

야생화분매개곤충 분포 모형을 활용한 과수원 수분 서비스 위험도 평가*

고인수¹⁾ · 최혜영²⁾ · 권혁수³⁾

¹⁾ 버몬트 의과대학 연구원 · ²⁾ 강원대학교 생태조경디자인학과 교수 · ³⁾ 국립생태원 생태계서비스팀 선임연구원

A Risk Assessment of Orchard Pollination Services using a Species Distribution Model for Wild Pollinators*

Koh, In-Su¹⁾ · Choe, Hye-Yeong²⁾ and Kwon, Hyuk-Soo³⁾

¹⁾ University of Vermont, College of Medicine, Department of pathology and laboratory medicine, Researcher,

²⁾ Kangwon National University, Department of Ecological Landscape Architecture Design, Professor,

³⁾ National Institute of Ecology, Team of Ecosystem Services, Senior Researcher.

ABSTRACT

Wild pollinators provide important pollination services for crops. However, their geographical ranges and impact on pollination services have not been fully explored within the scope of Korean agricultural land. This study aims to identify spatial supply-demand mismatches across orchard fields in the context of assessing pollination service risk. We first used National Ecosystem Survey data and a species distribution model (MaxEnt) to develop the geographic range of each of 32 wild pollinators belonging to three families (Diptera, Hymenoptera, and Lepidoptera). We then summed the modeled presence probability of each species to obtain a measure of spatially explicit pollinator richness. This modeled richness, defined as pollination supply, was compared with the summed area of orchard fields at the municipal boundary level to identify areas with supply-demand mismatches. The study found that Lepidoptera showed the highest species richness (8.3 ± 1.5), followed by Hymenoptera (4.3 ± 0.8) and Diptera (3.5 ± 0.8) species. Median orchard area was 1.5 km^2 (range of 0 - 176.7 km^2) among 250 municipal regions in South Korea. The municipal regions were divided into three categories (tertiles) of low, middle, and high pollination supply and demand according to, respectively, average pollinator richness and orchard area. Finally, we found that 55 municipal regions (accounting for 49% of national orchard

* 이 논문은 국립생태원의 전략과제로 수행된 지역의 생태가치 평가 및 인식증진방안 연구 사업(NIE-전략연구-2020-07)의 지원을 받아 수행되었습니다.

First author : Koh, In-Su, Researcher, Department of pathology and laboratory medicine, College of Medicine, University of Vermont, Tel : 1-802-656-9840, E-mail : ikoh@uvm.edu

Corresponding author : Kwon, Hyuk-Soo, Senior Researcher, National Institute of Ecology, Tel : +82-41-950-5452, E-mail : ulmus@nie.re.kr

Received : 2 July, 2020. **Revised** : 24 November, 2020. **Accepted** : 11 November, 2020.

land) potentially faced high risk of pollination deficits, 81 regions (48% of national orchard land) faced intermediate risk, and 63 regions faced low risk (3% of national orchard land). In conclusion, this study revealed significant mismatch between pollination supply and demand and developed risk assessment map will guide our future efforts on pollinator habitat conservation and monitoring to conserve crop pollination services.

Keyword: *Ecosystem Services, Supply-Demand, National Ecosystem Survey, Pollinator Habitat Conservation*

I. 서 론

안정적인 수분 서비스 공급은 농업 생산량 유지에 필수 요소이다. 전 세계 주요 작물의 75%가 동물에 의한 화분매개에 전적으로 또는 부분적으로 의존하고 있다 (Klein et al., 2007a). 따라서 화분 매개자가 없다면 전 세계 작물 생산량의 5-8% 손실이 있을 것이라고 예측하고 있다 (Potts et al., 2016). 이 중 과수, 채소, 견과류, 종자 작물 등 대부분의 고부가가치 작물은 수분 서비스 의존율이 매우 높다 (Klein et al., 2007). 우리나라의 경우, 과수 및 채소 작물 생산의 약 50%가 꿀벌이 제공하는 수분 서비스에 의존하고 있다고 보고됐다 (Jung, 2008). 하지만 경제성이 높은 과수 작물들은 현재 인공 수분에 크게 의존하고 있는 실정이다 (Kim et al., 2003; Lee et al. 2016). 특히, Lautenbach et al.(2012)의 연구에서는 한국은 상대적으로 수분 서비스 의존율이 높은 국가로 평가했으며 따라서 수분 서비스 감소에 따른 경제적인 손실이 높다고 보고하고 있다. 따라서 야생 또는 토종 화분매개 곤충에 의한 수분 서비스의 공급과 수요 비교를 통한 수분 서비스 평가는 생태계 서비스 증진을 위한 전략수립에 꼭 필요한 과정이다.

수분 서비스 공급은 대부분 곤충(벌, 나비, 파리 등)에 의해 이루어진다 (Klein et al. 2007; Potts et al. 2016). 그 중 꿀벌은 대표적인 화분매개 곤충으로 오래 전 인류에 의해 가축화되어 전 세계 109종의 주요 작물 중 약 90% 가까이 수분 서비스를 제공하고 있다 (Klein et al.

2007). 우리나라의 경우, 대부분이 아직도 인공 수분에 의지하고 있지만 일부에서는 호박벌, 서양뒤영벌 등을 사육하여 일부 온실 작물 등에 이용하고 있다(Yoon et al., 2015; Yoon et al., 2018; Son et al., 2019). 하지만 최근에 와서 야생벌이 제공하는 수분 서비스의 중요성이 부각되고 있다. 국제 공동 연구에 의하면 야생벌이 전 세계 주요 41작물에 수분 서비스를 제공하고 있으며, 그 효율은 꿀벌의 두 배에 달한다고 보고하고 있다 (Garibaldi et al., 2013). 미국 캘리포니아 주의 수박 재배지 연구에 의하면 야생벌 서식지가 잘 보존된 경관과 가깝게 위치한 유기농 수박 과수원의 경우는 꿀벌에 의한 수분 서비스 없이도 야생벌로만으로도 충분히 수분 서비스를 유지할 수 있었다(Kremen et al., 2002). 수분 서비스 공급에 가장 효율적인 곤충은 주로 벌이지만 이외에도 꽃등에(Syrphoidea), 나비, 그리고 딱정벌레 등이 야생화분매개 곤충으로 관찰되고 있다 (Klein et al. 2007; Potts et al. 2016). 우리나라의 경우, 야생화분매개 주요 곤충으로 복숭아, 배, 그리고 사과 꽃에 방문하는 벌목, 파리목, 그리고 나비목을 보고하고 있다 (RDA, 2006).

수분 서비스 공급과 수요 평가는 주로 지역 단위에서 이루어진다. 수분 서비스 공급은 화분매개 곤충의 꽃 방문 횟수를 직접 관측하여 방문율(number of pollinator visits per flower per 10 min)을 계산하거나 화분매개 곤충의 서식지 분포에 기반하여 상대적인 방문율을 추정하는 방법이 사용되고 있다 (Winfree et al., 2007;

Lonsdorf et al., 2009; Polce et al., 2013). 수분 서비스 수요는 작물 면적에 수분 서비스 의존율을 가중하여 평가한다 (Lautenbach et al. 2012; Koh et al. 2016). 예를 들어, 풍매화인 감귤의 경우 곤충에 의한 수분 의존율은 약 5% (즉, 화분매개 곤충의 꽃 방문으로 5% 정도의 생산량 증대를 기대)인 반면, 충매화인 사과와 배의 경우는 65% 그리고 수박의 경우 95%로 보고되고 있다 (Klein et al. 2007). 따라서 지역단위의 수분 서비스 수요는 작물의 면적을 수분의존율로 가중하여 산출할 수 있다. 이러한 수분 서비스 공급과 수요에 기반한 수분 서비스 평가는 유럽 (Schulp et al., 2014), 미국 (Koh et al., 2016), 그리고 전 세계를 (Lautenbach et al., 2012) 대상으로 수행되었다.

우리나라는 아직 수분서비스 평가에 있어서 초보적인 수준에 머무르고 있다. 농촌진흥청 (2006)은 화분매개곤충이 주는 경제적 효과를 인공수분 비용 절감 측면에서 최초로 분석했다. Jung (2008)은 앞선 연구를 보완하여 꿀벌의 경제적 기여도와 가치를 재평가했다. 이후 대부분의 수분 서비스 연구가 주로 인간에 의해 사육되는 꿀벌과 서양뒤영벌 등에 집중되고 있다 (Yoon et al., 2015; Yoon et al., 2018). 특히 온실 작물 등에 집중한 수분서비스 효율성 연구가 활발히 논의되고 있다 (Son et al., 2019). 하지만, 야생 곤충 자원의 중요성과 이를 수분 서비스 공급과 수요의 관점에서 공간 단위로 평가한 연구는 아직 초보적인 수준이다. 특히 생태계 서비스 공간 단위 연구는 생물자원의 서식지 보전 및 생태계 서비스 보전에 필수적인 과정이다. 최근에 와서 국립생태원은 야생 곤충의 화분 매개자 중요성을 인식하고 화분 매개자 종수에 기반하여 시도군별 서비스 공급 및 수요 평가를 수행했다(NIE, 2015). 하지만 이 연구에서는 사용한 서비스 공급과 수요 평가 공간 단위는 너무 커서 수분 서비스 수요가 일어나는 지점의 공급을 정확히 평가하기에는 한계가 있다.

이 연구에서는 먼저 야생화분매개곤충 분포 자료에 기반한 종분포 모형을 이용하여 종수에 기반한 수분서비스 공급지수를 산출했다. 다음으로 국내 과수원 위치와 면적 그리고 수분서비스 의존율에 기초하여 수분서비스 수요를 산출했다. 마지막으로 수분서비스 수요와 공급지수를 비교하여 위험도를 평가했다. 이를 통해서 향후 수분서비스 증진을 위한 정책방안을 제시하고자 하였다.

II. 연구방법

이 연구 방법론은 다음과 같은 순으로 요약된다. 1) 야생화분매개 곤충 종 선택, 2) 선택된 각종을 대상으로 화분매개 종 분포도 구축, 3) 종분포 확률값을 합해 수분 서비스 공급 지수 산출, 4) 과수원 면적에 기반한 수분 서비스 수요 지수 산출, 그리고 5) 시군구 행정구역을 기준으로 수분 서비스 공급 지수와 수요 지수를 상대 비교하여 수분 서비스 위험도를 평가했다 (Figure 1).

1. 야생화분매개 종 선택

이 연구는 제3차 자연환경조사에서 출현하는 종을 대상으로 야생화분매개 종을 선택했다. 제3차 전국자연환경조사는 제2차와 제4차 전국자연환경조사에 비해 일정한 격자 크기로 구분해, 조사지역이 누락되지 않고 균질한 조사 자료가 수집되어 전국 내 종의 분포를 확인하는데 효과적이다 (Kwon et al., 2020). 연구에 활용된 야생화분매개 곤충은 우리나라 3대 과수인 사과, 배, 그리고 복숭아에서 관찰되는 파리목 (Diptera) 중 꽃등예과 (Syrphidae), 벌목 (Hymenoptera), 나비목 (Lepidoptera)으로만 한정했다 (RDA, 2006). 벌목 중 개미과 (Formicidae)와 말벌과 (Vespidae)는 제외했다. 특히 말벌과의 경우 대부분 꿀벌을 사냥하는 육식성 곤충으로 보고되고 있다 (Choi and Kwon, 2015). 또한 서양종꿀벌 (*Apis Mellifera*)은 대부분 농촌에 양봉형태로 도입되고 있기에 역시

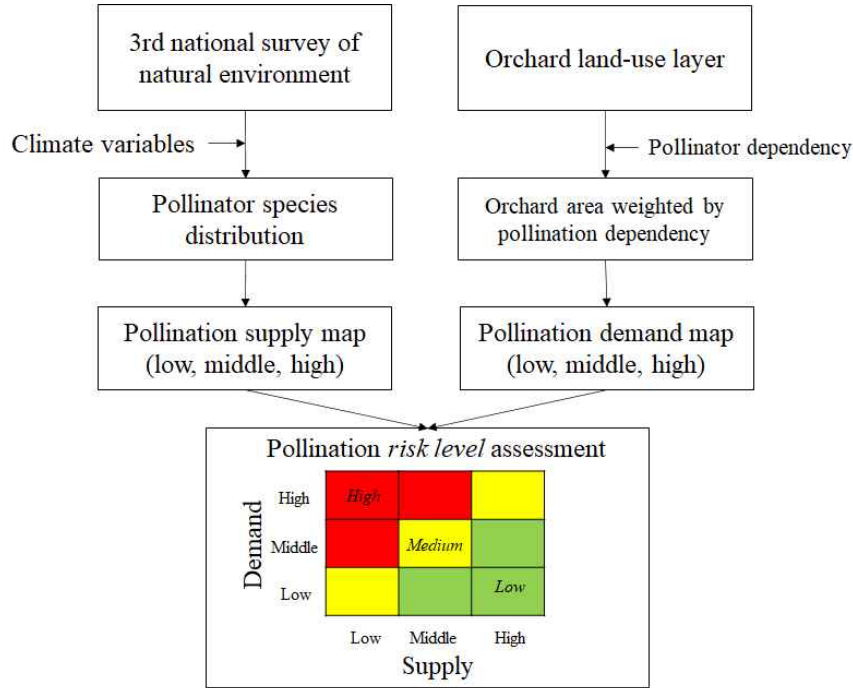


Figure 1. Research flow chart of pollination risk level assessment.

제외했다. 마지막으로 종 분포도 구축을 위해서 최소 10곳 이상 출현된 종만이 연구에 포함했다.

2. 화분매개 종 분포도 구축

화분매개 종분포는 기후, 질병인자, 그리고 화분식물 종분포에 영향을 받지만, 자료의 한계로 이 연구에서는 기후인자만을 이용하여 종분포모형을 구축했다. 선정된 야생화분매개 곤충 각 종을 대상으로 11개의 생물기후변수(table 2)를 환경변수 삼고 R(v.3.5.3)의 dismo 패키지에서 maxent 함수를 이용하여 종분포확율을 계산하고 자연환경조사 소격자 단위에서 종분포모형을 구축했다 (Phillips et al., 2006; Choe et al., 2020; Kwon et al., 2020). 선정된 11개의 생물기후변수는 계절성 및 극단적이거나 제한적인 환경적 요인을 설명할 수 있고 (Busby, 1991) 우리나라에서 종분포모형의 환경변수로 많이 이용되고 있다 (Choe et al., 2016; Choe et al., 2017). 생물기후변수는 WorldClim (<http://www.worldclim.org/>)에서 제공하는 30 arc-seconds(약 1km^2) 해상도의

1970-2000년의 평균 기후정보를 이용하였다 (WorldClim version 2; Fick & Hijmans, 2017).

3. 수분 서비스 공급 지수 산출

수분 서비스 공급 지수로 선행 연구들처럼 화분매개 곤충의 방문율이 이용되는데, 이 연구는 종풍부도를 공급지수로 삼았다. 전 세계를 대상으로 한 메타 연구에서 야생화분매개곤충의 과수꽃 방문율은 방문하는 종풍부도에 비례한다고 보고되었다 (Garibaldi et al. 2014). 또한 방문율은 자연서식지로부터 거리에 비례하려 감소하는데, Ricketts et al. (2008)은 온대림의 화분매개곤충의 방문율은 자연서식지로부터 1308 m (90% 신뢰 구간, 437m - 13,849m) 떨어져 있을 때 50% 감소한다고 보고했다. 따라서 자연환경조사 조사단위 크기(2.5min x 2.5min, 약 400m x 400m)에서 출현하는 종의 해당 격자 안의 과수원 방문율을 1로 가정하고 총 화분매개곤충 종풍부도를 해당 격자의 수분서비스 공급지수로 삼았다.

화분매개곤충 종풍부도는 각 종의 종분포도 모

형 확률값을 합산하는 방식으로 구했다. 종풍부도를 추정하기 위한 방안으로 거시 생태모형(macroecological models) 또는 종분포모형 결과를 합산하는 방법 (stacking species distribution models; S-SDMs) 등이 제안되었다. 최근의 연구에서는 각종의 종분포모형 결과를 합산하여 종풍부도를 추정하는 방법이 자주 이용되고 있지만(Scherrer et al. 2020), 어떻게 합산해야 하는 지에 대해서는 아직까지 합의된 방법이 없다. 상당한 연구들이 출현/비출현의 이분법적인 결과를 사용하여 합산하는 것은 종풍부도를 과대추정하는 경향이 있다는 것을 밝혔으며(Dubuis et al. 2011; D' Amen et al. 2015; Grenié 2020), 확률 기반(0에서 1까지의 원시적인 종분포모형 결과)의 합산이 종풍부도의 과대평가를 막고 실제 종풍부도에 더욱 근접하다는 것을 밝혔기 때문에(D' Amen et al. 2015; Del Toro et al. 2019; Grenié 2020; Scherrer et al. 2020), 본 연구에서는 종분포모형을 통한 각종의 분포 확률값을 합산하여 종풍부도를 다음과 같이 추정하였다.

$$Species\ richness_i = \sum_{j=1}^J P(Syrphidae_{j,i}) + \sum_{k=1}^K P(Hymenoptera_{k,i}) + \sum_{l=1}^L P(Lepidoptera_{l,i})$$

여기서, i 는 자연환경조사 격자, $P(X_{j,i})$ 는 격자 i 의 X 화분매개 곤충의 j 종 출현 확률값, 그리고 J, K, L 은 각 화분매개 곤충 그룹에서 선정된 총 종수를 의미한다.

4. 수분 서비스 수요 지수 산출

수분서비스 수요는 과수의 시설 재배와 노지 재배 모두에서 발생하지만, 야생화분매개 곤충이 혜택을 줄 수 있는 노지 과수원만을 수요 발생지로 한정하고 과수원의 면적을 수분 서비스 수요 지수로 삼았다. 노지 과수원 위치와 면적은 환경부 토지피복도 중분류의 과수원 폴리곤을 이용하여 추출하였다. 특히, 야생 수분매개 공급 지수와 평가단위를 맞추기 위해 전국자연환경조사 조사단위 별로 수분서비스 수요 지수

(과수원 면적)를 산출하였다. 선행연구들에서는 과수원의 면적을 화분매개 의존율로 가중하여 수분 서비스 수요 지수를 산출하였지만 (Jung 2008), 토지피복도 중분류에서는 과수원 재배 작물에 대한 구체적 정보가 없기에 모든 과수원이 동일한 수분 서비스 의존율을 가진다고 가정하고 과수원 면적만을 수요 지수로 산출했다.

5. 수분 서비스 수요-공급 평가

수분 서비스 수요-공급 분석의 단위는 시군구 행정구역을 기준으로 하였다. 먼저, 행정단위별 과수원 총 면적을 수요 지수로 삼았다. 수요 지수의 경우 과수원 면적이 0.01 km^2 (1 ha) 이하인 행정구역의 경우는 수분 서비스 수요가 없다고 가정하고 분석에서 제외했다. 행정단위별 공급 지수는 과수원이 존재하는 자연환경조사 소격자의 공급 지수(각 종의 확률분포 총 합)를 행정단위별로 평균하여 구했다. 따라서 수요발생지 기준으로 평균 공급 지수를 구할 수 있었다. 그 다음, 행정 단위별 수요와 공급 지수를 그 크기 순서에 따라 3등분하여 수분 서비스 수요와 공급을 각각 상, 중, 하로 분류했다. 삼분위수를 적용한 이유는 행정단위별 과수원 면적이 정규 분포를 따르고 있지 않고 서비스 위험도 상대 평가에 유리하기 때문이다. 보수적 관점에서 위험도 평가를 수행하기 위해서 수요와 공급이 동일한 수준인 행정구역을 먼저 중위험 지역으로 분류하고, 수요가 상대적으로 높은 지역을 고위험(수요 상 - 공급 중 또는 하 그리고 수요 중 - 공급 하), 그리고 수요가 상대적으로 낮은 지역을 저위험(수요 중 - 공급 상 그리고 수요 하 - 공급 중 또는 상)지역으로 분류했다.

III. 결 과

1. 화분매개 종 분포도

전국자연환경조사 소격자 6,747개소 중 10곳 이상에서 관찰된 종 수는 파리목 꽃등애과 7종,

Table 1. Pollinators observed more than 10 survey quadrats in the 3rd National Survey of Natural Environment

Order	Species
Diptera, Syrphidae	<i>Sphaerophoria menthastri</i>
	<i>Baccha maculata</i>
	<i>Metasyrphus corollae</i>
	<i>Melanostoma scalare</i>
	<i>Phytomia zonata</i>
	<i>Syrphus torvus</i>
Hymenoptera	<i>Allograpta balteata</i>
	<i>Crocisa emarginata</i>
	<i>Nomada japonica</i>
	<i>Ceratina flavipes</i>
	<i>Halictus aerarius</i>
	<i>Eucera spuratipes</i>
	<i>Megachile humilis</i>
	<i>Bombus ignitus</i>
	<i>Apis cerana</i>
	<i>Amegilla florea</i>
	Lepidoptera
<i>Colias erate</i>	
<i>Polygonia c-aureum</i>	
<i>Artogeia rapae</i>	
<i>Lycaeides argyromon</i>	
<i>Rapala caerulea</i>	
<i>Japonica lutea</i>	
<i>Pseudozizeeria maha</i>	
<i>Eurema laeta</i>	
<i>Anthocharis scolymus</i>	
<i>Leptidea amurensis</i>	
<i>Papilio xuthus</i>	
<i>Artogeia melete</i>	
<i>Celastrina argiolus</i>	
<i>Kaniska canace</i>	
<i>Limnitis camilla</i>	

벌목 9종, 나비목 16종 총 32종이었다 (Table 1). 먼저 화분매개 곤충 종 각각에 대해서 소격자 공간 단위에서 종분포도를 구축했다 (Figure 2 A-C). 화분매개곤충 각 집단내에서 곤충종분포 확률값을 합한 결과, 종풍부도 평균값은 꽃등에 과 3.5 종(SD = 0.8), 벌목 4.3 종(SD = 0.8), 그리고 나비목 8.3 종(SD = 1.5)이었다 (Figure 2 D-F).

2. 수분 서비스 공급 및 수요 지도

전국자연환경조사 소격자를 공간단위로 화분매개곤충 분포 확률을 모두 합하여 화분매개곤충 종 풍부도 지수(수분 서비스 공급)를 산출하고 과수원 면적(수분 서비스 수요)을 산출하여

지도화했다 (Figure 3). 화분매개곤충 종 풍부도는 전국 평균 16.0 (SD = 2.5)이었으며 경상북도에서 가장 많은 종수가 예측되었고 강원도에서 가장 적은 종수가 분포하는 것으로 예측되었다 (Figure 3A). 대체적으로 중부지방, 즉, 경상북도와 충청남북도에서 높은 종 풍부도를 보였고 경기도, 전라남북도 그리고 경상남도 일부 지역에서 종풍부도가 작았으며 지역별 편차는 최대 3배까지 나타났다. 소격자당 과수원 면적은 전국 평균 0.4 km² (SD = 0.9 km²)이었다. 과수원은 경상북도와 제주도에서 많이 분포하고 있고, 다음으로 충청남북도와 경기도 경계지역 그리고 전라남도 강원도 일부에 있으며, 강원도에 가장 적게 분포하고 있다 (Figure 3B).

행정구역단위별 종풍부도 크기를 삼분위로 나눈 결과, 경상북도 충청남북도 대부분의 지역이 수분서비스 공급 상위그룹 (16.8-20.7 richness)으로 분류되고, 강원도, 경기도 북부 지역, 전라남북도 서해안 지역과 제주도, 그리고 일부 경상남도 지역은 하위그룹(10.4-15.5 richness), 그리고 나머지 지역이 중위그룹으로 분류되었다 (Figure 3C). 행정구역단위별 과수원 면적을 삼분위로 나눈 결과, 대부분의 경상북도와 제주도, 경상남도 일부, 그리고 경기도와 충청남북도 경계지역, 일부 전라남북도 지역이 상위그룹(과수원 면적, 3.4 km² - 176.7 km²)으로 분류되고, 대부분의 강원도와 경기도 북부 지역이 하위그룹(과수원 면적, 0 km² - 0.6 km²), 나머지 지역이 중위그룹으로 분류되었다 (Figure 3D).

3. 수분 서비스 위험도 상대평가

행정구역별로 삼분위된 종풍부도 지도와 과수원 면적 지도를 중첩하여 수분서비스 위험도 상대평가를 수행한 결과, 총 55개의 행정구역이 수분서비스 고위험 지역으로 평가됐다 (Figure 4). 고위험 지역의 과수원 총 면적은 656 km²으로 전국 과수원 면적 (1,350 km²) 대비 49%를 차지했다. 경기도 외곽 지역, 전라남도, 전라북도와 경상남

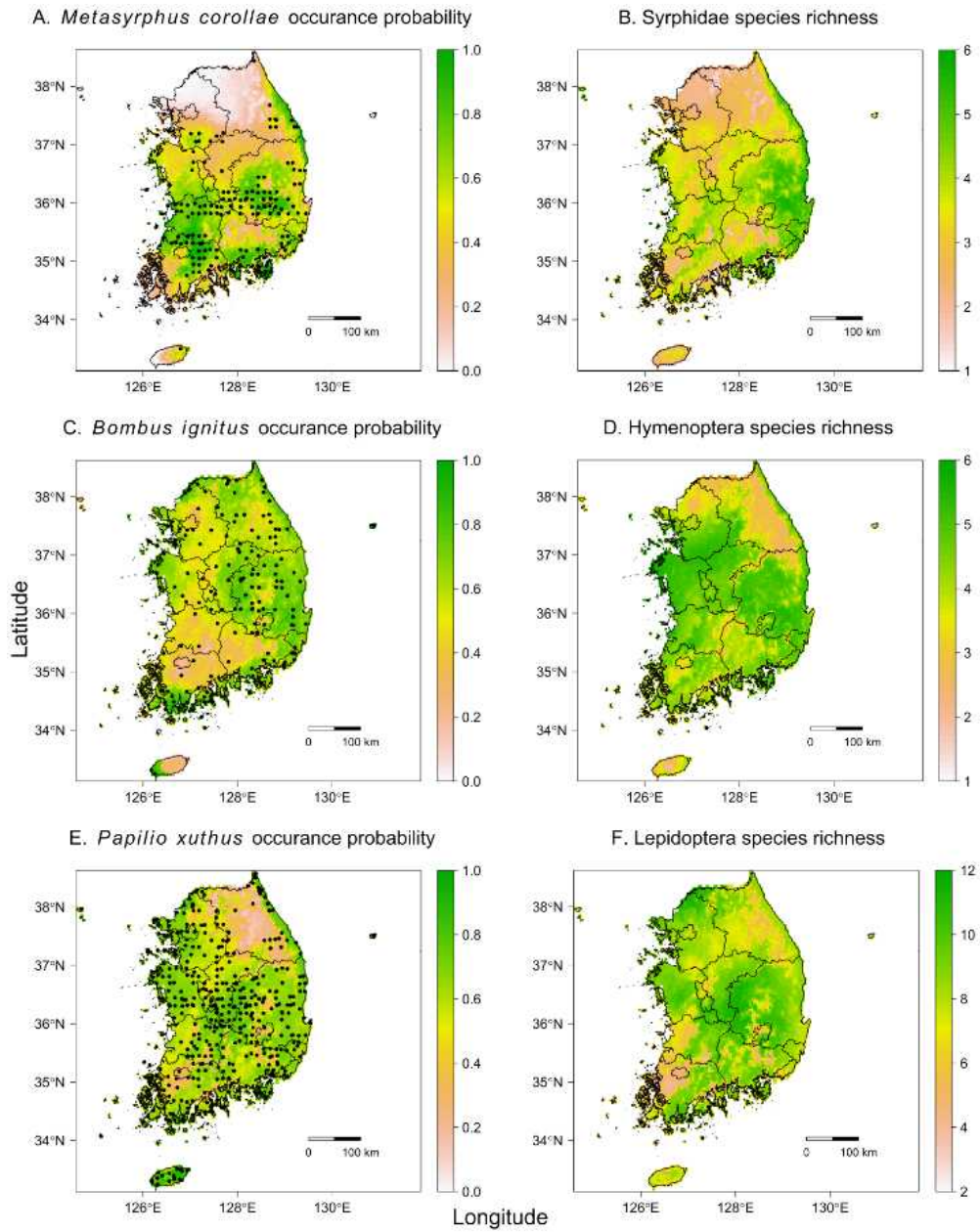


Figure 2. Maps of modeled pollinator species occurrence probability and modeled species richness for three pollinator groups. The black dots represent the observed locations (i.e., the middle of survey quadrat) for each species in the 3rd National Survey of Natural Environment.

도에서 고위험 지역이 주로 나타났고, 충청도와 경상북도 일부도 고위험 지역으로 분류되었다 (Figure 4). 중위험 지역으로 분류된 행정구역은 총 81개소이며, 전체 과수원의 48%를 차지했다

(Figure 4). 경상북도와 강원도, 그리고 충청남북도가 주로 중위험 지역으로 분류되었다. 그 외의 나머지 총 63개 행정구역이 저위험 지역으로 분류되었고 이들 행정구역은 전체 과수원의 면적의

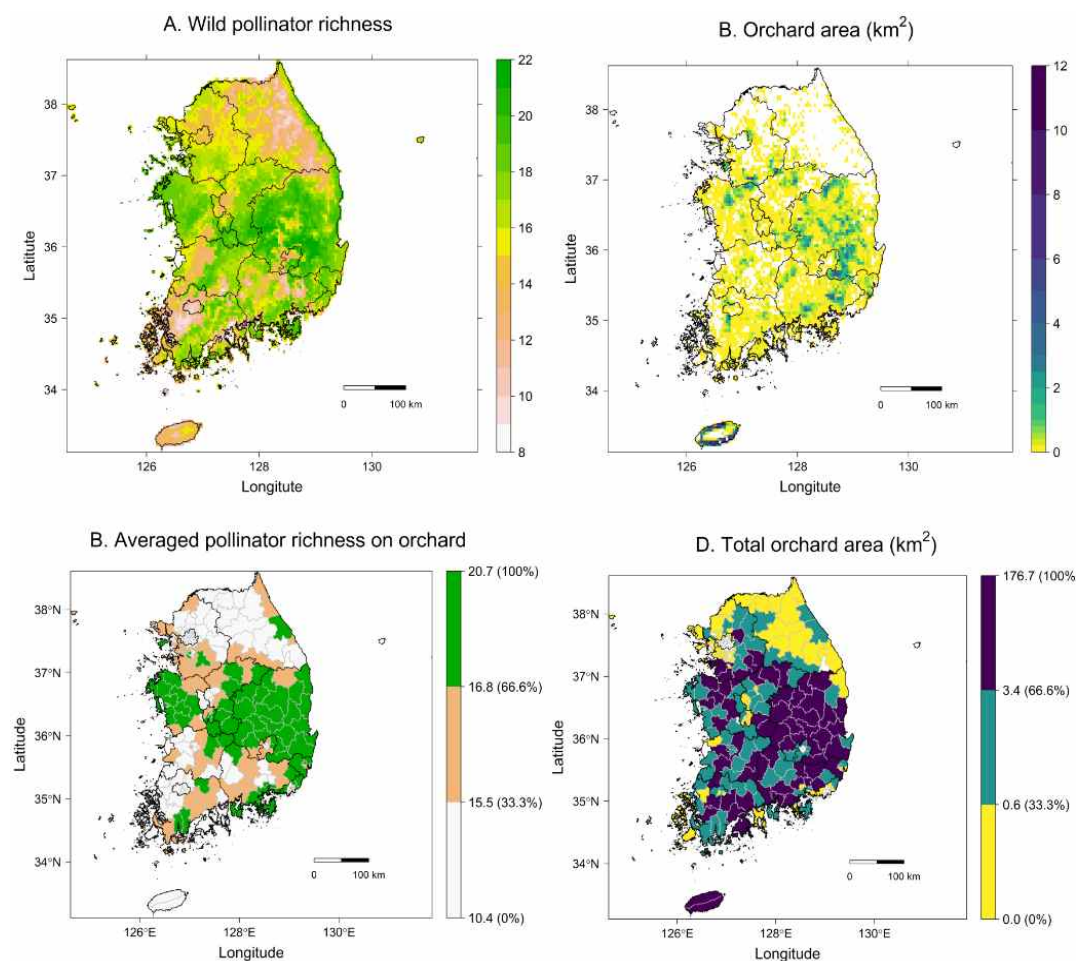


Figure 3. Maps of pollination supply (model-predicted pollinator richness) and demand (summed-area of orchards) index. Pollination supply and demand index were mapped at the quadrat-level for the 3rd National Survey of Natural Environment (A and B) and at the municipal level (C and D). At the municipal level indices were grouped into tertiles.

Table 2. Climate variable used for Species Distribution Models

Variable name	Definition
BIO1	Annual Mean Temperature
BIO2	Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp - min temp))
BIO3	Isothermality (BIO2/BIO7) (* 100)
BIO5	Max Temperature of Warmest Month
BIO7	Temperature Annual Range (BIO5-BIO6)
BIO8	Mean Temperature of Wettest Quarter
BIO9	Mean Temperature of Driest Quarter
BIO12	Annual Precipitation
BIO13	Precipitation of Wettest Month
BIO15	Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)
BIO18	Precipitation of Warmest Quarter

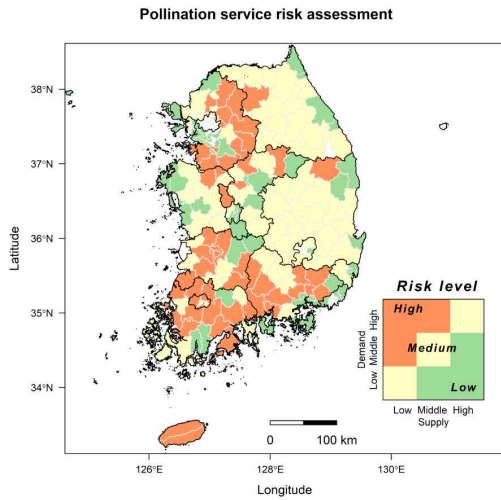


Figure 4. Map of pollination service risk assessment by comparing levels of demand and supply relatively.

3%정도를 차지하고 있었다 (Figure 3).

IV. 토의 및 결론

이 연구는 우리나라에서는 처음으로 종분포 모형을 이용하여 화분매개 곤충 종풍부도를 지도화했고 수분 서비스에 미치는 영향을 평가한 위험도 지도를 구축했다. 자연환경조사에서 관찰된 화분매개 곤충 종 수는 나비목, 벌목, 꽃등애과 순으로 나타났으며 구축한 종 풍부도는 곤충 종 대체적으로 중부지방에서 높았고, 경기도, 전라남도 그리고 강원도에서 낮았다. 과수원 면적을 수분 서비스 수요 지수로 그리고 종 풍부도를 공급 지수로 대체하여 수분 서비스 수요와 공급이 불일치하는 지역을 상대 평가한 결과, 우리나라 과수 재배지의 절반에 달하는 지역이 고위험 지역임을 밝혔다. 이 연구에서 구축한 수분 서비스 공급 및 수요지도, 그리고 수분서비스 위험도 평가 지도는 향후 수분서비스 보전과 관리를 위한 중요한 자료로 쓰일 것이다.

이 연구에서 수분 서비스 공급 지수로 이용한 화분매개 곤충 종 풍부도는 지역별로 차이가 있

음을 보여주고 있다. 충청남북도와 경상북도를 아우르는 중부지방에서 종풍부도가 대체적으로 높았던 이유는 이 지역의 온화한 기후와 중간산 지역이라는 지리적 요인 때문인 것으로 여겨진다. 특히, 강원도 지역이 가장 낮은 종풍부도를 보였는데, 이는 선택된 화분매개곤충의 기후 선호도에 따른 결과로 보인다. 반면에 인구가 밀집하고 도시화가 빠른 속도로 진행되는 경기도, 그리고 벼 생산 밀집 지역인 호남 평야, 논산 평야, 그리고 김해 평야를 포함하는 전라남북도와 경상남도 지역은 화분매개 종 풍부도가 낮았다. 우리가 적용한 종분포도 모형은 토지이용 변수를 고려하지 않았지만, 이들 지역의 생물기후변수가 지역의 특이성을 부분적으로 반영한 것으로 보인다. 집약적 농업 생산지역은 단순한 경관 구조 그리고 농약의 사용 등이 심화되는데 이는 이들 지역에 밀접한 수박, 블루베리, 커피, 그리고 사과 재배지 등에서는 야생벌의 종 다양성과 개체수가 적고 이들이 제공하는 수분 서비스도 작다는 것을 해외 연구들이 보고하고 있다 (Kremen et al., 2002; Ricketts et al., 2004; Nicholson et al., 2017; Grab et al., 2019).

수분 서비스 공급과 수요를 비교하여 제작한 수분 서비스 위험도 지도는 고위험 지역이 수분 서비스 공급이 부족한 지역 대부분에 편중되어 있음을 밝혔다. 고위험으로 분류된 총 55개 행정구역이 차지하는 과수원 총 면적은 우리나라 과수원 면적의 절반(49%)에 해당한다. 특히, 수분 서비스 고위험 지역으로 분류된 경기도 외각 지역은 도시화에 따른 화분매개 곤충 서식지 파괴에 따른 결과로 보인다. 전라도 및 경상남도 지역에서 고위험 지역으로 분류된 곳은 앞서 언급했던 집약적 벼농사에 따른 농촌 경관 단순화가 원인인 것으로 유추된다. 제주도 경우는 가장 작은 수의 화분매개 곤충 종수를 가지고 있지만 대단위 감귤 과수원이 있어 상대적으로 고위험으로 분류되었다. 중위험 지역 역시 우리나라 과수 재배지의 또 다른 절반(48%)

을 차지하고 있었다. 사과, 배, 복숭아, 포도 등이 주로 재배되는 경상북도와 충청남북도 등 중부지방이 중위험 지역으로 분류되었고 상대적으로 수요가 낮은 강원도 지역 역시 중위험 지역으로 분류되었다.

이 연구가 파악한 수분서비스 위험도는 수분서비스 보전 전략 수립을 위한 방향 제시에 도움이 될 것으로 기대한다. 고위험 지역으로 분류된 곳의 경우, 야생화분매개곤충 서식지 복원을 위한 우선 지역으로 선정할 필요가 있다. 과수원 주변의 초지와 같은 서식지를 조성하는 사업 등이 필요할 수 있다. 또한 마을숲과 같이 생물 서식처 제공과 방풍작용 그리고 마을사람들에게 휴식처를 제공하는 다목적 숲 조성 등을 고려할 필요도 있다 (Lee et al., 2007; Koh et al., 2014). 특히 수분서비스 효율이 높은 벌목류 종수를 증대하기 위해 관목류 숲을 조성하고 벌의 활동시기에 제초제 및 살충제 사용을 줄일 필요가 있다. 중위험 지역 경우 현재 주요 화분매개곤충을 파악하고 그 서식지를 파악하여 보전 전략을 수립할 필요가 있다. 마지막으로 저위험 지역은 화분매개곤충의 지속적 모니터링을 통해서 잠재적 야생화분매개 곤충을 발굴할 필요가 있다. 특히 중위험, 저위험 지역은 미래 과수원 수요 증가로 인한 화분매개곤충 서식지 잠식에 대응하기 위한 전략이 필요하다.

마지막으로 후속 연구를 위해서 이 연구의 한계점을 수분 서비스 공급과 수요 추정 부분에 집중하여 밝혀 둔다. 이 연구에서는 수분 서비스 공급 지도를 제작하기 위해서 3차 자연환경 조사에서 관찰된 종만을 대상으로 중 분포도를 구축했다. 계절과 시점에 따라서 관찰하지 못한 종을 향후 고려할 필요가 있다. 또한 중 분포도 구축 시 토지이용 또는 산림식생 변수를 고려할 필요가 있다. 중 수로 수분 서비스 공급량을 추정했지만, 향후 중별 수분 서비스 효율 차이를 고려하여 공급량을 추정할 필요가 있다. 이를 위해 벌이 꽃에 방문하는 횟수와 씨방에 전달된

화분의 개수를 관찰하여 벌 1회 방문 당 화분 전달률 또는 과실 착과율을 고려하는 방법을 국내외 연구자들과 협업하여 개발할 필요가 있다 (Winfrey et al., 2007; Lee et al. 2016). 특히 이번 연구를 지방 단위에서 실시할 경우 야생벌 서식지 평가를 통해서 야생벌 방문율을 모형화하는 접근법이 필요할 수도 있다 (Lonsdorf et al., 2009). 이 모형은 현재 Natural Capital Project 에서 제공하는 InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) 모형의 Pollination Model 로 제공되고 있으며 야생벌 방문 비율 지수를 현장에서 관측한 벌의 방문율과 비교를 통해서 모형의 검증을 수행한다 (Kennedy et al., 2013). 이 연구에서 구축한 수분서비스 수요 지도는 시군구별 상대적인 수요를 잘 반영하고 있다. 하지만, 자료의 한계로 과수원 면적을 수분서비스 수요량으로 간주했다는 한계가 있다. 시군구별 과수원 면적의 차이는 상대적인 수요 차이를 설명하는 첫 단계로, 보다 자세한 과수원 위치자료가 보강된다면 과수 작물의 종에 따라 수분 서비스 의존율이 다르다는 점을 향후 고려할 필요가 있다. 이러한 방법론이 보강된다면, 이 연구에서 수행했던 수요와 공급의 상대 비교 시 나타나는 한계를 줄이고 보다 정확한 위험도 평가를 수행할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- Busby J.R. 1991. BIOCLIM - A bioclimatic analysis and prediction system. Nature Conservation: Cost Effective Biological Surveys and Data Analysis (eds C.R. Margules & M.P. Austin). pp. 64-68. CSIRO, Canberra, Australia.
- Choe H · Thorne JH · Hijmans R · Kim J · Kwon H and Seo C. 2017. Meta-corridor solutions for climate-vulnerable plant species groups

- in South Korea. *Journal of Applied Ecology* 54(6) : 1742-1754.
- Choe H· Thorne JH · Joo W and Kwon H. 2020. The biodiversity representation assessment in South Korea's protected area network. *Journal of Korean Environmental Restoration Technology*. 23(1) : 77-87. (in Korean with English summary)
- Choe H· Thorne JH and Seo C. 2016. Mapping national plant biodiversity patterns in South Korea with the MARS species distribution model. *PloS one* 11(3) : e0149511.
- Choi MB, Kwon O. 2015. Occurrence of hymenoptera (Wasps and bees) and their foraging in the Southwestern part of Jirisan National Park, South Korea. *Journal of Ecology and Environment*: 38(3) : 367-374.
- D'Amen M· Dubuis A · Fernandes RF · Pottier J · Pellissier L and Guisan A. 2015. Using species richness and functional traits predictions to constrain assemblage predictions from stacked species distribution models. *Journal of Biogeography* 42(7) : 1255-1266.
- Dubuis A · Pottier J · Rion V · Pellissier L · Theurillat J and Guisan A. 2011. Predicting spatial patterns of plant species richness: a comparison of direct macroecological and species stacking modelling approaches. *Diversity and Distributions* 17(6) : 1122-1131.
- Fick SE and Hijmans RJ (2017) WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37, 4302-4315.
- Garibaldi LA · Steffan-Dewenter I · Kremen C et al. (2011) Stability of pollination services decreases with isolation from natural areas despite honey bee visits. *Ecology Letters*, 14, 1062-1072.
- Garibaldi LA · Steffan-Dewenter I · Winfree R et al. (2013) Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. *Science* (New York, N.Y.), 339, 1608-11.
- Grab H, Branstetter MG, Amon N, Urban-Mead KR, Park MG, Gibbs J, Blitzer EJ, Pveda K, Loeb G, Danforth BN. (2019) Agriculturally dominated landscapes reduce bee phylogenetic diversity and pollination services. *Science*, 363, 282-284.
- Grenié M · Violle C and Munoz F. 2020. Is prediction of species richness from stacked species distribution models biased by habitat saturation? *Ecological Indicators* 111 : 105970.
- Jung, C (2008) Economic Value of Honeybee Pollination on Some Fruit and Vegetable Crops in Korea. *Journal of Apiculture*, 23(2), 147-152. (in Korean with English summary)
- Kennedy CM, Lonsdorf E, Neel MC et al. (2013) A global quantitative synthesis of local and landscape effects on wild bee pollinators in agroecosystems (ed Anderson M). *Ecology Letters*, 16, 584-599.
- Kim JK, Lee HC, Yoon IK, Moon BW. 2003. A newly-developed pollen extender used for artificial pollination in fruit trees. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology* 21, 329-332.
- Klein A-M · Vaissiere BE · Cane JH · Steffan-Dewenter I · Cunningham SA · Kremen C and Tscharntke T (2007a) Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274, 303-313.
- Klein A-M · Vaissière BE · Cane JH · Steffan-Dewenter I · Cunningham SA · Kremen C and Tscharntke T (2007b) Importance of

- pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274, 303 LP-313.
- Koh I · Lonsdorf E V · Williams NM · Brittain C · Isaacs R · Gibbs and Ricketts TH (2016) Modeling the status, trends, and impacts of wild bee abundance in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113, 140-145.
- Koh I · Park, C · Kang W · Lee D (2014). Seasonal effectiveness of a Korean traditional deciduous windbreak in reducing wind speed. *Journal of Ecology and Environment*. 37. 91-97.
- Kremen C · Williams NM and Thorp RW (2002) Crop pollination from native bees at risk from agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99, 16812-16816.
- Kwon H. · Lee Y. · Yoo S. · Kim D. and Kim J.(2020) Distribution Patterns of Biodiversity Hotspot using Birds Data from the 3rd National Ecosystem Survey in South Korea. *J. Korean Env. Res. Tech.* 23(3). 81-89. (in Korean with English summary)
- Lautenbach S · Seppelt R · Liebscher J · Dormann CF (2012) Spatial and Temporal Trends of Global Pollination Benefit. *Plos one*, 7.
- Lee D., Koh I., Park, C. (2007). Ecosystem services of traditional village groves in Korea. Seoul National University Press. Seoul.
- Lee KY, Yim SH, Seo HJ, Kim SY, Yoon, HJ. The influence of insect pollination and artificial pollination on fruit quality and economic profit in the 'Niitaka' pear. *Korean Journal of Organic Agriculture*, 24, 759 - 771.
- Lonsdorf E · Kremen C · Ricketts T · Winfree R · Williams N and Greenleaf S (2009) Modelling pollination services across agricultural landscapes. *Annals of Botany*, 103, 1589-1600.
- National Institute of Ecology. 2015. Ecological service valuation and management plan for pollination service. (in Korean with English summary)
- Nicholson CC · Koh I · Richardson LL · Beauchemin A and Ricketts TH (2017) Farm and landscape factors interact to affect the supply of pollination services. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 250, 113-122.
- Phillips SJ · Anderson RP and Schapire RE. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190(3-4) : 231-259.
- Polce C · Termansen M · Aguirre-Gutiérrez J et al. (2013) Species Distribution Models for Crop Pollination: A Modelling Framework Applied to Great Britain (ed Vendramin GG). *PLoS ONE*, 8, e76308.
- Potts SG · Imperatriz-Fonseca V · Ngo HT et al. (2016) Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature*, 540, 220-229.
- Rader R · Reilly J · Bartomeus I and Winfree R (2013) Native bees buffer the negative impact of climate warming on honey bee pollination of watermelon crops. *Global Change Biology*, 19, 3103-3110.
- Ricketts TH· Daily GC · Ehrlich PR and Michener CD (2004) Economic value of tropical forest to coffee production. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101, 12579-82.
- Ricketts TH, Regetz J, Steffan-Dewenter I, Cunningham SA, Kremen C, Bogdanski A, Gemmill-Herren B, Greenleaf SS, Klein AM,

- Mayfield MM, Morandin, LA, Ochieng' A, pollination services: Are there general patterns? *Ecology Letters* 11, 499–515.
- Rural Development Administration (2006) An Economic Analysis of Pollinator Activities in the Crop Production. (In Korea with English Summary).
- Schulp CJE · Lautenbach S and Verburg PH (2014) Quantifying and mapping ecosystem services: Demand and supply of pollination in the European Union. *Ecological Indicators*, 36, 131–141.
- Son, M. · Jung S and Jung C (2019) Diversity and Interaction of Pollination Network from Agricultural Ecosystems during Summer. *Journal of Apiculture*, 34(3), 197-206. (in Korean with English summary)
- Viana, BF (2008). Landscape effects on crop
- Winfree R · Williams NM · Dushoff J and Kremen C (2007) Native bees provide insurance against ongoing honey bee losses. *Ecology Letters*, 10, 1105–1113.
- Yoon, H · Lee K · Kim M · Lee Y and Kim S (2015) Ecological Characteristics of *Bombus hypocrita sapporoensis* in Korea. *Journal of Apiculture*, 30(4), 231-238. (in Korean with English summary)
- Yoon, H · Lee K and Ko H (2018) Sexual Maturity Time of Reproductive Organ Development and Mating in the Korean Native Bumblebee, *Bombus ignitus*. *Korean J. Appl. Entomol.* 57(4) : 329-337. (in Korean with English summary)