

제주도 노루 로드킬 방지를 위한 저감시설 대상지 선정방안 연구*

김민지¹⁾ · 장래익²⁾ · 유영재²⁾ · 이준원³⁾ · 송의근⁴⁾ · 오홍식⁵⁾ · 성현찬²⁾ · 김도경⁶⁾ · 전성우⁷⁾

¹⁾ 고려대학교 환경생태공학과 학생 · ²⁾ 고려대학교 오정리질리언스센터 교수 ·
³⁾ 제주연구원 전문연구위원 · ⁴⁾ 국립생태원 전임연구원 · ⁵⁾ 제주대학교 생물교육전공 교수 ·
⁶⁾ (주)이쓰리 · ⁷⁾ 고려대학교 환경생태공학부 교수

Selection Method for Installation of Reduction Facilities to Prevention of Roe Deer (*Capreolus pygargus*) Road-kill in Jeju Island*

Kim, Min-Ji¹⁾ · Jang, Rae-ik²⁾ · Yoo, Young-jae²⁾ · Lee, Jun-Won³⁾ · Song, Eui-Geun⁴⁾
Oh, Hong-Shik⁵⁾ · Sung, Hyun-Chan²⁾ · Kim, Do-kyung⁶⁾ and Jeon, Seong-Woo⁷⁾

¹⁾ Dept. of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Student,

²⁾ Ojeong Resilience Institute, Korea University, Professor,

³⁾ Jeju Research Institute, Research Fellow,

⁴⁾ National Institute of Ecology, Junior Researcher,

⁵⁾ Faculty of Science Education, Jeju National University, Professor,

⁶⁾ ETHREE Co. Ltd, Manager

⁷⁾ Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Professor.

ABSTRACT

The fragmentation of habitats resulting from human activities leads to the isolation of wildlife and it also causes wildlife-vehicle collisions (i.e. Road-kill). In that sense, it is important to predict potential habitats of specific wildlife that causes wildlife-vehicle collisions by considering geographic, environmental and transportation variables. Road-kill, especially by large mammals, threatens human safety as well as financial losses. Therefore, we conducted this study on roe deer (*Capreolus pygargus tianschanicus*), a large mammal that causes frequently Road-kill in Jeju Island. So, to

*본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 ICT기반 환경영향평가 의사결정 지원 기술개발사업의(2020002990009) 및 환경영향평가 의사결정 검토지원모델 이해당사자 맞춤형 시·공간 표출 활용 시스템개발(2020002990004)의 지원을 받아 연구되었습니다.

First author : Kim, Minji, Dept. of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Student,
Tel : +82-2-3290-3543, E-mail : djgoby25@korea.ac.kr

Corresponding author : Jeon, Seongwoo, Division of Environmental Science&Ecological Engineering, Korea University,
Professor,
Tel : +82-2-3290-3543, E-mail : eepps_korea@korea.ac.kr

Received : 14 August, 2023. **Revised** : 23 October, 2023. **Accepted** : 19 October, 2023

predict potential wildlife habitats by considering geographic, environmental, and transportation variables for a specific species this study was conducted to identify high-priority restoration sites with both characteristics of potential habitats and road-kill hotspot. we identified high-priority restoration sites that is likely to be potential habitats, and also identified the known location of a Road-kill records. For this purpose, first, we defined the environmental variables and collect the occurrence records of roe deer. After that, the potential habitat map was generated by using Random Forest model. Second, to analyze roadkill hotspots, a kernel density estimation was used to generate a hotspot map. Third, to define high-priority restoration sites, each map was normalized and overlaid. As a result, three northern regions roads and two southern regions roads of Jeju Island were defined as high-priority restoration sites. Regarding Random Forest modeling, in the case of environmental variables, The importance was found to be a lot in the order of distance from the Oreum, elevation, distance from forest edge(outside) and distance from waterbody. The AUC(Area under the curve) value, which means discrimination capacity, was found to be 0.973 and support the statistical accuracy of prediction result. As a result of predicting the habitat of *C. pygargus*, it was found to be mainly distributed in forests, agricultural lands, and grasslands, indicating that it supported the results of previous studies.

Key Words : *Mammal, Capreolus pygargus tianschanicus, Habitat, Random Forest, Hotspot analysis*

I. 서 론

도로는 인간에게 편리한 이동성을 제공하고 상품의 이동과 사회적 상호 작용의 경계를 확장시키는 요소로써 오늘날 우리 사회에서 중요하게 여겨진다. 하지만 도로는 야생동물의 서식지를 가로지르게 되고, 도로와 서식지가 서로 교차하는 지점에서 야생동물과 차량과의 충돌이 발생한다(Forman et al., 2003). 이를 보편적으로 로드킬(Road-kill) 이라고 한다(KEI, 2018). 로드킬은 야생동물의 개체수 감소를 유발할 뿐만 아니라 운전자의 안전과 생명을 위협한다. 특히, 고라니 및 노루 같은 대형 포유류의 로드킬은 경제적인 측면에서 큰 피해를 유발할 뿐만 아니라, 운전자의 안전까지 위협하기 때문에 로드킬 저감대책 수립 시 우선적으로 고려할 필요가 있다(Kweon et al., 2008). 2018년 국토교통부와 환경부는 로드킬 방지의 실효성 있는 대책을 마련하기 위해 「동물 찾길 사고(로드킬) 조사 및 관

리 지침」을 제정하였다. 2020년에는 동물 찾길 사고 다발 상위 50구간을 선정하였고, 2022년에는 80구간으로 확대·지정하여 유도울타리, 동물찾길사고 주의 표지판 등 사고 저감시설물을 설치하였다(NIE, 2022). 하지만 이러한 정부의 노력에도 불구하고 로드킬은 지속적으로 발생하고 있다. 로드킬이 저감되지 않는 주요원인으로 도로에 의해 서식지가 단절되는 파편화 현상이 지목된다. 서식지 파편화로 인해 야생동물 서식지가 단절되고 서식지 면적이 감소하여 야생동물이 고립되는 현상이 발생한다(Noh et al., 2008). 야생동물은 먹이를 찾아 자유롭게 이동하며 새로운 번식지를 찾아 이동해야 하지만, 야생동물 서식지 내에 개발되는 도로는 이동을 저해하는 요소로 작용하는 동시에 야생동물의 로드킬을 유발하고 있다(Forman et al., 2003; Lee et al., 2004).

국외에서 수행된 로드킬 관련 연구는 지리적·환경적·교통적 변수를 고려하여 지리정보

시스템(GIS)과 머신러닝을 활용하여 사슴과 차량 충돌 위험이 높은 지역을 예측한 연구(Andreas S., 2004), 사슴과 차량 충돌 사고의 빈도, 충돌 지점의 지리적 위치, 그리고 사고 발생 위치에 영향을 미치는 환경적 요인들을 분석하고 저감대책을 제시한 연구(Andreas S., 2005), 도로상의 로드킬 모니터링을 수행할 수 있는 방안을 제시한 연구(Amy L et al., 2020) 등이 수행되었다.

국내에서 수행된 로드킬에 관한 연구로는 현장조사를 통해 수집한 데이터를 활용하여 로드킬 발생지역 현황조사를 한 연구(Lee et al., 2004), 로드킬 발생지역 현황자료를 활용하여 로드킬 발생 밀도와 주변 토지이용 유형의 특성을 밝혀 로드킬 저감을 위한 기초자료를 제시한 연구(Choi et al., 2006)와 이와 유사하게 현장 조사를 실시하여 획득한 로드킬 발생현황을 분석하여 로드킬 방지를 위한 저감대책을 제시한 연구(Kweon et al., 2008), 로드킬 발생에 영향을 미치는 요인을 분석한 연구(Son et al., 2016), 로드킬 다발구간을 선정하기 위한 연구(Song et al., 2019)가 진행되었다.

2000년대 초반에 수행된 로드킬 연구는 현장 조사를 중심으로 로드킬 데이터를 수집하였으나, 2018년 이후에는 로드킬 정보시스템이 개발되면서 데이터 수집 방법이 고도화되어 주기적이고 정량적인 데이터로 로드킬 연구가 가능하게 되었다. 하지만 야생동물의 서식지와 도로가 교차되는 지점에서 로드킬이 발생하는 것이 주요 원인임에도 불구하고 야생동물의 서식지 적합성을 고려하여 로드킬 다발구간을 분석한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구는 서식지 모델링 후 로드킬 데이터를 기반으로 핫스팟 분석한 결과를 결합하였다. 그 결과를 도로망도와 중첩하여 등급화한 후 가장 높은 값을 나타내는 구간을 우선복원지점으로 명명하였다. 따라서 본 연구의 목적은 제주도에서 로드킬 발생 빈도가 가장 높은 대형포유류인 노루를 대상으로 로드킬 저감시설이 우선적으로 설

치되어야 하는 우선복원지점을 제시하고자 한다.

II. 연구재료 및 방법

1. 공간적 범위

제주도는 한반도의 남쪽에 위치하며 면적은 1,850.26km²으로 대한민국 전체 면적의 1.8%를 차지한다(JRI, 2020).

제주도는 생물권보전지역, 세계자연유산, 세계 지질공원, UNESCO 3관왕을 달성한 지역으로 자연환경이 우수한 지역으로써, 2022년 기준 1,300만 이상의 관광객이 방문하는 관광압력 또한 큰 지역이다(Kim, 2013). 하지만, 집중되는 관광 수요로 인하여 제주도 내 도로 교통량이 꾸준한 증가 추세를 보이며 그에 따라 교통사고 등 다양한 사회적인 문제가 발생하고 있다(JRI, 2017). 제주특별자치도 도로교통량 조사결과에 따르면 제주도의 교통량은 2019년 대비 2021년 약 21% 증가하였다(JEJU, 2021). 국립생태원 에코뱅크 로드킬정보시스템에 의하면 교통량이 증가하는 동안 제주도의 노루 로드킬은 2019년 493건에서 2021년 684건으로 약 39% 증가하였다. 다시 말해, 제주도는 관광객의 유입으로 인하여 교통량이 증가함에 따라 로드킬 발생 또한 증가하고 있는 지역이므로 로드킬 저감 연구를 위한 적절한 대상지로 판단하였다.

2. 노루(*Capreolus pygargus*)

노루는 우제목(Artiodactyla) 사슴과(Cervidae) 흰꼬리사슴아과(Odocoileinae) 노루속(*Capreolus*)에 속하고, 전세계적으로 *C. capreolus*와 *C. pygargus*가 분포하고 있으며, 이 중 우리나라에 서식하는 노루는 *C. pygargus tianschanicus*로 분류되고 있다(Wilson and Reeder, 2005; Kim et al., 2007; Park et al., 2016).

노루의 형태는 몸통이 105~116cm, 꼬리는 1~2cm이며 엉덩이의 흰반점이 역삼각형으로 뾰족하며, 눈밑샘과 송곳니가 없다. 뿔은 17~22cm로

수노루에게만 있는데 번식을 위해 활용되다 번식이 끝난 후 탈각하고 이듬해 벨벳에 쌓여 다시 자라나 일정 시기가 되면 벨벳이 벗겨지고 단단해진다. 수노루의 뿔은 1년생은 한가지, 2년생은 2가지, 3년생은 3가지로 갈라지고 더 이상 갈라지지 않는다. 색은 갈색이지만 봄과 가을에 털갈이를 하여 계절에 따라 차이가 있고, 갓 태어난 개체의 등에는 하얀색 반점이 있지만 생후 3개월이 지나면 사라진다(JEJU, 2023).

노루는 침엽수림 또는 활엽수림 등 거의 모든 숲에서 서식하나, 목초지 주변 풍부한 관목층을 가진 식생이 복잡한 혼효림을 가장 선호하는 것으로 알려져 있다(Pedroli et al., 1981; Danilkin, 1996; Oh, 2004). 먹이는 주로 연한 잎을 가진 초본류와 목본류의 줄기, 잎, 순을 섭식하는 것으로 알려져 있으며, 번식은 1마리의 수컷이 2, 3마리의 암컷과 9월 초순경에 짝짓기를 하여 이듬해 5-6월 1~3마리의 새끼를 낳는다(Yoon et al., 2004; Han et al., 2015).

노루의 분포는 유럽에서부터 시작하여 아시아 대륙까지 이어지는데 전국자연환경조사 제4차 조사자료에 따르면 노루는 전국에 1,323지점에 분포하고 있고, 제주도에는 그중 16.78%(222지점)가 분포하고 있는 것으로 나타난다. 제주도의 노루는 1950년대 사냥과 올가미를 이용한 밀렵이 성행하면서 개체수가 급감하여 1970년대 말에 들어서는 관찰하기 힘들 정도로 개체수가 줄어들었다. 이후, 노루보호운동을 통해 개체수가 점차 증가하여 1990년대 중반부터는 개체수 회복에 성공하였다. 하지만, 「제주특별자치도 야생생물 보호 및 관리 조례」에 근거한 노루 개체수 조사 결과 제주노루는 농가의 농작물 피해 등의 이유로 2014년 9월 한시적인 ‘유해동물’로 지정되어 2009년 1만 2800여마리였던 제주지역 노루 개체수는 2019년 3,800마리까지 급감하였다. 제주노루 개체수는 2019년 6월 한시적 유해동물에서 지정 해제된 이후 2021년 4,200마리, 2022년 4,300마리 가량으로 증가하는 추세이지

만, 아직 제주도내 적정 서식 개체수인 6,100마리에는 미치지 못하고 있다. 이처럼 적정 개체수에 미치지 못하는 상황에서 노루의 로드킬 증가는 개체수의 감소로 이어질 수 있어 이를 방지하기 위한 적절한 방안이 필요하다.

3. 연구자료

1) 노루 출현 정보

노루의 출현 정보는 제주도 도시생태현황지도의 동물상 주제도 정보를 활용하였다. 제주도 도시생태현황지도는 2021년에 제작되었으며 전국자연환경조사정보, 현장조사 등을 종합하여 야생동물 출현정보를 구축하였다. 포유류 조사 지점 수는 1,663지점이며 그중 노루의 출현 지점은 581지점이다.

2) 로드킬 데이터

로드킬 발생 현황은 국립생태원 에코뱅크 로드킬정보시스템을 통해 2019년부터 2021년까지 수집된 정보를 활용하였다. 제주도에서 발생한 로드킬은 2019년 620건, 2020년 787건, 2021년 1,110건으로 총 2,517건이다. 이 중 노루의 로드킬은 2019년 493건(80%), 2020년 515건(65%), 2021년 684건(62%)이다(Figure 1). 제주도에서 발생하는 로드킬 중 매년 노루의 로드킬 비율은 50%이상이었으며 다른 종에 비해 높은 비율을 나타내었다.

III. 연구방법

가) 본 연구에서는 노루와 관련된 기존 선행 연구와 문헌을 검토하여 환경변수를 설정한 후 삼재서식지 예측을 위해 랜덤 포레스트(Random Forest)를 활용하여 모델링을 수행하였다. 랜덤 포레스트(RF) 모델은 다수의 분류나무를 생성시켜 분류, 회귀 분석 등에 사용되는 앙상블 학습방법의 일종이고, CART(Classification and regression trees)의 불안전성을 보완하고 있으며

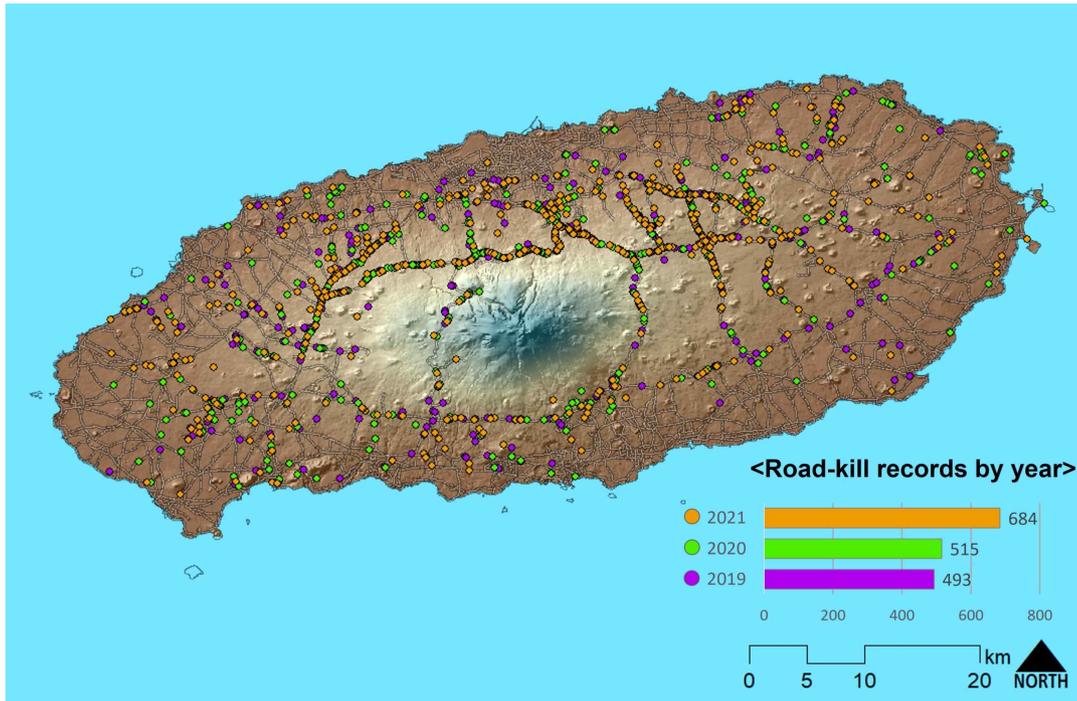


Figure 1. Road-kill Records

정확한 분류를 할 수 있는 기계학습 알고리즘이다. 랜덤 포레스트는 앙상블 기법중 배깅유형 기법이다. 배깅은 과적합을 방지하기 위하여 데이터 세트에서 무작위 복원 추출을 통해 임의의 개수로 구성의 부트스트랩 샘플을 생성하고 샘플별로 각 결정 트리 모델을 학습하여 결과를 집계하는 기법이며 이를 통해 과적합을 방지할 수 있으며 여러 분류나무를 통해 예측을 취합함으로써 정확도가 높아질 수 있다는 장점이 있어 종 분포 모델링(SDM)을 포함한 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다(Hwang et al., 2021; Valavi et al., 2021; Kwon et al., 2022). 본 연구에서는 9개의 환경변수와 581개의 출현정보를 활용하여 출현정보의 90%는 훈련데이터로, 10%는 검증데이터로 사용하여 30회 반복실행 중 AUC 0.8이상의 값만 앙상블하여 서식지 적합성 지도를 도출하였다.

나) 로드킬 다발지역을 도출하기 위해 커널 밀도 추정분석 방법 기반의 핫스팟 분석을 수

행하였다. 커널 밀도 추정은 점 개체의 분포를 토대로 공간밀도를 추정하여 시각화하는 방법이다. 관측된 점들로부터 일정한 탐색 반경 안에 포함된 밀도를 추정하여 커널 함수 K 로 표현한다(Song et al., 2019).

$$f(x,y) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{d_i}{h}\right) \quad (1)$$

식 (1)에서 $f(x,y)$ 는 (x,y) 위치에서 밀도 추정, n 은 관측치의 수, h 는 탐색반경, K 는 커널 함수, d_1 는 (x,y) 와 i 관측치 위치 간의 거리를 의미한다. 로드킬 다발구간 분석시 제주도에 서식하는 노루의 행동권을 분석한 선행연구를 참고하여 탐색반경을 511m로 설정하였다(Kim et al., 2013).

다) 로드킬 저감시설 설치하기 위한 우선복원지점을 선정하기 위하여 노루의 서식지 모델링 결과와 로드킬 핫스팟 지도를 표준화한 후 중첩하였으며, 국가교통정보센터의 전국표준노드링크의 도로망에 중첩한 지도를 더하여 지도

Table 1. Environmental Variables

Variable	References	Data type
Elevation	Kim et al., 2017; Wu et al., 2016; Feng et al., 2021	continuous
Aspect	Kim et al., 2017; Wu et al., 2016; Feng et al., 2021	continuous
Distance from oreum	Kim et al., 2017	continuous
Distance from forest edge(outside)	Kim et al., 2017	continuous
Distance from waterbody	Wu et al., 2016	continuous
Distance from grass		continuous
Ageclass	Kim et al., 2017; Wu et al., 2016	continuous
Population		continuous
Transportation		continuous

의 값을 나타내었다. 이를 **Natural break** 방법으로 로드킬 저감을 위한 저감시설 설치 대상지를 일곱 개의 등급으로 재분류하여 그 중 가장 높은 값을 나타내는 구간을 우선복원지점으로 선정하였다.

IV. 연구결과

1. 환경변수

서식지 분석을 위한 환경변수는 노루의 서식지 분석과 관련된 문헌조사와 선행연구(Kim et al., 2017; Wu et al., 2016; Feng et al., 2021) 검토를 통해 서식지 분석에 적합할 것으로 판단되는 변수를 설정하였다.

선행연구에서는 지형 인자로서 표고, 향을 선정하였다(Kim et al., 2017; Wu et al., 2016; Feng et al., 2021). 온도, 강우는 표고에 따라 달라지는데 이는 종 분포에 영향을 미치며 서식지 분석의 중요한 요인으로 다루어진다(Franklin, 2010). 향은 태양 복사량과 일사량에 영향을 미침으로써 토양 수분 이용 가능성에 영향을 주며 식생에 영향을 미친다(Franklin, 2010). 거리 인자는 제주도 특이한 지형적 특성을 반영하기 위하여 오름으로부터의 거리와 산림 내부와의 거리, 산림 외부와의 거리를 사용하였다(Kim et al., 2017). 수계로부터의 거리는 선행연구에서 물과 관련한 변수의 기여도가 높게 나온 점을 참고하여 사용

하였다(Wu et al., 2016). 노루는 주로 연한 잎을 가진 초본류를 먹이로 선호하는데 이를 고려하여 초지로부터의 거리를 사용하였다(Yoon et al., 2004). 식생인자는 동물종과 식물종의 서식지 구조를 파악하기 위한 중요한 인자이다(Leyequien et al., 2007; Franklin, 2010). 식생인자로는 나무의 새순이나 잎을 즐겨먹는 노루의 식성을 고려하여 나무의 영급을 사용하였다(Kim et al., 2017., Wu et al., 2016). 그 외 변수로 서식지에 미치는 인간 활동에 의한 인위적 영향을 고려하여 인가량과 교통량을 추가하였다.

환경변수는 총 10개의 변수를 선정하였다. 변수 간 상관관계가 높을 경우, 가중치가 작용하여 편향된 결과를 나타낼 수 있다. 이를 방지하기 위해 선정된 10개 변수에 대해 다중공선성 분석을 수행하였다. 상관분석 결과 산림 외부로부터의 거리와 상관계수가 0.8 이상으로 나타난 산림 내부로부터의 거리를 제거하여 총 9개의 환경변수를 사용하였다(Wu et al., 2016; Feng et al., 2021).

2. 모형 적용 결과

노루 분포예측 결과의 검증은 AUC 0.973으로 높음(high)의 정확도를 갖는다고 해석할 수 있다. 의학계열에서 ROC(Receiver operating characteristic)의 AUC의미의 해석은 $0.5 < AUC \leq 0.7$ 낮은 정확도(less), $0.7 < AUC \leq 0.9$ 중등도

Table 2. Variable importance

Class	Variable name	Importance	AUC
Capreolus pygargus	Distance from oreum	0.20	0.973
	Elevation	0.17	
	Distance from forest edge(Outside)	0.16	
	Distance from waterbody	0.09	
	Transportation	0.05	
	Distance from grass	0.04	
	Aspect	0.04	
	Ageclass	0.02	
	Population	0.01	

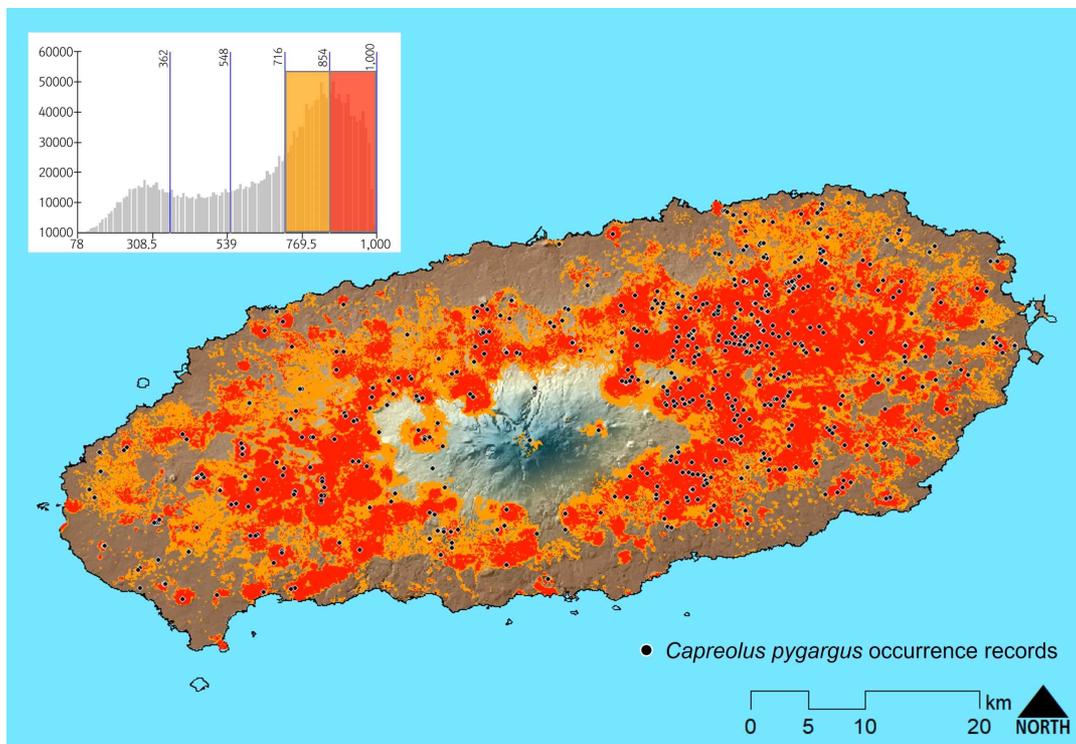


Figure 2. Distribution of suitable habitat

(moderate), $0.9 < AUC \leq 1.0$ 높음(high)로 해석하고 있고, 종분포모형 분야에서는 $0.8 \leq AUC$ 높음(high)로 평가한다(Thuiller, 2003; Franklin, 2009; Park et al.,2016).

노루의 서식환경에 영향을 미치는 주요 변수는 오름으로부터의 거리, 표고, 숲 외부로부터의 거리, 수계로부터의 거리, 교통량, 초지로부터

터의 거리, 향, 영급, 인구량 순으로 중요도가 높게 나타났다(Table 2). 중요도가 가장 높았던 오름으로부터의 거리 변수를 기반으로 노루의 출현지점을 확인한 결과 2km 내에 약 95%가 분포하는 것으로 나타나, 오름이 노루의 서식에 중요한 요소라는 선행연구의 결과를 뒷받침해 주었다(Kim et al., 2017). 다음으로 중요도가 높

있던 표고는 고지대와 중산간지대에서 높은 출현확률을 보였으며 이는 중산간지대를 선호하는 노루의 행동 특성이 반영된 결과이다. 이는 노루 출현확률이 높았던 선행연구와 동일하였다(Kim et al., 2017). 삼림 외부로부터의 거리는 산림 내부로 갈수록 출현확률이 높아지는 것을 확인되었으며 이를 통해 노루는 산림의 경계로부터 먼 내부 서식지를 선호함을 알 수 있었다. 다음으로 기여도가 높았던 수계로부터의 거리는 수계에서 가까울수록 출현확률이 높은 것으로 확인되어, 노루의 서식환경에 있어 물이 중요한 변수라는 선행연구의 결과를 뒷받침하는 결과를 나타내었다(Wu et al., 2016). 선행연구에서 사용하지 않았던 초지로부터의 거리는 초지로부터 200m 내에 약 89% 서식하고 있어 초지와 가까울수록 노루가 많이 분포함을 파악할 수 있었다. 교통량은 교통량이 많은 곳일수록 로드킬이 적었으며 이는 교통량이 많은 지역이

시가화지역으로 노루의 출현확률이 낮은 점이 반영된 결과라고 해석할 수 있다. 인구는 유동인구가 적을수록 노루의 출현확률이 높았다.

3. 로드킬 핫스팟 분석

로드킬은 제주도 북쪽의 한라산 끝자락과 연결되는 지방도에서 집중적으로 발생하는 특성이 있었으며, 특히 제주시가 위치한 북쪽에서 밀도가 높은 것을 확인할 수 있었다. 다발구간으로 도출된 곳은 1135번, 1117번, 1131번, 97번 지방도이다(Figure 3). 가장 높은 구간으로 도출된 곳은 1135번 지방도(Figure 3_a)와 1117번, 1131번, 97번 지방도이다(Figure 3_b). 1135번 지방도는 왕복 4차선으로 인근에 농경지, 산림, 초지, 나지 등이 존재하는 것으로 나타났다. 1117번, 1131번 지방도의 도로 주위는 산림, 초지, 나지, 농경지가 분포하고 있었으며 97번 지방도 주위는 농경지의 분포가 많았으며 산림,

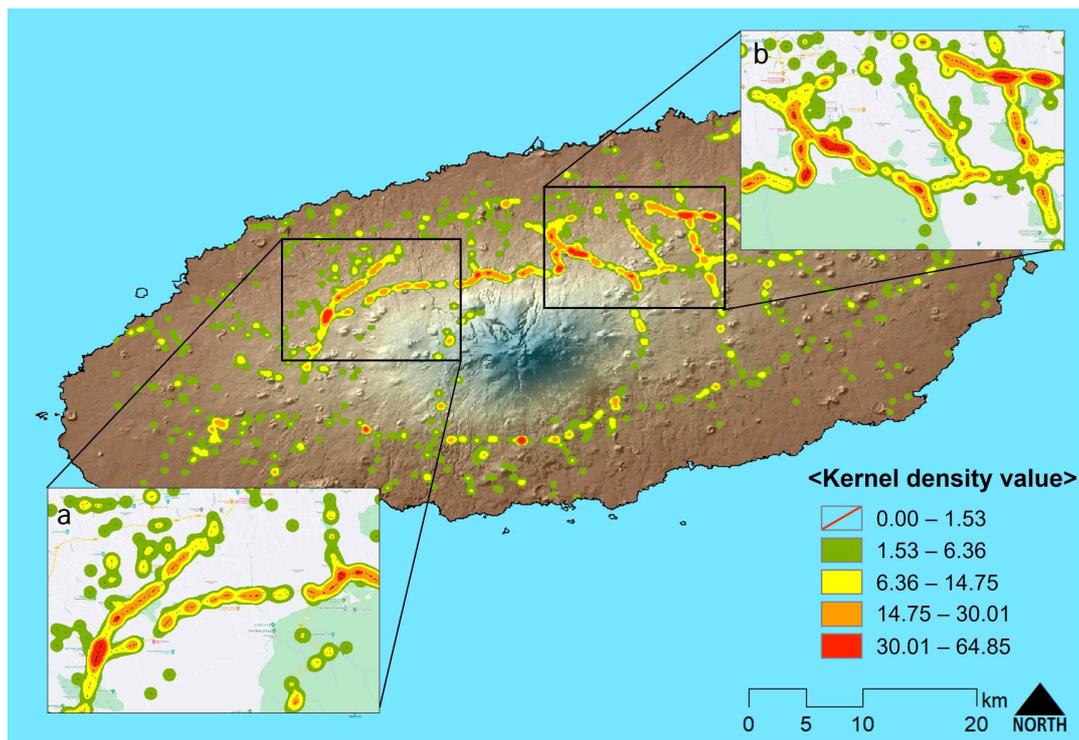


Figure 3. Road-kill hotspot in Jeju Island

초지, 나지도 다른 도로와 동일하게 분포하고 있었다.

핫스팟 분석을 결과인 로드킬 다발구간 주변의 토지피복을 확인한 결과 대부분의 다발구간에서 산림과 초지가 높은 비율로 나타났다. 서식지 모델링 결과 오름으로부터의 거리와 산림 외로부터의 거리는 중요도가 높게 나타났는데, 오름의 경우 토지피복상 대부분 산림으로 분류된다. 따라서, 로드킬 핫스팟 분석 결과와 서식지 모델링 결과에서 산림이 노루의 서식지를 판단하는데 중요한 변수라는 점을 확인하였다.

V. 우선복원지점 선정

우선복원지점으로 선정된 도로의 연장은 도로의 양쪽 길이를 합한 연장으로 약 31,071m이며, 제주도 내 총 도로 연장의 약 0.6%에 해당한다(Figure 4). 우선복원지점에 해당하는 다섯 개의 구간은 시·군도 세 구간, 지방도 두 구간

으로 도출되었다. 시·군도 세 구간에는 김송로, 녹산로, 해안마을길이 포함되며, 지방도 두 구간에는 1117번, 1118번 도로가 포함되었다(Figure 4). 시·군도에 해당하는 김송로는 산림이 가장 많이 분포하였으며 농경지, 초지, 나지가 분포하고 있었다. 녹산로 주위는 초지, 농경지, 산림의 형태가 주로 분포하였으며 일부 나지의 형태를 보이기도 하였다. 해안마을길 주위는 농경지, 초지, 산림의 형태가 나타났다. 1117번 지방도의 경우 두 구간이 도출되었다. 1117번 지방도는 산림 끝자락을 관통하는 도로로 첫 번째 구간은 1117번 지방도의 산록서로이다. 도로 주위로 산림, 농경지, 초지, 나지가 분포하고 있었다. 두 번째 구간은 1117번 지방도의 산록북로 구간이다. 이 구간 주위로 산림, 농경지, 초지, 나지가 분포하고 있고 산록서로와 도로 주위로 형성되어 있는 토지피복이 동일하였다. 1118번 지방도의 주위로는 산림과 초지의 분포가 많았으며 농경지의 분포도 보였다. 로드킬

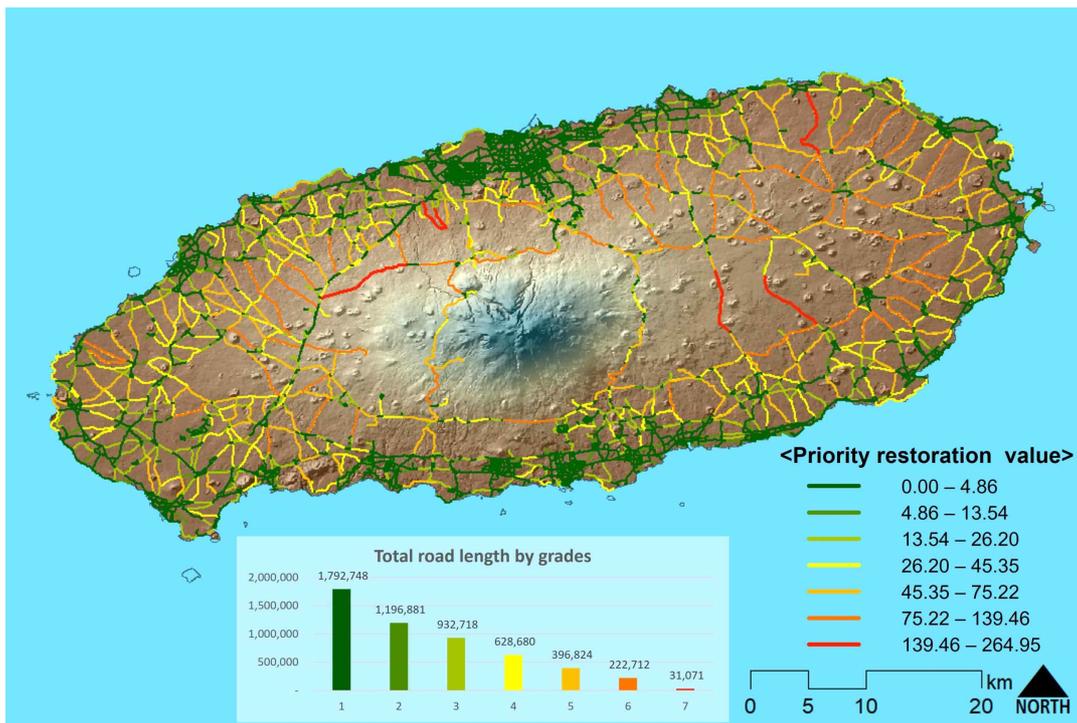


Figure 4. Road-kill Priority Restoration Sites of Road

Table 3. Number of Road-kill Per 1km

Grades	Number of Road-kill	Road Length(m)	Number of Road-kill Per 1km
1	287	1,792,748	0.16
2	501	1,196,881	0.42
3	476	932,718	0.51
4	408	628,680	0.65
5	280	396,824	0.71
6	219	222,712	0.98
7	63	31,071	2.03

우선복원지점으로 선정된 지방도와 시·군도 주위 경관은 대부분 산림, 농경지, 초지가 대부분을 차지하는 것으로 확인되었다. 산림으로 분류되고 있는 곳은 오름이 포함되어 선정된 구간 주위로 모두 오름이 분포하는 것으로 나타났다.

저감시설 설치 대상지 일곱 개의 등급에 대하여, 등급 설정의 적절성을 알아보기 위해 2022년과 2023년 8월까지의 2,234개의 로드킬 데이터를 통해 검증하였다. 검증을 위해서는 등급별 1km당 로드킬 발생 건수를 파악하였다 (Table 3). 우선복원지점에 해당하는 구간들의 1km당 로드킬 발생건수는 다른 등급보다 2배 이상 높음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 해당 구간에 대한 로드킬 위험성을 확인하였고 선정된 우선복원지점이 로드킬 저감 측면에서 중요하게 고려되어야 할 도로임을 확인하였다.

VI. 결 론

본 연구는 서식지 모델링 결과와 로드킬 핫스팟 분석을 통해 도출한 지도를 중첩하여 저감시설 설치 대상지를 일곱 개의 등급으로 분류하여 가장 높은 값을 가진 등급에 속하는 도로를 로드킬 저감을 위한 우선복원지점을 선정하였다. 분석 결과 로드킬 우선복원지점에 해당하는 구간은 제주 전체 도로 중 0.6%로 나타났는데 도로 주변 경관으로는 산림, 농경지, 초지가 확인되었다. 오름으로부터의 거리는 모델링 결과 가장 높은 중요도를 나타냈는데 우선복원지점의

경우 도로 주위에 오름이 분포하고 있어 노루로 인한 로드킬 발생 가능성이 높을 것으로 예상된다. 따라서 노루가 도로로 침입할 상황을 방지하기 위하여 적절한 저감 대책이 필요하다. 로드킬 다발지역을 도출하기 위한 핫스팟 분석은 커널 밀도 추정분석 방법 기반의 핫스팟 분석을 수행하였고 그 결과 제주도 북쪽에서 밀도가 높게 나타난 것을 확인할 수 있었다.

서식지 모델링결과와 로드킬 핫스팟 분석을 중첩하여 우선복원지점을 도출하였고 본 연구에서 제안하는 우선복원지점에 해당하는 도로의 구간은 다섯구간으로 시·군도 세 구간, 지방도 두 구간으로 현재까지 다른 등급의 도로보다 높은 로드킬 발생이 나타나고 있다. 현재 우리나라에서는 로드킬 저감을 위해서 로드킬 다발 구간 중 상위 80구간을 선정하여 유도 울타리 설치, LED 로드킬 주의 표지판 설치 등의 저감대책을 추진하고 있다. 2022년 로드킬 저감대책의 80구간 중 제주도는 6구간이 선정되었으며 97번, 1117번, 1131번 지방도의 일부 구간이 선정되어 저감방안 실행을 계획하고 있다. 로드킬 저감대책을 위한 다발구간으로 선정된 80개 구간 중 1117번 지방도는 본 연구의 우선복원지점과 중복되었다. 중복되는 구간은 노루의 생태학적 측면을 고려하여 로드킬 저감시설을 설계하고 적용해야 할 것으로 판단된다. 본 연구는 로드킬 저감대책을 위한 기존 정책을 지원할 수 있으며, 나아가 노루를 고려한 로드킬 저감대책을 적용하기 위한 도로를 선정하는

데 참고자료로 활용하여 효율적인 저감대책 수립이 가능하다. 또한, 본 연구에서 우선복원지점으로 선정된 도로 중 기존 다발구간으로 선정되지 않은 지점의 경우 향후 저감시설을 설치해야 할 추가적인 도로로 제안할 수 있다.

노루는 제주도에 서식하는 야생동물 중 가장 높은 비율의 로드킬이 일어나고 있는 종이다. 본 연구는 사회적 문제가 되고 있는 로드킬을 저감하기 위하여 제주도에 서식하는 노루를 대상으로 로드킬 저감시설 설치를 위한 우선복원지점을 제시하였다. 하지만 단일모형을 사용하여 서식지 적합성을 예측하였으므로 일반화하기 어려운 측면과 우선복원지점 선정 후 구체적인 저감시설물을 제시하지 못하였다는 한계점을 가지고 있어 향후 추가적인 연구가 필요하다.

이러한 한계점에도 불구하고 본 연구가 가지는 의의는 다음과 같다. 노루 서식지의 질적 가치를 고려하여 우선복원지점을 선정함으로써 서식지 파편화의 부정적 영향을 최소화하여 로드킬 저감에 기여하고자 하였다. 또한, 커널 밀도분석의 특성상 공간적 근접지역의 통계적 유의성이 도출되기 어렵기 때문에 로드킬 다발구간 선정 시 우선순위 판단이 어렵다는 한계가 있었지만, 본 연구에서는 노루 서식지 모델링 결과와 로드킬 핫스팟지역을 결합함으로써 종의 생태적 특성을 고려한 우선복원지점을 선정하기 위한 방법론을 제시하였다는데서 의미가 있다. 이를 통해 로드킬 저감대책 수립 시 종을 고려하여 다발구간을 선정하고 로드킬 저감을 계획함으로써 로드킬 저감의 효율성을 높일 수 있을 것으로 기대한다.

References

- Andreas Seiler. 2004. Trends and spatial patterns in ungulate-vehicle collisions in Sweden. *Wildlife Biology*, 10(4), 301-313.
- Andreas Seiler. 2005. Predicting Locations of moose-vehicle collisions in Sweden. *Journal of Applied Ecology*, 42, 371-382.
- Amy L.W. Schwartz., Fraser M. Shilling., Sarah E. Perkins. 2020. The value of monitoring wildlife roadkill. *Journal of Wildlife Research*, 66(18).
- Choi, T.Y., C.H. Park. 2006. The Effects of Land Use on the Frequency of Mammal Roadkills in Korea. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 34(5), 52-28.
- Danilkin, A.A. 1996. Behavioral ecology of Siberian and European Roe deer, London; Chapman & Hall.
- Erica H., Vinicius X.S., Rogerio G.T.C., Flavio N.R., Milton C.R., Mario S., Marco T.P.C., Diego G.S.P., Bruno R.R. 2016. Additions of landscape metrics improve predictions of occurrence of species distribution models. *J. For. Res.*, doi 10.10007/s11676-017-0388-5.
- Fryxell J. and A.R.E. Sinclair. 1998. Causes and consequences of migration by large herbivores. *Trends in ecology&evolution*, 3: 237-241.
- Forman, R.T., D. Sperling, et al.. 2003. *Road Ecology: Science and Solutions*. Island Press, Washington D.C.
- Frankin, J. 2009. *Mapping Species Distributions, Spatial Inference and Prediction*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Feng, Huamei., Li, Yuehui., Li, YueYuan., Li, Nana., Li, Yue., Hu, Yuanman., Yu, Jinghua., Luo, Hongxia. 2021. Identifying and evaluating the ecological network of Siberian roe deer (*Capreolus pygargus*) in Tieli Forestry Bureau, northeast China. *Global Ecology and Conservation*, 26.e01477.
- Hubbard, Michael W., Danielson, Brent J., Schmitz, Richard A. 2000. Factors Influencing the Location of Deer-Vehicle Accidents in Iowa.

- The Journal of Wildlife Management, 64, 707-713.
- Hewison, A.J.M., Vincent, J.P., Joachim, J., Angibault, J.M., Cargnelutti, B., Cibien, C. 2001. The effects of woodland fragmentation and human activity on roe deer distribution in agricultural landscapes. *Can. J. Zool.* 79(4), 679e689.
- Hong, C.S., Jang, D.H. 2020. Validation ratings for the length of the ROC curve, *Journal of the Korean Data&Information Science Society.* 31(5), 851-863.
- Hwang, J. K., Kang, T. H., Han, S. W., Cho, H. J., Nam, H. K., Kim, S. J., Lee, J. W. Identification of Bird Community Characteristics by Habitat Environment of Jeongmaek Using Self-organizing Map. 2021. *Korean Journal of Environment and Ecology.* 35(4), 377-386.
- JRI. 2017. Comparison and Implications of Road Transportation Systems in Jeju Island and Hawaii.
- JRI. 2020. JEJU THROUGH MAPS & DATA.
- Kim, B.S., M.H. Jang., H.S. O. 2007. The individual status and management plan of Roe deer (*Capreolus pygargus tianschanicus* Satunin) inhabiting Hallasan, Jeju island, Korea. *Journal of Korean Society of Environment and Ecology.* 21(4), 366-373.
- Kweon, H.K., Y.H. Choi., M.J. Kim., and J.W Lee. 2008. Study on the Status and Cause of the Road Kill for Wildlife Killing Reduce - A Case Study of National Road in Daejeon~Seosan Section -. *Journal of forest and environmental science.* 24(2), 99-109.
- Kim, J.Y., ·C.W. Seo., H.S. Kwon., J.E. Ryu., M.J. Kim. 2012. A Study on the Species Distribution Modeling using National Ecosystem Survey Data. *Journal of Environmental Impact Assessment.* 21(4), 593-607.
- Kim, E.M., Kwon, J.O., Kang, C.W., Song, K.M., Min, D.W. 2013. Home Range Size and Habitat Environment Related to the Parturition of Roe Deer at Warm-Temperate Forest in Jeju Island Using GPS-CDMA Based Wildlife Tracking System. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies,* 16(2), 65-74.
- Kim, H.G. 2013. A Study on Marketing Strategy of Souvenir Industry in Jeju, *Journal of Tourism & Industry Research,* 31, 37-55.
- Kim, A.R., J.M. LEE., G.S. Jang. 2017. Modeling the Spatial Distribution of Roe Deer (*Capreolus pygargus*) in Jeju Island. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies,* 20(4), 139-151.
- KEI. 2018. Study on Securing Suitable Wildlife Crossings in order to Control and Prevent Wildlife-Vehicle Collisions.
- Kwon, K. B., Choi, H. S., Oh, J. Y., Kim, D. K. A study on EPB shield TBM face pressure prediction using machine learning algorithms. 2022. *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association.* 24(2), 217-230.
- Lee, S.D., H.S. Cho., J.G. Kim. 2004. A Study of Wildlife Roadkill in Joongang Highway. *Journal of Environmental Impact Assessment,* 13(1), 21-31.
- Lee, Y.W. and M.W. Lee. 2006. Eco-corridor Positioning for Target Species- By Field Surveying of Mammals' Road-Kill -. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology,* 9(3), 51-58.
- Lee, S.Y., R.I. Jang., H.S. Oh and S.W. Jeon. 2023.

- Selection and Management Strategies for Restoration and Conservation Target Sites of Mankyua chejuense using Species Distribution Models. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 26(3), 29-42.
- Mysterud A. 1999. Seasonal migration pattern and home range of roe deer (*Capreolus capreolus*) in an altitudinal gradient in southern Norway, *Journal of zoology*, 247: 479-486.
- Noh, Y.D., E.S. Jeong., J.S. Lee., K.H. Kim. 2008. A Study on the Roadkill Prevention System Based on the Web Services. *Journal of Korea Information Processing Society*, 15(6), 873-878.
- NIE, 2022, Intensive survey on road-kill hotspots in South Korea.
- Phillips, Steven J., Anderson, Robert P., Schapire, Robert E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. 190, 231-259.
- Phillips, S. J., and M. Dudik. 2008. Modeling of species distributions with Maxent : new extensions and a comprehensive evaluation, *Ecography*, 31(2), 161-175.
- Park, Y.S., J.Y. Cha., N. S. Kim. 2016. Taxonomic Revision of Variation in Skull Morphology of Siberian Roe Deer (*Capreolus pygargus*, Pallas, 1771) in South Korea. *Journal of Korean Society of Environment and Ecology*, 30(1), 39-47.
- Pak, S.I., & Oh, T.H. 2016. Application of Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve for Evaluation of Diagnostic Test Performance. *Journal of Veterinary Clinics. The Korean Society of Veterinary Clinics.* <https://doi.org/10.17555/jvc.2016.04.33.2.97>.
- Song, W.K. and E.Y. Kim. 2012. A Comparison of Machine Learning Species Distribution Methods for Habitat Analysis of the Korea Water Deer(*Hydropotes inermis argyropus*), *Korean Journal of Remote Sensing*, 28(1), 171-180.
- Seo, S.B., M.J. Lee., J.J. Kim., S.H. Chun., S.D. Lee. 2016. Prediction onHabitat Distribution inMt.Inwang andMt.AnUsingMaxent. *Journal of Environmental Impact Assessment.* 25(6), 432-441.
- Son, S.W., S.H. Kil., Y.J. Yun., J.H. Yoon., H.J. Jeon., Y.H. Son., M.S. Kim. 2016. Analysis of Influential Factors of Roadkill Occurrence - A Case Study of Seorak National Park -. *Journal of Korean institute of landscape architecture.* 44(3), 1-12.
- Song, E.G., H.J Seo., K.M Kim., D.G Woo., T.J Park., T.Y Choi. 2019. Analysis of Roadkill Hotspot According to the Spatial Clustering Methods. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 28(6), 580-591.
- Thuiller, W.. 2003. BIOMOD-optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change, *Global Change Biology*, 9(10), 1353-1362.
- Wilson, D. E. and D. M. Reeder. 2005. *Mammal species of the world: a taxonomic and geographic reference* 3rd ed. Johns Hopkins University Press, Maryland, USA. 1599.
- Wen Wu, Yuehui Li and Yuanman Hu. 2016. Simulation of potential habitat overlap between red deer(*Cervus elaphus*) and roe deer(*Capreolus capreolus*) in northeastern China. *Peer J*, doi 10.7717/peerj.1756.
- Chunrong Mi, Falk Huettmann, Yumin Guo, Xuesong Han and Lijia Wen. 2017. Why choose Random Forest to predict rare species

distribution with few samples in large undersampled areas? Three Asian crane species models provide supporting evidence. Peer J, doi 10.7717/peerj.2849.

R. Valavi, J. Elith, J. J. Lahoz-Monfort and G. Guillera-Arroita. 2021. Modelling species presence-only data with random forests. *Ecography*. doi 10.1111/ecog.05615.