

## 화분매개자의 역할과 보호<sup>1)</sup>

김 현 정<sup>2)</sup>

서울여자대학교

수분(Pollination)은 생태계의 한 과정으로 수백만 년에 걸쳐 꽃을 피우는 식물과 화분매개자에게 이익을 주기 위해 진화해 왔다. 대부분의 식물은 유전적 다양성 유지를 위해 자가불화합성 기작을 가지고 있어 타 식물 유래의 화분을 옮겨주는 기작을 필요로 한다. 이러한 기작을 화분매개(수분: Pollination)라고 하며, 종자식물의 종자 결실을 위해 암술머리에서 같은 종의 다른 식물 유래의 꽃가루를 옮겨 받아 화아 분화를 도와주고 수정을 유도하여 식물의 종자를 생산할 수 있는 기반을 조절해 주는 중요 과정이다. 화분매개자들은 꿀 섭취, 꽃가루 수집, 자신을 보호해줄 따뜻하고 안전한 꽃 속 공간 활용 등을 포함한 다양한 이유로 꽃을 방문한다. 화분매개자가 꽃을 방문하면, 꽃가루는 화분매개자의 몸에 묻혀 있거나 달라붙게 된다. 이렇게 꽃에서 화분매개자로 이동된 꽃가루는 화분매개



그림 . 꿀벌에 의한 타가수정 (그림출처: Encyclopædia Britannica, Inc.)

1) Roles and Protection of Pollinators

2) KIM, Hyun-Jung, Seoul Women's University, Seoul 01797, Korea; E-mail: tree1515@swu.ac.kr

자가 다음 꽃을 이용하기 위해 이동할 때 함께 옮겨진다. 이 과정은 모든 개화 식물의 생활사(Life cycle)에서 중요한 단계이며 꽃에서 종자 및 과일을 생산하기 위해 꼭 필요하다.

화분매개자(Pollinators)는 자연생태계에서 필수적인 서비스를 제공할 뿐만 아니라, 건강하고 생산적인 농업생태계에 필수적이며, 많은 농업 작물의 성장과 과육 생산 및 비옥한 씨앗 생산을 보장해준다. 일부 식물 종은 수분을 위해 바람이나 물 등에 의존하지만 전체 식물 종의 90%는 수분을 위해 화분매개자의 도움이 필요하다. 이러한 도움을 주는 화분매개자는 전 세계에 약 20만 종이 있으며, 이 중 약 1,000 종이 새나 박쥐, 작은 포유동물 등의 척추동물에 속하며 나머지 종은 파리나 딱정벌레, 나비와 나방 그리고 벌과 같은 무척추동물에 속한다. 화분매개자에 속하는 곤충들을 살펴보면 다음과 같다.

### 1) 벌목(Hymenoptera) : 벌(Bee & Wasps)

벌은 농업생태계에서 가장 흔하게 이용하는 화분매개자로 이들이 수집한 꽃가루와 꿀을 가공하여 판매함으로써 경제적으로도 가장 중요한 화분매개자 그룹이다. 벌류는 자신의 필요를 위해서만 먹이를 찾는 다른 종보다 더 많은 꽃을 방문한다. 야생 벌 개체수를 증가시키려면 서식지와 꽃이 많이 피는 식물 자원을 필요로 한다.



그림 2. 꿀벌과(Apidae)의 화분매개자

### 2) 파리목(Diptera)

꽃등에과와 재니등에과에 속하는 일부 종은 꽃에서 대부분의 자원을 획득한다. 이 과에 속하는 파리들은 많은 털이 몸에 있어서 많은 양의 꽃가루를 이동시킬 수 있다. 파리목에 속하는 종들은 다양한 자연 환경에 적응하고 진화하여 종 다양성이 매우 높아 자연생태계에서는 벌목과 함께 중요한 화분매개자에 속한다.



그림 3. 꽃등에과의 화분매개자

### 3) 나비목(Lepidoptera) : 나비와 나방

나비목에 속하는 종의 애벌레(유충)는 식물 조직을 먹이로 먹지만, 변태를 거쳐 성충이 되면 더 이상 먹지 않는다. 대신 꽃의 꿀을 먹이로 섭취하며 생활한다. 나비목의 종들은 빨대처럼 생긴 입을 통해 꿀을 섭취하므로 많은 양의 꽃가루를 이동시키지는 못하지만, 열대 지방에서는 가장 많은 화분매개자가 속해있는 그룹이며, 특정 식물의 경우 나비목에 속하는 특정 종에 의해서만 수분이 일어나기도 한다.



그림 4. 팔랑나비과의 화분매개자

### 4) 딱정벌레목(Coleoptera) : 풍뎅이와 하늘소 등

나비목과 마찬가지로 딱정벌레에 의해서만 수분이 일어나는 주요작물(예: 오일팜)이 있으며, 풍뎅이과와 의병벌레과, 꽃하늘소과 등 꽃에서 흔히 발견되는 화분매개자들이 많이 속해있다. 딱정벌레들은 성충시기에 꽃가루를 먹으며 다른 꽃들 사이를 이동함으로써 식물의 수분을 돕는다.



그림 5. 꽃벼룩과에 속하는 화분매개자

화분매개자는 서식 지역의 기후조건, 토양 및 식물의 생존방식에 적응하여 함께 생존해 왔다. 그러나 인간의 활동은 많은 토종 화분매개자(Native pollinators)의 서식지를 파괴하고 파편화했다. 남아있는 많은 서식지역은 침입성 식물 종에 의해 토종 식생이 고립되고 퇴화되어 기존의 토종 화분매개자 및 도입된 화분매개자의 생존에 부적합한 지역이 되었다. 이러한 서식지의 변화는 화분매개자의 개체군 형성 및 먹이공급 장소를 감소시킬 수 있다. 뿐만 아니라 농업을 위해 사용하는 살충제의 과도한 사용과 부적절한 적용은 화분매개자와 그 서식지에 영향을 미친다. 일부 살충제는 화분매개자, 특히 곤충을 직접적으로 죽이고, 제초제를 사용하여 지역의 야생화를 제거함으로써 식물의 다양성을 감소시킨다. 농업에 이용되는 양봉꿀벌과 같이 도입된 화분매개자는 현지의 밀원에 대한 토종 화분매개자와의 경쟁에도 취약하기 때문에 개체군 쇠퇴의 위험이 더욱 커진다.

세계자연보전연맹(IUCN)에 의하면, 최소 185종의 화분매개자가 절멸의 위협을 당하거나 멸종된 것으로 간주되고 있고, 미국의 경우 위협에 처한 박쥐 및 조류 13종 중 적어도 2종이 화분매개자인 것으로 밝혀졌다. 유럽 전역에서 야생 벌(Biesmeijer et al. 2006)과 꽃등에과(Syrphidae)에 속하는 종 (Keil et al. 2011)의 서식지 감소가 확인되었으며, 북반구에 걸쳐 나비 개체수 및 서식범위의 축소(Warren et al. 2001; Forister et al. 2010)와 꿀벌 종수의 감소(Williams and Osborne 2009; Bommarco et al. 2011; Cameron et al. 2011)가 확인되었다. 농업을 위해 도입된 꿀벌의 경우 지역에 따라 증가했지만(Aizen and Harder 2009) 전체적으로 토종 꿀벌을 포함한 야생 꿀벌 종은 지난 수십 년 동안 유럽과 북미에서 감소하고 있으며(Potts et al. 2010b; van Engelsdorp et al. 2011), 열대지역의 화분매개자에 대한 위협은 곧 현실화 될 정도로 촉박하지만 화분매개곤충에 관한 자료는 거의 없는 실정이다(Aizen and Feinsinger 1994; Freitas et al. 2009).

많은 화분매개자 중에서 가장 잘 알려진 종류는 벌목(Hymenoptera)이다. 자연환경에서 제일 활발한 화분매개활동을 함으로써 연구자들에 의해 가장 많은 연구가 진행되어 왔으

며, 이를 바탕으로 높은 효율의 수분능력을 검증받아 농업생태계에 도입된 곤충 중에서 작물의 수분을 위해 가장 많이 활용되고 있다. 지구상에 있는 식물의 75%가 꿀벌들의 화분매개 덕분에 번식을 한다. 쌀과 밀, 유채 등을 포함한 세계 100대 농작물은 인류 식량의 98%를 공급하고 있으며, 그 중 71%가 곤충 등의 화분 매개에 의존하고 있다. 꿀벌이 사라지면 인류의 식량도 사라지는 것이다. 꿀벌을 통해 생산된 열매는 1차적으로 인간이 섭취하기도 하지만 풀과 곡물 등은 2차적으로 소, 돼지, 닭 등 가축의 먹이로 사용되기 때문에 꿀벌이 사라지면 인류는 극심한 식량난에 처하게 된다.

**표 1. 곤충의 화분매개에 의해 생산되는 작물들**

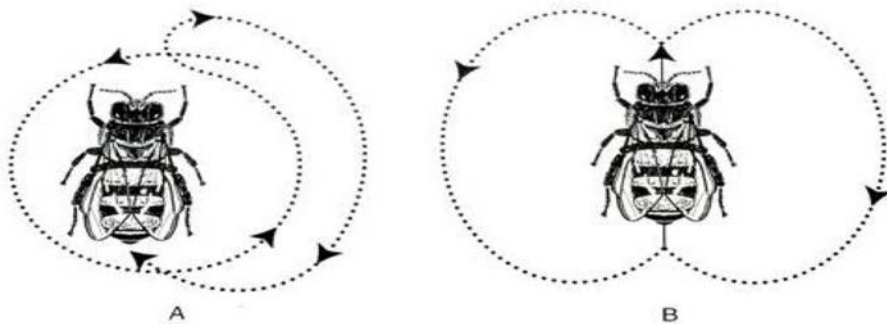
작물 유형	작물 명
콩과 식물	콩, 리마콩, 루핀스, 녹두 등
야채류	아티초크, 아스파라거스, 사탕무, 브로콜리, 콩나물, 당근, 콜리플라워, 샐러리, 오이, 가지, 피망, 파, 양상추, 오クラ, 양파, 호박, 무, 스쿼시, 토마토, 순무, 조롱박 등
과일 및 베리류, 견과류	아몬드, 사과, 살구, 아보카도, 블랙베리, 블루베리, 카카오, 캐슈넛, 체리, 밤, 감귤류, 커피, 코코넛, 크렌베리, 건포도, 구스베리, 포도, 구아바, 키위, 리치, 마카다미아, 망고, 올리브, 파파야, 복숭아, 배, 감, 석류, 딸기, 오동나무, 바닐라, 수박 등
허브와 향신료	알리세, 아니스, 후추, 캐러웨이, 카다몬, 꿀파, 정향, 고수, 딜, 회향, 라벤더, 겨자, 육두구, 파슬리, 피망, 차 등
오일, 씨앗, 곡물	알팔파, 메밀, 카놀라, 아마, 오일팜, 홍화, 참깨, 해바라기 등
클로버	땅콩, 레스페데자, 장미 등
기타	면화, 케나프 등

지난 30여 년간 급격한 환경의 변화는 각종 야생의 화분매개자원들의 서식처를 변형시켰을 뿐 아니라, 농업환경 및 농작물의 재배환경과 종류의 변화, 생태계의 변화는 환경을 대변할 수 있는 신뢰성 있는 자료를 축적하기도 전에 변화하고 있다.

미국 농무부의 통계에 따르면 1980년 450만개였던 양봉농가의 별통이 2008년 244만개로 줄었으며, 2006년 겨울부터 다음해 봄까지 북반부 꿀벌의 4분의 1이 사라졌다고 밝혔다. 2009년부터 2010년 사이 국내의 토종벌은 악성 바이러스가 퍼지면서 발생한 ‘낭충봉아부패병’과 ‘미국 부저병’으로 꿀벌과 유충 집단이 집단 폐사를 하였고, 농림축산식품부의 2010년 말 기준으로 토종벌의 76%가 사라졌다. 국외에서는 2007년 미국의 꿀벌 봉군 240만개 가운데 80만개가 겨울을 넘기지 못하고 폐사하였으며, 캐나다 온타리오지역의 벌의 35%가 사라지고, 프랑스, 독일, 스위스 등의 유럽에서도 겨울을 지나는 동안 전체의 40%가 사라졌다. 이 해의 세계 식량 가격은 37%가 급등하는 등 벌의 소멸로 인해 국제적인 문제가 발생하였다. 이 현상은 일명 군집 붕괴 현상(CCD)으로 불리며 원인을 밝혀내기 위해 여러 연구기관과 과학자들이 연구한 결과, 꿀벌의 군집 붕괴 이유로 각종 병균

과 바이러스, 기생충, 진드기, 살충제, 유전자조작 작물, 휴대폰 전자파 등 61가지 원인을 찾아내었으며, 결과적으로 여러 원인들이 복합적으로 작용했다는 결론을 발표하였다.

노벨상을 수상한 오스트리아의 곤충행동학자 카를 폰 프리슈(Karl von Frisch, 1886-1982)는 1960년대 꿀벌들의 춤은 밀원(蜜源)이 있는 곳까지의 거리를 동료들에게 알려주기 위한 정보 전달 방식이라는 것을 밝혔다. 먹이를 발견한 일벌이 봉군(벌집)에 돌아와서 두 가지 형식의 춤을 이용해 정보를 전달한다. 하나는 원형의 춤(Round dance)이고 다른 하나는 8자형의 춤(Waggle dance)으로 원형의 춤은 꿀의 소재지가 봉군 주위 반경 약 100 m 이내의 단거리에 있음을 알려주고, 8자형의 춤은 꿀의 소재지가 100 m를 넘어 6 km에 이르는 먼 거리에 있음을 알려준다. 또한 이 춤의 형태 외에 일정 시간에 춘 춤의 횟수에 따라 각기 다른 정보를 전달한다. 꿀의 소재지와 거리는 춤의 빈도에 반비례하며, 거리가 멀수록 춤의 속도가 느려진다. 꿀의 소재지 방향은 태양을 기준으로 8자 춤이 이루는 축으로 표시되며, 축이 오른쪽으로 기울어졌는지 왼쪽으로 기울어졌는지에 따라 꿀이 있는 장소와 태양이 이루는 각도를 나타낸다. 이토록 정교한 의사소통을 춤을 통해 전달하는 꿀벌들은 서식환경이 빠르게 바뀌면 주변 환경을 기억하지 못해 꿀이 있는 위치를 정확하게 전달하지 못할 수 있다.



**그림 6.** 꿀의 위치정보를 전달하는 꿀벌의 춤. (A) 원형 춤 (Round dance), (B) 8자형 춤 (Waggle dance). 꿀벌의 춤은 꿀의 소재지까지의 거리와 방향을 정확히 전달한다.

이미 중국 스완성에서는 수백 수 천 명의 노동자들이 ‘인간 벌’이 되어 일을 한다. 노동자들은 닭 털과 담배 필터를 붙여놓은 대나무 막대를 나무에 매달린 플라스틱 꽃가루 병에 담근 후 꽃마다 이 막대를 갖다 대어 수십억 송이를 직접 손으로 수분시킨다. 이렇게 힘든 노동을 하게 된 이유는 수년간 과수원에서 살충제를 엄청나게 사용한 이유로 벌들이 사라졌기 때문이다. 국내의 경우 자연생태계에 서식하는 토종화분매개자들은 나비류나 벌류, 파리류 등 1000종 이상이 있지만, 상업적으로 활용하고 있는 화분매개자는 뒤영벌, 꿀벌, 뿔가위벌류에 속하는 종으로 사육법 개발과 활용법 등을 계속적으로 연구하고

있다. 하지만 중국과 마찬가지로 대부분의 과수의 농가에서 수분을 위해 ‘인간 벌’이 일을 하고 있다. 벌이 사라지는 현상은 해결되지 못한 아직까지 국내외에서 발생하고 있는 현재진행형 상황인 셈이다.



그림 7. 스촨성에 위치한 배 과수원의 ‘인간 벌’에 의한 수분모습



그림 8. 국내 시설복숭아 농가에서의 수분 모습 (사진출처: 농촌진흥청)

농작물 및 야생식물의 화분매개자는 전 세계적으로 위협받고 있으며, 그 쇠퇴와 절멸은 경제적 및 환경적으로 중대한 결과를 초래하고 있다.

토지 이용의 강화, 기후변화, 외래종과 질병의 확산 같은 여러 가지 인위적인 원인이 화분매개곤충의 쇠퇴에 책임이 있다. 밀원의 부족, 질병, 살충제 같은 다양한 범위의 원인과 종의 분산 및 상호작용 같은 생물학적 과정 사이의 복잡한 상호작용에 대한 연구들이 화분매개곤충의 일반적인 쇠퇴를 뒷받침해주고 있다. 인류의 식량 안보와 자연생태계의 기능을 보존하려면, 이러한 상호 작용의 성격과 영향에 대한 학제 간 연구가 필요하다. 국제적으로 야생식물과 작물의 화분매개자 및 화분 서비스에 대한 문제를 완화하기 위해 중점을 두고 있는 주요 분야는 개략적으로 다음과 같다.

1) 화분매개자의 생태에 대한 기본적인 이해를 향상시키는 연구

- 우점 및 희귀 야생 식물 종의 주요 화분매개자에 대한 연구 (예 : Kleijn and Raemakers 2008)
- 꽃가루 가용성과 화분매개자의 풍부도 및 다양성 간의 인과 관계를 경관 척도로 확립하는 연구
- 경관 패치를 이용하여 분산 된 식물들 사이에서 화분매개자의 이동과 수분 성공의 측정을 향상시키는 연구 (예 : Carvell et al., 2012)

2) 화분매개자와 질병 그리고 환경 간의 복잡한 상호작용을 풀어내는 연구

- 유전자와 개체 스케일에서 화분매개자가 가지고 있는 병원균과 다양한 해충에 대한 상호작용을 줄이는 연구
- 사회적 화분매개자와 독립성 화분매개자의 병원체, 환경 독소, 및 영양실조 간의 분자수준에서의 상호작용 측정 연구
- 사회적 및 독립성 군집 안에서의 공유된 병원균의 병리학 및 역학 확립 연구

3) 화분매개자에 대한 인위적 영향을 이해하기 위한 연구

- 파편화된 경관에 걸쳐 일어나는 화분매개자의 메타개체군과 메타군집역동성의 평가 연구
- 여러 가지 상호 작용 (예 : 생태계 파편화, 질병, 외래종)이 화분매개자의 밀도와 행동에 미치는 경관 규모에서의 영향 평가
- 기후변화 영향 예측을 반영하여 곤충행동학과 개체군 통계를 통합하기 위한 현장 실험을 통한 여러 가지 시뮬레이션 모델링 연구
- 야생식물의 재생산과 화분매개자에 대한 산업화학물질의 만성적 영향에 대한 연구
- 서식지 퇴화의 정도에 따라 화분매개자 종들의 저항성 (지구력) 비교 연구(예: Forister et al. 2010)

화분매개자의 쇠퇴를 막고 보전하는 것의 이점은 두 가지로 요약할 수 있다. 첫 번째 이점은 농업 생태계에서 작물에 대한 다양한 화분매개자의 서비스를 경제적 비용을 지불하지 않거나 상대적으로 적은 재정적 비용만으로 얻을 수 있다는 점이다. 두 번째 이점은 공기정화와 물 순환 등 중요한 생태계 서비스를 제공하는 광범위한 생태계의 야생 식물이 생존하고 번식하기 위해 화분매개자에게 의존하고 있다는 점이다.

화분매개자의 쇠퇴를 막고 보존하기 위해서는 각각의 화분매개자들이 필요로 하는 적절한 먹이 제공과 피난처 및 물, 그리고 개체군을 형성할 공간을 확보해 주어야 한다.

화분매개자를 확보하는 가장 쉬운 방법은 다양한 종류의 야생화와 나무 및 관목을 포함하는 정원이나 초지를 만드는 것이다. 다양한 야생화와 토종 식물은 토종화분매개자에게 먹이(꿀, 꽃가루, 유충의 숙주 식물 등)를 제공해 주고, 나무와 뾰족한 관목은 화분매개자를 위한 중요한 쉼터 및 둥지가 되며, 바람과 천적을 피할 수 있는 공간을 제공해 준다. 여기서 주의할 점은 화분매개자를 확보하고자 하는 지역의 식물을 선택해야 한다는 점이다. 토종 식물은 그 지역의 기후 및 토양에 적응하며 진화해왔고, 토종 화분매개자는 토종 식물에 적응하며 생존해 왔다. 침입종 및 도입종은 자연 생태계의 구조와 구성을 방해함으로써 화분매개자 및 다른 야생 동물의 서식환경을 저하시킬 수 있다. 안정적인 먹이공급을 위해서는 일년생 식물보다는 다년생 식물을 위주로 식생을 구성하고, 식물 종은 군락이 형성되도록 조성되어야 한다. 다양한 꽃의 모양과 색상은 화분매개자를 유인할 수 있다. 대부분의 화분매개자는 빨간색, 오렌지색, 노란색 등 밝은 색의 꽃을 선호하며, 특



히 벌들의 경우 보라색, 파란색, 노란색 꽃에 유인된다.

화분매개자가 제공해주는 생태계 서비스와 지역의 미기후, 토양 및 식물에 대한 고유한 적응 능력을 이용하는 화분매개자는 우리의 환경과 경제에 대단히 중요한 역할을 한다. 그들의 가치에도 불구하고 토종화분매개자는 쇠퇴하고 있으며, 건강한 생태계에 대한 서비스 측면에서 종종 평가절하되고 있다. 인간의 활동은 토종화분매개자의 서식지를 파괴하고 파편화하면서 종의 쇠퇴를 불러왔다. 그러나 적절한 식생을 구성하고, 물을 공급해주며, 농업생태계의 살충제 사용량을 제한함으로써 화분매개자의 생존을 위한 조건을 개선해 나간다면, 쇠퇴해가는 화분매개자의 문제를 해결해 갈 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- Aizen, M. A. and Feinsinger, P., 1994. Habitat fragmentation, native insect pollinators, and feral honey bees in Argentine chaco serrano. *Ecol Appl* **4**: 378-392.
- Aizen, M. A. and Harder, L. D., 2009. The global stock of domesticated honey bees is growing slower than agricultural demand for pollination. *Curr Biol* **19**: 915-918.
- Biesmeijer, J. C., Roberts, S. P. M., Reemer, M., et al. 2006. Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands. *Science* **313**: 351-354.
- Bommarco, R., Lundin, O., Smith, H. G. et al. 2011. Drastic historic shifts in bumble-bee community composition in Sweden. *Proc R Soc Lond B* **279**: 309-315.
- Cameron, S. A., Lozier, J. D., Strange, J. P., et al. 2011. Patterns of widespread decline in North American bumble bees. *P Natl Acad Sci USA* **108**: 662-667.
- Carvell, C., Jordan, W. C., Bourke, A. F. G., et al. 2012. Molecular and spatial analyses reveal links between colony-specific foraging distance and landscape-level resource availability in two bumblebee species. *Oikos* **121**: 734-742.
- Encyclopedia Britannica, Inc.
- Forister, M. L., McCall, A. C., Sanders, N. J., et al. 2010. Compounded effects of climate change and habitat alteration shift patterns of butterfly diversity. *P Natl Acad Sci USA* **107**: 2088-2092.
- Forister, M. L., McCall, A. C., Sanders, N. J., et al. 2010. Compounded effects of climate change and habitat alteration shift patterns of butterfly diversity. *P Natl Acad Sci USA* **107**: 2088-2092.
- Freitas, B. M., Imperatriz-Fonseca, V. L., Medina, L. M., et al. 2009. Diversity, threats and conservation of native bees in the Neotropics. *Apidologie* **40**: 332-346.
- Keil, P., Biesmeijer, J. C., Barendregt, A., et al. 2011. Biodiversity change is Scale-dependent: an example from Dutch and UK hoverflies (Diptera, Syrphidae). *Ecography* **34**: 392-401.
- Kleijn, D. and Raemakers, I., 2008. A retrospective analysis of pollen host plant use by stable and declining bumble bee species. *Ecology* **89**: 1811-1823.
- Potts, S. G., Roberts, S. P. M., Dean, R., et al. 2010b. Declines of managed honey bees and beekeepers in Europe. *J Apicult Res* **49**: 15-22.
- Rohrseitz, K. and Tautz, J., 1999. Honey bee dance communication: Waggle run direction coded in antennal contacts?. *Journal of Comparative Physiology A*. **184**(4): 463-470.

- van Engelsdorp, D., Hayes, J., Underwood, R. M., *et al.* 2011. A survey of managed honey bee colony losses in the USA, fall 2009 to winter 2010. *J. Apic. Res.* **50**: 1-10.
- Warren, M. S., Hill, J. K., Thomas, J. A., *et al.* 2001. Rapid responses of British butterflies to opposing forces of climate and habitat change. *Nature* **414**: 65-69.
- Williams, P. H. and Osborne, J. L., 2009. Bumblebee vulnerability and conservation world-wide. *Apidologie* **40**: 367-387.