

기후변화로 인한 도시 야생조류 종 풍부도 변화와 도시녹지의 중요성

박채연* · 모용원**†

*일본국립환경연구소 특별연구원, **영남대학교 생명응용과학대학 조경학과 조교수

Impact of Climate Change on Urban Bird Species Richness and the Importance of Urban Green Spaces

Park, Chae Yeon* · Mo, Yong Won**†

*Research Associate, National Institute of Environmental Studies, Tsukuba, Japan

**Assistant Professor, Department of Landscape Architecture, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea

ABSTRACT

Climate change has affected wildlife habitat and biodiversity. Birds play an important role in the biodiversity of urban areas and their habitat is also affected by climate change. This study predicted bird species richness (BSR) in the 2050s under two climate scenarios (Representative Concentration Pathway [RCP] 4.5 and 8.5) in Seoul, South Korea. We selected 11 common bird species to represent bird biodiversity in the city and calculated BSR by analyzing potential habitat. The results of potential habitat analysis showed that the relative importance of surrounding green area ratio was 41%. Among climate factors, relative importance of accumulated rainfall and mean daily maximum temperature during the breeding season were 26% and 10%, respectively. This importance of climate factors will affect future BSR. The region with the highest BSR will be reduced from 27% to 3% in the 2050s under RCP 4.5 and to 1% under RCP 8.5. The change in maximum air temperature during the breeding season was an important factor in future BSR decrease in Seoul. The results indicate the importance of urban parks and green spaces for maintaining urban biodiversity. We identified important green spaces located in areas with high BSR. These important green spaces should be managed and conserved to prevent degradation of biodiversity in the future.

Key words : Wild Bird, Biodiversity, Maxent, Potential Habitat, Urban Ecosystem

1. 서론

도시화로 인한 서식지 파괴와 기후변화는 생물 종의 멸종을 가져오고 생물다양성을 감소시키고 있다(Pimm, 2008). 생물다양성은 유전자와 종에서 생태계에 이르기까지 모든 생명체의 다양성을 의미하며, 사람들에게 필수적인 서비스를 제공한다(Reid and Swiderska, 2008). 그러나 도시화로 인해 자연피복이 감소하고 인공피복이 증가하면서 생물들의 서식지가 감소하고 있다(Hagen et al., 2017).

기후변화 또한 서식지와 종 다양성에 부정적인 영향을 주고 있다는 것이 밝혀져 왔다(Mantyka-pringle et al., 2012; Filloy et al., 2019). 기후변화로 인해 생물들의 기후 환경이 달라지면

서 서식지가 북쪽으로 옮겨지는 경우도 있으나, 멸종 위기에 처하는 경우도 있다(Hitch and Leberg, 2007; Manes et al., 2021). 기후변화가 생물 서식지에 영향을 주는 요인으로는 최고기온과 강수량의 변화로 알려져 있으며, 특히 생물의 생리학적 임계값을 초과하는 기온의 증가가 부정적인 영향을 주는 것으로 나타났다(Rosenzweig et al., 2008; Mantyka-pringle et al., 2012). 따라서 미래에 기후변화 정도에 따라 생물다양성의 감소정도가 달라질 것이라는 전망이 나오고 있다(Manes et al., 2021).

우리나라에서도 기후변화가 생물다양성을 감소시킬 것으로 예측되고 있지만, 녹지면적 증가와 관리를 통해 생물다양성을 회복시킬 수 있다는 의견도 있다(Choi et al., 2021).

†Corresponding author : csmo12@yu.ac.kr (Yeungnam University, Gyeongsan, 38541, Republic of Korea. Tel. +82-53-810-2979)

ORCID 박채연 0000-0002-5641-892X

모용원 0000-0001-9448-0591

특히 도시에서는 서식지 측면에서 도시녹지를 관리하는 것이 도시 내 생태계를 보호하고 생물다양성을 증진하기 위한 가장 효과적인 방안으로 여겨진다(Hagen et al., 2017). 도시 녹지는 자연피복이 파편화된 도시 내에서 야생생물의 중요한 서식지 역할을 하기 때문이다. 따라서 미래 기후변화 상황에서 도시녹지의 효과를 파악하고 주요 녹지를 관리하고 확장하는 것이 생물다양성 측면에서 필요하다.

야생조류의 종 다양성은 도시생태계의 주요 지표로, 많은 선행연구에서 도시녹지에서의 생물다양성 연구 대상이 되어왔다. 조류는 다른 생물분류군보다 녹지 간 이동이 자유롭고, 비행을 통해 주변 환경변화에 즉각적으로 반응할 수 있기 때문이다(Song, 2014; Song, 2018). 따라서 야생조류는 도시생태계의 건강성을 판단할 수 있는 중요한 지표종으로서 중요한 의미를 가진다(Yang et al., 2020).

야생조류의 서식지나 종 다양성과 관련된 국내 선행연구들은 대부분 환경변수로 토지이용이나 토지피복에 초점을 두었다. 그 결과, 녹지 패치의 구조적 특성이 종 다양성과 관계가 있으며, 패치의 크기뿐만 아니라 수목 영급의 다양성이 조류의 종 다양성에 영향을 주는 것이 확인되었다(Lee et al., 2010a). 공원의 면적뿐만 아니라 수종의 다양성, 불 투수표면의 비율 등에 영향을 받는 것도 밝혀졌다(Song, 2015). 특히, 시가화지역에서의 야생조류 출현은 블록면적, 녹지율, 건폐율, 교목층의 수고 등과 밀접한 연관이 있는 것으로 확인되었다(Kwak et al., 2010). 이 외에도 야생조류의 종 다양성은 식생지수와 혼효림 및 계곡으로부터의 거리와도 상관성이 있는 것으로 나타났다(Lee et al., 2010b). 그러나 종 다양성은 기후변화에도 영향을 받기 때문에, 기후변화에 따른 서식지의 변화 및 종 다양성 변화에 대한 예측이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 기후변화로 인한 도시 내 야생조류 종 다양성의 변화를 잠재서식지 분석을 통해 알아보고자 한다. 종 다양성을 판단하는 지표로는 몇 종의 조류가 서식 가능한 곳인지를 나타내는 종 풍부도를 이용하였다. 또한, 종 풍부도 공간 분석을 통해 미래에도 높은 종 다양성을 가질 수 있는 녹지를 확인하여, 도시녹지 보전의 중요성을 확인하였다.

2. 방법론

2.1. 연구의 범위

연구 대상지는 이미 도시화가 진행되었으나 녹지가 상

당히 분포하고 있어 다양한 야생조류가 서식하고 있는 서울시로 선정하였다. 서울시 내 녹지는 서울시 전체 면적의 약 35%에 해당하며, 그중 도시공원은 서울시 전체 면적의 약 28%에 해당한다(Song and Yoon, 2019). 따라서 서울시는 야생조류의 종 풍부도를 확인하기 용이하며 도시녹지의 역할을 보는 데 적합하다. 한편 야생조류의 잠재서식지 분석은 남한 전체를 대상으로 하였다. 서울시 내 조류 관측지점이 다양한 토지피복형태를 포함하지 못하고 있으며, 서울시만 한정하여 잠재서식지를 분석할 경우 현재 서울시가 갖는 기후 범위 내에서만 서식가능성이 분석되기 때문에 미래 기후변화에 대한 예측의 신뢰성이 떨어질 수 있기 때문이다. 따라서 남한 전체를 대상으로 잠재서식지 분석을 진행하고, 서울시의 잠재서식지만 추출하여 서울시 야생조류의 종 풍부도를 계산하였다.

본 연구의 시간적 범위는 현시점(2010년대)과 미래 시점(2050년대)을 포함한다. 시간적 범위가 바뀔 때 따라 토지피복, 지형 등 다른 환경변수들도 변화가 있을 수 있으나 본 연구는 기후변화에 대한 영향만을 파악하기 위하여 기후변수만 바뀌는 것으로 가정하였다. 본 연구에서 활용한 기후변수는 변식기(5~6월) 일 최고기온의 평균값(일 최고기온)과 누적 강수량이다.

연구 대상 종은 서울시 도시녹지에서 가장 많이 관찰되는 조류를 기준으로 선정하였다. 구체적인 연구 대상 종 선정기준은 다음과 같다. (1) 강이나 하천에서 서식하는 물새가 아닌 도시녹지에서 서식할 수 있는 산림성 조류, (2) 서울시 도시생태현황도(2015년)에서 조사된 257곳의 출현지점 중 5% 이상인 13곳 이상에서 발견된 종, (3) 연중 조류 풍부도에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 텃새로 대상 종 범위를 한정하였다. 그 결과 총 12종의 조류가 대상 종으로 선정되었는데, 까마귀는 조건에 부합하나 큰부리까마귀와 오동정으로 인한 오류일 가능성이 있어 이를 제외한 11종을 최종 선정하였다: 까치(*Pica pica*), 박새(*Parus major minor*), 멧비둘기(*Streptopelia orientalis*), 직박구리(*Microscelis amaurotis*), 핑(*Phasianus colchicus Linnaeus*), 붉은머리오목눈이(*Paradoxornis webbianus*), 곤줄박이(*Parus varius*), 참새(*Passer montanus*), 쇠박새(*Parus palustris*), 노랑턱멧새(*Emberiza elegans*), 쇠딱따구리(*Dendrocopus kizuki*) (Lee et al., 2020).

종 출현지점 자료는 제3, 4차 전국자연환경조사자료(National Institute of Ecology, 2021)와 2015 서울시 도시생태현황도(Seoul Metropolitan Government, 2021), 생태계정밀조사자료(K water, 2021)을 활용하였다. 제3 차 전

국자연환경조사는 2006~2013년, 제4 차는 2014~2018년 간 이루어졌으며, 생태 생태계정밀조사는 2004~2018년 간 이루어졌다. 해당 자료들은 대부분 1월이나 2월부터 11월이나 12월까지 조사되었으며 본 연구는 해당 자료를 모두 활용하여 종 풍부도 분석에 활용했다.

2.2. 종 풍부도 분석

야생조류의 종 풍부도를 구축하기 위해서 11종의 잠재 서식지를 각각 예측한 후 중첩분석을 하여 0부터 11까지 값을 갖는 도면을 작성하였다. 각각 개별 종의 잠재서식지 예측은 종 분포 모형인 Maxent를 이용하였다. Maxent 모형은 종 분포 모형 중 하나로, 불완전한 정보로 예측을 만들어내는 다목적 방안이며 통계 역학에 그 기반을 두고 있다(Jaynes, 1957). Maxent는 종속변수로 종 출현자료만을 이용하여 예측할 수 있다는 장점이 있으며(Phillips et al., 2006), 생물 종과 환경변수와의 관계를 이해하는 데 도움을 주어 특정 종에 대한 지리적 분포를 파악해 우선적으로 보호해야 할 지역을 찾아낼 수 있다(Kwon, 2011). 본 연구의 입력 자료인 전국자연환경조사자료, 서울시 도시생태현황도, 생태계정밀조사 자료는 종 출현지점 자료만을 제공하고 있어서 출현자료만을 바탕으로 최대 엔트로피 접근법(maximum entropy approach)을 통해 종 분포를 예측하는 Maxent를 사용하는 것이 유용하다고 판단하였다(Song and Kim, 2012; Lee and Kim, 2010).

Maxent 분석 결과는 0에서 1까지의 서식지 확률분포지 도로 도출된다. 이를 로지스틱 임계값(logistic threshold) 중 하나인 ‘maximum training sensitivity plus specificity’

값을 기준으로 출현(1)과 비출현(0) 값을 갖는 이항형 자료로 변환하였다(Hu and Jiang, 2011; Thuiller, 2004). 이 임계값은 출현이 예측된 지역에서 실제 출현할 확률과 비출현으로 예측된 지역에서 실제 출현하지 않을 합이 최대가 되는 값으로(Kim et al., 2014), 값이 1인 지역이 개별 종의 잠재서식지가 된다.

본 연구에서는 전체 출현자료 중 80%를 모형 개발에, 나머지 20%를 모형 설명력 평가에 활용하였다. 모형의 설명력 평가는 ROC(receiver operating characteristics) 곡선의 AUC(area under the curve)를 통해 실시했다. 일반적으로 AUC가 0.7 이상일 때 모형이 설명하는 잠재서식지의 의미가 있다고 판단한다(Lee and Kim, 2010).

잠재서식지 분석에 활용된 입력변수는 지형 및 토지와 관련된 변수 5개(토지피복, 녹지율, 수역으로부터의 거리, 고도, 표면 거칠기)와 기후변수 2개(번식기 일 최고기온, 번식기 누적 강수량)을 활용하였다. 도시 조류의 종 다양성은 녹지의 면적비율과 양의 상관관계를 갖기 때문에(Fillooy et al., 2019), 격자 주변 90 m 이내의 초지 및 산림의 면적 비율을 의미하는 주변 녹지율을 변수로 활용하였다. 토지피복은 조류의 서식과 관련이 있는 8가지의 피복으로 구분하였다(건축물, 도로, 나지, 논, 초지, 산림, 습지, 수역)(Kim et al., 2021). 자연환경적 요소를 고려하기 위해 고도, 지표면의 거칠기, 하천으로부터의 거리를 이용하였다(Coxen et al., 2017; Wolff et al., 2018). 본 연구의 대상 종은 모두 봄철에 번식하는 종이기 때문에 5월과 6월을 번식기로 정의하였고, 서식지에 가장 중요한 변수인 번식기 일 최고기온과 누적 강수량을 기후변수로 활용하였다(Kim et al., 2021) (Table 1).

Table 1. Environmental variables for analyzing potential habitats

Input variables	Unit	Description	Class
LCC	-	8 classes land cover types	Categorical
Green	ratio	Neighbor greenness. The ratio of grassland or forests in the area surrounding 90 m	Continuous
Water	km	Distance to water land cover class	
Elevation	m	Elevation of the ground	
Roughness	ratio	Topography roughness. variance of the height distribution	
Tmax	°C	Mean daily maximum temperatures during breeding season (May-June)	
Rainfall	mm	Accumulated rainfall during breeding season (May-June)	

토지와 관련된 변수는 2019년 중분류 토지피복도를 활용하였으며(Ministry of Environment, 2019), 지형과 관련된 변수는 2015년 국토지리정보원에서 구축한 남한의 수치표고 모형을 활용하여 제작하였다(Ministry of Land Infrastructure and Transport, 2015). 표면의 거칠기는 ArcMap 10.7의 래스터 계산기(raster calculator)를 이용해서 구축하였다. 마지막으로 기후변수는 기상청에서 제공하는 일 최고기온과 일 강수량 자료를 활용하였다. 그중에서도 공간적 해상도가 1 km x 1 km인 200년 제어적분(IC 200) HadGEM3-RA 모델을 활용한 남한상세자료를 사용하였다(KMA, 2021). 토지 및 지형과 관련된 변수를 모두 30 m x 30 m 해상도로 구축하였기 때문에 기후변수도 30 m x 30 m로 리샘플(resample) 후 사용하였다(ArcMap 10.7 활용).

2.3. 기후변화 시나리오에 따른 예측

본 연구는 현 시점(2010년대)을 기준으로 미래 시점(2050년대)의 종 풍부도 변화를 예측, 비교하였다. 본 연구는 미래의 기후변화에 대한 영향만을 파악하기 위하여 2050년대는 기후변수만 바뀌는 것으로 가정하였다. 본 연구에서 활용한 기후변수인 일 최고기온과 누적 강수량을 구축할 때 특정 연도가 갖는 불확실성을 줄이기 위하여 10년 평균을 사용하였다. 현시점 분석에는 2011~2020의 평균을, 미래 시점의 분석에는 2051~2060의 평균을 사용하였다.

미래 기후변수에 대해서는 RCP 4.5와 8.5 두 가지 기후변화 시나리오를 활용하였다. RCP 4.5 시나리오는 현재보다 온실가스 배출량을 줄여서 2100년까지 지구 평균온도 상승을 약 2°C 이내로 줄이는 시나리오이며, RCP 8.5 시나리오는 현재 수준의 배출을 유지했을 경우로 온도가 약 4.5°C로 증가하는 시나리오이다(van Vuuren et al., 2011).

자료의 통일성을 위해서 현재 시점에 RCP 8.5 시나리오의 2011~2020년 자료를 활용하였다.

2.4. 주요 도시녹지 분석

종 풍부도 유지에 중요한 도시녹지의 위치를 확인하기 위해, 2015년 서울시 생태현황도에서 조경녹지비오톱(녹지 및 오픈스페이스에서 산림지비오톱을 제외한 곳)을 추출하여 미래 종 풍부도와 공간적 분포를 비교하였다. 미래 종 풍부도는 비교적 기후변화 영향이 적은 2050년대 RCP 4.5 시나리오를 기준으로 하였다.

3. 결과

3.1. 입력변수 분석

서울시의 입력변수 구축 결과, 주변 녹지량은 평균 0.36 ± 0.36 (범위: 0~1) 값을 가지며, 하천으로부터의 거리는 평균 0.7 ± 0.5 km(범위: 0~2.6 km) 값을 가지며, 고도는 평균 63 ± 82 m(범위: 3~738 m) 값을 가지며, 표면거칠기는 평균 0.3 ± 0.16 (범위: 0~1) 값을 가지는 것으로 나타났다. 서울의 북쪽과 남쪽에는 산림이 위치하고 있어 고도, 표면거칠기, 주변 녹지량이 높게 나타났다. 서울시는 한강을 중심으로 지류가 형성되어 있기 때문에 지류를 중심으로 하천으로부터의 거리가 낮게 분포했다. 현시점의 기상자료 구축 결과로는, 일 최고기온은 평균 $25.6 \pm 0.8^\circ\text{C}$ (범위: $21.6 \sim 26.7^\circ\text{C}$) 값을 가지며, 누적 강수량은 평균 371 ± 8 mm(범위: 354~399 mm) 값을 가졌다. 일 최고기온은 산림지역이 21°C 로 가장 낮게 나타났으며, 도심지가 27°C 로 가장 높게 나타났다. 누적 강수량은 지역에 따라 분포가 다르게 나타났다(Fig. 1).

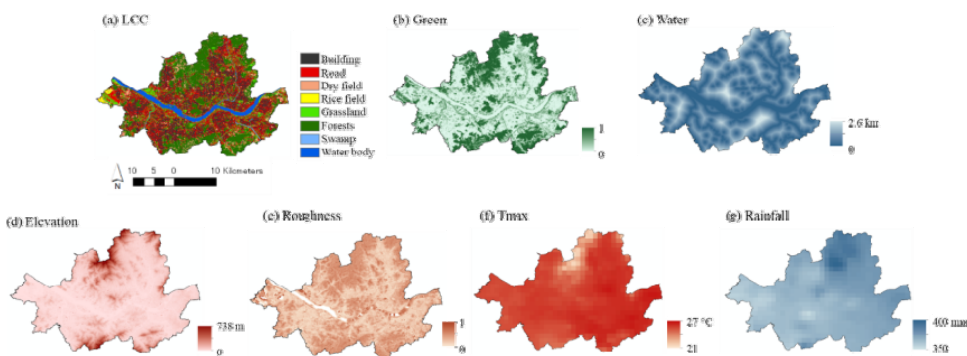


Fig. 1. Environmental variables for analyzing potential habitats. Tmax and rainfall was the yearly averaged value of 2011~2020.

2050년대의 종 풍부도의 변화를 분석하기 위해서 구축한 일 최고기온과 누적 강수량은 현시점(2010년대)보다 모두 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 2). 일 최고기온은 RCP 4.5에서 평균 $27.2 \pm 0.8^\circ\text{C}$ (범위: $23.2 \sim 28.3^\circ\text{C}$) 값을, RCP 8.5에서는 평균 $27.9 \pm 0.8^\circ\text{C}$ (범위: $23.9 \sim 28.8^\circ\text{C}$) 값을 갖는다. 누적 강수량의 경우 RCP 4.5에서 평균 $424 \pm 17 \text{ mm}$ (범위: $394 \sim 473 \text{ mm}$) 값을, RCP 8.5에서 평균 $403 \pm 28 \text{ mm}$ (범위: $359 \sim 463 \text{ mm}$) 값을 갖는다. 일 최고기온은 RCP 4.5에 비해서 RCP 8.5에서 더 높게 예측되었다. 그러나 누적 강수량의 경우 분포범위가 RCP 8.5에서 더 커지긴 하지만 평균은 RCP 4.5에서 더 높게 나타났다.

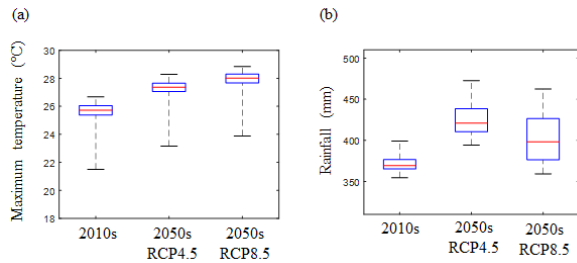


Fig. 2. The range of current and future (a) Tmax and (b) Rainfall (red line: average value, black line: minimum and maximum value). Blue boxes include 25 ~ 75% of the data and red lines mean median value.

3.2. 조류 서식지와 종 풍부도 예측 및 평가

전국을 대상으로 11종의 조류 서식가능성을 분석한 결과 AUC가 평균 0.81(0.78 ~ 0.84)로 구축된 모형이 설명력을 갖는 것으로 나타났다. 서울을 대상으로 서식가능성이 높은 잠재서식지를 도출한 결과 까치, 붉은머리오목눈이, 참새, 직박구리의 잠재서식지가 서울시 전체 면적의 70% 이상으로 가장 높게 나타났다. 이 종들은 높은 산지나 밀집된 도심지역만 제외하고, 많은 지역에서 잠재적 서식이 가능한 것으로 나타났다. 그다음으로는 멧비둘기, 박새, 평의 잠재서식지가 서울시의 57~62%로 나타났다. 이들도 높은 산지와 도심지역에서 서식이 불가능한 것으로 나타났다. 마지막으로 쇠딱따구리, 곤줄박이, 노랑턱멧새, 쇠박새는 30~55%의 지역만이 잠재서식지로 도출되었다. 특히 이들은 산지에서는 서식할 수 있지만, 도심지역에서는 대부분 불가능한 것으로 나타났다.

위와 같은 서식 분포는 변수들의 기여도, 각 변수와 서식가능성도와의 관계(어느 범위에서 서식가능성도가 크게 나타나는지)에 따라 다르게 나타났다. 서식 분포에 관여하는 기여도는 종마다 조금씩 다르게 나타났지만 유사한 패턴을 보였다(Fig. 3). 가장 높은 기여도를 한 변수는 주변 녹지율(green)로 평균 41%의 기여도를 보였다. 기후변수인 누적 강수량(rainfall)과 일 최고기온(tmax)은 각각 평균 26%, 10%의 기여도를 보였다. 이 외에 고도(elevation)가 10%, 하천으로부터의 거리(water)가 5%, 표면 거칠기(roughness)가 4%, 토지피복(LCC)이 4%의 평균적인 기여도를 보였다. 노랑턱멧새의 경우 고도에 대한 기여도가 22%, 참새의 경우 하천으로부터의 거리 기여도가 11%, 평의 경우 토지피복의 기여도가 9%로 이상치를 나타냈다.

입력변수별로 서식가능성도가 높게 나타나는 범위를 확인해 본 결과 주변의 녹지율이 공통적으로 0.3 ~ 0.8에서 서식가능성도가 높았다(Fig. 4c). 누적 강수량의 경우 400 mm까지 증가 후 감소하는 종(붉은머리오목눈이, 참새, 딱따구리, 쇠박새)과 600 mm까지 증가하는 종(박새, 까치, 평, 곤줄박이, 직박구리, 멧비둘기, 노랑턱멧새)으로 나누어졌다. 위 결과는 현재 서울시 종 풍부도가 누적 강수량이 400 mm에 가까워질수록 높아지는 결과를 가져왔다(Fig. 4g). 일 최고기온은 25 ~ 26°C에서 가장 높은 서식가능성을 보였다(Fig. 4f). 고도는 지표면과 가까운 곳, 혹은 300 m 까지에서 높았다(Fig. 4b). 표면의 거칠기는 0.1 ~ 0.4에서 가장 높고 그 이후로 감소했다(Fig. 4e). 하천과의 거리는 가까울수록 서식가능성도가 높았다.

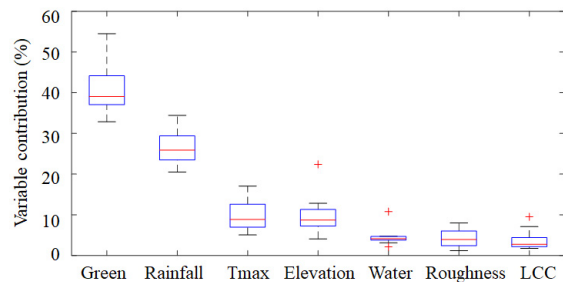


Fig. 3. Contribution of variables to the habitat suitability model of 11 bird species. Blue boxes include 25 ~ 75% of the data, red lines indicate median value, and cross symbols indicate outliers.

서울시의 잠재서식지만 활용하여 조류의 종 풍부도를 계산한 결과 0부터 11까지 다양하게 분포하였으며, 그중에서도 모든 대상 종의 잠재서식지가 되는 11인 지역이 가장 많은 것으로 분석되었다(Fig. 4a, Fig. 5). 종 풍부도는 산림과 수역에서도 높게 나타났지만, 도심 내 녹지에

서도 높게 나타났다. 고도가 매우 높거나 일 최고기온이 너무 낮은 산림지역은 오히려 종 풍부도가 낮게 분석되었다. 강동구, 송파구, 동대문구 내 녹지가 부족한 주거지역의 경우에 종 풍부도가 0~3인 면적이 넓게 나타났다.

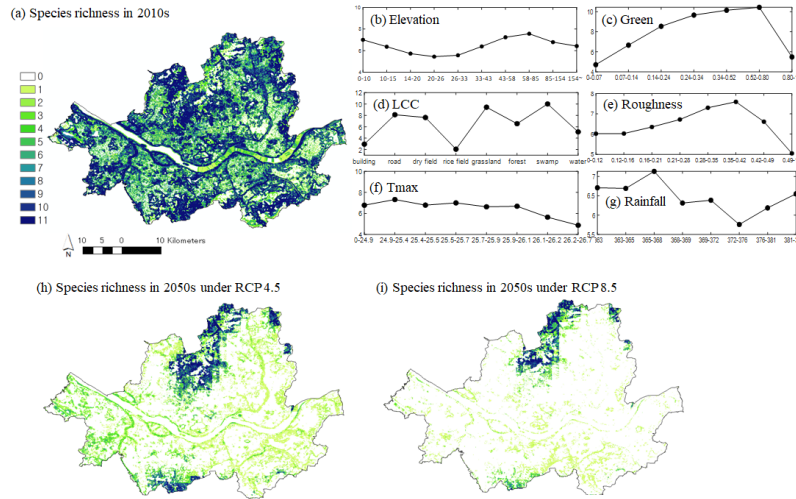


Fig. 4. Predicted bird species richness under current climate (2010 ~ 2011) (a), and future (2041 ~ 2050) climate under RCP 4.5 (h) and RCP 8.5 (i) scenarios. (b-g) are the relationships between species richness (current) and elevation (b), green (c), LCC (d), Tmax (e), and rainfall (f). Plots show the average species richness for each class (quantile classification).

3.3. 기후변화로 인한 미래 종 풍부도 변화

조류 11종의 잠재서식지 모델을 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5에 투영하여 미래의 잠재서식지 변화와 종 풍부도의 변화를 예측한 결과, 현시점에서는 종 풍부도가 0부터 10까지 고르게 분포하고 11을 차지하는 비율이 가장 큰 것에 비해, 미래에는 종 풍부도가 0인 지역이 확연히 증가하며, 3 이상인 곳의 면적은 크게 감소했다(Fig. 5). 분석 대상 11종은 모두 잠재서식지가 줄어들어 종 풍부도가 0인 지역이 가장 크게 증가한 것이다. RCP 4.5와 RCP 8.5를 비교할 경우, RCP 8.5에서 종 풍부도 감소가 더 크게 나타났다. 종 풍부도가 11인 지역은 현시점에서 27%(153 km²)였지만, RCP 4.5에서 3%(16 km²)로 감소했으며, RCP 8.5에서는 1%(8 km²)로 더 크게 감소하였다.

미래 종 풍부도의 공간적인 변화를 확인한 결과, 북쪽의 산림지역(북한산, 인왕산, 도봉산, 수락산)과 남쪽의 관악산 일부 지역을 제외하고는 종 풍부도가 모두 감소하였

다(Fig. 4 h, i). 수역 근처의 경우 RCP 4.5에서는 종 풍부도가 1~4 정도로 다른 지역보다 높았지만, RCP 8.5에서는 대부분 0~1로 감소하였다.

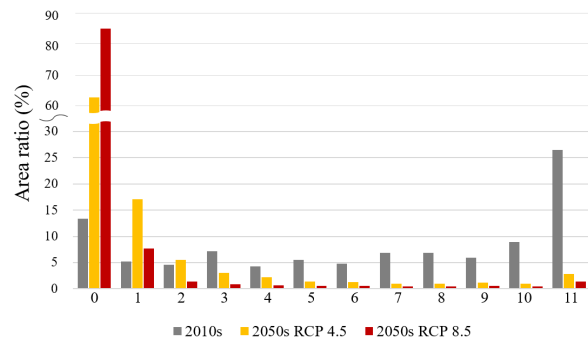


Fig. 5. Area ratio for each value of species' richness (0 ~ 11). Grey means 2010s, yellow means 2050s RCP 4.5, and red mean 2050s RCP 8.5 results.

3.4. 주요 도시녹지 분석

서울시 내에는 크고 작은 조경녹지비오톱이 4,841개의 패치로 구성되고 있었다(Fig. 6, blue + red). 2050년 RCP 4.5를 기준으로 분석된 미래 조류의 종 풍부도를 서울시

의 도시녹지와 비교한 결과, 조경녹지의 평균적인 종 풍부도가 1.5로 나타났으며, 그중 종 풍부도가 9 이상인 패치는 151개로 나타났다(Fig. 6, red). 대부분 산림과 같은 큰 녹지의 주변에 분포하고 있는 녹지들이었으며 주거지역에 위치하고 있었다.

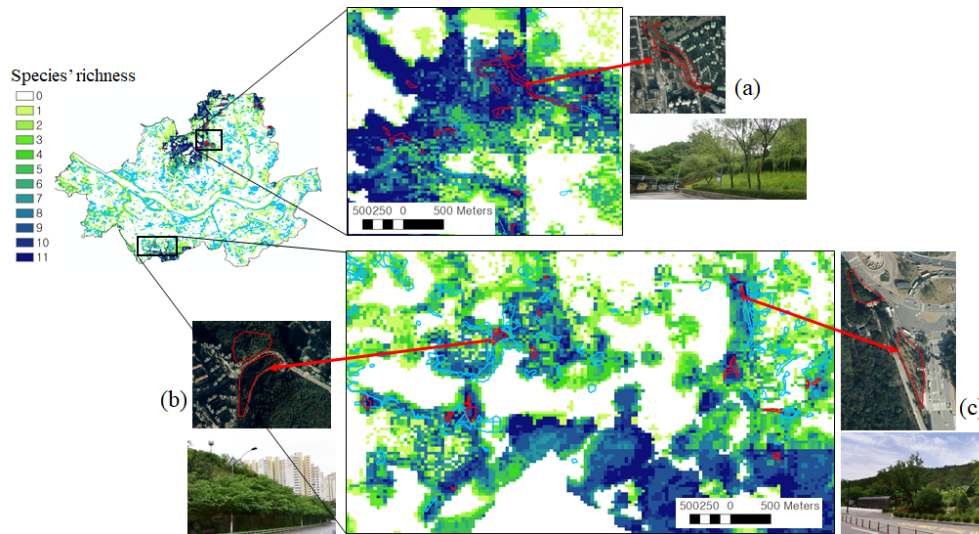


Fig. 6. Bird species' richness map and current urban green patches (blue: richness in 2050 under RCP 4.5 is under 9, red: over 9 green patches). Aerial and ground photos are derived from ©NAVER map.

4. 고찰

4.1. 조류의 종 풍부도와 기후변화

본 연구에서 서울시 야생조류 11종에 대해서 잠재서식지 분석을 한 결과, 누적 강수량이 대부분의 종 서식지에 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다(Fig. 3). 서울시의 경우 현시점에서 누적 강수량이 350~400 mm로 나타났는데, Maxent 분석결과 이 분포는 모든 야생조류의 서식가능성이 높은 범위에 속했다. 그러나 2050년에는 누적 강수량이 증가하여 서식가능성이 감소하였다. 특히 400 mm가 넘게 되면 붉은머리오목눈이, 참새, 딱따구리, 쇠박새의 서식가능성이 크게 감소하였다. 따라서 이러한 종들은 서울시 미래 강수량의 변화에 크게 반응할 것으로 판단된다. 나머지 야생조류는 누적 강수량이 600 mm가 될 때까지 서식가능성이 오히려 증가했기 때문에, 2050년까지의 강수량 변동성에 영향을 받지 않거나 오히려 서식가능성이 증

가할 것으로 판단된다.

일 최고기온이 서식 가능성에 주는 기여도는 누적 강수량보다 낮았지만(Fig. 3), 미래의 변화 범위와 서식가능성 변화를 고려했을 때 미래 종 풍부도 감소에 큰 영향을 줄 것으로 판단된다. 일 최고기온 변수가 서식가능성에 주는 변화는 11종의 야생조류에게서 모두 유사하게 나타났다. 대부분 22~25°C에서 가장 높은 서식가능성을 보여주었다가 그 이후에 모두 급격히 감소하였다. 현시점의 서울시 평균 일 최고기온이 25.6°C로 25°C를 넘는 지역이 많이 없는 것에 반해, 2050년대에는 RCP에 상관없이 평균 일 최고기온이 27°C를 넘게 된다(Fig. 2). 즉, 미래 일 최고기온의 변화는 서식가능성이 높은 범위를 벗어나게 되고, 이는 종 풍부도의 감소에 큰 기여를 한다고 볼 수 있다.

기후변화로 인한 기온 증가가 조류의 서식가능성에 부정적인 영향을 주는 것은 선행연구에서도 확인 할 수 있는데, 특히 높은 기온에서 번식하는 조류일수록 기온 증가에 취약한 것으로 나타났다(Jiguet et al., 2010). 기온은

조류의 기초대사에 밀접한 영향을 주는 요인으로, 기온 증가는 조류의 기초대사과정에 문제를 줄 수 있다 (Şekercioğlu et al., 2012). 계절적 강수량의 변화도 서식 가능성을 저하시키는데(Şekercioğlu et al., 2012), 봄철 강수량 빈도의 증가는 번식기를 늦춰 번식 성공률을 낮추는데 기인할 수 있다(Senapathi et al., 2011).

그러나 모든 선행연구에서 기후변화로 인해 조류의 서식가능성이 감소되는 것은 아니었다. 유럽에서는 낮은 온도 범위에서 번식하는 종의 경우 기후변화로 인해 성장률이 증가하는 것이 확인되었으며(Jiguet et al., 2010). 노르웨이와 스웨덴에서 이뤄진 연구에서도 기후변화가 조류의 번식 성공률을 높인 것으로 나타났다(Wegge and Rolstad, 2017).

우리나라를 대상으로 한 연구에서는 과거 도시화와 기후변화로 현재 철새와 함께 텃새들의 출현율이 과거보다 감소했으며, 텃새 중에서는 멧비둘기, 까치, 박새, 직박구리, 노랑턱멧새의 출현율이 감소한 것으로 추정되었다(Kim et al., 2021). 본 연구에서도 이와 유사하게 2050년 기후변화 영향으로 인해 서울시의 멧비둘기, 까치, 직박구리, 박새를 포함한 11종의 잠재서식지가 감소할 것으로 예측되었다. 이에 따라 앞으로 서울을 포함한 우리나라 전 지역에서 텃새들의 서식가능성이 기후변화의 영향을 받을 것으로 판단된다. 텃새들은 주로 보전조치에서 제외되기 때문에 풍부도가 저하되기 쉽지만, 도시의 중요한 생태계 서비스 제공자 역할을 한다(Gaston et al., 2018). 따라서 미래 기후변화로 인한 야생조류, 그중에서도 텃새들의 종 풍부도의 감소는 서울시 내 생태계 서비스의 약화를 가져올 수 있으므로 각별한 주의가 필요할 것이다.

4.2. 도시녹지의 역할

본 연구를 통해서 기후변화가 가져올 큰 변화와 함께, 도시녹지의 중요성을 확인할 수 있었다. 야생조류 서식가능성에 가장 큰 영향을 주는 것은 주변의 녹지율로(Fig. 3). 현시점의 종 풍부도 평가 결과, 산림이나 수역뿐만 아니라 도심 내 녹지 주변에서 풍부도가 높게 나타나는 것을 확인했다(Fig. 4). 도시녹지의 중요성은 기존의 연구에서도 많이 찾아볼 수 있는데, 특히 녹지 면적이 크면 클수록 다양한 조류가 서식할 수 있어 종 풍부도를 높일 수 있다(MacGregor-Fors and Schondube, 2011; Yang et al., 2020). 그러나 무조건 도시녹지를 늘리거나 현시점의 모든 녹지를 보존하는 것이 현실적으로 어려우므로, 도시에

서 종 풍부도 유지에 큰 역할을 할 수 있는 녹지를 구분하여 관리하는 것이 필요하다. 본 연구는 서울시의 남, 북쪽의 산림과 인접한 도시녹지가 주요한 역할을 할 것으로 확인하였다. 이러한 도시녹지가 높은 풍부도를 유지하는 이유는 도시 내 산림지역이 그 주변에 녹지량을 풍부하게 해주기 때문이다. 즉, 미래 야생조류의 종 풍부도와 생태계서비스 유지를 위해서는 도시 내 산림지역을 보호하고 그 주변의 도시녹지를 우선으로 보존하거나 확장해야 할 것이며, 야생조류 서식지 관리도 함께 이루어져야 할 것이다.

4.3. 연구의 한계

본 연구는 현시점의 서울시에서 가장 많이 발견되는 텃새 11종을 대상으로 미래의 종 풍부도에 대해서 분석해보았다. 그러나 본 연구의 범위나 사용된 자료에는 한계가 있으므로 해석에 주의가 필요하다. 본 연구의 첫 번째 한계는 조류의 적응능력이 고려되지 못했다는 점이다. 진화론적으로 야생조류는 장기적인 기후변화를 겪으면서 유전적인 적응능력을 취득하는 것이 밝혀지고 있다(Karell et al., 2011). 한 가지 사례로 기후변화로 인해 기상조건이 달라지면서 특정 조류들의 번식기가 빨라지고 있다(Rosenzweig et al., 2008; Griffith et al., 2016). 그러나 본 연구에서는 번식기를 5~6월로 고정하여 현재, 미래 모두 동일 기간의 기상변수를 활용하였다. 만약 미래에 서울에서 서식하는 텃새들이 번식기를 변화시키며 기후변화에 적응한다면, 본 연구의 결과보다 종 풍부도 감소량이 적을 것이다.

두 번째 한계는 대상 종 선정과 출현지점 데이터의 사용에 있다. 본 연구는 현재 서울시에서 가장 많이 볼 수 있는 텃새를 대상으로 미래 잠재서식지 예측을 하였다. 그러나 조류는 기후변화로 인해 그 서식지가 북쪽으로 이동하기 때문에(Hitch and Leberg, 2007), 실제로 미래에는 현재 서울에서 볼 수 없는 남부 종의 서식지가 북쪽으로 이동하여 서울시의 종 풍부도를 구성할 수 있다. 이를 확인하기 위해 앞으로 기후변화로 인한 다른 조류의 분포변화와 지역별 종 구성 변화 등의 연구가 이루어져야 할 것이다. 또한, 본 연구에서는 서로 다른 생물 종 출현지점 자료를 종합하여 전국에서 조사된 출현지점을 활용하였다. 하지만 자료마다 조사 기간과 공간적 범위가 다르며, 조사방법에 따라 표본 편향에 대한 가능성이 있다는 한계점을 가진다.

세 번째는 환경변수 입력 자료가 가지는 한계점이다. 현재 시점의 기후변수는 관측자료나 관측자료를 바탕으로 한 재분석자료를 활용하는 것이 좋지만, 본 연구의 경우 관측자료가 공간 해상도가 낮은 이유와 미래 시점 자료와의 통일성을 높이기 위한 이유로 RCP 시나리오(RCP 8.5)의 2011~2020년 예측값을 활용하였다. 하지만 이것은 실제 관측 값과 다를 수 있으므로 한계로 남는다. 또한, 미래에 기후변수만을 변화시키고 다른 환경변수는 모두 현재와 동일하다고 가정한 것도 본 연구의 한계로 남는다. 기후변화 시나리오에 따라서 토지피복이 달라질 수 있으며 전 지구적 규모에서 예측이 되고 있지만(Hasegawa et al., 2017), 도시와 같이 작은 지역에 대해 예측하기에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구는 미래의 기후변수가 서울시 조류 종 풍부도에 미치는 영향만을 파악할 수 있었다.

마지막으로는 기상청 RCP 시나리오의 불확실성이다. 일반적으로 RCP 시나리오 값은 기후모델에 따라 다르게 나타나는데, 기상청에서 제공한 데이터는 다른 기후모델보다 더 높은 온도상승을 예측하고 있다(Shin and Jung, 2015). 향후 다양한 기후모델을 활용한다면, 미래 종 풍부도의 예측을 불확실성 범위와 함께 제공할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 2050년대 서울의 야생조류의 종 풍부도가 기후변화로 인해 어떻게 변화하는지 분석하여, 현재의 도시녹지가 미래 야생조류의 종 풍부도 유지를 위한 역할을 할 수 있는지 확인하였다. 서울시 야생조류 풍부도에는 번식기 누적 강수량과 일 최고기온이 서식 가능성에 큰 영향을 주는 것으로 나타나 미래에는 강수량의 증가, 최고기온의 증가로 야생조류의 서식지가 감소되는 것으로 나타났다.

미래 야생조류 종 풍부도의 감소는 다른 도시생태계에 큰 영향을 주어, 결과적으로 생태계 서비스를 저하시킬 것으로 판단된다. 따라서 미래의 기후변화를 고려한 도시 녹지 관리가 앞으로 중요할 것으로 보인다. 특히 도시 내 산림과 그 주변의 도시녹지를 관리하고 보전하여 도시에 서식하는 야생조류의 다양성을 유지해야 할 것이다.

사사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의

ICT기반 환경영향평가 의사결정 지원 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2021003360002).

References

- Choi Y, Lim CH, Chung HI, Kim Y, Cho HJ, Hwang J, Kraxner F, Biging GS, Lee W-K, Chon J, et al. 2021. Forest management can mitigate negative impacts of climate and land-use change on plant biodiversity: Insights from the Republic of Korea. *J Environ Manage.* 288:112400. doi:10.1016/j.jenvman.2021.112400. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112400>
- Coxen CL, Frey JK, Carleton SA, Collins DP. 2017. Species distribution models for a migratory bird based on citizen science and satellite tracking data. *Glob Ecol Conserv.* 11:298-311. doi:10.1016/j.gecco.2017.08.001.
- Filloy J, Zurita GA, Bellocq MI. 2019. Bird Diversity in Urban Ecosystems: The Role of the Biome and Land Use Along Urbanization Gradients. *Ecosystems.* 22(1):213-227. doi:10.1007/s10021-018-0264-y.
- Gaston KJ, Cox DTC, Canavelli SB, García D, Hughes B, Maas B, Martínez D, Ogada D, Inger R. 2018. Population Abundance and Ecosystem Service Provision: The Case of Birds. *Bioscience.* 68(4):264-272. doi:10.1093/biosci/biy005.
- Griffith SC, Mainwaring MC, Sorato E, Beckmann C. 2016. High atmospheric temperatures and 'ambient incubation' drive embryonic development and lead to earlier hatching in a passerine bird. *R Soc Open Sci.* 3(2). doi:10.1098/rsos.150371.
- Hagen EO, Hagen O, Ibáñez-álamo JD, Petchey OL, Evans KL. 2017. Impacts of urban areas and their characteristics on avian functional diversity. *Front Ecol Evol.* 5:0-15. doi:10.3389/fevo.2017.00084.
- Hasegawa T, Fujimori S, Ito A, Takahashi K, Masui T. 2017. Global land-use allocation model linked to an integrated assessment model. *Sci Total Environ.* 580:787-796. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.12.025. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.025>.

- Hitch AT, Leberg PL. 2007. Breeding distributions of North American bird species moving north as a result of climate change. *Conserv Biol.* 21(2):534-539. doi:10.1111/j.1523-1739.2006.00609.x.
- Jiguet F, Devictor V, Ottvall R, Van Turnhout C, Van der Jeugd H, Lindström Å. 2010. Bird population trends are linearly affected by climate change along species thermal ranges. *Proc R Soc B Biol Sci.* 277(1700):3601-3608. doi:10.1098/rspb.2010.0796.
- Hu J. and Jiang Z. 2011. Climate change hastens the conservation urgency of an endangered ungulate. *PLoS ONE* 6(8): e22873
- Jaynes, E.T. 1957. Concluding remarks. In: Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology 22: 415-427
- K water. 2021. Ecosystem detailed survey data. [accessed 2021 Jun 22]. https://www.bigdata-environment.kr/user/data_market/detail.do?id=d19c6b00-2fb4-11eb-a877-a5b67dc5814b.
- Karell P, Ahola K, Karstinen T, Valkama J, Brommer JE. 2011. Climate change drives microevolution in a wild bird. *Nat Commun.* 2(1). doi:10.1038/ncomms1213.
- Kim H, Mo Y, Choi CY, McComb BC, Betts MG. 2021. Declines in common and Migratory Breeding Landbird Species in South Korea Over the Past Two Decades. *Front Ecol Evol.* 9:1-15. doi:10.3389/fevo.2021.627765.
- Kim JY, Kwon HS, Seo CW, and Kim MJ. 2014. A nationwide analysis of mammalian biodiversity hotspots in South Korea (in Korean with English abstract). *Journal of Environmental Impact Assessment of Korea.* 23(6): 453-465.
- KMA. 2021. Climate change data. [accessed 2021 Jul 1]. http://www.climate.go.kr/home/CCS/contents_new/32_2_user_analysis.php.
- Kwak J, Lee K, Han B. 2010. Study on analysis of influence factor for wildbirds' appearance in urban area around urban green axis - A case study of Gangdong-gu in Seoul (in Korean with English abstract). *Kor J Env Eco.* 24(2):166-177.
- Kwon HS. 2011. Integrated Evaluation Model of Biodiversity for Conservation Planning: Focused on Mt. Jiri, Mt. Deokyu and Mt. Gaya regions (in Korean with English abstract). Ph.D dissertation, Seoul National University.
- Lee DK, and Kim HG. 2010. Habitat Potential Evaluation Using Maxent Model -Focused on Riparian Distance, Stream Order and Land Use (in Korean with English abstract). *Journal of Korean Environmental Restoration Technology* 13(6): 161-172.
- Lee DK, Park C, Oh KS. 2010a. Forest Patch Characteristics and Their Contribution to Forest-Bird Diversity - Focus on Chungcheong Province Area - (in Korean with English abstract). *J Korean Env Res Tech.* 13(5): 146-153.
- Lee SG, Jung SG, Park KH, Kim KT, Lee WS. 2010b. A prediction model and mapping for forest-dwelling birds habitat using GIS (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Geospatial Inf Syst.* 13(1): 62-73.
- Lee US, Koo TH, Park JY. 2020. A field guide to the birds of Korea; second revised version. LG Evergreen Foundation.
- MacGregor-Fors I, Schondube JE. 2011. Gray vs. green urbanization: Relative importance of urban features for urban bird communities. *Basic Appl Ecol.* 12(4): 372-381. doi:10.1016/J.BAAE.2011.04.003.
- Manes S, Costello MJ, Beckett H, Debnath A, Devenish-Nelson E, Grey KA, Jenkins R, Khan TM, Kiessling W, Krause C, et al. 2021. Endemism increases species' climate change risk in areas of global biodiversity importance. *Biol Conserv.* 257(November 2020): 109070. doi:10.1016/j.biocon.2021.109070.
- Mantyka-pringle CS, Martin TG, Rhodes JR. 2012. Interactions between climate and habitat loss effects on biodiversity: A systematic review and meta-analysis. *Glob Chang Biol.* 18(4):1239-1252. doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02593.x.
- Ministry of Environment. 2019. Land cover Map. Environ Spat Inf Serv. egis.me.go.kr.
- Ministry of Land Infrastructure and Transport. 2015. Digital Elevation Model. Korea Natl Spat Data

- Infrastruct Portal. data.nsd.go.kr.
- National Institute of Ecology. 2021. National natural environment survey data. <https://www.nie-ecobank.kr/rsrch/doi/selectDoiRsrchDtaListVw.do>.
- Phillips, S. J. Anderson, R. P. and Schapire, R. E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231-259.
- Pimm SL. 2008. Biodiversity: Climate Change or Habitat Loss — Which Will Kill More Species? *Curr Biol*. 18(3):R117-R119. doi:10.1016/j.cub.2007.11.055.
- Reid H, Swiderska K. 2008. Biodiversity, climate change and poverty: exploring the links. *Int Inst Environ Dev* 6. <http://pubs.iied.org/17034IIED.html>.
- Rosenzweig C, Karoly D, Vicarelli M, Neofotis P, Wu Q, Casassa G, Menzel A, Root TL, Estrella N, Seguin B, et al. 2008. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature*. 453(7193):353-357. doi:10.1038/nature06937.
- Şekercioglu ÇH, Primack RB, Wormworth J. 2012. The effects of climate change on tropical birds. *Biol Conserv*. 148(1):1-18. doi:10.1016/j.biocon.2011.10.019. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0006320711003880>.
- Senapathi D, Nicoll MAC, Teplitsky C, Jones CG, Norris K. 2011. Climate change and the risks associated with delayed breeding in a tropical wild bird population. *Proc R Soc B Biol Sci*. 278(1722):3184-3190. doi:10.1098/rspb.2011.0212. <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspb.2011.0212>.
- Seoul Metropolitan Government. 2021. Map of urban ecology in Seoul. https://urban.seoul.go.kr/view/html/P_MNU5090100000#view/318323763.
- Shin Y, Jung H. 2015. Assessing uncertainty in future climate change in Northeast Asia using multiple CMIP5 GCMs with four RCP scenarios (in Korean with English abstract). *J Environ Impact Assess*. 24(3):205-216.
- Song I. 2014. Habitat Improvement Plan in Cities for an Influx of Birds (in Korean with English summary). The Seoul Institute.
- Song IJ, Yoon CR. 2019. Development and application of biodiversity indicator in parks and green spaces in Seoul. The Seoul Institute.
- Song WK, Kim, E. 2012. A Comparison of Machine Learning Species Distribution Methods for Habitat Analysis of the Korea Water Deer (*Hydropotes inermis argyropus*) (in Korean with English abstract). *Korea Journal of Remote Sensing* 28(1) : 171-180.
- Song W. 2015. Analysis of Bird Species Diversity Response to Structural Conditions of Urban Park -Focused on 26 Urban Parks in Cheonan City- (in Korean with English abstract). *J Korean Env Res Tech*. 18(3):65-77.
- Song W. 2018. Analysis of Urban Green Areas using NDVI and Development of a Model to Analyze Bird Diversity in Urban Parks (in Korean with English abstract). *J Korean Env Res Tech*. 21(1):73-82.
- Thuiller W. 2004. Patterns and uncertainties of species' range shifts under climate change. *Global Change Biology* 10(12): 2020-2027.
- van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt GC, Kram T, Krey V, Lamarque JF, et al. 2011. The representative concentration pathways: An overview. *Clim Change*. 109(1):5-31. doi:10.1007/s10584-011-0148-z.
- Wegge P, Rolstad J. 2017. Climate change and bird reproduction: Warmer springs benefit breeding success in boreal forest grouse. *Proc R Soc B Biol Sci*. 284(1866). doi:10.1098/rspb.2017.1528.
- Wolff PJ, Degregorio BA, Rodriguez-Cruz V, Mulero-Oliveras E, Sperry JH. 2018. Bird community assemblage and distribution in a tropical, urban ecosystem of Puerto Rico. *Trop Conserv Sci*. 11. doi:10.1177/1940082918754777.
- Yang X, Tan X, Chen C, Wang Y. 2020. The influence of urban park characteristics on bird diversity in Nanjing, China. *Avian Res*. 11(1):1-9. doi:10.1186/s40657-020-00234-5.