

Research Paper

## 메타개체군 이론을 활용한 도시개발에 따른 생물 종 영향 평가 활용 가능성 분석

김은섭\*, \*\*, \*\*\* · 모용원\*\*\*\* · 박태윤\*\*\*\*\* · 전윤호\*\*, \*\*\*\*\*, \* · 최지영\*\*\*\*\* · 이동근\*, \*\*\*\*\*

\*서울대학교 협동과정 조경학, \*\*서울대학교 융합전공 스마트시티 글로벌 융합,  
\*\*\*서울대학교 지능형에코사이언스 특성화대학, \*\*\*\*영남대학교 생명융공과대학 조경학과,  
\*\*\*\*\*연세대학교 교육대학원, \*\*\*\*서울대학교 생태조경·지역시스템공학부,  
\*\*\*\*\*서울대학교 농업생명과학연구원

### Analyzing the Impact of Species on Urban Development Using Meta Population Model

Eun Sub Kim\*, \*\*, \*\*\* · Young Won Mo\*\*\*\* · Tae Yoon Park\*\*\*\*\* ·  
Yoonho Jeon\*\*, \*\*\*\*\*, \* · Jiyoung Choi\*\*\*\*\* · Dong Kun Lee\*, \*\*\*\*\*

\*Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University

\*\*Integrated Major in Smart City Global Convergence Program, Seoul National University

\*\*\*Specialized Graduate School of Intelligent Eco-Science, 4 Dept. of Landscape Architecture, Seoul National University

\*\*\*\*Department of Landscape Architecture, Yeungnam University

\*\*\*\*\*Graduate School of Education, Yonsei University

\*\*\*\*\*Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University

\*\*\*\*\*Research Institute of Agriculture and Sciences, Seoul National University

**요약:** 공간 스케일에 따른 생물 종 별 영향의 차이가 발생함에 따라, 도시 개발 사업에 따른 영향을 정량적으로 평가하기 위해서는 경관규모에서의 분석이 필요하다. 선행연구에서는 도시개발에 따라 변화하는 환경에 대한 생물종 영향을 분석하기 위해 메타개체군 이론을 기반한 Incidence Function Model (IFM)을 활용하여 분석하고 있다. 하지만 해당 모델은 최소 점유영역이 10개 이상이 되어야 하므로, 모니터링이 어려운 생물종에 대한 활용은 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위해 삶(*Prionailurus bengalensis*)을 중심으로 종 분포 모델을 통해 구축된 데이터를 바탕으로 IFM 모델을 분석하고자 하였다. 또한, 본 모델을 통해 환경영향평가서 중 자연생태환경분야에서의 활용 가능성을 검토하였다. 연구결과, 도시개발에 따른 삶의 최소 점유율은 56.5%, 생존가능성은 28.7%로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 서식지 개수 감소에 따른 개체군 수용력에 대한 분석을 통해 230개소와 70개소에서 개체군의 수용 능력이

First Author: Eun Sub Kim, Tel: +82 2-880-4885, E-mail: mr.solver92@snu.ac.kr, ORCID: 0000-0003-2206-5203

Corresponding Author: Dong Kun Lee, Tel: +82-2-880-4875, E-mail: dklee7@snu.ac.kr, ORCID: 0000-0001-2206-5203

Co-Authors: Yong Won Mo, Tel: +82-53-810-2979, E-mail: csmo12@yu.ac.kr, ORCID: 0000-0001-9448-0591

Tae Yoon Park, Tel: +82-2-2123-6268, Email: ecoprk@yonsei.ac.kr, ORCID: 0009-0009-6923-5469

Yoonho Jeon, Tel: +82-2-880-4875, E-mail: uknow15@snu.ac.kr, ORCID: 0000-0003-4094-7082

Jiyoung Choi, Tel: +82-2-880-4875, E-mail: jychoi1@snu.ac.kr, ORCID: 0000-0002-2702-1245

Received: 9 December, 2022. Revised: 23 March, 2023. Accepted: 6 April, 2023.

급격하게 감소함을 확인하였다. 본 연구는 환경계획 관점에서 서식지 면적 감소에 따른 삶의 환경영향을 평가하였으며, 삶을 보호하기 위한 최소한의 서식지 개수 및 면적 설정에 대한 의사결정을 지원할 수 있다. 이는 개발 프로젝트 전, 후 영향평가 및 저감방안 계획에 기초자료로 활용됨으로써, 저감방안의 실효성을 높여줄 수 있을 것으로 기대된다.

**주요어:** 생물 종 생존가능성, 의사결정지원, 환경영향평가, 삶, 경관 스케일

**Abstract:** As differences in the impact of each species on a spatial scale occur, analysis at the landscape scale is necessary to evaluate the impact of a development project. In previous studies, the Incidence Function Model (IFM) based on meta population theory was used to analyze the impact of species on the environment that changes according to urban development. However, since the model was required at least 10 occupied areas, it is difficult to use it for species that are difficult to monitor such as endangered species. Therefore, we proposed the Incidence Function Model (IFM) using species distribution model to fill the species data. In addition, we reviewed whether the developed model can be used in environmental impact assessment. As a result of the analysis, the minimum occupancy of *Prionailurus bengalensis* on urban development decreased to 56.5% and the possibility of survival to 28.7%. We confirmed that It rapidly decreased from the reference points of 230 and 70habitats through analysis of the meta-population capacity according to the decrease in the number of habitats. These results can be assessing the environment impact of each species on habitat loss. And it can support decision-making on the minimum number and area of habitat for species protection. This study is expected to be used as basic data for environment impact assessment on before and after development projects and mitigation measures plans, thereby increasing the effectiveness of reduction plans.

**Keywords :** Environment impact assessment, Species persistence, Decision making tool, *Prionailurus bengalensis*, Landscape scale

## I. 서론

인구증가와 급격한 산업화로 인해 도시지역 내 서식지와 생물 종에 대한 부정적인 영향은 증가하고 있다. 자연환경에 미치는 영향을 최소화하면서 증가하는 개발 요구를 충족할 수 있도록 경관규모에서의 전략적인 도시계획이 대두되고 있다(Mörtberg et al. 2007). 이에 따라 국내 환경영향평가 자연생태환경 분야의 동·식물상에서는 개발사업에 따라 생물종에 미치는 잠재적인 영향을 평가하고, 환경영향이 큰 지역에 대해서는 저감방안 조치를 계획하고 있다. 그럼에도 불구하고 생물 종의 개체 수는 감소하고 있으며, 국외 연구 및 문헌에서는 생물 종 중심으로 우선순위를 부여하여 보호하는 것이 아닌 서식지에 대한 영향평가의 필요함을 주장하고 있다 (Drayson 2015).

이에 따라 선행연구에서는 도시개발에 따른 생물 종의 영향을 정량적으로 평가하기 위해 종 분포 모델, 역동적 모델, 메타개체군 모델 등 다양한 연구가 진행되고 있다(Opdam et al. 2003; Hobbs 1997; Mörtberg et al. 2007; McHugh & Thompson 2011). 종 분포모델은 환경 변수를 사용하여 종의 분포를 예측하는 정적 모델로 환경 조건이 시간이 지남에 따라 일정하고 종이 환경과 균형을 이루고 있다고 가정하여 분석한다. 하지만 메타개체군 이론은 다양한 종이 함께 존재하는 개체군에서 종 간의 상호작용을 분석할 수 있으며, 메타개체군 이론을 바탕으로 개발된 Incidence Function Model (IFM) 모델은 종 분포의 시간적 역학을 설명하여 생물종이 환경변화에 어떻게 반응하는지 이해할 수 있다. 또한, 도시개발로 인해 파편화된 서식지내 생물종들의 군집 및 멸종

를 기반으로 종들의 분포 패턴 변화 및 생존가능성을 모의하여 환경영향평가의 활용가능성을 제시한 모델이다(Graham et al, 2018).

IFM은 작고, 파편화 된 패치로 구성되어 있는 서식지에서 생물종들의 영향을 분석하기에 적절한 모델이다. 본 모델은 패치의 크기와 위치를 기반으로 관리 조치 및 도시개발과 같은 환경변화에 따라 점유율 변화를 이해할 수 있는 유용한 틀로 활용되고 있다(Hanski 1994; Graham 2018). 하지만 IFM 모델은 연구 영역 내 점유된 패치가 최소 10개 이상이 필요하므로, 모니터링이 어려운 생물종 혹은 공간에서는 활용의 한계가 있다. 이러한 한계점을 해결하기 위해 본 연구는 종분포 모델 결과를 바탕으로 종 출현 여부를 IFM 입력자료로 활용하여 분석하고자 한다.

본 연구는 데이터 확보가 어려운 한계점을 해결하기 위해, 7가지 머신러닝 모델을 이용한 앙상블 모델 결과를 바탕으로 격자 내 종 출현 유무를 계산하였다. 구축된 데이터를 활용하여 메타개체군 이론을 활용한 IFM모델을 통해 멸종위기종인 파른 새(*Felis bengalensis*)을 대상으로 개발에 따라 변화되는 분포 패턴을 파악하고자 하였으며, 이를 통해 개발에 따른 전과 후에 대한 서식지 내 생존 가능성을 분석하였다. 본 연구를 통해 도시개발에 따라 변화하는 생물종의 영향을 시계열적인 관점에서 IFM 모델을 활용한 생물 종 분포 패턴 변화 및 점유율 변화를 평가하였다. 이는 경관규모에서 도시개발에 따른 생물종 영향을 정량적으로 평가할 수 있으며, 점유율 변화 분석을 바탕으로 저감방안 계획수립에 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

## II. 연구방법

본 연구는 환경변수와, 종 출현 데이터를 활용하여 7가지의 머신러닝 기법을 바탕으로 종 분포모델을 구축하였다. 구축된 모델의 AUC값을 활용하여 가중치를 부여하여 앙상블 모델을 통해 서식지 적합성 지도를 구축하고, 임계값 0.75 이상인 지점을 종 출현 지점으로 정의하였다. 그 후 구축된 2013, 2020년 종 출현데이터를 활용하여 IFM 시뮬레이션을 통해 도시

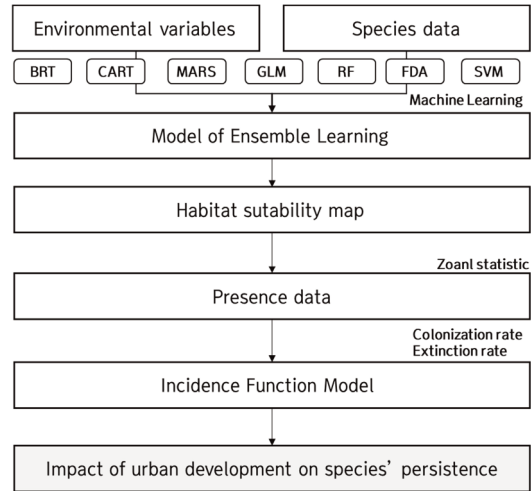


Figure 1. Research flow.

개발에 따른 새의 생존 지속성에 대한 평가를 수행하였다.

### 1. 연구대상지 및 데이터

연구 대상지는 2013년 원주시 내 농업 및 상업 지역에서 2020년 도시개발 지역으로 토지피복이 변한 지역을 대상으로 실시하였다(Figure 2). 본 연구는 명륜동, 개운동, 원인동 등 주거지역이 급격하게 증가된 지역을 중심으로 14km×14km 규모로 분석 대상지를 설정하였다. 해당 대상지는 구도심 중심부로 도심의 녹지축으로서, 원주시 외곽 산림축인 치악산과 백운산의 중요한 생태축을 연결하고 있는 지역이다(Lee et al, 2012). 또한, 멸종위기 야생생물이 서식하고 있으며, 비오톱 지도 1, 2등급 지역이 대부분 포함되어 있는 생태적으로 중요한 지역이다(Noh et al, 2013).

연구 분석 스케일은 경관 규모에서의 도시개발에 따른 생물종 영향을 분석하기 위해 대상지 범위가 14km 미만인 것을 고려하여 종의 행동권 범위가 작은 새(2.099±1.08km)으로 선정하였다(Park et al, 2012). 새는 법정보호종(환경부 멸종위기 야생생물 II 급)으로 지정되었으며, 상대적으로 인간에 의한 서식지 교란으로 영향을 크게 받는 종으로 보호가 필요한 종으로 분류되어 있다.

새의 종 출현 지점은 국립생태원에 멸종위기종을

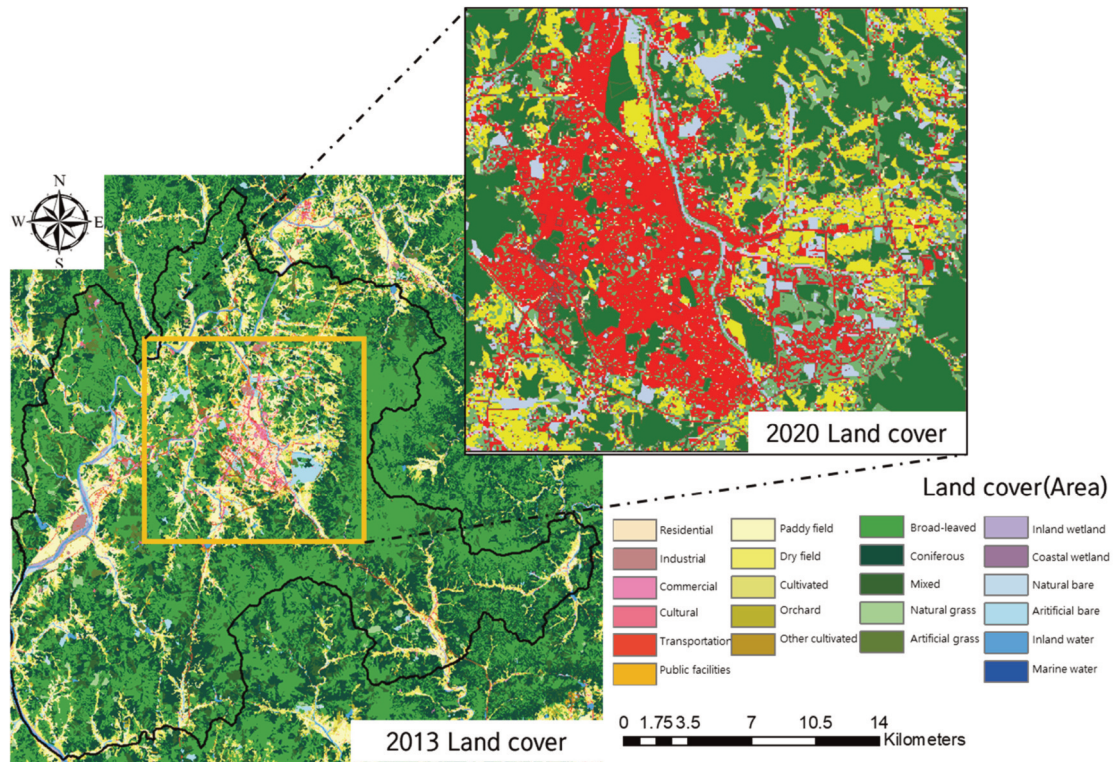


Figure 2. Study site centered on Myeongnyun-dong, Gaeun-dong, and Wonwon-dong in Wonju-si.

포함한 종 출현 데이터를 요청하였으며, 전국자연환경 조사서 3차, 4차 데이터를 활용하여 분석하였다. 출현 데이터가 미흡한 종의 경우 관측치 확보가 어렵다는 한계점을 보완하기 위해 종 분포 모델의 결과를 바탕으로 임계값 이상인 지점에 대해 종의 출현 여부를 판단하였다. 분석 격자 해상도는 조사의 독립성 확보를 고려하여 500m×500m로 선정하였다(Graham et al. 2015).

## 2. 서식지 적합성 분석

본 연구에서는 연구대상종의 출현자료를 바탕으로 머신러닝 기법을 활용한 SDM (Species Distribution Model)를 활용하여 서식지 적합성을 분석하였다. 머신러닝에 사용된 모형은 Generalized linear model (GLM), Boosted Regression Trees (BRT), Random Forest (RF), Classification And Regression Tree (CART), Flexible Discriminant Analysis (FDA), Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS),

Support Vector Machine (SVM)으로 R v.4.1.3의 sdm package를 이용하여 분석하였다. 또한, 불확실성을 줄이기 위해 각 모델들의 ROC커브를 활용한 가중치를 부여하여 앙상블 모델을 통해 서식지 적합성을 분석하였다. 도출된 서식지 적합성의 AUC 값을 활용한 임계값을 도출하였으며, 이를 바탕으로 종 출현 여부를 판단하였다. 종분포 모델 결과 도출을 위해 사용된 변수는 토지피복, 지형, 식생, 거리데이터를 활용하였다(Kwon 2014; Kim et al. 2012; Jeon et al. 2014; Yoo et al. 2021). 각 입력자료는 국가 공공 데이터 사이트에서 취득하였으며(Table 1), 거리 및 지형관련 데이터는 공공 데이터 사이트에서 취득된 데이터를 활용하여 Arc.GIS 10.5를 이용하여 분석하여 변수를 도출하였다.

앙상블 모델에서 도출된 지도의 해상도 30m로 본 연구에서 분석하고자 하는 연구 분석 해상도(500m)와 차이가 존재한다. 이에 격자내 출현 여부는 Arc gis프로그램에서 제공하는 zonal statistic tool을 활



Table1. Input data for species distribution model

Category	ID	Detail	Data source
Land	1	Land cover	https://egis.me.go.kr/
Vegetation	2	Forest type	https://map.forest.go.kr/
	3	age class	
	4	Diameter	
	5	Density	
	6	DEM	
Terrain	7	Aspect	http://map.ngii.go.kr/
	8	Hillshade	
	9	Slope	
	10	TWI	
Distance	11	Distance to water	http://www.wamis.go.kr/
	12	Distance to road	http://data.nsd.go.kr/
	13	Distance to agriculture	https://egis.me.go.kr/
	14	Distance to grass	
	15	Distance to Forest	
	16	Distance to urban	

용하여 평균값을 활용하여 임계값보다 높게 도출된 격자는 출현, 낮게 도출된 지역에 대해서는 비출현으로 정의하였다.

### 3. Incidence Function Model 분석

IFM (Incidence Function Model)은 확률적 패치에 의해 개발된 점유 모델로 장기 예측을 분석할 수 있다(Hanski, 1994). 서식지 패치에서 개체군 지속 가능성 분석을 위해 군집률, 멸종률을 추정하여 값을 도출한다. 이때 패치*i*의 점유율은  $J_i$ 를 의미하여  $C_i$ 는 군집률,  $E_i$ 는 멸종률을 의미한다(수식 1).

$$J_i = \frac{C_i}{C_i + E_i - C_i E_i} \quad (1)$$

개체군의 멸종률은 면적에 정비례한다는 생태적 이론을 바탕으로 개발된 식으로, 서식이 적합한 패치의 면적이 감소할 수록 멸종률은 증가하게 된다. 따라서 멸종률( $E_i$ )는 패치의 면적( $A_i$ )와 반비례 하여 다음과 같은 식을 통해 도출할 수 있다(수식 2).

$$E_i = \min\left[\frac{u}{A_i}, 1\right] \quad (2)$$

여기서  $u$ 와  $x$ 는 생물종 매개변수이며, 모든 패치는

$\frac{1}{u \cdot x}$  보다 작을 경우 멸종률 1을 차지하게 된다. 이때 매개변수  $x$ 는 종의 생존 정도를 나타내며, 패치 크기에 따라 달라진다. 따라서  $x$ 가 클수록 생존능력이 증가된다.

군집률 서식지 연결성  $S_i$ 의 함수로 분석할 수 있다. 이때 연결성  $S_i$ 는 유클리드 거리를 활용하였다. 또한 이동하려 하는 패치  $j$ 의 면적이 클수록 생물종들의 이동할 확률이 증가하게 된다.  $a$ 는 생물종의 분산 거리이며, 본 연구에서는 삶의 분산거리 문헌 자료를 바탕으로 3.7로 정의하였다. 따라서 서식지 간의 거리가 가깝고, 이주하려는 패치의 면적이 클수록 생물종들의 군집률 비율이 증가하게 되며, 이는 다음과 같이 계산하였다(수식 3).

$$C_i = \frac{\sum_{j \neq i} \exp(-aD^{ij}) p_j A_i^2}{\sum_{j \neq i} \exp(-aD^{ij}) p_j A_i^2 + y^2} \quad (3)$$

매개변수  $u$ ,  $x$  및  $y$ 는 패치의 면적 및 군집 데이터를 통해 추정된다. 본 연구에는 삶에 대해 8년간의 종을 fitting하여 IFM의 매개변수를 추정하였다. 추정 식은 로지스틱 회귀 모델로 패치 288개에 대한 분석으로 다음과 같은 수식을 통해 도출하였다(수식 4).

$$\text{logit}(J_i) = \beta_0 + 2 \log(S) + \beta_1 \log(A) \quad (4)$$

여기서  $\beta_0 = -\log(uy)$  및  $\beta_1 = x$ 이다. 매개변수  $u$ 는 점유된 모든 패치 중 가장 작은 패치에 대해  $E_i = 1$ 인 다음 방정식을 통해 도출하였다. 그 후 이 값을  $\beta_0$ 으로 대체하여  $y$ 를 도출하였다. 본 연구에서의 모든 시뮬레이션 분석은 R v4.1.3 (R Core Team 2014)에서 수행하였다.

#### 4. 도시개발에 따른 생물종 영향 분석

도시개발에 따른 100년 기간 동안 삶의 점유율 분포 변화 결과를 바탕으로 최소 점유율, 평형 점유율, 생존 확률을 계산하였다. 최소 점유율은 100년 기간 동안 최소 점유율을 기록한 연도에서의 서식지 면적을 의미하며, 평형 점유율은 첫해에 기록한 삶의 점유율과 동일한 점유율을 기록한 연도에서의 서식지 면적, 생존 확률은 도시개발 후 첫해의 삶의 점유율과 100년이 되는 시점에 기록된 삶의 점유율간 차이를 통해 데이터를 구축한다. 3가지 평가 항목 외 메타개체군 멸종률 위험성(Johansson et al, 2013) 또는 생존 확률(Biedermann 2000)이 있다. 하지만 본 연구에서 선정한 3가지 항목은 도시개발로 인한 지형 변화로 생태적 안정성에 대한 다차원적 관점을 분석할 수 있으며(Donohue et al, 2013), 다양한 종에 대한 영향을 포착할 수 있는 장점이 있으므로 3가지 평가항목을 선정하여 분석하였다.

도시개발로 인해 감소되는 서식처 감소에 따라 서식지내 삶의 수용력(Metapopulation capacity)을 계산하였다(수식 5). 패치  $i$ 와  $j$ 가 다를 경우, 동일할 경우, 군집률을 구성하는 연결성과 유사한 산정식을 활용하여  $\exp(-ad_{ij}) A_j$ 을 통해 도출되며, 패치  $i$ 와  $j$ 가 같을 경우, 수용력은 0으로 정의한다. 이는 도시개발에 따른 서식지내 삶의 수용 능력을 바탕으로 서식지 개수 및 면적이 급격하게 감소하는 구간을 평가할 수 있다.

$$m_{ij} = \begin{cases} A_i \exp(-ad_{ij}) A_j & \text{if } i \neq j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases} \quad (5)$$

### III. 연구 결과 및 고찰

#### 1. 서식지 적합성

본 연구는 전국자연환경 조사 3, 4차 데이터를 활용하여 7가지의 머신러닝 기법으로 종 분포 모델 결과를 도출하였다(Figure 3). GLM, RF모델이 AUC 0.85로 가장 높았고, CART모델은 0.79로 가장 낮았으나, 모델들의 AUC 값은 평균적으로 0.84로 유의미하게 도출되었다. 해당 모델들의 AUC값을 활용하여 앙상블 모델을 만들었으며, 앙상블 모델에 활용되는 가중치는 AUC값을 이용하였다.

각 모델들의 AUC값을 활용한 앙상블 모델의 출현 여부에 대한 임계값은 0.75로 도출되었다. 500m격자 단위로 출현여부에 대해 분석하기 위해 앙상블 모델에서 도출된 종 분포 모델을 활용하였다. 따라서 격자내 종 출현 확률이 0.75이상인 지점에 대해서는 출현, 0.75 이하인 격자에 대해서는 비출현으로 정의하여 IFM 모델의 변수로 활용되었다.

#### 2. 삶 점유율 패턴 변화 분석

본 연구는 288개의 격자에서 로지스틱 회귀분석을 통해  $x$ ,  $u$ ,  $y$  매개변수에 대해 도출하였다. 삶에 대한 회귀분석 모델은 (pseudo- $R^2 > 0.80$ ) 값으로 유의미하게 도출되었으며, 각 매개변수에 대한 값은  $x:0.92$ ,  $y:206.1$ ,  $u:0.55$  로 도출되었다.

IFM분석 결과 2013년에 비해 2020년의 종 점유율이 감소하였다(Figure 4). 특히 주거지역과 상업지구가 활발하게 개발된 명륜동 지역(Figure 4A)은 2013년 점유율이 0.5~0.7이었으나, 개발후 2020년은 0.1~0.3으로 감소하였다(Figure 4A). 또한 두물수변공원 지역(Figure 4B)의 점유율은 0.68~0.72로 분포하였으나, 개발 후 0.1~0.36으로 감소하였다. 두물수변공원 중심으로 점유율이 급격하게 감소하게 된 원인은 개운동, 명륜동, 원인동등 다중지역에서 진행된 도시개발로 인한 가중영향으로 판단된다.

도시개발로 인한 삶의 점유율 분포 변화를 분석 결과는 산림지역이 많이 분포되어 있는 치악산 그리고 봉산동에 위치한 파편화된 산림지역으로 이주한 것으로 보인다(Figure 4C, D). 치악산의 주연부 지역에서

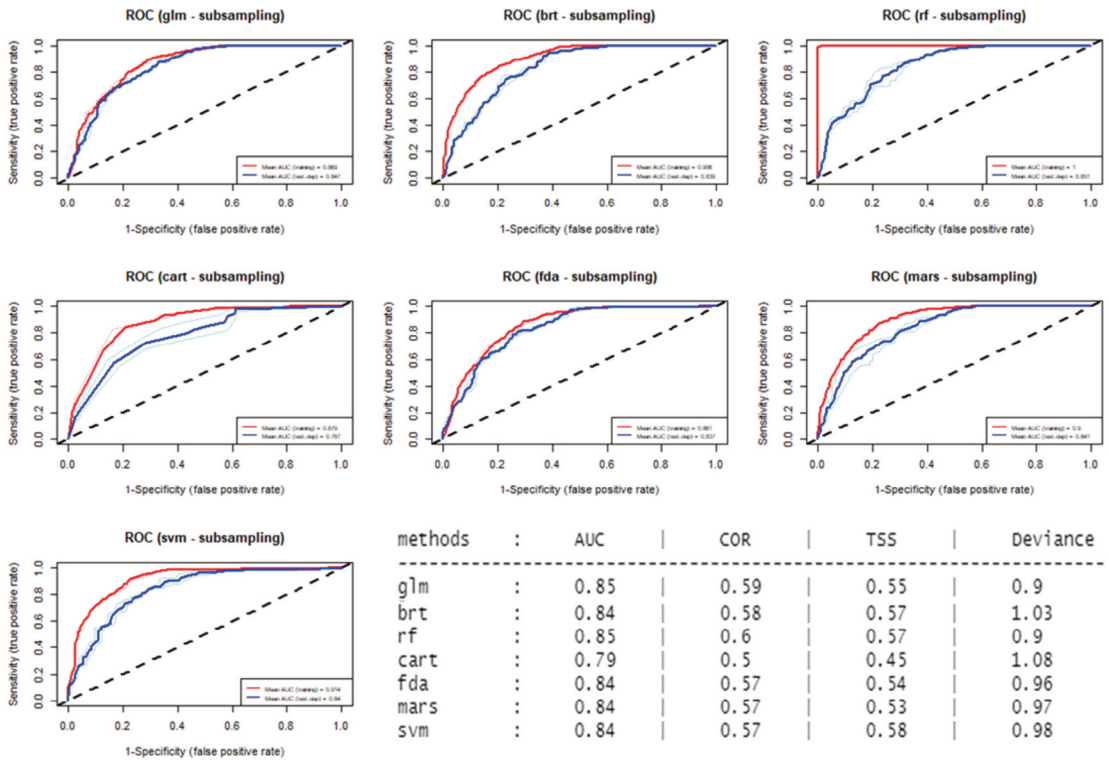


Figure 3. Area under the ROC curve (AUC) of species distribution model results using seven types of machine learning.

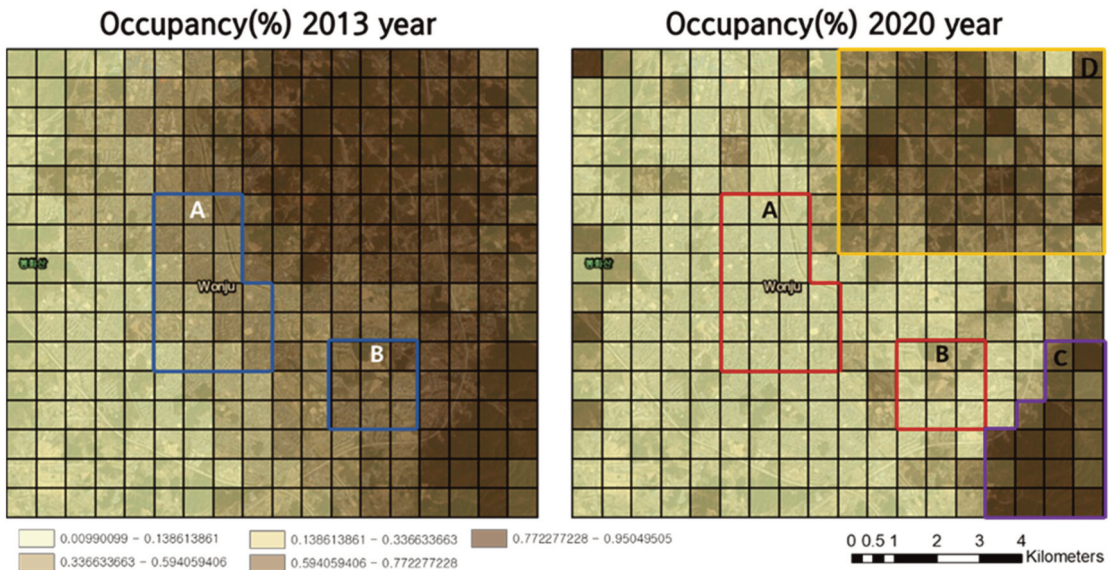


Figure 4. Change in species occupancy patterns on urban development using the Incidence Function Model (A) Myeongnyun-dong where rapid urban development has progressed (B) Dumul Waterside Park (C) Chiaksan Mountain (D) the fragmented forest area located in Bongsan-dong.

Table 2. Impact of development on species' persistence

Species	Persistence measures	Change		
		Current	Post-development	Ratio (%)
<i>Prionailurus bengalensis</i>	Minimum occupancy(ha)	1282.23	-559.27	(-56.5%)
	Occupancy at equilibrium(ha)	1397.88	-666.45	(-52.3%)
	Survival probability (over 100 years)	150	-107	(-28.7%)

산림 내부까지 점유율이 균등하게 분포되어 있음에 따라, 주연부의 장기적인 모니터링 및 관리는 삶의 점유율 감소 영향을 줄여 줄 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 도시개발 지역내 파편화 된 소규모의 서식지에도 삶이 분포되어 있는 것으로 나타났다.

### 3. 도시개발에 따른 삶 영향 분석

본 연구에서는 도시개발에 따른 서식지 내 삶의 생존 지속가능성을 분석하기 위해 3가지를 분석하였다(Table 2). 최소 점유율에서의 서식지 면적은 56.5% 감소, 첫 해와 동일한 점유율인 경우의 서식지 면적은 52.3%, 생존가능성은 28.7% 감소함을 확인할 수 있었다(Table 2).

이는 도시개발에 따라 삶이 생존할 수 있는 서식지가 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 감소한 서식지로 인해 삶의 생존 가능성도 감소하는 것을 확인

할 수 있었다. 결과적으로 서식지 감소는 삶의 생존가능성에 부정적인 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

도시개발에 따른 서식지 감소에 따른 개체군 수용력에 대한 분석 결과, 패치수가 감소함에 따라 개체군을 수용할 수 있는 능력이 감소하는 것을 확인할 수 있었다(Figure 5). 특히 패치의 수가 230, 70개소에서 감소할 때, 삶이 서식지 수용력(Metapopulation Capacity)이 다른 패치 개수보다 감소율이 크게 나타났다(Figure 5). 이는 도시개발에 따라 감소된 서식지 면적에 따라 삶의 생존가능성 영향을 파악할 수 있었으며, 급격하게 감소하는 구간을 고려하여 개발계획 측면에서 패치의 수를 고려할 수 있다.

### 4. IFM 모델을 통한 환경영향평가 활용

본 연구는 종 분포모델에서 추출된 종 출현 데이터를 바탕으로 IFM 모델 input 데이터로 활용하여 분

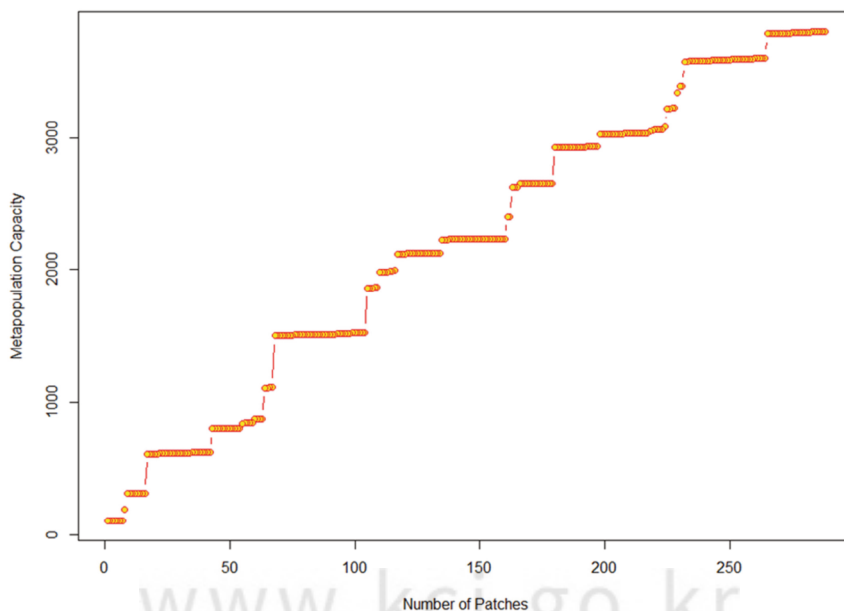


Figure 5. Metapopulation capacity on the decrease in the number of patches.



석하였다. 종분포모델은 시간적 변동성을 고려하지 않지만, 특정 환경 조건에서의 분포를 예측할 때 높은 정확도를 보이는 장점이 있다. 반면 IFM 모델은 시간적 변동성을 고려하지만 데이터가 부족하거나 분석이 복잡할 수 있다(MacKenzie et al. 2002). 따라서 종 분포모델 결과를 반영한 역동적인 점유율 모델은 보다 정확하고 유연한 예측을 제공할 수 있으며, 도시개발 및 저감방안 계획 수립에 따라, 시계열 적인 측면에서 종의 점유율 변화를 평가할 수 있다(Tyre et al. 2003). 즉, 종 분포모델은 도시개발에 따른 단일 시점에 대한 종 출현 여부를 파악할 수 있으나, 도시개발 이후 시계열 적으로 종 점유율이 어떻게 변화하는지 추세를 파악하지 못한다. 이는 도시개발 직후 특정 지점에서 출현율이 높게 나타날 수 있으나, 시간이 흐름에 따라 해당지역의 종이 다른 서식지로 이동할 수 있으므로 이러한 점을 반영하기 위해서는 IFM 모델과 같은 시계열적인 측면을 반영할 수 있는 모델이 필요하다. 본 연구에서는 종 분포모델에서 반영하지 못하는 시계열적인 생물종 영향추세를 IFM 모델을 통해 확인하면서, 효과적인 보전계획 및 저감방안 계획 수립을 위한 정보를 제공할 수 있음을 확인하였다.

해당 연구 방법론은 도시개발에 따라 경관규모에서 삶의 분포 패턴 변화에 대한 분석을 진행하여 환경영향평가의 활용가능성에 대해 검토하였다. 현재 환경영향평가 동물상 부문에서 영향예측을 정량화 되지 않고 개발 지역 주변 환경을 고려하여 단순히 설명되는 부분을 보완 및 개선하기 위해 본 연구의 방법론의 활용가능성을 확인하였다(Geneletti 2006, Karlson et al. 2014; Treweek 1996). 사례분석 결과, 도시개발에 따른 서식지의 면적이 감소하면서 삶의 생존가능성 및 점유율이 급격하게 감소함을 확인할 수 있다. 이는 경관규모에서 생물종의 영향을 정량적으로 평가할 수 있으며, 특히 높은 해상도에서 분석 가능한 방법론으로 환경영향평가에서의 활용도가 높을 것으로 기대된다. 특히 현장조사 결과를 바탕으로 동물상의 영향평가가 미흡하며, 이에 저감방안 계획에 대한 실효성의 부재에 대한 문제점을 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

점유율 분포 변화에 따라 급격하게 감소하는 구역에 대해 저감방안 계획을 진행할 수 있으며, 도시개발에 따른 생물종의 분포변화를 통해 모니터링 범위, 조사방법 등을 고려해볼 수 있다. 또한, 패치면적 감소 수에 따라 개체군 수용능력에 대한 연구 결과를 바탕으로, 기존 서식지의 면적감소율에 따른 영향 평가를 통해 대안설정 및 계획 측면에서의 활용할 수 있다. 해당 방법론의 가장 큰 장점은 기존 환경영향평가에서 진행되는 현장모니터링 데이터로 충분히 결과를 도출할 수 있으며, 개발 전, 후에 대한 영향평가를 정량적으로 진행할 수 있다는 점이다.

#### IV. 결론

본 연구는 메타개체군 이론을 활용한 IFM 모델을 통해 경관규모에서 도시개발에 따른 삶의 분포 패턴 변화에 대해 분석하였다. 분석 결과, 도시개발로 인해 삶의 점유율은 0.5~0.72에서 1~0.36으로 감소하였다. 연도별 삶의 점유율 분포 변화를 통해 최소 점유율을 기록한 연도에서의 서식지 면적은 도시개발 전에 비해 56.5%가 감소하였다. 또한 삶의 생존가능성은 28.7%로 감소하였으며, 서식지 수 감소로 인한 개체군 수용 능력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특히 대상지내 총 302개소 서식지에서 개발로 인한 서식지 수가 230개소, 70개소로 감소할 때, 개체군 수용 능력이 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 도시개발에 따른 농촌지역, 산림지역 등 삶의 서식환경이 감소함에 따라, 멸종위기종 II 급으로 분류된 삶의 생존능력에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 삶의 서식환경 보호를 위해 점유율이 급격하게 감소된 지역 혹은 서식처 개수를 고려한 도시계획 수립에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

해당 연구 방법은 모니터링 및 현장조사가 제한된 구역이거나, 종 출현 공공 데이터가 부족하여 평가에 한계가 있는 법정보호종, 멸종위기종 등에 대해 도시개발에 따른 영향을 평가할 수 있는 유용한 톨로 제안하였다. 이는 도시개발에 따라 향후 생물종의 분포 변화를 예측할 수 있는 방법론으로, 점유율이 감소되는

지역을 핫 스팟지역으로 추출할 수 있다. 해당 지역은 도시개발에 따른 생물종 생존가능성이 감소하는 지역이므로, 생물종 영향을 최소화하기 위한 저감방안 계획 수립에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 다양한 대상지, 생물 중에서 해당 연구 방법론의 추가 연구 테스트는 해당 결과의 실효성을 높일 수 있으며, 생물종 영향 평가로 인한 저감방안 계획 수립에 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

## 사사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 ICT기반 환경영향평가 의사결정 지원 기술개발 사업의 지원을 받아 연구되었습니다(MOE) (2021003360002).

## References

- Biedermann R. 2000. Metapopulation Dynamics of the Froghopper *Neophilaenus albipennis* (F. 1798) (Homoptera, Cercopidae) – What Is the Minimum Viable Metapopulation Size? Vol. 4.
- Donohue I, Owen LP, José MM, Andrew LJ, Luke M, Mafalda V, Kevin H, Miguel L, Nessa EO, Mark CE. 2013. On the Dimensionality of Ecological Stability. *Ecology Letters* 16(4): 421-429.
- Drayson K, Graham W, Stewart T. 2015. Assessing the Quality of the Ecological Component of English Environmental Statements. *Journal of Environmental Management*. 160: 241-253. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.06.022.
- Geneletti D. 2006. Some Common Shortcomings in the Treatment of Impacts of Linear Infrastructures on Natural Habitat. *Environmental Impact Assessment Review*. 26(3): 257-267. doi: 10.1016/j.eiar.2005.10.003.
- Graham LJ, Roy HH, Richard F. 2015. Using Citizen Science Data for Conservation Planning: Methods for Quality Control and Downscaling for Use in Stochastic Patch Occupancy Modelling. *Biological Conservation* 192: 65-73. doi: 10.1016/j.biocon.2015.09.002.
- Graham LJ, Roy HH, Richard F. 2018. The Incidence Function Model as a Tool for Landscape-Scale Ecological Impact Assessments. *Landscape and Urban Planning* 170: 187-194. doi: 10.1016/j.landurbplan.2017.10.008.
- Hanski I. 1994. *A Practical Model of Metapopulation Dynamics*. Vol. 63.
- Hobbs R. 1997. *Future Landscapes and the Future of Landscape Ecology*. Vol. 37.
- Jeon SW, Kim JE, Jung HC, Lee WK, Kim JS. 2014. Species Distribution Modeling of Endangered Mammals for Ecosystem Services Valuation – Focused on National Ecosystem Survey Data –. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 17(1): 111-122. doi: 10.13087/kosert.2014.17.1.111. [Korean Literature]
- Johansson V, Thomas R, Tord S. 2013. Epiphyte Metapopulation Persistence after Drastic Habitat Decline and Low Tree Regeneration: Time-Lags and Effects of Conservation Actions. *Journal of Applied Ecology* 50(2): 414-422. doi: 10.1111/1365-2664.12049.
- Karlson M, Ulla M, Berit B. 2014. Road Ecology in Environmental Impact Assessment. *Environmental Impact Assessment Review* 48: 10-19. doi: 10.1016/j.eiar.2014.04.002.
- Kim JY, Seo CW, Kwon HS, Ryu JE, Kim MJ. 2012. A Study on the Species Distribution Modeling Using National Ecosystem Survey Data. *J Environ Impact Assess*. 21(4): 593-607 [Korean Literature]

- Kwon HS. 2014. Applying Ensemble Model for Identifying Uncertainty in the Species Distribution Models. *Journal of Korean Society for Geospatial Information System* 22(4): 47-52. doi: 10.7319/kogsis.2014.22.4.047. [Korean Literature]
- Lee JC, Han BH, Choi JW, Noh TH. 2012. A study on the plan of Namsan (Mt.) Park for Restoration Eco-cultural Corridors of the Old Town in Wonju. *Pro. Kor. Soc. Env. Eco. Con.* 22(2): 113-117. [Korean Literature]
- MacKenzie, DI, Nichols JD, Lachman GB, Droege S, Royle AA, Langtimm CA. 2002. Estimating site occupancy rates when detection probabilities are less than one. *Ecology* 83(8): 2248-2255. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[2248:ESO RWD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[2248:ESO RWD]2.0.CO;2)
- McHugh N, Stewart T. 2011. A Rapid Ecological Network Assessment Tool and Its Use in Locating Habitat Extension Areas in a Changing Landscape. *Journal for Nature Conservation* 19(4): 236-244. doi: 10.1016/j.jnc.2011.02.002.
- Mörtberg UM, Balfors B, Knol WC. 2007. Landscape Ecological Assessment: A Tool for Integrating Biodiversity Issues in Strategic Environmental Assessment and Planning. *Journal of Environmental Management.* 82(4): 457-470. doi: 10.1016/j.jenvman.2006.01.005.
- Noh TH, Pi JH, Choi JW, Lee KJ. 2013. Properties of Wildbirds Habitat According to Biotope Types at Seom River and Wonju Stream. *Korean J. Environ. Ecol.* 27(6): 676-689. doi:10.13047/KJEE.2013.27.6.676. [Korean Literature]
- Opdam P, Jana V, Rogier P. 2003. Landscape Cohesion: An Index for the Conservation Potential of Landscapes for Biodiversity.
- Park JJ, Woo DG, Oh DH, Park CH. 2012. Site Selection of Wildlife Passage for Leopard Cat in Urban Area using Space Syntax. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 40(1): 92-99. [Korean Literature]
- Yoo DY, Lim TY, Kim WM, Song WK. 2021. A Comparative Study on HSI and MaxEnt Habitat Prediction Models: About prionailurus bengalensis. *J. Korean Env. Res. Tech.* 24(5): 1-14. doi: 10.13087/kosert.2021.24.5.1. [Korean Literature]
- Treweek J. 1996. *Ecology and Environmental Impact Assessment.* Vol. 33.
- Tyre AJ, Tenhumberg B, Field SA, Niejalke D, Parris K, Possingham HP. 2003. Improving precision and reducing bias in biological surveys: Estimating false-negative error rates. In *Ecological Applications.* Ecological Society of America 13(6): 1790-1801. <https://doi.org/10.1890/02-5078>