



KOREA

기상 변동성과 침입 포식자의
확산을 통해 기후변화가
꿀벌 군집에 미치는 영향

WWF(World Wide Fund for Nature, 세계자연기금)
WWF는 세계 최대 규모의 비영리 자연보전기관으로 세계 100여 개 국가에서 3,800만 명 이상의 서포터즈와 함께 활동하고 있습니다. WWF의 미션은 자연 파괴를 막고 사람과 자연이 조화롭게 살아가는 미래를 만드는 것입니다. 이를 위해 전 세계 생물다양성을 보전하고, 자연 자원이 지속가능하게 사용될 수 있도록 방향을 제시하며, 자원 낭비와 오염을 줄이는 인식 증진 활동에 힘쓰고 있습니다. 2014년 공식 설립된 한국WWF는 ‘지구를 지키는 힘’이 될 수 있도록 다양한 이해 관계자들과 협력하고 있습니다. 자세한 내용은 wwfkorea.or.kr에서 확인할 수 있습니다.

발행인: 박민혜
발행처: 한국WWF
연구책임자: 정수중(서울대학교 환경대학원 교수)
연구원: 조유리(서울대학교 환경계획연구소 선임연구원/박사)
이지원(서울대학교 기후연구실 연구원)
박혜원(서울대학교 기후연구실 연구원)
WWF 참여진: 한국WWF
발행일: 2025년 4월

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 2025 WWF-Korea
All rights reserved



© naturepl.com / Laurent Geslin / WWF

목차

인사말	2
제1장 서론	
1.1 배경	4
1.2 연구의 중요성	5
1.3 연구 목표	10
제2장 군집 항상성과 기후변화	
2.1 꿀벌 군집 항상성(homeostasis)에 대한 외부 기상 변수의 영향 모니터링	12
2.2 연구 방법	17
2.3 연구 결과	19
2.4 논의 및 시사점	25
제3장 기후변화와 침입종의 복상	
3.1 등검은말벌의 침입이 군집에 미치는 영향	26
3.2 연구 방법	33
3.3 연구 결과	38
3.4 논의 및 시사점	44
제4장 나아갈 길	46
참고문헌	48

꿀벌 생태계의 위기와 지속가능한 미래



한국WWF 사무총장
박민혜

오늘날 전 세계는 기후변화와 생물다양성 감소라는 복합적이고 심각한 환경 문제에 직면해 있습니다. 기온 상승, 강수 패턴 변화, 극단적인 기상이변 등으로 인해 지구 생태계는 빠르게 변화하고 있으며, 이는 인간과 자연이 유지해 온 섬세한 균형을 위협하고 있습니다.

특히 꿀벌은 생태계에서 필수적인 역할을 수행하는 존재입니다. 전 세계 작물의 약 75%가 꿀벌과 같은 수분매개 곤충에 의존하고 있으며, 이는 인류의 식량 공급과 직결됩니다. 그러나 기후변화로 인해 꿀벌의 서식 환경과 번식 조건이 급변하고 있으며, 외래 침입종의 확산까지 더해지면서 꿀벌 개체군의 생존이 더욱 위협받고 있습니다. 본 연구에서 중점적으로 다룬 등검은말벌과 같은 침입종은 토착 꿀벌 개체군의 붕괴를 가속화하고 있으며, 이는 농업과 식량 생산에도 직접적인 영향을 미치며 연쇄적인 변화를 초래할 가능성이 큼니다.

이에 WWF는 기후변화가 꿀벌 개체군과 외래 침입종 확산에 미치는 영향을 과학적으로 분석하고, 이를 바탕으로 보다 효과적인 보전 및 대응 전략을 모색하고자 했습니다. 이번 연구에서는 기온 변화와 기상이변이 꿀벌 군집의 생리적·행동적 패턴에 미치는 영향을 조사하는 한편, 기후온난화에 따른 등검은말벌의 확산 속도와 생태계 내 역할을 분석하여 그 영향을 정량적으로 평가했습니다. 지난해 대기오염이 꿀벌의 생존에 영향을 미친다는 사실을 밝혀낸 데 이어, 이번 연구는 꿀벌 생태계를 중심으로 기후변화와 생물다양성 감소가 어떻게 연결되어 있으며, 궁극적으로 인류에 어떤 영향을 미치는지를 규명하는 중요한 자료가 될 것입니다.

이제 우리는 기후변화와 생물다양성 감소 문제를 더 이상 미룰 수 없는 시대를 살고 있습니다. 생태계의 지속가능성을 보장하고 기후위기의 영향을 최소화하기 위해서는 과학적 연구와 정책적 대응이 함께 이루어져야 합니다. WWF는 각 분야의 전문가뿐만 아니라 기업, 정부, 시민사회가 협력하여 문제 해결을 위한 실질적인 행동에 나설 수 있도록 적극적으로 이끌어 나가겠습니다. 감사합니다.



© Ola Jennersten / WWF-Sweden

1.서론

1.1 배경

기후변화는 21세기의 가장 심각한 환경 문제 중 하나로, 전 세계적으로 생태계를 변화시키고 생물다양성을 위협하고 있다. 지구 온도 상승의 가속화, 강수 패턴의 변화, 그리고 극한 기상 현상의 빈도 및 강도의 증가는 생태계 기능에 중요한 역할을 하는 곤충을 포함한 수많은 종에게 심각한 위협을 초래하고 있다. 이러한 곤충들 중에서도 꿀벌(*Apis mellifera*)은 수분 과정과 생태계 안정성에 필수적인 역할을 하는 핵심 종으로 주목받고 있다. 꿀벌은 다양한 개화 식물의 번식을 가능하게 함으로써 농업 생산성과 생물다양성 보전, 자연 생태계의 기능을 지원한다. 꿀벌은 전 세계 식량 공급에 기여하는 많은 식물을 포함하여 개화 식물 종의 약 75%를 수분하는 역할을 한다.

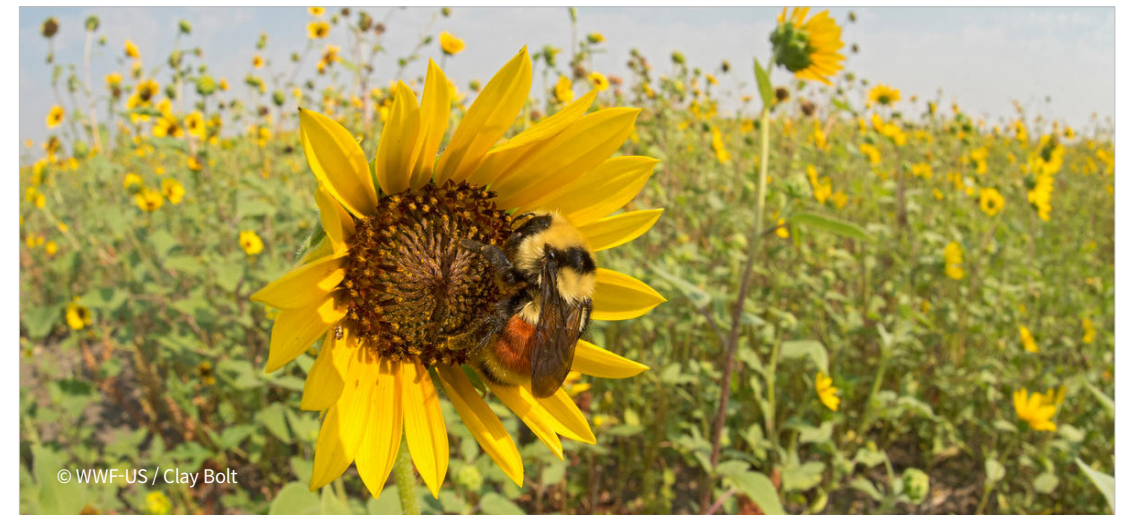
꿀벌은 인간의 식량 생산에 매우 중요하며, 농작물의 수확량, 품질 및 다양성을 향상시킨다. 꿀벌은 과일, 채소, 견과류 및 기타 작물의 수분 매개자로서 인간이 소비하는 필수 식량의 생산에 직접적인 영향을 미치며, 따라서 꿀벌의 건강과 생존은 세계 식량 안보에 필수적이다. 기후변화와 꿀벌 생태계 간의 관계는 전 세계 생태계와 농업 시스템의 안정성에 직접적인 위협이 되기 때문에 점점 더 긴급한 문제가 되고 있다. 특히 꿀벌은 환경 변화에 민감하게 반응하며, 이들의 생존과 생산성은 기후 안정성과 밀접한 관련이 있다. 꿀벌의 먹이 활동, 번식 주기와 전반적인 군집 역학은 온도, 강수량, 계절적 패턴에 의해 크게 좌우된다. 이러한 환경적 요소는 꽃 자원의 가용성을 결정하고, 벌집 내부 환경을 조절하며, 군집이 번성하고 성장할 수 있는 능력을 좌우한다. 따라서 이러한 환경적 요소의 교란은 꿀벌 개체군뿐만 아니라, 그들이 속한 광범위한 생태계에도 연쇄적인 영향을 미칠 수 있다. 꿀벌 군집의 생존과 효율성은 주로 벌집 내부 환경, 특히 온도와 습도를 조절하는 능력에 크게 의존한다. 포유류와 달리 꿀벌은 일정한 내부 체온을 유지하는 능력이 부족하다. 대신에 꿀벌은 행동적 및 집단적 메커니즘을 통해 벌집의 미기후를 조절한다.



또한, 기후변화는 새로운 포식자들의 북쪽 확장을 크게 촉진하여, 꿀벌 개체군에 점점 증가하는 위협을 초래하고 있다. 지구온난화로 인해 서식지 적합성이 변화하면서 이전에는 따뜻한 지역에만 서식하던 종들이 온대 지역으로 확산되고 있다. 이러한 변화는 꿀벌 군집에 대한 직접적인 포식 위협을 증가시킬 뿐만 아니라 필수적인 꽃 자원과 동지 자원을 둘러싼 경쟁을 심화시킨다. 외래 말벌과 같은 새로운 침입성 포식자 대다수는 꿀벌과 먹이 및 서식지를 두고 치열하게 경쟁하여, 이미 취약한 꿀벌 개체군에 추가적인 부담을 가중시키고 있다.

더 나아가, 기후변화는 기존의 포식-피식 관계를 변화시키면서, 꿀벌과 토착 및 외래종 사이의 예기치 않은 상호작용을 초래하고 있다. 역사적으로 꿀벌 군집에 미미한 영향을 미쳤던 포식자들이 이제 장기간의 활동 기간과 기후 변동에 따른 행동 패턴의 변화로 인해 더욱 위협적인 존재가 될 수 있다. 일부 지역에서는 따뜻한 기간이 길어짐에 따라 특정 포식자의 번식 주기가 증가하여 개체 수가 급증하고 있으며, 이는 결과적으로 꿀벌 개체군에 대한 영향을 더욱 증폭시키고 있다.

이러한 요인들은 꿀벌 군집이 직면하는 생리적·행동적 문제를 총체적으로 심화시키며, 새로운 위협과 전통적인 위협 모두에 대한 꿀벌의 회복력을 약화시킨다. 자연 환경이 급격히 변화함에 따라 꿀벌들은 자원 부족, 심화되는 경쟁, 변화하는 포식 압력 등에 지속적으로 적응해야 하며, 이 모든 것이 군집의 건강과 생존을 더욱 불안정하게 만든다.



© WWF-US / Clay Bolt

1.2 연구의 중요성

수분매개자와 생물다양성

기후변화로 인한 꿀벌 개체군의 붕괴가 개별 군집에 미치는 영향은 단순한 즉각적인 영향을 훨씬 뛰어넘는다. 꿀벌은 야생 및 경작 식물 중 모두의 번식에 필수적인 수분 활동에 중요한 역할을 한다. 수분은 다양한 식물의 번식을 촉진하여 생물다양성을 지원하며, 그 중 많은 식물이 복잡한 먹이망의 기초를 형성한다. 앞서 언급한 바와 같이, 꿀벌은 인간이 섭취하는 주요 작물의 수분을 도와 세계 농업 생산에 크게 기여하고 있다.

기후변화로 인한 스트레스 요인으로 꿀벌 개체수가 감소함에 따라 수분 서비스의 효율성 또한 저하되고 있다. 연구에 따르면, 꿀벌 개체수와 수분 효율성이 감소하면서 사과, 아몬드, 커피를 포함한 주요 농작물의 과일 및 종자 생산량이 줄어들 수 있다고 한다. 이러한 작물 수확량 감소는 특히 꿀벌에 의존하여 작물 수분을 하는 지역에서 식량 안보에 심각한 영향을 미친다. 작물 생산성에 미치는 영향은 특히 이미 기후변화 및 다른 스트레스 요인에 취약한 지역에서 식량 부족을 악화시키고 있다.

또한, 많은 식물이 번식을 위해 곤충 수분에 의존하기 때문에 꿀벌과 기타 수분매개자의 손실은 식물의 생물다양성을 감소시킬 수 있다. 수분매개자가 먹이망의 중요한 구성 요소이기 때문에 수분매개자의 감소는 생태계 전반에 걸쳐 연쇄적인 영향을 미칠 수 있다. 식물 다양성의 감소는 특정 식물종에 먹이를 의존하는 초식동물에게 영향을 미칠 수 있으며, 더 나아가 포식자를 포함한 더 높은 영양 수준에 영향을 미친다. 따라서 수분매개자의 개체군 붕괴는 전체 생태계를 불안정하게 만들 가능성이 있으며, 이는 생물다양성의 상실과 인간과 야생동물이 의존하는 생태계 서비스의 약화로 이어질 수 있다.



© Ola Jennersten / WWF-Sweden

기후변화는 생물다양성에 심각한 위협이 되고 있으며, 생태계를 붕괴시키고, 종 분포를 변화시키며, 서식지 손실을 전례 없는 속도로 초래하고 있다. 지구 온도 상승, 불규칙한 기후 패턴, 극한 기후 현상의 빈도 증가로 인해 종 간 상호작용이 변화하고, 개체수가 감소하며, 일부 지역에서는 특정 종이 지역적으로 멸종되고 있다. 생태계가 불안정해짐에 따라, 생물다양성을 유지하는 복잡한 균형이 악화되어 환경 문제가 더욱 악화되고 있다. 그러나 생물다양성은 기후변화로 인해 위협받고 있는 동시에, 기후변화 완화를 위한 가장 효과적인 자연 기반 해법 중 하나이기도 하다. 수분매개자는 식물 번식을 촉진함으로써 생태계의 건강과 안정성에 직접적으로 기여하여, 수많은 유기체에게 먹이, 쉼터, 서식지를 제공하는 식물 종의 지속성을 보장한다. 농업 환경에서도 수분매개자는 작물의 수확량과 품질을 증대시키며, 기후변화에 대응하는 전 세계 식량 생산 시스템 구축에 기여한다. 더욱이, 번식을 위해 수분매개자에 의존하는 많은 식물들은 탄소 흡수 기능을 가지고 있어, 수분매개자의 개체수 감소는 생태계의 기후변화 완화 능력 저하로 이어질 수 있다.

기후변화로 인해 생태계가 계속 교란되면서 생물다양성을 보호하고 복원하는 것이 기후 적응과 완화를 위한 핵심 전략으로 우선시되어야 한다. 수분매개자에게 친화적인 서식지를 조성하고, 훼손된 생태계를 복원하며, 종의 다양성을 증진하는 보전 노력은 생태계의 회복력을 강화하고, 자연이 기후변화의 영향을 완충하는 중요한 역할을 지속적으로 수행할 수 있도록 한다. 본질적으로 생물다양성과 기후변화 완화는 서로 깊이 연결되어 있으며, 수분매개자를 보호하는 것은 단순히 개별 종을 보존하는 것만이 아니라 지구상의 생명을 유지하고 장기적인 기후 안정을 지원하는 생태 기능을 유지하는 것이다.

현재까지 축적된 연구들은 효과적인 개입이 이루어지지 않는다면, 기후변화가 꿀벌에 미치는 장기적인 영향이 전 세계 수분매개자의 개체수를 계속 위협할 것임을 시사한다. 수분매개자는 생태계 기능과 식량 생산에 필수적인 존재이므로, 기후변화가 꿀벌 생태에 미치는 영향을 보다 면밀하게 연구할 필요가 있다. 이러한 연구는 기후 스트레스 요인이 꿀벌 개체군에 미치는 영향을 완화할 수 있는 전략을 개발하는데 필수적이며, 이를 통해 수분 서비스의 지속성과 생물다양성 보전을 보장할 수 있다.



Fig. 1 수분매개자는 생태계 생물다양성을 증진시키고 기후변화의 영향으로부터의 생태계 회복력을 향상시킬 수 있다.

꿀벌의 뉴노멀(new normal)

기후변화가 생태계를 계속 변화시키면서 꿀벌도 점점 더 "뉴노멀(new normal, 새로운 표준)"로 불리는 환경에 적응해야 하는 상황에 직면하고 있다. 이 표현은 한때 꿀벌에게 최적이었던 서식지 조건인 예측 가능한 계절 패턴, 안정적인 기온, 일정한 강우량 등의 환경 조건이 더 이상 보장되지 않는 현실을 반영한다. 폭염, 가뭄, 폭우 등 예측할 수 없는 기상이변과 꽃의 개화 패턴 변화는 이제 전세계 꿀벌 군집에 끊임없는 도전이 되고 있다. 이러한 환경 패턴의 변화는 꿀벌이 맞서 싸워야 하는 새로운 생태학적 현실이 되고 있다.

꿀벌은 이제 과거의 표준으로 돌아가는 대신 기후 관련 스트레스 요인의 빈도와 강도가 점점 더 커지고 있는 세상을 헤쳐나가고 있다. 이러한 새로운 표준은 꿀벌에게 도전과 기회를 동시에 제시하는데, 꿀벌이 체온 조절, 먹이 찾기, 번식을 위한 새로운 전략을 시험하며 변화하는 환경에 지속적으로 적응해야 하기 때문이다. 예를 들어, 꿀벌은 점점 더 먹이 활동 범위를 넓혀야 하며 때로는 계절적 불일치로 인해 낮은 꽃 자원이 있는 지역으로 모험을 떠나는 경우도 있다. 마찬가지로 꿀이 분비되는 시기와 꽃가루 가용성의 변화로 인해 꿀벌은 번식 일정과 벌통 관리 방식을 변경해야 한다.

Fig. 2
꿀벌은 꽃의 꽃가루받이를 도와주고 일부 꽃가루는 집으로 가져와 식량 자원으로 사용한다.

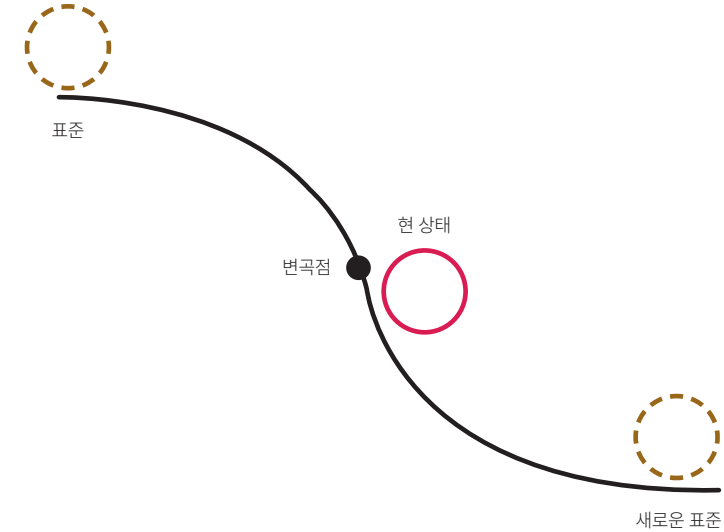


이러한 생태계의 변화로 인해 꿀벌은 더 이상 과거와 같은 방식으로 번성하지 못할 것이 분명해졌다. 새로운 표준에 대한 꿀벌의 대응에는 행동적, 생리적 적응이 모두 포함될 수 있지만, 기후변화는 새로운 도전에 대처하는 꿀벌의 능력을 능가하는 빠른 속도로 이루어지기도 한다. 따라서 기후로 인한 혼란이 더 이상 일시적인 변동이 아니라 모든 생태학적 과정을 이해하고 관리해야 하는 새로운 기준이 되는 세상에서 수분 매개자의 보호 전략을 재고하는 것이 중요하다.

그러나 우리가 한때 표준이었던 것에서 새로운 표준으로의 전환을 목격하고 있는지, 아니면 단순히 훨씬 더 크고 지속적인 변화의 전환점에 있는 것인지는 아직 불확실하다. 기후변화에 직면한 꿀벌 개체군의 미래 궤적은 여전히 예측할 수 없으며, 때문에 이러한 전례 없는 환경 문제에 대한 꿀벌의 대응을 지속적으로 모니터링하고 평가하는 것이 중요하다.

따라서 꿀벌 군집이 이 새로운 표준이 된 기후에 어떻게 적응하고 있는지 현재 상태를 진단하는 것이 필수적이다. 꿀벌이 이러한 변화하는 환경에서 어떻게 대응하고 있는지 이해하면 꿀벌의 회복력에 대한 중요한 통찰력을 얻고 장기적인 생존과 지속적인 생태적 역할을 지원하기 위한 전략을 수립하는 데 도움이 될 것이다.

Fig. 3
기후변화의 영향이 새로운 표준이 되고 있으며, 이런 영향에 꿀벌이 어떻게 반응하고 적응하는지 이해해야 한다.



1.3 연구 목표

본 연구는 두 가지 주요 구성 요소로 나뉜다. 첫째, 외부 기후변화가 꿀벌 군집의 내부 환경에 어떤 영향을 미치는지 모니터링하여, 군집 항상성의 잠재적 변화에 초점을 맞출 것이다. 여기에는 기상이변이나 온도 및 습도 변화와 같은 기후로 인한 스트레스 요인이 벌통 내부의 생리적 조건과 꿀벌의 안정성을 유지하기 위해 활용하는 행동 및 집단적 메커니즘에 어떤 영향을 미치는지 조사하는 것이 포함된다. 본 연구는 이러한 내부 변화가 변화하는 기후에 직면하여 군집의 건강, 생산성 및 생존에 어떠한 영향을 미칠 수 있는지 추적할 것이다.

둘째, 국내 여러 지역에 분포하는 말벌(*Vespa*) 종을 모니터링하는 연구를 수행한다. 특히 꿀벌 군락에 심각한 위협이 되고 있는 말벌 종인 등검은말벌(*Vespa velutina nigrithorax*)의 복상 추이를 분석하는 데 초점을 맞출 것이다. 본 연구는 이 종의 현재 분포를 추적하고 지역 생태계에서의 우점도를 평가함으로써 등검은말벌이 한국에서 점점 더 지배적인 꿀벌의 포식자가 되어가는 과정과 꿀벌 개체군 및 수분 서비스에 미치는 잠재적 영향에 대한 통찰력을 제공할 것이다.

본 연구는 양봉가, 환경 보호론자, 정책 입안자, 그리고 더 많은 대중에게 기후변화가 가속화됨에 따라 꿀벌이 직면할 수 있는 잠재적 위험과 도전에 대해 알리는 것을 목표로 한다. 벌통 설계 개선, 군집 관리 관행 최적화, 서식지 복원력 향상 등 기후로 인한 스트레스가 꿀벌 군집에 미치는 영향을 완화하는 전략을 개발함으로써 과학자들과 양봉가들은 수분 서비스를 보호하고 글로벌 식량 시스템의 장기적인 지속 가능성을 보장하기 위해 함께 노력할 수 있다. 전 세계적으로 환경의 불확실성에 직면하고 있는 가운데, 기후변화로 인해 꿀벌이 직면한 문제를 이해하고 해결하는 것은 생물다양성을 보전하고 전 세계 식량 생산의 미래를 보장하는 데 매우 중요하다.

전반적으로 기후변화와 꿀벌 생태 사이의 관계를 이해하는 것은 효과적인 생물다양성 보전 및 기후변화 완화 전략을 개발하는 데 매우 중요하다. 본 연구의 결과는 다음과 같은 분야에 기여할 수 있다:

- 기상이변에 대비해 벌통의 복원력을 강화하는 양봉 관행 개선.
- 지속가능한 토지 관리 및 수분 매개자 친화적인 농업 관행을 위한 정책 권고.
- 환경 스트레스 요인에 대한 수분 매개자의 반응을 통합하여 생태계 변화에 대한 예측을 개선하는 향상된 기후 모델.
- 기후변화 속에서 수분 매개자 보호의 중요성에 대한 대중 인식 제고 및 교육.

본 연구는 이러한 문제를 다룸으로써 꿀벌 개체수를 보존하고 농업과 생태계의 안정에 필수적인 수분 서비스의 지속 가능성을 보장하기 위한 전 세계적인 노력을 지원하는 것을 목표로 한다.



© Joe Buglewicz / WWF-US

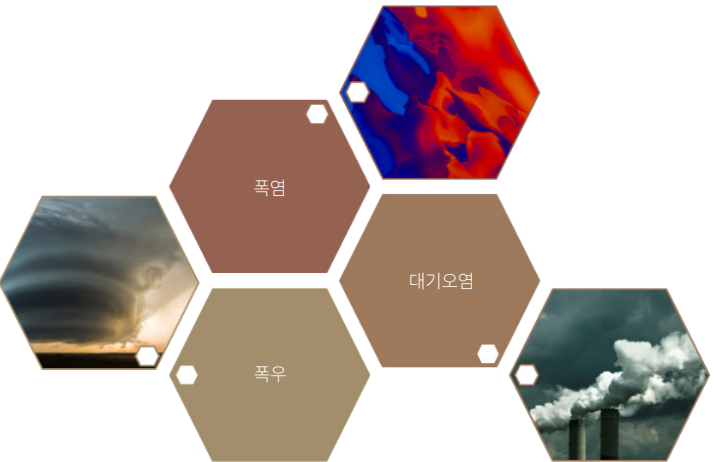
2.군집 항상성과 기후변화

2.1 꿀벌 군집 항상성(Homeostasis)에 대한 외부 기상 변수의 영향 모니터링

예측할 수 없는 기후변화와 기상이변의 빈도와 규모가 증가하면서 꿀벌의 생존이 점점 더 위협받고 있다. 특히 기후의 온난화로 인해 꿀벌이 의존하는 자연 환경이 급격히 변화하고 있으며, 이는 꿀벌의 생태학적 역할과 건강에 심각한 영향을 미치고 있다. 극심한 더위와 변동하는 기상 조건은 꿀벌의 생리적 기능을 손상시켜 군집을 과열, 탈수, 채집 활동의 차질로 인한 식량 부족과 같은 다양한 스트레스 요인에 노출시킬 수 있다.

꿀벌은 날개로 부채질하여 공기를 순환시키고, 서로 모여 열을 보존하거나, 물방울을 사용하여 증발 냉각을 통해 벌집을 식히는 등 벌통 내부의 최적의 상태를 유지하기 위해 다양한 전략을 사용한다. 이러한 메커니즘을 통해 꿀벌은 변화무쌍한 환경 조건에서도 번성할 수 있다. 그러나 폭염, 폭우, 장기간의 가뭄과 같은 기상이변이 발생하면, 이러한 행동 반응이 필요한 벌집 내부의 미세 환경을 유지하기에 부족하여 군집에 심각한 스트레스를 초래할 수 있다. 예를 들어, 극심한 폭염은 벌통의 냉각 능력을 압도할 수 있으며, 지나친 강우는 벌통 활동을 방해하고 군집을 손상시키며 병원균을 유입시킬 수 있다. 이러한 스트레스 요인은 꿀벌의 건강에 심각한 영향을 미쳐 꿀 생산량 감소, 번식 성공률 저하, 극단적인 경우 전체 군집의 붕괴를 초래할 수 있으며, 이러한 현상을 군집 붕괴 현상(CCD, Colony Collapse Disorder)이라 한다.

Fig. 4 기후변화에 기인한 다양한 요인이 군집 상태를 바꾸고 있으며, 이는 꿀벌이 군집 내 항상성을 유지하는 데 걸림돌이 되고 있다.



지난 수십 년 동안 기후변화로 인한 기상 패턴의 변화로 인해 폭염과 강수량 예측이 불가능한 현상이 빈번하고 심각하게 발생하고 있다. 이러한 환경 변화는 꿀벌 개체군에게 점점 더 큰 도전이 되고 있으며, 꿀벌 자체와 꿀벌이 생태계 및 인간 농업에 제공하는 서비스 모두를 위협하고 있다. 온도 변동, 강우 패턴의 변화, 꿀벌 군집 역학 간의 상호작용은 꿀벌이 기후변화의 심화되는 영향에 어떻게 대처할지 이해하기 위한 중요한 연구 분야이다. 기상이변의 증가는 벌통의 안정성에 특별한 위험을 초래하므로 모니터링 및 적응 전략의 필요성이 더욱 강조된다.

이전 연구 단계에서는 기후변화와 밀접한 관련이 있는 대기 오염을 기상 조건과 함께 모니터링했다. 그러나 이전 연구에서는 대기 오염이 꿀벌의 먹이 활동에 미치는 영향을 조사한 반면, 이번 연구에서는 기상 변수에만 초점을 맞췄다. 본 연구는 폭염과 폭우가 꿀벌 군집에 미치는 영향을 조사하여, 이러한 기후 스트레스 요인이 벌통의 미세 환경을 어떻게 변화시키고, 군집의 건강과 행동에 어떤 영향을 미치는지에 초점을 맞추고자 한다. 본 연구는 다양한 기후 조건에서 활동 수준, 번식량, 생존율의 변화와 같은 꿀벌의 생리적 반응을 조사함으로써 꿀벌이 기후변화에 적응하거나 적응하지 못하는 메커니즘을 밝히고자 한다. 또한, 환경 스트레스 요인에 대한 꿀벌의 행동 반응을 조사함으로써 연구자들은 꿀벌이 변화하는 조건에 어느 정도까지 적응할 수 있는지, 새로운 기후 체제 하에서 꿀벌이 군집의 건강을 유지할 수 있는지를 이해하는 데 도움이 될 것이다.



폭염과 기온 상승

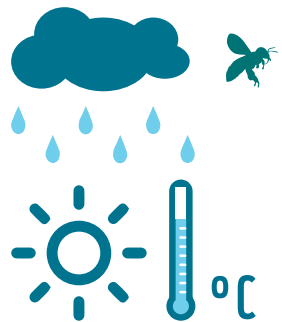
기후변화의 지속적인 영향으로 인해 지나치게 높은 기온이 장기간 지속되는 폭염이 더욱 빈번하고 강렬해지고 있다. 이러한 이상 기온 현상은 꿀벌 군집에 심각한 위협이 되며, 최적의 벌통 상태를 유지하는 능력뿐만 아니라 전반적인 생존과 생산성에도 부정적인 영향을 미친다. 지구 기온이 상승함에 따라 꿀벌은 온도 조절 능력의 한계를 시험하는 환경에 점점 더 많이 노출되어 열 스트레스와 이로 인한 군집의 건강에 대한 연쇄적인 영향에 더욱 취약해지고 있다. 꿀벌의 온도 변화에 매우 민감하기 때문에 벌통 내부 온도를 안정적으로 유지하는 것이 꿀벌의 생존에 매우 중요하다. 연구에 따르면 유충의 발달, 군집의 건강 및 기타 군집 활동의 효율성에 필수적인 벌통 기능의 최적 내부 온도는 32°C에서 35°C 사이인 것으로 나타났다. 외부 온도가 이 범위를 넘어 서면, 꿀벌은 벌집을 보호하기 위해 일련의 복잡한 체온 조절 행동에 의존해야 한다. 대표적인 예로 날갯짓(wing fanning)을 통해 공기 흐름을 증가시켜 벌집을 냉각하고, 물 수집(water foraging)을 통해 벌집 내부에 물을 뿌려 증발 냉각을 유도하며, 벌떼 형성(bearding)을 통해 벌이 벌집 외부에 모여 내부의 열을 낮추는 행동이 있다. 이러한 행동은 벌집의 미세 환경을 유지하고 유충과 성체 꿀벌의 건강을 유지하는데 필수적인 요소이다.

꿀벌은 정상적인 상황에서 체온을 조절하는 놀라운 능력을 가지고 있지만, 극심한 더위나 장기간의 더위는 이러한 적응 메커니즘을 압도할 수 있다. 외부 온도가 장기간 높게 유지되면 꿀벌은 벌집 내부 온도를 최적의 범위로 유지하는 데 어려움을 겪을 수 있다. 이러한 경우 과도한 열은 탈수, 과열, 그리고 궁극적으로 벌집의 붕괴와 같은 여러 가지 부정적인 결과를 초래할 수 있다. 벌집 내부가 과열되면 성장 중인 유충이 폐사하여, 군집의 번식 성공률이 더욱 낮아질 수 있다. 열 스트레스는 즉각적인 군집 사망의 위협 외에도 군집 생산성에 오래 지속되는 영향을 미칠 수 있다. 열 스트레스는 꿀 생산량 감소, 꿀 수확량 감소, 채집 효율성 저하로 이어질 수 있으며, 이 모든 것이 군집의 회복과 번성 능력을 약화시킨다.

또한 폭염은 질병 및 해충 감염의 위험을 더욱 증가시킬 수 있는데, 더운 환경은 병원균과 기생충의 증식에 더 유리한 환경을 조성하여 군집에 더 많은 스트레스를 줄 수 있기 때문이다. 예를 들어, 악명 높은 꿀벌 기생충인 응애는 따뜻한 환경에서 번성하며, 이미 열 스트레스를 받고 있는 군집이 직면한 문제를 더욱 악화시킬 수 있다. 또한, 더위 스트레스는 꿀벌의 채집 활동 패턴의 시기와 행동을 변화시켜 군집이 충분한 식량을 확보하기 어렵게 만들고, 이는 결국 겨울철 꿀을 저장하는 능력에도 영향을 미칠 수 있다.

기후변화로 인해 폭염의 빈도와 심각성이 계속 심화됨에 따라 이러한 극한 환경에 적응하는 꿀벌의 능력은 점점 더 시험대에 오를 것이다. 이러한 스트레스 요인들은 내열성 꿀벌 품종 개발, 벌통 관리 관행 개선, 극심한 온도 변동으로부터 군집을 완충할 수 있는 서식지 보존 능력 등 효과적인 완화 전략에 대한 연구의 시급한 필요성을 강조한다. 나아가, 기후변화가 수분 매개자의 건강에 미치는 광범위한 영향은 기후 및 생물다

강수 패턴의 변화와 기온 상승 및 기후 관련 스트레스 요인으로 인해 꿀벌이 이미 직면하고 있는 압박을 더욱 가중시킬 수 있다



폭우와 강수 패턴의 변화

양성 보전에 대한 통합적인 접근 방식의 중요성을 강조하며, 이러한 접근방식을 통해 꿀벌과 그들이 제공하는 중요한 생태계 서비스가 급변하는 환경에서 회복력을 유지할 수 있도록 한다.

기온 상승과 더불어 기후변화로 인해 강수 패턴이 더욱 불규칙해지고 있으며, 많은 지역에서 극심한 강우 현상의 빈도와 강도가 증가하고 있다. 이러한 강수 패턴의 변화는 여러 가지 방식으로 꿀벌 군집에 부정적인 영향을 미칠 수 있으며, 기온 상승 및 기타 기후 관련 스트레스 요인으로 인해 꿀벌이 이미 직면하고 있는 압박을 더욱 가중시킬 수 있다.

폭우는 벌통을 침수시켜 꿀벌 군집에 직접적인 영향을 미칠 수 있으며, 이는 곰팡이 번식과 군집 내부의 과도한 수분 축적의 위험을 증가시킨다. 높은 습도는 꿀벌이 안정적인 내부 환경을 유지하는 데 방해가 될 수 있으므로 특히 해롭다. 곰팡이 성장은 꿀벌의 체온 조절 및 질병 관리 능력에 영향을 미쳐 벌집의 건강을 약화시킬 수 있다. 또한 수분 증가는 해로운 곰팡이와 박테리아의 성장을 촉진하여 꿀벌의 면역 체계를 더욱 약화시키고 이미 꿀벌 개체군에 심각한 위협이 되고 있는 바로아(Varroa) 응애와 같은 감염과 기생충에 더 취약하게 만들 수 있다.

뿐만 아니라, 극심한 폭우는 꿀벌의 채집할 수 있는 날을 줄어든게 만들어, 꿀벌의 먹이 수집 능력에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 꿀벌은 꿀과 꽃가루를 먹기 위해 좋은 기상 조건에 의존하기 때문에 폭우가 발생하면 먹이를 구할 기회가 제한된다. 특히 이른 봄이나 늦가을과 같이 꽃 자원이 부족한 시기에는 꿀과 꽃가루를 구할 수 있는 시기를 예측할 수 없기 때문에 더욱 우려된다. 이러한 중요한 시기에 식량 자원이 부족하면 영양 스트레스가 발생하여, 군집이 약화되고 다른 기후 관련 스트레스 요인에 대한 회복력이 떨어질 수 있다. 또한 월동에 들어가기 전 장기간 강우가 지속된다면, 군집의 생존에 필수적인 에너지가 고갈될 수 있다.

식량 부족 외에도 장기간의 강우로 인해 꿀벌의 효율적인 채집 능력이 저하될 수 있다. 폭우와 강풍은 꿀벌이 벌집을 떠나 꿀과 꽃가루를 모으는 것을 어렵게 만들어, 수분 활동이 지연되면서 군집의 번식 성공률이 낮아질 수 있다. 수분은 식물의 번식을 지원하고 다른 야생동물의 먹이원을 유지하기 때문에, 군집의 건강뿐만 아니라 더 넓은 생태계를 위해서도 매우 중요하다.

기후변화는 또한 식물의 개화와 꿀벌의 채집 활동과 같은 자연 현상의 시기가 점점 더 맞지 않는 계절적 불일치 문제를 더욱 악화시킨다. 이상 기온이 발생하는 지역에서는 식물이 평소보다 일찍 또는 늦게 개화하여 꿀벌이 활동하는 시기에 꽃 자원의 가용성을 방해할 수 있다. 온도와 가용 자원의 변화에 반응하는 꿀벌은 이러한 꽃 자원을 이용하기에는 너무 일찍 또는 너무 늦게 출현할 수도 있다. 꿀벌의 활동 기간과 식량 자

원의 가용성 사이의 이러한 시간적 불일치는 심각한 영양 스트레스를 유발하고 군집의 전반적인 건강을 악화시킬 수 있다. 기후변화로 인해 이러한 불일치가 더욱 빈번해지면서 꿀벌 개체군에 심각한 위협이 되고, 꿀벌의 채집 활동과 번식 주기를 꽃 자원의 가용성과 동기화하는 능력이 더욱 떨어지게 된다.

불규칙한 강수 패턴, 식량 부족, 계절적 불일치 등의 복합적인 영향은 꿀벌 군집을 약화시키고 번식 성공률을 떨어뜨리며, 심한 경우 군집 붕괴로 이어질 수 있다. 기후변화가 가속화됨에 따라 꿀벌의 채집 활동 패턴이 붕괴되고 중요한 수분 서비스가 중단되면 꿀벌 자체뿐만 아니라 꿀벌에 의존하는 광범위한 농업 및 생태계에 광범위한 영향을 미치게 될 것이다. 이러한 문제를 해결하려면 기후변화를 완화하고, 서식지를 보호하며, 변화하는 기후에 맞서 식량 안보와 생물다양성을 보장하기 위해 수분 매개자의 개체군의 회복력을 보장하는 등 통합적인 접근 방식이 필요하다.

Fig. 5 꿀벌은 군집이 마치 하나의 개체처럼 생활하는 ‘초개체(superorganism)’로 벌집 내부의 소화, 호흡 등 대사과정이 군집 단위로 일어난다.

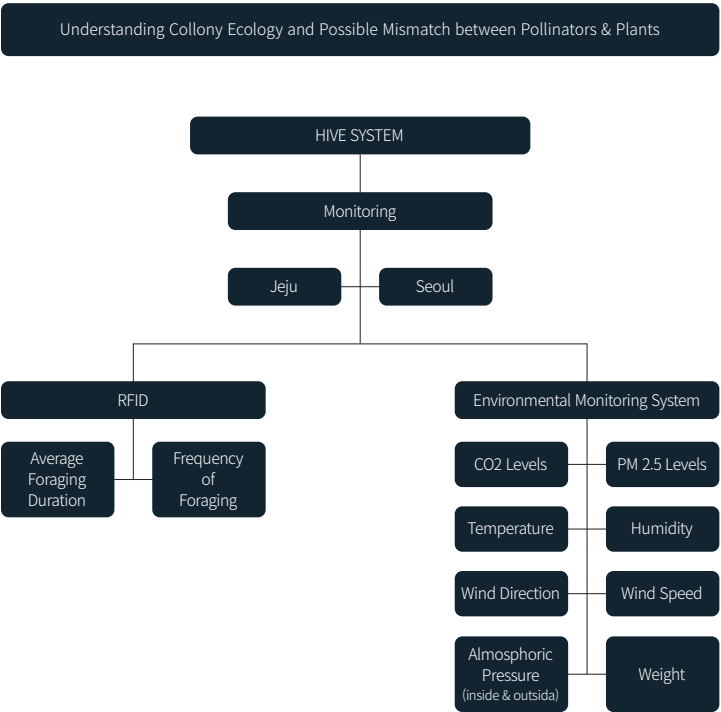


2.2 연구 방법

우리는 벌집 모니터링을 위해 특별히 HIVE 시스템을 설계하여 벌집 내부 환경과 외부 조건을 모두 추적할 수 있도록 했다. 또한, 채집 활동을 모니터링하기 위해 RFID 방식을 구현했다. RFID 태그가 부착된 벌통의 출입 기록을 사용하여 각 벌의 ID(UID), 시각(KST), 방향(Direction) 정보를 포함하는 데이터를 구축했다. 원 데이터를 ID와 시각(KST)별로 정렬하고, 출발 시간(‘출발’로 표시)을 도착 시간(‘도착’으로 표시)과 매칭하여 각 벌의 비행 시간을 계산했다. 의미 있는 비행 활동에 초점을 맞추기 위해, 비행 시간이 10분 이상 250분 미만인 데이터만 활용했다. 지나치게 짧거나 긴 비행 시간은 RFID 태그 센서 오작동으로 인한 것일 수 있으므로, 이러한 데이터는 신뢰할 수 없는 것으로 간주하여 제외했다. 비행 시간의 분포와 평균, 최소, 최대 비행 시간을 분석하여 비행 활동을 정량적으로 평가했다.

개별 벌의 비행 시간 데이터는 기상청의 시간별, 일별 기상 데이터와 통합되었다. 시간별 기상 변수와 비행 시간, 그리고 일별 기상 변수와 비행 시간 간의 관계를 분석했다. 이를 위해 출발 시간(Departing time)에서 날짜(date)와 시간(hour) 정보를 추출하고, 기상 데이터의 ‘시각(timestamp)’ 변수에서도 해당 날짜(date)와 시간(hour) 정보를 추출했다. 그런 다음 기상 데이터와 개별 벌의 비행 시간 데이터를 병합했다.

Fig. 6 HIVE 모니터링 시스템의 구조



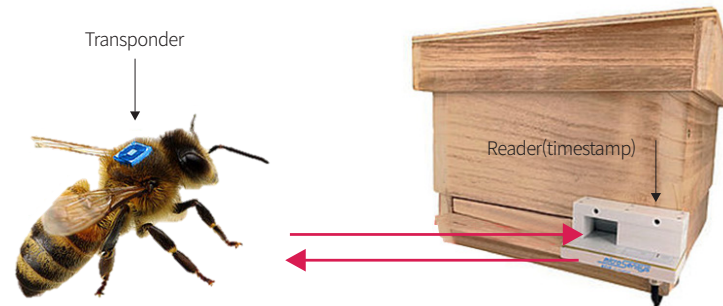
벌 활동과 기상 변수 간의 관계를 보다 정밀하게 분석하기 위해, RFID 데이터의 비행 정보를 기상 데이터와 병합하여 비교했다. 각 시간대의 평균 비행 시간과 평균 비행 빈도를 계산하여 데이터에 추가했다.

비행 활동과 관련된 주요 기상 변수를 탐색하고 비행 빈도, 비행 시간, 기상 변수 간의 관계를 비교했다. 특히 강수량이 0인 날(비가 오지 않은 날)과 강수량이 0이 아닌 날(비가 온 날)의 비행 활동의 차이를 비교했다. 이 분석을 통해 기상 조건에 따라 벌의 활동 패턴이 어떻게 변화하는지 더 잘 이해할 수 있었고, 맑은 하늘이나 비와 같은 특정 기상 조건에서 비행 활동이 더 활발해지는지 확인할 수 있었다.

분석을 더욱 심화하기 위해, 통계적 테스트를 수행하여 다양한 기상 조건(예를 들어, 비오는 날과 건조한 날 또는 다양한 온도 범위 비교)에서 비행 활동의 유의미한 차이가 발생하는지 여부를 정량화했다. 또한, 벌의 활동 패턴이 특정 시간대나 계절의 영향을 받는지 평가하기 위해 데이터를 계절별, 일별 기간으로 세분화하여 시간적 분석을 수행했다.

군집 안팎의 기상 환경이 벌의 활동에 미치는 영향을 분석하기 위해 군집 안팎에서 측정된 기상 데이터를 비교했다. 이 비교는 벌집 내부 조건(예를 들어, 이산화탄소 수준)이나 외부 요인(예를 들어, 미세먼지)이 비행 패턴에 영향을 미치는지 평가하여 벌이 주변 환경과 더 넓은 대기 조건에 어떻게 반응하는지에 대한 통찰력을 제공하는 것을 목표로 했다.

Fig. 7 RFID 태그를 부착한 일벌

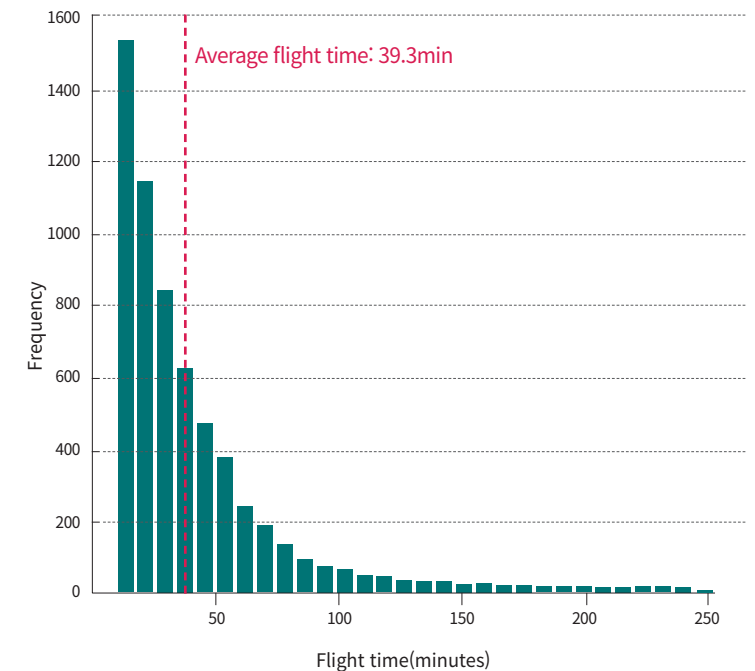


2.3 연구 결과

비행 시간의 분포를 살펴본 결과(Fig. 8), 비행 시간 분포는 왼쪽으로 치우쳐 있고, 오른쪽으로 긴 꼬리가 나타났으며, 이는 대부분의 데이터가 10분에서 50분 사이의 비행 시간을 가졌음을 의미한다. 특히, 가장 높은 빈도는 10~20분 구간에서 발생했고, 그 이후에는 급격한 감소가 관찰된 부분을 주목할 수 있었다. 이는 대부분의 벌들이 상대적으로 짧은 채집 비행을 했고 더 긴 비행은 덜 빈번하다는 것을 시사한다. 10분에서 50분 범위의 데이터가 많았기 때문에, 평균 비행 시간은 약 39분으로 계산되었다.

10분에서 250분 사이의 비행 시간을 가진 개체들의 평균 비행 시간은 0일 39분 16.709902139초, 즉 약 39분 16초였다. 이는 지정된 범위 내 모든 개별 비행 시간의 평균을 구하여, 이상치를 제외한 값으로 계산되었다. 이 연구의 결과는 이전 연구 결과와 일치한다. 최소 비행 시간은 10분 4초였고, 최대 비행 시간은 4시간 9분 42초로, 10분에서 250분 사이의 비행 시간만 포함되도록 데이터가 필터링되었음을 확인할 수 있었다. 분포의 긴 꼬리는 일부 극단적인 이상치가 존재함을 시사하며, 이는 드문 또는 예외적인 벌의 비행일 가능성이 높다. 이러한 이상치는 이론적으로 긴 채집 여행이나 센서 이상으로 인한 것일 수 있지만, 데이터의 완전성을 위해 그대로 유지되었다.

Fig. 8 일벌의 비행 시간과 비행 빈도



기상 변수와 비행 시간의 관계

비행 시간과 시간별 기상 변수 간에는 강한 상관관계는 관찰되지 않았으나, 지면 온도와 짧은 비행 시간 사이에는 상대적으로 더 높은 상관관계가 발견되었다. 이러한 결과는 온도 변동이 비행 시간에 중간 정도의 영향을 미친다는 이전 연구 결과와 일치하며, 특히 지면 온도와와의 관계에서 영향을 확인할 수 있었다. 온도 변수들 간의 상관관계를 살펴본 결과, 지면 온도와 공기 온도 사이에는 강한 양의 상관관계가 나타났고, 지면 온도와 습도 사이에는 음의 상관관계가 발견되었는데, 이는 유사한 연구 결과와 일치한다.

또한, 기온, 강수량, 풍속, 습도, 운량과 비행 시간 간의 관계를 직관적으로 확인할 수 있었다. 특히 강수량이 적을 때, 비행 빈도와 비행 시간이 높았다는 점이 관찰되었다. 기온에 대해서는 20-30°C 범위에서 비행 빈도가 증가하고 비행 시간이 길어지는 경향이 나타났다. 비슷하게, 풍속이 0-4 m/s일 때는 더 긴 비행과 빈번한 비행이 연관되었다. 이러한 기상 변수와 관련된 비행 활동의 경향은 이전 연구에서, 온화한 기온과 가벼운 바람과 같은 유리한 기상 조건에서 벌의 활동이 증가했다는 결과와 유사하다. 또한, 최저 기온 및 평균 기온은 비행 시간과 양의 상관관계를 보였으며, 일일 강수량은 비행 시간과 음의 상관관계를 보였다. 일일 강수량이 감소할수록 비행을 시도하는 개체 수가 증가하고 비행 지속 시간도 길어지는 경향이 나타났다. 이는 강우량이 적은 날에 벌들이 비행 활동을 더 활발히 수행할 가능성이 크며, 기상 조건이 보다 비행에 적합해지는 것과 관련이 있을 수 있다. 또한, 평균 기온과 최저 기온이 25~30°C 범위일 때 비행 시간이 더 길어지는 경향이 나타나, 기온과 비행 시간 사이에 약한 양의 상관관계가 있음을 시사한다. 이러한 결과는 벌이 중간 정도의 기온에서 더 활발히 활동한다는 기존 연구와도 부합한다. 한편, 강수가 있는 날이 강수가 없는 날에 비해 비행 빈도가 높았으나 강수가 없는 날에도 여전히 비행 시도가 이루어지고 있음을 관측하였다. 강우는 가시성을 저하시킬 수 있으며, 항법에 어려움을 초래하거나 벌의 에너지 소비를 증가시킬 수 있다. 따라서, 본 연구 결과는 기온과 강수량이 벌의 비행 행동을 결정하는 중요한 기상 요인임을 추가적으로 입증한다.

강수량에 따른 평균 비행 시간을 비교한 결과, 다음과 같은 패턴이 나타났다.

- 시간별 기상 데이터를 사용할 경우, 강수량이 0일 때 평균 비행 시간은 39분이었다.
- 일일 기상 데이터를 사용할 경우, 강수량이 0일 때 평균 비행 시간은 44분이었다.
- 강수량이 0보다 큰 경우,
 - 시간별 기상 데이터 기준 평균 비행 시간은 37분이었다.
 - 일 기상 데이터 기준 평균 비행 시간은 39분이었다.

기상 변수와 비행 빈도의 관계

시간별 및 일일 기상 데이터 모두에서 기온과 강수량이 비행 빈도에 유의미한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 비행 활동은 기온이 20~30°C일 때 가장 활발했으며, 강수량이 감소할수록 비행 빈도가 증가하는 경향이 나타났다. 이는 벌이 중간 정도의 기온과 건조한 조건에서 더 활발히 비행하는 경향이 있음을 보여주며, 이러한 조건이 비행 안정성과 가시성을 높이는 데 기여할 수 있음을 시사한다.

강수량이 0 mm(비가 오지 않는 경우)일 때, 기상 변수와 비행 활동 간의 상관관계를 분석한 결과, 내부 및 외부 습도와 비행 빈도 사이에 음의 상관관계가 관찰되었다. 이는 습도가 높을수록 비행 활동이 감소하는 경향이 있음을 의미한다. 과도한 습기는 벌의 비행 효율을 저해하거나 채집 활동을 방해할 가능성이 있으며, 내부 습도와 비행 빈도 간의 음의 상관관계는 벌 집단이 내부 환경에 반응하는 방식과도 관련이 있을 수 있다. 즉, 벌집 내부 습도가 높으면 벌이 이를 불리한 환경 조건으로 인식하여 비행을 줄일 가능성이 있다.



© Clay Bolt / WWF-US

시간대별 출발 비행 횟수의 특성

출발 시간대별 비행 빈도를 분석한 결과, 벌은 주로 낮 동안 비행하며, 대부분의 출발이 07:00~16:00 사이에 이루어졌다. 이는 벌이 낮 동안 채집 활동을 선호한다는 점을 반영하며, 가시성이 높은 주간이 비행에 더 유리한 조건을 제공하기 때문일 수 있다. 또한, 비행 활동은 이 시간대에 가장 활발하게 이루어졌으며, 이는 벌이 주로 아침과 낮에 가장 활발히 활동한다는 기존 연구 결과와도 일치한다.

각 시간대별 평균 비행 지속 시간을 분석한 결과, 주간 출발한 비행은 새벽이나 저녁에 출발한 비행보다 평균 지속 시간이 짧았다. 이는 낮 동안 기온과 풍속이 보다 적절하여 효율적인 채집이 가능하고, 벌이 신속하게 벌집으로 돌아올 수 있기 때문일 수 있다.

또한, 월별 평균 비행 지속 시간을 나타낸 히스토그램을 분석한 결과, 8월에 가장 긴 평균 비행 시간이 나타났으며, 6월에 가장 짧은 평균 비행 시간이 기록되었다. 이러한 계절적 변동성은 기온, 꽃의 개화 상태, 벌집 내 환경 등의 영향을 받을 수 있다. 예를 들어, 8월에는 온도가 높고 꽃이 풍부하여 벌이 더 긴 비행을 하면서 넥타를 수집할 가능성이 크다. 반면, 6월에는 상대적으로 기온이 낮고 채집 여건이 덜 유리할 수 있어 비행 시간이 짧아질 가능성이 있다.

Fig. 9 시간대별 벌의 비행 빈도

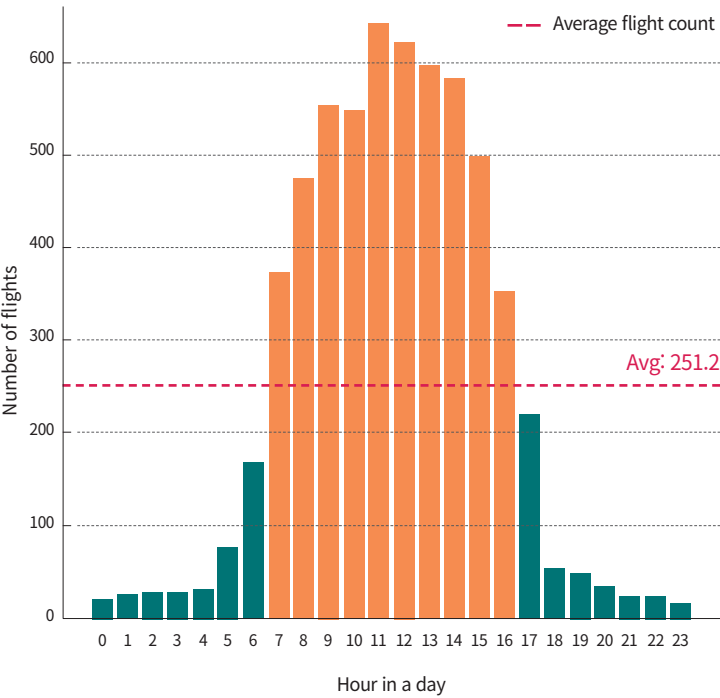


Fig. 10 시간대별 벌의 비행 시간

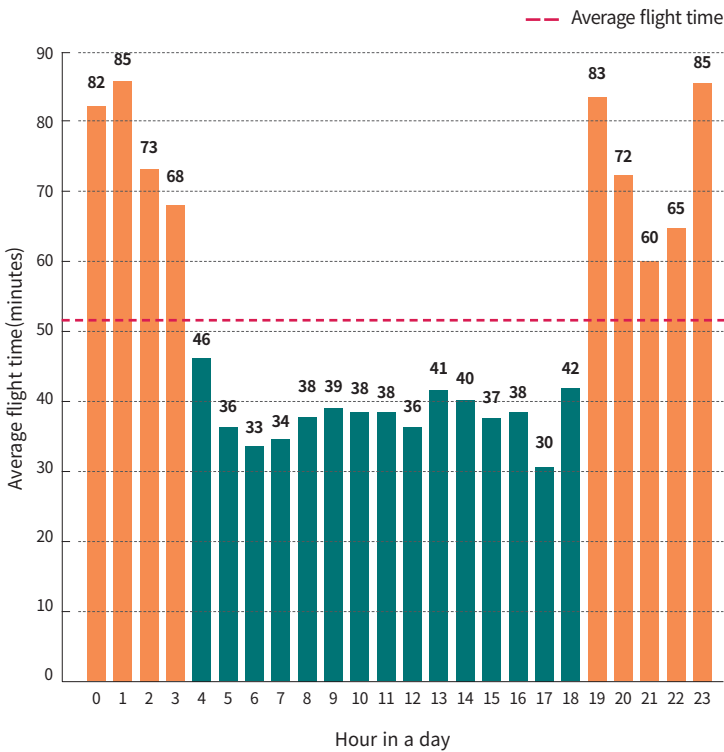
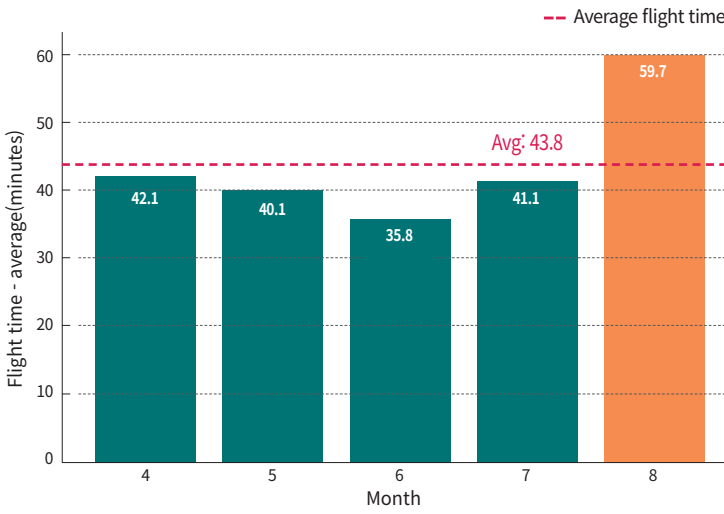


Fig. 11 월 별 비행시간의 분포



벌집 내부 변수 vs 외부 변수

강수량 여부에 따라 데이터를 구분하여 강수량이 0(건조한 환경)일 때와 0보다 클 때 (비 오는 환경) 각각 벌집 내부 및 외부 변수 간의 상관관계를 비교하였다.

- 벌집 외부의 온도와 습도는 음의 상관관계를 유지하였으며, 외부 온도가 상승할수록 습도가 감소하는 경향이 관찰되었다.
- 비행 시간과 비행 빈도는 특정 기상 변수들과 유사한 상관 패턴을 보였다.
 - CO₂ 농도는 비행 시간 및 비행 빈도와 음의 상관관계를 보였으며, 이는 CO₂ 농도가 높은 환경에서 벌의 채집 활동이 줄어들 수 있음을 시사한다.
 - 미세먼지 농도 역시 두 변수와 음의 상관관계를 보였으며, 대기오염이 심할수록 벌의 비행 활동이 감소할 가능성을 나타냈다.
 - 습도는 비행 시간 및 비행 빈도와 강한 음의 상관관계를 보였으며, 높은 습도가 벌의 비행을 저해할 수 있음을 보여준다.

강수량이 있을 경우, 벌집 내부 온도와 외부 습도 간의 음의 상관관계가 더욱 강화되었다. 이는 강수량이 증가할수록 벌집 내부 환경과 외부 환경 간의 대비가 커지며, 벌들의 환경 조절이 더 어려워질 수 있음을 시사한다.



© Morgan Heim / Day's Edge Productions / WWF-US

2.4 논의 및 시사점

온도와 습도는 벌의 활동을 결정하는 중요한 요소로 작용하며, 높은 온도와 낮은 습도가 일반적으로 더 빈번하고 긴 비행을 촉진하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 온도가 벌의 비행 행동을 결정하는 핵심 요소임을 강조한다.

강수량의 영향은 비행 지속 시간보다 비행 빈도에 더 크게 작용했다. 시간 단위 및 일 단위 기상 분석 모두 강수량이 감소할 때 비행 빈도가 증가하며, 특히 20~30°C 범위에서 가장 높은 활동이 관찰되었다. 또한, 비 오는 날씨는 비행 활동 감소와 상관관계를 보였는데, 이는 벌이 다양한 기상 조건에서 비행할 수 있음에도 불구하고, 상대적으로 낮은 강수량을 보이는 더 유리한 환경을 선호함을 시사한다. 이는 벌의 비행 행동이 다양한 기상 조건에 적응할 수 있지만, 특히 강우와 같은 극단적인 날씨는 그들의 활동을 제한할 수 있음을 보여준다.

마지막으로, 꿀벌의 활동에 영향을 미치는 환경적 요인을 탐색하기 위해 비 오는 날과 맑은 날의 벌통 내부 및 외부 변수 간 비교를 수행한 결과, 몇 가지 중요한 시사점이 도출되었다. 예를 들어, 벌통 외부의 미세먼지 농도와 CO₂ 농도가 높을수록 비행 빈도는 감소하는 경향을 보였는데, 이는 대기 질이 나쁠 경우 벌이 비행을 기피할 가능성이 있음을 시사한다. 또한, 비 오는 날에는 벌통 내부 온도와 외부 습도 간의 차이가 더 두드러졌으며, 이는 벌이 벌통 내부 환경을 조절하는 데 영향을 미칠 수 있음을 나타낸다.

이러한 연구 결과는 벌의 행동이 내부 및 외부 환경 요인과 복잡한 상호작용을 이루고 있음을 강조하며, 벌의 활동성과 채집 패턴이 벌통 안팎의 다양한 환경적 요인에 의해 결정된다는 점을 시사한다.



미세먼지 농도와 CO₂ 농도가 높을수록 비행 빈도는 감소하는 경향을 보였는데, 이는 대기 질이 나쁠 경우 벌이 비행을 기피할 가능성이 있음을 시사한다

3.기후변화와 침입종의 부상

3.1 등검은말벌의 침입이 군집에 미치는 영향

최근 기후변화는 환경을 크게 변화시키며 생태계 내 변동성을 증가시키고, 외래 침입종의 광범위한 정착을 촉진하고 있다. 이러한 생태계 불안정성은 토착 생물다양성, 식량 안보와 농업 생산성에 심각한 위협을 초래한다. 외래 침입종에서도 특히 등검은말벌이 큰 우려를 불러일으키고 있다. 등검은말벌은 한국과 프랑스를 포함한 온대 지역으로 빠르게 확산되었으며, 양봉업과 토착 수분매개 곤충에 피해를 주는 것은 물론, 나아가 생태계 전반에도 심각한 위협이 되고 있다.

등검은말벌은 높은 사냥 효율성과 공격성을 가진 포식자로서, 자연 생태계와 농업에서 수분매개에 필수적인 역할을 하는 꿀벌 군집을 주요 먹이 표적으로 삼는다. 등검은말벌은 벌통 근처에서 정지 비행을 하며, 채집을 마치고 돌아오는 일벌을 포획하는 전략적인 사냥 방식을 사용하며, 시간이 지날수록 꿀벌 군집을 심각하게 약화시킨다. 그 결과, 꿀벌 개체군이 급격히 감소하면서 수분 네트워크가 붕괴되고 작물 수확량이 줄어드는 현상이 발생한다. 이로 인해 양봉업자와 농업 생산자의 경제적 손실이 커지며, 이는 생태계 변화에 대한 이해와 적극적인 대응이 얼마나 중요한지 보여준다.

Fig.12 등검은말벌(출처: observation.org)



최근 연구에 따르면, 등검은말벌의 확산은 기후변화와 밀접한 관련이 있다. 지구 온난화로 인해 기온이 상승하고 겨울이 따뜻해지며 강수 패턴이 변화하면서, 등검은말벌의 생존과 번식에 더욱 유리한 환경이 조성되고 있다. 따뜻한 기온은 말벌의 활동 기간을 연장시켜 군집 형성이 더 빠르게 진행되도록 하며, 한 해 동안 더 많은 세대가 번식할 수 있도록 만든다. 또한, 겨울철 월동 여왕벌의 사망률이 감소하면서 개체군 성장이 촉진되고, 등검은말벌이 기존에는 생존이 어려웠던 지역으로까지 확산될 수 있도록 한다.

이러한 기후변화로 유발된 환경의 변동은 생태계 전반에 광범위한 영향을 미치며, 등검은말벌과 같은 침입종이 변화된 환경에서 더욱 번성하면서 그 분포가 확대되고 있다. 이러한 현상은 단순히 꿀벌 개체군을 위협하는 것에 그치지 않고, 먹이망과 생태계 서비스에 혼란을 초래하여 토착 종이 직면한 문제를 더욱 악화시키고 있다. 이에 따라, 현재 연구는 기온 변동, 강수 패턴, 계절 시기 변화와 같은 환경 변수들이 등검은말벌과 꿀벌 군집 간의 상호작용에 미치는 영향을 규명하는 데 초점을 맞추고 있다.

등검은말벌이 초래하는 생태적·경제적 위협을 고려할 때, 등검은말벌의 분포 동태를 파악하고 기후변화와의 복잡한 관계를 이해하는 것이 필수적이다. 향후 등검은말벌의 지리적 확산 범위를 예측하여 꿀벌 군집 피해를 완화하고, 조기 탐지 및 신속 대응 시스템을 구축하는 것이 등검은말벌의 영향을 최소화하는 핵심 전략으로 꼽힌다. 이러한 노력은 생물다양성을 보호하고 수분 서비스를 유지하며, 지속적인 환경 변화 속에서도 농업의 회복력을 유지하는 데 중요한 역할을 할 것이다.

본 연구의 주요한 목표는 외래 침입종인 등검은말벌이 생태계와 농업 시스템에 미치는 영향을 종합적으로 이해하는 것이다. 특히, 한국과 프랑스라는 두 주요 지역에서 등검은말벌의 확산 영향을 분석하고 비교하여 등검은말벌의 지리적 확산 패턴을 규명하는 것이 본 연구의 최우선 목표이다. 본 연구를 통해 온대 지역에서의 분포 유사점과 차이점을 조사함으로써, 기후 조건, 환경 변수, 서식지 적합성 등의 요인이 등검은말벌의 급속한 확산을 어떻게 촉진하는지를 밝혀보고자 한다.

두 번째 목표는 기후변화가 등검은말벌의 월동 생존율과 확산 속도에 미치는 영향을 탐색하는 것이다. 지구 기온이 상승하면서 등검은말벌이 온화한 겨울을 견디는 능력이 향상되었으며, 등검은말벌의 활동 기간이 길어지면서 개체군 증가 속도가 빨라지고 서식지 확장이 가속화되고 있다. 기후변화가 등검은말벌의 생활사에 미치는 영향을 이해하는 것은 향후 분포를 예측하고, 토착 생태계 및 농업 시스템에 대한 위험성을 평가하는데 필수적이다. 본 연구는 기후변화가 월동 생존율과 확산 패턴에 미치는 영향을 조사하여, 변화하는 환경 조건이 침입종의 동태에 미치는 영향을 규명하는 데 중요한 통찰을 제공할 것으로 기대된다.

본 연구의 세 번째 목표는 등검은말벌의 존재가 초래하는 장기적인 생태계 교란과 꿀벌 개체군에 미치는 영향을 평가하는 것이다. 수분 서비스와 농업 생산성에 필수적인 꿀벌은 등검은말벌의 포식 활동으로 인해 심각한 위협을 받고 있다. 본 연구는 이러한 포식압이 수분 네트워크, 생물다양성, 작물 생산량에 미치는 연쇄적인 영향을 분석하여 생태계 전반에 미치는 영향을 평가할 것이다. 또한, 꿀벌 개체군의 장기적인 감소와 그로 인한 생태계 안정성 저하를 분석함으로써, 침입종과 생태계 건강 간의 복잡한 상호작용을 보다 깊이 이해하는 데 기여하고자 한다.

마지막으로, 본 연구는 등검은말벌의 확산으로 인한 생태계 및 농업 생산성 위협을 최소화하기 위한 효과적인 대응 전략을 제안하는 것을 목표로 한다. 연구 결과를 바탕으로 조기 탐지 시스템, 말벌 개체군 관리 계획, 꿀벌 보호 방안 등 등검은말벌의 확산을 통제할 수 있는 실질적인 해결책을 모색할 것이다. 아울러, 기후 변화 맥락에서 침입종 관리를 위한 정책적 대응 방안을 탐색함으로써, 등검은말벌이 확산된 지역의 생물다양성, 수분 서비스, 식량 안보를 보호하는 데 기여하는 것을 궁극적인 목표로 한다.

등검은말벌 확산으로 인한 생태계와 농업 생산성 위협을 최소화하고, 등검은말벌 확산을 통제할 수 있는 실질적인 해결책을 모색해야 한다



등검은말벌의 생태학적 특성

등검은말벌은 중국 저장성 원산으로, 유럽과 한국을 포함한 온대 지역 전반에 성공적으로 침입하여 높은 적응력과 생존력을 지닌 종으로 자리 잡았다. 등검은말벌의 몇 가지 주요 생태적 특성은 새로운 환경에 적응하는 데 유리하게 작용하며, 빠른 확산과 생태학적 영향에 기여하고 있다.

- **생존력:** 등검은말벌의 가장 두드러진 특징 중 하나는 혹독한 겨울 환경에서도 생존할 수 있는 능력이다. 이 종은 나무 구멍, 창고, 다른 닫힌 공간과 같은 은폐된 장소에서 월동하며, 여왕벌은 봄까지 동면 상태를 유지한다. 다양한 서식지에서 생존할 수 있는 능력과 여왕벌의 봄철 출현 특성은 계절 변화에 취약한 다른 종들에 비해 등검은말벌이 생태적 우위를 점할 수 있도록 한다.
- **포식 행동:** 등검은말벌은 매우 효율적이고 기회주의적인 포식자로, 주요 먹이감은 꿀벌이다. 전략적이고 계산된 방식으로 꿀벌을 사냥하며, 벌통 근처에서 정지 비행을 하면서 먹이를 기다린 후, 채집을 마치고 돌아오는 일벌을 급습하여 포획한다. 등검은말벌의 지속적인 포식 활동은 꿀벌 군집을 약화시키며, 이는 수분 서비스에 광범위한 생태적 영향을 미친다. 꿀벌은 야생 식물과 농작물의 수분 과정에서 중요한 역할을 하므로, 꿀벌 개체수 감소는 생태계와 농업 생산성에 심각한 영향을 미칠 수 있다.
- **확산 속도:** 등검은말벌의 빠른 확산 속도는 부분적으로 교통망의 발달에 기인하며, 이는 종의 지역 간 이동을 용이하게 만든다. 2004년 프랑스에서 처음 발견된 이후, 등검은말벌은 불과 10년 만에 프랑스 전역으로 확산되었다. 한국에서는 남부 지역에서 최초로 보고된 후 점차 북쪽으로 확산되었으며, 현재는 서울을 포함한 주요 대도시에서도 점점 더 흔하게 발견되고 있다. 등검은말벌의 빠른 확산 능력은 다양한 서식지에서 새로운 군집을 형성할 수 있도록 하며, 등검은말벌을 매우 위협적인 침입종으로 만든 주요 요인 중 하나이다.

지구 기온이 상승함에 따라 등검은말벌의 번식 기간이 연장되고 생존율이 증가하는 경향을 보이고 있다. 특히, 겨울 기온이 따뜻해지면서 월동 여왕벌의 생존율이 높아지고 있으며, 이에 따라 봄철 개체군이 더욱 강력해지고 있다. 이러한 변화는 등검은말벌의 지리적 확산을 가속화하고 있으며, 현재 유럽과 아시아에서 그 확산 속도가 우려할 만큼 빠르게 진행되고 있다. 그러나, 이 종의 생태적 특성에 대한 많은 측면이 여전히 명확히 밝혀지지 않은 상태이며, 추가적인 연구가 필요하다.

침입종으로서의 등검은말벌의 현재 상황

등검은말벌은 현재 아시아와 유럽의 여러 국가에 확고하게 정착했으며, 두 지역 모두에서 광범위한 서식 보고가 이루어지고 있다. 한국에서는 이 말벌이 처음으로 남부 지역에서 발견되었으며, 이는 중국에서 해상 경로를 통해 유입되었을 가능성이 높다. 이후 등검은말벌은 점진적으로 북상하여 최근에는 서울과 강원도 지역에서도 발견 사례가 증가하고 있다. 이러한 북상 현상은 등검은말벌이 다양한 기후 조건에 적응할 수 있으며, 다양한 지리적 환경에서 생존하고 번성할 수 있는 능력을 지니고 있음을 보여 준다. 등검은말벌의 강한 포식성과 공격적인 특성을 고려할 때, 한국에서 등검은말벌의 확산은 특히 토착 수분매개 곤충 개체군과 농업 생산성에 미치는 잠재적 영향에 대한 우려를 불러일으키고 있다.

유사하게 프랑스에서도 등검은말벌은 2004년 처음 발견된 이후 빠르게 확산되었으며, 불과 10년 만에 프랑스 대부분의 지역에 정착하였다. 프랑스의 양봉업자들과 환경 보호 활동가들은 등검은말벌이 꿀벌 개체군에 미치는 심각한 영향에 대해 우려를 제기하고 있으며, 이는 지역 생태계를 교란시키고 수분매개 곤충의 개체수 감소를 초래하는 주요 원인이 되고 있다. 유럽에서 등검은말벌의 급속한 확산과 포식 행동은 보다 효과적인 모니터링 및 관리 전략의 시급한 필요성을 강조하고 있다. 일부 지역에서는 양봉업자들이 등검은말벌로 인해 전체 꿀벌 군집의 30%가 손실을 입었다고 보고하였으며, 이는 생물다양성과 식량 생산에 대한 위협을 더욱 심화시키고 있다. 2004년 프랑스에서 처음 발견된 이후, 등검은말벌은 유럽 전역으로 빠르게 확산되었다. 현재는 프랑스를 기점으로 스페인, 포르투갈, 이탈리아, 벨기에, 독일, 영국 등으로 확산되었으며, 이러한 지역에서 등검은말벌은 양봉업자들과 환경 보호 활동가들에게 중대한 문제로 인식되고 있으며, 꿀벌 개체군 감소와 지역 생태계 교란에 대한 우려가 지속적으로 제기되고 있다.

등검은말벌은 꿀벌을 포식할 뿐만 아니라, 다른 곤충 개체군에도 영향을 미쳐 생태계 전반의 균형을 교란할 가능성이 있는 것으로 알려져 있다. 이 말벌은 꿀벌을 비롯한 다양한 수분매개 곤충 및 곤충류와 같은 단백질이 풍부한 먹이를 선호하며, 이는 침입 지역에서 생태적 변화를 유발하는 주요 요인으로 지목되고 있다. 또한, 등검은말벌의 공격적인 성향과 빠른 번식력은 지역 생태계뿐만 아니라, 농작물 수확을 위해 수분 서비스에 의존하는 농민들의 생계에도 영향을 미칠 수 있다.

대한민국과 프랑스 모두 등검은말벌의 확산으로 인한 생태적 영향을 해결하기 위해 대응하고 있으며, 이는 지역 생태계와 농업 시스템에 중대한 영향을 미치고 있다. 이러한 지역에서 등검은말벌의 분포 현황을 정확히 파악하는 것은 효과적인 관리 전략을 수립하고 생태적·경제적 피해를 최소화하는 데 필수적이다. 이 외래 침입종의 확산을 통제하고 장기적인 영향을 줄이기 위해서는 지속적인 모니터링, 대중 인식 제고 캠페인, 등검은말벌의 생물학적 특성과 행동에 대한 연구가 필수적이다.

등검은말벌은 꿀벌을 포식하며
다른 곤충 개체군에도 영향을
미쳐 생태계 전반의 균형을 교란할
가능성이 있는 것으로 알려져 있다



요약: 침입 곤충과 생태계 교란

등검은말벌과 같은 침입종은 새로운 서식지에 빠르게 정착하며, 지역 생태계에 심각한 교란을 초래할 수 있다. 특히, 등검은말벌과 그 아종은 꿀벌과 같은 주요 종을 집중적으로 포식하며, 이로 인해 지역 생태계에 상당한 변화를 유발시킨다는 점이 확인되었다. 이에 따라, 이 말벌이 정착한 지역에서는 생물다양성 감소, 먹이망 교란, 농업 생산성 저하 등과 같은 연쇄적인 영향을 초래할 가능성이 크며, 결과적으로 생태계 전반에 걸친 광범위한 변화가 발생할 위험이 높다.

- **토착 수분매개 곤충 개체수 감소:** 등검은말벌의 주요 먹잇감인 꿀벌은 농업과 야생 식물의 수분 과정에서 필수적인 역할을 한다. 그러나 등검은말벌이 꿀을 채집하는 일벌을 포식하면서, 지역 생태계 내에서 꿀벌의 개체수가 급격히 감소하고 있다. 이로 인해 작물의 직접적인 수분 과정뿐만 아니라 생태계 전체의 먹이망에도 심각한 영향을 미친다. 많은 야생 식물 또한 꿀벌의 수분 활동에 의존하고 있기 때문에, 꿀벌 개체군 감소는 식물 다양성 감소로 이어질 수 있으며, 일부 종은 수분 과정이 원활하지 않아 번식이 어려워질 수 있다. 이러한 생태적 교란은 생물다양성을 위협할 뿐만 아니라, 농업 생산성 저하로 이어져 식량 안보와 농업 경제의 안정성에도 부정적인 영향을 미칠 수 있다.
- **먹이망 교란:** 등검은말벌이 꿀벌을 포식하는 것은 생태계 내 포식-피식 관계의 균형을 변화시키며, 먹이망 구조를 교란하는 요인으로 작용한다. 등검은말벌은 꿀벌의 최상위 포식자로 기능하면서 새로운 생태적 상호작용을 유발하여 기존의 종 간 관계를 변화시킨다. 예를 들어, 꿀벌 개체군 감소는 수분 과정에 영향을 미치는 것에 그치지 않고, 꿀벌 및 그 부산물(벌꿀, 화분 등)에 의존하는 다른 생물군에도 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 꿀을 먹는 곤충과 새, 꿀벌이 수분하는 식물에 의존하는 작은 포유류 등도 생존에 어려움을 겪을 가능성이 크다. 또한, 꿀벌 개체군 감소는 꿀벌 서식지나 그들이 수분하는 식물에 의존하는 다른 곤충 종의 개체수 감소로 이어지며, 결과적으로 먹이망 전반의 불안정성을 심화시킬 수 있다.
- **토착 포식성 곤충과의 경쟁 심화:** 등검은말벌이 새로운 지역에 정착하면서 토착 포식성 곤충과의 먹이 경쟁이 심화되고 있다. 특히, 먹잇감 확보를 둘러싼 경쟁이 증가하면서 지역 생태계의 균형이 변화할 가능성이 높아지고 있다. 등검은말벌은 공격적인 포식 행동, 높은 번식력, 다양한 서식지에서 생존할 수 있는 뛰어난 적응력을 갖추고 있어, 토착 포식 곤충들보다 경쟁에서 우위를 점할 가능성이 크다. 그 결과, 기존에 특정 해충 개체수를 조절하던 토착 포식 곤충들은 먹이와 서식지 모두에서 등검은말벌에게 경쟁에서 밀려나게 될 수 있다. 이러한 변화는 생태계의 불안정을 심화시키고, 장기적으로 지역 생태계 전반에 걸친 교란을 초래할 가능성이 크다.

기후변화가 등검은말벌의 급속한 확산에 미치는 영향

따라서, 등검은말벌의 확산은 단순히 수분매개 곤충을 포식하는 것에 그치지 않고, 생태계 전반에 걸쳐 복합적인 위협을 초래한다. 이 침입종은 종 간 상호작용, 먹이망, 생태계의 전반적인 건강성에 영향을 미치는 광범위한 생태적 변화를 유발하며, 결과적으로 생물다양성과 농업 시스템에 부정적인 영향을 미친다. 이러한 생태적 교란을 해결하기 위해서는 신속한 모니터링, 체계적인 연구, 효과적인 관리 전략이 필수적이다.

기후변화는 등검은말벌의 개체수 증가와 서식지 확장을 가속화하는 주요 요인으로 작용하며, 이 종의 생존율과 번식 성공률을 높이는 데 기여하고 있다. 등검은말벌이 새로운 지역에 빠르게 확산하고 정착하는 과정에 여러 가지 기후 관련 요인이 영향을 미치고 있다.

- **기온 상승:** 기후변화로 인해 지구 기온이 지속적으로 상승하면서, 등검은말벌의 생존율과 번식 성공률이 크게 향상되고 있다. 특히, 겨울철 기온이 상승하면서 월동하는 여왕벌의 생존율이 증가하고 있다. 과거에는 추운 겨울이 여왕벌의 생존을 제한하는 주요 장벽이었지만, 최근 온난화로 인해 더 많은 여왕벌이 동면을 견디고 살아남아 봄철에 더욱 이른 시기에 활동을 시작하고 있다. 이로 인해 군집 형성 및 번식 기간이 길어지면서 더 많은 개체가 번식하고, 새로운 지역으로 확산할 기회가 증가하고 있다. 기온이 높은 계절 동안 등검은말벌의 활동 기간이 연장됨에 따라, 사냥과 번식이 활발해지고, 이는 개체군 증가와 새로운 서식지 정착을 더욱 가속화하는 요인으로 작용한다. 선행 연구에 따르면 기온이 상승할수록 곤충의 활동 기간이 길어지며, 이는 생존율과 번식 성공률을 직접적으로 증가시키는 것으로 확인되었다.
- **습도 및 강수량 변화:** 기온 상승뿐만 아니라, 습도와 강수량 패턴의 변화 또한 등검은말벌의 확산을 촉진하는 중요한 요인으로 작용한다. 일반적으로 따뜻하고 습한 환경은 등검은말벌에게 풍부한 자원을 제공하며, 먹이 확보와 말벌집 형성을 더욱 용이하게 만든다. 강수량 증가로 인해 말벌집을 만들기 적합한 나무와 식물이 풍부해지며, 습도 변화는 등검은말벌의 생존에 유리한 환경을 조성할 수 있다. 또한, 기후변화의 영향으로 온화한 기후와 더불어 늘어난 식물 생장기간은 수분매개자의 활동 기간 또한 증가시켰다. 이러한 변화는 등검은말벌이 새로운 지역에서 정착하고 군집을 유지하는 데 유리한 조건을 형성하고 있다. 이러한 환경적 변화는 활동 기간의 연장, 서식지 적합성 증가, 먹이원의 풍부함과 맞물려 등검은말벌이 기존에는 생존이 어려웠던 지역에서도 성공적으로 정착할 수 있도록 하는 주요 요인으로 작용한다.

3.2 연구 방법

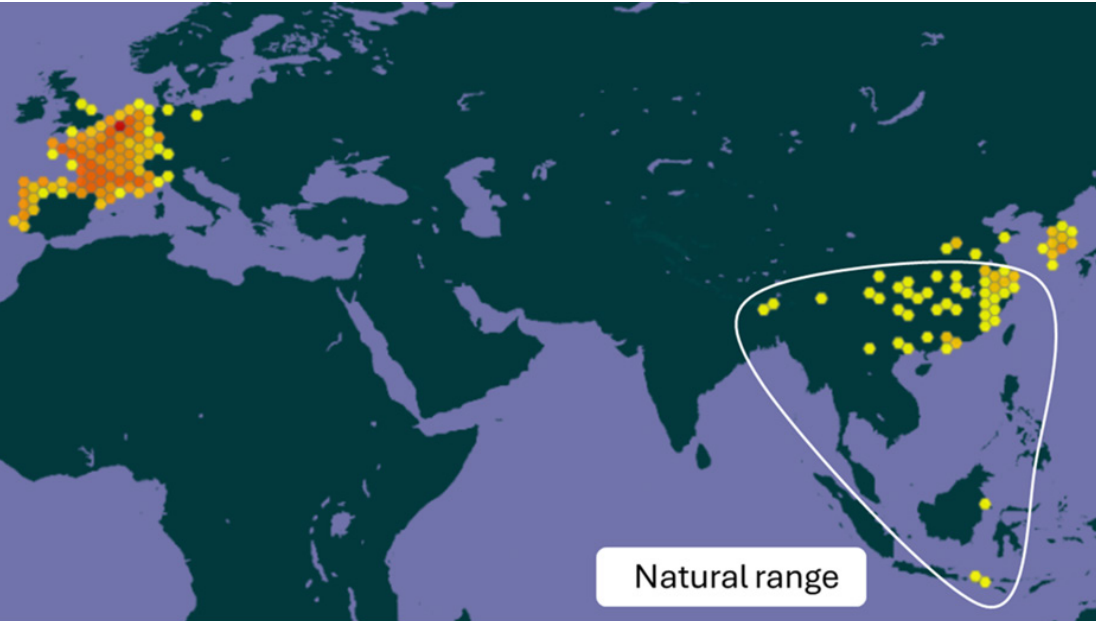
연구 지역

본 연구는 등검은말벌의 우점성을 평가하고, 다른 말벌 종과의 분포 차이를 모니터링하는 것을 목표로 하였다. 연구 지역은 대한민국의 수도인 서울을 포함하여, 웅진군, 무안군, 철원군, 제주시, 그리고 울릉군까지 광범위한 지리적 범위를 아울렀다. 특히, 철원군에서의 연구는 비무장지대(DMZ) 인근 민간인통제선(CCL) 내 마을에서 진행되었으며, 이는 등검은말벌의 확산 양상을 이해하는 데 있어 독특한 의미를 갖는다.

등검은말벌의 북상 움직임은 다양한 기후 조건에 대한 높은 적응력을 시사하며, 이러한 특성을 확인하기 위해 철원군을 주요 모니터링 지역으로 선정하였다. 이처럼 광범위한 지리적 분포를 포함하는 연구 설계를 통해, 등검은말벌의 확산 패턴과 지역 생태계와의 상호작용을 다양한 환경적 맥락에서 평가할 수 있도록 하였다.

또한, 회고 분석(Retrospective Analysis)을 통해 프랑스 내 등검은말벌의 잠재적 서식지를 비교 분석하였다. 한국과 프랑스에서의 등검은말벌 서식지 확산을 장기적인 관점에서 분석함으로써, 인간 활동과 기후변화가 복합적으로 이 종의 확산에 미치는 영향을 평가하는 데 초점을 맞추었다.

Fig. 13 등검은말벌의 알려진 분포와 자연적 서식 범위

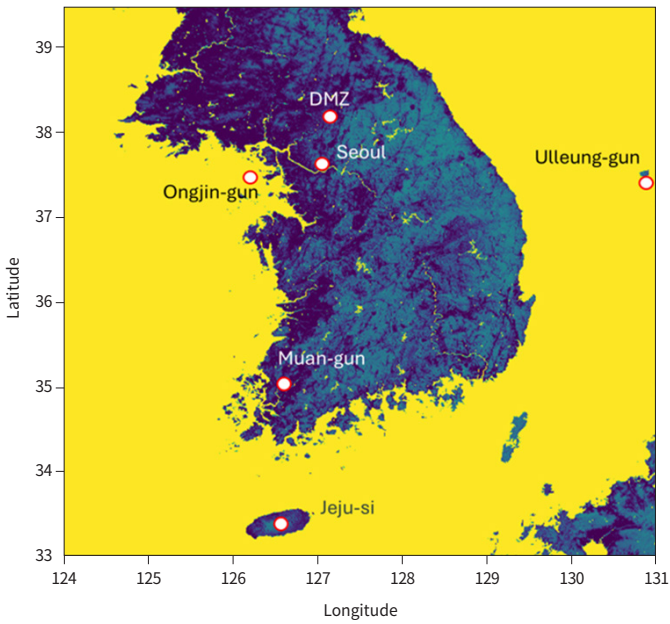


데이터 수집 및 분석

본 연구에서는 등검은말벌의 분포와 활동성을 보다 정확하게 파악하고, 기후 요인과의 상관관계를 분석하기 위해, 전통적인 현장 조사 방법과 현대적인 데이터 소스 및 분석 도구를 결합한 다각적 접근법을 활용하였다.

- **현장 포획 조사(Field Trapping Surveys):** 본 연구의 핵심 구성 요소 중 하나는 대한민국 내 9개 지역에서 수행된 현장 포획 조사이다. 본 조사의 목적은 등검은말벌과 다른 말벌 종을 채집하여, 분포 패턴, 개체군 밀도, 계절별 활동성을 평가하는 것이다. 포획 조사는 도시, 농촌, 농업 지역을 포함한 다양한 서식지에서 진행되며, 이러한 환경적 차이가 말벌의 정착에 미치는 영향을 분석하는 데 활용된다. 본 조사를 통해 수집된 데이터는 등검은말벌의 확산 경로를 추적하고, 주요 핫스팟 지역을 파악하는 데 기여할 것이다. 이러한 정보는 향후 효과적인 관리 및 방제 전략을 수립하는 데 중요한 기초 자료가 될 것이다.
- **시민 과학 데이터(Citizen Science Data):** 현장 포획 조사를 보완하기 위해, 본 연구는 두 가지 주요 시민 참여 생물다양성 데이터 플랫폼 데이터를 사용하였는데, GBIF(Global Biodiversity Information Facility)와 한국의 생물다양성 모니터링 플랫폼인 Naturing이 그에 해당한다. 이러한 플랫폼에서 제공하는 공간적 데이터는 등검은말벌의 분포를 보다 포괄적으로 분석할 수 있는 중요한 자료로, 현장 조사가 어려운 지역에서도 말벌 출현을 추적하는 데 유용하다. 본 연구는 시민 과학 데이터를 분석하여 등검은말벌의 확산 경향을 파악하고, 해당 종의 확산을 촉진하는 환경적 요인을 규명하는 데 초점을 맞춘다. 이를 통해 더 광범위한 지역에서의 분포 양상을 효과적으로 이해하고, 기존 현장 조사 데이터와 결합하여 종합적인 분석을 수행할 수 있다.
- **기후 데이터 분석:** 기후 요인과 등검은말벌의 활동성 간의 관계를 보다 잘 이해하기 위해, 본 연구는 NASA의 디지털 표고 모델(Digital Elevation Model, DEM), GLAD 캐노피 높이 데이터(GLAD Canopy Height), ERA5 기온 데이터 세트를 분석한다. 이러한 데이터 세트는 기온, 강수량, 지형 고도 등 고해상도의 기후 데이터를 제공하며, 환경 변수와 등검은말벌의 행동 간 상관관계를 분석하는 데 필수적인 역할을 한다. DEM은 연구 지역의 지형과 고도를 평가하는 데 활용되며, 이는 등검은말벌의 서식지 적합성에 영향을 미칠 수 있다. ERA5 데이터 세트는 1982년부터 2016년까지의 상세한 기온 데이터가 포함되어 있으며, 기온 상승이나 계절 변화 패턴이 등검은말벌의 계절별 활동성, 생존율, 번식 주기에 미치는 영향을 이해하는 데 특히 유용하다. 본 연구는 기후 데이터와 현장 조사 데이터를 통합하여, 등검은말벌이 다양한 환경에서 번성하는 데 영향을 미치는 주요 요인을 규명하고, 향후 분포 경향을 예측하는 것을 목표로 한다.

Fig. 14 말벌 모니터링 지역의 분포



© Sabine Bos / WWF-Netherlands

기후 기반 생물학적 모델링

등검은말벌의 향후 기후 시나리오에서의 잠재적 확산을 보다 정확히 예측하기 위해, 본 연구는 이전 연구에서 제안된 누적 온도 모델(Degree Days Model, DDM)을 적용한다. DDM은 여왕벌의 봉침 출현과 같은 생물학적 사건의 시기를 분석하는 데 효과적인 도구이며, 이러한 사건이 지역 기후 조건에 따라 어떻게 영향을 받는지 이해하는 데 유용하다. 본 연구에서는 DDM을 활용하여 등검은말벌 여왕벌의 출현 시기를 추정하였다. 여왕벌 출현 임계값은 350 누적 온도일(Degree Days, DD)로 설정되었으며, 이는 여왕벌이 번식 주기를 시작하는 데 필요한 기온 조건을 의미한다. 모델은 1월 1일부터 일평균 기온이 8°C를 초과하는 날들의 누적 온도 합계를 계산하며, 이 누적 합계가 350 DD를 초과하면 전체 여왕벌의 50%가 동면에서 깨어나 번식 주기를 시작하는 것으로 가정한다. 과거 기후 데이터를 분석하고 지역별 기온 변화 추세를 반영함으로써, 본 모델은 다양한 기후 조건에서 여왕벌의 출현 시기를 예측하는 데 활용될 수 있다.

추정된 총 면적(A)은 연중일(Day of Year, DOY) 120 이전, 즉 꿀벌의 주요 활동이 시작되기 전에 동면을 마치고, 50% 이상의 등검은말벌 여왕벌이 출현할 것으로 예상되는 지역을 나타낸다. 시민과학 자료에 따르면 이미 2017년 서울에서 등검은말벌이 발견되었기 때문에 회고분석을 2016년까지로 제한하였다.

$$A = \int_{Grid} 1 \left(\sum_{i=1}^n Ti(x, y) \geq 350DD \text{ and } n \leq 120DOY \right) \cdot \Delta A$$

이 모델링 기법은 기후 데이터 분석과 현장 관찰과 결합하여, 기후변화가 등검은말벌의 분포와 행동에 미치는 잠재적 영향을 예측하는 데 기여할 것이다. 이러한 동태를 이해하는 것은 향후 등검은말벌의 확산을 예측하고, 효과적인 대응 전략을 개발하며, 이 침입종이 초래하는 생태적 및 농업 측면의 위협을 관리하는 데 필수적이다.



3.3 연구 결과

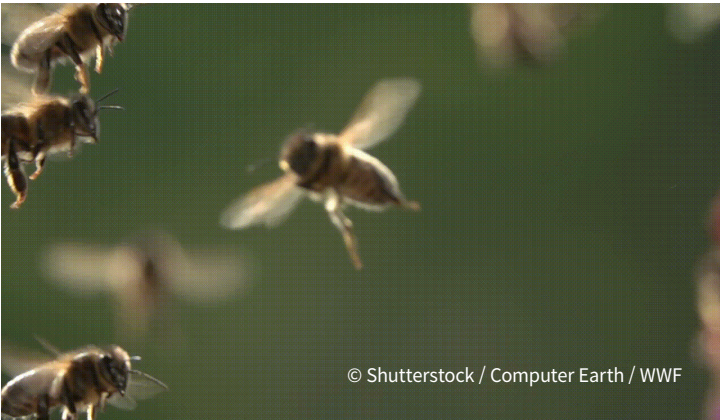
전 세계 분포 패턴

GBIF 기록과 본 연구의 모니터링 데이터를 종합적으로 분석한 결과, 등검은말벌은 다양한 캐노피 높이와 해발 고도를 포함한 지역에 분포하는 것으로 확인되었다. 그러나, 대부분의 출현 지역은 캐노피 높이가 5m 이하이고 해발 고도가 100m 이하인 지역에 집중되어 있었다.

한국 내 분포 변화

현장 조사 및 시민 과학 플랫폼을 통해 수집된 데이터는 한국 내 등검은말벌의 지속적인 확산을 명확히 보여준다. 초기에는 남해안 지역에 국한되어 서식하였으며, 해당 지역의 온화한 기후가 등검은말벌의 정착에 유리한 환경을 제공하였다. 그러나 최근 몇 년 동안 서울을 포함한 북부 지역과 강원도에서도 등검은말벌의 출현이 보고되면서, 서식 범위가 북쪽으로 확장되고 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 수행된 기후 모델링 분석 결과는 이러한 현상의 원인을 보다 구체적으로 설명한다. 특히, 기후변화로 인해 겨울 기온이 상승하면서, 높은 위도 지역에서도 등검은말벌이 성공적으로 월동할 가능성이 증가하고 있다. 온화한 겨울은 여왕벌의 사망률을 감소시키며, 이로 인해 기존에는 정착이 어려웠던 지역에서도 군집 형성이 가능해지고 있다. 이러한 분포 변화는 등검은말벌의 확산과 기후변화 간의 밀접한 관계를 보여주며, 특히 겨울철 기온 상승이 북쪽에서의 확산을 촉진하는 핵심 요인임을 시사한다.

또한, 모니터링 결과를 통해 등검은말벌이 비무장지대 인근의 민간인통제선 내 마을에서도 정착한 것으로 확인되었다. 그러나, 울릉군과 제주시에서는 등검은말벌 개체가 발견되지 않았으며, 이는 아직 내륙과 먼 섬 지역에서는 정착이 이루어지지 않았음을 의미한다. 전반적으로, 본 연구에서 기록된 전체 말벌 중 중 약 70%가 등검은말벌로 확인되었으며, 이는 연구 지역에서 등검은말벌이 토착 말벌 종보다 우위를 점하고 있음을 보여준다.



Region	서울				인천	강원	경북	전남	제주	%	Number
	구로구	광진구	관악구	은평구	옹진군	철원군	울릉군	무안군	제주시		
<i>Vespa dybowskii</i>	0	0	0	9	0	0	0	1	0	0.4	10
<i>Vespa ducalis</i>	0	9	5	9	3	44	0	47	0	4.9	117
<i>Vespa velutina nigrithorax</i>	33	64	235	573	4	19	0	614	0	65.1	1542
<i>Vespa crabro</i>	38	23	4	16	1	17	0	86	0	7.8	185
<i>Vespa mandarinia</i>	23	10	1	48	0	31	0	50	0	6.9	163
<i>Vespa analis</i>	0	6	21	14	0	19	0	12	0	3.0	72
<i>Vespa simillima simillima</i>	0	0	0	21	0	15	0	24	0	2.6	61
<i>Vespa simillima xanthoptera</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	150	6.3	150
Unidentified	0	0	0	6	1	48	0	12	0	2.8	67
Total	94	112	266	696	9	193	0	847	150	100.0	2367

표1. 모니터링 기간동안 포획된 말벌의 수

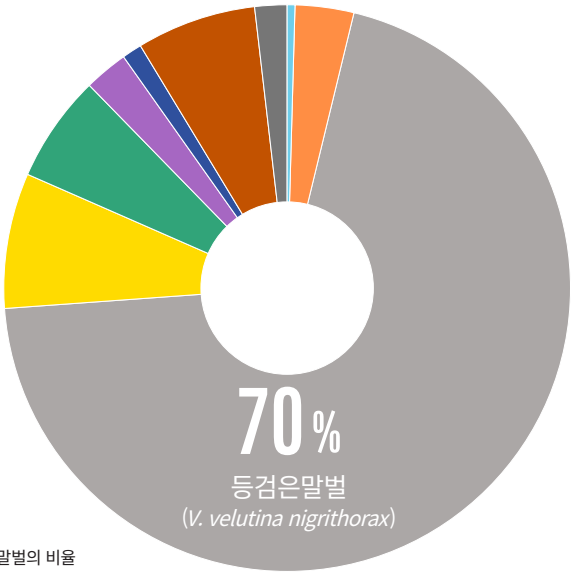


Fig. 15 포획된 전체 말벌 중 등검은말벌의 비율

프랑스에서의 확산 속도 비교

회고 분석 결과, 프랑스에서 등검은말벌은 더욱 공격적인 확산 양상을 보이며, 연평균 확산 속도가 약 1.2%로 추정되었다. 이는 한국에서 관찰된 확산 속도(0.5%)보다 상당히 높은 수준으로, 두 국가 간의 기후 조건 차이가 확산 속도에 영향을 미치고 있음을 시사한다. 등검은말벌 여왕벌의 월동 후 출현 시기는 한국과 프랑스 모두에서 점진적으로 앞당겨지고 있는 것으로 나타났다. 한국에서는 연간 약 0.2일씩 여왕벌의 출현 시기가 빨라지는 반면, 프랑스에서는 연간 약 0.5일씩 더 이른 시기에 출현하는 경향을 보였다. 이는 프랑스의 기후 조건이 한국보다 등검은말벌의 출현 시기를 더욱 빠르게 앞당기고 있음을 의미한다. 프랑스에서는 등검은말벌이 최초로 관찰된 남서부 지역에서 시작하여, 불과 몇 년 만에 프랑스 전역으로 급속히 확산되었다. 현재 이 종은 남부 및 서부 해안 지역뿐만 아니라 내륙 지역에서도 강력한 개체군을 형성하고 있으며, 다양한 환경 조건에서도 정착하는 능력을 보여주고 있다. 프랑스에서의 등검은말벌 확산은 기온과 강수량 패턴과 밀접한 관련이 있는 것으로 추정된다. 특히, 더 따뜻하고 습한 기후 조건이 말벌의 번식 성공률을 높이고 새로운 군집 형성을 촉진하는 환경을 제공하는 것으로 보인다. 과거 기온(1982년)을 바탕으로 미루어 볼 때, 등검은말벌이 두 나라에서, 과거 어느 시점에 도입되었더라도 도태되지 않고 생존할 수 있었음을 알 수 있다. 기후 변화는 확산세를 촉진하는 역할을 하였다. 이러한 기후 요인이 등검은말벌 확산에 미치는 구체적인 환경 임계점과 기작에 대해서는 추가적인 연구가 필요하며, 장기적으로 지역 생태계에 미칠 영향을 보다 면밀히 조사해야 한다.



© Paul Rogers / WWF-UK

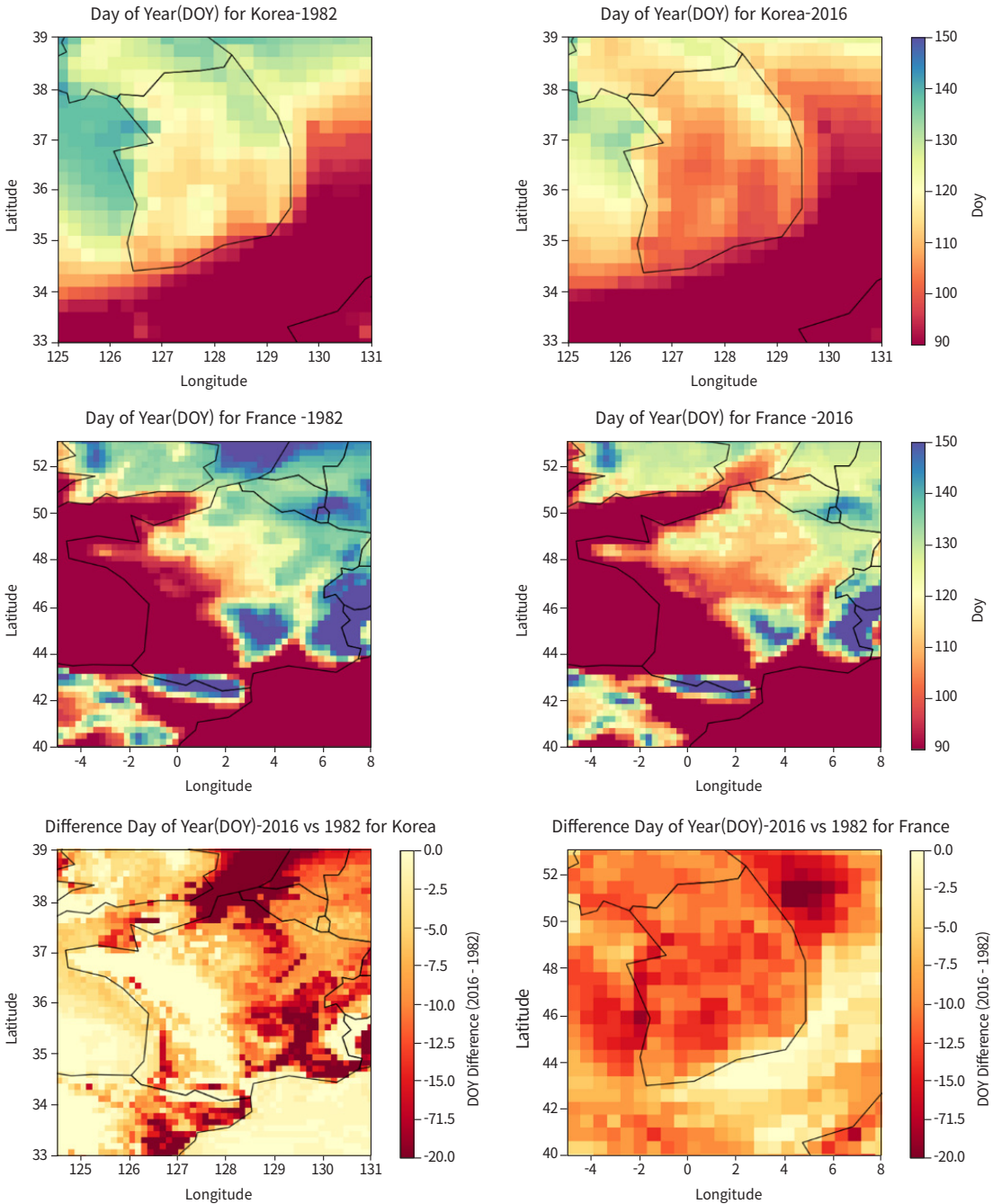


Fig. 16
한국과 프랑스에서 50% 이상의 등검은말벌 여왕벌이 동면 후 출현하는 시기의 예측일(DOY) 변화 및 1982년과 2016년 사이의 차이

기후변화에 따른 확산 기작

등검은말벌의 기후변화에 따른 확산은 여러 상호 연관된 기작에 의해 촉진되며, 이러한 기작들은 종의 새로운 군집 형성과 지역 확산을 강화하는 역할을 한다. 이러한 확산 기작은 온난화와 그에 따른 환경 변화의 결과로 나타나고 있다.

- 활동 기간 연장:** 등검은말벌 확산의 주요 요인 중 하나는 기온 상승으로 인해 활동 기간이 길어지는 것이다. 온난한 기후에서는 말벌 군집이 더 오랜 기간 동안 활동할 수 있으며, 이로 인해 먹이 탐색 및 군집 형성 기간이 연장된다. 활동 기간이 길어지면 등검은말벌이 더 이른 시기에 번식할 수 있게 되며, 새로운 군집이 빠르게 형성될 수 있는 환경이 조성된다. 그 결과, 새로운 지역에서의 정착 속도가 빨라지고, 이는 등검은말벌의 확산을 더욱 가속화하는 역할을 한다.
- 월동 생존율 증가:** 등검은말벌 확산의 또 다른 중요한 요인은 월동하는 여왕벌의 생존율 증가이다. 겨울철 기온이 온화해짐에 따라, 봄철 새로운 군집을 형성하는 여왕벌의 사망률이 감소하고 있다. 과거에는 혹독한 겨울로 인해 등검은말벌이 생존하기 어려웠던 지역에서도, 기후변화로 인해 여왕벌이 월동에 성공할 가능성이 커지고 있다. 그 결과, 봄철에 출현하는 여왕벌의 수가 증가하면서 군집 형성이 활발해지고, 새로운 서식지로의 확산이 촉진되고 있다. 특히, 기존에는 서식이 어려웠던 지역에서도 정착할 가능성이 높아지고 있어, 등검은말벌의 분포 범위가 더욱 확대될 것으로 예상된다.
- 먹이원의 증가:** 일부 지역에서는 기온 상승이 꿀벌 개체군의 증가를 초래할 수 있으며, 이는 등검은말벌의 확산을 간접적으로 촉진하는 요인이 될 수 있다. 꿀벌은 따뜻한 기후에서 더욱 번성하는 경향이 있으며, 이로 인해 등검은말벌이 번식과 유충 성장에 필요한 먹이를 더욱 쉽게 확보할 수 있다. 이러한 먹이원 증가 현상은 먹이 공급이 많아질수록 등검은말벌 개체군이 더 빠르게 성장할 수 있도록 만드는 순환 효과를 유발하며, 결과적으로 등검은말벌의 확산을 더욱 가속화할 수 있다. 이는 기후변화가 단순히 특정 종의 서식 환경에 직접적인 영향을 미치는 것이 아니라, 생태계 내 다양한 상호작용을 통해 침입종의 확산을 촉진할 수 있음을 보여준다.

등검은말벌 확산의 주요 요인 중 하나는 기온 상승으로 인해 활동 기간이 길어지는 것이다

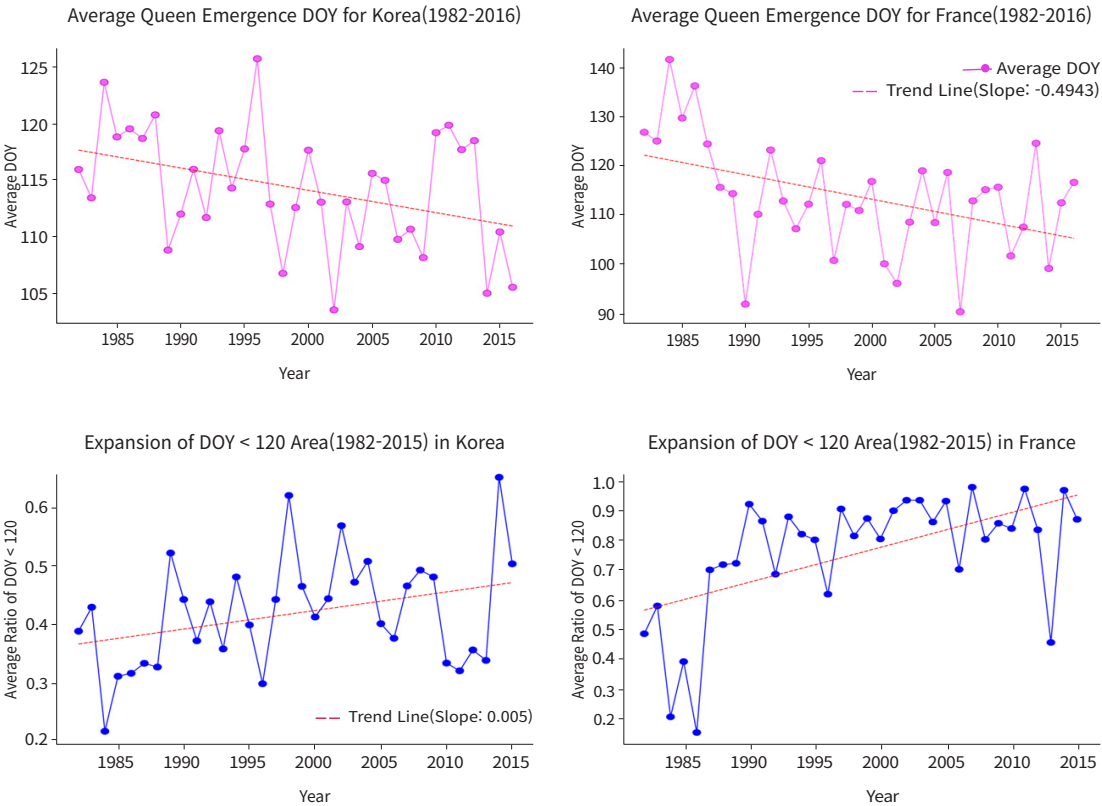


Fig. 17 1982년과 2016년 사이, 한국과 프랑스에서 등검은말벌 여왕벌이 동면 후 깨어나서 활동 가능한 지역 면적의 변화

3.4 논의 및 시사점

계절적 활동 변화

현장 조사 및 시민 과학 플랫폼에서 수집된 데이터는 등검은말벌의 계절적 활동 기간이 점점 길어지고 있음을 명확히 보여준다. 특히, 온난한 기후 지역에서 군집의 활동 기간이 연장되는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 양봉업자들은 등검은말벌의 포식압이 특히 늦여름과 초가을에 심화된다고 보고하고 있으며, 이는 말벌 군집이 최대로 성장하는 시기와 일치한다. 활동 기간이 길어질수록 등검은말벌의 포식으로 인한 꿀벌 개체군의 피해가 커지며, 이는 꿀벌의 생활사에서 중요한 시기에 더욱 큰 영향을 미친다. 등검은말벌의 활동 기간 연장은 이미 취약한 꿀벌 개체군에 추가적인 스트레스를 가해, 수분 매개 곤충 개체수 감소를 더욱 심화시키는 요인이 되고 있다. 이로 인해, 수분에 필수적인 꿀벌의 감소는 단순히 양봉업에 국한된 문제가 아니라, 야생 식물과 농작물의 수분에도 부정적인 영향을 미치는 등 생태계 전반에 걸쳐 광범위한 영향을 미치고 있다.

꿀벌 개체군과 생태계 안정성에 미치는 영향

등검은말벌의 지속적인 포식 활동으로 인한 꿀벌 개체군 감소는 생태계의 안정성과 농업의 지속 가능성에 중대한 위협이 되고 있다. 꿀벌은 과일, 채소, 견과류를 포함한 다양한 작물의 수분을 담당하는 필수적인 종이며, 이는 생태계 서비스의 핵심적인 기능 중 하나라 할 수 있다. 따라서, 꿀벌 개체군의 손실은 식물 번식과 먹이망 유지 등 자연 생태계의 기본적인 과정에 영향을 미치게 된다. 더 나아가, 꿀벌 개체군 감소는 식량 안보에도 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 수분매개자의 감소로 수분매개 효율이 감소하면 작물의 수확량이 줄어들고, 이는 농산물 가격 상승으로 이어지며, 결국 농업 및 식량 공급망 전체에 경제적 부담을 가중시킨다. 등검은말벌이 꿀벌 개체군에 미치는 지속적인 영향은 생태계와 농업이 얼마나 밀접하게 연결되어 있는지를 보여주며, 이러한 부정적 영향을 완화하기 위한 효과적인 관리 전략이 시급히 요구된다.

농업 및 양봉업에 대한 경제적 영향

등검은말벌의 확산이 초래하는 경제적 영향은 광범위하고 심각할 수 있다. 양봉업에서는 등검은말벌로 인한 벌집 손실이 증가하면서, 양봉업자들은 말벌 개체군을 관리하고 손실된 벌통을 보충하는 데 더 많은 비용을 지출해야 하는 상황에 직면하고 있다. 이러한 경제적 부담은 전문적인 방제 장비(예: 특수 포획 장치) 사용, 말벌 활동 모니터링 비용 증가 등으로 더욱 가중되고 있다. 또한, 앞서 언급한 바와 같이 농업 부문에서도 등검은말벌로 인해 꿀벌 수분 효율이 감소하면서, 수분 의존 작물의 생산량이 감소하고 있다. 이로 인해 특히 과일, 채소, 기타 수분 의존 작물을 생산하는 농업 종사자들은 경제적 손실을 입을 가능성이 크다. 등검은말벌의 확산과 꿀벌 개체군에 대한 포식이 심화될수록, 양봉업과 농업 부문의 경제적 부담은 더욱 증가할 것으로 예상되며, 이에 대한 긴급한 대응이 필요하다.



© Morgan Heim / Day's Edge Productions / WWF-US

4.나아갈 길

꿀벌은 수분매개자로서 다양한 개화 식물의 번식을 가능하게 하여 생태계 안정에 필수적인 종이며, 인간의 식량 생산과 농작물의 수확량, 품질 확보에도 중요한 역할을 한다. 기후변화는 이러한 꿀벌 개체군의 생존을 위협하며, 식량 시스템과 생물다양성에 중대한 영향을 미치고 있다. 기온 상승, 강수 패턴 변화, 이례적 기상이변이 꿀벌 군집의 내부 항상성을 교란하며, 외래 침입종인 등검은말벌의 기후변화에 따른 급속한 확산은 꿀벌 생태계에 이중적인 부담을 가중시키고 있다.

이전 연구가 대기질 악화와 꿀벌 시계 제한의 상관성을 밝혀 대기질 규제 중요성을 강조했다면, 이번 연구는 기후변화와 침입종인 등검은말벌이 꿀벌에 미치는 영향을 밝히고자 하였다. 꿀벌이 생태계에서 차지하는 수분매개자로서의 역할과 중요성, 농업과 식량 생산에 미치는 막대한 영향력을 고려할 때, 이러한 영향을 정량적으로 파악하여 적절한 보호 및 대응 전략을 세우는 것이 시급하다.



© Ola Jennersten / WWF-Sweden

연구 결과를 기반으로 꿀벌 생태계 보호 및 기후변화 대응 전략으로써 다음과 같은 방향성을 제시할 수 있을 것이다. 우선, 기상 스트레스에 강한 꿀벌 군집 환경을 조성하고, 기후 데이터 기반 양봉 관리 체계를 구축하는 것이다. 폭염, 폭우 등의 극한 기상 조건에도 내부 온도, 습도를 안정적으로 유지할 수 있도록 단열성을 강화하고, 통풍 조절 시스템 등을 적용하도록 벌통 디자인을 개선하는 것이다. 장기적 기온 상승에 적응 가능한 꿀벌 품종의 선별과 유전자 다양성을 확보하는 것도 중요하다. 또한 연구 기반의 기상-비행 예측 모델을 통해 꿀벌 비행 가능성과 수분 서비스 효율을 예측하여 농업과의 효율적인 연계 가능성을 모색하는 것이다.

또한 등검은말벌 조기 경보 및 방제 시스템을 구축하고, 국가 생물다양성 보전 정책을 꿀벌 중심으로 연계하는 활동이 필요할 것으로 보인다. 연구 결과를 통해 등검은말벌의 확산 정도가 앞으로 더욱 증가할 것으로 예상되므로 등검은말벌에 대한 지역별 모니터링 네트워크를 강화하고 예방적 방제 체계 마련이 필요하다. 주요 확산 루트로 예상되는 남부, 중부, 수도권에서 개체군을 실시간으로 탐지하고 확산 속도를 분석하는 것이다. 예방 체계와 관련해서는 벌통 주변 포식자 차단 장치 설치, 생물학적 통제 방안 연구, 포획 트랩 운영 등의 다양한 방안을 도입할 필요가 있다. 또한 수분매개자 친화적으로 서식지를 복원하고, 생물다양성 기반 기후변화 완화 전략을 통해 꿀벌 보전을 생태계 복원, 탄소 관련 정책과 통합하여 추진할 필요가 있다.

그리고 대중 교육 및 참여를 활성화하고 국제 협력 및 법제화를 추진하는 것이다. 시민 대상으로 꿀벌과 기후위기 인식 교육을 강화할 수 있도록 학교와 지역 커뮤니티를 중심으로 생태교육 프로그램을 확대하는 것이 필요하다. 양봉가 대상으로는 기후 대응 매뉴얼로써 극한기후 시 행동수칙, 포식자 탐지법 등이 포함된 실천 중심의 가이드라인을 보급할 수 있을 것이다. 등검은말벌의 확산은 다른 국가에서도 나타나고 있기 때문에, 침입종 대응을 위해 등검은말벌이 이미 확산된 프랑스와 같은 국가와 정보 공유를 늘려가는 것도 중요하다. 이와 더불어 생물다양성법, 농업법, 기후변화 대응 전략 내 꿀벌 보전 조항을 신설하는 등 기후변화와 수분매개자 보호 관련 법제도 정비도 함께 이루어져야한다.

꿀벌을 포함한 수분매개자 보호는 단순한 종 보존을 넘어, 기후위기 시대를 견디기 위한 생태계 회복력 강화의 핵심 과제로 자리매김해야 한다. WWF는 정부, 학계, 산업계, 시민사회가 협력할 수 있는 장을 마련하고 이 연구를 시작으로 꿀벌 중심의 생태적 전환을 통해 생물다양성과 식량 체계의 지속가능성이 보장될 수 있도록 앞으로도 다양한 활동을 전개해나갈 예정이다.

참고 문헌

Dicks, L. V., et al. (2021). A global-scale expert assessment of drivers and risks associated with pollinator decline. *Nature Ecology & Evolution*, 5(10), 1453–1461. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01534-9>

González-Varo, J. P., et al. (2013). Combined effects of global change pressures on animal-mediated pollination. *Global Change Biology*, 28(3), 524–530.

Polce, C., et al. (2014). Climate-driven spatial mismatches between British orchards and their pollinators: Increased risks of pollination deficits. *Global Change Biology*, 20(9), 2815–2828.

Potts, S. G., et al. (2010). Global pollinator declines: Trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology & Evolution*, 25(6), 345–353.

Potts, S. G., et al. (2016). Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature*, 540(7632), 220–229.

Settele, J., Bishop, J., & Potts, S. G. (2016). Climate change impacts on pollination. *Nature Plants*, 2, 16092. <https://doi.org/10.1038/nplants.2016.92>

Cho, Y., et al. (2024). Rising atmospheric levels of fine particulate matter reduce the degree of linear polarisation of light. *Communications Earth & Environment*, 5, 517. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01682-3>

Cho, Y., et al. (2021). Foraging trip duration of honeybee increases during a poor air quality episode and the increase persists thereafter. *Ecology and Evolution*, 11(3), 1492–1500. <https://doi.org/10.1002/ece3.7145>

Monceau, K., Bonnard, O., & Thiéry, D. (2014). *Vespa velutina*: A new invasive predator of honeybees in Europe. *Journal of Pest Science*, 87(1), 1–16.

Leza, M., et al. (2019). The impact of the invasive species *Vespa velutina* on honeybees: A new approach based on oxidative stress. *Science of the Total Environment*, 689, 709–715.

Monceau, K., & Thiéry, D. (2017). *Vespa velutina* nest distribution at a local scale: An 8-year survey of the invasive honeybee predator. *Insect Science*, 24(4), 663–674.

Seeley, T. D. (1982). Adaptive significance of the age polyethism schedule in honeybee colonies. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 11(4), 287–293.

Seeley, T. D., & Visscher, P. K. (2004). Group decision making in nest-site selection by honey bees. *Apidologie*, 35(2), 101–116.

Seeley, T. D., & Visscher, P. K. (1985). Survival of honeybees in cold climates: The critical timing of colony growth and reproduction. *Ecological Entomology*, 10(1), 81–88. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2311.1985.tb00537.x>

Seeley, T. D. (1974). Atmospheric carbon dioxide regulation in honeybee (*Apis mellifera*) colonies. *Journal of Insect Physiology*, 20(11), 2301–2305.

Loope, K. J., Baty, J. W., Lester, P. J., & Wilson-Rankin, E. E. (2019). Pathogen shifts in a honeybee predator following the arrival of the Varroa mite. *Proceedings of the Royal Society B*, 286(1901), 20182499.

Ryabov, E. V., et al. (2017). Recent spread of Varroa destructor virus-1, a honey bee pathogen, in the United States. *Scientific Reports*, 7, 1–10.

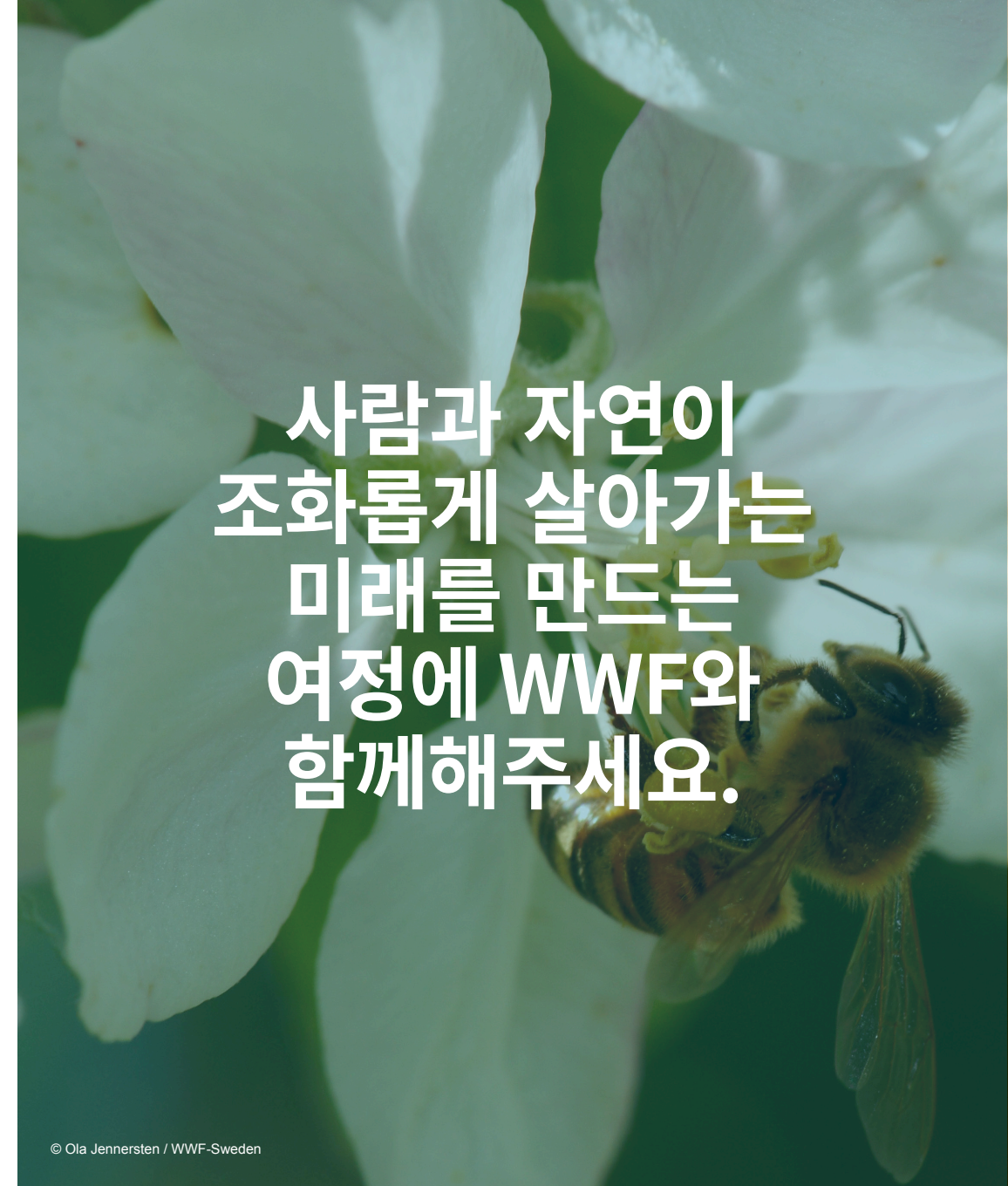
vanEngelsdorp, D., et al. (2009). Colony collapse disorder: A descriptive study. *PLOS ONE*, 4(8), e6481. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006481>

Park, S.-B., Kim, M.-J., & Jeong, C.-U. (2024). Development of a predictive model for the spring emergence timing of the queen *Vespa velutina* nigrithorax. *Journal of Apiculture*, 39(1), 43–49.

Keeling, M. J., Franklin, D. N., Datta, S., Brown, M. A., & Budge, G. E. (2017). Predicting the spread of the Asian hornet (*Vespa velutina*) following its incursion into Great Britain. *Scientific Reports*, 7, 6240.

Arca, M., et al. (2015). Reconstructing the invasion and the demographic history of the yellow-legged hornet, *Vespa velutina*, in Europe. *Biological Invasions*, 17(8), 2357–2371.

Goulson, D., & Nicholls, E. (2022). Anthropogenic influences on bee foraging. *Science*, 375(6582), 970–972.



사람과 자연이 조화롭게 살아가는 미래를 만드는 여정에 WWF와 함께해주세요.

© Ola Jennersten / WWF-Sweden



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

together possible™ wwfukorea.or.kr

© 2023

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

® 'WWF'는 WWF의 등록상표입니다.