



**대기오염으로 인한
꿀벌 시정 거리의 감소가
생태계에 미치는 영향 분석**

WWF(World Wide Fund for Nature, 세계자연기금)

WWF는 1961년 설립된 세계 최대 비영리 국제 자연보전기관으로 전 세계 100여 개 국가에서 600만 명의 후원자와 3,000만 명의 서포터즈와 함께 활발히 활동하고 있습니다. WWF는 지구의 자연환경이 파괴되는 것을 막고, 사람과 자연이 조화를 이루며 살아가는 미래를 만들어가고자 합니다. 이를 위해 생물다양성을 보전하고, 재생 가능한 자연자원을 지속가능하게 사용할 수 있도록 이끌고 있습니다. 또한, 불필요한 소비와 환경오염을 줄이는 인식 개선 활동에도 힘쓰고 있습니다. WWF-Korea(세계자연기금 한국본부)는 2014년 공식 설립되었습니다.

발행인: 박민혜
연구책임자: 정수종(서울대학교 환경대학원 교수)
연구원: 장동영(서울대학교 환경계획연구소 연구교수)
조유리(서울대학교 환경계획연구소 선임연구원)
박채린(서울대학교 환경계획연구소 선임연구원)
김연수(서울대학교 기후연구실 연구원)
박하영(서울대학교 기후연구실 연구원)
배연(서울대학교 기후연구실 연구원)
이지원(서울대학교 기후연구실 연구원)
신재한(서울대학교 기후연구실 연구원)
발행일: 2024년 2월
발행처: WWF(세계자연기금)
WWF 참여진: 박승효(WWF-Korea 기후에너지팀)
조윤진(WWF-Korea 기후에너지팀)

디자인 작업: 베스트셀러바나나
표지 사진: © Ola Jennersten / WWF-Sweden

본 보고서 전체 혹은 일부를 복제하거나 배포하는 경우, 아래 인용 표시를 참고하여 출처와 저작권을 표기하고 위에 열거된 당사자에게 저작권이 있음을 반드시 고지해야 합니다.
© Text 2024 WWF-Korea
All rights reserved



© Ola Jennersten / WWF-Sweden

목차	
제1장 전지구적 벌의 위기	4
전지구적 벌 개체수의 감소	4
감소의 원인은 무엇인가?	5
제2장 HIVE 프로젝트: 모니터링 결과	6
HIVE 프로젝트	6
환경 변수 조절에 있어서 꿀벌의 선택적 우선순위	7
채이 활동 시작 시간: 기후변화 안에서의 의미	12
반갑지 않은 방문객: 침입종(등검은말벌, <i>Vespa velutina nigrithorax</i>)	15
제3장 가려진 진실: PM2.5 배출량 증가에 따른 꿀벌의 시계 제한 위험성 확대에 대한 탐구	16
'먹이탐색활동에 있어' 알려진 위험과 알려지지 않은 위험	16
PM2.5 질량농도와 선행편광도 간의 관계	18
2050 꿀벌의 시계 제한 위험성에 대한 전 세계 전망	19
제4장 결론	26
참고문헌	28

꿀벌 시정거리 감소가 생태계에 전하는 메시지



WWF-Korea
사무총장
박민혜

인류는 지금 기후위기와 생물다양성 감소의 이중위기에 처해 있습니다. 무분별한 개발 등 인간의 활동으로 인한 서식지 파괴가 생물다양성 감소의 주요 원인이었으나, 최근 지구 기온 상승 등 심화한 기후변화가 생물종의 생존과 번식에 영향을 주면서 생물다양성 위기가 극대화되고 있습니다.

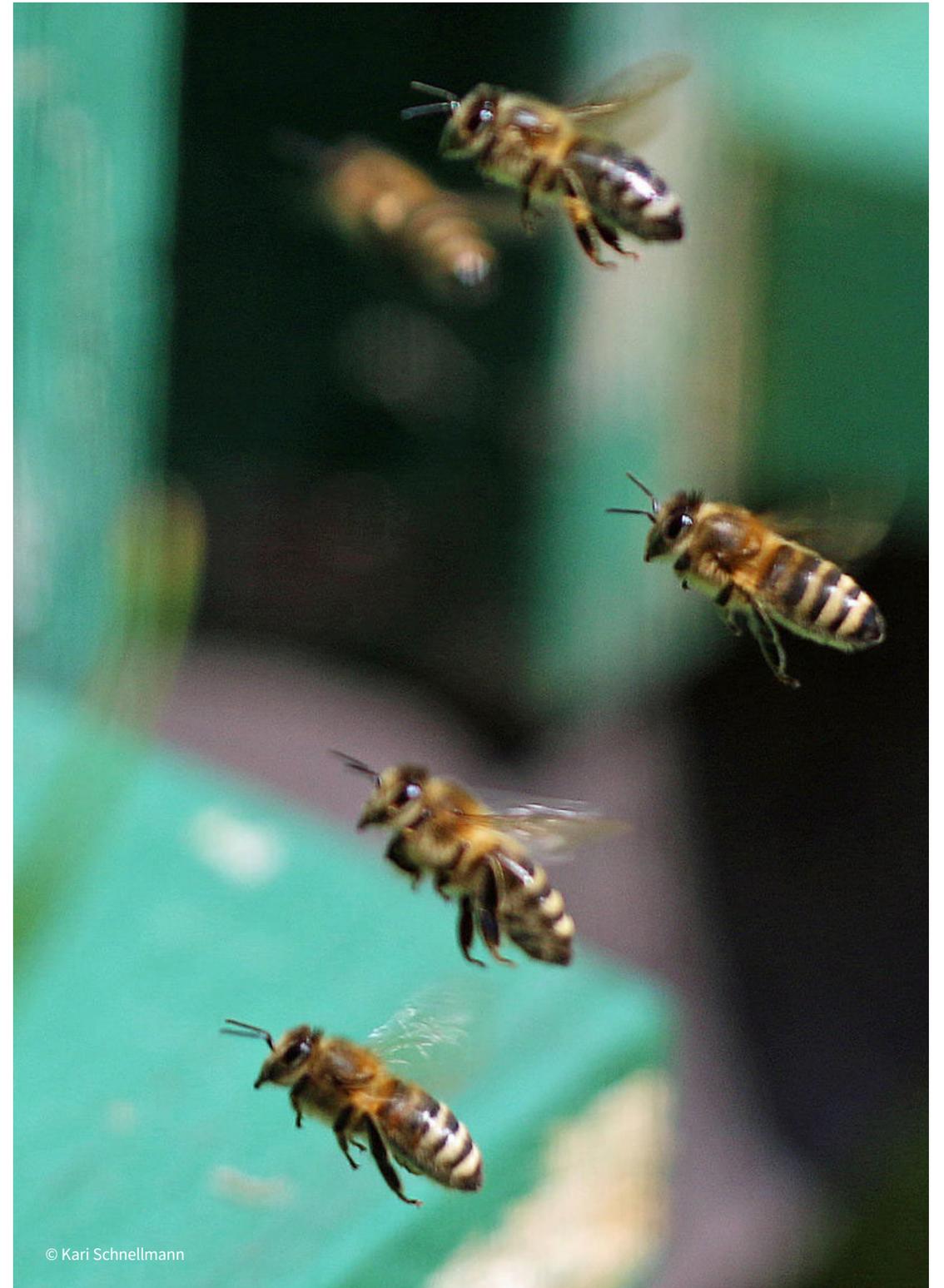
WWF는 국내 최초로 서울대학교와 협력하여 전 세계적으로 쟁점이 되고 있는 꿀벌 개체 수 감소에 대한 국내 사례 연구를 진행했습니다. 그 결과 대기질 오염이 꿀벌의 생존에 영향을 미친다는 사실을 밝혔습니다. 인간의 산업 활동으로 인한 대기 중 미세먼지 농도의 상승은 꿀벌의 시각적 기능에 명확한 영향을 주었으며, 이에 따라 비행거리 역시 영향을 받는 것을 알 수 있었습니다. 평균 기온 상승으로 인한 외래종 유입 역시 기존에 서식하던 꿀벌의 개체 수 감소에 상당한 영향을 미치는 것으로 확인했습니다.

꿀벌과 같은 수분 매개 곤충들이 처한 이 같은 위험은 우리의 생존과도 연결되어 있습니다. 수분 매개 곤충이 번식에 문제를 겪게 되면 작물 수확과 생산성, 식품 다양성 등에도 연쇄적인 영향을 줄 것입니다. 이는 결국 인간의 식생활과 식량 안보에 위협으로 돌아오게 됩니다.

우리에게 닥친 생물다양성 위기에 대응하기 위해서는 다양한 노력이 필요합니다. 기초적인 생물 다양성 조사에서부터 생태계 복원 및 보전 방안 연구, 생물종 관리 및 관련 정책 개발과 실행에 이르기까지 민간과 정부에서 다양한 노력이 이루어져야 합니다.

여전히 한국을 포함한 여러 나라에서는 이러한 분야에 대한 연구가 부족한 상황입니다. 생물다양성 감소를 막고, 자연이 풍요로운 미래를 만들기 위해서는 여러분의 관심과 아낌없는 지원이 필요합니다. WWF는 앞으로도 과학 기반의 문제 해결을 위해 기초 과학 분야를 포함한 포괄적인 연구가 진행될 수 있도록 전문가들과 협력하겠습니다. 여러분도 이 여정에 함께해 주십시오.

together possible, 함께하면 가능합니다.



© Kari Schnellmann

CHAPTER 1 INTRODUCTION: GLOBAL BEE CRISIS

전 지구적인 벌 개체수의 감소

주로 곤충으로 대표되는 동물 수분매개자는 전지구적으로 중대한 개체수 감소를 겪고 있다. 벌, 나비, 포유류를 포함한 다양한 종의 수분매개자가 감소하는 이러한 세계적 현상은 현재 우리가 직면한 환경 문제 중 가장 시급한 문제 중 하나가 되었다. 많은 곤충 수분매개자 중 특히 벌의 개체수가 급감하고 있다. 양봉꿀벌(*Apis mellifera*) 군락에서 일벌들이 여왕벌과 유충만 남겨둔 채 갑자기 사라지는, 이제는 군집붕괴현상(Colony Collapse Disorder, CCD)으로 알려져 있는 이 사건이 지난 2007년 북미와 유럽 전역에서 동시에 발생하였고, 이는 벌 개체수 감소에 대한 광범위한 관심을 증폭시키는 결정적 계기가 되었다. 이후 수분매개자에 의한 "생태계 서비스"가 강조됨에 따라 국제 정책 무대에서 또한 이에 대한 관심이 고취되어 왔다.

우리 인간은 수분매개자에 의존하고 있으며, 이 전지구적 문제에 심각하게 대처하고 있다. 전세계적으로 소비되는 상업적 작

물의 약 75%가 동물 수분매개자에 의존하고 있으며, 여기에는 사과, 토마토, 딸기, 양파, 오이 등의 작물이 포함된다. 수분매개자 도움이 필요없는 작물도 실제로는 수분매개자가 주변에 존재할 때 더 큰 수확을 낼 수 있다. 따라서 수분매개자는 식량안보에 있어 매우 중요한 생태계 서비스이다. 그러나 더 근본적으로 수분매개자는 지구 상에 존재하는 꽃이 피는 식물 90%의 생식에 필수적이다. 이것이 식물과 동물이 수백만 년 동안 공진화한 결과이다.

생태계 생산성에 중추적인 역할을 하고 있는 야생벌 및 양봉 꿀벌(*Apis*)을 포함한 꿀벌은 자연 및 관리 생태계에서 주요 수분매개자로서 의심할 여지 없이 중요한 역할을 한다. 전세계적으로 약 25,000종의 벌이 존재한다. 이 다양성에서 비롯된 고도로 특성화된 식물-수분매개자의 상호작용은 꿀벌 개체수가 감소할 때 생태계를 보다 취약하게 만든다. 성공적인 상호작용 및



© Paul Rogers / WWF-UK

이에 따른 식물의 성공적인 생식은 생태계의 지속가능한 생산성에 기여한다. 이것은 꿀벌 개체수의 감소가 단순히 꿀벌에 대한 문제를 넘어 더 광범위한 함의를 갖고 있음을 명확히 한다. 식물에 의한 일차생산성은 생태계의 전반적인 기능을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 생태계 내의 생물다양성은 유전적 다양성에서 전체 경관까지 다양한 수준의 다양성을 포함하고 있다 (Figure 1). 따라서, 수분서비스는 '생물다양성과 일차생산성에서 파생된 무한한 생태계 기능다양성을 보존하는, 생태계 내 가장 근본적인 종 간 상호작용'으로 정의될 수 있다.

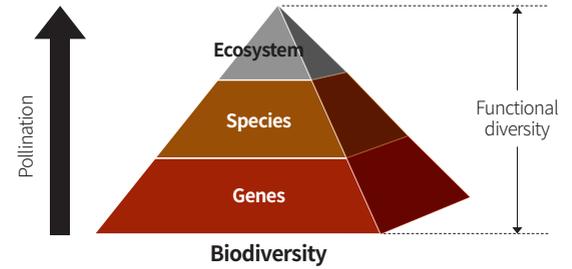


Figure 1 식물-수분매개자 간 상호작용은 전지구적 생물다양성의 근본이 되는 종 간 상호작용이다.

감소의 원인은 무엇인가?

전지구적 벌 개체수 감소의 원인으로 대표되는 것은 토지이용 변화와 기후변화다. 인간 활동은 수분매개자 활동에 영향을 미쳐 왔다. 특히 도시화는 벌의 서식지를 감소시키는 데 큰 원인으로 작용하였다. 또한, 꽃이 풍부한 서식지를 농지로 개간하는 것은 벌 개체수의 지속적인 감소에 크게 영향을 주었다. 이러한 토지이용변화는 적합한 서식지의 파괴와 벌이 소비할 수 있는 꽃 자원의 감소로 이어졌다. 지난 몇 년 동안 살충제가 벌의 행동 및 생리 기능에 미치는 영향이 주목받고 있다. 이 또한 토지 이용변화의 영향에 포함될 수 있다.

벌은 원래 다양한 기생충 및 병원체와 공생한다. 그러나 기후변화로 일부 벌 질병 요인들에게 더 유리한 조건이 조성되고 있다. 예를 들어 바로아(Varroa)는 남극과 호주 태즈메니아를 제외한 모든 대륙에 퍼졌으며, 미국과 유럽의 양봉 꿀벌 군집의 감소에 중대한 영향을 주었다. 기후는 직접적으로나 간접적으로 이러한 숙주와 기생충 간 상호 작용에 중대한 영향을 미칠 수 있다. 따뜻하고 습한 조건은 병원체와 해충의 생식 능력을 향상시키고, 식물의 긴 성장 기간은 병원체가 벌 군집에서 퍼지는 데에 더 큰 시간적 여유를 만들어 낸다.

더 따뜻한 기후는 병원체와 함께 병원성을 가진 해충 뿐 아니라 벌의 자연적인 천적인 침입종의 유입도 유발한다. 등검은말벌(*Vespa velutina nigrithorax*)은 아열대 지역에서 기원하며 한국, 일본 및 유럽 국가로 침입했다. 장수말벌(*Vespa mandarinia*)은 아시아의 온대 지역에서 기원하며 미국을 비롯한 북아메리카로 침입했으며 특히 미국에서 큰 문제를 일으

키고 있다. 등검은말벌은 본래 동지를 지하에 짓기 때문에 극심한 온도 변동에 더 오랜 기간 노출되어 왔고, 따라서 꿀벌에 비해 기후변화에 더 적응하기 쉽다. 게다가 식물의 개화 시점이 빨라지면서 식물과 수분매개자 간의 생물계절 불일치가 발생하고 있다. 이러한 불일치는 번식 능력을 감소시키고 이러한 상호작용에 의존하는 생태학적 기능을 손상시킬 수 있다. 따라서, 벌 개체수에 영향을 주는 모든 근본적인 원인은 이를 모두 포함하는 토지 이용 변화와 기후 변화로 정의될 수 있다.

하지만 아쉽게도, 전지구적 벌 위기에 대한 연구에서는 유럽과 북미에서 주로 이루어져 전 세계 상황을 시사하지 못하고 있다. 따라서 공기 오염과 같은 다른 잠재적 원인들은 많은 학술 연구에서 과소평가되고 있다.

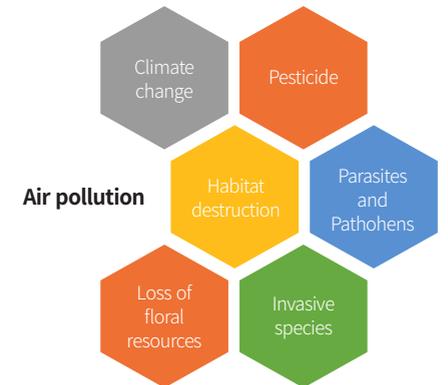


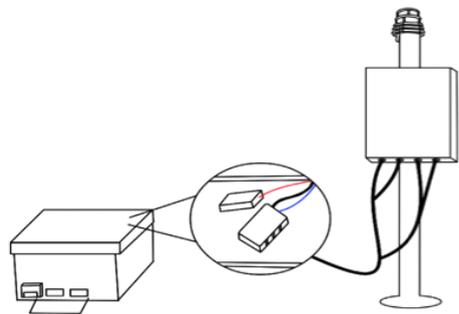
Figure 2 전지구적 벌의 위기의 요인을 탐구하는 많은 연구들이 있지만, 이러한 연구들에서 대기오염처럼 여전히 저평가된 요인들이 있다.

CHAPTER 2 HIVE 프로젝트: 모니터링 결과

HIVE 프로젝트

꿀벌 개체수에 영향을 미치는 요소들 중 저평가된 요소들을 확인하기 위해, 우리는 벌집 내부와 외부의 환경 변수와 개별 일벌들의 채밀 활동을 모니터링하는 개체 관측 시스템을 설계하고 구현하였다. 이 모니터링 시스템을 'HIVE 프로젝트'고 이름 지었으며, 여기서 HIVE는 'Human Interactions with our Vital Ecosystem'을 약자이다. 이 프로젝트에서 우리는 단순히 군집을 모니터링하는 것뿐만 아니라, '대기오염이 꿀벌의 시야에 영향을 미치는가'라는 질문을 해결하기 위한 필수 데이터를 수집하였다. 이 질문에 답하기 위해, 우리는 꿀벌의 채집 활동에 대한 기본 데이터가 필요했다. 꿀벌이 다양한 날씨 조건에서 실제로 얼마나 시간을 소비하는지에 대한 정보는 한계가 있었다. 또 다른 중요한 질문은 꿀벌이 비 오는 날이나 고도의 대기오염과 같은 불리한 조건에서도 여전히 채집을 하는지 여부였다. 벌들의 활동이 줄어들면, 군집 내부의 조건이 활발한 채집 활동이 있는 날에 비해 어떻게 변화하는지 이해하고자 하였다.

Figure 3 HIVE 모니터링 시스템의 구성



2023년 4월부터 서울 및 제주에서 4개의 꿀벌 군집에 대한 장기간 동시 모니터링을 시작하였다. 우리는 무선주파수인식장치(Radio-frequency identification system, RFID) 태그를 4개의 군집에서 약 2,500마리의 개별 일벌에 부착하여 그들의 비행 시간을 추적하고, 여러 환경변수의 군집에 대한 영향을 모니터링하였다. 따라서, 우리는 벌집 안과 밖에서 이산화탄소 농도, 미세먼지 농도, 온도, 습도, 풍향, 풍속, 대기압의 환경변수 데이터를 수집하였다. 획득한 모니터링 데이터를 분석하여 꿀벌 군집의 생태학적 안정성과 환경변수 간의 관계를 확인하고, 활동 데이터를 활용하여 미세먼지가 꿀벌의 비행에 미치는 영향, 꿀벌의 활동의 시작 시간, 그리고 꿀벌이 그들의 조절에서 세가지 환경변수(이산화탄소농도, 습도 및 온도) 중 무엇을 우선시 하는지 등을 조사할 수 있었다.

이 연구의 결과는 기후 변화의 영향 하에 꿀벌의 생태의 변화를 이해하는 데 뿐만 아니라 다른 수분 매개 생물과 식물 간의 현상적 불일치를 예측하는 데 필수적인 기초 정보로 활용될 수 있다.

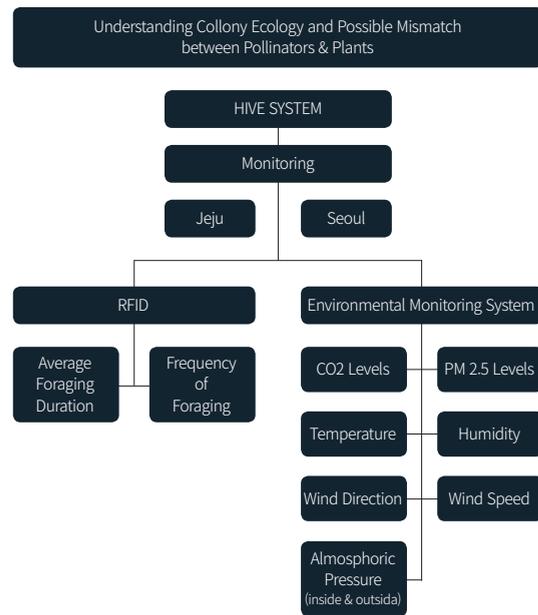


Figure 4 가슴에 RFID 태그를 부착한 일벌의 모습



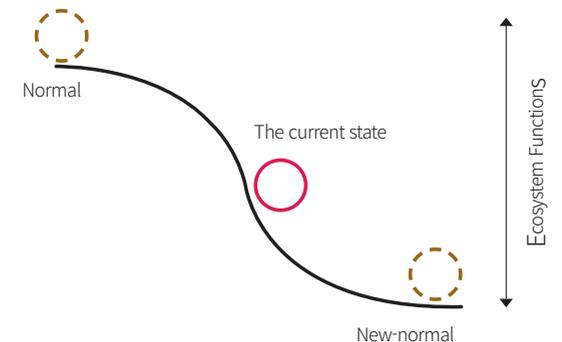
Figure 5 벌집 입구에 설치된 RFID 리더기

환경 변수 조절에 있어서 꿀벌의 선택적 우선순위

기후 변화 시나리오에 따르면, 강수량 예측은 온도 예측에 비해 더 높은 불확실성을 가지고 있다. 그러나 대부분의 시나리오에서는 미래에 비 오는 날의 수가 감소하고, 강한 비가 내리는 날의 수가 증가할 것으로 추정된다. 즉, 현재보다 강수가 짧은 기간에 집중될 가능성이 높다. 이는 생태계, 인간을 포함한 여러

시스템이 현재의 것과는 다른 환경에 직면할 것이며, 이에 대한 다른 적응 시스템이 필요할 것을 의미한다(Figure 6). 미래 강수 변화를 이해함이 중요하며, 따라서 우리는 꿀벌이 강한 비나 폭우로 인한 스트레스에 어떻게 행동 변화를 보일지 조사하고자 하였다.

Figure 6 극한 기상은 이제 뉴노멀이 되고 있다. 이 뉴노멀에 벌 군집이 어떻게 대응할지 이해하기 위해서는 현재 상태에 대한 이해가 필요하다. 이러한 이해는 미래의 수분 저하가 변화시킬 생태계 기능의 범위를 추정하는 데 활용될 것이다.



꿀벌은 날갯짓을 통해 이들의 군집의 평형을 유지하기 위해 군집 내 이산화탄소농도, 온도 및 습도를 조절한다. 이전 연구에서는 꿀벌이 이 세가지 요소를 동시에 규제하는 대신 특정한 위계를 가지고 우선순위를 두고 조절함이 알려졌다. 이산화탄소농도 조절의 우선순위에 대한 연구는 많지 않으나, 군집의 건강을

유지하는 데 습도 조절이 온도 조절보다 중요함을 밝힌 연구들이 있다. 습도 조절은 온도 조절과 유사한 측면이 있기에 우리는 온도 조절보다는 습도 조절에 우선순위를 두고, 이를 이산화탄소 농도 조절과 비교하고자 하였다.



Figure 7 군집 내 다양한 환경 변수 변화를 조절하는데 꿀벌의 우선순위 결정 과정에 대해 많이 알려져 있지 않다.

연구에서 정의한 호우는 기상청 예보를 참고하였다. 기상청이 발표한 호우 경보의 기준은 3시간 동안 예상 강우량이 60mm 이상이거나 12시간 동안 110mm 이상인 경우이다. 또한, 호우 주의보의 기준은 3시간 동안 90mm 이상이거나 12시간 동안 180mm 이상인 경우이다. 2023년 4월 12일부터 2023년 7월 27일까지의 꿀벌 관측을 했기에, 해당 기간 동안의 서울에 발

표된 호우 경보 및 주의보를 조사하였고, 서울에 호우 경보 또는 주의보가 발효된 날은 총 6일이었다. 이번 분석에서 하루 동안 30mm 이상의 강우량을 중요한 강우로 설정하고, 해당 14일 동안의 데이터를 분석하여 강한 비나 호우로 인한 꿀벌에게 발생한 잠재적인 스트레스를 탐색하였다.

Heavy rainfall advisory and heavy rainfall warning issued by Korea Meteorological Administration	June: 29th July: 9th, 11th, 13th, 23rd, 26th
Dates of interest	May: 5th, 6th, 27th, 28th June: 11th, 14th, 26th, 29th July: 4th, 9th, 11th, 13th, 14th, 23rd, 26th

Table 1 실험 기간 동안 강우 기록

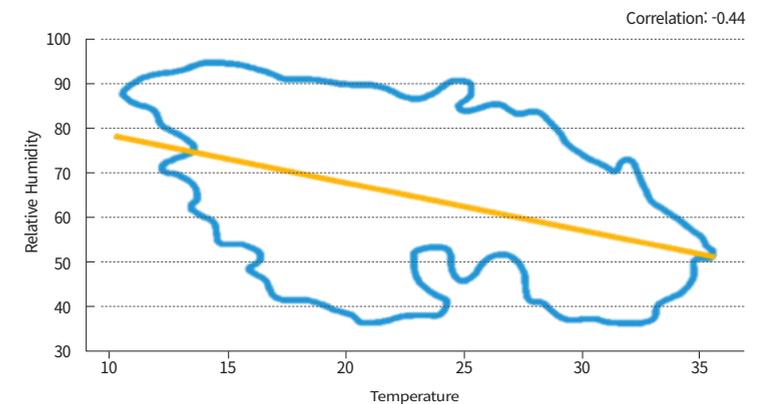
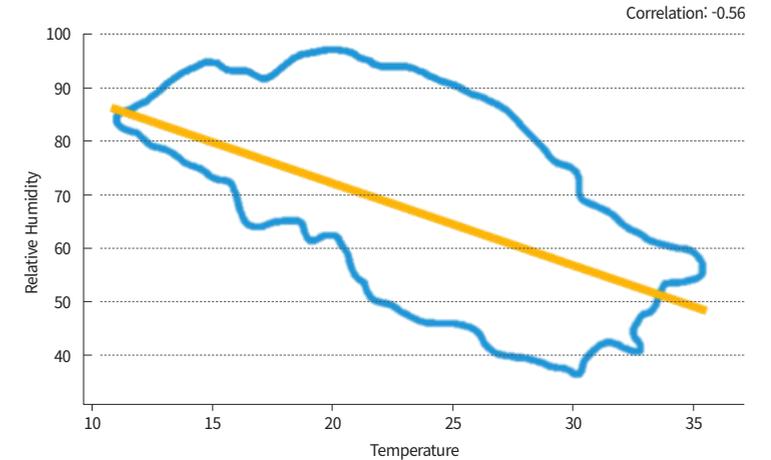
모니터링 시스템은 벌집 내외의 기상 및 환경 변수의 농도를 측정하는데, 2023년 4월 12일부터 2023년 7월 27일까지 이러한 변수들의 농도를 5분마다 측정하였다. 획득한 데이터를 사용하여 꿀벌의 온도, 습도, 그리고 이산화탄소농도 데이터를 기반으로 한 군집의 환경변수 조절 양상을 분석하였다. 비가 오지 않은 기간 동안과 비가 오는 기간 동안의 꿀벌의 항상성 조절 과정을 비교하여, 비로 인한 스트레스가 꿀벌의 항상성 조절에 미치는 영향을 이해하고자 하는 것이다.

이전 연구에 따르면 습도 조절이 온도 조절보다 우선시 되었다. 습도 조절이 온도 조절보다 꿀벌 생존에 더 중요한 요소로 보인다. 그러나 실제로는 습도 조절 능력이 열 내구성과 일치한다. 이는 온도와 습도 조절 간에 밀접한 관계가 있다는 것을 나타

낸다. 따라서 우리는 온도와 습도 조절을 하나의 변수로 취급하고, 더 중요한 습도 조절을 이산화탄소 조절과 비교하기로 결정한다. 이전 연구와 유사하게 온도와 습도 간의 상관 관계가 데이터에서 나타나는지 확인하기 위해 온도와 습도 간의 상관분석을 수행하였다. 우선 상관분석을 통해 온도와 습도, 두 변수 간의 관계를 파악하고자 하였다. 여기서 습도는 상대습도를 일컫는다.

Figure 8은 데이터 수집 이전 기간 동안 벌집 내부의 습도와 온도 간의 상관 관계를 보여준다. 습도 규제는 열 내구성과 일치하므로 온도와 상대 습도는 음의 상관 관계를 나타내야 한다. 각 실험군집의 상관 계수는 각각 -0.56 및 -0.44($p < 0.01$)로, 두 군집 모두에서 명확한 음의 상관 관계를 확인하였다

Figure 8 두 개의 실험 군집의 벌집 내부에서 관측된 온도와 상대습도 간 관계

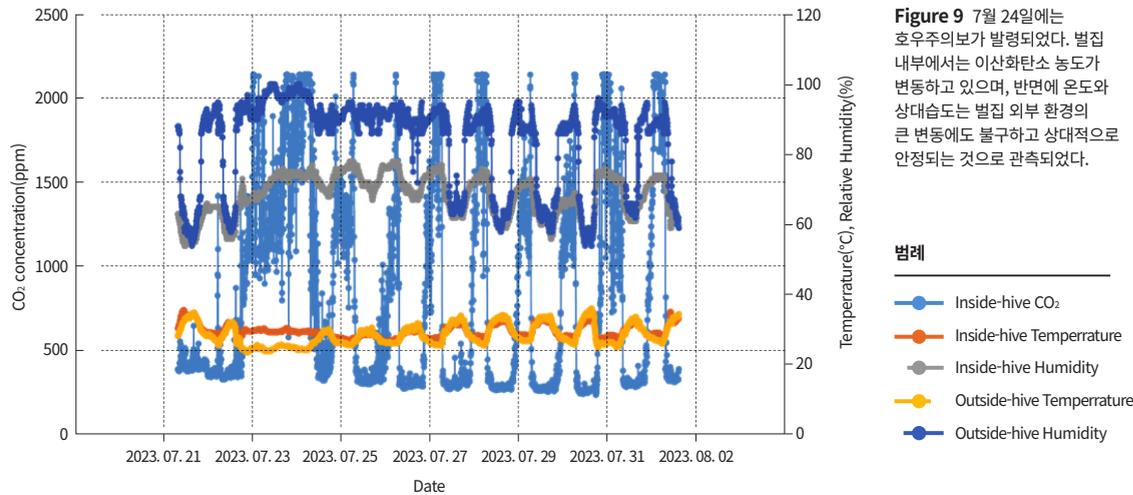


호우가 있던 날의 온도와 습도 데이터를 사용한 추가 상관 분석에서는 -0.36 및 -0.52의 상관 관계를 나타내었고, 이 분석은 전체 기간의 상관 분석과 일관된 명확한 음의 상관 관계를 드러낸다. 따라서 앞서 설정한 대로 온도와 습도 조절을 하나의 변수로 취급하고 습도 조절을 이산화탄소 조절과 비교하는 결정이 타당함을 입증하였다.

강우 스트레스가 없는 날의 꿀벌의 열조절 우선순위를 결정하기 위해, 호우가 있던 날을 데이터 수집 기간에서 제외한 날짜의 데이터를 사용하여 시계열 분석을 수행하였다. 호우가 없는 날의 벌집 내 상대습도와 이산화탄소농도의 시계열 변화를 분석한 결과, 습도가 증가함에 따라 이산화탄소 농도도 증가하는 경향을 보였다. 이는 습도 조절을 위한 꿀벌의 활동(날개짓)이 증가하고 있음을 나타낸다. 꿀벌은 이러한 활동으로 벌집 내 습

도를 조절하려고 하며, 이 과정에서 이산화탄소 배출이 증가한다. 호우 스트레스가 없을 때 꿀벌은 이산화탄소농도 조절보다는 습도 조절을 우선시하는 것으로 관찰되었다. 이산화탄소농도의 큰 변동이 있기 때문에 단기적인 조정이 다른 요인에 의해 우선순위를 갖는 것으로 판단된다. 그러나 습도와 온도 조절 과정에서 꿀벌이 이산화탄소를 발산시키기 때문에 정확한 단기 변동의 원인을 파악하는 것은 어려우므로 장기적인 관점에서 이산화탄소 농도의 변화를 관찰하여야 한다.

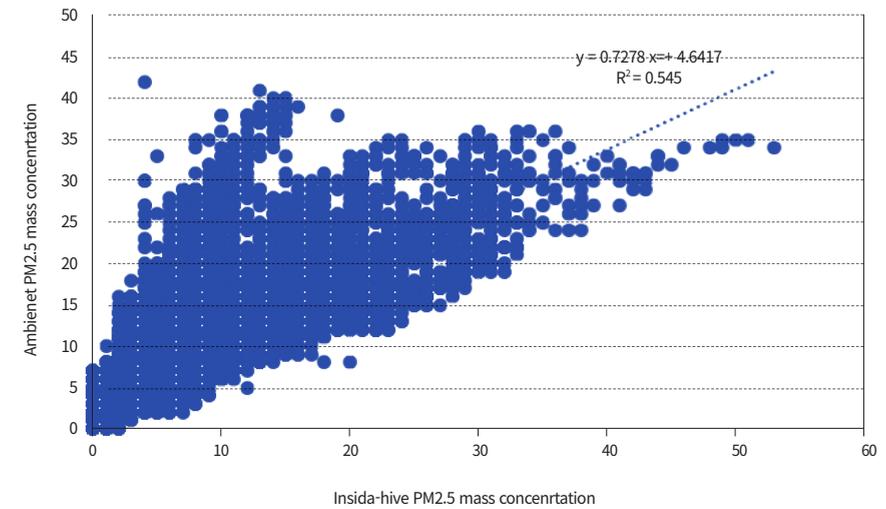
호우 스트레스가 있는 상황에서 꿀벌의 열조절 우선순위를 결정하기 위해, 호우가 있던 날을 데이터 수집 기간에서 제외한 날짜의 데이터를 사용하여 시계열 분석을 수행하였다. 이 결과 또한 꿀벌은 호우 여부와 상관없이 습도 조절을 이산화탄소농도 조절보다 우선시 함을 보여준다.



향후 호우 스트레스가 증가하면 꿀벌은 현재보다 더 많은 에너지를 습도 조절에 할당해야 하므로 현재보다 큰 스트레스를 겪게 될 것이다. 그러나 문제는 꿀벌이 동시에 벌집 내의 온도와 이산화탄소농도를 조절해야 한다는 점이다. 더욱 큰 문제는 온도의 지속적인 상승이 예상된다는 점이다. 꿀벌은 상승하는 온도에 대응하기 위해 노력해야 할 뿐만 아니라 단기간 내 습도가 급격히 증가함에 따라 습도 조절에 상당한 에너지를 할당해야 할 것이다. 온도와 습도 조절은 유충 관리와 먹이질에 중대한 영향을 미치므로 꿀벌은 외부 환경 변화로 인해 다양한 문제에 직면하고 있다.

꿀벌은 항상성 유지, 유충 및 여왕벌 관리, 벌집 내부 관리 및 채집과 같은 다양한 활동에 참여한다. 이러한 활동 간의 에너지 균형 분배는 향후에 뒤바뀔 수 있다. 벌집의 항상성 조절은 벌

집의 안정성 뿐만 아니라 꿀벌의 채집 활동에도 큰 영향을 준다. 상승하는 온도와 강우 빈도는 꿀벌 먹이의 양과 질을 감소시킬 것이며, 이로 인해 활동 가능한 일 수가 감소할 것으로 예상된다. 습도, 온도 및 이산화탄소농도를 조절 이외에, 벌집 내부에서 미세먼지 농도를 제어하는지에 관해서도 모니터링하였다. 모니터링 결과에 따르면, 벌은 벌집 내부의 미세먼지의 농도를 조절하지 않았다 (Figure 10)



채이 행동 시작 시간: 기후변화 안에서의 의미

벌의 활동이 일반적으로 아침 일출 시기에 시작된다. 이를 정량적으로 분석하기 위해 RFID가 사용되었다. 종종 RFID태그가 부착된 벌이 벌집 근처에 머무르거나 장치 오류로 인해 RFID에 인식되지 때문에, 출발시간과 도착시간이 명확한 비행 중 비행 시간이 10분에서 240분까지 사이인 비행 활동을 분석하였다.

이 분석에서는 일일 비행 중 하루 중 가장 빠른 5%의 출발 시간을 벌의 채집 시작 시간으로 고려하였고, 정확성을 위해 전체 채집 횟수가 100회를 초과하는 날만 선택하였다. 이에 대한 정보는 Table2와 같다.

Table 2 RFID 실험을 통해 얻은 채이활동에 대한 기본 정보

Date	May 4	May 7	May 8	May 9	May 10	May 11	May 12	May 13
Number of foraging	153	148	193	204	283	300	250	265
Time to start foraging	08:35	10:37	09:59	09:20	09:25	08:55	09:27	09:18

Date	May 14	May 15	May 16	May 17	May 18	May 19	May 20	May 22
Number of foraging	429	381	307	234	236	143	190	161
Time to start foraging	09:07	09:12	08:13	07:40	06:58	06:29	06:23	06:36

가장 빠른 5%에서 감지된 시간의 표준 편차는 1.28시간이며, 평균은 오전 08:31이다. 매일 유의미한 차이가 있었고, 이러한 차이의 기원을 조사하기 위해 다른 환경변수들과의 관계를 살펴보았다. 서울의 일일 평균 기온 및 일출 시간 데이터를 기상청의 Open API에서 수집하였다.

Spearman's 상관계수를 계산하여 채집 시작 시간과 벌집 내부 온도, 서울의 일일 평균 기온, 벌집 이산화탄소 농도, 일출 시간 사이의 상관관계를 분석하였다(Table 3). 채집 시작 시간과 벌집 내 습도 및 이산화탄소농도 간에는 유의미한 관련성이 없

었다. 그러나 벌집 내부 온도와 서울의 기온, 일출 시간과는 유의미한 상관 관계가 있었다. 이러한 상관 관계가 기온이나 일출 시간으로 인한 벌 개체수나 비행시간의 증가와 관련이 있는지 확인하기 위해 그 날의 환경변수와 채집 횟수 사이의 상관성을 분석하였다. 그러나 모든 환경 변수에 대해 유의미한 상관 관계는 관찰되지 않았다(Table 4). 또한, 벌집 내부 온도와 서울의 기온 간에는 높은 상관성이 관찰되었고(0.806, $p < 0.1$), 채집 시작 시간과 채집 횟수 간에는 유의미한 상관 관계(0.191, $p < 0.1$)가 관찰되지 않았다.

Environmental variables	Temperature within hive	Temperature of Seoul	Sunrising time	Concentration of CO2 within hive	Humidity within hive
Spearman's correlation coefficient	-0.888	-0.798	0.804	-0.397	0.238

Table 3 환경변수와 채이 시작 시간 간 Spearman's 상관계수

Environmental variables	Temperature within hive	Temperature of Seoul	Sunrising time	Concentration of CO2 within hive	Humidity within hive
Spearman's correlation coefficient	-0.038	-0.018	-0.022	-0.424	0.050

Table 4 환경변수와 채이 횟수 간 Spearman's 상관계수

채집 시작 시간과 가장 유의미한 상관 관계를 나타낸 변수는 벌집 내부 온도였다. 일출 시간도 상관성이 있었지만, 상관성은 내부

온도와 비교하여 낮았다. 일일 채집 활동의 시작은 일출 시간보다는 내부 벌집 온도와 더 유사한 경향을 나타냈다(Figure 11).

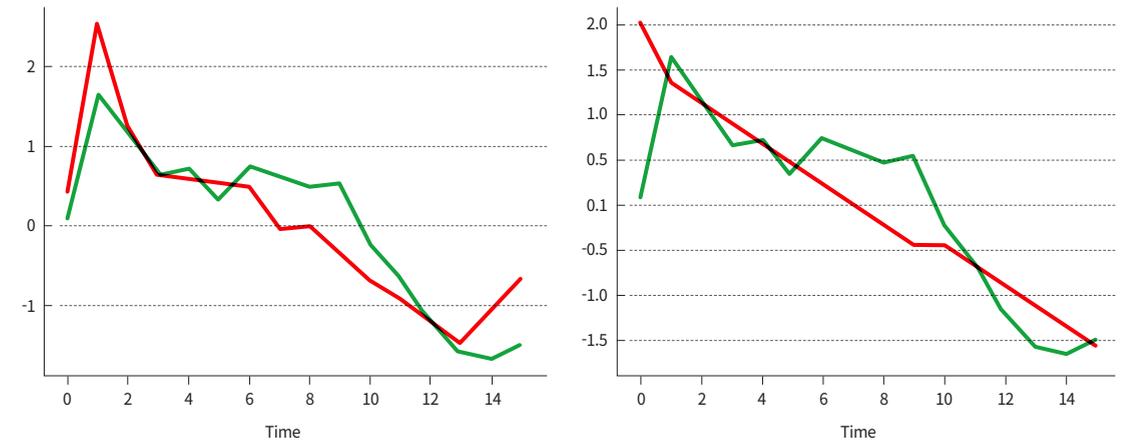


Figure 11 왼쪽 그래프는 정규화된 채이 시작 시간과 정규화된 벌집 내부 온도를 -1을 곱하여 나타내었고, 오른쪽 그래프는 정규화된 채이 시작 시간과 일출 시간을 보여주고 있다.

이어서 벌집 내부 온도가 벌의 채집 시작에 어떻게 영향을 미치는지 이해하기 위한 분석을 수행하였다. 먼저, 벌 활동이 특정 임계 온도에 도달했을 때 시작될 수 있다는 가설을 세웠다. 분석에 사용된 날짜의 평균 기온의 일교차는 5.88°C이었고, 표준 편차는 1.46°C였다. 반면에, 벌집 내부의 하루 동안 평균 온도의 일교차는 3.74°C이었고, 하루 동안 기온의 표준 편차는 0.89°C로 나타나, 적은 변동을 나타냈다. 하지만 벌의 채집 시작을 특정 임계 온도에 도달한 것으로 해석하는 것은 어려웠다. 날짜 간의 온도 차이가 하루 동안 온도의 일교차보다 더 큰 영향을 줄 것이라 기대되기에, Effective Accumulated Temperature 모형을 활용하였다. 벌의 월동에 대한 연구에서 임계 온도는 일반적으로 10~20°C 정도이다. 임계 온도가 15°C

일 때, 전날 저녁 8시부터 채집 시작까지의 유효 온도를 누적함으로써 최소 표준 편차를 얻었다. 따라서 임계 온도를 15°C로 설정하고 누적된 유효 온도가 특정 값에 도달하는 것과 실제 채집 시작 시간 간의 오차율을 계산하였다. 결과는 누적된 효과적인 온도가 10600°C*min에 도달했을 때 최소 오차를 보였으며, 평균 오차율은 38분이었다.

또한, 우리의 모니터링 데이터는 평균 채집 기간이 대략 45분으로 나타났으며, 이는 강한 비가 오지 않은 날에도 일관되게 관측되었다. 가장 빈번한 채이 활동은 정오쯤에 관측되었다 (Figure 12).

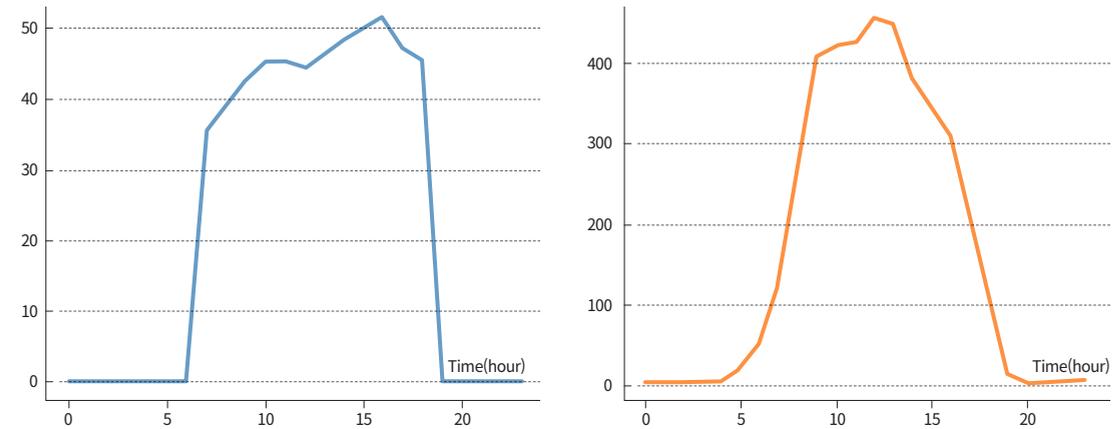


Figure 12 왼쪽 그래프는 평균 채집 기간이 40분에서 50분 사이에 분포함을 나타내고, 오른쪽 그래프는 가장 활발한 채이 활동이 정오쯤에 발생함을 보여준다.

반갑지 않은 방문객: 침입종 (등검은말벌, *Vespa velutina nigrithorax*)

여름 동안 우리가 모니터링한 군집은 말벌(*Vespa*) 종에 의해 공격 받았고, 그 중 등검은말벌(*Vespa velutina nigrithorax*)이 가장 높은 방문수를 보였다 (Figure 13). 이 종은 열대 아시아 원산의 침입 말벌로, 양봉 꿀벌(*Apis mellifera*)의 약 두 배인 약 20mm의 몸 길이를 가지고 있다. 이들은 검은 가슴을 가지고 있으며 전형적인 말벌 종과 같이 육식성이며, 양봉업에 상당한 피해를 입힌다. 이 말벌종은 꿀벌을 사냥하며, 공격성은 인간에게도 위협적이다. 이 말벌은 큰 나무 위에 높이 등지를 만들며, 한 등지에는 3,000명 이상의 개체가 모여 산다. 2003년 부산을 통해 도입된 이후, 빠르게 전국에 퍼져나갔다.

국립생물자원관이 운영하는 한반도 생물다양성 데이터베이스에 따르면, 이 말벌의 군집 분포는 아직 한국의 남부 지역으로 제한되어 있다. 7월 말부터 9월 말까지 우리 실험지에 방문한 말벌들을 포획하기 위해 4개의 트랩을 설치하고 모니터링 하였다.

2018년부터 2020년까지를 조사한 이전의 보고에 따르면, 등검은말벌이 포획된 전체 말벌 중에서 49%를 차지하다가 2020년에 72%로 증가하였다. 이를 바탕으로 추산하여 볼 때, 그 비율이 2023년에는 26% 증가하여 등검은말벌이 우리 실험장 트랩에서 포획된 모든 말벌종의 거의 100%에 달하였고, 이는 이 열대종의 빠른 복상을 보여주고 있다 (Table 5, Figure 14).

Figure 13 서울대학교의 실험 양봉장에서 포획된 말벌



Vespa spp.	The number of catches
등검은말벌 <i>Vespa velutina nigrithorax</i>	488
장수말벌 <i>Vespa mandarinia</i>	6
꼬마장수말벌 <i>Vespa ducalis</i>	3

Table 3 실험 양봉장에서 포획된 말벌 종 별 포획된 수

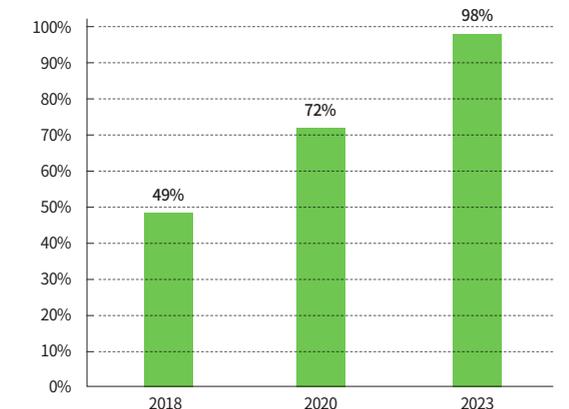


Figure 14 포획된 말벌 중 등검은말벌이 차지하는 비율의 변화

CHAPTER 3 가려진 진실: PM2.5 배출량 증가에 따른 꿀벌의 시계 제한 위험성 확대에 대한 탐구

꿀벌 먹이탐색활동에 있어 알려진 위험과 알려지지 않은 위험

다른 곤충과 마찬가지로, 꿀벌의 생애는 에너지론에 의존한다. 꽃밭 사이를 이동하는 데는 상당한 에너지를 필요로 하며, 특히 꿀벌이나 뒤영벌과 같이 에너지 평형을 섬세하게 관리하는 큰 벌들의 경우 더욱 그러하다. 불리한 채집 조건은 먹이탐색활동 동안의 순 에너지 부족으로 이어질 수 있다. 현재 꿀벌이 직면하고 있는 난관은 먹이 부족, 살충제 노출, 기후변화의 영향 등이 있다. 전 세계적인 꿀벌 개체수 감소의 원인으로 이러한 요인들을 살펴보았으며, 이는 꿀벌이 먹이를 구할 수 있는 환경을 최적화하는 문제에도 해당된다. 여기서 주목해야 할 점은 이러한 요인들은 인간에 의해 발생하였다는 것이다.

또한, 꿀벌의 먹이탐색활동에 영향을 미치는 다른 인위적 요소가 아직 파악되지 않았거나 충분히 연구되지 않았을 가능성이

있다. 꿀벌의 시각적 먹이탐색활동에는 다양한 요인들이 영향을 미치지만, 그중에서도 방향감각은 꿀벌의 먹이 탐색에 매우 중요한 요소이다. 여러 선행연구에 따르면 치명적 수준의 살충제 노출은 꿀벌의 방향을 인지하는 능력을 저하시키며, 나아가 꿀벌의 사망률까지 증가시키는 것으로 밝혀졌다. 그럼에도 불구하고 이러한 연구들은 주로 직접적인 영향만을 조사한다.

이 연구는 대기오염이 증가하면 외역봉의 방향감각이 저하될 수 있다는 가설에 기반을 두었다. 이 가설은 선행 편광된 태양광에 포함된 광학 정보를 활용한 방향 탐색에 초점을 맞추고 있다. 인위적인 에어로졸의 농도가 높아지면 복사선의 과도한 산란을 통해 전자기 복사의 주요한 특징인 태양광 편광의 정도가 감소한다. 편광의 정도(강도), 특히 선행편광(DoLP)의 정도가 감소하면



© Shutterstock / Paapaya / WWF

태양이 가려질 때 탐색 능력이 편광 신호에 의존하여 방향을 찾는 대부분의 곤충들에게 악영향을 미칠 수 있다. 그중에서도 중요한 수분매개자 중 하나인 꿀벌(*Apis mellifera*)은 선행편광 신호만을 사용하여 방향을 탐색하는 것으로 가장 잘 알려져 있다. 완벽한 방향 설정을 위해, 꿀벌은 비행 중 상공의 시야를 가리지 않는 영역에서 최소 15%의 DoLP(이하 ‘탐색 임계값’)를 필요로 한다. 그러나 높은 수준의 대기오염은 꿀벌의 탐색 임계값 이하로 DoLP를 약화시켜 결국 맑은 하늘에 대한 가시성을 제한함으로써 꿀벌의 탐색 능력을 손상시킬 수 있다. 이는 꿀벌 군집의 지속가능성뿐만 아니라 꿀벌이 식물 번식을 위해 제공하는 필수적인 생태계 서비스인 수분에도 영향을 미친다.

꿀벌의 눈에 보이는 상공 가시성(이하 ‘가시성’)은 인간 눈에 보이는 대기 가시성과 유사하며, 이는 둘 모두 주로 대기 중 에어로졸 입자에 의한 빛의 산란에 의해 영향 받기 때문이다. 대기 가시성과 대기 중 미립자 물질의 질량농도 사이의 강한 상관관계는 가까운 미래의 잠재적 대기 가시성 변화를 추정하는 몇 가지의 대기질 예측에 이미 적용된 바 있다. 하지만 꿀벌의 미래 가시성을 예측하려는 시도는 없었다. 충분하지 않은 실증적 증거로 인하여, 대기오염이 수분매개자에 대한 현재 또는 새롭게 나타나는 위협으로 확인된 적은 거의 없다. 그러나 최근의 한 현장 연구에서 도시 대기오염 수준과 꿀벌 먹이탐색활동 지속 시간 사이에 강한 상관관계가 있는 것으로 나타났다. PM2.5(공기역학적 직경이 2.5 μ m 미만인 입자) 질량농도(~400 μ g m⁻³)로 표시되는 대기질이 좋지 않을 때, 외역봉은 평소보다 약 1.7배 더 오래 먹이탐색활동을 하는 것으로 나타났다. 먹이활동탐색 시간의 증가는 먹이 탐색 기능 저하의 강력한 증거로 판단된다. 여러 모델링 연구를 통하여 서식지 감소 및 기후변화 등과 같이 잘 알려진 인위적 위협이 꿀벌에게 미칠 영향을 예측한 바 있다. 그러나 대기질이 꿀벌의 시각적 탐색에 미치는 영향을 정량적으로 분석한 연구는 아직 없다.

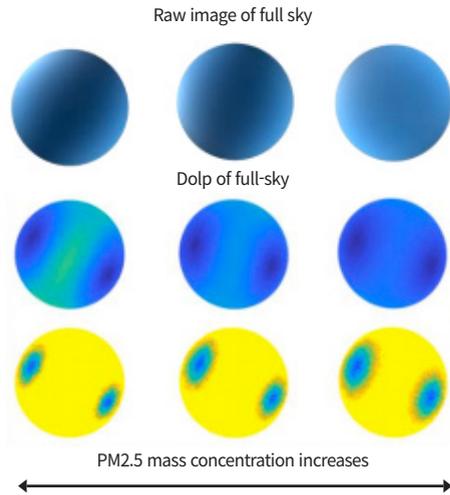
가설 검증을 위하여 “PM2.5”로 표시되는 지상에서 측정된 PM2.5 질량농도와 천체 선행편광 정도(DoLP) 사이의 실증적 상관관계를 설정하였다. 이 상관관계를 통하여 PM2.5가 광산란 및 대기 가시성에 미치는 주요한 영향을 기반으로 대기 전체의 DoLP 분포를 예측할 수 있다. 다중 산란 시뮬레이션은 DoLP 변화가 미립자에 가장 잘 반응한다는 것을 입증하였다. 이를 위하여, 이 연구는 지상 기반 디지털 전천 이미지 시스템(지상 기반 이미지 편광계)을 활용하여 2018년부터 2019년까지, 그리고 2020년부터 2021년까지 수집된 구름 없는 전체 하늘 이미지에서 천체 DoLP를 분석하였다. 각 관측의 태양광 편광 상태는 스톡스 매개변수(Stokes parameter)를 사용하여 표현되었다. 결과적으로, 이 연구는 PM2.5와 DoLP 사이의 실증적 관계를 매개변수화하여 하늘 전체의 DoLP 분포를 차트화 하였다. 이 매개변수화는 ECHAM5/MESSy 대기 기후 화학 모델(EMAC)에 의해 시뮬레이션된 전세계 PM2.5 분포를 활용하여 대기질 예측 결과에 적용되었다. 모델은 BaU(Business-as-usual) 인위적 배출 시나리오를 기반으로 하였다. 이 연구는 2050년에 최소 하루 동안 꿀벌의 시야가 제한될 수 있는 ‘위험 핫스팟’ 지역(위도 및 경도 1.1° X 1.1°)을 확인하였다.

제한된 가시성은 식물 번식에 매우 중요한데, 수분매개자의 탐색 실패로 인하여 수분손실이 단 하루만 발생하여도 악영향을 미칠 수 있기 때문이다. 마지막으로, 이 연구는 전 세계, 지역적 및 국가 규모로 위험 핫스팟의 공간적 범위(면적)와 핫스팟 당 제한된 가시성 일수(LVD)의 빈도를 연간 및 계절별로 평가하였다. 또한, LVD 빈도 증가에 의해 위험 핫스팟 범위가 증가하는 것으로 추정하였다. 이러한 분석에 있어 기존 연도 자료와 동일한 모델의 2010년 PM2.5 예측이 사용되었다.

PM2.5 질량농도와 선형 편광도 간의 관계

지상 기반 이미지 편광 측정을 기반으로, 이 연구는 하늘을 가로지르는 DoLP 분포와 지상에서 측정된 PM2.5 사이의 관계를 설정하였다. DoLP 분포는 태양-반태양 경계를 따라 축 대칭을 나타냈으며, DoLP는 태양 근처에서 가장 낮고 천정(태양

로부터 90° 주위에서 가장 높았다. 대기 중 PM2.5 농도가 증가함에 따라 탐색 임계값(15%) 미만의 DoLP가 있는 대기 영역이 확장되어, 이는 꿀벌의 탐색에 유용한 편광 신호가 포함된 대기 영역이 감소된 것을 의미한다(Figure 15).



대기의 PM2.5와 DoLP 분포 간의 실증적 관계를 설정하기 위하여, 이 연구는 관측 데이터를 기반으로 비선형 최소 자승(NLS) 회귀 모델을 개발하였다. 향후 추정을 위하여, 각 관측에 대한 대기 전체의 평균 및 30 최대 DoLP를 활용하여 탐색 임계값에 해당하는 PM2.5의 가능 범위를 확인하였다. 관측 평균(Figure 16)과 최대 DoLP는 PM2.5(평균 및 최대 DoLP 모두 $p < 0.001$)가 증가함에 따라 감소하였다. 모델은 평균 및 최

대 DoLP의 탐색 임계값과 일치하는 PM2.5의 하한을 $130 \mu\text{g m}^{-3}$ 로, 상한을 $240 \mu\text{g m}^{-3}$ 으로 추정하였다. 이는 대기 중 PM2.5가 두 임계값 농도를 초과할 경우, 꿀벌의 탐색 장애가 발생할 가능성이 있음을 의미한다. 임계 농도로 적용된 PM2.5 값이 $130 \mu\text{g m}^{-3}$ 와 $240 \mu\text{g m}^{-3}$ 라는 추정을 각각 확률이 높은 예측(Most Probable, 이하 MP)과 상한계 예측(Higher-End, 이하 HE)으로 하여 분석하였다.

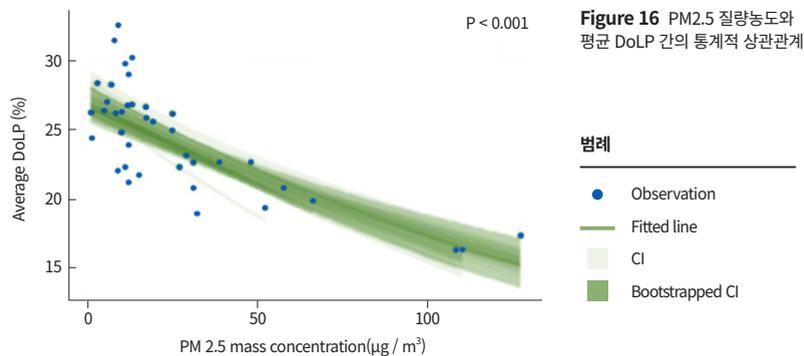


Figure 16 PM2.5 질량농도와 평균 DoLP 간의 통계적 상관관계

2050년 꿀벌의 시계 제한 위험성에 대한 전 세계 전망

2010년과 비교하여 2050년의 위험 핫스팟 면적과 제한 가시성 일수(LVD) 빈도의 연간 총 변화는 지역 및 국가에 따라 다르다 (Table 6, Figure 17).

Table 6 위험 핫스팟의 2050년 공간적 분포(면적) 및 2010 대비 증가율. E. Mediterranean: Eastern Mediterranean, N. America: North America, S. America: South America, S-E. Asia: South-Eastern Asia, W. Pacific: Western Pacific.

Region	MP estimation		HE estimation	
	Spatial extent of risk hotspots in 2050 (km ²)	Δ between 2010–2050 (%)	Spatial extent of risk hotspots in 2050 (km ²)	Δ between 2010–2050 (%)
Global	28,095,000	20.0	10,338,000	16.0
Africa	10,198,000	0.5	5,457,000	1.6
E. Mediterranean	2,506,000	5.7	1,052,000	12.5
Europe	3,595,000	20.1	470,000	28.1
N. America	94,000	0.00	0	-
S. America	1,188,000	1.4	207,000	0.00
S-E. Asia	4,337,000	318.3	906,000	529.2
W. Pacific	6,177,000	13.7	2,246,000	20.9



2010년에 MP 및 HE예측에 의해 확인된 위험 핫스팟은 사하라 이남 아프리카 지역에서 주로 관찰되었다. 이 지역은 이미 높은 수준의 PM2.5에 직면하였고 2010년에 수많은 위험 핫스팟이 있었으며, 눈에 띄는 LVD 빈도 증가 없이 2050년에 높은 수준의 PM2.5가 지속될 것이라 예상된다. PM2.5는 2050년에 인

도와 중국에서 크게 증가할 것이라 예측되며, 두 국가는 2010년에 비해 2050년에 LVD 빈도 증가 핫스팟 전체 면적 증가에 40% 이상 기여한다. 인도 북부 지역의 경우, MP 예측에 따르면 꿀벌의 LVD 빈도는 최소 100일 이상 증가할 것이라 예측된다. 추가적으로, 중국의 동북부 일부 지역에서는 LVD가 20일 이상

증가할 것으로 예측된다. 예측된 LVD 빈도 증가는 MP 예측보다 HE 예측에서 덜 두드러지게 나타났지만, 북동부 인도 대부분 지역에서의 LVD 빈도는 20일 이상 증가하는 것으로 추정된다. 2010년과 2050년 사이, 사하라 이남 지역의 LVD 빈도는 10일 미만으로 예측된다. 하지만 차드, 니제르, 알제리와 같은 일

부 국가는 꿀벌에게 가장 어려운 환경을 가지며, 두 가지 추정에 따르면 약 일년 내내 비행 중 교란될 수 있다. 또한, 두 가지 추정 모두 인도에 이어 방글라데시, 이집트에서 발생한 LVD 최대 발생 건수가 가장 많이 증가한 것으로 나타났다.

Spatial distribution of hotspots and the frequency of LVD in 2010

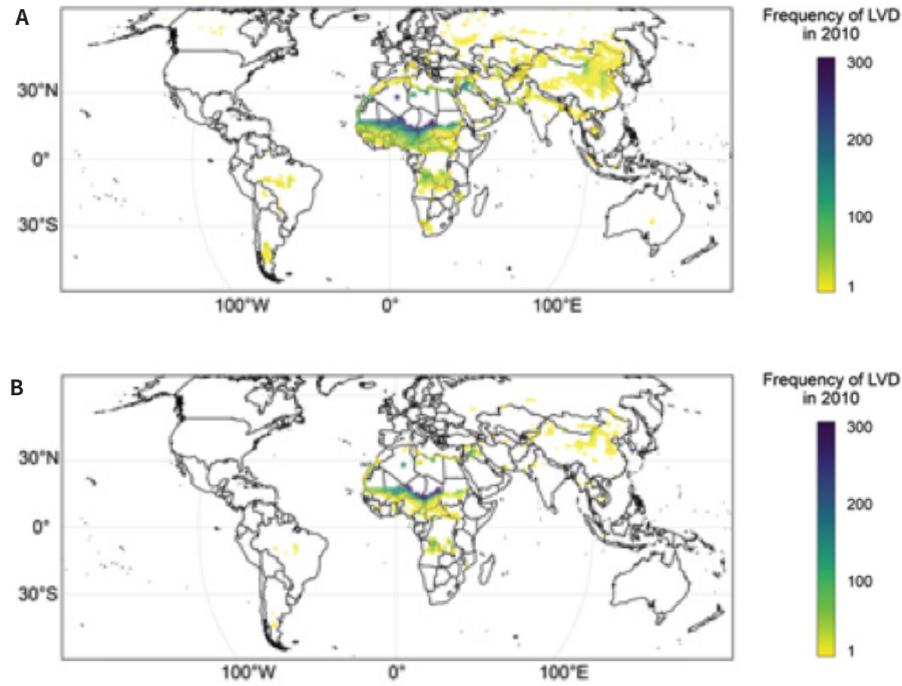


Figure 17 2010년 가시성 제한 일수 빈도수의 지역적 분포(a, b) 및 2050년 예측된 이러한 분포의 변화(c, d)를 보여주고 있다.

Spatial distribution of risk hotspots and changes in the frequency of LVD in 2010

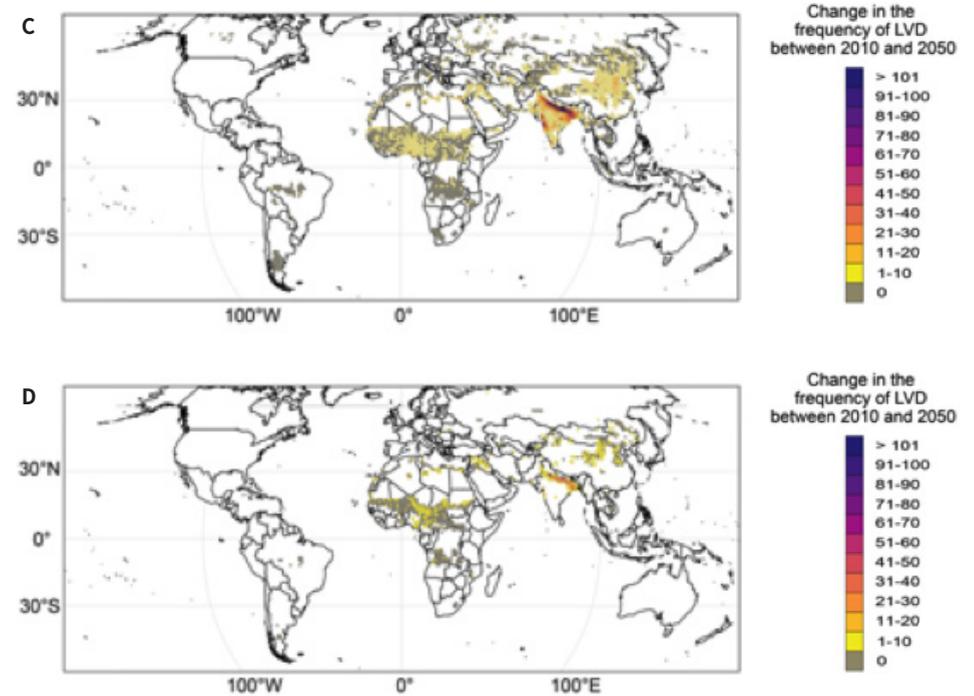


Figure 17 2010년 가시성 제한 일수 빈도수의 지역적 분포(a, b) 및 2050년 예측된 이러한 분포의 변화(c, d)를 보여주고 있다.

2010년에 포착된 대부분의 핫스팟은 현 상태를 유지하거나 2050년에 LVD 수가 적어도 하루 이상 증가할 것으로 추정되었다(Figure 18). 이와는 대조적으로, 극소수의 핫스팟만이 LVD 빈도 감소하는 현상을 경험할 수 있을 것이다. 2050년의 MP 예측에 따르면, LVD 빈도는 새롭게 출현하는 핫스팟 지역을 포함한 1,460만 km² 면적에서 최소 하루 증가할 것이다. 또한, HE 예측에 따르면 더 넓은 지역은 변화가 없을 것이라 예상된다. 하지만, 440만km²의 위험 핫스팟은 LVD 빈도가 증가할 것이라 예상된다. 전반적으로, MP 예측에 따르면 2050년까지 위험 핫스팟은 아프리카 크기와 맞먹는 약 2,800만km² 수준의 영역이 전 세계적으로 분산될 것이라 예상되며, 이는 핫스팟 면적이

2010년보다 20% 증가하였음을 나타낸다. HE 예측은 위험 핫스팟이 2010년에서 2050년 사이 16%의 면적 증가와 함께 약 1,000만 km²에 걸쳐 분포할 것이라 예측하고 있다. 특히나 지역 간 차이가 크게 나타난다. 동남아시아에서 MP 예측과 HE 예측에 의해 포착된 위험 핫스팟의 공간적 범위는 각각 약 318%와 530% 증가할 것이다. 두 가지 예측 모두 북미와 남미 지역 위험 핫스팟 면적 확장이 거의 또는 전혀 확인되지 않는다. 또한, HE 예측보다 MP 예측의 위험 핫스팟 면적 증가가 더 큼에도 불구하고, HE 예측에서 남미를 제외한 다른 지역에서는 지역별로 평가된 면적 범위 변화가 상대적으로 덜 우호적이라는 점에 주목할 필요가 있다.

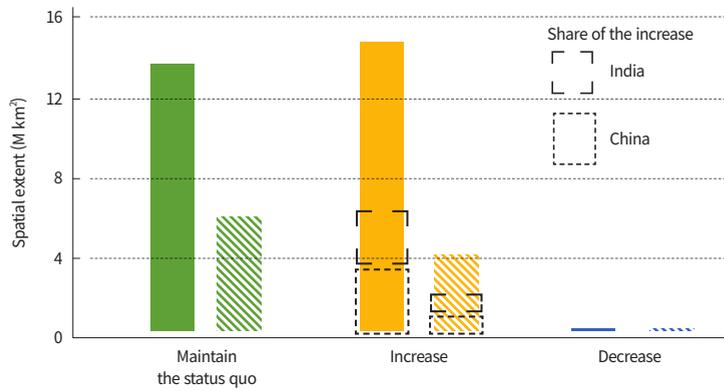


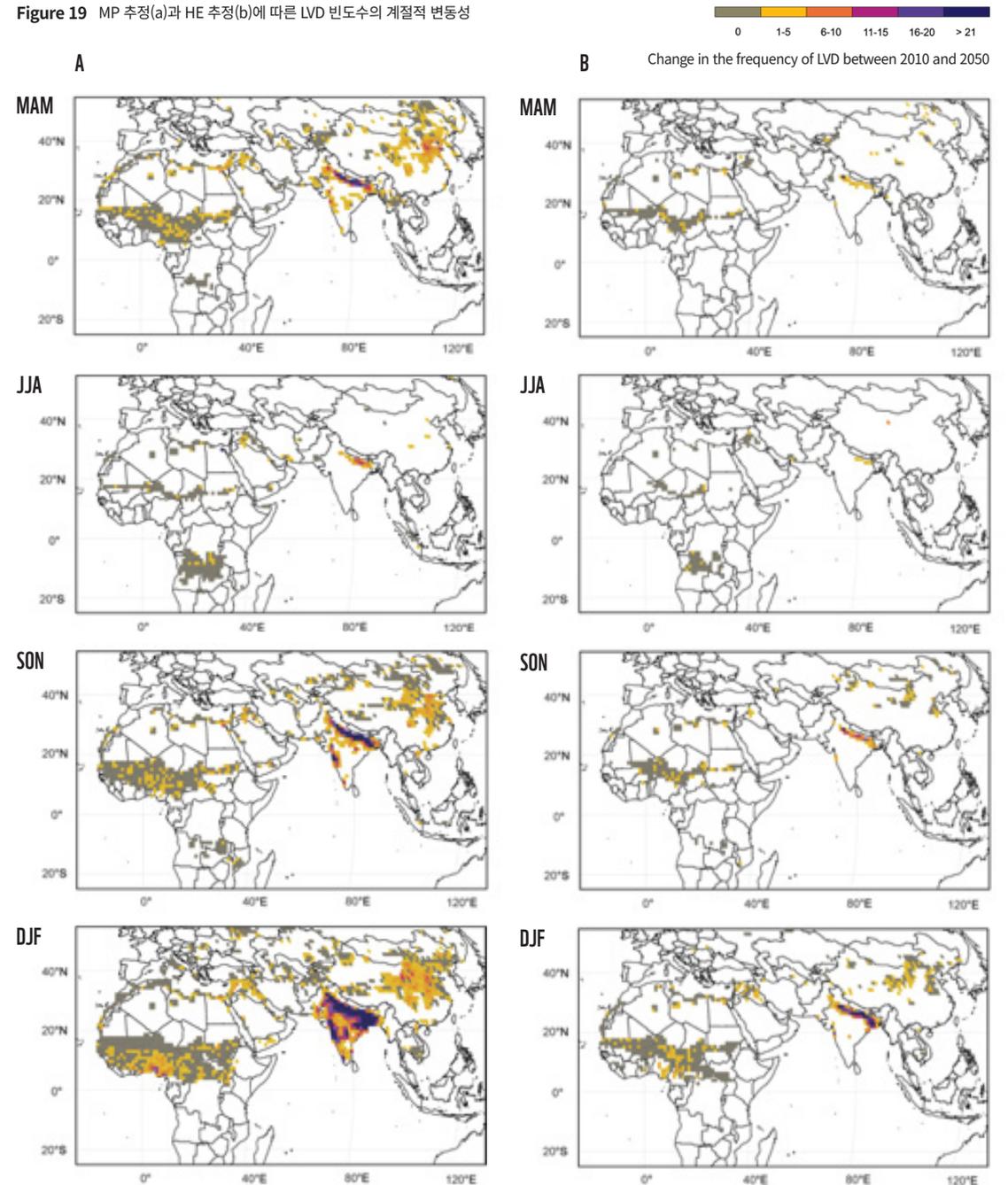
Figure 18 2010년과 2050년 사이 위험 핫스팟 면적의 증감

범례
 ■ MP estimation
 ▨ HE estimation

계절성은 식물-수분매개자 상호관계의 역할에 있어 중요한 요소이기 때문에 Figure 19는 MP 예측과 HE 예측에 의해 평가된 LVD 빈도 향상의 계절적 변동성을 보여준다. 여기에서는 위험 핫스팟이 가장 우세할 것이라 예측되는 지역으로 아프리카, 지중해 동부, 동남아시아, 서태평양 지역을 대상으로 하였다. 전 세계적 규모에서 LVD 빈도 증가를 동반한 면적의 증가는 12월-1월-2월(DJF)에 가장 크게 나타날 것이라 예측되며, 그 이

후로는 3월-4월-5월(MAM), 9월-10월-11월(SON) 순으로 나타날 것으로 예측된다. 비관적 추정에 따르면 6월-7월-8월(JJA), 그리고 HE 예측에 따르면 DJF, SON, MAM, JJA 순으로 나타날 것이다. 2050년 위험 핫스팟 공간적 범위는 DJF가 가장 클 것으로 예측되며, 두 가지 예측 모두에서 SON, MAM, JJA가 그 뒤를 이을 것이라 예상된다.

Figure 19 MP 추정(a)과 HE 추정(b)에 따른 LVD 빈도수의 계절적 변동성



인도와 중국은 꿀벌이 증가된 LVD 빈도를 경험할 수 있는 위험 핫스팟의 면적 증가에 가장 큰 부분을 차지한다. 인도의 경우, MP 예측에 따르면 위험 핫스팟의 예측된 총 면적은 2050년에 260만 km² 으로, 2010년에 기록된 50만 km² 보다 5배 증가할 것이라 예상된다(Figure 20). 2010년부터 인도의 거의 모든 위험 핫스팟은 LVD 수가 증가할 가능성이 높다. LVD 빈도가 20일 이상 증가한 위험 핫스팟의 면적은 국토의 식생이 있는 지표면의 약 30%를 포함하여 증가량이 작은 위험 핫스팟을 능가한다. 전반적으로, MP 예측에 따르면 식생 지표면의 90%에서 LVD 빈도가 증가할 것이라 예상된다. HE 예측에서 2050년의 위험 핫스팟 예상 공간 범위는 70만 km² 이며, 2010년부터 거의 모든 핫스팟에서 LVD 빈도가 증가할 것이라 예상된다.

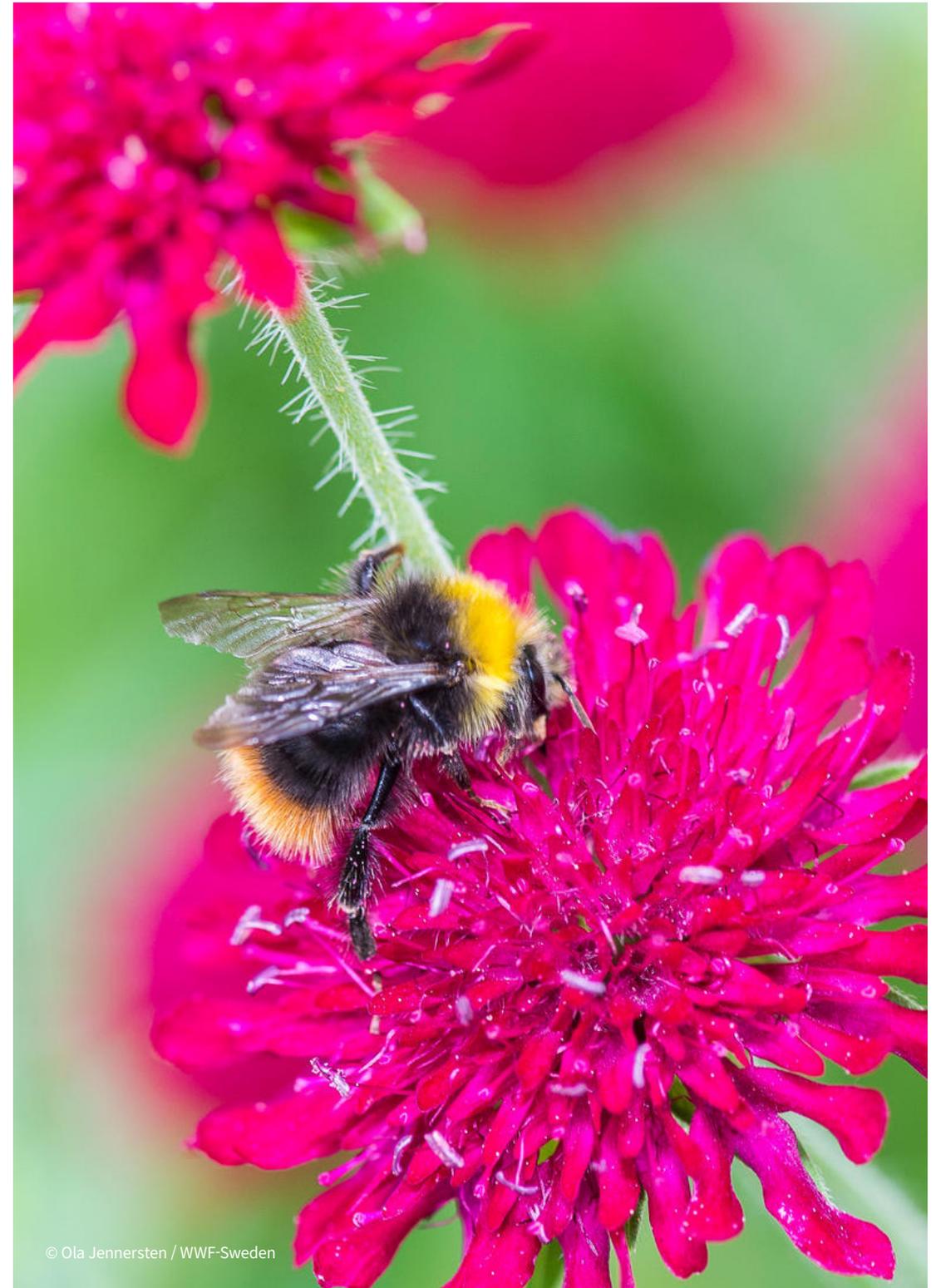
중국에서 위험 핫스팟의 총 면적은 2050년까지 520만 km² 에 도달할 것이라 예상되며, 이는 2010년에 기록된 460만 km² 와 비교했을 때 1.13배 증가한 값과 동일하다(Figure 20). 2010년 핫스팟 지역 80% 이상을 차지하는 380만 km² 면적의 위험 핫스팟은 LVD 빈도 증가 전망을 보인다. 전체 식생 지표면의 40% 다 다르지는 대부분의 위험 핫스팟은 작은 증분(1-5 일)을 겪게 될 것이다. 그럼에도 불구하고, 우리의 추정치는 이러한 위험 핫스팟의 면적(3백만 km²)은 모든 국가 중에서 가장 크다는 것을 밝혀냈다.

아시아에서 2050년까지 대기질 악화가 꿀벌의 탐색활동에 미칠 잠재적 영향이 가장 두드러지게 나타나기에 특히나 중국과 인도의 주의를 필요로 하는 실정이다. 인도는 전 세계 과일 및 채소 생산국 중 두 번째로 큰 국가이다. 사실, 인도 인구의 70% 이상은 수입의 원천으로서 농업에 의존한다. 몇몇 지역에서는 꿀벌 수분에 의존하는 농업 생산이 DJF 시즌에도 활발히 이루어지는데, 이는 우리가 추정된 위험도가 가장 높은 것으로 파악된다. 중국은 최근 수십 년 동안 관찰된 상당한 성장과 더불어 전 세계적으로 수분 매개로 인한 상당한 경제적 이익을 얻은 국가이다. 인도와 중국에서의 농업 생산에 있어서 수분 수요 충족 실패는 전 세계적인 식량 부족과 미세 영양소 결핍으로 이어질 수 있다.

주요 수분 이익 수혜자인 중국과 인도는 또한 인위적인 에어로졸의 가장 큰 배출국이다. 최근 몇 년간 이들 국가의 많은 도시(e.g., 인도-갠지스 평원 일부, 델리, 인도 중부 지역 및 중국 수도 허베이성)의 연평균 PM2.5 가 우리의 분석에서 정의된 임계 농도를 초과하였다. 이는 특히나 인도에서의 주요한 우려 사항이다. 우리의 분석에 채택된 실현 가능한 BaU(Business-as-Usual) 시나리오 외에도 2050년까지 인도 상공의 대기 PM2.5 는 더 낮은 배출 시나리오에서도 증가할 것이라 예측된다.



PM2.5 질량농도로 표시되는 대기질 수치가 좋지 않을 때, 더 오래 먹이탐색활동을 하는 것으로 나타났는데 이는 먹이 탐색 기능 저하의 강력한 증거로 판단된다.



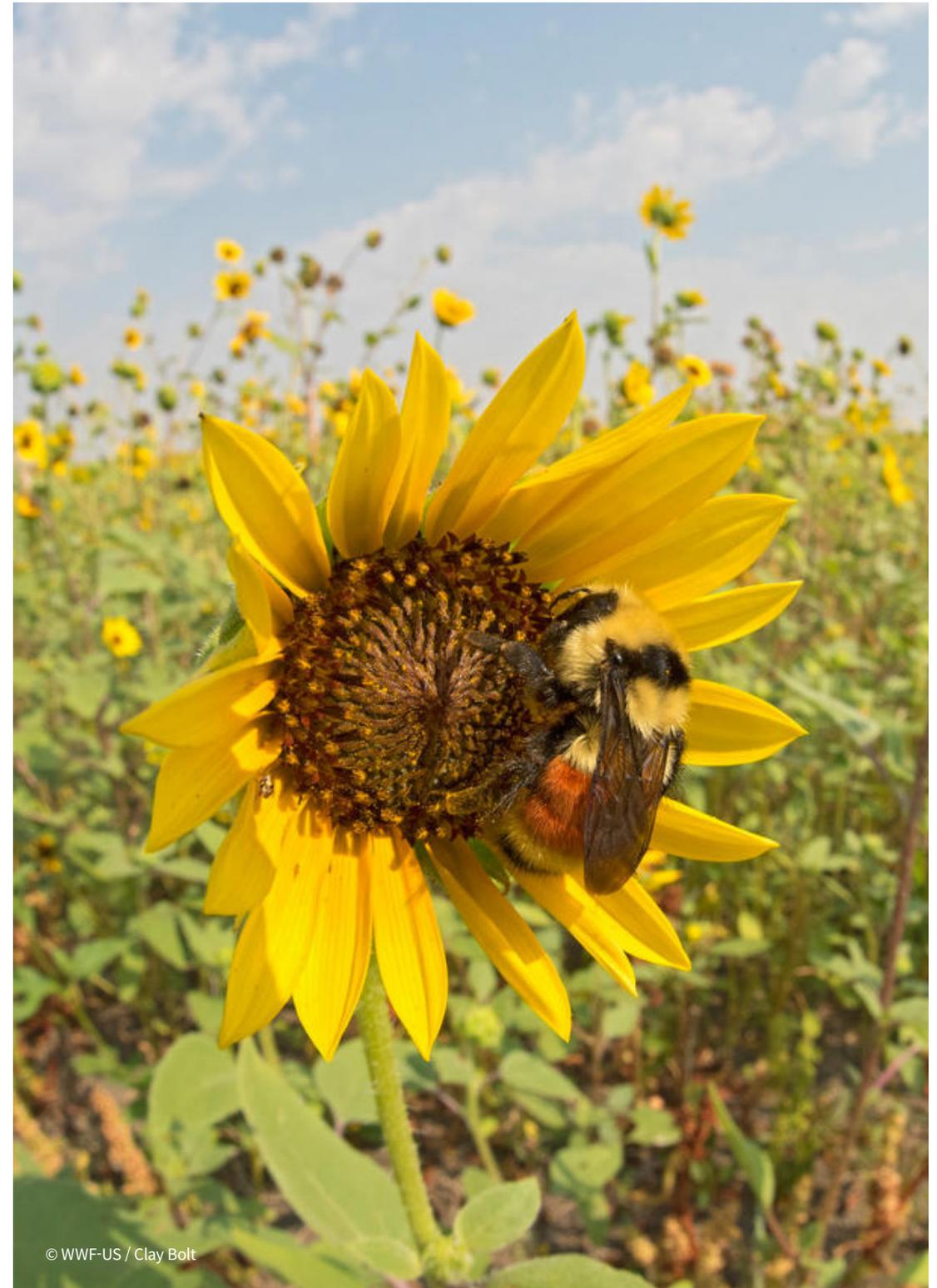
© Ola Jennersten / WWF-Sweden

CHAPTER 4 결론

수분서비스를 연구하는 생태학 분야가 양적으로, 또 질적으로 많은 성과를 왔으나 여전히 탐구 되지 않은 연구 질문들이 남아 있다. 수분서비스는 경제적 이익 뿐만 아니라 기본적인 생태계 서비스 유지에도 중요한 역할을 한다. 그러나 전지구적 별 개체 수는 다양한 생물학적 및 비생물학적 요인에 기인한 감소를 겪고 있다. 특히 꿀벌 군집의 취약성에 영향을 미치는 인간 활동에 의한 다양한 요인들이 연구되어 왔다. 꿀벌 개체수 감소에 영향을 주는 요인에 중점을 둔 많은 연구들이 진행되었지만, 대기질이 수분활동에 미치는 영향을 평가한 연구는 많이 찾아볼 수 없다. 인간 활동으로 인한 대기 중 미세먼지 농도의 상승은 선형 편광된 태양빛의 강도를 감소시켜, 많은 곤충 종이 비행에 있어 의존하는 시각적 정보 또한 감소시킨다. 대기 중 미세먼지 증가가 다른 알려진 원인들과 어떻게 상호 작용하는지에 따라 꿀벌 개체수의 감소는 더욱 악화될 수 있다. WWF-Korea가 지원하는 HIVE 프로젝트에서는 벌의 수확에 대한 기본 데이터를 수집하고, 대기질의 악화가 벌의 공중 하늘 가시성 및 따라서 항법에 미치는 잠재적인 영향을 탐색했다. 우리의 연구 결과는 PM2.5 농도의 상승이 편광 빛의 정도를 감소시킨다는 것을 보여준다. 이 발견을 기반으로 우리는 시야가 제한될 위험이 높

은 지역이 주로 아프리카, 인도, 중국 지역에 위치해 있을 것으로 예측했다.

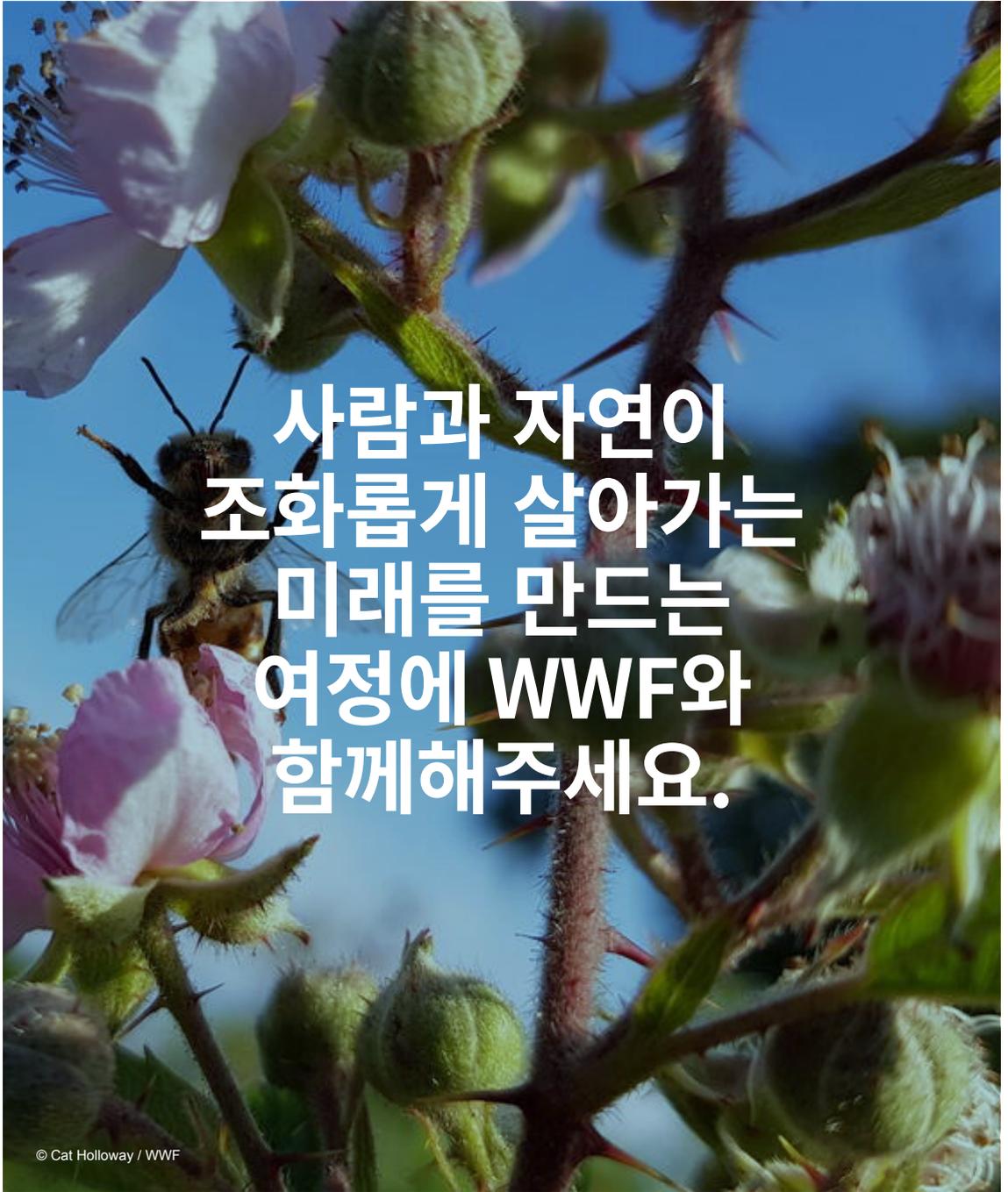
위험 핫스팟은 전 세계적으로 고르지 않은 분포를 나타내며, 이러한 경향은 지속될 것이다. 그럼에도 불구하고, 이 영향은 국경을 초월하여 나타날 수 있기에 대기질 관리를 위한 국제적 협력이 필요하다. 몇몇 사례는 특히나 단기적으로도 엄격한 규제 (PM2.5 통제의 직접적인 목표 여부와 관련없이) 하에서 대기 PM2.5 감소를 보여주었기에, 긍정적인 전망을 보이기도 한다. 특히, 중국은 강력한 대기질 완화 정책으로 인해 최근 전국적으로 대기질이 향상되었다. 이러한 긍정적인 추세가 지속된다면, 중국에서의 꿀벌의 제한된 가시성의 위험은 이 연구에서 제시된 예측보다 더 적게 나타날 수 있다. 하지만, 에어로졸 전구체 배출량 감소가 지형적, 기상학적 영향뿐만 아니라 에어로졸 간의 상호작용에 의해 상쇄되어 잠재적으로 PM2.5의 증가로 이어질 수 있음에 주의해야 한다. 이 연구는 식물-수분매개자의 상호작용을 보호하기 위하여 대기질 규제의 중요성을 강조하는 바이다.



© WWF-US / Clay Bolt

참고 문헌

1. Akimoto, H. J. S. Global air quality and pollution. *Science* 302, 1716-1719(2003).
2. Aizen, M. A. et al. Global agricultural productivity is threatened by increasing pollinator dependence without a parallel increase in crop diversification. *Glob. Change Biol* 25, 3516-3527(2019).
3. Ashman, T.-L. & Schoen, D. J. How long should flowers live? *Nature* 371, 788-791.(1994).
4. Balbuena, M. S. et al. Effects of sublethal doses of glyphosate on honeybee navigation. *J. Exp. Biol.* 218, 2799-2805(2015).
5. Baldasano, J. M., Valera, E. & Jiménez, P. Air quality data from large cities. *Sci. Total Environ.* 307, 141-165(2003).
6. Boesche, E., Stammes, P., Ruhtz, T., Preusker, R. & Fischer, J. Effect of aerosol microphysical properties on polarization of skylight: sensitivity study and measurements. *Appl. Opt.* 45, 8790-8805(2006).
7. Bhalchandra, W., Baviskar, R., Nikam, T. Diversity of nectariferous and polleniferous bee flora at Anjaneri and Dugarwadi hills of Western Ghats of Nasik district (MS) India. *J. Entomol. Zool. Stud.* 2, 244-249 (2014).
8. Brines, M. L. & Gould, J. L. Skylight polarization patterns and animal orientation. *J. Exp. Biol.* 6, 69-91(1982).
9. Brown, M. J. et al. A horizon scan of future threats and opportunities for pollinators and pollination. *PeerJ* 4, e2249(2016).
10. Cho, Y. et al. Foraging trip duration of honeybee increases during a poor air quality episode and the increase persists thereafter. *Ecol. Evol.* 11, 1492-1500(2021).
11. Christmann, S. Do we realize the full impact of pollinator loss on other ecosystem services and the challenges for any restoration in terrestrial areas? *Restor. Ecol.* 27, 720-725(2019).
12. Cornelissen, B., Neumann, P. & Schweiger, O. Global warming promotes biological invasion of a honey bee pest. *Glob. Change Biol.* 25, 3642-3655(2019).
13. Degen, J. et al. Exploratory behaviour of honeybees during orientation flights. *Anim. Behav.* 102, 45-57(2015).
14. Dhaka, S. K. et al. PM_{2.5} diminution and haze events over Delhi during the COVID-19 lockdown period: an interplay between the baseline pollution and meteorology. *Sci. Rep.* 10, 13442(2020).
15. Ellis, A. M., Myers, S. S. & Ricketts, T. H. Do pollinators contribute to nutritional health? *PLoS one* 10, e114805(2015).
16. Fischer, J. et al. Neonicotinoids interfere with specific components of navigation in honeybees. *PLoS one* 9, e91364(2014).
17. Ford, B. et al. Future fire impacts on smoke concentrations, visibility, and health in the contiguous United States. *GeoHealth* 2, 229-247 (2018).
18. Hinds, W. C. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, Edn. Second (A Wiley-Interscience publication, USA; 1999).
19. Henry, M. et al. A common pesticide decreases foraging success and survival in honey bees. *Science* 336, 348-350(2012).
20. Imbach, P. et al. Coupling of pollination services and coffee suitability under climate change. *PNAS* 114, 10438-10442(2017).
21. Kreuter, A., Emde, C. & Blumthaler, M. Measuring the influence of aerosols and albedo on sky polarization. *Atmos. Res.* 98, 363-367 (2010).
22. Lautenbach, S., Seppelt, R., Liebscher, J. & Dormann, C. F. Spatial and temporal trends of global pollination benefit. *PLoS one* 7, e35954 (2012).
23. Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D. & Pozzer, A. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525, 367-371(2015).
24. Liu, M., Bi, J. & Ma, Z. Visibility-based PM_{2.5} concentrations in China: 1957-1964 and 1973-2014.
25. *Environ. Sci. Technol.* 51, 13161-13169(2017).
- Luan, T., Guo, X., Guo, L. & Zhang, T. Quantifying the relationship among PM_{2.5} concentration, visibility and planetary boundary layer height for long-lasting haze and fog-haze mixed events in Beijing city. *Atmos. Chem. Phys.* 18, 1-39(2017).
26. Martin, M. V. et al. How emissions, climate, and land use change will impact mid-century air quality over the United States: a focus on effects at National Parks. *Atmos. Chem. Phys.* 14, 26495-26543(2014).
27. Martins, A. E., Camargo, M. G. G. & Morellato, L. P. C. Flowering phenology and the influence of seasonality in flower conspicuousness for bees. *Front. Plant Sci.* 11, 2301(2021).
28. Otto, C. R. et al. Past role and future outlook of the Conservation Reserve Program for supporting honey bees in the Great Plains. *PNAS* 115, 7629-7634(2018).
29. Potts, S. G. et al. Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends Ecol. Evol.* 25, 345-353(2010).
30. Potts, S. G. et al. Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature* 540, 220-229(2016).
31. Pozzer, A. et al. Effects of business-as-usual anthropogenic emissions on air quality. *Atmos. Chem. Phys.* 12, 6915-6937(2012).
32. Rabeling, S. C. et al. Seasonal variation of a plant-pollinator network in the Brazilian Cerrado: Implications for community structure and 33. robustness. *PLoS one* 14, e0224997(2019).
33. Rader, R., Reilly, J., Bartomeus, I. & Winfree, R. Native bees buffer the negative impact of climate warming on honey bee pollination of 34. watermelon crops. *Glob. Change Biol.* 19, 3103-3110(2013).
34. Singh, A., Bloss, W. J. & Pope, F. D. 60 years of UK visibility measurements: impact of meteorology and atmospheric pollutants on visibility. *Atmos. Chem. Phys.* 17, 2085-2101(2017).
35. Søvik, E., Perry, C. J., LaMora, A., Barron, A. B. & Ben-Shahar, Y. Negative impact of manganese on honeybee foraging. *Biol. Lett.* 11, 20140989(2015).
36. Stein, K. et al. Bee pollination increases yield quantity and quality of cash crops in Burkina Faso, West Africa. *Sci. Rep.* 7, 17691(2017).
37. Steffan-Dewenter, I., Potts, S. G., Packer, L. Pollinator diversity and crop pollination services are at risk. *Trends Ecol. Evol.* 20, 651-652 (2005).
38. Tibesigwa, B., Siikamäki, J., Lokina, R. & Alvsilver, J. Naturally available wild pollination services have economic value for nature dependent smallholder crop farms in Tanzania. *Sci. Rep.* 9, 3434(2019).
39. Von Frisch, K. *The dance language and orientation of bees* (Harvard University Press, 2013). Wang, X., Zhang, R. & Yu, W. The effects of PM_{2.5} concentrations and relative humidity on atmospheric visibility in Beijing. *J Geophys Res Atmos.* 124, 2235-2259(2019).
40. Won, W.-S. et al. Impact of fine particulate matter on visibility at Incheon International Airport, South Korea. *Aerosol Air Qual. Res.* 20, 1048-1061 (2020).
41. Yao, L. et al. Co-benefits of reducing PM_{2.5} and improving visibility by COVID-19 lockdown in Wuhan. *npj Clim. Atmos. Sci.* 4(1), 1-10(2021).
- Yong, Y. et al. Source apportionment of visibility impairment in a national forest park in east China. *Atmos. Res.* 250, 105371(2021).
42. Zheng, C. et al. Analysis of influential factors for the relationship between PM_{2.5} and AOD in Beijing. *Atmos. Chem. Phys.* 17, 13473-13489(2017).
43. Zhao, H. et al. Influence of atmospheric aerosols on PM_{2.5}-based visibility impairment: a case study of Shanghai, China. *Sci. Total Environ.* 730, 138994(2020).



사람과 자연이 조화롭게 살아가는 미래를 만드는 여정에 WWF와 함께해주세요.

© Cat Holloway / WWF



WWF는 자연환경 파괴를 막고
자연과 인간이 조화롭게 공존하는 미래를 위해
일하는 세계 최대 규모의 자연보전기관입니다.

together possible. wwfkorea.or.kr

© 2023

© 1986 판다 도형 WWF - World Wide Fund for Nature 세계자연기금 (전 World Wildlife Fund 세계야생동물기금)

® 'WWF'는 WWF의 등록상표입니다.