

Maxent 모델을 이용한 양봉꿀벌의 서울시 수분 잠재환경 분석*

김윤호¹⁾ · 조용현²⁾ · 배양섭³⁾ · 김다윤¹⁾

¹⁾ 공주대학교 대학원 조경학과 학생 · ²⁾ 공주대학교 조경학과 교수 · ³⁾ 인천대학교 생명과학부 교수

The Analysis of Pollination Potential Environment for *Apis mellifera* in Seoul Using Maxent Modeling Approach*

Kim, Yoon-Ho¹⁾ · Cho, Yong-Hyeon²⁾ · Bae, Yang-Seop³⁾ and Kim, Da-Yoon¹⁾

¹⁾ Dept. of Landscape Architecture, Graduate School of Kongju National University, Student,

²⁾ Dept. of Landscape Architecture, Kongju National University, Professor,

³⁾ Dept. of Biological Sciences, Incheon National University, Professor.

ABSTRACT

The honeybee serves for most entomophilous flowers. They are a core species for maintaining the ecological system. Though the urban ecological system needs bees' mediation of pollination as well, we have little understanding on how the honeybee reacts to the physical environments of an urban city. This study is a basic research to enhance the potential environment for pollination in an urban area and aims to review the urban environmental variables which are highly linked to the pollination mediations by the honeybee. The study composed a Maxent model by adopting nine urban environmental variables and the locations of the *Apis mellifera*'s appearances around 52 spots in Seoul. The variables reflect the ecology of the *Apis mellifera*. Of the urban environmental variables used for the model composition, six variables were found as not having meaningful correlations with the *Apis mellifera*'s appearances and finally, building coverage, actual vegetation and land cover were selected as the appearance variables of the *Apis mellifera*. The AUC, the reliability indicator of the final model was 0.791 (sd=0.077). And the importance data of the variables used for the model were 55.6%, 27.9%, and 16.5% for building coverage, actual vegetation and land cover, respectively. The result of

*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 : 30 June, 2020. **Revised** : 24 August, 2020. **Accepted** : 20 August, 2020.

the study showed that the building coverage has the highest correlation with the appearance of the honeybee. And, as per the actual vegetation, the artificially tree planted area as well as the cultivated field and meadow in an urban area were functioning as the most important environmental conditions for the honeybee to be inhabitable. The study is expected to be utilized as the base material for the urban planning and park green area planning to enhance the potential environment for pollination in an urban area.

Key Words : *Building Coverage, Actual Vegetation, Land Cover, Tree Planted Area*

I. 서 론

식물의 수분에 큰 영향을 미치는 꿀벌 개체군의 감소가 전 세계적으로 보고되고 있다. 우리나라의 경우 토종꿀벌(*Apis cerana*) 개체군의 90% 이상이 감소하였다고 판단되며(Shon et al, 2015), 양봉꿀벌 또한 전 세계적으로 개체군이 감소하고 있다는 보고가 있는 등, 자연 및 도시 생태계의 기반이 위협받고 있다(Lee, 2008; vanEngelsdorp et al, 2009; Winfree et al, 2009; Jill and Barry, 2016).

꿀벌 개체군의 대량 감소는 2000년대 중반 미국, 유럽, 호주 등지에서 보고되기 시작했다. 미국 22개 주에서는 2006년부터 1년 사이에 25 ~ 40%의 꿀벌 개체군이 감소하였는데, 전문가들은 이 현상을 군집붕괴현상(Colony Collapse Disorder)이라 명명하였다(vanEngelsdorp et al, 2009). 영국 역시 1970년 이후 3종의 꿀벌이 멸종하고 11종의 꿀벌 개체군 70%가 폐사하였다(Jill and Barry, 2016). 많은 과학자가 꿀벌 개체군 감소의 원인을 찾고자 하였으며(Lee, 2008), 서식지 감소, 기후변화, 살충제 등 다양한 환경요인의 변화가 꿀벌 개체군 감소의 원인으로 보고되고 있다(Winfree et al, 2009). 화분 매개 곤충인 꿀벌의 감소는 특정 서식지 및 먹이를 필요로 하는 생물 종의 생존을 어렵게 할 수 있으며 생태계의 생물다양성 감소로 이어질 수 있다(Potts et al, 2010).

지구에 존재하는 식물의 약 65%는 외부요인에 의해 수분이 이루어지며, 꿀벌은 자연계에서 곤충이 담당하는 화분 매개의 대부분을 담당하고 있다(Barth, 1985). 200,000종 이상의 현화식물 중 절반 이상이 화분 매개를 필요로 하며(Nabhan and Buchmann, 1997), 전 세계 속씨식물 20만 종 가운데 약 17만 종의 식물이 꿀벌의 도움을 받고 있다(Jha, 2005). 꿀벌은 자연식생의 수분에 있어 중요한 생태적 역할을 수행하며(Morandin and Winston, 2005), 생태계의 보전, 자연경관의 유지, 농산물 생산량의 증가 등, 인류의 생활환경에 다방면으로 도움을 주고 있다(Lee, 2019). 화분 매개 곤충으로부터 제공되는 경제적 가치는 전 세계적으로 약 2,000억 달러로 추정되고 있으며(Gallai et al, 2009), 미국은 최대 약 14조 6,692억 원으로 추산하고 있다(Losey and Vaughan, 2006). 국내 연구에서는 꿀벌의 화분 매개의 가치를 약 6조 원으로 추산하였다(Jung, 2008).

여러 국가는 자국의 꿀벌을 보호하기 위한 전략을 수립하였고(Williams, 1994; Faith, 2014), 꿀벌의 생태와 가치에 대한 과학자들의 관심이 증가하고 있다. 생태계의 지속가능성에 있어 꿀벌의 중요성은 관련 연구를 통해 점점 입증되고 있으며, 인류가 생활하는 도시환경 또한 꿀벌의 중요성이 강조되고 있다(Damon et al, 2016). 자연적인 서식지가 감소한 도시지역은 인위적으로 조성한 녹지가 주를 이루고 있으며, 녹지의

건강성을 향상시키기 위해서는 많은 노력이 필요로 하는데, 꿀벌에 의한 화분 매개 활동은 효과적인 대책 중 하나이다(Rebacca et al, 2011). 꿀벌은 도시에서 이루어지는 생물학적 상호작용을 증대시킬 수 있으며(Kremen et al, 2007), 도시 경관의 질을 향상시키고(You, 2016), 환경 오염을 알려주는 생물학적 지표로써 이용될 수 있다(Giorgio and Bettina, 2003). 최근 도시는 꿀벌 개체군 증가를 위한 새로운 서식환경으로 제안되고 있는데(Rebacca et al, 2011), 도시의 식생은 농촌 지역보다 더 다양하고, 농약과 천적의 위험이 적으며(Kim et al, 2016), 농촌 및 자연지역 대비 평균기온이 높아 꿀벌의 생존에 이점이 있다(Vollet-Neto et al, 2011).

하지만 국내에서는 화분 매개 곤충이 환경에 이바지하는 역할과 중요도에 대한 평가가 충분히 이루어지지 않고 있으며(Lee, 2019), 도시에 나타나는 야생 꿀벌이 어떠한 자원, 경관, 서식지를 선호하고, 어떻게 반응하는지 대부분 알지 못한다(Jeroen et al, 2011). 중 분포 모델을 이용하여 꿀벌의 서식지를 파악하고, 꿀벌에 의한 수분 가능성을 평가하려는 많은 시도가 있었지만(Stohlgren et al, 2011; Silva et al, 2014; Gill et al, 2016), 광범위한 자연지역에서 기후환경 변수를 이용하여 결과를 도출한 연구가 대부분 이기에, 도시지역 내 물리적 환경이 꿀벌의 화분 매개 활동과 어떠한 연관이 있는지 살펴보기에는 한계가 있다.

근래 선행 연구로서 3차 전국자연환경조사의 양봉꿀벌 출현지점 위치자료를 이용한 도시 내 양봉꿀벌의 서식환경에 관한 연구가 진행되었지만(Kim et al, 2017), 전국자연환경조사는 산림지역을 중심으로 곤충 조사가 이루어져 도시 내 서식환경을 평가하기에 한계가 있었다. 도시 지역에서 식물의 수분 가능성은 자연지역보다 매우 취약할 것으로 예상되며, 향후 꿀벌과 같은 화분 매개 곤충의 개체군이 더욱 감소한다면, 도시의 생물다양성은 보장받기 어려울 것이

다. 때문에, 향후 도시환경과 꿀벌의 관계를 파악하고, 꿀벌의 화분 매개 활동을 증진시키는 방안을 마련할 필요가 있다.

본 연구는 도시생태계의 수분 가능성 향상을 위한 기초연구로써, 꿀벌의 화분 매개 활동과 연관성이 높은 환경 변수를 도출 및 검토하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해서 양봉꿀벌 출현 데이터가 있는 서울시를 대상으로 도시의 물리적 환경 변수와 Maxent 모델을 이용해 양봉꿀벌의 잠재적 출현 지점을 예측하였다. 이 결과를 활용해 도시 내에서 양봉꿀벌에 의한 수분 가능성이 높은 환경적 특성을 파악하고자 한다.

II. 재료와 방법

1. 대상지 및 연구 종 위치자료

연구 대상지로 산림과 하천에 둘러싸여 곤충의 접근이 쉽고, 한국의 도시생태계로서 대표성을 가지고 있는 서울시를 선정하였다. 도시에서 이루어지는 꿀벌의 화분 매개 활동과 도시환경 간 관계 분석이 연구의 주목적이므로 서울시 대분류 토지피복도 7개 유형 중 산림지역은 대상지에서 제외하였다.

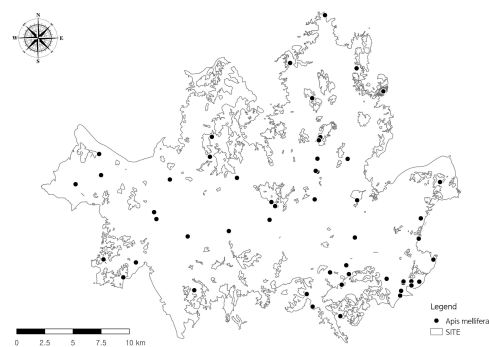


Figure 1. Study Area

연구 종으로 벌목(Hymenoptera) 꿀벌과(Apidae)에 속하는 양봉꿀벌(Apis mellifera)을 선정하였다. 흔히 국내 토종꿀벌로 불리는 종은 재래꿀벌

Table 1. Information Environment Variables

Environment 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
Water Area Distance	Land Cover Map	Ministry of Environment, Korea	2004
Forest Area Distance	Land Cover Map	Ministry of Environment, Korea	2004

(*Apis cerana*)이지만, 우리나라에서 도시 및 국가 단위로 조사된 출현지점 위치자료가 각 도시지역 내 10개 지점 이하이거나 존재하지 않아 연구 종으로 선정하기에 한계가 있었다. 이에 도시에서 보편적으로 나타나며, 토종꿀벌과 비교해 활동성이 높은 양봉꿀벌을 연구 종으로 선정하였다. 출현지점 위치자료는 서울시를 대상으로 서울연구원이 2001년부터 3년간 시행한 서울시 비오톱 유형별 생물다양성 증진방안 연구의 183개 조사지점 중 연구 범위 내에서 양봉꿀벌이 출현한 52개 지점을 사용하였다. 출현지점 위치자료는 조사지역 내 곤충상이 가장 풍부할 것으로 예상되는 경로를 설정하여 조사 인원수와 시간을 균등하게 배치하고, 쓸어잡기법, 털어잡기법, 채어잡기법 및 임의채집법 등의 여러 조사 방법을 전문가의 판단하에 적절히 시행하여 기록되었다(Seoul Development Institute, 2004).

2. 환경 변수 선정

서식지는 그 장소에 사는 야생동물의 생존과 번식에 관여하는 모든 자원과 조건을 포함한다(Morrison et al, 2012). 도시지역에서 나타나는 양봉꿀벌과 도시환경 변수와의 관계를 파악하기 위해 양봉꿀벌의 특성 및 생태에 관한 연구와 중분포 모델을 이용하여 꿀벌의 서식지를 평가한 선행 연구를 검토하였다. Pahl(2011)은 양봉꿀벌의 행동반경이 통상적으로 2 km 내외라 보았으며,

Weronika(2016)은 도시지역에 서식하는 양봉꿀벌의 중 분포도가 주변 녹지지역과 거리 및 식피율 정도에 따라 큰 상관관계를 가진다고 평가하였다. Hevia(2016)은 도로와 같은 반 자연적 공간이 양봉꿀벌의 중 다양성에 긍정적인 영향을 미친다고 보았으며, Kang and Lee(2008)은 적절한 풍속이 꿀벌의 화분 매개 활동을 촉진한다고 평가하였다. Jeroen(2011)은 높은 일조량을 가진 장소가 꿀벌에게 좋은 환경을 제공한다고 하였으며, Rebacaa(2011)은 양봉꿀벌이 녹화된 옥상 공간을 선호하며 잔디가 우세한 지역의 경우 오히려 중 다양성이 감소한다고 평가하였다. 중 분포 모델을 이용하여 꿀벌의 서식지를 평가한 연구에서는 서식지를 예측하기 위한 환경 조건으로 기후환경 변수가 가장 많이 사용되었으며, 토지피복 변수가 종종 사용되었다(Stohlgren et al, 2011; Silva et al, 2014; Gill et al, 2016). 하지만 기후환경 변수의 경우 대상지의 규모가 작고, 도시 미기후 데이터가 존재하지 않아 본 연구에 적용하기에 한계가 있었다. 이를 토대로 도시지역 내에서 양봉꿀벌의 생태에 영향을 미치며, 인위적으로 조절할 수 있다고 판단되는 9개의 도시환경 변수를 선정하였다(Table. 1). 현존식생, 식피율 변수는 도시에 존재하는 먹이자원과 양봉꿀벌의 관계를(Weronika et al, 2016), 향 변수는 일사량과의 관계를(Jeroen et al, 2011), 건축물의 평균 층수 변수는 도시화의 정도와 고층 건물로 인한 바람의 영향을(Lee,

2008), 건폐율 및 불투수 포장 비율 변수는 인위적 공간의 정도를(Hevia et al, 2008), 산림으로부터의 거리, 수역 및 습지로부터의 거리 변수는 원자연으로부터의 거리에 따른 영향을(Pahl et al, 2011; Weronika et al, 2016), 토지피복 변수는 해당 구역에 대한 인간의 활동이 양봉꿀벌 출현과 어떤 관계가 있는지 확인하고자 하였다(Morrison et al, 2012). 모델 구성에 사용한 환경 변수 자료 중 범주형 자료인 토지피복, 현존식생 변수는 모델의 정확도를 위해 당시에 가장 세분화한 자료를 이용하였다. 토지피복 변수는 대상지 내 20개 중분류 유형이 존재하는 토지피복지도 데이터를 사용하였으며, 현존식생 변수는 대상지 내 소분류 9개 유형과 세분류 618개 유형이 존재하는 도시생태현황도 현존식생 데이터를 사용하였다.

3. 양봉꿀벌 분포 모델링

본 연구에서는 양봉꿀벌의 잠재적 출현지점을 도출하고, 도시환경 변수 간의 관계를 파악하기 위해 출현지점 위치자료만을 요구하는 비선형 모형인 Maxent 모델을 사용하였다. Maxent 모델은 최대 엔트로피 이론을 활용하여 생물 종의 출현자료만으로 생물의 잠재적 출현지점을 예측하고, 수용자 반응 특성 곡선(Receiver Operating Characteristic Curve)을 이용한 AUC(Area Under Curve) 값을 제공하여 모델의 설명력을 평가하며(Swets, 1988), 출현지점 위치자료만을 요구하는 모델 중 높은 신뢰도를 가지고 있다(Elith et al, 2006). 잠재적 출현지점 추정에 있어 고도와 같은 연속형 자료와 현존식생과 같은 범주형 자료를 모두 사용할 수 있으며, 추정의 편차를 방지하기 위해 정규화(Regularization) 과정을 적용한다(Phillips and Dudik, 2008).

본 연구에서는 모델의 신뢰도 검정을 위해 Maxent 프로그램에서 이용 가능한 AUC 검정을 이용하였다. 52개의 부족한 출현지점 위치자료 지점 개수로 인해 모델의 신뢰성이 떨어질 수 있어 K겹 교차검증(K-fold Cross Validation)을

사용하였다. K겹 교차검증은 데이터 개수가 적은 데이터 셋에 대하여 편향을 줄이고, 모든 데이터 셋을 검증에 이용하여 모델 정확도를 향상시킬 수 있는 통계학적 수단이다. 본 연구에서는 분산과 편향 측면에서 일반적으로 선호되는 방법인 10겹 교차검증을 적용하였다(Kohavi, 1995). 모델의 추정과 관련하여 가장 중요한 환경 변수를 평가하기 위해 Jackknife 검정을 수행하였다. 이 검정은 각 환경 변수를 한 번씩 빼내어 각각의 모델을 구성한 뒤, 구성된 각 모델을 비교하여 빼낸 환경 변수의 중요도를 상대적으로 평가하는 방법이다(Phillips et al, 2006). Jackknife 검정을 통해 나타난 결괏값 중 가장 낮은 중요도가 나타난 도시환경 변수를 인위적으로 제외하여 가장 높은 AUC 값이 나타날 때까지 모델 구성을 반복하였다.

모델을 구성하는데 사용된 9개 환경 변수 중 현존식생 데이터의 경우 9개 유형을 가진 소분류 데이터를 우선적으로 데이터 분석에 이용하였으며, 결과에 유의성이 있을 것이라 판단될 경우 세분화된 분석을 위해 세분류 데이터를 분석에 활용하였다.

Maxent 모델을 통한 분석을 위해 환경 변수 자료는 ArcGIS ver. 10.5 프로그램을 이용하여 30 m × 30 m 격자 크기의 공간 해상도를 갖는 래스터 형태의 자료로 제작하였다. 수치지형도 자료 확장자를 SHP파일로 변환하기 위해 국토교통부가 제공하는 NGIMap ver 1.0 프로그램을 사용하였다. 양봉꿀벌과 환경 변수 간의 상관관계를 파악하기 위해 Maxent ver. 3.4.1 프로그램을 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

9개의 환경 변수를 이용해 Maxent 모델을 구성하여 양봉꿀벌의 도시 내 잠재적 출현 지점을 예측한 결과, 모델의 신뢰도인 AUC 값은 0.772 (sd=0.084)로 나타났다. 현존식생 변수, 토지피

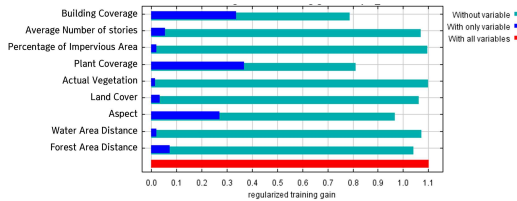


Figure 2. Jackknife Test Result for *Apis mellifera*

복 변수, 건폐율 변수를 제외한 6개 변수는 서울시 도시환경 내에서 양봉꿀벌의 출현을 예측하는데 중요한 변수는 아니었다. Figure 2는 Jackknife 검정 결과로 파랑색 막대는 해당 변수를 단독으로 모델을 구성하였을 때 AUC 값, 하늘색 막대는 해당 변수를 제외하고 모델을 구성하였을 때 AUC 값으로 건폐율, 현존식생 변수가 설명력 및 모델 기여도가 높다는 것을 확인할 수 있다.

모델을 구성하는데 기여율이 낮은 변수를 순차적으로 제거한 결과, 건폐율 변수, 현존식생 변수, 토지피복 변수의 3가지 변수를 이용하여 모델을 구성하였을 때 더 높은 AUC 값이 나타났다(AUC=0.791, sd=0.077). AUC 값이 0.70 이상이 경우 생물 종의 잠재 서식지를 예측하는데 유용할 수 있다(Phillips and Dudik, 2008).

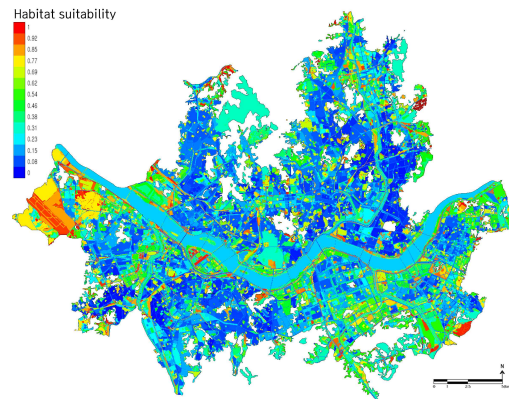


Figure 3. Potential Habitat in Seoul

Maxent 모델은 0~1의 범위로 출현 가능성을 표현하는 대응 값(Response Value, 이하에서 출현 가능성 지표라 표기함)을 산출하는데, 출현 가능성 지표가 1에 가까울수록 양봉꿀벌의 출현 가능성이 높다(Figure 3, 4). 예측 모델에 대한 환경 변수의 중요도는 건폐율이 55.6%로 가장 높게 나타났으며 현존식생(27.9%), 토지피복(16.5%) 순으로 나타났다(Table 2).

Figure 4는 환경 변수의 변화에 따른 양봉꿀벌의 출현 가능성 지표를 보여준다. 데이터 값이 1에 가까울수록 양봉꿀벌의 출현 가능성이 높다. x축은 환경 변수의 변화, y축은 지표의 변

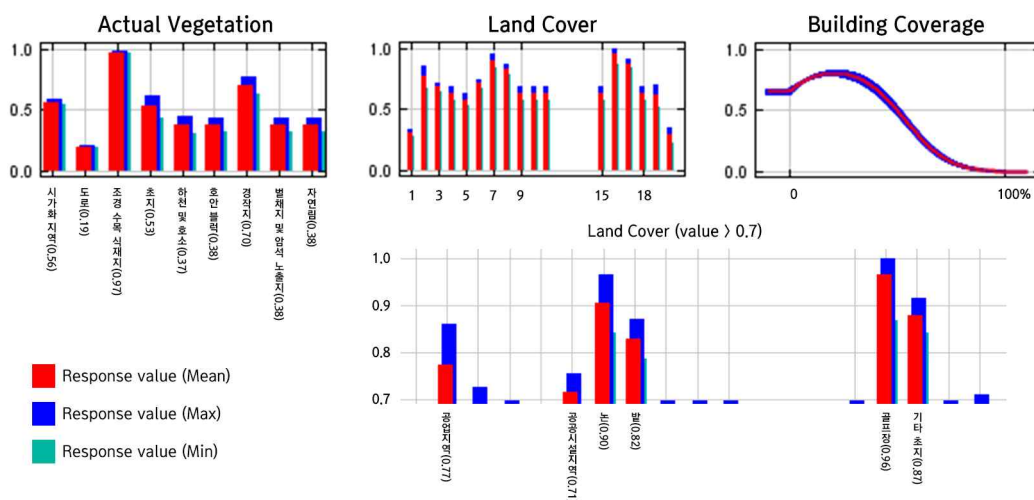


Figure 4. Model impact of individual environmental variables

Table 2. Environment Variable Importance

Environment Variable Name	Importance (%)
Building Coverage	55.6
Actual Vegetation	27.9
Land Cover	16.5

화를 나타내며 파랑색 범위는 출현 가능성 지표의 표준편차를 의미한다.

건폐율 변수의 경우 25% 부근에서 출현 가능성 지표가 가장 높았으며 건폐율이 증가할수록 출현 가능성 지표가 0에 수렴하였다. Hevia(2016)의 연구에서는 농촌지역 내 도로와 같은 인위적 장소에서 꿀벌의 출현 빈도가 높았으며, 자연지역보다 인위적인 공간에서 더 많은 혜택을 받을 가능성이 있다는 연구 결과가 있다(McFrederick and LeBuhn, 2006; Winfree et al, 2007; Gunnarsson and Federsel., 2014). 서울시에 서식하는 양봉꿀벌 또한 건폐율 0%의 자연성이 높은 공간보다 일정 수준 교란된 녹지 또는 인위적으로 조성된 녹지를 선호하는 것으로 판단된다. 인위적인 환경이 꿀벌의 출현에 핵심적인 환경 변수라면 건폐율은 그 정도를 판단할 수 있는 중요한 도시환경 변수라고 생각된다, 하지만 미시적 환경에서 건폐율이 양봉꿀벌 출현과 관계가 높다고 판단되는 온도, 습도, 풍속, 식생 등 공간을 구성하는 다른 변수에 어떻게 영향을 미치는지 파악하기에는 한계가 있었다.

현존식생 변수의 경우 우선 소분류 유형으로 평가한 결과에서 양봉꿀벌의 지표는 대상지 내 9개 유형 중 조경 수종 식재지 0.99, 경작지 0.70 순으로 높았다. 이외의 변수 값에서는 지표가 0.7 미만으로 나타났으며, 초지 및 자연림보다 조경 수종 식재지가 더 높은 결핍값을 나타냈다. 꿀벌은 식생 다양성이 높고(Hendrix et al, 2010; Potts et al, 2003; Wojcik, 2011), 단일식생이 우점한 지역보다, 층위 조성된 식생 지역에서 더 높은 활동성을 보이는데 (Rebecca et al, 2011), 조경 수종 식재지는 대상지내 다른 지역

보다 이러한 조건에 더 적합하여 높은 결핍값이 나왔다고 판단된다. 이를 확인하기 위해 변수 값을 세분류 범주로 적용하여 현존식생 변수를 재평가하였다.

현존식생 변수 값을 세분류 값을 기준으로 재평가한 결과에 따르면 층위 조성된 수목 식재지와 건조 자생초지의 출현 가능성 지표는 모두 0.99로 높았다. 다음으로 초본이 없으며 층위 조성되지 않은 외래종 수목 식재지(0.91), 초본이 존재하며 층위 조성되지 않은 향토종 수목 식재지(0.89), 초본이 존재하며 층위 조성되지 않은 외래종 수목 식재지(0.80), 시설 경작지(0.77) 순으로 나타났으며 이외의 변수 값에서는 출현 가능성 지표가 0.7 이하로 나타났다.

Table 3. Response Values of Actual Vegetation

Actual Vegetation		Response value
Land-scaping Tree Area	Not Stratified Foreign Tree Area (without herbaceous layer)	0.91
	Not Stratified Native Tree Area (without herbaceous layer)	0.17
	Not Stratified Foreign Tree Area (with herbaceous layer)	0.80
	Not Stratified Native Tree Area (with herbaceous layer)	0.89
	Stratified Tree Area	0.99
	Unmanaged tree Area	0.17
	Nursery Field	0.17
Grassland Dominated by Drought-tolerant Native Species		0.99
Equipped Farmland (Green house)		0.77

조경 수종 식재지의 경우 7개 세분류 유형 중 4개 유형에서 출현 가능성 지표가 높게 나타났으며, 출현 가능성 지표가 낮은 세분류 유형은 초본이 없으며 층위 조성되지 않은 향토종 수목

식재지, 관리되지 않은 수목식재지, 묘포장이었다(Table. 3). 낮은 값이 나타난 3개 유형을 검토한 결과 초본이 없으며 층위 조성된 수목 식재지(0.17), 관리되지 않은 수목 식재지(0.17)의 경우 다른 변수와 비교하여 매우 작은 면적이기에 Maxent 모델에서 평가하기에 한계가 있었다고 판단된다. 묘포장의 경우 일부 지역에 집중되어 위치하고 있었는데, 해당 지점이 모델 구성에 사용한 양봉꿀벌 출현지점 위치자료 데이터에 포함되어 있지 않아 결괏값이 낮게 나타났다고 판단된다. 이에 서울시 바이오툰 유형별 생물다양성 증진방안 연구 자료를 검토한 결과, 위치 데이터로서 기록되지 않았지만 묘포장 곤충상 조사 데이터가 존재하였으며, 양봉꿀벌, 호박설, 어리호박벌 등 꿀벌과 3종이 출현하였음을 확인하였다. 평가할 수 없는 2개 유형을 제외한 전 유형에서 양봉꿀벌의 지표가 높다는 것을 볼 때, 조경 수종 식재지는 양봉꿀벌의 출현과 관련된 주요 환경 변수라고 판단된다. 2030 서울시 공원 녹지 기본계획에 의하면 조경 수종 식재지는 서울시 시가화구역 내에서 가장 증가하고 있는 현존식생 유형이다. 조경 수종 식재지는 향후 계속될 도시화 과정 속에서, 도시 수분 가능성을 향상시킬 수 있는 적절한 대안일 것이다. 하지만 양봉꿀벌의 지표가 높게 나타난 조경 수종 식재지에 어떠한 식생이 존재하고, 어떠한 미시적 환경 요인이 양봉꿀벌의 출현과 긍정적 관계를 가지는지 파악하기에는 한계가 있었다.

토지피복 변수의 경우 20개 중분류 유형 중 출현 가능성 지표는 골프장에서 0.96로 가장 높았다. 다음으로 논(0.90), 기타 초지(0.87), 밭(0.82), 공업지역(0.77), 공공시설지역(0.71)으로 나타났으며 이외의 유형은 출현 가능성 지표가 0.70 미만으로 나타났다. 자연성이 높은 골프장, 논, 초지, 밭 유형 외에도 공업지역, 공공시설지역 또한 높은 지표를 보였는데, 이는 서울시 바이오툰 유형별 생물다양성 증진방안 연구 결과와 어느 정도 일치하였다(Seoul Development

Institute, 2004). 공업지역의 경우 산림지역과 인접한 일부 공업지역에서 양봉꿀벌 출현지점 데이터가 존재하는 것을 확인하였으며, 공공시설지역의 경우 정부의 주도로 녹지 조성이 장려되는 지역이기에 비자연적 지역임에도 불구하고 높은 결괏값이 나왔다고 판단된다.

식피율 변수 및 산림으로부터의 거리 변수의 경우 양봉꿀벌의 생태와 관련된 연구를 검토했을 때 가장 중요한 환경 변수로 추측되었지만(Rebacca et al, 2011; Weronika et al, 2016), 변수 선택 과정에서 낮은 중요도를 나타내 최종적으로 제외되었다. 식피율 변수의 경우 식피율이 일정한 공간 단위마다 평가되지 않고, 불규칙한 넓은 면적에서 정성적으로 평가되었으며, 넓은 활동 범위를 가지는 양봉꿀벌의 생태적 특성, 국내 곤충상 조사방식의 한계로 인해 위 변수를 분석하기에 한계가 있었다고 판단되며, 건축물 평균 층수 변수와 불투수 포장 비율 변수 또한 동일한 이유로 낮은 중요도 값이 나타났다고 판단된다.

산림으로부터 거리 변수의 경우 대상지 내 대부분의 지역이 산림지역과 인접하고 있어 양봉꿀벌의 출현을 구분하기에 한계가 있었다고 생각되며, 수역 및 습지로부터 거리 변수 또한 같은 이유로 낮은 중요도 값이 나타났다고 판단된다.

향 변수의 경우 동향이 가장 높은 지표가 나타났으며, 남향, 서향, 북향 순으로 지표가 낮아졌다. 북향의 출현 가능성 지표가 가장 낮게 나타났다는 점에서 꿀벌과 일사량의 긍정적 관계가(Jeroen et al, 2011) 일부분 일치하였다고 판단되지만, 산림지역과 달리 대부분의 지역이 평탄하고, 건축물로 인해 미소환경의 일사량 변화가 나타났을 수 있기에 도시환경을 평가하기에 한계가 있었다고 생각된다.

결과적으로 본 연구에서 양봉꿀벌의 출현과 밀접한 관계가 있는 도시환경 변수는 건폐율, 현존식생, 토지피복 변수로 나타났으며, 그 중 건폐율 20~30% 지역 및 조경 수종 식재지가 서울시 수분 잠재력을 향상시키는데 기여하고 있

는 수분 잠재환경이었다. 따라서 도심 내 자연성이 높은 지역을 보존하는 것 또한 중요하지만, 건축 밀도를 낮추고, 도시민의 일상적인 공간을 녹화하는 것은, 도시 전체의 수분 가능성과 생물다양성을 향상시킬 수 있는 효과적인 방법이고 할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구는 도시 수분 잠재력을 향상시키기 위한 기초연구로서 꿀벌의 화분 매개 활동과 연관성이 높은 도시환경 변수의 검토를 목적으로 하였다. 9개의 도시환경 변수와 Maxent 모델을 통해 양봉꿀벌과 도시환경 간의 관계를 확인하였다.

모델을 구성하는데 선택된 변수는 최종적으로 건폐율, 현존식생, 토지피복이었으며, 최종 선택된 모델의 신뢰도 지표인 AUC값은 0.791 (sd=0.077)로 나타났다. 건폐율 변수의 경우 중요도 값 55.6%로 양봉꿀벌의 출현을 결정짓는 핵심적인 도시환경 변수였으며, 건폐율이 25%에 가까울수록 양봉꿀벌 지표가 높게 나타났다. 현존식생 변수의 경우 중요도 값 27.9%로 자연림 및 초지에서 양봉꿀벌의 지표가 높을 것으로 예상되었지만 가장 높은 결괏값을 나타낸 것은 오히려 조경 수종 식재지이었다. 토지피복 변수의 경우 중요도 값 16.5%로 자연성이 높은 골프장, 논, 초지, 밭 유형 외에도 공업지역, 공공시설지역에서 높은 지표가 나타났다.

연구 결과 도심 내 초지 및 경작지를 보존하는 것도 중요하지만, 건폐율이 25% 정도로 낮으면서 인위적으로 조경 수종 식재지가 양봉꿀벌이 서식하는데 충분한 환경 조건으로 작용한다는 것을 확인하였다. 도심 내에서 높은 식피율과 수종의 다양성, 자연지역 대비 천적이 적다는 점 등 양봉꿀벌이 출현하기에 다양한 이점이 있다고 추측된다. 하지만 실제 조경 수종 식재지로 분류된 지역이 어떠한 환경 조건을 가지고 있으며, 무엇이 식재되어 있고, 양봉꿀벌과

어떠한 긍정적인 관계를 가지고 있는지를 미시적 관점에서 파악하기에는 한계가 있었다.

양봉꿀벌의 출현에 있어 가장 중요한 도시환경 변수로 판단되는 건폐율 변수의 경우, 미시적 환경에서 양봉꿀벌과 관계가 높다고 판단되는 온도, 습도, 풍속, 식생 등 공간을 구성하는 다른 변수에 어떻게 영향을 미치는지 알 수 없었다.

산림으로부터 거리, 수역 및 습지로부터 거리, 건축물의 평균 층수, 향, 불투수 포장 비율, 식피율 변수의 경우 대상지의 지형적 특성, 조사방식의 한계로 인해 양봉꿀벌의 출현과 큰 연관성을 확인할 수 없었다. 국가 정보 데이터의 경우 Maxent 모델과 같은 종 분포 모델을 염두에 두고 제작된 것이 아니기에 양봉꿀벌의 출현 가능성을 분석하는 데 한계가 있었다. 이를 보완하기 위해서는 지자체 차원에서 양봉꿀벌을 포함하여 도시생태계에서 중요한 생태적 지위를 가진 생물 종 및 환경 변수를 선정하고, 정량적인 조사를 선택적으로 시행하는 것이 필요할 것으로 보인다. 특히 양봉꿀벌의 주요 출현지이자 먹이자원으로 예상되는 조경 수종 식재지에 대해서는 향후 현장 조사연구를 통해 화분 매개 곤충과의 관계를 구체적으로 파악할 필요가 있을 것이다.

본 연구는 양봉꿀벌에 의한 도시 수분 잠재력 증진을 위한 기초연구로서 의미가 있으며, 향후 도시수분 잠재력 향상을 위한 도시계획 및 공원 녹지 조성 계획의 기초자료로써 활용될 것으로 기대된다.

References

- Barth FG. 1985. Insects and flowers. The Biology of a Partnership. George Allen & Unwin: United Kingdom.
- 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., CH. Graham, RP. Anderson, M. Dudík, S. Ferrier, A. Guisan, RJ. Hijmans, F. Huettmann, JR. Leathwick, A. Lehmann, J. Li, LG. Lohmann, BA. Loiselle, G. Manion, C. Moritz, M. Nakamura, Y. Nakazawa, J. McC, M. Overton, AT. Peterson, SJ. Phillips, K. Richardson, R. Scachetti Pereira, RE. Schapire, J. Soberón, S. Williams, MS. Wisz and NE. Zimmermann. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2): 129-151.
- Faith K. 2014. Obama announces plan to save honey bees. *CNN Politics*. June 23, 2014.
- Gallai N., JM. Salles, J. Settele and BE. Vaissière. 2009. Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline. *Ecological Economics*. 68(3): 810-821.
- Gill NS. and F. Sangermano. 2016. Africanized honeybee habitat suitability: a comparison between models for southern Utah and southern California. *Applied Geography*. 76: 14-21.
- Giorgio C. and M. Bettina. 2003. Honey bees as bioindicators of environmental pollution. *Bulletin of Insectology*. 56(1): 137-139.
- Gunnarsson B. and LM. Federsel. 2014. Bumblebees in the city: abundance, species richness and diversity in two urban habitats. *Journal of Insect Conservation*. 18(6): 1185 - 1191.
- Hendrix SD., KS. 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.
- Hevia T., J. Bosch, FM. Azcárate, E. Fernández, A. Rodrigo, H. Barril-Graells and JA. González. 2016. Bee diversity and abundance in a livestock drove road and its impact on pollination and seed set in adjacent sunflower fields. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 232: 336-344.
- Jeroen E., W. Michael, G. Bernd and F. Carsten. 2011. Microsite conditions dominate habitat selection of the red mason bee (*Osmia bicornis*, Hymenoptera: Megachilidae) in an urban environment: A case study from Leipzig, Germany. *Landscape and Urban Planning*. 103: 15-23.
- Jha PK., RB. Thapa and JB. Shrestha. 2005. Conservation and Management of Pollinators for Sustainable Agriculture through an Ecosystem Approach. Report submitted to Food and agriculture Organization of the United Nations, Kathmandu.
- Jill A. and A. Barry. 2016. *The Business of Bees: An Integrated Approach to Bee Decline and Corporate Responsibility*. Greenleaf Publishing: United Kingdom.
- Jung CE. 2008. Economic value of honeybee pollination on major fruit and vegetable crops in Korea. *Korean Journal of Apiculture*. 23(2): 147-152.
- Kang CH. and HS. Lee. 2018. A study on the effect of wind speed on the production of honey. *Journal of Apiculture*. 33(1): 63-70.
- Kim YJ. · JH. Kim, YH. Oh, SJ. Lee, SG. Song, EY. Joung, SJ. Lee, SJ. Lee and BC. Moon. 2016. Prevalence of honeybee (*Apis mellifera*) disease in Daejeon. *Korean Journal of Veterinary Service*. 39(4): 253-258. (in Korean with English summary)

- Kim WM., WK. Song, SY. Kim, EJ. Hyung and SH. Lee. 2017. Habitat analysis study of honeybees (*Apis mellifera*) in urban area using species distribution modeling - focused on Cheonan. Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology. 20(3): 55-64.
- Kohavi R. 1995. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. In IJCAI. 14(2): 1137-1145.
- Lee MR. 2008. Characteristics of CCD and domestic situation. Korea Beekeeping Bulletin. 331: 16-17. (in Korean with English summary)
- Lee JM., YL. Kim, CH. Kim and SH. Woo. 2019. Beekeeping crisis and implications. KREI Agriculture Policy Focus. 178: 1-24. (in Korean with English summary)
- Losey JE. and M. Vaughan. 2006. The economic value of ecological services provided by insects. Bioscience. 56(4): 311-323.
- Morrison ML., B. Marcot and W. Mannan. 2012. Wildlife-habitat relationships: concepts and applications. Island Press: Washington·Covelo·London.
- Morandin LA. and ML. Winston. 2005. Wild bee abundance and seed production in conventional, organic, and genetically modified canola. Ecological Applications. 15(3): 871-881.
- Nabhan GP. and SL. Buchmann. 1997. Services provided by pollinators. Nature's Services: societal dependence on natural ecosystems. 133-150.
- Pahl M., H. Zhu, J. Tautz and S. Zhang. 2011. Large scale homing in honeybees. PLOS ONE. 6(5): e19669.
- Phillips SJ. and M. Dudík. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. Ecography. 31(2): 161-175.
- Potts SG., N. Vulliamy, A. Dafni, G. Néeman and P. Wilmer. 2003. Linking bees and flowers: How do floral communities structure pollinator communities?. Ecology. 84(10): 2628-2642.
- Potts SG., JC. Biesmeijer, C. Kremen, P. Neumann, O. Schweiger and WE. 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.
- Seoul Development Institute. 2004. Characteristics of seoul biotope types and enhancing biodiversity. (in Korea)
- Shon KR., JH. Kim, KS. Chu and JW. Lee. 2015. Monitoring of Sacbrood virus from Korean native honeybees in Jeonbuk province, Korea. The Korean Journal of Veterinary Service. 38(1): 57-59. (in Korean with English summary)
- Silva DP., VH. Gonzalez, GA. Melo, M. Lucia, LJ. 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.
- Stohlgren TJ., CS. Jarnevich, WE. Esaias and JT. Morissette. 2011. Bounding species distribution models. Current Zoology. 57(5): 642-647.
- Swets JA. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. Science. 240(4857): 1285-1293.

- vanEngelsdorp D., JD. Evans, C. Saegerman, C. Mullin, E. Haubruge, BK. Nguyen, M. Frazier, J. Frazier, D. Cox-Foster, Y. Chen, R. Underwood, DR. Tarpay and JS. Pettis. 2009. Colony collapse disorder: a descriptive study. *PIOS ONE*. 4(8): e6481-e6481.
- Vollet-Neto A., C. Menezes and VL. Imperatriz-Fonseca. 2011. Brood production increases when artificial heating is provided to colonies of stingless bees. *Journal of Apicultural Research*. 50(3): 242-247.
- Weronika B., R. Halina and D. Lukasz. 2016. Features of urban green space favourable for large and diverse bee populations (Hymenoptera: Apoidea: Apiformes). *Urban Forestry & Urban Greening*. 20: 448-452.
- Williams IH. 1994. The dependence of crop production within the European Union on pollination by honey bees. *Agricultural Zoology Reviews*. 6: 229 - 257.
- Winfree R., NM. Williams, J. Dushoff and C. Kremen. 2007. Native bees provide insurance against ongoing honey bee losses. *Ecology Letters*. 10(11): 1105 - 1113.
- Winfree R., R. Aguilar, DP. Vázquez, G. LeBuhn and MA. Aizen. 2019. A meta-analysis of bees responses to anthropogenic disturbance. *Ecology*. 90(8): 2068-2076.
- Wojcik V. 2011. Resource abundance and distribution drive bee visitation within developing tropical urban landscapes. *Journal of Pollination Ecology*. 4: 48-56.