbers (Tables 5 and 8); no statistical test was applied.

이 뒤영벌과 함께 유지된 것과 대조적이었다. 화분매개곤충의 소문 출입과 방화활동은 화분매개 효율 및 착과와 직접 연관되므로(Lee *et al.*, 2007, 2010), 이러한 결과는 앞서 나타난 뒤영벌 3배량 처리구의 낮은 착과율 및 수량 저하와도 부합하며, 혼합 투입 시 두 곤충의 밀도 균형이 무너지면 오히려 화분매개 효율이 저하될 수 있음을 보여준다. 즉 뒤영벌은 저조도기 보안을 위해 기준량의 2배 수준까지 늘리는 것이 유리하나, 그 이상으로 과도하게 투입하면 꿀벌의 방화활동이 감소하여 상호보완 효과가 오히려 낮아질 가능성이 있는 것으로 판단된다. 이는 혼합 투입 시 적정 밀도가 곤충 간 상호작용에 의해 결정되며 단순히 투입량을 늘린다고 수량이 비례하여 증가하지 않음을 의미한다.

5. 화분매개곤충 종류 및 투입 밀도에 따른 경제성

화분매개곤충 종류 및 투입 밀도에 따른 경제성 분석 결과는 Table 10과 같다. 선발 시험에서는 꿀벌·뒤영벌 혼합 처리구의 추정수익액이 21,265천 원 10a⁻¹로 뒤영벌 단독(21,172천 원 10a⁻¹)과 비슷한 수준이었는데, 이는 혼합 처리가 뒤영벌 단독과 대등한 수량을 확보하면서도 뒤영벌 봉군수를 12.0봉군에서 4.6봉군으로 줄여 봉군 구입비를 절감하였기 때문이다. 반면 투입 밀도 시험에서는 뒤영벌을 기준량의 2배로 늘린 처리구가 봉군수 증가(뒤영벌 4 → 8봉군)에도 불구하고 상품수량이 가장 높아(8,286

kg 10a⁻¹) 추정수익액이 21,182천 원 10a⁻¹로 기준 처리구(19,453천 원 10a⁻¹)보다 높게 나타났다. 즉 선발 시험에서는 두 곤충의 상호보완적인 활동으로 안정적인 수량을 확보하면서 봉군수를 줄여 비용을 절감하는 방향으로, 투입 밀도 시험에서는 화분매개곤충 혼합 이용의 장점을 유지하면서 봉군을 늘려 수량을 높이는 방향으로 경제성이 확보되어, 두 시험에서 경제적 이점이 나타나는 기전이 서로 달랐다. 다만 투입 밀도 시험에서도 봉군을 늘리는 것이 항상 유리한 것은 아니었으며, 두 곤충 간 밀도 균형이 유지되는 범위에서만 봉군 증가가 수익 증가로 이어졌다.

결 론

이상의 결과를 종합하면, 시설 고추 재배에서 화분매개에 주로 기여하는 곤충의 종류는 시설 미기상과 계절·날씨에 따라 달라져, 저온·저조도기에는 뒤영벌이, 광량과 온도가 높은 시기에는 꿀벌이 주된 방화곤충으로 작용하였다. 따라서 특정 시기의 날씨에 관계없이 안정적인 화분매개와 수량을 확보하기 위해서는 꿀벌과 뒤영벌을 혼합 투입하는 것이 유리하며, 이때 꿀벌은 기준량(8,000마리 10a⁻¹)을 유지하고 뒤영벌은 기준량의 2배(200마리 10a⁻¹)로 투입하되, 뒤영벌을 그 이상으로 과도하게 투입하면 꿀

벌의 방화활동이 감소하여 오히려 수량이 낮아질 가능성이 있으므로 두 곤충 간 밀도 균형을 유지하는 것이 중요하다. 또한 꿀벌과 뒤영벌 혼합 투입은 상대적으로 고가인 뒤영벌 봉군의 수를 줄이면서도 대등하거나 더 높은 수량을 확보하여 추정수익액 기준으로 경제성 측면에서도 유리하였다.

본 연구는 그동안 꿀벌 중심으로 이루어져 온 시설 고추의 화분매개곤충 이용에서, 기후변화로 꿀벌 수급이 불안정해지고 뒤영벌 이용이 늘어나는 여건 변화를 반영하여 꿀벌과 뒤영벌의 혼합 이용 및 투입 밀도 효과를 2개 작기에 걸쳐 실증하였다는 데 의의가 있다. 시설 미기상(온도·조도)에 따라 두 곤충의 방화활동이 시기적으로 분화되어 저온·저조도기에는 뒤영벌이, 고온·고광기에는 꿀벌이 우세한 상호보완적 패턴을 확인함으로써 단일 곤충 이용의 한계와 혼합 이용의 필요성을 활동 특성 수준에서 뒷받침할 수 있었다.

화분매개곤충 선발 시험에서는 두 곤충의 혼합 이용을 통해 뒤영벌 단독과 대등한 수량을 더 적은 봉군으로 확보하여 경영비를 절감하였고, 투입 밀도 시험에서는 적정 수준의 뒤영벌 봉군 확충을 통해 증수 효과를 이끌어냄으로써 경제적 수익을 높일 수 있음을 확인하였다. 이처럼 봉군 절감과 수량 극대화는 접근 방식에 차이가 있으나, 모두 꿀벌과 뒤영벌의 혼합 이용을 전제로 경제적 효율성을 극대화한다는 점에서 맥을 같이한다. 본 연구 결과는 향후 시설 고추 재배 시 화분매개곤충 이용 지침을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

다만 본 연구는 특정 지역과 품종을 대상으로 2개 작기 동안 수행된 결과이므로, 지역·작형·품종에 따른 변이와 시설 내 미기상 조건을 고려한 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다. 아울러 뒤영벌도 지나친 고온에서는 방화활동과 화분매개가 저하될 수 있으므로(Hemberger *et al.*, 2023), 최근의 기후변화와 여름철 고온기를 고려한 시설 환경 관리 및 종별 활용 방안에 대한 연구도 필요할 것이다.

적 요

시설 고추(*Capsicum annuum* L.) 재배에 적합한 화분매개곤충을 선발하고, 선발된 곤충의 방화활동을 시설 미기상과 연계하여 분석함으로써 적정 투입 밀도를 구명하기

위해 경상남도농업기술원에서 2개 작기 동안 시험을 수행하였다. 시설 내부는 난방으로 온도가 15°C 이상 유지되었으나 조도는 겨울철과 흐린 날에 크게 낮아졌다. 종류별 비교에서 고추의 생육 및 과실특성은 처리 간 유의차가 없었으나, 상품수량은 뒤영벌 처리구(8,275 kg 10a⁻¹)와 혼합 처리구(8,255 kg 10a⁻¹)에서 높았고 꿀벌 단독 처리구는 저조도기 방화활동 저하로 가장 낮았다. 혼합 처리구는 뒤영벌 단독보다 적은 봉군으로 대등한 수량을 확보하여 시설 고추의 화분매개곤충으로 꿀벌·뒤영벌 혼합이 선발되었다. 방화활동은 저온·저조도기에는 뒤영벌이, 온도·광량이 높은 시기에는 꿀벌이 우세하여 계절·날씨에 따라 주된 방화곤충이 바뀌는 상호보완적 양상을 보였다. 혼합 투입 밀도 시험에서는 꿀벌 기준량(8,000마리 10a⁻¹)에 뒤영벌 2배량(200마리 10a⁻¹)을 투입한 처리구의 상품수량이 8,286 kg 10a⁻¹로 가장 높아 기준 대비 10% 증수되었으나, 뒤영벌 밀도가 과도하면 꿀벌의 방화활동이 감소하여 수량이 오히려 낮아지는 경향을 보였다. 이러한 결과는 시설 고추 화분매개곤충 이용의 실용적 지침으로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ01618 1102022)의 지원에 의해 이루어진 것임.

인 용 문 헌

- Bartholomée, O., V. W. Jie, P. Caplat, H. G. Smith and E. Baird. 2025. Warm or bright - Temperature and light micro-habitat use in insect pollinators. *Ecol. Entomol.* 50: 853-864.
- Buchmann, S. L. and J. P. Hurley. 1978. A biophysical model for buzz pollination in angiosperms. *J. Theor. Biol.* 72: 639-657.
- Dag, A. and Y. Kammer. 2001. Comparison between the effectiveness of honeybee (*Apis mellifera*) and bumblebee (*Bombus terrestris*) as pollinators of greenhouse sweet pepper (*Capsicum annuum*). *Am. Bee. J.* 141: 447-448.
- Ercan, N. and A. N. Onus. 2003. The effects of bumblebees (*Bombus terrestris* L.) on fruit quality and yield of pepper (*Capsicum annuum* L.) grown in an unheated greenhouse. *Isr. J. Plant Sci.* 51: 275-283.

- Evans, S. K., G. Clouston, Y. Regev, E. M. Walsh, K. Ihle, F. Rinkevich, M. Simone-Finstrom and H. Evans. 2026. Effect of honey bee colony strength on foraging productivity and its application to precision pollination. *Insects* 17: 163.
- Gallai, N., J. M. Salles, J. Settele and B. E. Vaissière. 2009. Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline. *Ecol. Econ.* 68: 810-821.
- Goulson, D., G. C. Lye and B. Darvill. 2008. Decline and conservation of bumblebees. *Annu. Rev. Entomol.* 53: 191-208.
- Greenleaf, S. S. and C. Kremen. 2006. Wild bee species increase tomato production and respond differently to surrounding land use in Northern California. *Biol. Conserv.* 133: 81-87.
- Hemberger, J. A., N. M. Rosenberger and N. M. Williams. 2023. Experimental heatwaves disrupt bumblebee foraging through direct heat effects and reduced nectar production. *Funct. Ecol.* 37: 591-601.
- Huang, X., Q. Zhang, U. A. A. Sheikh, Y. Wang and L. Zheng. 2024. Bumblebee foraging dynamics and pollination outcomes for cherry tomato and pear varieties in Northern China. *Insects* 15: 216.
- Kang, Y., S. H. Kwon and C. Jung. 2024. Correlation analysis between honeybee pest occurrences and winter failure based on the questionnaire from beekeepers in Korea. *Korean J. Apic.* 39: 185-193.
- Karbassioon, A., J. Yearsley, T. Dirilgen, S. Hodge, J. C. Stout and D. A. Stanley. 2023. Responses in honeybee and bumblebee activity to changes in weather conditions. *Oecologia* 201: 689-701.
- Kim, H., M. Son, D. H. Lee, S. H. Min, B. S. Park, S. J. Lee, S. B. Kim, K. W. Kwak, Y. B. Lee and K. Y. Lee. 2024. Pollination effect of bumblebee (*Bombus terrestris* L.) with a ventilation system in high-temperature greenhouse cultivation of cherry tomatoes. *Korean J. Apic.* 39: 209-216.
- Kim, Y. S., S. B. Lee, H. S. Shim, M. L. Lee, M. Y. Lee, H. J. Yoon, S. H. Nam and S. J. Chang. 2004. Pollination effect of honeybee (*Apis mellifera*) and bumblebee (*Bombus terrestris*) on hot and sweet pepper raised in vinyl house. *Korean J. Apic.* 19: 23-26.
- Kim, Y. S., S. B. Lee, Y. S. Cho, M. R. Lee, H. J. Yoon, M. Y. Lee and S. H. Nam. 2005. Comparison of pollinating effects between honeybees (*Apis mellifera*) and bumblebees (*Bombus terrestris*) on kiwifruit raised in greenhouse. *Korean J. Apic.* 20: 47-52.
- Klein, A. M., B. E. Vaissière, J. H. Cane, I. Steffan-Dewenter, S. A. Cunningham, C. Kremen and T. Tscharntke. 2007. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proc. R. Soc. B* 274: 303-313.
- Konuma, A. and S. Okubo. 2015. Valuating pollination services for agriculture in Japan. *Jpn. J. Ecol.* 65: 217-226.
- Kwon, Y. J. and S. Saeed. 2003. Effect of temperature on the foraging activity of *Bombus terrestris* L. (Hymenoptera: Apidae) on greenhouse hot pepper (*Capsicum annuum* L.). *Appl. Entomol. Zool.* 38: 275-280.
- Lee, D. H., M. Son, H. Kim, S. H. Min, Y. B. Lee, S. J. Lee, B. S. Park, S. B. Kim, K. W. Kwak, S. M. Lee and K. Y. Lee. 2025a. Effect of planting density and environmental factors on pollination activity of *Apis mellifera* and fruit set in greenhouse-cultivated mango (*Mangifera indica* L. cv. Irwin). *Korean J. Apic.* 40: 281-291.
- Lee, K. Y. and H. J. Yoon. 2017. The pollination properties and pollination efficiency of bumblebee (*Bombus terrestris* L.) relation to colony ventilation under high temperature condition in a greenhouse. *Korean J. Apic.* 32: 205-221.
- Lee, K. Y., H. J. Yoon, S. Lee and J. Park. 2020. Foraging activities of honeybees (*Apis mellifera* L.) and bumblebees (*Bombus terrestris* L.) on passionfruit (*Passiflora edulis* f. *edulis*) flower and their pollination effects. *Korean J. Apic.* 35: 205-217.
- Lee, S. B., D. G. Seo, Y. S. Kim, N. I. Gwak, H. J. Yoon, H. C. Park and S. J. Hwang. 2007. Foraging activity characteristics of *Apis mellifera* and *Bombus terrestris* on pear flowers. *Korean J. Apic.* 22: 125-132.
- Lee, S. B., H. S. Shim, W. T. Kim, K. H. Park, S. J. Hwang and Y. C. Choi. 2010. Foraging activity of workers and males of *Bombus terrestris* and honeybee *Apis mellifera* in greenhouse oriental melon. *Korean J. Apic.* 25: 245-252.
- Lee, S. B., H. S. Shim, Y. S. Kim, H. J. Yoon, S. E. Kim, J. W. Kim, N. G. Ha and S. R. Kim. 2004. Comparison of foraging activity and hive longevity of Korean native bumblebee (*Bombus ignitus*) and European bumblebee (*Bombus terrestris*) in cherry-tomato greenhouse. *Korean J. Apic.* 19: 27-36.
- Lee, S. B., N. G. Ha, K. Y. Lee, H. J. Yoon, I. G. Park, H. S. Kang, S. J. Hwang, M. Y. Lee and K. Choi. 2008. Pollinating characteristics and producing effects of *Apis mellifera* and *Bombus terrestris* in strawberry vinyl-houses. *Korean J. Apic.* 23: 73-81.
- Lee, S. J., H. Kim, M. Son, D. H. Lee, B. S. Park, S. B. Kim, Y. B. Lee and K. Y. Lee. 2025b. Comparative evaluation of pollination traits in the Jangwonbee (*Apis mellifera* L.) with enhanced nectar-gathering ability under greenhouse conditions for watermelons and strawberries. *Korean J. Apic.* 40: 31-40.
- Mahon, N. and S. Hodge. 2022. Evaluating the effects of observation period, floral density, and weather conditions on the consistency and accuracy of timed pollinator counts. *J. Pollinat. Ecol.* 32: 124-138.
- Rahimi, E. and C. Jung. 2025. Exploring climate-driven mismatches between pollinator-dependent crops and honeybees in Asia. *Biology* 14: 234.
- Rao, S. and W. P. Stephen. 2010. Abundance and diversity of native bumble bees associated with agricultural crops:

- The Willamette Valley experience. *Psyche* 2010: 354072.
- Roldán Serrano, A. and J. M. Guerra-Sanz. 2006. Quality fruit improvement in sweet pepper culture by bumblebee pollination. *Sci. Hortic.* 110: 160-166.
- Rural Development Administration (RDA). 2020. Agricultural technology guide 115: Red pepper. 41p. Rural Development Administration, Jeonju, Korea.
- Shipp, J. L., G. H. Whitfield and A. P. Papadopoulos. 1994. Effectiveness of the bumble bee, *Bombus impatiens* Cr. (Hymenoptera: Apidae), as a pollinator of greenhouse sweet pepper. *Sci. Hortic.* 57: 29-39.
- Statistics Korea. 2024. Agricultural area survey: Cultivation area of vegetables. Statistics Korea, Daejeon, Korea.
- Thimijan, R. W. and R. D. Heins. 1983. Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: A review of procedures for interconversion. *HortScience* 18: 818-822.
- Velthuis, H. H. W. and A. van Doorn. 2006. A century of advances in bumblebee domestication and the economic and environmental aspects of its commercialization for pollination. *Apidologie* 37: 421-451.
- Yoon, H. J., K. Y. Lee, H. S. Lee, M. Y. Lee, Y. S. Choi, M. Y. Lee and G. H. Kim. 2017. Survey of insect pollinators use for horticultural crops in Korea, 2016. *Korean J. Apic.* 32: 223-235.
- Yoon, H. J., K. Y. Lee, I. G. Park, M. I. Kim, Y. M. Kim and P. D. Kang. 2013. Current status of insect pollinators use for horticultural crops in 2011. *Korean J. Apic.* 28: 9-18.
- Yoon, H. J., K. Y. Lee, Y. B. Lee, M. Y. Lee, K. Sankar and J. D. Park. 2021. Current status of insect pollinators use for horticultural crops in Korea, 2020. *Korean J. Apic.* 36: 111-123.