

전국 야생 벌목 분포에 대한 기후요인 영향 연구^{1a}

유동수^{2†} · 권오창^{3†} · 신만석⁴ · 김정규^{5*} · 이상훈^{6*}

Effects of Climatic Factors on the Nationwide Distribution of Wild Aculeata (Insecta: Hymenoptera)^{1a}

Dong-Su Yu^{2†}, Oh-Chang Kwon^{3†}, Man-Seok Shin⁴, Jung-Kyu Kim^{5*}, Sang-Hun Lee^{6*}

요약

온실가스 배출 증가에 의한 기후변화는 화분매개곤충과 식물과의 생태적 상호작용인 수분생태계와 농업생태계를 포함한 자연생태계를 변화시킬 수 있다. 특히 수분생태계에서 중요한 야생벌(wild bee)은 기후변화에 의해 감소되고 있어서 결국 농업경제, 현화식물의 생태활동, 나아가 전체 생물종 다양성에 악 영향을 끼치고 있음이 보고되고 있다. 따라서 지구온난화에 의해 한반도(남한)에서도 매년 기온이 상승하고 있고, 그에 따른 기후변화 발생으로 한반도 내 야생벌의 생태활동에 영향을 주고 있음을 예상할 수 있다. 본 연구에서는 한반도(남한)에서 출현하는 야생벌(꿀벌상과, 말벌상과, 청벌상과)의 분포와 기후요인과의 관계를 검정하기 위하여, 2017년(37 조사지점)에서 2018년 (14 조사지점) 까지 총 51개 조사지점을 대상으로 말레이즈 트랩을 이용하여 야생벌류의 출현현황을 파악하였다. 형태 및 문헌을 통해 동정한 야생벌류와 산림기후대에 따른 분포는 평균기온, 적산온도와 상관성이 있음을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 공통사회 경제경로(Shared Socioeconomic Pathways, SSP) 시나리오의 2-4.5와 5-8.5버전으로 BIOMOD 종분포 모형에 따라 남한 전역에서 출현한 야생벌과 기후대별로 특이적으로 출현한 종의 서식지 분포 변화를 예측하여 현재의 종 서식지 분포에서, 2050년과 2100년에 북쪽으로 서식지가 이동함을 확인하였다. 이를 통해 향후 지구온난화가 지속될 경우 국내 야생벌의 분포 변화가 일어 날 수 있고, 그로 인한 한반도의 생태계 변화가 야기될 수 있음을 예측할 수 있었다. 본 연구결과는 기후변화에 따른 수분생태계 및 그와 관련된 영향에 대한 연구와 야생벌 관리를 위한 정책수립을 위해 참조할 수 있는 연구자료가 될 수 있을 것으로 기대하고 있다.

주요어: 기후변화, 수분생태계, 야생벌, 종 분포

ABSTRACT

Climate change caused by increased greenhouse gas emissions can alter the natural ecosystem, including the pollination ecosystem and agricultural ecology, which are ecological interactions between potted insects and

1 접수 2022년 1월 5일, 수정 (1차: 2022년 3월 10일, 2차: 2022년 4월 25일), 게재확정 2022년 5월 11일

Received 5 January 2022; Revised (1st: 10 March 2022, 2nd: 25 April 2022); Accepted 11 May 2022

2 국립농업과학원 농업유전자원센터 농업연구사 National Agrobiodiversity Center, NAS, RDA, Jeonju, 54874, Korea (dtsy216@korea.kr)

3 국립생태원 기후탄소연구팀 연구원 Climate Change and Carbon Research Team, National Institute of Ecology Seochun 33657, Korea (hymkoc@nie.re.kr)

4 국립생태원 생태정보팀 전임연구원 Ecological Information Team, National Institute of Ecology Seochun 33657, Korea (manhae@nie.re.kr)

5 동남보건대학교 바이오환경보건과 교수 Dept. of Bio Environment Health, Dongnam Health University, Suwon 16328, Korea (hymjkk@dongnam.ac.kr)

6 국립생태원 생태정보팀 책임연구원 Ecological Information Team, National Institute of Ecology Seochun 33657, Korea (sanghunlee@nie.re.kr)

a 이 논문은 국립생태원 “NIE-B-2022-01”의 지원에 의해 수행되었습니다.

† Co-first author

* 교신저자 Corresponding author: sanghunlee@nie.re.kr, hymjkk@dongnam.ac.kr

plants. Many studies have reported that populations of wild bees, including bees and wasps (BW), which are the key pollinators, have gradually declined due to climate change, leading to adverse impacts on overall biodiversity, ultimately with agribusinesses and the life cycle of flowering plants. Therefore, we could infer that the rising temperature in Korean Peninsula (South Korea) due to global warming has led to climate change and influenced the wild bee's ecosystem. In this study, we surveyed the distributional pattern of BW (Superfamily: Apoidea, Vespoidea, and Chrysoidea) at 51 sites from 2017 (37 sites) to 2018 (14 sites) to examine the effects of climatic factors on the nationwide distribution of BW in South Korea. Previous literature has confirmed that their distribution according to forest climate zones is significantly correlated with mean and accumulative temperatures. Based on the result, we predicted the effects of future climate changes on the BW distribution that appeared throughout South Korea and the species that appeared in specific climate zones using Shared Socioeconomic Pathways (SSPs). The distributions of wild BW predicted by the SSP scenarios 2-4.5 and 5-8.5 according to the BIOMOD species distribution model revealed that common and endemic species will shift northward from the current habitat distribution by 2050 and 2100, respectively. Our study implies that climate change and its detrimental effect on the ecosystem is ongoing as the BW distribution in South Korea can change, causing the change in the ecosystem in the Korean Peninsula. Therefore, immediate efforts to mitigate greenhouse gas emissions are warranted. We hope the findings of this study can inspire further research on the effects of climate change on pollination services and serve as the reference for making agricultural policy and BW conservation strategy

KEY WORDS: CLIMATE CHANGE, POLLINATION ECOLOGY, WILD BEES, WASPS, SPECIES DISTRIBUTION

서론

온실가스로 인한 지구온난화로 인하여 생태계의 물리적, 생물적 구성요소에 대한 지구적 변화가 발생하고 있음은 주지의 사실이다. 많은 생물학적 요소들 가운데, 특히 화분매개를 담당하는 토착 기능군(곤충이 화분매개의 주요 기능군이며, 이하에서는 이를 화분매개곤충(Pollinator)으로 통칭한다)의 감소, 절멸 위험 및 외래종의 유입을 통한 종 다양성의 변화가 발생하는 사례가 보고되고 있다. 이러한 현상은 농업 효율성 및 생산량의 악화와 국가 경제의 직접적 피해와 심각한 사회경제적 비용의 증가를 포함하는 복잡한 문제들을 발생시킬 수 있을 것으로 우려하고 있다. 이미 지구온난화에 따른 화분매개곤충의 감소는 국가적 범위부터 지역에 이르기까지 문제가 되고 있는데, 일례로 영국과 네덜란드에서는 지구온난화로 인하여 1980년 이후 화분매개곤충 종 풍부도(species richness)가 급격히 감소하고 있음이 보고된 바 있으며, 이러한 현상이 현재진행형임은 의심의 여지가 없다. 미국 또한 2017년 주요 화분매개곤충류인 뒤영벌류(Hymenoptera, Apidae, *Bombus*)의 개체수 급감에 따른 대응으로 멸종위기종으로 지정함으로써 야생벌의 보전과 보호를 추진하고 있다(Hughes, 2018; Potts, et al., 2010; Service, 2015; Shell and Rehan, 2019).

화분매개곤충은 생태계 유지뿐만 아니라 농업활동 및 수익 창출에 있어서 중요한 역할을 담당한다. 생물다양성과 과학기구(IPBES, Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services)에서 2016년 발간한 화분매개 동향에 관한 전지구적 평가보고서는 주요 작물의 85%가 동물의 수분활동에 의존하고 있으며, 화분매개곤충의 감소는 결국 농작물 생산량 감소에 따라 인간의 식량 자원 확보에 큰 타격을 줄 것으로 예상하였다(Potts, et al., 2016). 즉 농업 생산성에 있어서 화분매개곤충의 감소는 생태계의 생산자에 해당하는 현화식물의 수분(Pollination)을 통한 번식과 결실(종자생산)의 감소로 이어져 식물 종 다양성 및 개체수 감소를 유발하고 연쇄적으로 먹이망과 먹이사슬의 불일치를 야기시킴으로써 생물종들의 생태변화를 초래할 것이다. 따라서 기후변화에 따른 화분매개곤충의 생태적 영향 연구는 농업경제와 더불어 생태계의 유지, 보존 및 적응을 위한 것이므로 국가적 관심과 지원이 요구된다. 다양한 화분매개곤충 가운데 꿀벌(*Apis mellifera*)을 포함하는 꽃벌류(Hymenoptera, Apoidea, Apiriformes)는 식물의 화분매개에 있어 대표적인 곤충으로 알려져 있으며, 특히 농업 분야에서 크게 활용되고 있다. Choi & Jung (2015)에 따르면, 과수원과 야생 초지대의 43개 과실수 및 현화식물을 방문하는 곤충의 목록 조사에서, 벌목(Order Hymenoptera)

이외에도 파리목(Order Diptera), 딱정벌레목(Order Coleoptera), 나비목(Order Lepidoptera), 노린재목(Order Heteroptera) 등이 화분매개에 관여하지만, 특히 벌목이 가장 많이 방문하는 것을 확인하였다(Choi and Jung, 2015). 또한 경상북도 8개 지역과 강원도 평창군 1개 지역에서 개화 중인 재배 작물 주변 개화식물과 상호작용이 가장 많은 곤충을 조사했을 때, 벌목의 비율이 다른 곤충 목보다 높게 나타났으며(Son et al., 2019), 벌에 의한 자연수분은 인공수분에 비해 작물의 품질이 높고 노동 소비량이 감소되어 농업경영자의 경제적 수입이 증대되므로 만족도가 더 높은 것으로 확인된 바가 있다.(Yoon et al., 2017). 경제적 영향에 있어서도 과수, 과채, 곡물 등 23개 품목을 대상으로 확인된 벌의 수분 활동에 대한 가치는 총 5조 8,621억원 규모로, 농업경제에 있어 벌의 역할이 매우 중요한 요소임을 시사하고 있다(Han, 2014). 이러한 화분매개곤충의 역할이 중요함에도 불구하고, 국내외 자연생태계에서는 야생벌의 감소와 멸종위 기종의 출현이 나타나고 있다(Potts, et al., 2016). 2017년 환경부에 의하여 국내에서 벌목 중 최초로 참호박뒤영벌(*Bombus koreanus*)이 멸종위기야생생물 2급의 법정보호종으로 지정된 것은 앞서 언급한 토착 야생벌의 감소 현상이 나타나고 있음을 시사하고 있다. 그러므로 기후변화에 따른 생태계의 기반을 이루는 생산자와 화분매개벌류 동태의 상 관에 관한 연구는 국가 기후변화대응에 관한 중·장기적 연구 및 자연자원 보전 정책수립 기초자료의 한 부분으로 고려되어야 한다. 또한 이를 뒷받침하기 위해서는 농업 경제적 가치가 있는 종(주로 꿀벌류)에 대한 연구뿐만 아니라 미래의 기후환경변화에 반응할 국내의 야생벌 전반에 관한 연구를 통해 기후영향에 따른 미래의 벌 분포 변화 예측이 요구된다.

본 연구는 기후요인에 따른 전국 야생벌의 분포영향을 분석하고자 2017년부터 2018년까지 전국 51개 조사지점에서 채집한 야생벌 가운데 동정된 꿀벌상과(Hymenoptera: Apoidea), 청벌상과(Hymenoptera: Chrysoidea), 말벌상과(Hymenoptera: Vespoidea)를 이용하여 산림기후대에 따른 야생벌의 분포 현황과 기온(평균기온, 적산온도)에 따른 야생벌의 분포영향에 대한 통계적인 유의성을 검정하였다. 특히 적산온도와 출현시기 사이의 상관관계는 기후변화의 대표적 생물대응 현상인 출현시기의 변동(chronological shift)에 대한 실측적 예측을 가능케 하는 점에서 그 의미가 크다고 할 수 있다. 또한 조사된 야생벌 출현을 기준으로 장기적인 지구온난화에 대한 한반도 남한에서의 야생벌 분포변화에 대한 예측을 분석하였다. 최근 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP) 개념과 함께 미래 사회경제변화를 기준으로 기후변화에 대한 미래의 완화와 적응도를 근거로 구성된 공통사회 경제경로(Shared

Socioeconomic Pathway, SSP) 시나리오 가운데 SSP2-4.5와 SSP5-8.5를 기준으로 중 분포모형(BIOMOD)으로 야생벌 분포의 변화를 추정함으로써, 향후 지구온난화에 따른 야생벌의 생태적 변화 감시와 관리를 위한 기초자료를 마련하고자 하였다. 기후변화에 대한 다양한 생물군의 생태적 변화를 추적하고 예측한 연구는 꾸준히 지속되고 있으며, 야생벌과 기후변화와의 관계는 자연생태계의 건전한 유지와 작물 생산에의 활용이라는 측면에서 중요한 연구과제이다. 본 연구는 전국단위로 획득, 동정된 야생벌과 기후적 영향과의 관계를 검증하고 미래 지구온난화의 장기화 가능성에 의한 야생벌의 분포변화를 예측하였다. 마지막으로 본 연구의 한계점과 야생벌과 기후변화의 관계를 예측을 통해, 현재 진행 중인 수분생태계의 변화에 대한 대응방안 마련을 위한 토론을 제공하였다.

연구방법

1. 연구대상지

1) 전국 야생벌 출현 조사지점, 시기, 방법, 동정, 자료 정리 및 소장

조사지점은 변온동물과 일조량 관계를 고려하여(Kang and Lee, 2018; Kim and Choi, 2014), 산림 인근의 개활지 중 낮 시간 동안 일조량이 높을 것으로 예상되는 51개 조사지점(Appendix 1)을 선택하여 말레이즈 트랩을 이용한 조사를 실시하였다. 2017년 4월에서 10월까지(약 7개월)는 37개 조사지점, 2018년 3월부터 10월(약 8개월)까지는 14개 지점을 조사하여 총 51개 지점에서 실시하였다. 각 조사지점에 W165 × D180 × H180(110)cm 규격의 흰색과 검은색으로 구성된 메쉬(mesh) 재질의 말레이즈 트랩(ez-Malaise trap)을 설치하여 비행성 곤충을 2주에서 한달 간격으로 수거하였으며, 분석에는 조사지점마다 수거일의 차이를 고려하여 10일 간격으로 3등분하여 각각 1일(1일~10일), 11일(11일~20일), 21일(21일~31일)로 지정하였다(Yu, et al., 2019). 채집된 곤충은 육안으로 형태적 특징으로 분류한 1차 동정과 전문가에 의해 출간된 문헌자료와 현미경을 통한 생식기 관찰을 통한 2차 동정을 수행하였다(Choi et. al., 2013). 2년간 채집된 곤충의 분류군은 벌목(Hymenoptera) 18.34%, 파리목(Diptera) 34.78%, 딱정벌레목(Coleoptera) 10.21%, 노린재목(Hemiptera) 3.60%, 기타 33.59%로 확인하였고, 이 중에서 침벌류(Aculeata)에 속하는 꿀벌상과, 청벌상과, 말벌상과에 대하여 총 168종, 2,250개체를 확보하였다. 본 연구에 사용된 표본들은 국립생태원(서천) 표본실에 보관하였다.

2) 기온자료(평균 및 적산) 도출

51개 조사지점의 기온(일평균, 일최저, 일최고)을 도출하기 위하여 전국 571개 기상청 방재기상관측지점에서 측정된 2017년과 2018년의 기온자료를 역거리 가중치법(Inverse distance weighted method, IDW, 식1)을 적용한 1km 해상도의 남한 전역 기온 보간(Interpolation) 방법을 통하여 해당 조사지점의 기온자료를 도출하였다. 또한 바람, 센서의 오작동, 주변 환경의 영향으로 불확실한 기온자료가 기록되었을 가능성을 고려하여 RGI 프로그램의 Self-Starting Weibull (SSWeibull, 식2) 비선형 회귀 모델을 이용하여 보완하였다(Weibull, 1951; Yu et al., 2020).

$$IDW(x) = \frac{1}{d(x, x_i)^p}, \text{ distance of coordinate } (x, x_i) \text{ and power } p \tag{1}$$

$$SSWeibull = Asym - Drop \times \exp(-\exp(lrc) \times x^{power}) \tag{2}$$

RGI 프로그램에 의해 도출된 기온으로부터 한반도 남한의 산림 기후대를 구분하기 위하여 시간대별 기온(t_i)으로 평균기온(T_{avg} , 식3)을 도출하고, 야생벌의 출현과 이의 출현 지속과 관련된 적산온도 (Growing degree days, GDD, 식4)를 산출하였다. 적산온도는 생장도일 혹은 생육도일로 달리 표현되기도 하며 식물이나 동물 생장의 시작과 활동기간에서의 온도 범위 등을 예측하고 분석하는데 이용된다(Grigorieva et al., 2010; Zhou and Wang, 2018). 적산온도는 1년 단위로 계산되며 일 최고 기온(t_{max})과 일 최저 기온(t_{min})간의 중간값이 생물이 생육하는데 필요한 최저온도인 기준온도(t_b) 이상일 경우 그 차이를 누적함으로써 계산한다. 계산된 평균기온과 적산온도는 기상청 방재기상관측장비의 기상센서에 대한 오류로 인한 불확실성을 내포하고 있어서, 이들 값을 보정하고자 각각 2차함수모형($y = ax^2 + bx + c$)과 SSWeibull (식2)로 보정하였다(Yu, et al., 2020).

$$T_{avg} = \sum \frac{t_i}{n} \tag{3}$$

$$GDD = \sum \left(\frac{t_{max} + t_{min}}{2} - t_b \right) \tag{4}$$

3) 한반도(남한) 산림기후대별 야생벌 분포

한반도(남한)의 기후대는 사계절이 비교적 명확한 온대성 기후의 특징을 나타내지만, 남북으로 길게 늘어진 형태

이기 때문에 지리적 영향에 의한 기상 조건의 차이가 있다. 본 연구에서는 월 평균기온(T_{avg})와 기준 온도(t_b)와의 차이에 대한 년 단위 누적 값인 온량지수(Warmth Index, WI)를 이용한 산림기후대를 대상으로 야생벌의 분포를 분석하고자 표 1과 같이 한반도를 5가지 산림기후대 -아한대림(Subarctic forest zone, SZ), 냉온대북부림(Cool temperate forest northern zone, CNZ), 냉온대중부림(Cool temperate forest central zone, CCZ), 냉온대남부림(Cool temperate forest southern zone, CSZ), 난온대림(Warm temperate forest zone, WZ)- 으로 분류한 기후대를 적용하였다(Kong et al., 2013). 각 기후대는 67개 기상청 관측소를 대상으로 1981년부터 2010년까지 총 30년간의 평균기온으로 분류하였는데, 이들 중 아한대림(SZ)은 온량지수가 낮은 북한지역에 나타나는 기후대이며 본 연구의 조사지가 포함되지 않으므로 분석에서 제외하였다(Table 1 and Appendix 1).

Table 1. Forest climate zones and number of included reserch sites

Climate zone	Warmth Index	numbers of Site included
Subarctic forest zone (SZ)	~55	0
Cool temperate forest, northern zone (CNZ)	55~85	6
Cool temperate forest, central zone (CCZ)	85~100	13
Cool temperate forest, southern zone (CSZ)	100~108	13
Warm temperate forest zone (WZ)	108~	19

온량지수(WI, 식 5)는 IDW에 의해 보간된 일단위 평균 기온(t_m)을 바탕으로 계산하였고, 기준 온도는 식물의 생장에 필요한 최저기온으로 알려진 5℃를 적용하여 조사지점의 기후대를 반영하였다.

$$WI = \sum (t_m - t_b), t_m > t_b \tag{5}$$

4) 미래기후 변화에 따른 야생벌 분포 변화

미래 지구온난화에 따른 한반도 야생벌의 분포변화를 예측하기 위하여 본 연구에서는 최근 WorldClim (worldclim.org)에서 제공된 공통사회 경제경로(Shared Socioeconomic Pathways, SSP) 시나리오를 이용하여 현재의 조사지점

(2017~2018년)과 미래(2100년) 기후변화에 따른 야생별 잠재서식지를 예측하였다. SSP 시나리오는 4개의 표준경로, 즉 SSP1-2.6 (재생에너지 기술발달과 석탄연료 사용 최소화)와 같이 친환경적 경제성장을 이루는 경우), SSP2-4.5 (기후변화 완화 및 사회경제 발전 정도가 중간 단계를 가정하는 경우), SSP3-7.0 (기후변화 완화 정책에 소극적으로 대응하는 경우), SSP5-8.5 (산업기술의 빠른 발전에 중점을 두어 화석연료의 사용이 높은 경우)로 구성되어 있다 (O'Neill et al., 2014). 본 연구에서는 최근 정부에서 탄소 넷 제로(Net-zero) 정책, 화석연료 사용 자제, 배기가스 배출 규제 등, 기후변화관련 정책을 추진하고 있는 상황을 고려한 SSP2-4.5과 함께 비교군으로 온실가스 저감을 하지 않는 극한 상황의 기후를 고려한 SSP5-8.5를 사용하였다. 사용된 시나리오에 대한 전지구 기후변화 모델(Global Circulation Model; Global Climate Model, GCM)의 불확실성을 최소화하기 위하여 WorldClim에서 제공하는 7개 GCM (Table 2)의 각 월평균 최저기온, 월평균 최대기온, 월 강수량의 평균값을 계산하였다. 그 이후 평균값을 활용하여 19개 생물 기후적 변수(Bioclimatic Variables, Bioclim)를 생성한 후(Hijmans et al., 2017), Pearson's correlation 분석으로 19개 Bioclim 변수 중에서 상관성이 높은($r > 0.7$) 변수들을 제외하였다(Koo et al., 2015). 사용된 변수로는 연평균 기온(BIO1), 월평균 일교차(BIO2), 등온성(BIO3), 연간 강수량(BIO12), 가장 습한 달의 강수량(BIO13), 가장 건조한 달의 강수량(BIO14)으로 분석하였다(Shin et al., 2018). 비록 사용된 변수는 식물의 서식지와 관련된 것이지만, 본 연구의 조사대상이 수분생태계의 화분매개와 관련한 야생별이기 때문에 식물의 서식지에 따라 야생별의 출현이 서로 양의 상관관계가 있음을 가정하여(Hoehn et al., 2010), 식물의 서식지 분포모델을 바탕으로 야생별의 잠재서식지를 예측하고자 BIOMOD 중분포모형을 이용하였다(Thuiller et al., 2016). BIOMOD는 8개의 알고리즘(Artificial Neural Networks(ANN), Classification Tree Analysis (CTA), Flexible Discriminant Analysis(FDA), Generalized Additive Models

(GAM), Generalized Boosted Models(GBM), Generalized Linear Models (GLM), Random Forest(RF), Surface Range Envelope(SRE), Maximum Entropy Model (Maxent))을 사용하여 구축되며, 그 모델 중 True Skill Statistics (TSS)가 0.7이상인 모델을 서식지 적합성 예측에 적용하였다(Shin et al., 2018).

결과 및 고찰

1. 산림기후대별 야생별 출현 현황

2017년부터 2018년까지 총 51개 고정조사지에서 채집한 야생별 중에서 꿀벌상과, 청벌상과, 말벌상과를 포함한 총 168종, 2,250개체를 동정하였다. 조사지점 중 종다양성이 가장 높은 조사구는 강원도 영월군 중동면 지점(18번)이며 49종(196개체)이 출현하였고, 강원도 화천군 하남면(48번)에서 가장 많은 265개체(34종)가 채집되었다(Figure 1A). 종 수가 높을수록 개체수도 높게 측정되었으며, 종 수와 개체 수는 서로 유의적인 상관관계가 있음(Pearson's correlation, $P < 0.05$)이 확인되었다.

4개 기후대별로 종 수와 개체수의 차이가 있는지를 확인하기 위하여 조사지점당 평균 종 수와 개체수를 분석했을 때, 제주도 한라산 오름부근에 해당하는 냉온대북부림이 가장 낮게 나타났고, 냉온대중부림(강원도 일부), 냉온대남부림(경기도, 충청도, 전라북도 및 경상북도 일부), 난온대림(전라남도, 경상남도, 제주도 일부) 순으로 높게 측정되었다(Figure 1B). 비록 조사지점에 대한 지리적 위치, 밀원식물의 분포, 인간간섭, 기후적 요인 등과 같은 다양한 환경적 요인에 의하여 종 수와 개체수가 달라질 수 있지만, 국내의 경우 온량지수가 85~108 수준에서 종 다양성이 높을 것으로 추정되며, 향후 장기적이고 반복된 조사를 통한 정밀한 연구결과로의 보완이 요구된다.

Table 2. Global Climate Model (GCM) used in this study

No.	GCM	Institution
1	BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center
2	CNRM-CM6-1	Centre National de Recherches Météorologiques
3	CNRM-ESM2-1	
4	CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
5	IPSL-CM6A-LR	Institute Pierre-Simon Laplace
6	MIROC-ES2L	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, National Institute for Environmental Studies and Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo
7	MIROC6	

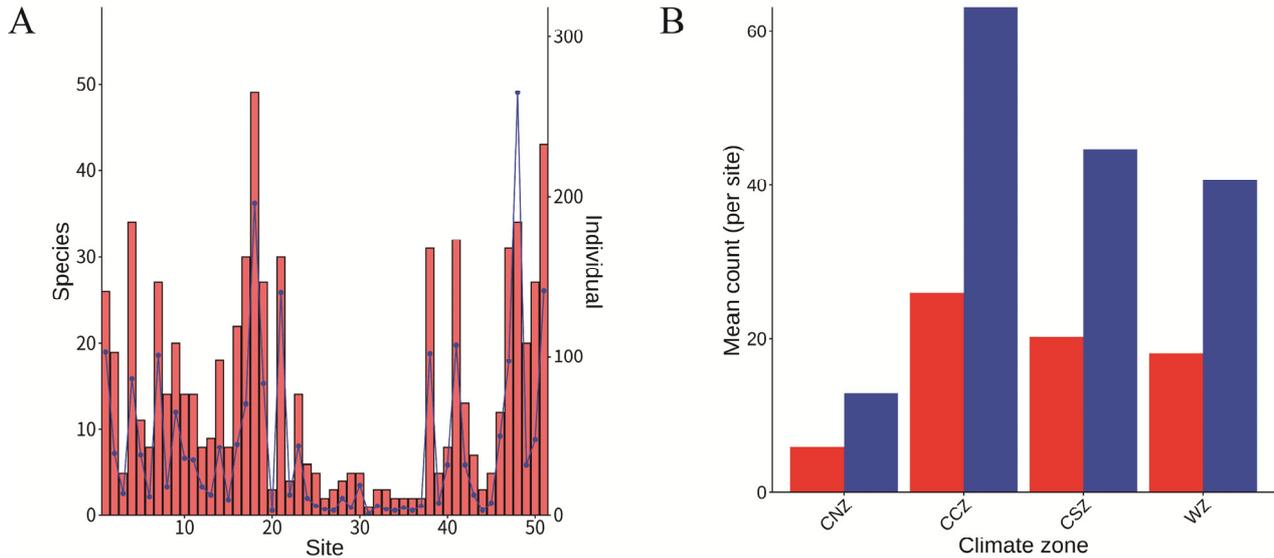


Figure 1. A. Counted species numbers of wild BW (bees and wasps, blue), and individual number (red) during 2017-2018. B. Numbers (mean) of species (red) and individual (blue) at forest zone of South Korea.

2. 산림기후대별 종 다양성 및 분포

생물다양성 지수는 모든 기후대에서 비교적 높으며, 특히 종다양도지수(Shannon-Wiener index)와 종풍부도지수(Species richness index)에서 냉온대중부림과 난온대림이 높게 측정되었고, 냉온대북부가 가장 낮았는데, 앞서 Figure 1B를 통해 추정된 분석과 일치하였다(Table 3). 종균등도지수(Species evenness index)는 모든 기후대에서 90% 이상이었는데, 이는 비록 각 기후대별로 다양성의 차이는 존재하지만 특정 종이 높은 개체수로 우점하는 현상은 없을 것이라 추정할 수 있다. 비록 본 연구에 있어서 비록 모든 벌목에 대한 모집단을 조사하지 않은 점, 각 기후대에 대하여 조사 지점의 수가 다른 점, 말레이즈 트랩의 특성상 저공비행의 곤충이 채집될 가능성이 높은 점, 짧은 조사기간(2년), 조사 지점 주변의 환경적 영향으로 종 다양성을 일반화하기는 어려우나, 냉온대중부림 및 남부림, 난온대림이 다양한 야생벌의 출현과 함께 생태활동이 활발할 것으로 예상된다.

Table 3. Biodiversity index of wild BW on climate zone

Climate zone	Shannon-Wiener	Species Richness	Species Evenness
CNZ	2.917	5.7648	0.9737
CCZ	4.5191	21.8669	0.9596
CSZ	4.4921	20.0957	0.9842
WZ	4.5331	21.2974	0.976
Average	4.115325	17.2562	0.973375

지형적, 지리적 요인과 기온은 서로 상관관계가 있으며 특히 위도와 기온과의 관계-위도의 증가에 따른 기온의 감소는 기후대에 속하는 생태계의 특성들을 이해하는데 도움이 된다(Yu, et al., 2019). 온량지수를 바탕으로 구분한 한반도 기후대에 출현한 야생벌 중에서 모든 기후대에 나타난 종은 흰털꼬마꽃벌(*Lasioglossum kiautschouense*), 흰발목줄애꽃벌(*Lasioglossum proximatum*), 금테줄배벌(*Megacampsomeris prismatica*), 연날개개미벌(*Myrmosa mongolica*), 슈카아드 진딧물벌(*Pemphredon inornata*), 홍조배벌(*Scolia fasciata*), 어리줄배벌(*Scolia nobilis*), 붉은어리나나니(*Trypoxylon rufimaculatum*)로 총 8종이 확인되었다(Figure 2). 이 외에 냉온대북부·중부림과 난온대림에 출현한 왕가위벌(*Megachile sculpturalis*), 냉온대북부·남부림에 출현한 먹어리나나니벌(*Trypoxylon pacificum*), 그리고 냉온대북부·중부림과 난온대림에 출현한 호박벌(*Bombus ignitus*)도 출현 확인이 안된 기후대가 있지만, 냉온대북부림과 난온대림에서 확인된 것으로 보아 이들 중 역시 전국적으로 분포하고 있을 것으로 추정된다. 또한 농가에서 과수의 수분, 양봉으로써 많이 이용되고 있는 양봉꿀벌(*Apis mellifera*)은 냉온대중부림, 냉온대남부림, 난온대림에서 확인되었는데, 이는 아마도 양봉업이 진행되는 지역과 관련이 있을 것으로 판단된다. 양봉꿀벌의 근연인 국내 재래종 재래꿀벌(*Apis cerana*) 역시 양봉꿀벌과 동일한 기후대에서 확인되었는데, 본 연구자료를 통해 밀원식물에 대한 양봉꿀벌과 재래꿀벌간의 경쟁과 재래꿀벌의 생태적 활동을 연구하는데 필요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 기후대에 특이적으로 출현한 야생벌들은

특히 냉온대중부에서 다수 확인되었다(Appendix 2). 본 연구에서 조사된 출현종은 국가 생물다양성 정보공유체계 (Sung et al., 2018)에 기록된 야생벌의 분포와는 차이가 있었다. 예를 들어 삼포로뒤영벌(*Bombus hypocrita sapporoensis*), 야노뿔족벌(*Coelioxys yanonis*), 꼬마알락가위벌(*Anthidium sibiricum*), 무늬호리병벌(*Eumenes labiatus flavoniger*), 검은날개황습감탕벌(*Anterhynchium melanopterum*), 어리극동가위벌(*Megachile remotissima*) 등, 다수의 종들이 전국에서 출현하는 것으로 보고되어 있다. 이러한 차이는 생물다양성 정보공유체계의 축적된 정보와 기록의 정확성을 가정했을 때, 짧은 조사기간(2년)과 말레이즈 트랩에 의한 저공비행 곤충류의 우연한 채집의 결과이거나, 혹은 조사지 주변의 환경 변화(농업활동, 도시화에 의한 인간간섭, 토양, 기후 등과 같은 서식지 환경 변화 등) 및 기온의 상승으로 인한 종 서식지 이동(shift) 등 다양한 요인의 반영으로 판단된다.

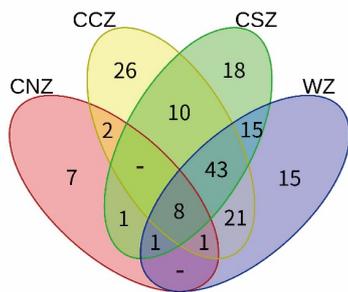


Figure 2. Relationships of species numbers classified by forest climate zones in South Korea.

야생벌의 분포와 기후대와의 관계를 검증하기 위하여 분산분석을 수행하였다. 분산분석은 정규성과 등분산성을 모

두 만족해야 하지만, 본 조사자료는 정규성과 등분산성을 만족하지 못하므로($P < 0.05$), 비모수 검정방법인 Kruskal-Wallis Rank Sum test (Shapiro's test, $P < 0.05$), Welch test, and Brown-Forsythe test (Levene's test, $P < 0.05$)를 이용하여 다각적으로 검정하였다. 상과(Super family) 수준에서는 99% 이상의 신뢰수준에서 기후대에 따라 차이가 있는 것으로 나타났으며($P < 0.01$), 종 수는 95%의 신뢰수준($P < 0.05$), 개체수는 90%의 신뢰수준에서 10% 이내($P < 0.1$)로 확인되었다(Table 4).

기후대와 야생벌(상과, 종 수준)의 분포 차이와의 유의적 관계는 야생벌이 서식할 수 있는 환경조건과 관련이 있으며, 특히 기온에 따라 야생벌의 분포가 유의적 관계에 있음을 추정할 수 있다. 그래서 기온과 야생벌 분포와의 관계를 명확히 검증하기 위한 회귀모형 분석의 분석 또한 평균기온에 대해서 종 수 및 개체수가 선형으로 유의적 관계가 있고 ($P < 0.05$), 적산온도에 대해서는 비선형 회귀모형에 따른 유의적 관계가 나타났다(Figure 3).

3. 미래기후영향에 따른 야생벌 분포 추정

국내 야생벌을 대상으로 미래기후변화에 대한 서식지, 종 분포 이동(shift)에 대한 연구는 매우 미흡하지만, 국소 지역을 통한 증장기적인 벌목에 대한 연구와, 그리고 해외 다수의 연구에서는 미래 지구 온난화에 의하여 화분매개곤충의 서식지가 이동할 것이며, 이는 식물과 화분매개곤충의 수분 시기(plant-pollinator synchrony) 변화와 이로 인한 먹이사슬 불일치, 생태계 변화가 나타날 것으로 우려하고 있다 (Willmer et al., 2012, Morton et al., 2017). 이미 다른 화분매개곤충인 나비와 곤충류인 푸른아시아실잠자리(*Ischnura senegalensis*)의 연구에도 미래기후 시나리오에 따른 종 분포가 북상하고 있음을 보여주어(Adhikari et al., 2020, Shin

Table 4. Nonparametric analysis of wild BW's distribution on climate zone

Type	Method	Formula	Statistic	Degree of freedom	P (p-value)
Super family	Kruskal-Wallis	Count ~ Climate_zone	35.94537594	3	***
	Welch	Count ~ Climate_zone	18.09583812	3	***
	Brown-Forsythe	Count ~ Climate_zone	18.59855917	3	***
Species	Kruskal-Wallis	Count ~ Climate_zone	8.184660313	3	**
	Welch	Count ~ Climate_zone	7.928221717	3	***
	Brown-Forsythe	Count ~ Climate_zone	4.331072928	3	***
Individuals	Kruskal-Wallis	Count ~ Climate_zone	6.642973809	3	*
	Welch	Count ~ Climate_zone	4.818211195	3	***
	Brown-Forsythe	Count ~ Climate_zone	3.294533495	3	**

*P: * < 0.1; **, < 0.05; ***, < 0.01

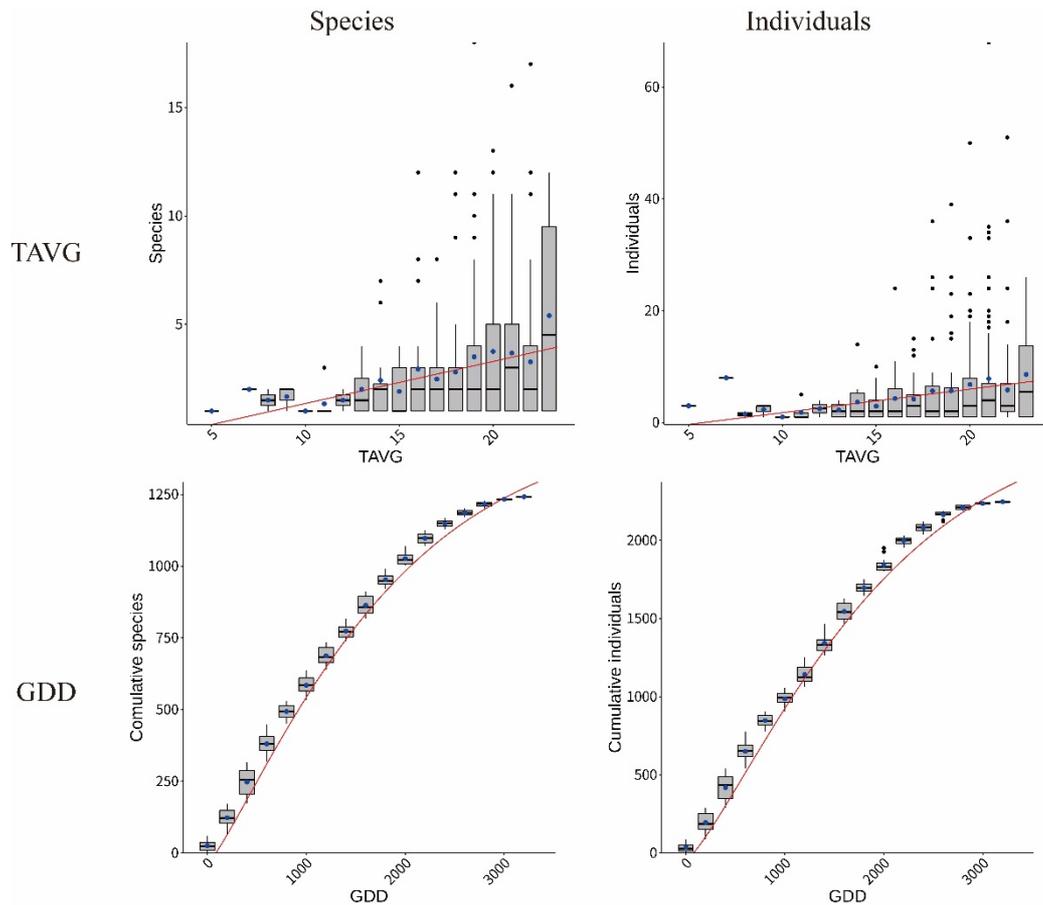


Figure 3. Wild BWs' regression analysis (red line) on average temperature (TAVG) and Growing Degree Days (GDD).

et al., 2021), 지구온난화가 장기화된다면 기온에 민감한 곤충류의 종 서식지의 더 큰 이동과 함께 빠른 생태계의 변화가 예상된다.

미래기후에 따른 한반도 야생벌의 분포 변화를 추정하기 위하여 SSP 시나리오를 적용한 BIOMOD 종 분포 모형을 이용하여 분포 패턴을 예측(Hao et al., 2019)한 결과, 야생벌의 분포는 북쪽으로는 서식지 확산이 예측되었다(Figure 4). 냉온대중부림 및 난온대림 출현 야생벌의 경우도 마찬가지로 북쪽으로 뚜렷하게 확산되는 것으로 예측되었는데, 특히 냉온대중부림에서 남부지방으로의 종 분포 확산보다는 북부지방으로의 확산이 뚜렷하다. SSP5-8.5의 결과가 SSP2-4.5보다 확산의 정도가 더욱 심한 것으로 보아 지구온난화가 가속될 경우 야생벌 서식지의 북위도 이동은 더욱 심각해질 것으로 예상할 수 있다.

본 연구는 남한 내 야생벌의 분포와 Kong et. al. (2013)에 의하여 제시된 4대 기후대와와의 상관에 관하여 분석하였다. 야생벌의 출현과 관련된 생태 활동은 기온과 유의적 관

계가 있음을 통계적으로 확인하였으며, 남한 내의 전 기후대를 통하여 광역적으로 출현하는 종들과 더불어 각 기후대에 특이적인 야생벌이 있음을 확인하였다. 야생벌 분포의 기후대에 따른 차이가 평균기온 및 적산온도와의 통계적 유의성이 있음이 확인된 점은 향후 지구온난화의 지속과 더불어 야생벌의 종 분포에 변화가 올 것임을 예견하고 있다. 종 분포의 변화를 미래기후 시나리오(SSP2-4.5와 SSP5-8.5)로 추정하 바, 모의된 야생벌들의 분포가 모두 북상하고 있고, 지구온난화가 가속 될수록 종 분포는 더욱 크게 북상하는 결과가 도출되었다. 결국 지구온난화가 지속될 경우 한반도 남한의 야생벌 출현 시기 및 지역의 변화가 나타날 것이며, 이에 따른 생태적 부조화 현상이 발생할 수 있음을 예상할 수 있다. 본 연구는 짧은 조사기간, 말레이즈 트랩에 의한 저공비행성 곤충의 우연한 채집, 조사지점 주변의 환경변화 등과 같이 조사 방법에 대한 한계점을 내포하고 있지만, 국내에서는 연구되지 않았던 전국 단위의 동일한 시기에 야생벌 출현을 조사한 점과 그 결과를 바탕으로 분석

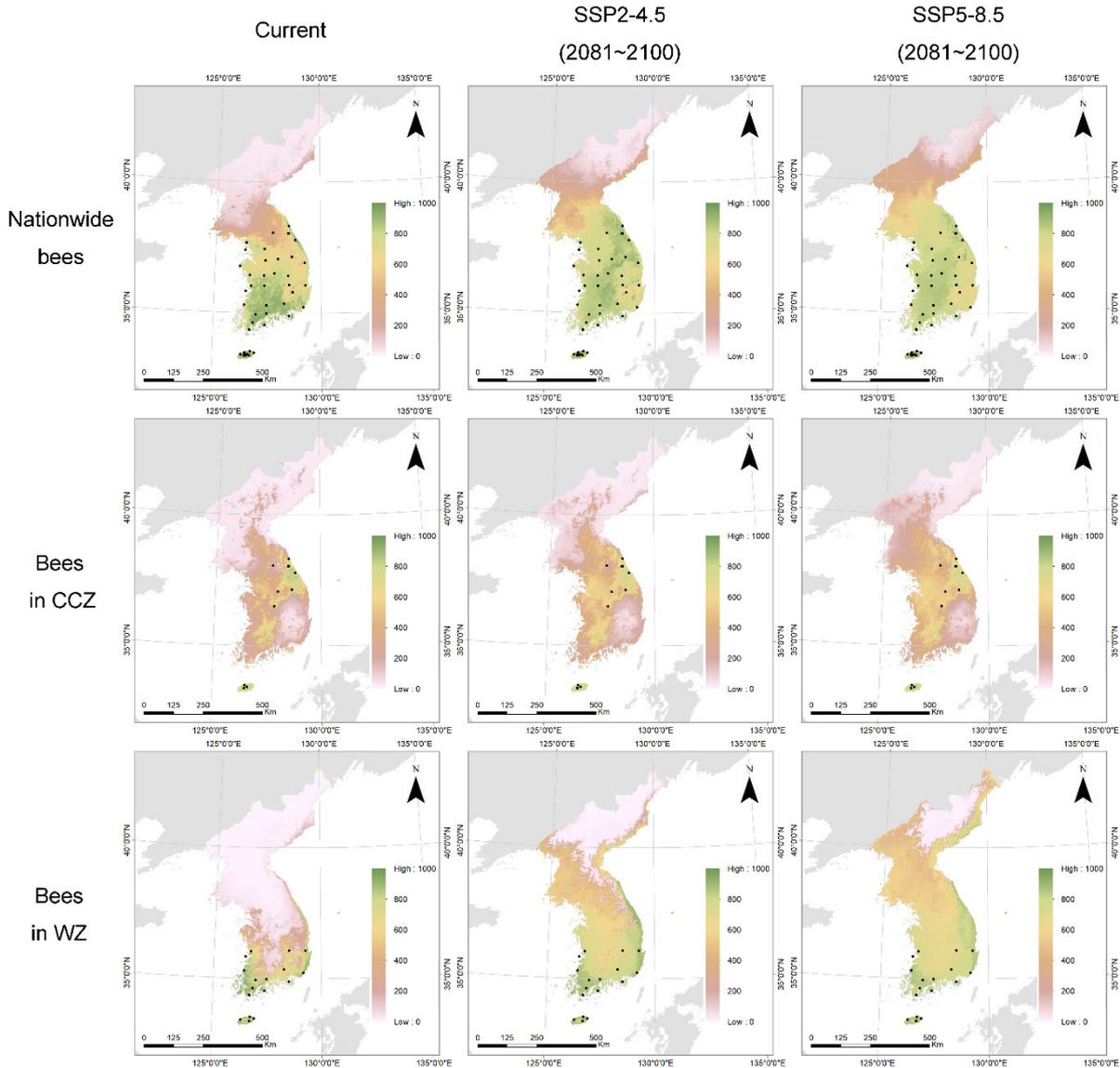


Figure 4. Emerged bees' (black spot) distribution on SSP scenario using BIOMOD ensemble model.

한 야생벌 분포와 기후대 및 기온과의 유의적 상관관계는 기후변화에 대한 야생벌의 생태적 변화가 발생할 수 있음을 예측한 측면에서 의의가 있다. 벌은 화분매개자 혹은 해충에 대한 포식/기생 등을 통하여 생산자를 직접적으로 조절하는 주요 자연자원 중의 하나이며, 이들은 유전적 다양성이 낮아 환경의 변화에 매우 민감한 변동을 보여주는 분류군이다. 농약의 과도한 사용, 자연 먹이원과 영소지의 직접적 감소를 이끄는 서식지의 파괴, 기후적 변화 등 다양한 원인으로 사라져 가는 야생벌의 보전을 위하여 선행적인 분류, 생태학적 연구와 지구온난화의 저감을 위한 탄소중립(net-zero)방안 마련이 요구된다.

REFERENCES

Adhikari, P., J.Y. Jeon, H.W. Kim, H.S. Oh, P. Adhikari and C. Seo(2020) Northward range expansion of southern butterflies according to climate change in South Korea. *Journal of Climate Change Research* 11: 643-656.

Choi, M.B., J.K. Kim and J. Lee(2013) Checklist and Distribution of Korean Vespidae Revisited. *Korean Journal of Applied Entomology* 52(2): 85-92. (in Korean with English abstract)

Choi, S.W. and C. Jung(2015) Diversity of Insect Pollinators in Different Agricultural Crops and Wild Flowering Plants in Korea: Literature Review. *Journal of Apiculture* 30(3):

- 191-201. (in Korean with English abstract)
- Grigorieva, E., A. Matzarakis and C. De Freitas(2010) Analysis of growing degree-days as climate impact indicator in a region with extreme annual air temperature amplitude. *Climate Research* 42: 143-154.
- Han, J.H.(2014) A Study on the Present State and Development Strategies of the Beekeeping Industry. Korea Rural Economic Institute, pp.1-99. (in Korean with English abstract)
- Hao, T., J. Elith, G. Guillera-Arroita and J.J. Lahoz-Monfort(2019) A review of evidence about use and performance of species distribution modelling ensembles like BIOMOD. *Diversity and Distributions* 25(5): 839-852.
- Hijmans, R.J., S. Phillips, J. Leathwick, J. Elith and M.R.J. Hijmans(2017) Package 'dismo'. *Circles* 9(1): 1-68.
- Hoehn, P., I. Steffan-Dewenter and T. Tschamtkke(2010) Relative contribution of agroforestry, rainforest and openland to local and regional bee diversity. *Biodiversity and Conservation* 19: 2189-2200. doi:10.1007/s10531-010-9831-z
- Hughes, A.(2018) Survey of the critically endangered Rusty Patched Bumble bee (*Bombus affinis*) at Midewin National Tallgrass Prairie, (USDA-FS) Ill. Pence-Boyce STEM Student Scholarship, 2.
- Kang, C. and H. Lee(2018) A Study on the Effect of Wind Speed on the Production of Honey. *Journal of Apiculture* 33(1): 63-70. (in Korean with English abstract)
- Kim, N.H. and S.W. Choi(2014) Seasonal and Elevational Pattern of Herbivore's Feeding Activity in Temperate Deciduous Forest. *Korean Journal of Ecology and Environment* 47(1): 24-31. (in Korean with English abstract)
- Kong, S.J., J.H. Shin and K.C. Yang(2013) The Study of Adaptable Plant Species according to Warmth Index using RCP 8.5 Scenarios in Cheonan-Si. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* 16(3): 19-30. (in Korean with English abstract)
- Koo, K.A., S.U. Park, S. Hong, I. Jang and C. Seo(2018) Future distributions of warm-adapted evergreen trees, *Neolitsea sericea* and *Camellia japonica* under climate change: Ensemble forecasts and predictive uncertainty. *Ecological Research* 33(2): 313-325.
- Morton, E.M. and N.E. Rafferty(2017) Plant-pollinator interactions under climate change: The use of spatial and temporal transplants. *Applications in Plant Sciences* 5(6): apps.1600133. doi:10.3732/apps.1600133
- O'Neill, B.C., E. Kriegler, K. Riahi, K.L. Ebi, S. Hallegatte, T.R. Carter, R. Mathur and D.P. Van Vuuren(2014) A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change* 122(3): 387-400.
- Potts, S., V. Imperatriz-Fonseca, H. Ngo, J. Biesmeijer, T. Breeze, L. Dicks, L. Garibaldi, R. Hill, J. Settele and A. Vanbergen (2016) The Assessment Report on Pollinators, Pollination and Food Production: United Nations Environment Programme, Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Bonn, Germany.
- Potts, S.G., J.C. Biesmeijer, C. Kremen, P. Neumann, O. Schweiger and W.E. Kunin(2010) Global pollinator declines: Trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology & Evolution* 25(6): 345-353.
- Shell, W.A. and S.M. Rehan(2019) Invasive range expansion of the small carpenter bee, *Ceratina dentipes* (Hymenoptera: Apidae) into Hawaii with implications for native endangered species displacement. *Biological Invasions* 21(4): 1155-1166. doi:10.1007/s10530-018-1892-z
- Shin, M.S., C. Seo, S.U. Park, S.B. Hong, J.Y. Kim, J.Y. Jeon and M. Lee(2018) Prediction of Potential Habitat of Japanese evergreen oak (*Quercus acuta* Thunb.) Considering Dispersal Ability Under Climate Change. *Journal of Environmental Impact Assessment* 27(3): 291-306. (in Korean with English abstract)
- Shin, S., K.S. Jung, H.G. Kang, J.H. Dang, D. Kang, J.E. Han and J.H. Kim(2021) Northward expansion trends and future potential distribution of a dragonfly *Ischnura senegalensis* Rambur under climate change using citizen science data in South Korea. *Journal of Ecology and Environment* 45(1): 33.
- Son, M., S. Jung and C. Jung(2019) Diversity and Interaction of Pollination Network from Agricultural Ecosystems during Summer. *Journal of Apiculture* 34(3): 197-206. (in Korean with English abstract)
- Sung, S., Y.S. Kwon and K.D. Kim(2018) Development and applications of ecological data portal service (EcoBank) for sharing ecological information of Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* 51(3): 212-220. (in Korean with English abstract)
- Thuiller, W., D. Georges, R. Engler, F. Breiner, M.D. Georges and C.W. Thuiller(2016) Package 'biomod2'. Species distribution modeling within an ensemble forecasting framework. *Ecography* 32: 369-373.
- US Fish and Wildlife Service(2015) Endangered and Threatened Wildlife and Plants; Endangered Status for 49 Species From the Hawaiian Islands (Vol. 80). US Fish and Wildlife Service, pp. 58820-58909.
- Weibull, W.(1951) A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics* 18(3): 293-297.
- Willmer, P.(2012) Ecology: Pollinator-Plant Synchrony Tested by Climate Change. *Current Biology* 22(4): R131-R132.
- Yoon, H.J., K.Y. Lee, H.S. Lee, M.Y. Lee, Y.S. Choi, M.L. Lee and G.H. Kim(2017) Survey of Insect Pollinators Use for Horticultural Crops in Korea, 2016. *Journal of Apiculture* 32(3): 223-235. (in Korean with English abstract)

- Yu, D.S., O.C. Kwon and H.G. Kim(2020) A Simple Program Improving Uncertainly Average Temperature and Growing Degree Days based on RCP Scenario. *Journal of Climate Change Research* 11(2): 113-122. (in Korean with English abstract)
- Yu, D.S., O.C. Kwon, H. Kim and J.K. Kim(2019) Nationwide Spatiotemporal Distribution of Some Selected Aculeata (Hymenoptera) in South Korea, based on Materials Collected with Malaise Trap in 2017 and 2018. *Korean Journal of Environment and Ecology* 33(6): 654-663. (in Korean with English abstract)
- Zhou, G. and Q. Wang(2018) A new nonlinear method for calculating growing degree days. *Scientific Reports* 8(1): 10149.

APPENDIX

Appendix 1. Research sites for collecting wild bees

No.	Site	Latitude	Longitude	Average Temp	Climate zone	Year
1	전남 화순군 춘양면 가봉리 (예성산 주변)	34.9299	126.9637139	111.1754309	WZ	2017
2	전남 강진군 군동면 덕천리 (괴마위산 주변)	34.62011944	126.8360944	113.2933596	WZ	2017
3	전남 고흥군 포두면 차동리 (마복산 주변)	34.52700278	127.3743528	116.8773329	WZ	2017
4	전남 순천시 석현동 (난봉산 주변)	34.98238611	127.4612667	116.5705656	WZ	2017
5	경남 거제시 사등면 오량리	34.88074167	128.5084667	114.486728	WZ	2017
6	경남 김천시 구성면 흥평리 (덕대산 주변)	36.08294444	128.5084667	108.9009554	WZ	2017
7	경북 의성군 안계면 도덕리	36.43028333	128.4599167	107.2000734	CSZ	2017
8	충북 충주시 산척면 영덕리 (새나무골 주변)	37.05642778	127.9760806	98.53931838	CCZ	2017
9	경기도 광주시 퇴촌면 관음리	37.44544444	127.3320167	106.1264214	CSZ	2017
10	인천시 중구 무의동 (무의도)	37.39613611	126.4101056	101.0238355	CSZ	2017
11	충남 보령시 청라면 황룡리 (오서산 주변)	36.441875	126.6592083	105.5703806	CSZ	2017
12	세종특별자치시 금남면 금천리 (금병산 주변)	36.42811944	127.3247389	105.9784926	CSZ	2017
13	전북 완주군 운주면 고당리	36.03565278	127.3433167	104.5848091	CSZ	2017
14	전북 군산시 옥도면 신시도리 신시도	35.81869722	126.4752694	111.2208115	WZ	2017
15	전남 완도군 군외면 대문리 완도수목원	34.35898056	126.6768417	114.9095299	WZ	2017
16	전남 구례군 광의면 온당리 지리산구례생태숲	35.28579722	127.4524222	103.8873128	CSZ	2017
17	경북 경주시 강동면 단구리	36.06335	129.2711806	108.7975438	WZ	2017
18	강원 영월군 중동면 화원2리 예미산	37.15190278	128.6352861	94.22787936	CCZ	2017
19	강원 인제군 기린면 진동리 강선마을	38.03516111	128.4551889	92.14117521	CCZ	2017
20	경북 울진군 금강송면 왕피리	36.91420833	129.2424417	102.8084114	CSZ	2017
21	충남 서천군 마서면 국립생태원	36.029775	126.7266028	112.5921428	WZ	2017
22	제주도 제주시 연동 한라수목원	33.47044444	126.4937361	97.0598518	CCZ	2017
23	제주도 제주시 해안동 어승생악 인근	33.40475833	126.4760056	83.92818517	CNZ	2017
24	제주도 제주시 한림읍 금악리 금오름	33.40475833	126.3055556	121.4614797	WZ	2017
25	제주도 서귀포시 색달동 1100고지	33.35805556	126.4638889	92.92110136	CCZ	2017
26	제주도 제주시 봉개동 물장오리	33.40833333	126.6072222	90.70675235	CCZ	2017
27	제주도 서귀포시 성산읍 오조리 식산봉주변	33.46638889	126.9155556	126.774249	WZ	2017
28	제주도 제주시 구좌읍 동북리 동백동산	33.52111111	126.7269444	124.1137949	WZ	2017
29	제주도 서귀포시 남원읍 수망리 물영아리	33.36888889	126.6936111	112.619794	WZ	2017
30	제주도 제주시 애월읍 광령리 만세동산	33.36563333	126.5056917	56.14898714	CNZ	2017
31	제주도 한라산 어리목 1200m	33.38346944	126.4984472	77.86903197	CNZ	2017
32	제주도 한라산 사제비동산	33.37669722	126.4980833	72.14881917	CNZ	2017
33	제주도 한라산 윗세오름 근처	33.36999444	126.5088972	59.55007607	CNZ	2017
34	제주도 한라산 남벽부근	33.3597	126.5245611	55.46029038	CNZ	2017
35	강원도 점봉산 곰배령입구	38.03292222	128.4650528	91.80784751	CCZ	2017
36	강원도 점봉산 단목령입구	38.04443611	128.4746083	91.56002176	CCZ	2017

No.	Site	Latitude	Longitude	Average Temp	Climate zone	Year
37	강원도 접봉산 산지습지	38.04953056	128.4811389	91.7842047	CCZ	2017
38	충남 서천군 마서면 국립생태원	36.029775	126.7266028	112.5921428	WZ	2018
39	전남 영광군 백수읍 천마리	35.29274722	126.4150139	112.9046538	WZ	2018
40	전남 완도군 근외면 삼두리	34.34752778	126.6787583	114.3767763	WZ	2018
41	전남 구례군 광의면 온당리	35.28826944	127.4444528	104.3837166	CSZ	2018
42	경남 의령군 용덕면 와요리	35.35195556	128.2743306	111.6562064	WZ	2018
43	부산광역시 기장군 기장읍 내리	35.21946944	129.1748694	116.9882441	WZ	2018
44	대구광역시 수성구 범물동	35.79894722	128.6743917	103.8270404	CSZ	2018
45	경기 안성시 금광면 사흥리	37.00356667	127.3841056	105.1095689	CSZ	2018
46	충남 태안군 소원면 송현리	36.78105	126.1753861	104.5357175	CSZ	2018
47	인천광역시 강화군 양도면 길정리	37.67018056	126.4671389	104.6595351	CSZ	2018
48	강원 화천군 하남면 삼화리	38.05993333	127.7295917	93.28457373	CCZ	2018
49	강원 고성군 죽왕면 오봉리	38.33703611	128.4854083	90.74824509	CCZ	2018
50	강원 강릉시 사천면 사기막리	37.78850833	128.7976444	93.70625355	CCZ	2018
51	충북 보은군 속리산면 상판리	36.51503889	127.8092028	93.26954608	CCZ	2018

Appendix 2. Specific wild bees in each climate zone on collection from 2017 to 2018

Species	Climate zone	Species (Korean)
<i>Ancistrocerus densepilosellus</i>	CNZ	짧은배털감탕벌
<i>Eumenes labiatus jejuensis</i>	CNZ	제주호리병벌
<i>Rhopalum gracile</i>	CNZ	호리은주둥이벌
<i>Rhopalum kuwayamai</i>	CNZ	쿠와야마호리은주둥이벌
<i>Rhopalum pygidiale</i>	CNZ	검정호리은주둥이벌
<i>Trypoxylon exiguum</i>	CNZ	꼬마어리나나니
<i>Vespa simillima xanthoptera</i>	CNZ	황말벌
<i>Bischoffitilla exilipunctata</i>	CCZ	짧은종아리개미벌
<i>Bombus hypocrita sapporoensis</i>	CCZ	삼포로뒤영벌
<i>Coelioxys hosoba</i>	CCZ	애뽀족벌
<i>Coelioxys yanonis</i>	CCZ	야노뽀족벌
<i>Discoelius zonalis</i>	CCZ	북방띠호리병벌
<i>Euodynerus nipanicus nipanicus</i>	CCZ	점무늬별감탕벌
<i>Euodynerus quadrifasciatus atripes</i>	CCZ	털별감탕벌
<i>Hoplammophila aemulans</i>	CCZ	왕나나니
<i>Lasioglossum calceatum</i>	CCZ	긴윗입술꼬마꽃벌
<i>Lasioglossum denticolle</i>	CCZ	턱니꼬마꽃벌
<i>Lasioglossum miyabei</i>	CCZ	넓은얼굴꼬마꽃벌
<i>Lasioglossum nipponense</i>	CCZ	큰꼬마꽃벌
<i>Megachile maackii</i>	CCZ	뒤영가위벌
<i>Nippononysson rufopictus</i>	CCZ	붉은빛은주둥이벌
<i>Pemphredon podagrica</i>	CCZ	큰진딧물벌
<i>polistes rothneyi</i>	CCZ	왕바다리
<i>Psenulus gussakovskij</i>	CCZ	극동꼬마구멍벌
<i>Scolia oculata</i>	CCZ	황띠배벌
<i>Seladonia tumulorum ferripennis</i>	CCZ	가는머리구리꼬마꽃벌
<i>Stenodynerus pullus</i>	CCZ	어리꼬마감탕벌
<i>Stigmus convergens</i>	CCZ	-
<i>Symmorphus apiciornatus</i>	CCZ	주름잎벌레살이감탕벌
<i>Trypoxylon koma</i>	CCZ	고려어리나나니
<i>Trypoxylon sapporoense</i>	CCZ	삿뽀로어리나나니
<i>Trypoxylon varipes</i>	CCZ	갈색어리나나니
<i>Vespula shidai</i>	CCZ	흰띠땅벌
<i>Ancistrocerus parietinus</i>	CSZ	털감탕벌
<i>Anthidium sibiricum</i>	CSZ	꼬마알락가위벌
<i>Dasylabris siberica</i>	CSZ	노랑무늬개미벌
<i>Eumenes labiatus flavoniger</i>	CSZ	무늬호리병벌
<i>Hoplitis scita</i>	CSZ	어리민뿔가위벌
<i>Lasioglossum circularum</i>	CSZ	-

Species	Climate zone	Species (Korean)
<i>Megachile abluta</i>	CSZ	화장가위벌
<i>Megachile willughbiella</i>	CSZ	윤가위벌
<i>Megachile xanthothrix</i>	CSZ	두색가위벌
<i>Mutilla mikado</i>	CSZ	구주개미벌
<i>Nomia incerta</i>	CSZ	청띠꼬마꽃벌
<i>Osmia excavata</i>	CSZ	흰줄빨가위벌
<i>Pemphredon krombeini</i>	CSZ	-
<i>Psenulus laevigatus</i>	CSZ	검정다리꼬마구멍벌
<i>Scolia decorata</i>	CSZ	출배벌
<i>Stenodynerus clypeopictus</i>	CSZ	민이마방패꼬마감탕벌
<i>Symmorphus decens</i>	CSZ	이마방패잎벌레살이감탕벌
<i>Trypoxylon fronticorne</i>	CSZ	어리나나니
<i>Amegilla zonata</i>	WZ	청출벌
<i>Anterhynchium melanopterum</i>	WZ	검은날개황습감탕벌
<i>Carinostigmus filippovi</i>	WZ	호리꼬마구멍벌
<i>Ceratina jejuensis</i>	WZ	제주광채꽃벌
<i>Elampus bidens</i>	WZ	배두치청벌
<i>Lasioglossum primavera</i>	WZ	민등꼬마꽃벌
<i>Megachile remotissima</i>	WZ	어리극동가위벌
<i>Nomada japonica</i>	WZ	왜알락꽃벌
<i>Orancistrocerus drewseni</i>	WZ	줄무늬감탕벌
<i>Parapolybia crocea</i>	WZ	-
<i>Pararrhynchium paradoxum paradoxum</i>	WZ	줄감탕벌
<i>Polistes japonicus</i>	WZ	꼬마별쌍살벌
<i>Psenulus nipponensis</i>	WZ	일본꼬마구멍벌
<i>Trypoxylon koreanum</i>	WZ	장안어리나나니
<i>Vespa velutina nigrithorax</i>	WZ	등검은말벌