

# 고온 시설재배 환경에서 봉군의 환풍처리를 통한 서양뒤영벌(*Bombus terrestris* L.)의 방화활동 특성 및 화분매개효과

이경용 · 윤형주\*

농촌진흥청 국립농업과학원 농업생물부

## The Pollination Properties and Pollination Efficiency of Bumblebee (*Bombus terrestris* L.) Relation to Colony Ventilation under High Temperature Condition in a Greenhouse

Kyeong Yong Lee and Hyung Joo Yoon\*

Department of Agricultural Biology, The National Institute of Agricultural Science, RDA, Wanju 55365, Republic of Korea

(Received 6 September 2017; Revised 26 September 2017; Accepted 26 September 2017)

### Abstract

In order to increase the utilization of bumblebees (*Bombus terrestris*) for pollination in summer, we investigated pollination properties of bumblebees in a high temperature condition i. e. a greenhouse where onions (*Allium cepa*) were cultivated. The temperature of bumblebee colonies was 3°C higher than the temperature inside the greenhouse during the onion pollination period. Foraging activity of bumblebee workers decreased at temperature over 33°C and was negatively correlated with colony temperature. Fanning behavior was observed at temperature over 30°C and was positively correlated with colony temperature. There was negative correlation between the number of bees fanning and bees foraging. We expected that foraging activity would be affected by colony temperature and fanning behavior. We ventilated bumblebee colonies using PC cooling fan to replace the fanning behavior of bumblebees, unventilated colonies were used as controls. The temperature of the colonies that were ventilated using the cooler fan was 3°C lower than the control colonies, and the rate of fanning behavior were 9 times lower in ventilated colonies than in the control colonies. Foraging activity and survival rates of worker bees in ventilated colonies doubled compared to the control colonies. Rates of seed set per flower and number of seeds set by bees in the ventilated colonies was 12% and -15% and 1.1 and -1.4 times higher pollination, respectively, than for the control colonies. We conclude that installing a ventilation device on the colony box can improve the internal environment of bumblebee colonies at high temperatures through ventilation and that this is a good option to increase pollination effectiveness for the crops in high temperature greenhouse conditions.

Key words: Bumblebee, Fanning, Greenhouse condition, High temperature

\*Corresponding author. E-mail: yoonhj1023@korea.kr

## 서 론

뒤영벌(*Bombus* spp.)은 다양한 많은 작물들의 중요한 화분매개곤충이며 효과적인 화분매개자가 될 수 있는 많은 특징을 가지고 있다(Corbet, 1987; Plowright and Laverty, 1987; Goulson, 2003). 뒤영벌은 꿀벌(*Apis mellifera*)에 비해 유충의 먹이원으로 화분을 더욱 선호하며, 이는 토마토와 같은 무밀작물에 더욱 효과적으로 사용될 수 있다(Plowright and Pendrel, 1977; Sutcliffe and Plowright, 1990). 뒤영벌은 다른 벌보다 크기가 크며 가슴근육을 통한 뛰어난 단열효과로 효과적인 비행중 온도조절 기구를 가지고 있기 때문에, 5°C의 저온에서 활동이 가능하고 민첩한 방화활동을 있는 것으로 알려져 있다(Poulsen, 1973; Heinrich, 1993; Willmer *et al.*, 1994). 1990년대 초 뒤영벌의 연중대량 사육기술이 개발된 이래로 서양뒤영벌(*B. terrestris*)은 유럽을 중심으로 전 세계 온실작물의 효과적인 수분용 농자재로서 판매되고 있다(Shipp *et al.*, 1994; Morandin *et al.*, 2001; Whittington and Winston, 2004). 국내에서도 2004년부터 서양뒤영벌을 자체생산하여 2015년 국내 유통 봉군의 90%를 수입대체 하였고, 14개의 생산업체에서 서양뒤영벌을 농가에 판매하고 있다(RDA, 2017).

서양뒤영벌은 주로 온실 내에서 이용되기 때문에, 온실 내 온도조건은 서양뒤영벌의 이용성에 많은 영향을 미친다(Martínez *et al.*, 2014). 자연상태에서 서양뒤영벌들은 봉군내부를 28~32°C가 될 수 있도록 온도를 조절한다(Pomeroy and Plowright, 1980; Vogt, 1986a, b). 이는 여러 연구자들이 수행한 서양뒤영벌의 실내사육실험 결과와 일치한다. Jie *et al.* (2005)과 Yoon *et al.* (2008)은 여왕벌이 최적으로 산란할 수 있는 온도가 29~30°C라고 보고하였다. 부화율과 유충의 발육 및 봉군의 성장 최적온도 범위 역시 29~30°C의 범위에서 가장 높다고 보고되었다(Heinrich, 1979; Vogt, 1986b; Gurel and Gosterit, 2008; Yoon *et al.*, 2008). 서양뒤영벌의 방화활동의 경우, 활동가능온도는 10~35°C, 최적 활동온도는 27~28°C로 보고되었다(Wysocka-Owczarek, 2006; Roman and Szczesna, 2008). Kwon and Saeed (2003)는 외기온도가 30°C가 넘으면

서양뒤영벌의 활동이 적어지기 시작하며 32°C에서는 서양뒤영벌의 활동이 제한된다고 보고하였다. 또한, Vogt(1986a)는 뒤영벌이 봉군의 환기를 위해 날개를 떠는 선풍행동(fanning behavior)은 외기온도가 32°C부터 증가한다고 보고하였다.

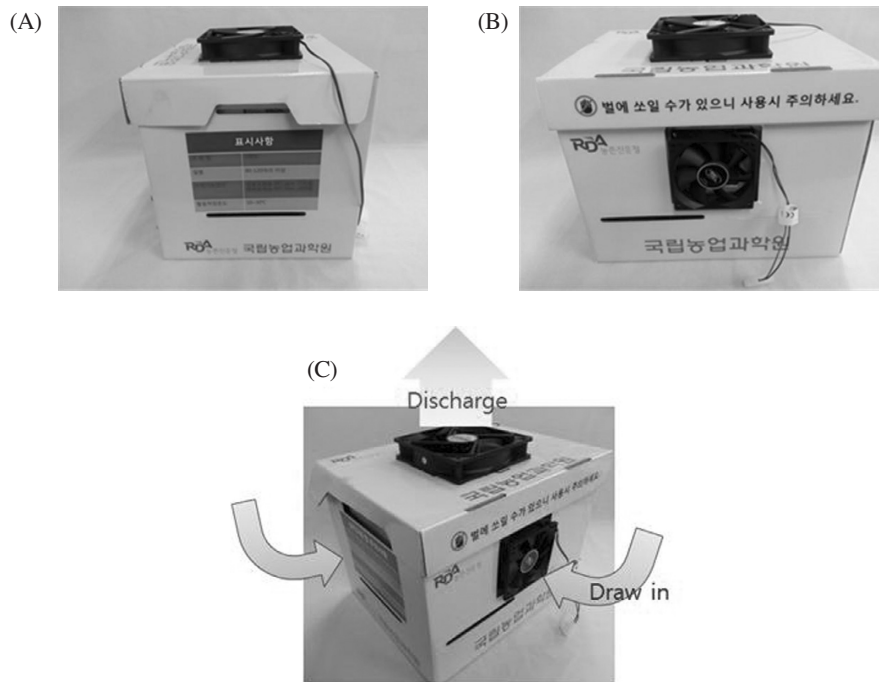
온실 재배기술의 발달로 토마토와 같은 채소작물은 연중생산이 가능하게 되었다. 그러나 여름작기 하우스 채소작물을 비롯하여 초여름에 개화하는 채종용 작물이나 일부 특용 작물의 경우 개화기간 중 온실내부 환경은 고온이 지속된다(Ku *et al.*, 2008; Nam *et al.*, 2015). 따라서 여름의 온실 고온 조건에서 서양뒤영벌의 사용은 크게 제한 받을 수 있다. 또한, 최근 기후변화로 인한 고온현상으로 남부 유럽의 지중해 주변의 영농현장에서는 온실 온도가 30°C를 초과하는 사례가 자주 발생하고 있다. 이러한 이유로 온실에서 사용되는 서양뒤영벌의 수명이 짧아져 작물 수분에 문제가 발생함으로 이에 대한 대비책이 요구되고 있다(Martínez *et al.*, 2014).

본 연구는 여름철 온실에서 서양뒤영벌의 사용 가능성을 확인하기 위하여 고온 온실 조건에서 서양뒤영벌 봉군내부의 온도 변화와 서양뒤영벌의 활동특성을 조사하였다. 아울러 봉군에 환기장치 설치를 통하여 봉군내부온도 감소, 서양뒤영벌의 방화활동 개선 및 화분매개효과를 구명하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 실험곤충 및 대상작물 선정

온실내 고온환경을 구현하기 위하여, 수분기간이 5월 말에서 7월 초인 채종용 양파(*Allium cepa*)를 대상작물로 선정하였다. 실험은 1차 2013년 6월 10일부터 7월 10일까지, 2차 2014년 5월 28일부터 6월 30일까지 수원소재 국립농업과학원 곤충산업과 165m<sup>2</sup> 비닐하우스 4개 동에서 수행되었다. 각 하우스 별로 채종용 양파는 중만생종 F<sub>1</sub> 부계와 모계를 1:4의 비율로 각각 170구, 680구를 준비하여 이랑너비 100cm, 조간거리 40cm, 주간거리 30cm로 비닐멀칭하여 정식하였다.



**Fig. 1.** A bumblebee colony box with the PC cooler installed. (A) The front of the box. (B) The side of the box. (C) The cooler allow external air flow into the side of colony box, and the inside air of the box escapes upwards.

고온환경에서 서양뒤영벌의 화분매개활동을 확인하기 위하여, 국립농업과학원 곤충산업과에서 26°C, RH 65%, 암조건에서 계대사육된 서양뒤영벌(*Bombus terrestris*) 7세대 봉군을 사용하였다. 실험에 사용된 뒤영벌 봉군 크기는 여왕벌 1마리에 일벌 250마리로 설정하였다.

#### 서양뒤영벌 봉군 환풍 장치 제작 및 실험구 배치

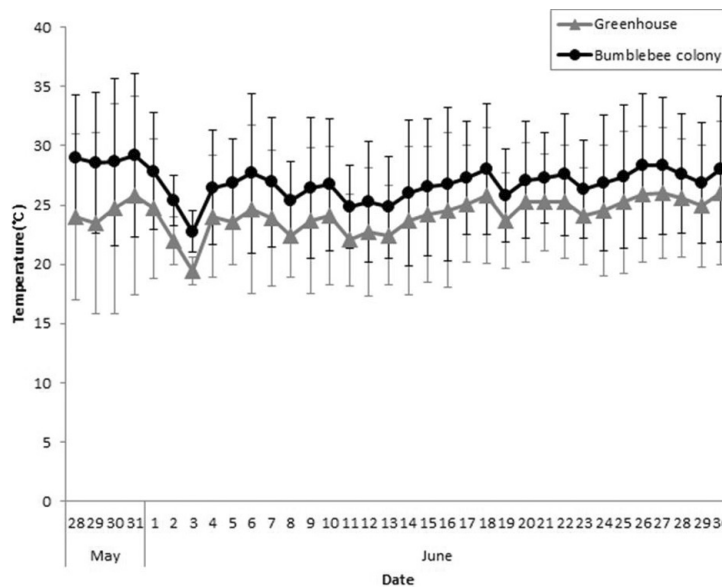
서양뒤영벌 봉군 내부의 환풍처리를 위하여 서양뒤영벌 벌통의 측면에 70mm 데스크탑 PC용 쿨링팬을, 벌통 덮개 상단에 100mm 쿨링팬(Zalman, Korea)을 설치하였다. 측면에 설치한 쿨링팬을 통하여 외부공기를 흡입시키고, 벌통 위쪽 덮개부분의 쿨링팬으로 봉군내부의 더운공기를 배출하는 구조로 봉군 내부를 환기시키고자 하였다(Fig. 1).

시험구는 2개 하우스에 환풍처리구(각 하우스 당 환풍처리 봉군 2개), 남은 2개 하우스에 무처리구(각 하우스 당 일반 봉군 2개)를 배치하였다. 양파의 화구가 약 70% 정도 개화한 시기(1차: 2013년 6월 10일, 2

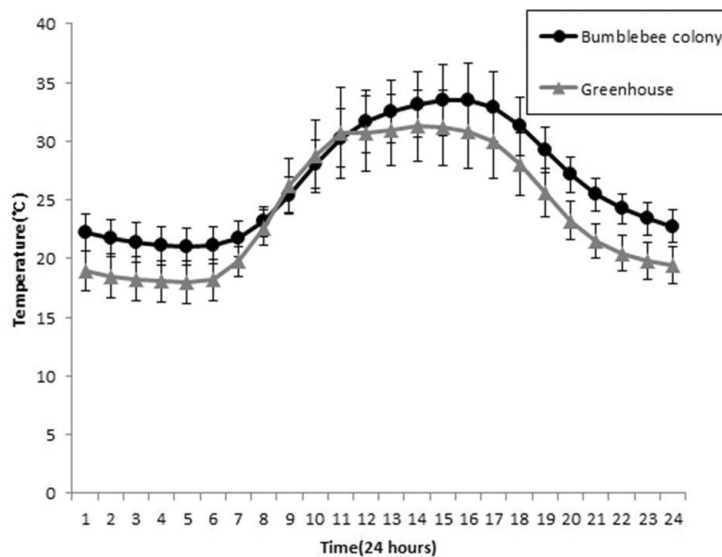
차: 2014년 5월 27일)에 서양뒤영벌 봉군들을 시험구에 투입하였다. 각 봉군은 1개월 간 비닐하우스에서 양파의 화분매개실험에 사용되었다.

#### 고온 온실 환경에서 서양뒤영벌 봉군내부의 온도변화

고온 온실 환경에서 서양뒤영벌의 봉군내부 온도변화를 조사하기 위하여, 2013년 6월 10일부터 7월 10일까지, 2014년 5월 28일부터 6월 30일까지 176T4 temperature data logger (Testo, Germany)를 통하여 1개 측정채널은 뒤영벌 봉군 내부에, 다른 1개 측정채널은 봉군외부에 설치하여 봉군내부와 온실의 온도변화 데이터를 확보하였다. 온도를 측정하는 시점은 매 10분 단위로 기록하였다. 확보된 데이터는 날짜별, 일 주시간별 평균온도, 최대온도, 최소온도 및 일교차를 분석하였다. 분석된 데이터를 바탕으로 온실온도와 봉군온도의 차이를 비교하였다. 추가적으로, 환풍처리 봉군과 무처리 봉군간의 봉군온도 비교를 통하여 환풍처리가 실제 봉군내부의 온도감소에 효과가 있는지 확인하였다.



**Fig. 2.** The temperature variation of ambient environment and bumblebee colonies in the greenhouse during the onion pollination period. There was a significant temperature difference between the ambient environment of greenhouse and the inside of bumblebee colony (T-test,  $t_{(65)}=-7.917, p=0.0001$ ).



**Fig. 3.** Diurnal temperature variation he inside of the greenhouse and bumblebee colonies during the onion pollination period (May 28~June 30 2013). There was a significant temperature difference between the greenhouse and bumblebee colonies (T-test,  $t_{(142)}=-3.115, p=0.002$ ).

### 고온 온실 환경에서 서양뒤영벌의 화분매개활동 특성

고온 온실 환경에서 서양뒤영벌의 활동은 봉군 설치 7일 후, 5일간(2013년 6월 17일~21일) 07시부터 19시까지 2시간 간격으로 봉군에서 소문 출입활동, 방

화활동 및 선풍행동(fanning behavior)을 조사하였다. 조사시기는 봉군설치후 뒤영벌의 하우스 내부 적응(3일)과 양파 꽃의 수술 개약기간(2일) 및 암술의 수정 능력 최성기(3일)을 감안하여 설정하였다(RDA

2002). 조사시간은 조도와 온도가 증가하기 시작하는 오전 7시부터 조도와 온도가 가장 낮아지는 오후 7시로 설정하였다. 서양뒤영벌의 소문 출입활동은 조사시간마다 5분간 봉군에서 출입하는 일벌의 수를 조사하였다. 방화활동은 조사시간을 기준으로 비닐하우스 내 양파 꽃에 앉아 화분매개활동을 하는 모든 일벌의 수를 세었다. 선풍행동은 조사시간을 기준으로 5분간 선풍행동을 하는 일벌의 수를 조사하였다.

하우스 내 환경은 2시간마다 하우스 내부온도와 조도를 서양뒤영벌 봉군내부 환경은 봉군 내부온도를 조사하였다. 온실온도는 176T4 temperature data logger (Testo, Germany)로 측정하였고, 20.0~24.9°C, 25.0~29.9°C, 30.0~34.9°C, 35.0~45.0°C로 나누어 분석하였다. 조도는 TM-204 Lux/Fc Lighter meter(Tenmars, Taiwan)으로 측정하였고 10,000 lux 미만, 10,000~19,999 lux, 20,000~29,999 lux, 30,100~45,000 lux로 나누어 분석하였다. 봉군온도는 앞서 온실온도 측정에 쓴 data logger에 추가로 측정채널을 봉군내부에 넣어 조사하였고, 25.0~30.9°C, 31.0~34.9°C, 35.0~40.0°C로 나누어 분석하였다. 각 온도와 조도에 대한 구간설정은 이전 연구에서 온도와 조도의 설정구간을 참고하였고, 아울러 분산분석을 위하여 관측값의 분포를 기준으로 정의하였다(Lee *et al.*, 2016). 조사된 자료를 바탕으로 온실온도, 조도 및 봉군온도 등의 환경조건과 뒤영벌의 활동수를 편상관분석하여 각 환경조건 중 뒤영벌의 활동에 유의미한 영향을 끼치는 요소를 도출하였다. 아울러, 봉군의 내부 온도에 따라 선풍행동의 변화를 조사하였고 회귀분석을 통하여 봉군내부 온도와 선풍행동 간의 상관관계를 확인하였다. 또한 선풍행동을 하는 일벌의 수가 방화활동수에 영향을 미치는지 조사하기 위하여 일벌의 선풍행동과 방화활동수간의 상관분석 및 회귀분석을 통하여 상호관계를 분석하였다.

#### 벌통 환풍 처리에 따른 화분매개활동 특성과 봉군내부 벌의 생존수

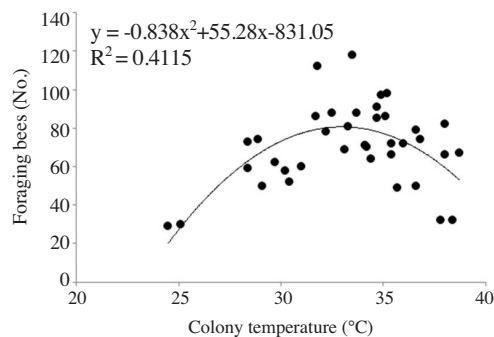
고온 온실 환경에서 뒤영벌 벌통의 환풍처리에 따른 화분매개활동 특성을 조사하기 위하여, 봉군설치

7일후 5일간(2013년 6월 17일~21일) 07시부터 19시까지 2시간 간격으로 봉군에서 소문 출입활동, 방화활동 및 선풍행동을 조사하였다. 조사된 자료를 바탕으로 무처리 봉군에 대하여 일주시간 및 봉군내부 온도에 따른 소문출입활동, 방화활동의 비교를 하였다. 그리고 봉군내부 온도에 따른 선풍행동의 수를 비교 조사하였다. 화분매개 종료 직후 봉군 상태를 확인하기 위하여 환풍처리와 무처리에 대한 생존 일벌의 수, 수벌의 수, 여왕벌의 수 및 번데기 수를 조사하였다.

#### 벌통 환풍 처리에 따른 수확물 특성

고온환경에서 서양뒤영벌 벌통의 환풍처리에 따른 화분매개효과를 비교하기 위하여, 환풍처리별 양파 꽃의 수정률, 화구당 종자수, 천립중을 조사하였다. 수정률은 한 화구에 총 꽃 수에 대하여 수정된 소화수로 계산하였고, 화구당 종자수는 1개의 화구에서 얻을 수 있는 총 종자의 개수를 나타내었다. 천립중은 한 화구에서 얻은 종자 1,000개의 평균 무게로 나타내었다. 종자 계수는 정밀종자계수기(WAVER IC-250, AIDEX, Nagoya, Japan)를 사용하였다.

봉군 환풍처리별 종자활성 검정을 위하여 수분이 끝난 화구를 종자가 굳어질 때까지 하우스에서 1개월간 건조시킨 다음 야외에서 7일간 일광건조한 후 실험구 별로 수확하였다. 실험구 별로 수확한 종자를 지름 15cm 유리 패트리디쉬에 탈지면을 2cm 두께로 깔 후 물을 충분히 적신 후, 50립씩 치상하여, 20°C, 습도 70%, 암 조건으로 12일간 배양하였다. 배양기간 동안 매일 13시를 기준으로 발아종자수를 확인하였다. 조사된 자료를 바탕으로 발아세(Germination Energy), 발아율(Germination Percent), 평균발아일수(Mean Germination Time), 평균 발아속도(Mean Daily Germination)를 조사하였다. 발아율은 12일간 발아된 대파종자의 비율로, 발아세는 중간발아조사일인 6일간의 발아율로 조사하였다. 평균발아일수는 치상후 조사일수 × 조사당일 발아수/총발아수로, 평균발아속도는 총발아수/총조사일수로 산정하였다(Zhu *et al.*, 2010).



**Fig. 4.** Relationship between colony temperature and number of foraging bumblebee workers. The regression equation is  $y = -0.838x^2 + 55.28x - 831.05$  and the  $R^2$  value is 0.412. The temperature at which activity ceases is estimated at a maximum of 42.8 degrees and a minimum of 23.2 degrees.

### 통계분석

양파의 개화기간 중 일주시간에 따른 온실과 봉군 내부의 온도차이, 일교차 방화활동 차이는 T-test 또는 oneway ANOVA test로 분석하였다. 온실 온도와 조도, 봉군내부의 온도에 따른 화분매개활동의 비교는 조도와 온도간 상호 상관분석을 통하여 연관성을 찾은 후 그 요인을 배제하여 공분산분석(ANCOVA test)를 수행하였다. 또한 각 환경조건에 대한 화분매개활동의 연관성을 밝히기 위해 편상관분석(Partial correlations)을 수행하였다. 상관분석을 통하여 유의미한 상관관계가 도출시 회귀분석을 통하여 관계를 해석하였다. 뒤영벌 봉군의 환풍 처리별 봉군온도, 화분매개활동, 선풍행동, 화분매개종료 후 생존한 벌의 수 및 수확물 비교는 분산의 동질성 검정에 따라 T-test나 welch's T-test로 비교분석하였다. 통계분석 중 분산분석의 결과는 Tukey's HSD test로 사후분석하였고, 모든 통계분석은 SPSS PASW 22.0 for windows 통계 패키지(IBM, USA)을 사용하였다.

## 결 과

### 고온 시설 재배환경에서 서양뒤영벌 봉군내부의 온도 변화

채종용 양파의 개화기중 날자별 온실과 서양뒤영벌 봉군의 온도변화를 조사한 결과를 Fig. 2에 표시하

였다. 개화기간 33일간 온실내부 온도는 평균온도  $25.3 \pm 6.0^\circ\text{C}$ , 최고온도  $33.5 \pm 3.1^\circ\text{C}$ , 최저온도  $17.2 \pm 1.7^\circ\text{C}$ 로 나타났다. 일교차는  $16.3 \pm 4.0^\circ\text{C}$ 로 나타났다. 뒤영벌 봉군의 평균 내부온도는  $27.1 \pm 1.7^\circ\text{C}$ , 최고온도  $34.7 \pm 2.8^\circ\text{C}$ , 최저온도  $20.8 \pm 2.4^\circ\text{C}$ 로 온실온도보다  $3^\circ\text{C}$  정도 높았다. 일교차의 경우  $13.9 \pm 4.0^\circ\text{C}$ 로 외기 일교차보다  $3^\circ\text{C}$  유의미하게 낮았다(T-test  $t_{(113)} = 3.217, p=0.002$ ). 봉군 내부의 일교차가 온실보다 작다는 것은 벌에 의하여 봉군내부 온도가 일정부분 유지되고 있기 때문으로 생각된다.

Fig. 3에 채종용 양파의 개화기중 일주시간에 따른 온실과 서양뒤영벌 봉군의 온도변화를 나타내었다. 온실의 경우 10시부터 16시까지  $30\sim 31^\circ\text{C}$ 로 가장 높은 수준을 보였고, 22시부터 6시까지  $18\sim 20^\circ\text{C}$ 로 가장 낮은 수준을 나타내었다. 서양뒤영벌 봉군 내부 온도는 12시부터 16시까지  $32\sim 33^\circ\text{C}$ 로 가장 높은 수준을 나타내었고, 23시부터 4시까지  $21\sim 22^\circ\text{C}$ 로 가장 낮은 수준을 보였다. 온실온도와 비교할 때 15~16시까지 온도가  $2.7\sim 3.9^\circ\text{C}$ 로 높게 유지되어 다른 시간대에 비해 유의미한 차이를 나타내었다(welch's ANOVA test  $F_{(23,286,210)} = 42.780, p=0.0001$ ).

### 고온 온실 환경에서 서양뒤영벌의 화분매개활동 특성

#### 고온 온실 환경에서 서양뒤영벌 일벌의 화분매개활동 변화

고온 온실 환경에서 온실 내부 온도에 따른 서양뒤영벌의 일벌 활동 수를 조사한 결과, 온도에 따른 일벌의 봉군의 출입수는 유의미한 차이는 보이지 않았으나(ANCOVA test:  $F_{(3,25)} = 2.235, p=0.110$ ), 방화활동 수에서는 유의미한 차이를 나타내었다( $F_{(3,25)} = 3.188, p=0.042$ ). 봉군 출입수와 방화활동 모두 온도별로  $20\sim 29.9^\circ\text{C}$ 까지는 증가하다가,  $30\sim 35^\circ\text{C}$ 에서는 감소하는 경향을 보여주어 Kwon and Saeed(2003)이 보고한 서양뒤영벌의 방화활동 감소 온도범위와 일치하였다(Table 1). 온실 내부 조도에 따른 일벌의 봉군 출입수와 방화활동 수는 유의미한 차이는 나타나지 않았다(Table 2). 특히 조도에 따른 봉군 출입수는 이렇다 할

**Table 1.** The average rate of foraging and pollination activity of bumblebees at different temperatures in the greenhouse during the onion pollination period

Air temperature (°C)	n*	No. of bumblebee workers	
		In-out activities	Foraging activities
20-24.9	5	8.7±4.9	20.0±15.1 <sup>b</sup>
25-29.9	11	11.6±1.6	42.7±17.2 <sup>a</sup>
30-34.9	9	7.5±3.1	35.1±10.8 <sup>ab</sup>
35-44.9	3	3.1±1.5	28.8±8.2 <sup>b</sup>

\*n: Observed number of colonies.

1) survey period: 20~26 June 2013.

2) The rate of in-out activity of bees was not significantly affected air temperatures in the greenhouse (ANCOVA and Tukey HSD test:  $F_{(3,25)}=2.235, p=0.110$ ). In contrast, the foraging activity of bees was significantly affected by air temperatures in the greenhouse ( $F_{(3,25)}=3.188, p=0.042$ ).**Table 2.** The average rate of foraging and pollination activity of bumblebees at different levels of illuminations in greenhouse during onion pollination period

Illumination level (Lux)	n*	No. of bumblebee workers	
		In-out activities	Foraging activities
< 10,000	7	9.9±5.2	23.6±16.2
10,000-19,999	7	7.2±2.1	30.7±18.5
20,000-29,999	9	8.2±4.1	35.1±11.7
30,000-49,999	5	3.5±1.8	28.5±8.3

\*n: Observed number of colonies.

1) survey period: 2013. 6. 20~26.

2) The rate of in-out activity and foraging activity of bees was not significantly affected by illumination level in the greenhouse (ANCOVA, foraging activity:  $F_{(3,24)}=0.935, p=0.440$  and in-out activity:  $F_{(3,25)}=0.619, p=0.610$ ).**Table 3.** The average rate of foraging and pollination activity of bumblebees at different temperatures inside bumblebee colonies in a greenhouse during the onion pollination period

Colony temperature (°C)	n	No. of bumblebee workers		
		In-out activities	n	Foraging activities
25-30.9	3	10.0±1.2	2	37.0±1.4
31-34.9	3	5.4±1.0	7	31.6±3.9
35-39.9	14	3.9±1.8	10	29.9±2.5

1) The rate of foraging and in-out activity of bees was not significantly affected by colony temperatures in the greenhouse (ANCOVA, foraging activity:  $F_{(2,17)}=0.718, p=0.503$  and in-out activity:  $F_{(2,16)}=2.241, p=0.141$ ).

패턴을 확인 할 수 없었지만(봉군 출입 수:  $F_{(3,24)}=0.935, p=0.440$ ; 방화활동 수:  $F_{(3,25)}=0.619, p=0.610$ ), 방화활동의 경우는 온도패턴과 같이 특정 시점(10,000 이하-29,999 lux)까지 활동이 증가하다가 이후부터 감소하는 경향을 보여주었다. 봉군온도에 따라 일벌의 봉군 출입수와 방화활동 수는 통계적으로 유의미하지 않았으나 봉군온도가 25°C 이상 증가한 이후부터 감소하는 경향을 보여주었다(봉군출입 수:  $F_{(2,17)}=0.718, p=0.503$  방화활동 수:  $F_{(2,16)}=2.241,$

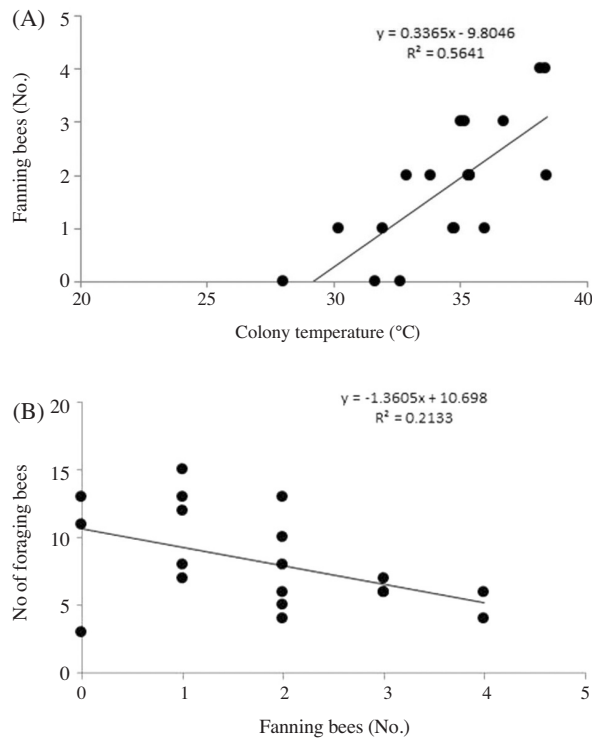
$p=0.141$ ) (Table 3).

온실온도와 조도 그리고 봉군온도는 상호간 높은 상관관계를 가지고 있기 때문에(온실온도-봉군온도:  $R=0.878, p=0.0001$ ; 온실온도-조도:  $R=0.786, p=0.0001$ ; 봉군온도-조도:  $R=0.760, p=0.0001$ ), 편상관분석을 통하여 온실온도, 조도, 봉군온도 중 벌의 활동과 상관관계 있는 요소를 분석하였다(Table 4). 그 결과, 봉군온도만이 서양뒤영벌의 방화활동에 상관관계를 가지는 것으로 나타났고, 봉군온도가 오를수록 방화활동이 감소

**Table 4.** Correlations between air temperature, level of illumination, colony temperature and bee activity (foraging and pollination)

Partial correlations	Air temperature		Illumination level		Colony temperature	
	R	p	R	p	R	p
In-out activities	-0.326	0.097	0.062	0.759	0.068	0.731
Foraging activities	0.116	0.564	-0.005	0.979	-0.622**	0.006*

1) Partial correlation coefficients are calculated with bee activity and green house environmental parameters as controlling variables. As each set of values was used to calculate two correlations, "\*" indicates a significant correlation at the  $p < 0.01$  level (2-tailed) and "\*\*\*" indicates a strong correlation ( $R > 0.6$ ).



**Fig. 5.** Number of fanning bees in relation to (A) colony temperature and (B) number of foraging bees. The regression equation is  $y = 0.3365x - 9.8046$  and the  $R^2$  value is 0.564 in (A). The regression equation is  $y = -1.3605x + 10.698$  and the  $R^2$  value is 0.213 in (B).

하는 부의 상관관계를 나타내었다 ( $R = -0.622$ ,  $p = 0.006$ ). 이에 회귀분석으로 이용하여 온도에 따른 패턴을 조사한 결과, 특정 온도 시점까지 활동량이 증가하다가 이후 감소하는 2차 곡선 회귀식을 도출하였다 ( $y = -0.838x^2 + 55.28x - 831.05$ ,  $R^2 = 0.412$ , ANOVA  $F_{(2,35)} = 12.237$ ,  $p = 0.0001$ ). 회귀식을 통하여 방화활동이 감소하는 특정 봉군 온도 시점은  $33^\circ\text{C}$ 로 활동이 정지되는 온도는 최고  $42.8^\circ\text{C}$ , 최저  $23.2^\circ\text{C}$ 로 계산되었다.

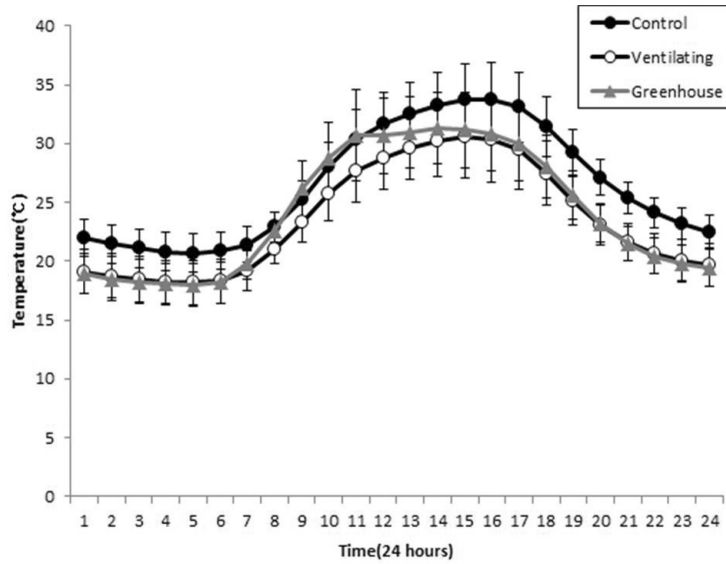
### 고온 온실 환경에서 서양뒤영벌 일벌의 선풍행동 변화

봉군 온도에 따른 서양뒤영벌의 선풍행동을 조사한 결과, 봉군 온도가  $30^\circ\text{C}$  이상부터 선풍행동을 하는 일벌이 관찰되었으며, 이후 봉군 온도가 상승 할수록 선풍행동을 하는 일벌의 수가 많아졌다. 상관분석 결과 봉군 온도와 선풍행동 간에 유의미한 정적 상관관계를 확인 할 수 있었다 ( $R = 0.728$ ,  $p = 0.0001$ ). 내부 온도 변화에 따른 선풍행동의 변화를 예측하기 위하여 회귀분석을 한 결과 유의미한 1차 회귀식 ( $y = 0.3365x - 9.8046$ ,  $R^2 = 0.564$ , ANOVA  $F_{(1,17)} = 22.001$ ,  $p = 0.0001$ ,  $DW = 2.218$ ) 이 도출되었다 (Fig. 5-A). 일벌의 선풍행동이 방화활동에 영향을 미치는 지 확인하기 위하여 일벌의 선풍행동 수와 방화활동 수간의 상관관계를 확인한 결과, 선풍행동 증가함에 따라 방화활동이 감소 경향을 보여주었다 ( $R = -0.462$ ,  $p = 0.047$ ). 이를 바탕으로 회귀분석 결과 설명력은 다소 낮으나 유의미한 1차 회귀식을 확인 할 수 있었다 ( $y = -1.3605x + 10.698$ ,  $R^2 = 0.213$ , ANOVA  $F_{(1,17)} = 4.609$ ,  $p = 0.047$ ,  $DW = 2.303$ ) (Fig. 5-B). 이와 연관지어 생각해 볼 때,  $30^\circ\text{C}$  이상 봉군 내부 온도의 증가는 선풍행동의 증가를 일으키며 이는 방화활동 감소에 영향을 끼칠 수 있음을 의미한다. Couvillon *et al.* (2010)와 Martínez *et al.* (2014)는 봉군 내부가 고온이 됨으로 인해 일벌의 선풍행동이 늘어나면 방화활동을 할 수 있는 일벌의 기회가 제한되어 방화활동의 감소로 나타날 수 있음을 예상하였는데, 이와 일치하는 결과였다.

### 고온 온실 환경에서 서양뒤영벌 봉군의 환풍처리에 따른 봉군 내부 온도 변화

Fig. 1과 같이 PC용 70mm 쿨러를 봉군의 양 측면에





**Fig. 6.** Diurnal temperature variation inside the greenhouse, the control colonies and ventilated colonies in the greenhouse during the onion pollination period.

**Table 5.** The temperature inside the bumblebee colony boxes at different ventilation treatments in the greenhouse

Treatments	n	Air temperature	
		Inside greenhouse (°C)	Inside colony (°C)
Controls	80	28.9 ± 5.5	33.3 ± 2.8*
Ventilation treatment	80	28.9 ± 5.5	30.1 ± 3.1

\* indicates significant difference at  $p < 0.05$  between treatment plots.

1) Each bumble colony box contained 1 queen and 250 workers.

2) The temperature inside bumble colony differed significantly between control colonies and colonies with ventilation treatment (T-test:  $t_{(158)}=6.829, p=0.0001$ ).

설치하여 흡기하고, 봉군 위 뚜껑에 100mm 쿨러를 설치하여 봉군내부 공기를 배기하는 서양뒤영벌 봉군 환풍장치를 제작하였다. 전체 화분매개기간동안 무처리 봉군과 환풍처리 봉군의 봉군내부 온도의 차이를 비교하였다(Table 5). 그 결과, 평균 내부온도는  $23.8 \pm 1.6^\circ\text{C}$ , 최고온도  $31.8 \pm 2.9^\circ\text{C}$ , 최저온도  $17.6 \pm 1.9^\circ\text{C}$ 로 무처리 봉군보다  $3^\circ\text{C}$  정도 유의미하게 낮은 것으로 나타났다(T-test, 평균온도:  $t_{(158)}=-12.457, p=0.002$ , 최고온도:  $t_{(158)}=-0.597, p=0.002$ , 최저온도:  $t_{(158)}=-0.201, p=0.002$ ) 시간대 별로 분석한 결과, 환풍처리를 한 봉군의 경우 오전 11시에서 오후 4시까지  $29\sim 30^\circ\text{C}$ 로 가장 높은 수준을 보였고, 오후 10시부터 오전 6시까지  $18\sim 20^\circ\text{C}$ 로 가장 낮은 수준을 보였다(Fig. 6). 전반적으로 환풍처리한 봉군의 내부온도는

온실온도와 같은 수준을 보였으나, 오전 8시부터 10시까지  $2.8\sim 3.0^\circ\text{C}$  온도가 낮게 유지 되어 다른 시간대에 비해 차이를 보였다(Welch's ANOVA test:  $F_{(23,286,421)}=57.507, p=0.0001$ ). 무처리구와 비교할 때 온도변화 패턴은 유사하였으나, 전반적으로 온도는  $3^\circ\text{C}$  정도 더 낮게 유지되었다. 특히 오후 1시부터 오후 10시까지의 온도차는  $3.1\sim 4.1^\circ\text{C}$ 로서 가장 큰 차이를 나타내었다( $F_{(23,286,638)}=18.022, p=0.0001$ ). 양파꽃의 유효수정 시간인 오전 9시부터 오후 4시의 경우, 봉군의 내부온도 역시  $25.4\sim 30.2^\circ\text{C}$  범위로 외기온도( $30\sim 31.3^\circ\text{C}$ )나 무처리 봉군( $32.5\sim 33.5^\circ\text{C}$ )에 비해 낮은 온도를 나타내어 낮 시간 봉군의 온도 감소에 효과적임이 인정되었다(one-way ANOVA test:  $F_{(2,18)}=6.370, p=0.008$ ).

**Table 6.** The average rate of foraging and pollination activity of bumblebees at different ventilation treatment in the greenhouse

Treatments	No. of bumblebee workers			
	n	In-out activities	n	Foraging activities
Controls	19	16.3 ± 12.8	23	32.7 ± 13.9
Ventilation treatment	19	25.1 ± 11.7*	23	64.2 ± 26.1*

\* indicates significant difference at  $p < 0.05$  between treatment plots.

1) The in-out and foraging activity of bees differed significantly between the control and ventilated colonies (T-test, foraging activity:  $t_{(36)} = -8.003$ ,  $p = 0.032$  and pollination activity:  $t_{(18)} = -2.918$ ,  $p = 0.009$ ).

**Table 7.** Number of survival bumblebees inside colony boxes at different ventilation treatment of bumblebee colony boxes after the pollination period

Treatments	n	No. of survival bumblebees			
		Worker	Male	New queen	Pupa
Controls	8	33.3 ± 26.9	1.4 ± 2.9	0.1 ± 0.4	2.3 ± 4.5
Ventilation treatment	5	62.0 ± 13.2*	1.4 ± 2.1	1.2 ± 1.6	7.4 ± 6.0

\* indicates significant difference at  $p < 0.05$  between treatment plots.

1) Number of workers differed significantly between control and ventilation treatment of bumblebee colony boxes (T-test:  $t_{(11)} = -2.199$ ,  $p = 0.05$ ), in contrast the number of males, new queens, pupas did not differ significantly between treatments (males:  $t_{(11)} = -1.782$ ,  $p = 0.102$ , new queens:  $t_{(11)} = -0.017$ ,  $p = 0.987$ ; pupas:  $t_{(11)} = -1.830$ ,  $p = 0.219$ ).

**Table 8.** The onion seed yields parameters at different ventilation treatment of bumblebee colony boxes

Years	Treatments	n	Rate of seed set per flower (%)	No. of seeds per umbel	No. of seeds per flower	Weight of 1,000 seeds (g)
2013	Controls	18	58.9 ± 10.1	1,091.9 ± 201.8	1.7 ± 0.4	4.2 ± 0.3
	Ventilation treatment	18	71.0 ± 16.0*	1,246.7 ± 162.7*	2.3 ± 0.6*	4.1 ± 0.4
2014	Controls	20	62.1 ± 12.3	1,014.4 ± 412.4	2.6 ± 0.2*	3.4 ± 0.2*
	Ventilation treatment	20	77.5 ± 10.5*	1,394.4 ± 605.4*	2.3 ± 0.2	3.1 ± 0.3

\* indicates significant difference at  $p < 0.05$  between treatment plots.

1) In 2013, the rate of seed set and number of seeds differed significantly between controls and ventilation treatment of bumblebee colony boxes (Rate of seed set per flower: T-test  $t_{(33)} = -2.658$ ,  $p = 0.012$ ; no. of seeds per umbel:  $t_{(33)} = -2.505$ ,  $p = 0.017$ , no. of seeds per flower:  $t_{(33)} = -2.505$ ,  $p = 0.017$ ), in contrast the weight of 1,000 seeds did not differ significantly ( $t_{(10)} = 0.587$ ,  $p = 0.570$ ).

2) In 2014, all of the seed yield parameters differed significantly between controls and ventilation treatment of bumblebee colony boxes (Rate of seed set per flower: T-test  $t_{(35)} = -4.110$ ,  $p = 0.0001$ ; no. of seeds per umbel:  $t_{(35)} = 2.190$ ,  $p = 0.035$ , no. of seeds per flower:  $t_{(35)} = -3.593$ ,  $p = 0.001$ ; weight of 1,000 seeds:  $t_{(35)} = -3.384$ ,  $p = 0.002$ ).

### 고온 온실 환경에서 서양뒤영벌 봉군의 환풍처리에 따른 화분매개활동 특성변화

#### 서양뒤영벌 봉군의 환풍처리 따른 일벌의 화분매개활동 변화

Table 6에 7시부터 19시까지 시간대별 환풍처리와 무처리 봉군의 봉군온도와 일벌의 봉군입출입수와 방화활동 수를 비교하였다. 환풍처리를 한 봉군의 경우, 봉군을 출입하는 서양뒤영벌의 일벌 수는 25.1 ± 11.7마리로 무처리 봉군보다 1.5배 증가하였고, 방화

활동 수는 64.2 ± 26.1마리로 무처리보다 2배 증가하여 유의미한 차이를 나타내었다(봉군출입수:  $t_{(36)} = -8.003$ ,  $p = 0.032$ ; 방화활동수:  $t_{(18)} = -2.918$ ,  $p = 0.009$ ).

시간별로 환풍처리 봉군과 무처리 봉군간의 서양뒤영벌의 활동차이를 비교하였다. 봉군출입수를 조사한 결과(Fig. 7-A), 07시는 무처리가 환풍처리보다 높은 출입수를 보였으나, 유의미한 차이는 없었고( $t_{(4)} = 0.696$ ,  $p = 0.558$ ), 15시, 19시에는 같은 수준을 보였다(15시:  $t_{(4)} = 0.270$ ,  $p = 0.801$ ; 19시:  $t_{(4)} = 0.696$ ,  $p = 0.808$ ). 09~13시와 17시에는 1.6~2.9배 환풍처리 봉군이 무처

**Table 9.** Germination properties of onion seeds at different ventilation treatment of bumblebee colony boxes

Years	Treatments	n	Germination energy (%)	Germination percentage (%)	Mean germination time (days)	Mean daily germination (days)
2013	Controls	5	97.6 ± 1.7	98.4 ± 0.9	2.6 ± 0.2	4.1 ± 0.0
	Ventilation treatment	5	96.0 ± 2.8	99.2 ± 1.8	3.2 ± 0.3*	4.1 ± 0.1
2013	Controls	30	74.5 ± 16.5	82.6 ± 15.2	4.0 ± 0.6	3.8 ± 0.7
	Ventilation treatment	30	67.7 ± 14.1	80.5 ± 10.6	4.6 ± 0.6*	3.7 ± 0.5

\* indicates significant difference at  $p < 0.05$  between treatment plots.

1) In 2013, the mean germination time differed significantly between controls and ventilation treatment of bumblebee colony boxes ( $t_{(8)} = 3.392, p = 0.009$ ).

2) In 2014, only mean germination time differed significantly between controls and ventilation treatment of bumblebee colony boxes ( $t_{(58)} = 3.341, p = 0.001$ ).

리 봉군보다 더 많은 봉군출입수가 관찰되었다(09시:  $t_{(4)} = -5.714, p = 0.005$ ; 11시:  $t_{(4)} = -4.656, p = 0.001$ ; 13시:  $t_{(4)} = -3.516, p = 0.025$ ; 17시:  $t_{(4)} = -11.404, p = 0.0001$ ). 전반적으로 13~15시까지 봉군내부온도가 올라가면서 입출입 수도 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 9시부터 13시까지 봉군내부온도가 올라갈수록 출입수의 차이는 더 커지는 경향이였다. 다만 15시의 경우 봉군의 온도가 가장 높고, 환풍처리구에서는 가장 낮은 출입수를 나타내어 무처리구와 차이가 없는 것으로 생각된다. 봉군내부 방화활동수를 조사한 결과(Fig. 7-B), 07시와 19시의 경우 같은 수준을 보였으나(07시:  $t_{(4)} = 1.000, p = 0.423$ ; 19시:  $t_{(4)} = 0.962, p = 0.438$ ), 09시부터 17시까지 환풍처리가 무처리보다 1.8~2.5배 높은 결과를 보였다(09시:  $t_{(6)} = -3.014, p = 0.0024$ ; 11시:  $t_{(6)} = -2.905, p = 0.027$ ; 13시:  $t_{(4)} = -1.619, p = 0.025$ ; 17시:  $t_{(6)} = -2.976, p = 0.025$ ).

봉군온도에 따른 환풍처리와 무처리 봉군에서 서양뒤영벌의 활동을 분석한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 일벌의 봉군 출입수는 환풍처리구 무처리구 모두 봉군내부온도가 올라갈수록 감소하는 관계를 나타내었다(무처리구:  $y = -0.694x + 30.049, R^2 = 0.761$ , ANOVA  $F_{(1,8)} = 25.437, p = 0.001, DW = 1.590$ ; 환풍처리:  $y = -0.524x + 26.846, R^2 = 0.414$ , ANOVA  $F_{(1,8)} = 5.658, p = 0.045, DW = 2.578$ ). 다만 환풍처리구는 무처리구에 비해 결정계수가 작고, 회귀식의 기울기가 낮기 때문에, 환풍처리구의 일벌의 출입활동은 봉군온도에 영향을 적게 받을 것으로 판단된다(Fig. 8-A). 일벌의 방

화활동의 경우, 봉군내부 온도가 올라갈수록 무처리구의 방화활동이 감소하지만( $y = -0.828x + 37.634, R^2 = 0.394$ , ANOVA  $F_{(1,17)} = 11.050, p = 0.004, DW = 2.228$ ), 환풍처리구는 봉군내부온도가 방화활동에 영향을 주지 않는 것으로 보인다(Fig. 8-B). 이러한 결과를 연관시켜 볼 때 봉군에 환풍처리를 할 경우, 무처리에 비해 일벌의 화분매개활동량이 많아지며, 봉군내부 온도변화에도 큰 영향 없이 방화활동을 할 수 있는 것으로 판단된다.

#### 서양뒤영벌 봉군의 환풍처리에 일벌의 선풍행동 변화

봉군에 환풍처리를 통하여 선풍행동의 변화를 확인한 결과(Fig. 9), 무처리는  $1.8 \pm 1.2$ 마리, 환풍처리는  $0.2 \pm 0.4$ 마리로 환풍처리시 선풍행동을 하는 서양뒤영벌의 수가 유의미하게 감소된 것을 확인 할 수 있었다(T-test  $t_{(36)} = 5.303, p = 0.0001$ ). 또한 무처리와 선풍처리시 봉군내부온도 증가에 따른 선풍행동을 선형회귀분석을 한 결과(Fig. 10), 무처리와 환풍처리 모두 유의미한 선형회귀식을 도출 할 수 있었다(무처리:  $y = 0.3365x - 9.8046, R^2 = 0.564, p = 0.0001, DW = 2.218$ ; 환풍처리:  $y = 0.067x - 1.833, R^2 = 0.326, p = 0.011, DW = 2.578$ ). 그러나 결정계수( $R^2$ )를 감안할 때, 환풍처리의 결정계수가 무처리보다 낮아 무처리보다 설명력이 떨어지고, 회귀식의 기울기도 무처리보다 낮으므로, 환풍처리시 봉군내부온도에 따라 선풍행동이 증가하지 않거나, 봉군내부의 온도가 증가하더라도 서양뒤영벌

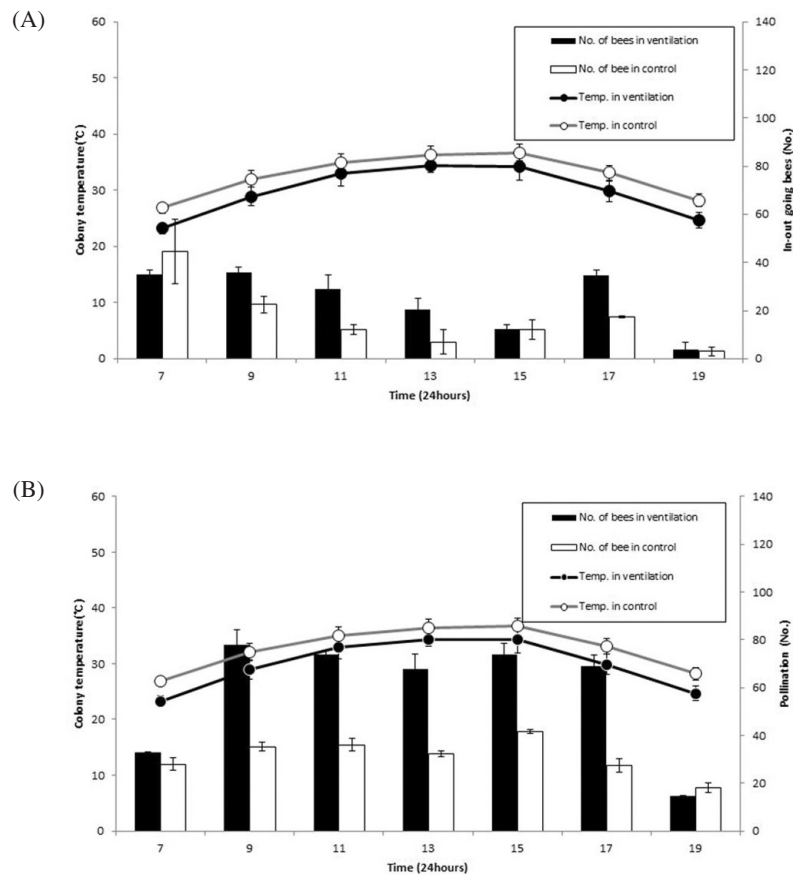


Fig. 7. Diurnal temperature variation in bumblebee colonies and (A) in-out and (B) foraging activities at different ventilation treatment of bumblebee colony boxes during the onion pollination period.

의 선풍행동이 무처리보다는 적을 것으로 생각된다. 앞서 일벌의 선풍행동과 방화활동은 부의상관관계를 보였지만, 환풍처리 조건에서 일벌의 선풍행동과 방화활동은 어떠한 관계도 확인할 수 없었다 ( $p=0.947$ ). 이와 연관시켜 볼 때, 서양뒤영벌 봉군의 환풍처리는 봉군내부 온도와 함께 일벌의 선풍행동을 감소시키며, 이를 통하여 일벌의 방화활동에 영향을 주지 않는 것으로 예상된다.

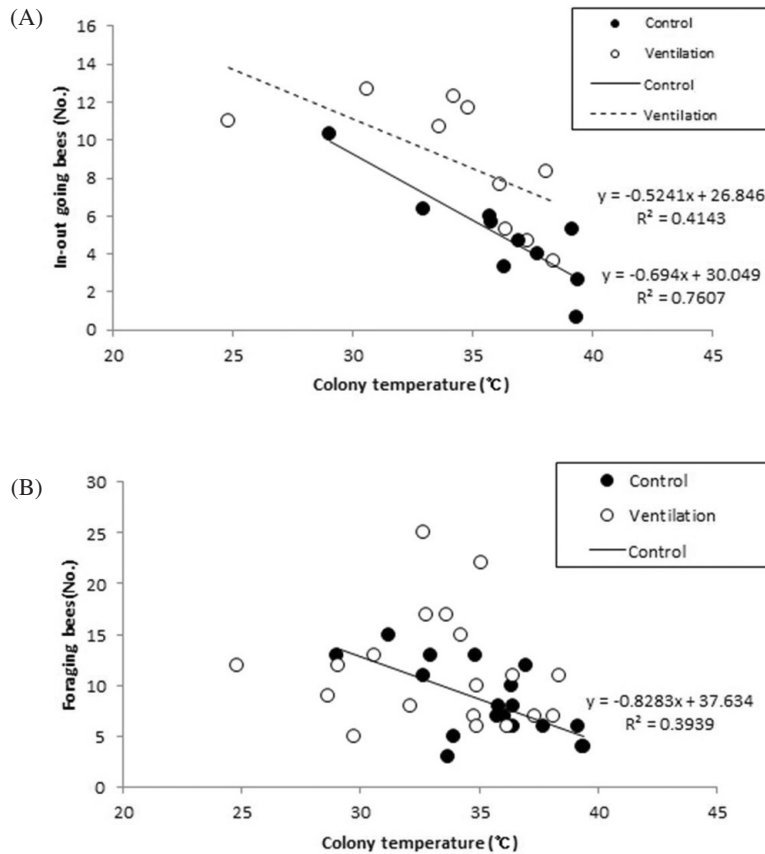
#### 서양뒤영벌 봉군의 환풍처리에 따른 봉군내부 벌 생존수

환풍처리에 따른 화분매개 종료 후 봉군내검을 실시하여 생존한 벌과 번데기 수를 확인 한 결과를 Table 7에 나타내었다. 환풍처리를 한 봉군의 경우 생

존한 일벌의 수는  $62.0 \pm 13.2$ 마리로 무처리보다 2배 많은 생존 수를 보였고 통계적으로 유의하였다(T-test:  $t_{(11)}=-2.199$ ,  $p=0.05$ ). 또한 번데기의 수도 통계적으로 유의하지는 않으나, 환풍처리가 무처리에 비해 2배이상 높은 결과를, 신여왕벌의 경우도 무처리보다 높은 결과를 나타내어, 두 처리 모두 일벌의 수가 감소하였지만, 감소율이 무처리구가 환풍처리구보다 높은 바, 환풍처리는 무처리에 비해 봉군을 유지시키는 데 다소 효과가 있는 것으로 판단된다.

#### 고온 온실 환경에서 서양뒤영벌 봉군의 환풍처리에 따른 화분매개효과

고온온실 환경에서 서양뒤영벌 봉군의 환풍처리에 따른 화분매개효과를 조사한 결과(Table 8), 수정률에

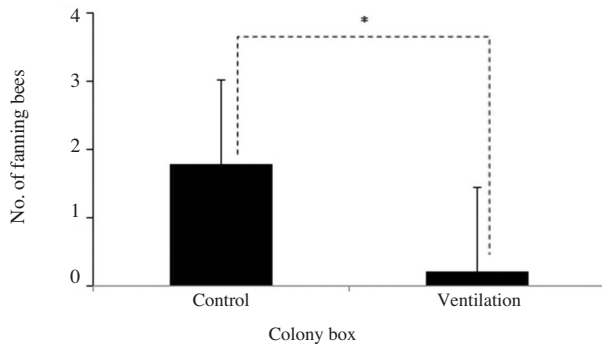


**Fig. 8.** Number of bees going in and out and foraging bees in relation to colony temperature. There is not a correlation between foraging activities and colony temperature in the ventilated colonies. The regression equation for controls is  $y = -0.694x + 30.049$ ,  $R^2$  value is 0.761, and the regression equation for ventilation treatment is  $y = -0.524x + 26.846$  and  $R^2$  value is 0.414 in (A). The regression equation for 'control' is  $y = -0.828x + 37.634$ ,  $R^2$  value is 0.394 in (B).

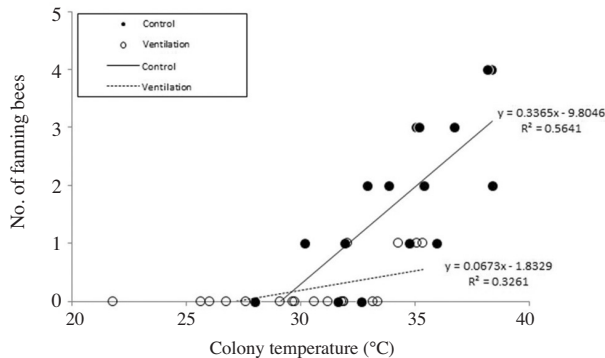
서는 환풍처리가 무처리에 비해 12~15% 유의미하게 높은 결과를 보여주었다(2013년: T-test  $t_{(33)} = -2.658$ ,  $p = 0.012$ ; 2014년:  $t_{(35)} = 4.110$ ,  $p = 0.0001$ ). 화구 당 종자 수는 환풍처리가 무처리에 비해 1.1~1.4배 많았으며 통계적으로 유의미한 차이를 나타내었다(2013년: T-test  $t_{(33)} = -2.505$ ,  $p = 0.017$ ; 2014년  $t_{(35)} = 2.190$ ,  $p = 0.035$ ). 천립중에서는 무처리가 환풍처리보다 0.1~0.3g 더 높은 경향을 나타내었다.

환풍처리에 따른 종자 발아 특성을 조사한 결과를 Table 9에 나타내었다. 발아세는 무처리구가 환풍처리구보다 높은 경향이었으나 유의성은 없었고, 평균 발아일수는 무처리구가 환풍처리구보다 0.6일 빠른 것으로 확인되었다(2013년 T-test:  $t_{(8)} = -3.392$ ,  $p = 0.009$ ;

2014년  $t_{(58)} = -3.341$ ,  $p = 0.001$ ). 발아율과 평균발아속도는 큰 차이를 보이지 않았다. Lee *et al.* (2012)는 화분매개곤충의 이용에 따른 양파의 종자활성은 큰 차이가 없다고 보고하였다. 본 결과 역시 발아율, 발아세와 같은 주요 지표에서는 유의미한 차이가 없어, 환풍처리는 종자의 활성에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다. 그러나 평균발아속도의 경우 유의미한 차이를 보이고 있어, 이 차이가 화분매개곤충에 의한 차이인지 종자 수확 시 후숙 또는 보관에 의한 차이인지는 추가적인 검토가 필요하다. 수정률이나 종자수확량의 경우, 환풍처리구가 무처리구보다 유의미하게 높으므로 환풍처리를 통한 화분매개효과가 인정된다.



**Fig. 9.** Comparison of fanning response between controls and ventilating treatment of the bumblebee colony boxes. The fanning response differed significantly between controls and ventilating treatment of bumblebee colony boxes (T-test:  $t_{(36)}=5.303, p=0.0001$ ).



**Fig. 10.** Relationship between the number of fanning bees and colony temperature. The regression equation for controls is  $y=0.3365x-9.8046$  and the  $R^2$  value is 0.564, and ventilation treatment is  $y=0.0673x-1.833$  and the  $R^2$  value is 0.326.

## 고찰

고온 시설 재배환경에서 서양뒤영벌의 효율성을 확인하기 위해, 채종용 시설양과 개화기에 서양뒤영벌 봉군의 온도와 활동특성, 환풍처리를 통한 서양뒤영벌의 봉군의 온도와 활동특성 변화 그리고 환풍처리를 통한 화분매개효과를 조사하였다.

서양뒤영벌 봉군내부의 온도변화를 조사한 결과, 양과 수정가능 시간대인 9시부터 16시까지 온실내부 온도변화는 30~31.3°C범위로 나타났고, 서양뒤영벌 봉군의 내부온도는 32.5~33.5°C까지 상승하여 하루 중 가장 높은 온도를 기록하였다. Vogt(1986a)는 서양

뒤영벌 봉군 내부온도는 대개 28~32°C가 유지되도록 일벌의 수와 유충의 양육을 조절한다고 보고하였다. 30°C 이상의 고온 온실 조건에서 뒤영벌 봉군내부 온도는 외기온도보다 높아지고, 서양뒤영벌이 유지할 수 있는 봉군내부 온도범위를 초과한 것으로 미루어 볼 때, 상기 조건에서는 봉군 내부의 효율적인 열관리가 되지 않는 것으로 판단된다. 고온 온실 환경에서 봉군내부온도가 33°C 이상부터 일벌의 화분매개활동이 감소하기 시작하였다. 활동 감소에 주된 원인은 봉군내부의 온도였다. 곡선회귀식을 통한 방화활동이 감소하는 특정 봉군온도 시점은 33°C로 확인되었고, 활동이 정지되는 온도는 최고 42.8°C, 최저 23.2°C로 나타났다. Couvillon *et al.*(2010)은 뒤영벌(*B. impatiens*) 봉군내부 온도가 33°C 이상부터 화분매개활동이 감소하는 것으로 보고하여 본 결과와 유사하였다. 이러한 방화활동의 감소는 봉군내부온도가 30°C 이상일 때 시작되는 일벌의 선풍행동 증가가 한 원인일 것으로 생각이 된다. 뒤영벌 일벌의 선풍행동의 매커니즘은 여러 연구자를 통하여 보고되었다(Heinrich, 1979; Seeley and Heinrich, 1981; Barrow and Pickard, 1985; Vogt, 1986a). 이러한 행동의 주된 요인은 봉군내부 고온으로 인한 온도 감소이지만(Vogt, 1986b; Couvillon *et al.* 2010), Weidenmüller *et al.* (2002)은 봉군내의 CO<sub>2</sub> 농도 증가 역시 선풍행동의 한 요인으로 보고하였다. 꿀벌의 경우 봉군내부의 꿀을 농축시키기 위하여 상대습도에 따라 선풍행동을 하는 것으로 보고되었다(Reinhardt, 1939; Winston, 1987). 서양뒤영벌 봉군에 환풍장치를 설치한 결과, 봉군의 내부온도는 평균 3°C 감소되었고, 서양뒤영벌의 선풍행동의 감소와 함께 화분매개활동도 증가시켰다. 또한 무처리에 비하여 봉군내부 벌들의 생존율도 높은 결과를 나타내었다. Himmer(1927)은 봉군 내부온도가 35°C일 때 서양뒤영벌 유충에 가장 치명적이라고 보고하였다. 그 외에도 서양뒤영벌 봉군 내부 고온이 되면 봉군 내부의 벌들의 대사 증가로 인하여 CO<sub>2</sub>의 농도가 증가하게 되면, 일벌은 외기 산소를 공급하기 위하여 선풍행동을 하는데(Heinrich, 1979; Weidenmüller *et al.*, 2002), 그럼에도 가스교환이 부족하여 높은 CO<sub>2</sub> 농도에 노출될 때는 산소 이용성을 증가시키기 위하여, 유충을 밖으로 물어버리는 행동을 한다(Kukuk *et*

al., 1997). 또한, 일부 뒤영벌(*B. bifarius*)중에는 내역봉 중 선풍행동 같은 온도조절을 하는 일벌의 수가 많아 지면 유충 사육하는 일벌의 수가 줄어들기도 한다(O'Donnell et al., 2000). 이번 결과에서 봉군의 환풍처리는 봉군내부의 온도와 CO<sub>2</sub>농도를 감소를 통해 봉군 내부환경을 개선하여 봉군의 수명을 비교적 길게 연장시킬 수 있음을 시사하였다. 또한 환풍처리는 화분매개 효과 면에서도 무처리에 비해 수정률과 종자수확량도 증가시켰다. 다만 앞선 결과에서 무처리구 대비 환기처리구의 방화활동수가 2배 많은 것에 비해 수정률이나 종자수확의 증가는 이에 미치지 못하였다. 이는 양과 수분 및 임신후의 고온으로 인하여 수분이 되더라도 수정에 이르지 못하거나, 임신 후 양과 화구에 장애를 미쳐 종자수확량이 떨어졌을 것으로 생각된다(Ku et al., 2008).

이러한 결과들을 종합하면, 봉군의 환풍장치 설치 여름철이나 고온온실 조건에서 서양뒤영벌을 통한 작물의 화분매개 효과를 높일 수 있는 좋은 방법으로 판단된다. 그러나 이번 연구에서는 봉군내부의 CO<sub>2</sub> 농도는 조사되지 않았으므로 차후 봉군내부 온도의 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도의 변화와 이러한 변화가 서양뒤영벌의 활동에 어떠한 영향을 끼치는지 추가적인 조사가 필요하다. 아울러 온실 내 CO<sub>2</sub> 발생장치를 통하여 작물의 수량이나 품질을 높이는 효과가 보고되었는데(Choi et al., 2017), 이에 화분매개용으로 쓰이는 꿀벌과 서양뒤영벌 봉군의 영향도 조사할 필요가 있을 것으로 생각된다.

## 적 요

여름철 작물수분에 뒤영벌(*B. terrestris*)의 활용도를 높이기 위하여, 양과가 재배되는 고온 온실환경에서 활동 특성과 봉군환기를 통한 화분매개 효용성을 조사하였다. 양과 개화기에 서양뒤영벌의 봉군온도는 온실온도보다 3°C 높은 결과를 나타냈다. 봉군내부 온도가 33°C부터 방화활동이 감소하기 시작하였고, 봉군내부온도와 방화활동은 부의 상관관계를 나타내었다. 봉군온도가 30°C부터 일벌의 선풍행동이 시

작되었고, 봉군내부온도와 선풍행동은 정의 상관을 나타내었다. 일벌의 선풍행동과 방화활동은 부의 상관을 나타내며, 일벌의 방화활동은 봉군내부온도와 선풍행동에 영향받는 것으로 생각된다. 그러므로 고온 온실환경에서 서양뒤영벌 봉군온도의 증가는 서양뒤영벌의 방화활동에 부정적인 영향을 끼치는 것으로 생각된다. 일벌의 선풍행동을 대체하기 위하여 서양뒤영벌 봉군에 PC 쿨러에 의한 환풍처리를 한 결과, 무처리에 비해 봉군내부온도 3°C, 선풍행동은 9배 감소하였고, 방화활동과 봉군내부의 일벌의 생존률은 각각 2배 씩 증가하였다. 화분매개효과에서 수정률은 12~15%, 종자량은 1.1~1.4배 증가하였다. 따라서 서양뒤영벌 봉군에 환풍장치를 설치하는 것은 봉군온도를 고온의 봉군내부 환경을 환기를 통하여 개선시킬 수 있고, 고온온실 조건에서 작물의 화분매개 효과를 높일 수 있는 좋은 방법으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 친환경 안전 농축산물 생산기술 연구개발사업(과제번호: PJ010829022017)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

## 인용 문헌

- Barrow, D. A. and R. S. Pickard. 1985. Larval temperature in brood clumps of *Bombus-Pascuorum* (Scop). *J. Apicult. Res.* 24: 69-75.
- Choi, I. L., J. S. Yoon, H. S. Yoon, K. Y. Choi, I. S. Kim and H. M. Kang. 2017. Effects of carbon dioxide fertilization on the quality and storability of strawberry 'Maehyang'. *Protected Hort. Plant Fac.* 26: 140-145.
- Corbet, S. A. 1987. More bees make better crops. *New Sci.* 115: 40-43.
- Couvillon, M. J., G. Fitzpatrick and A. Dornhaus. 2010. Ambient air temperature does not predict body size of foragers in bumble bees (*Bombus impatiens*). *Psyche*. 2010: ID 536430.
- Goulson, D. 2003. *Bumblebees: Behaviour and Ecology*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Gurel, F. and A. Gosterit. 2008. Effects of different stimulation methods on colony initiation and development of

- Bombus terrestris* L. (Hymenoptera: Apidae) queens. Appl. Entomol. Zool., 43: 113-117.
- Heinrich, B. 1979. Bumblebee economics. Harvard University Press; Cambridge, MA, USA.
- Heinrich, B. 1993. The hot-blooded insects: strategies and mechanisms of thermoregulation. Berlin, Germany: Springer.
- Himmer, A. 1927. Ein Beitrag zur Kenntnis des Wärmehaushalts im Nestbau sozialer Hautflügler. Z. Vergl. Physiol. 5: 375-389.
- IBM PASW<sup>®</sup> Statistics 22.0. 2013. PASW<sup>®</sup> Core System User's Guide, SPSS inc. USA.
- Jie, W., P., Wenjun A. Jiandong, G. Zhanbao, T. Yueming and L. Jilian. 2005. Techniques for year-round rearing of *Bombus terrestris* L. (Hymenoptera: Apoidea) in China. J. Apicult. Res. 49: 65-69.
- Ku, Y. G., W. Park, E. T. Lee, C. W. Kim, Y. S. Kim, Y. S. Jang and S. J. Ahn. 2008. Effect of high temperature and humidity on seed production and mother bulb harvesting of onion. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 26: 97-100.
- Kukuk, P. F., J. D. L. Kilgore and P. B. Frappell. 1997. Larval ejection behavior in *Bombus occidentalis* in response to CO<sub>2</sub>- or N<sub>2</sub>-induced narcosis. J. Kansas Entomol. Soc. 70: 359-361.
- 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, K. Y., E. T. Lee, I. S. Hwangbo, I. G. Park, M. A. Kim, Y. M. Kim, P. D. Kang and H. J. Yoon. 2013. Selection of insect pollinators for selfing cages for onion (*Allium cepa* L.) seed production. Korean J. Apicult. 28: 181-189.
- Lee, K. Y., D. H. Yim, H. J. Seo, S. Y. Kim and H. J. Yoon. 2016. Comparison of Pollination Activities Between Honeybee (*Apis mellifera* L.) and Bumblebee (*Bombus terrestris* L.) during the Flowering Period of Asian Pear (*Pyrus pyrifolia* N.) under Variable Weather Conditions. Korean J. Apicult. 31: 247-261.
- Martinez, F. D., F. J. S. Garcia, M. S. Hernandez and F. C. Ferre. 2014. Evaluation of a novel bumble bee pollination station under summer greenhouse conditions. J. Apicult. Res. 53: 408-412.
- Morandin, L. A., T. M. Lavery, P. G. Kevan, S. Khosla and L. Shipp. 2001. Bumble bee (Hymenoptera: Apidae) activity and loss in commercial tomato greenhouses. Can. Entomol. 133: 883-893.
- Nam, J. I., H. Y. Kwon, M. S. Kim and S. H. Kim. 2015. Flowering characteristics and honeybee visiting of jujube (*Ziziphus jujuba* Mill). Korean J. Apicult. 30: 343-348.
- O'Donnell, S., M. Reichardt and R. Foster. 2000. Individual and colony factors in bumble bee division of labor (*Bombus bifarius nearcticus* Handl; Hymenoptera, Apidae). Insectes Soc. 47: 164-70.
- Plowright, R. C and B. A. Pendrel. 1977. Larval growth in bumble bees (Hymenoptera-Apidae). Can. Entomol. 109: 967-973.
- Plowright, R. C. and T. M. Lavery. 1987. Bumblebees and crop pollination in Ontario. Proc. Entomol. Soc. Ont. 118: 155-160.
- Pomeroy, N. and R. C. Plowright. 1980. Maintenance of bumblebee colonies in observation hives (Hymenoptera: Apidae). Can. Entomol. 112: 321-326.
- Poulsen, M. H. 1973. The frequency and foraging behaviour of honeybees and bumble bees on field beans in Denmark. J. Apicult. Res. 12: 75-80.
- Rural Development Administration (RDA). 2002. Culture of onion seed production. 37-48pp. RDA Press, Muan, Korea.
- Rural Development Administration (RDA), 2017. Current status for diffusion of insect pollinator utilization. 13pp. RDA Press, Wanju, Korea.
- Reinhardt, J. F. 1939. Ventilating the bee colony to facilitate the honey ripening process. J. Econ. Entomol. 32: 654-660.
- Roman, A. and N. Szczesna. 2008. Assessment of the flying activity of the buff-tailed bumblebee (*Bombus terrestris* L.) on greenhouse grown tomatoes. J. Apic. Sci., 52: 93-100.
- Seeley, T. D. and B. Heinrich. 1981. Regulation of temperature in nests of social insects. In: Insect thermoregulation (Ed. by B. Heinrich), pp. 159-234. New York: J. Wiley.
- Shipp, J. L., G. H. Whitfield and A. P. Papadopoulos. 1994. Effectiveness of the bumble bee, *Bombus impatiens* Cresson (Hymenoptera, Apidae), as a pollinator of greenhouse sweet pepper. Sci. Hortic. 57: 29-39.
- Sutcliffe, G. H. and R. C. Plowright. 1990. The effects of pollen availability of development time in the bumble bee *Bombus terricola* K. (Hymenoptera: Apidae). Can. J. Zool. 68: 1120-1123.
- Vogt, F. D. 1986a. Thermoregulation in bumblebee colonies. I. Thermoregulatory versus brood-maintenance behaviours during acute changes in ambient temperatures. Physiol. Zool. 59: 55-59.
- Vogt, F. D. 1986b. Thermoregulation in bumblebee colonies. II. Demographic variation throughout the colony cycle. Physiol. Zool. 59: 60-68.
- Weidenmüller, A., C. Kleineidam and J. Tautz. 2002. Collective control of nest climate parameters in bumblebee colonies. Anim. Behav. 63: 1065-71.
- Whittington, R. and M. L. Winston. 2004. Comparison and examination of *Bombus occidentalis* and *Bombus impatiens* (Hymenoptera: Apidae) in tomato greenhouses. J. Econ. Entomol. 97: 1384-1389.
- Willmer P. G., A. A. M. Bataw and J. P. Hughes. 1994. The superiority of bumblebees to honeybees as pollinators: insect visits to raspberry flowers. Ecol. Entomol. 19: 271-284.



- Winston, M. L. 1987. The Biology of the Honey Bee. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- Wysock-Owczarek, M. 2006. Ocena efektywności trzmieli. Owoce Warzywa Kwiaty. 9: 8-10.
- Yoon, H. J., S. E. Kim, K. Y. Lee, S. B. Lee, I. G. Park. 2008. The effect of temperature treatment on the production of worker or queen Bumblebees. Korean J. Apicult. 23: 283-287.
- Zhu, S. Y., X. L. Zhang, T. K. Luo, Q. Liu, Z. Tang and H. Y. Chen. 2010. Effects of GA<sub>3</sub> on seed vigor and several physiological and biochemical characteristics of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis* L.) aged seeds. Plant Physiol. Commun. 46: 143-146.