

## Maxent 모델을 이용한 호박벌과 양봉꿀벌의 수분 잠재환경 비교 분석\* - 서울시를 중심으로 -

김윤호<sup>1)</sup> · 조용현<sup>2)</sup> · 배양섭<sup>3)</sup> · 김태종<sup>4)</sup> · 손인기<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> 공주대학교 대학원 조경학과 학생 · <sup>2)</sup> 공주대학교 조경학과 교수 ·  
<sup>3)</sup> 인천대학교 생명과학부 교수 · <sup>4)</sup> 공주대학교 대학원 조경·환경계획학과 박사수료.

## A Comparative Analysis on the Pollination Potential Environment of *Apis mellifera* and *Bombus ignitus* Using the Maxent Model\* - Focused on Seoul -

Kim, Yoon-Ho<sup>1)</sup> · Cho, Yong-Hyeon<sup>2)</sup> · Bae, Yang-Seop<sup>3)</sup> ·  
Kim, Tae-Jong<sup>4)</sup> and Son, In-Ki<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Landscape Architecture, Graduate School of Kongju National University, Student,  
<sup>2)</sup> Dept. of Landscape Architecture, Kongju National University, Professor,  
<sup>3)</sup> Dept. of Biological Sciences, Incheon National University, Professor,  
<sup>4)</sup> Dept. of Landcape Architecture & Environmental Planning, Graduate school of Kongju National University,  
Ph.D. Candidate.

### ABSTRACT

The honey bee has a crucial ecological status for maintaining the natural ecology system. Pollination mediations by honey bees are recognized as an efficient way to enhance the quality of biological diversity and green areas in the nature and the urban ecological system. However, the population of bee around the world is decreasing and we do not know exactly how bees react to the physical environment in the urban area. This study is a basic research for the improvement of pollination services in the Korean urban ecological system. It aims to induce and review environmental variables which have high relations with the activities of pollination mediation insects in the urban area. The study estab-

\*본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 도시생태 건강성 증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다. (2019002770001)

**First author** : Kim, Yoon-Ho, Dept. of Landscape Architecture·Environmental Planning, Graduate School of Kongju National University, Student,  
Tel : +82-41-330-1452, E-mail : wswdo@naver.com

**Corresponding author** : Cho, Yong-Hyeon, Department of Landscape Architecture, Kongju National University, Professor,  
Tel : +82-41-330-1446, E-mail : yhcho@kongju.ac.kr

**Received** : 2 November, 2020. **Revised** : 4 February, 2021. **Accepted** : 3 December, 2020.

lished a Maxent model using five urban environmental variables that reflect the ecology of *Bombus ignitus* and the place information where *Bombus ignitus* appears in 18 spots of Seoul city, and compared with previous research results on *Apis mellifera*. *Bombus ignitus* preferred places with more natural environments such as mountain forest areas and vicinities of streams. They preferred Stratified Tree Area the most among the vegetation types existing in the urban area. Comparing chicken models, both species saw their response value drop as the building coverage rose. In the case of *Apis mellifera* and *Bombus ignitus* variables, the response value of both species was high in 10 out of 20 types. The result of this study is expected to provide basic information for improving the pollination services in the Korean urban area and to be utilized as the basic materials for the future urban planning.

**Key Words :** *Building Coverage, Land Cover, Actual Vegetaion, Landscaping Tree Area*

## I. 서 론

도시는 전 세계적으로 그 면적이 증가하고 있지만 도시지역의 생물다양성을 조사한 연구는 비교적 적다(Matteson and Langellotto, 2010). 도시화는 기존에 서식하던 생물의 서식지를 변화시키며, 곤충을 포함한 다양한 종의 분포, 생태를 각각 변화시킨다(Mckinney, 2008). 꿀벌 또한 종에 따라 도시화의 영향을 다르게 받으며(Goulson, 2003), 이는 도시의 수분 서비스 현황을 파악하는데 어려움을 가져올 수 있다.

식물의 수분(Pollination)은 자연 및 인류의 지속 가능한 미래를 위해 필수적인 과정이다(Kenta et al, 2007). 식물 종의 약 65%는 수분 과정에서 외부요인의 도움을 받으며, 꿀벌은 충매화 대부분을 담당하고 있다(Barth, 1985). 도시생태계 또한 화분 매개 곤충의 중요성이 강조되고 있다(Damon et al, 2016). 인공적으로 조성된 도시의 녹지는 관리하는 데 있어 많은 노력이 필요하다. 녹지의 건강성은 인간의 쾌적한 거주환경을 위해 필수적인 요인이며, 이를 관리하는데 곤충의 화분 매개 활동은 훌륭한 대안이 될 수 있다(Matteson and Langellotto, 2009; Rebecca et al, 2011). 또한 도시의 녹지는 서식지의 감소로 인해 사라져가고 있는 꿀벌의 대체 서식지로 기능할 수 있다

(Saure, 1996; Tommasi et al, 2004; Greenleaf et al, 2007; Matteson et al, 2008; Hernandez et al, 2009). 따라서 도시의 생물다양성 증진과 지속 가능한 발전을 위해 도시에 서식하는 꿀벌종이 어떻게 활동하는지 개별적으로 파악할 필요가 있다.

하지만 한국에서는 화분 매개 곤충의 가치 평가가 충분히 이루어지지 않고 있으며(Lee et al, 2019), 도시환경에서 화분 매개 곤충의 분포에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 근래 한국의 도시를 대상으로 양봉꿀벌(*Apis mellifera*)의 종 분포 연구가 진행되었지만(Kim et al, 2017; Kim et al, 2020), 도시 생물다양성의 향상을 위해서는 양봉꿀벌뿐 아니라 다양한 꿀벌종이 각각 어떠한 환경을 선호하는지 파악할 필요가 있을 것이다.

본 연구는 한국의 도시생태계 수분 서비스 증진을 위한 기초연구로, 도시환경에서 종에 따라 다른 생태 및 분포를 나타내는 화분 매개 곤충들이 각각 어떠한 환경을 선호하는지 비교 및 분석을 목적으로 한다. 이를 위해서 Maxent 모델과 환경 변수를 사용해 호박벌의 출현지점을 예측하였고, 양봉꿀벌을 대상으로 한 본 연구자의 이전 연구 결과와 비교하였다(Kim et al, 2020). 서로 다른 먹이환경 및 생태를 가진 두 종의 꿀벌이 도시환경에 어떻게 반응하는지 파악하는 것으로 향후 도

시생태계의 전체적인 수분 서비스 향상에 이바지하고자 한다.

## II. 재료와 방법

본 연구는 양봉꿀벌을 대상으로 한 이전 연구와의 비교를 위해 동일한 방법론을 이용하여 호박벌이 선호하는 수분 잠재환경을 예측하였다(Kim et al, 2020). 서울시를 대상으로 생물종의 비출현 위치자료를 요구하지 않으며 모델의 우수성이 여러 연구에서 입증된 Maxent 모델과(Elith et al, 2006), 국내 유일하게 도시 곤충상 데이터가 존재하는 서울시를 대상으로 이전 연구에 사용된 9개의 도시환경 변수를 사용하였다. 비교를 통해 두 종이 선호하는 환경 특성의 차이를 확인하였으며, 도시환경에서 두 종의 화분 매개 활동을 동시에 지원할 수 있는 환경 특성을 도출하고자 하였다.

### 1. 연구종 위치자료

예측에 사용된 출현지점 위치자료는 양봉꿀벌을 대상으로 한 이전 연구와 동일하게 서울시 비오톱 유형별 생물다양성 증진방안 연구의 곤충상 자료를 사용하였다(Seoul Development Institute, 2004). 연구종으로 벌목(Hymenoptera) 꿀벌과(Apidae) 뒤희벌속(*Bombus*)에 속하는 호박벌(*Bombus ignitus*)을 선정하였다.

꿀벌은 각각의 종이 선호하는 먹이 자원이 다르며(Knight, 2005), 화분 매개 곤충으로서 서로의 역할을 보완한다(Kenta et al, 2007). 때문에

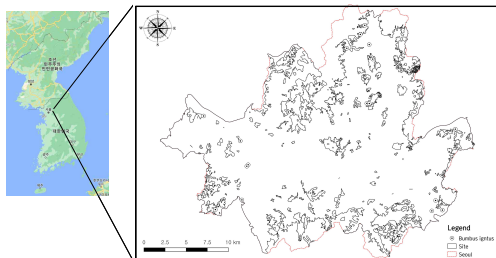


Figure 1. Study Area (Seoul City)

도시생태계의 전체적인 수분 서비스 증진을 위해서는 더 다양한 종의 환경 특성을 파악하고 비교하는 것이 필요하지만, 양봉꿀벌 및 호박벌을 제외한 타 꿀벌종의 경우 출현지점 위치자료의 개수가 부족하여 연구종으로 선정하기에 한계가 있었다.

연구종으로 선정한 호박벌과 양봉꿀벌의 경우 서로 다른 속에 속하며, 선호하는 밀원식물 및 생태에 있어서 확연한 차이가 존재하지만(Velthuis and Doorn, 2006), 두 종 모두 생태적으로 중요한 화분매개곤충이며 한국에서 보편적으로 나타나는 꿀벌 종이다. 때문에 두 종의 비교는 도시생태계의 전반적인 수분 잠재환경을 파악하는데 있어 적합하다고 판단하였다.

### 2. 환경변수

한국에 서식하는 야생 호박벌(*Bombus ignitus*)의 생태 연구는 미진하여, 뒤희벌속(*Bombus*)과 관련한 연구를 환경 변수 선정에 참고하였다. 뒤희벌은 통상 등지로부터 650 m 이내에서 먹이활동을 수행하며(Osborne et al, 1999), 뒤희벌의 출현과 가장 큰 상관관계를 가지고 있는 요인은 먹이자원의 다양성이며(Widmer and Hempel, 1999; Steffan-Dewenter et al, 2002; Sikora and Kelm, 2012), 무밀식물을 포함한 다양한 식물의 수분에 기여한다(Velthuis and Doorn, 2006). 도시화로 인한 불투수 포장 및 다양한 요인에 영향을 받지만(Hatfield and LeBuhn, 2007), 그 정도는 종마다 차이가 있다(Goulson, 2003). 이를 참고하여 이전 연구에서 사용된 9개의 도시환경 변수를 모델의 구성에 사용하였다(Table. 1).

도시화에 의한 간섭의 정도 및 환경 구조를 파악하기 위해 토지피복, 건폐율, 불투수 포장 비율, 건축물의 평균 층수, 향 변수를 사용하였으며, 도시에 존재하는 식생 구조와 호박벌의 관계를 파악하기 위해 현존식생 및 식피을 변수를, 자연지역과 거리에 따른 영향을 파악하기 위해

산림 및 수역과의 거리 변수를 사용하였다.

모델 구성에 사용한 환경 변수 자료 중 범주형 자료인 토지피복, 현존식생 변수는 모델의 정확도를 위해 2004년 당시에 가장 세분화된 환경 데이터를 포함하는 자료를 사용하였다. 토지피복 변수는 대상지 내 20개 중분류 유형이 존재하는 토지피복지도 데이터를 사용하였으며, 현존식생 변수는 소분류 9개 유형과 세분류 618개 유형이 존재하는 도시생태현황도 현존식생 데이터를 사용하였다. 모델을 구성하는 데 사용된 현존식생 변수의 경우 9개 유형을 가진 소분류 범주 데이터를 우선하여 모델 구성에 사용하였으며, 결과에 유의성이 있다고 판단될 때 더 정확한 분석을 위해 세분류 범주 데이터를 분석에 활용하였다.

생물종의 종 분포를 예측하고자 많은 연구에서 사용되는 기후 변수의 경우(Stohlgren et al, 2011; Silva et al, 2014; Gill et al, 2016), 대상지의 규모가 작고 도시 미기후 데이터가 존재하지 않아 본 연구에 적용하기에 한계가 있어 사용되지 않았다.

### 3. 호박벌 분포 모델링

본 연구에서는 모델링을 통해 호박벌의 잠재적 출현지점을 예측하고, 양봉꿀벌을 대상으로 한 이전 연구와의 비교를 위해 Maxent 모델을 사용하였다. 모델의 적합성은 ROC(Receiver Operating Characteristic) 곡선을 통한 AUC

(Area Under Curve) 값을 사용하여 평가하였으며, Jackknife 검정을 통해 나타난 결괏값 중 가장 낮은 중요도가 나타난 도시환경 변수를 인위적으로 제외하여 가장 높은 AUC 값이 나타날 때까지 모델 구성을 반복하였다.

모델의 신뢰성 검증은 52개의 양봉꿀벌 출현지점 위치자료가 사용된 이전 연구와 비교해 호박벌의 출현지점 위치자료는 18개 밖에 존재하지 않아, 검증 방법으로 Leave-One-Out Cross Validation을 사용하였다. Leave-One-Out Cross Validation은 신뢰성 검증 및 유효성 검사를 시행하기에 필요한 표본 데이터가 충분치 않을 때 효과적인 통계적 수단이다(Cawley and Talbot, 2003).

두 종의 비교는 Maxent 모델을 통해 예측된 환경 변수 데이터 중 두 종의 출현에 있어 유의성이 있다고 판단된 항목을 선별하여 비교하였다. Maxent 모델은 0~1의 범위로 출현가능성을 표현하는 대응 값(Response Value, 이하에서 출현가능성 지표라 표기함)을 산출하는데, 그 값이 0.7 이상으로 나타난 항목들은 타 항목들과 비교하여 그 차이가 명확하였기에 한 종 이상의 예측값이 0.7 이상으로 나타난 변수 항목은 두 꿀벌종의 선호 환경을 도출하는데 있어 유의성이 있다고 판단하였다.

Maxent 모델을 통한 분석을 위해 환경 변수 자료는 ArcGIS ver. 10.5 프로그램을 이용하여 30 m × 30 m 격자 크기의 공간 해상도를 갖는

**Table 1.** Used Environment Variables

Environmental Variable Name	Raw Data	Source	Year
Building Coverage	Seoul Metropolitan Biotope Map	Seoul Development Institute, Korea	2004
Average Number of stories	Seoul Metropolitan Biotope Map	Seoul Development Institute, Korea	2004
Percentage of Impervious Area	Seoul Metropolitan Biotope Map	Seoul Development Institute, Korea	2004
Plant Coverage	Seoul Metropolitan Biotope Map	Seoul Development Institute, Korea	2004
Actual Vegetation	Seoul Metropolitan Biotope Map	Seoul Development Institute, Korea	2004
Land Cover	Land Cover Map	Ministry of Environment, Korea	2004
Aspect	Digital Topographic Map	Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea	2006
Distance from Water Bodies	Land Cover Map	Ministry of Environment, Korea	2004
Distance from Forests	Land Cover Map	Ministry of Environment, Korea	2004

래스터 형태의 자료로 제작하였다. 수치지형도 자료 확장자를 SHP파일로 변환하기 위해 대한민국 국토교통부가 제공하는 NGIMap ver 1.0 프로그램을 사용하였다. 호박벌과 환경 변수 간의 상관관계를 파악하기 위해 Maxent ver. 3.4.1 프로그램을 이용하였다.

### III. 연구결과

#### 1. 호박벌 분포 예측 결과

9개의 환경 변수를 이용해 Maxent 모델을 구성하여 호박벌의 도시 내 잠재적 출현지점을 예측한 결과, 모델의 신뢰도인 AUC값은 0.677(sd=0.264)로 낮은 값이 나타났다. Jackknife 검정 결과 향, 식피율, 건축물의 평균 층수, 불투수 포장 비율 변수는 서울시 도시환경 내에서 호박벌의 출현을 예측하는데 중요한 변수는 아니었다. 모델 기여율이 낮은 변수를 제거하고 건폐율, 토지피복, 현존식생, 산림으로부터의 거리, 수역으로부터의 거리의 5개 변수를 이용하여 모델을 재구성한 결과, 모델의 신뢰도인 AUC 값은 0.847(sd=0.130)로 나타났다. 대상지의 17.67% 면적에서 적합한 서식 환경이 나타났다. AUC값이 0.7 이상일 경우 호박벌의 분포를 예측하는데 유용할 수 있다

(Phillips and Dudik, 2008).

예측 모델에 대한 환경 변수의 중요도는 토지 피복 변수가 26.9%로 가장 높게 나타났으며 건폐율(26.7%), 수역으로부터의 거리(23.4%), 현존식생(13.7%), 산림으로부터의 거리(9.3%)로 나타났다(Figure 3).

연속형 자료인 건폐율, 수역으로부터의 거리, 산림으로부터의 거리 변수의 경우 값이 커질수록 호박벌의 출현가능성 지표는 감소하였으며, 건폐율 변수는 그 차이가 명확하였다.

토지피복 변수의 경우 20개 중분류 유형 중 출현가능성 지표는 위락시설지역(공원이 포함된)이 0.979로 가장 높았다. 다음으로 공업지역(0.932), 밭(0.906), 기타초지(0.832)로 나타났으며 이외의 유형은 출현가능성 지표가 0.7 미만으로 나타났다.

현존식생 변수는 9개 소분류 유형 중 조경 수종 식재지가 0.977로 출현가능성 지표가 가장 높았다. 다음으로 하천변(0.957), 경작지(0.859), 초지(0.749)로 나타났으며, 이외의 유형은 출현가능성 지표가 0.70 미만으로 나타났다. 출현가능성 지표가 높게 나타난 유형에 대해 세분류 항목으로 재평가한 결과 조경 수종 식재지 항목에 속한 층위가 조성된 수목 식재지가 0.996으로

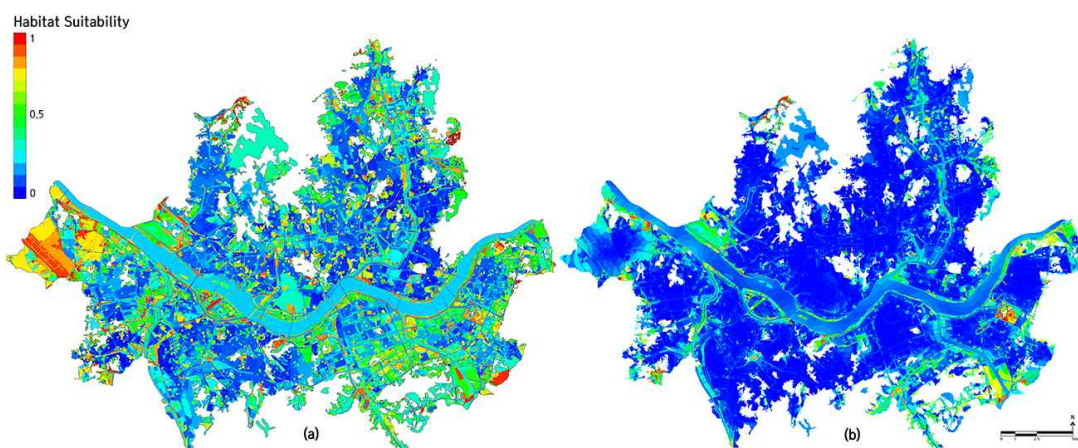


Figure 2. Potential Habitat in Seoul

(a) *Apis mellifera*'s Potential Habitat (Kim et al., 2020)

(b) *Bombus ignitus*'s Potential Habitat

로 출현가능성 지표가 가장 높았다. 다음으로 시설 경작지(0.966), 초본이 있으며 층위 조성되지 않는 향토종 수목 식재지(0.949), 초본이 있는 버드나무 식생지(0.948), 하천 제방(0.947), 나지(0.940)로 나타났으며 이외의 유형은 출현가능성 지표가 0.7 미만으로 나타났다.

2. 양봉꿀벌 모델과 비교

Maxent 모델을 이용해 두 종의 잠재적 출현지점을 예측한 결과 모델의 신뢰도인 AUC값은 호박벌이 0.847(sd=0.130), 양봉꿀벌이 0.791(sd=0.077)로 표준편차 값이 더 크지만, 모델의 설명력은 호박벌이 더 높게 나타났다.

동일한 환경 변수를 사용한 비교를 위해 양봉꿀벌 모델에 수역으로부터의 거리, 산림으로부터의 거리 변수를 추가하여 모델을 구성한 결

과, 모델의 신뢰도인 AUC값이 0.75이하로 나타나 동일 변수에서의 비교는 한계가 있었다.

예측에 사용된 9개 환경 변수 중 건폐율, 토지피복, 현존식생 변수는 두 종의 출현을 예측하는데 공통적으로 중요한 변수였다.

거리 변수인 산림으로부터의 거리, 수역으로부터의 거리 변수는 호박벌의 출현을 예측하는 주요 변수였지만, 양봉꿀벌의 출현을 예측하는데 사용되지 않은 나머지 4개 변수와 마찬가지로 중요한 변수는 아니었다.

두 종의 모델 구성에 있어서 사용된 환경 변수 중 공통적으로 사용된 건폐율, 현존식생, 토지피복 변수를 대상으로 한 종 이상의 출현가능성 지표가 0.7 이상으로 나타난 항목을 비교한 결과 Figure 3과 같았다.

건폐율 변수의 경우 두 종 모두 건폐율이 상

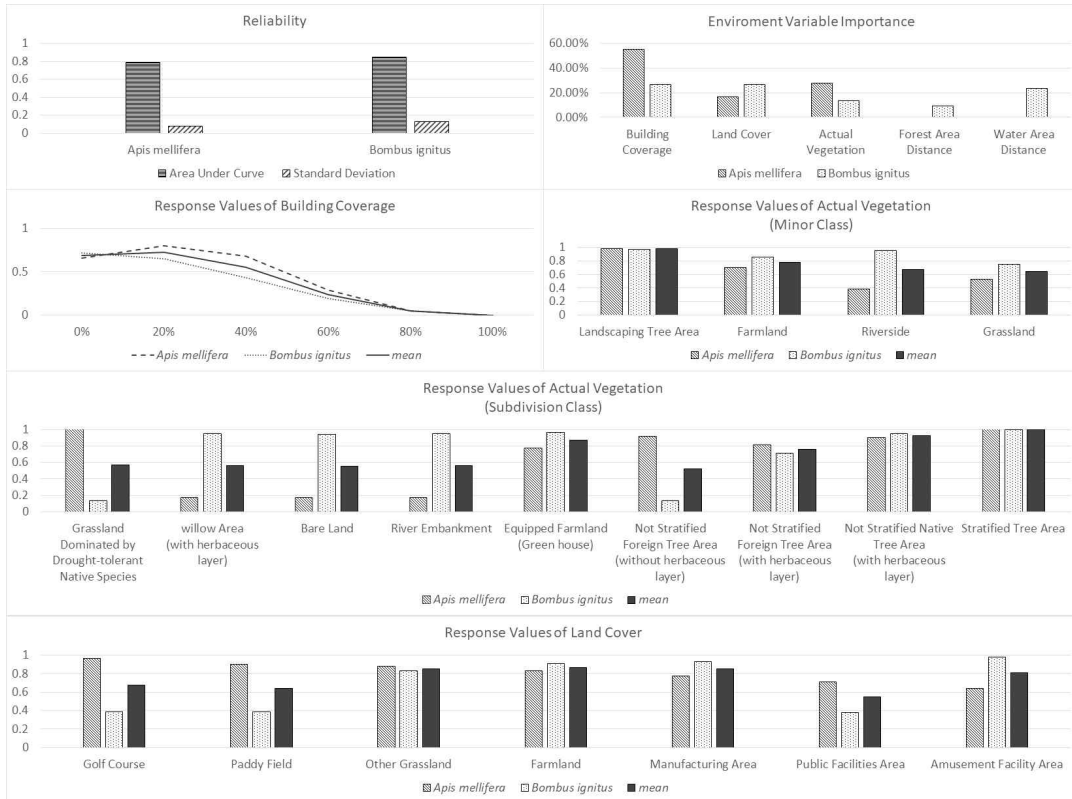


Figure 3. Comparison of Maxent model results for *Bombus ignitus* and *Apis mellifera* (Kim et al., 2020)

승할수록 출현가능성 지표가 낮아졌으나, 양봉꿀벌의 경우 호박벌과 같이 자연성이 가장 높은 0% 구간보다 25% 구간에서 가장 높은 출현가능성 지표가 나타났다.

현존식생 변수의 경우 소분류 유형의 4개 항목이 비교되었다. 조경 수종 식재지, 경작지는 두 종의 출현가능성 지표가 모두 높았으며, 하천변 항목의 경우 두 종의 차이가 컸다. 세분류 유형의 경우 9개 항목이 비교되었는데 층위 조성된 수목 식재지가 두 종 모두 1에 근접한 매우 높은 출현가능성 지표가 나타났으며, 시설경작지, 초본이 있으며 층위 조성되지 않은 외래종 수목 식재지, 초본이 있으며 층위 조성되지 않은 향토종 수종 식재지 항목의 평균값이 0.7 이상으로 높았다. 건조 자생초지, 초본이 있는 버드나무 식재지, 나지, 하천 제방, 초본이 없으며 층위 조성되지 않은 외래종 수목 식재지 항목의 경우 출현가능성 지표에 있어 두 종의 차이가 컸다.

토지피복 변수의 경우 7개 유형의 항목이 비교되었다. 밭 항목이 0.867로 두 종의 출현가능성 지표 평균값이 가장 높았으며, 기타 초지, 농업지역, 위락시설지역 항목의 평균값이 0.7 이상으로 나타났다. 골프장, 논 항목의 경우 출현가능성 지표에 있어 두 종의 차이가 컸다.

#### IV. 논의 및 한계

호박벌 모델의 예측에 따르면 산림지역을 제외한 서울 면적의 17.69%가 호박벌의 선호 환경이었으며, 산림지역 및 하천변 인근을 중심으로 자연성이 높은 장소를 선호하였다. 또한 건폐율이 높은 도시 중심지에 가까울수록 호박벌의 출현가능성이 낮았다. 낮은 출현가능성에도 불구하고 도심 내 일부 환경에서는 호박벌의 출현이 예측되었는데 그 중 층위 조성된 조경 수종 식재지는 0.996으로 본 연구에서 가장 높은 출현가능성 지표가 나타났다. 토지피복 변수는

모델 구성에 가장 큰 영향을 미친 변수였으며, 도심 내 자연성이 높은 공간이 선호되었다.

호박벌과 양봉꿀벌의 선호 환경을 예측하는데 공통적으로 중요한 변수는 건폐율, 현존식생, 토지피복 변수이었다. 두 종에 대해 각 변수의 출현가능성 지표를 비교한 결과 토지피복 변수는 위락시설지역, 농업지역, 밭, 기타초지 항목이, 현존식생 변수의 시설경작지, 초본이 존재하며 층위 조성되지 않은 향토종, 외래종 수목 식재지, 층위 조성된 수목 식재지 항목이, 건폐율 변수의 15~25% 구간에서 두 종의 출현가능성 지표 평균값이 0.7 이상으로 나타났다. 이외의 항목은 모델 예측에 있어서 두 종의 출현가능성 지표가 차이가 있었다.

#### 1. 모형 특성 비교

호박벌과 양봉꿀벌이 선호하는 서식 환경에 있어서 가장 큰 차이는 모델 구성에 이용된 거리 변수의 유무였다. 양봉꿀벌은 거리 변수인 산림으로부터의 거리, 수역으로부터의 거리 항목이 큰 중요성을 갖지 못하였는데, 이는 서울 내 존재하는 자연성이 높은 장소가 양봉꿀벌의 행동반경인 2 km 이내 모두 포함되기 때문이라고 추정된다(Visscher and Seeley, 1982). 호박벌의 경우 양봉꿀벌과 달리, 거리 변수에 민감하게 반응하였는데 모델을 통해 예측한 호박벌의 분포는 서울을 가로지르는 하천 및 산림지역 인근에 밀집되어 있었다. 현존식생 변수의 비교에서 또한 하천변 인근의 초본이 존재하는 버드나무 식생지, 나지, 하천 제방의 항목에서 양봉꿀벌과 다르게 높은 출현가능성지표가 나타났다. 이는 호박벌의 벌집이 자연지역에 있다고 가정할 때 양봉꿀벌보다 650 m 이내라는 짧은 비행 거리가 출현 환경을 한정시키는 주요 원인이라고 추정된다(Osborne et al, 1999). 이러한 생태적 차이로 양봉꿀벌과 비교해 호박벌이 선호하는 환경 특성이 제한되어 더 높은 AUC값이 나타났다고 생각된다.

## 2. 도시환경에서의 서식 특성 비교

자연성 관점에서는 호박벌이 속한 뒤영벌속 종은 인위적으로 변경된 서식지를 기피하며, 불투수 포장 때문에 활동이 제한받는다라는 논의가 있다(Goulson et al, 2008; Jha and Kremen, 2013). 자연성의 부분에서 양봉꿀벌과 비교하여 어느 종이 더 민감한지에 대한 국내 연구는 미진하지만, 토지피복 변수에서 또한 인위적 간섭의 정도(농약)가 타 공간보다 높은 공공시설지역, 논, 골프장의 경우, 호박벌의 출현가능성 지표는 양봉꿀벌과 비교하여 매우 낮았다. 선행 연구와 마찬가지로 공간의 자연성에 민감하게 반응한다고 추론된다. 건폐율 변수의 경우 호박벌은 건폐율 0% 지점에서 출현가능성 지표가 가장 높았던 것에 반해 양봉꿀벌은 25% 지점에서 가장 높은 출현가능성 지표가 나타났다. 이와 관련하여 녹색 불투수 포장 비율이 20% 이상일 때 몇몇 뒤영벌 종의 출현이 감소한다는 보고가 있다(Ahrne et al, 2009). 이 차이는 거리 변수와 마찬가지로 두 종의 먹이 활동에 있어 지속가능한 비행거리가 원인이라고 추론된다. 두 종 모두 건폐율이 상승할수록 출현가능성 지표가 낮아졌는데, 이러한 결과에 대해 불투수 포장 및 도시에서의 인위적 간섭 요인은 먹이자원이 존재하는 장소의 출현에 관련하고 있지만, 두 종의 이동을 단절시키는 요인으로 판단되지는 않는다.

도시의 공원에서는 다양한 종의 뒤영벌이 출현하고 있으며(McFrederick and LeBuhn, 2006), 도시라는 전체적인 경관 자체는 꿀벌의 출현에 영향을 주는 핵심 요인이 아니라는 보고가 있다(Steffan-Dewenter et al, 2002). 꿀벌과 곤충의 출현에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 식물 다양성으로 합의되고 있으며(Widmer and Schmid-Hempel, 1999; Steffan-Dewenter et al, 2002; Sikora and Kelm, 2012), 본 연구의 토지피복 변수의 경우 자연성이 높은 밭, 기타초지 항목 이외도 인위적 간섭이 높을 것이라 예상되는 농업

지역에서 두 종 모두 높은 출현가능성 지표가 나타났다. 지도 데이터를 이용해 당시의 주변 환경 및 관련 연구를 살펴본 결과 해당 지역은 산림지역 인근에 위치하며, 다양한 곤충 종 출현데이터가 존재한 지역이었다(Seoul Development Institute, 2004). 이 외에도 도심지 내부의 공원(위락시설지역), 조경 수종 식재지에서 호박벌과 양봉꿀벌 두 종 모두 나타났으며, 양봉꿀벌은 자연지역과 멀리 떨어진 공공시설지역 등에서도 출현하였다(Kim et al, 2020). 이러한 결과는 도시환경 그 자체가 꿀벌에게 있어 어느 정도의 간섭은 있을지라도, 일정 거리 내에 자연적 공간들이 서로 연결되어 있다면 충분히 접근할 수 있음을 보여준다.

## 3. 선호 먹이자원 특성 비교

본 연구에서 현존식생 변수를 통해 예측한 두 종이 선호하는 먹이 환경은 일부 차이가 있었다. 현존식생 세분류 유형을 통해 비교한 9가지 항목 중 두 종 모두 선호한 항목은 4가지였으며 나머지 5가지 항목은 종에 따른 차이가 있었다.

호박벌이 선호하였지만, 양봉꿀벌이 선호하지 않은 3개 항목의 경우 모두 하천변 인근에 분포하는 식생 유형이었다. 반면에 양봉꿀벌이 선호하였지만, 호박벌이 선호하지 않은 초본이 없으며 층위 조성되지 않은 외래종 수목 식재지의 경우 분포현황을 살펴본 결과, 매우 일부 지역에만 존재하며, 하천변 및 산림지역과 떨어져 있는 경우가 많아 호박벌의 접근이 어려웠을 것으로 판단된다. 하지만 동일하게 선호되지 않은 건조 자생초지는 안양천, 탄천 등 하천변 인근에 분포했음에도 불구하고 출현가능성 지표가 낮게 나타났다. 이러한 차이는 꿀벌의 출현에 있어 가장 중요한 요인인 먹이 다양성 외에도(Widmer and Schmid-Hempel, 1999; Steffan-Dewenter et al, 2002; Sikora and Kelm, 2012), 종에 따라 선호하는 온도와 습도의 차이 때문이라고 판단된다. 하천변은 도시 내부와 다른 미



기후 환경(온도, 습도, 바람)을 가지며, 이 중 온도와 습도는 꿀벌의 생존에 큰 영향을 미치는 요인이다. 꿀벌은 종에 따라 선호하는 온도 및 습도의 범위가 다르며, (Abou-Shaara et al, 2012; Xinyu et al, 2019), 이러한 미기후 환경의 차이는 두 꿀벌종의 출현가능성이 다르게 주요 원인이라고 추정된다.

하지만 본 연구의 한계로 인해 실제 각 공간이 어떠한 미시적 환경 조건을 가지고 있으며, 무엇이 식재되어 있는지 파악하기에는 어려움이 있었으며, 호박벌의 출현지점 위치자료 개수 또한 충분치 못해 정확한 예측에 있어 한계가 존재하였다.

그럼에도 불구하고 두 종 모두 선호한 4가지 항목의 경우 출현가능성 지표 평균값이 0.7 이상이었으며 이 중 조경 수종 식재지에 속한 층위 조성된 수목 식재지의 경우 두 종 모두 1에 근접한 출현가능성 지표가 나타났다. 두 종 모두 층위 조성된 수목 식재지의 출현가능성 지표가 가장 높았다는 점에서 식생의 다양성 및 층위 구조가 꿀벌종의 선호 환경이라 판단된다(Potts et al, 2003; Hendrix et al, 2010; Wojcik, 2011; Rebecca et al, 2011). 이러한 결과를 통해 서울의 녹지가 두 종의 꿀벌을 도시로 불러들이는 먹이자원으로 충분히 이용될 수 있다고 판단된다(Saure, 1996; Tommasi et al, 2004; Greenleaf et al, 2007; Matteson et al, 2008; Hernandez et al, 2009).

이 논의는 도시의 수분 서비스를 향상시킬 충분한 기회가 있음을 나타낸다. 다양한 식물을 이용하여 공원 및 녹지를 조성하고, 그 장소를 소규모 녹지로 이어주는 것만으로도, 도시의 수분 가능성은 크게 향상될 것이다. 이러한 도시 경관의 변화는 꿀벌의 생존 및 분포 범위를 개선할 뿐 아니라 수분 서비스의 범위를 향상시킬 수 있다(Goulson et al, 2008). 꿀벌은 인간과 함께 녹지를 공유할 수 있으며, 그들의 종 풍부성은 지속가능한 도시 개발을 도와주고 우리의 생활환경을 풍요롭게 하는 효과적인 대안일 것이다.

## V. 결 론

도시생태계 수분 서비스 증진을 위해 호박벌이 선호하는 환경을 예측하고, 양봉꿀벌의 선호 환경을 예측한 이전 연구와 비교하였다.

호박벌의 분포에 영향을 미치는 변수는 건폐율, 토지피복, 현존식생, 산림 및 수역으로부터의 거리 변수였으며, 동일한 조건에서의 비교를 위해 위 5개 변수를 양봉꿀벌의 분포 예측에 사용해 보았지만, 모델 신뢰도가 하락하여 양봉꿀벌 분포 예측에 있어서는 건폐율, 현존식생, 토지피복 변수만 사용되었다.

호박벌은 양봉꿀벌과 달리 자연성이 높은 산림지역, 하천변 인근으로 분포가 한정되었는데 이는 두 종의 행동반경, 환경 민감도(공해, 온도, 습도), 먹이 선호도의 차이라고 예상된다. 하지만 각 항목의 장소에 어떠한 식물 종이 식재되어 있으며, 어떠한 환경 조건을 가졌는지 미시적 관점에서 파악하기가 어려움이 있었으며, 호박벌의 경우 적은 출현지점 위치자료 개수로 인해 이전 연구와 비교하여 모델 신뢰도의 표준편차 값이 증가하는 한계가 있었다. 또한 모델 구성에 사용된 데이터가 Maxent 모델과 같은 종 분포 모형을 염두에 두고 제작된 것이 아니기에 몇몇 변수의 경우 호박벌의 출현을 예측하는 데 어려움이 있었으며, 과거의 데이터를 사용했기에 추가적인 조사를 시행하는 데 한계가 있었다.

이를 보완하기 위해 향후 각 지자체 차원에서 도시생태계에 중요한 생태적 지위를 가진 생물종 및 환경 변수를 선정하고, 지속적으로 데이터를 축적할 필요가 있을 것이다.

본 연구의 결과는 한국 도시생태계 수분 서비스 증진을 위한 기초적인 정보를 제공하는 데 의미가 있으며, 향후 본 연구에서 다루지 못한 꿀벌종의 연구 및 수분 서비스 소외지역에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## References

- Abou-Shaara H.F., A.A. Al-Ghamdi and AA. Mohamed. 2012. Tolerance of two honey bee races to various temperature and relative humidity gradients. *Environmental and experimental Biology*. 10(4) : 133-138.
- Ahne K., J. Bengtsson and T. Elmqvist. 2009. Bumble bees (*Bombus spp*) along a gradient of increasing urbanization. *PloS one*. 4(5) : e5574.
- Barth F.G. 1985. *Insects and flowers. The Biology of a Partnership*. George Allen & Unwin: United Kingdom.
- Carvell C., D.B. Roy., S.M. Smart., R.F. Pywell., C.D. Preston and D. Goulson. 2006. Declines in forage availability for bumblebees at a national scale. *Biological conservation*. 132(4) : 481-489.
- Cawley G.C and N.L. Talbot. 2003. Efficient leave-one-out cross-validation of kernel fisher discriminant classifiers. *Pattern Recognition*. 36(11) : 2585-2592.
- Damon M., R. Hall., K. Gerardo., O. Revecca., A. Jeff., A. Karin., S. Mike., C. John., F. Katherine., F. Robert., G. Gordon., G. Dave., E. Bengt., I. Mick., L. Lanet., L. Gail., S. David., M. Emily., G. Stacy., H. Simon., M. Muzafar., N. Edward-Graham and G. Caragh. 2016. The city as a refuge for insect pollinators. *Conservation Biology*. 31(1) : 24-29.
- Elith J., C.H. Graham., R.P. Anderson., M. Dudík., S. Ferrier., A. Guisan., R.J. Hijmans., F. Huettmann., J.R. Leathwick., A. Lehmann., J. Li., L.G. Lohmann., B.A. Loiselle., G. Manion., C. Moritz., M. Nakamura., Y. Nakazawa., J. McC., M. Overton., A.T. Peterson., S.J. Phillips., K. Richardson., R. Scachetti-Pereira., RE. Schapire., J. Soberón., S. Williams., M.S. Wisz and NE. Zimmermann. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*. 29(2) : 129-151..
- Gill N.S. and F. Sangermano. 2016. Africanized honeybee habitat suitability: a comparison between models for southern Utah and southern California. *Applied Geography*. 76 : 14-21.
- Goulson D. 2003. *Bumblebees: their behaviour and ecology*. Oxford University Press: England.
- Goulson D., G.C. Lye and B. Darvill. 2008. Decline and conservation of bumble bees. *Annu Rev Entomol*. 53 : 191-208.
- Greenleaf S.S., N.W. Williams., R. Winfree and C. Kremen. 2007. Bee foraging ranges and their relationship to body size. *Oecologia*. 153(3) : 589-596.
- Hatfield, R.G and G. LeBuhn. 2007. Patch and landscape factors shape community assemblage of bumble bees, *Bombus spp.(Hymenoptera: Apidae)*, in montane meadows. *Biological Conservation*. 139(1-2) : 150-158.
- Hendrix S.D., K.S. Kwaiser and SB. Heard. 2010. Bee communities (*Hymenoptera: Apoidea*) of small Iowa hill prairies are as diverse and rich as those of large prairie preserves. *Biodiversity and Conservation*. 19(6) : 1699-1709.
- Hernandez J.L., G.W. Frankie and R.W. Thorp. 2009. Ecology of urban bees: a review of current knowledge and directions for future study. *Cities and the Environment*. 2(1) : 3.
- Jha S and C. Kremen. 2013. Resource diversity and landscape-level homogeneity drive native bee foraging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 110(2) : 555-558.
- Kenta T., N. Inari., T. Nagamitsu., K. Goka and T. Hiura. 2007. Commercialized European bumblebee can cause pollination disturbance: an ex-

- periment on seven native plant species in Japan. *Biological Conservation*. 134(3) : 298-309.
- Kim W.M., W.K. Song., S.Y. Kim, E.J. Hyung and S.H. Lee. 2017. Habitat analysis study of honeybees (*Apis mellifera*) in urban area using species distribution modeling - focused on Cheonan. *J. Korean Env. Res. Tech.* 20(3) : 55-64.
- Kim Y.H., Y.H. Cho., Y.S. Bae., D.Y. Kim. 2020. The Analysis of Pollination Potential Environment for *Apis mellifera* in Seoul Using Maxent Modeling Approach. *J. Korean Env. Res. Tech.* 23(4) : 85-96.
- Knight M.E., A.P. Martin., S. Bishop., J.L. Osborne., R.J. Hale., R.A. Sanderson and D. Goulson. 2005. An interspecific comparison of foraging range and nest density of four bumblebee (*Bombus*) species. *Molecular Ecology*. 14(6) : 1811-1820.
- Lee J.M., YL. Kim, CH. Kim and SH. Woo. 2019. Beekeeping crisis and implications. *KREI Agriculture Policy Focus*. 178 : 1-24. (in Korean with English summary)
- Matteson K.C and G.A. Langellotto. 2009. Bumble bee abundance in New York City community gardens: implications for urban agriculture. *Cities and the Environment*. 2(1): 5.
- Matteson K.C and G.A. Langellotto. 2010. Determinates of inner city butterfly and bee species richness. *Urban Ecosystems*. 13(3) : 333-347.
- Matteson K.C., J.S. Ascher and G.A. Langellotto. 2008. Bee richness and abundance in New York City urban gardens. *Annals of the Entomological Society of America*. 101(1) : 140-150.
- McFrederick Q.S and G. LeBuhn. 2006. Are urban parks refuges for bumble bees *Bombus spp.*(*Hymenoptera: Apidae*)?. *Biological conservation*. 129(3) : 372-382.
- McKinney M.L. 2008. Effects of urbanization on species richness: a review of plants and animals. *Urban ecosystems*. 11(2) : 161-176.
- Osborne J.L., S.J. Clark., R.J. Morris., I.H. Williams., J.R. Riley., A.D. Smith., D.R. Reynolds and A.S. Edwards. 1999. A landscape scale study of bumble bee foraging range and constancy, using harmonic radar. *Journal of Applied Ecology*. 36(4) : 519-533.
- Phillips S.J. and M. Dudík. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*. 31(2) : 161-175.
- Potts S.G., J.C. Biesmeijer., C. Kremen., P. Neumann., O. Schweiger and W.E. Kunin. 2010. Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology & Evolution*. 25(6) : 345-353.
- Rebecca T., F. Jeremie., A. John., E. Katherine and L. Daniel. 2011. A comparison of bee communities of Chicago green roofs, parks and prairies. *Landscape and Urban Planning*. 103 : 102-108.
- Saure C. 1996. *Urban habitats for bees: the example of the city of Berlin*. Academic Press: New York.
- Seoul Development Institute. 2004. Characteristics of seoul biotope types and enhancing biodiversity. (in Korea)
- Sikora A and M. Kelm. 2012. Flower preferences of the Wrocław Botanical Garden bumblebees (*Bombus spp.*). *Journal of Apicultural Science*. 56(2) : 27-36.
- Silva D.P., V.H. Gonzalez., G.A. Melo., M. Lucia., L.J. Alvarez., and P. De Marco Jr. 2014. Seeking the flowers for the bees: integrating biotic interactions into niche models to assess the distribution of the exotic bee species *Lithurgus huberi* in South America. *Ecological Modelling*. 273 : 200-209.
- Steffan-Dewenter I., U. Münzenberg., C. Bürger., C.

- Thies and T. Tschamtkke. 2002. Scale dependent effects of landscape context on three pollinator guilds. *Ecology*. 83(5): 1421-1432.
- Stohlgren T.J., C.S. Jarnevich, W.E. Esaias and J.T. Morisette. 2011. Bounding species distribution models. *Current Zoology*. 57(5): 642-647.
- Tommasi D., A. Miro., H.A. Higo and M.L. Winston. 2004. Bee diversity and abundance in an urban setting. *Canadian Entomologist*. 136(6): 851-869.
- Visscher P.K and T.D. Seeley. 1982. Foraging strategy of honeybee colonies in a temperate deciduous forest. *Ecology*. 63(6): 1790-1801.
- Velthuis H.H and A. Van Doorn. 2006. A century of advances in bumblebee domestication and the economic and environmental aspects of its commercialization for pollination. *Apidologie*. 37(4): 421-451.
- Widmer A and P. Schmid Hempel. 1999. The population genetic structure of a large temperate pollinator species, *Bombus pascuorum* (Scopoli) (*Hymenoptera: Apidae*). *Molecular Ecology*. 8(3): 387-398.
- Wojcik V. 2011. Resource abundance and distribution drive bee visitation within developing tropical urban landscapes. *Journal of Pollination Ecology*. 4: 48-56.
- Xinyu L., M. Weihau., S. Jinshan., L. Denglong., F. Yujia., S. Wenting., X. Kai., D. Yali and J. Yusuo. 2019. Tolerance and response of two honeybee species *Apis cerana* and *Apis mellifera* to high temperature and relative humidity. *PloS one*. 14(6): e0217921.