

Research Paper

멧돼지(*Sus scrofa*) 개체군의 생애주기 기반 밀도 분포 기초 모형 연구

황혜미* · 이동근** · 김다슬* · 김지영* · 황인재*** · 김은섭**** · 이재홍*****

서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 학생*, 서울대학교 농업생명과학대학 교수**,
국립생물자원관 기후·환경생물연구과 전문위원***, 홍콩성시대학교 환경에너지학 연구원****,
서울대학교 협동과정 조경학 학생*****

Development of a Life-Cycle-Based Density Model for Wild Boar (*Sus scrofa*) Population

HyeMee Hwang* · DongKun Lee** · DaSeul Kim* · JiYoung Kim* ·
InJae Hwang*** · EunSub Kim**** · JaeHong Lee*****

Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, South Korea, Student*
Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, South Korea, Professor**
Climate Change and Environmental Biology Research Division, National Institute of Biological Resources,
Incheon 22689, Republic of Korea

Low-Carbon and Climate Impact Research Centre, School of Energy and Environment, City University of Hong Kong*****
Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University, Seoul, Korea, Student*****

요약: 도시화, 농경지 확장, 기후변화 등 인간 활동은 서식지 단편화를 가속화하며, 이는 멧돼지(*Sus scrofa*)와 같은 광역 이동종의 공간적 이동 경로를 제한하고 개체군 간 연결성을 약화시켜 생태계 안정성을 위협한다. 특히 멧돼지는 뛰어난 환경 적응력과 높은 번식력을 바탕으로 농경지, 도시 외곽 등 인간 활동 지역으로 이동할 가능성이 높으며, 이는 아프리카돼지열병(ASF)과 같은 인수공통감염병의 확산 위험을 증가시키는 요인으로 작용할 수 있다. 본 연구는 멧돼지의 생태적·행동학적 특성과 공간 이용 특성을 통합한 밀도 기반 시뮬레이션 모델을 구축하여, 개체군 동태와 자원 이용 간의 공간적 상호작용을 분석하고자 하였다. 시뮬레이션 결과, 시간 경과에 따라 개체군은 먹이 자원이 집중된 지역으로 군집을 이루었고, 이로 인해 특정 지역에서 자원의 급격한 고갈과 밀도 집중 현상이 나타났다. 또한 개체들은 자원 밀도에 따라 공간을 선택적으로 이용하며, 먹이가 고갈된 지역은 회피하는 경향을 보였다. 특히 개체 밀도가 높은 지역은 병원체의 유지 및 전파가 용이한 공간으로 작용할 수 있어, 본 연구 결과는 ASF와 같은 인수공통감염병의 확산 위험 지역 예측 및 생태적 복원 대상지 우선순위 설정에 활용될 수 있는 기초자료로서의 가능성을 제시한다.

주요어: 멧돼지(*Sus scrofa*), 개체기반모형(Individual-Based Model), 개체군 밀도, 아프리카돼지열병(ASF), 생태계 모델링

First Author: HyeMee Hwang, Tel: +82-2-880-4885, E-mail: hyemee@snu.ac.kr, ORCID: 0000-0003-3659-5678

Corresponding Author: DongKun Lee, Tel: +82-2-880-4885, E-mail: dklee7@snu.ac.kr, ORCID: 0000-0001-7678-2203

Co-Authors: DaSeul Kim, Tel: +82-2-880-4885, E-mail: daslekim@snu.ac.kr, ORCID: 0000-0003-3747-2338

JiYoung Kim, Tel: +82-2-880-4885, E-mail: jzy0305@snu.ac.kr, ORCID: 0009-0005-4760-9758

InJae Hwang, Tel: +82-2-880-4885, E-mail: inzea@snu.ac.kr, ORCID: 0000-0003-2324-0579

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

JaeHong Lee, Tel: +82-2-880-4885, E-mail: vaink00@snu.ac.kr, ORCID: 0000-0001-9788-1008

Received: 16 May, 2025. Revised: 13 October, 2025. Accepted: 14 October, 2025.

Abstract: Human activities such as urbanization, agricultural expansion, and climate change accelerate habitat fragmentation, which restricts the spatial movement of wide-ranging species such as wild boars (*Sus scrofa*) and weakens population connectivity, ultimately threatening ecosystem stability. Wild boars, in particular, possess high environmental adaptability and reproductive capacity, making them more likely to expand into human-influenced areas such as farmlands and urban fringes. This movement may increase the risk of spreading zoonotic diseases such as African Swine Fever (ASF). This study developed a density-based simulation model that integrates the ecological and behavioral traits of wild boars with their spatial use patterns, aiming to analyze the spatial interactions between population dynamics and resource utilization. The simulation results revealed that over time, wild boars formed clusters in areas with concentrated food resources, leading to rapid depletion of resources and localized population density peaks. Individuals exhibited selective spatial use based on food availability and tended to avoid areas where resources had been exhausted. Notably, areas of high population density may function as hotspots for pathogen maintenance and transmission. Accordingly, the findings of this study suggest the potential utility of the model as a basis for identifying ASF risk zones and prioritizing ecological restoration areas.

Keywords: Wild boar (*Sus scrofa*), Individual-Based Model (IBM), Population density, African swine Fever (ASF), Ecological modelling

I. 서론

도시화, 농경지의 확장, 기후변화 등 다양한 인간 활동은 자연 생태계의 연속성을 훼손하고 서식지를 단편화 시켜왔다. 이러한 서식지 단편화는 특히 광범위한 이동이 필요한 육상종의 공간적 이동 경로를 제한하고, 개체군 간 연결성을 약화시켜 생태계 기능의 안정성에 부정적인 영향을 미친다(Doherty et al., 2021). 멧돼지 (*Sus scrofa*)는 이러한 영향을 대표적으로 보여주는 종으로, 뛰어난 환경 적응력과 유연한 행동 특성을 바탕으로 인간 활동에 의해 구조적으로 변형된 경관 내에서도 활발한 이동성을 보인다(Gamelon et al., 2012). 특히 서식지 단편화가 심화된 지역에서는 기존의 연속적 이동 경로나 안정적인 서식지가 감소하거나 단절되면서, 멧돼지가 농경지, 도시 외곽 등 인간 활동 밀집 지역으로 이동할 가능성이 높아진다.

멧돼지는 잡식성 야생 포유류로, 도토리, 칩, 뿌리류, 곤충, 소형 척추동물 등 다양한 식물성 및 동물성 자원을 섭취한다. 계절에 따라 섭식 행동에 차이를 보이며, 특히 겨울철에는 자연 상태에서의 먹이 자원이 부족해짐에 따라 농경지나 인근 농가 지역으로 활동 반경을 확장하는 경향이 나타난다. 멧돼지는 번식력이 매우

높은 종으로, 사회 구조는 일부다처제에 기반한다. 일반적으로 12월경 번식 활동이 이루어지며, 약 115일의 임신 기간 후 이듬해 4월경 4~12마리의 새끼를 출산한다(Náhlik et al., 2003). 특히 상위 포식자인 호랑이와 늑대 등의 개체수 감소는 포식 압력을 약화시켜 멧돼지 개체군의 밀도 증가를 유발하는 요인으로 작용하고 있다(Cwynar et al., 2019). 이에 따라, 환경부는 멧돼지를 유해야생동물로 지정하고 수렵 대상으로 분류하여 개체군 조절 및 인위적 관리 방안을 시행하고 있다.

지금까지 멧돼지와 인간 간 접촉 빈도를 줄이기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔으며, 이들 연구는 주로 멧돼지의 공간적 이동 특성과 서식지 간 연결성에 중점을 두어 왔다. 예를 들어, 이현정 외(2022)는 Circuitscape 소프트웨어를 활용하여 토지이용 유형에 따른 저항값을 설정하고, 이를 기반으로 멧돼지의 이동 경로와 연결성(connectivity)을 시각화하고 분석하였다. 한편, 서창완과 박종화(2000)는 야생 멧돼지의 출현 자료를 바탕으로 지형, 산림 유형, 고도 등 다양한 환경 변수를 활용하여 로지스틱 회귀분석을 수행함으로써 멧돼지의 서식 적합성 및 출현 가능성을 예측하였다.

이처럼 선행연구는 멧돼지의 공간적 분포나 이동 경로에 대한 이해를 도모하는 데 기여하였으나, 대부분

이 서식지 연결성 또는 출현 가능성 예측에 초점을 맞추고 있으며, 개체군의 밀도 변화 및 군집 동태에 기반한 정량적 분석은 상대적으로 부족한 실정이다. 야생동물 질병은 직접 접촉뿐만 아니라 배출물이나 사체를 매개로 한 간접 경로를 통해서도 전파되므로, 개체의 행동 생태와 서식지 이용 특성을 반영한 공간 기반 밀도 분석은 감염 위험 지역을 이해하고 예측하는 데 중요한 기초 자료가 된다. 특히 ASF의 경우, 현재까지 효과적인 백신이나 치료제가 개발되어 있지 않아, 병원체의 주요 매개체로 알려진 멧돼지 개체군의 크기 및 밀도를 관리하는 것이 사실상 유일한 방역 수단으로 간주되고 있다(Guberti et al., 2022). Podgórski et al. (2020)의 연구에 따르면, 개체 밀도가 0.4개체/km²에서 2개체/km²로 증가함에 따라 ASF 발생 확률이 3%에서 20%까지 상승하는 것으로 나타났다. 따라서 감염 위험 지역을 정밀하게 식별하기 위해서는 개체의 행동 생태를 반영한 서식지 접근성 및 이용성에 대한 정량적 분석이 필요하다.

이에 본 연구는 멧돼지의 생태적·행동학적 특성과 공간 이용 특성을 반영한 밀도 기반(density-based) 시뮬레이션 모델을 구축하고자 한다. 개체군 밀도를 중심으로 한 시뮬레이션을 통해, 효과적인 방역 전략 수립과 생태 복원 대상지 선정에도 과학적 근거를 제공할 수 있다.

II. 연구방법

1. 모형 개요

우리는 개체 단위의 시뮬레이션 모델(Individual-Based Model, IBM)을 구축하였다. 본 IBM은 개체 수준에서 행동학적 과정을 모의함으로써, 개체군의 동태와 공간적 밀도 변화를 분석할 수 있도록 설계되었다. 시뮬레이션은 가상 대상지에서 개체 초기화와 환경 조건 설정을 통해 시작되며, 공간 해상도 100 m의 50×50 격자(총 2,500셀)를 기반으로 수행되었다. 초기 개체군 밀도는 환경부(2022)에서 제시한 평균 수준인 1.1 마리/km²로 설정하였으며, 성비는 암컷과 수컷을 각각 1:1로 구성하였다. 또한 각 개체의 체중은 성체 범위 내에서 무작위로 할당하여 초기 조건으로 적용하였다(Tack et al., 2018). 본 연구의 기초 시뮬레이션 모델은 Python (version 3.12) 환경에서 구현하였다.

1) 자원 (Resource)

야생멧돼지의 주요 서식지는 일반적으로 산림 지역으로 알려져 있으며(Focardi et al., 2008), ASF와 같은 야생동물 전염병 또한 산림 지역에서 더 높은 발생률을 보이는 것으로 나타났다(Podgórski et al., 2020). 이에 따라 본 연구는 산림이 멧돼지에게 풍부한 먹이 자원을 제공하는 핵심 서식지라는 전제 하에 분석을 수

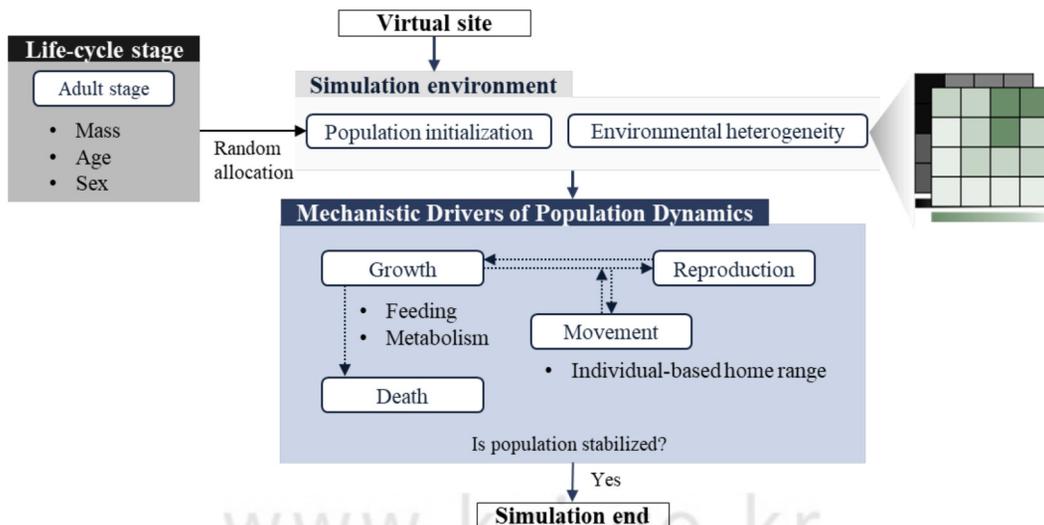


Figure 1. Study flow

Table 1. Life-Cycle Stages of Wild Boar with Corresponding Age and Mean Body Mass

Life-cycle stage	Age (month)	Mean mass (kg)		Citation
Juvenile stage	0	0.5		Focardi et al. (2008)
Sub-adult stage	6	8.8		
Adult stage	12	Male	50-130	Tack et al. (2018)
		Female	45-90	

Table 2. Feeding Parameters and Energy Intake Components for Wild Boar

Uptake rate (g/min)	Biting rate (bites/min)	Uptake per bite (g/bite)	Citation
17.4	13.0	1.3	Elston & Hewitt (2010)

Table 3. Metabolic Rate Coefficients Used in Basal Energy Consumption Equation

<i>a</i>	<i>b</i>	Citation
70	0.667	Kleiber et al. (1975), White et al. (2002)

행하였다.

가상의 대상지 환경을 설정함에 있어, 산림 지역은 전체 격자 내에서 무작위로 배치하였으며, 개체는 해당 산림 셀 위에 초기 위치를 부여하였다. 또한, 현실 공간에서 자원의 분포가 균일하지 않다는 점을 고려하여, 산림 지역을 중심으로 먹이 자원이 분포하도록 설정하였고, 자원 밀도는 설정된 범위 내에서 무작위로 할당함으로써 공간적 이질성을 구현하였다.

2) 초기 개체군 구성

본 연구에서는 멧돼지 개체군의 생리적 변화와 에너지 흐름을 반영하기 위해, 체중(mass)을 중심 변수로 설정하였다. 멧돼지는 생애주기에 따라 일반적으로 세 단계로 구분된다. 출생 후 0-6개월까지는 체중 증가와 생리적 발달이 활발히 이루어지는 새끼 단계(juvenile stage)로, 이 시기 개체는 생존률이 비교적 낮다. 6~12개월 사이의 개체는 아성체 단계(sub-adult stage)로 분류되며, 12개월 이상이 되면 성체(adult stage)로 간주된다. 이에 따라 개체의 생애주기에 따라 연령별 체중을 구분하여 적용하였다.

2. 개체군 동태의 기작적 요인

1) 개체 먹이 섭취 및 대사(Feeding and Metabolism)

야생멧돼지의 에너지 섭취는 먹이 자원의 양뿐만 아니라, 먹이 섭취 행동과 대사 효율에 따라 결정된다. 본

연구에서는 Elston & Hewitt (2010)의 연구를 기반으로 하여, 개체가 주어진 시간 동안 셀 내에서 실제로 섭취 가능한 먹이 자원의 양과, 그 먹이로부터 얻는 총 에너지량을 정량적으로 평가하기 위해 사용되었다.

$$E_i = (F_{max} F_c) \cdot C$$

여기서, B 는 한입 크기, R 는 물기 속도, T 는 먹이 시간을 의미한다. F_c 는 셀에 존재하는 현재 먹이량, C 는 먹이 칼로리 함량을 나타낸다.

대사는 생물체가 섭취한 먹이로부터 에너지를 획득하고 이를 생명 유지, 성장, 활동 등에 활용하는 일련의 생리적 과정을 의미한다. Kleiber의 기초대사량(basal metabolic rate, BMR) 방정식은 포유류의 대사율이 체중의 3/4제곱에 비례한다는 이론에 기반한다. 본 연구에서는 이러한 대사 원리를 반영하여, 개체가 섭취한 먹이 자원 중 일정 비율을 에너지로 전환하고, 그중 일부를 기초 대사에 소모되는 에너지로 차감하는 방식으로 에너지 균형을 설정하였다.

$$E_{BMR} = a \cdot M^b$$

M 는 현재 체중을 나타내며 a , b 는 대사 관련 계수이다.

에너지 섭취량이 기초대사에 필요한 에너지 요구량을 초과할 경우, 잉여 에너지는 체중 증가에 활용된다. 반대로, 섭취 에너지가 대사 요구량에 미치지 못할 경우에는 에너지 부족분에 비례하여 체중이 감소하도록 설정하였다. 체중 변화에 따른 에너지-질량 전환은

Elston & Hewitt (2010)의 연구를 기반으로 하였으며, 본 연구에서는 1g의 체중 증가에 4.8 kcal의 에너지가 소요되는 것으로 가정하였다.

$$\Delta E = E_i - E_{BMR} - R_a$$

$\Delta E > 0$ 일 경우, 잉여 에너지는 체중 증가에 사용되며, $\Delta E < 0$ 일 경우에는 부족한 에너지만큼 체중이 감소하도록 설정하였다.

$$\Delta M = \frac{\Delta E}{e}$$

ΔM 은 증가한 체중을 의미하며, e 는 에너지-질량 전환 계수이다.

2) 사망(Death)

사망은 크게 노화에 따른 자연사와 기아에 의한 사망으로 구분된다. 본 연구에서는 멧돼지의 평균 수명이 약 10년이라는 점을 반영하여, 개체의 최대 생존 기간을 10년으로 설정하였으며, 이를 초과한 개체는 자연사한 것으로 간주하였다(Weiler et al., 1998).

한편, 기아로 인한 사망은 개체가 더 이상 섭취 가능한 자원을 확보하지 못하여 체내 에너지가 고갈되는 경우에 발생하는 것으로 정의하였다. 이를 모델에 반영하기 위해, 개체의 체중이 성숙 체중에 비해 지나치게 낮은 경우 사망 확률이 급격히 증가하도록 로지스틱 함수를 적용하였다.

$$\mu_s = 1 - \frac{M_i}{M_{min}^{(s)}} \text{ for } M_i < M_{min}^{(s)}$$

μ_s 는 기아에 따른 사망률을 의미하며, M_i 는 현재 체중, $M_{min}^{(s)}$ 는 생존 가능한 최소 체중을 나타낸다. 수컷($M_{min}^{(s)}$)은 50kg, 암컷($M_{min}^{(f)}$)은 45kg을 의미한다.

3) 번식(Reproduction)

성체 암컷은 생식 가능 연령에 도달하고 일정 수준 이상의 체중을 확보한 이후 번식이 가능해진다. 일반적으로 한 번의 번식 주기당 4~12마리의 새끼를 출산

하며, 이들 새끼는 생애 초기 단계에서 평균 18.7%에서 35.9%의 사망률을 보이는 것으로 보고된 바 있다(Náhlík et al., 2003). 본 연구에서는 양호한 서식 환경을 전제로 하여 암컷 개체의 번식률을 50%로 설정하였으며(Bieber et al., 2005), 번식 조건으로는 생식 가능 연령(12개월)과 함께 최소 체중 45kg을 충족한 경우로 정의하였다. 새끼 개체군의 초기 생존률을 반영하기 위해 위 사망률 범위를 고려한 평균값을 모델에 적용하였다.

$$P(\text{reproduce}) = \begin{cases} 0.3, & \text{if mass} \\ 0, & \text{otherwise } \geq M^* \text{ and month} \equiv 4 \end{cases}$$

여기서, M^* 는 성체 체중을 의미한다.

4) 이동(Movement)

본 연구에서는 개체의 이동 경로가 주변 환경의 물리적 조건이나 서식지 적합성에 따라 영향을 받는다는 생태학적 전제를 바탕으로, 각 격자 셀에 1에서 10 사이의 무작위 저항값을 부여함으로써 환경적 제약을 모의하였다. 저항값이 낮을수록 개체가 이동하기 용이한 공간으로 간주되며, 반대로 값이 높을수록 이동에 어려움을 주는 공간을 나타낸다. 특히, 산림 지역은 멧돼지의 주요 서식지이자 이동이 가장 원활하게 이루어지는 공간으로 간주되어, 가장 낮은 저항값인 1로 고정하여 설정하였다(이동근 외, 2008). 이를 통해 개체가 저항값이 낮고 자원이 풍부한 방향으로 이동하는 경향을 모의할 수 있도록 하였다.

(1) 개체별 행동권(Individual-based home range)

개체별 행동권은 생애주기 단계, 성별, 사회적 지위 및 생리적 상태 등에 따라 달라지는 공간 이용 범위를 의미하며, 이는 개체의 행동 생태 및 공간 분산 양상을 결정짓는 핵심 요인 중 하나이다. 본 연구에서는 연령과 성별에 따라 개체별 행동권 크기를 차등 적용하였다. 특히, 생후 12개월 내외의 연령대에 해당하는 연령층은 가족 집단에 속한 개체에 비해 더 넓은 이동 거리와

Table 4. Friction Coefficients by Landscape Elements

Landscape Element	Friction Coefficient	Citation
Forest	1	Theobald, 2004

Table 5. Life-Cycle Stages of Wild Boar with Corresponding Age and Home Range

Life-cycle stage	Age (month)	Home range (km ²)		Citation
Sub-adult stage	6	0.43~1.37		Keuling et al., 2008
Adult stage	12	Male	4~6	Choi et al., 2006
		Female	0.015~0.091	Keuling et al., 2008

행동권 확대 경향을 보이는 것으로 보고되어 있으며 (Keuling et al., 2008), 이를 모델에 반영하였다. 또한, 새끼 개체는 일반적으로 어미와 함께 행동하는 사회적 구조를 보이기 때문에, 독립적인 행동권을 부여하지 않고 어미 개체의 공간 이용에 종속되도록 설정하였다.

$$(x^*, y^*) = \arg \max_{(x_i, y_i) \in N} \left(\frac{S(x_i, y_i)}{R(x_i, y_i)} \right)$$

$S(x_i, y_i)$ 는 먹이량이 많은 그리도로 이동, $R(x_i, y_i)$ 는 경로 저항도가 낮은 그리드로 이동, N 는 행동권 반경 내 가능한 후보지 목록(8방면 탐색)을 의미한다.

먹이 자원의 이용에 있어 개체는 일정 시간 이후 자원 고갈로 인해 에너지 획득 효율이 감소하는 수확체감 현상(diminishing return)을 경험하게 된다(McNab., 1980). 본 연구는 이러한 생태적 원리를 반영하여, 개체가 머무는 서식 패치 내의 먹이량이 설정된 임계값 이하로 감소할 경우, 해당 패치에서의 추가 체류를 중단하고 다른 패치로 이동하도록 모델링하였다.

$$F(x, y) < \theta$$

$F(x, y)$ 는 현재 위치의 먹이량을 나타내며, θ 는 먹이량 임계값을 의미한다.

III. 결과 및 고찰

1. 모형 결과

1) 개체군 및 환경 초기 구성

모형 초기화 단계에서는 시뮬레이션 영역 내에 총 9마리의 성체 멧돼지가 생성되었으며, 각 개체의 체중과 연령은 사전에 정의된 범위 내에서 무작위로 할당되었다(Table 5).

Table 6. Result of Initial Population

#	Sex	Mass (kg)	Age (month)
1	F	71.53	77
2	M	58.95	99
3	F	61.72	106
4	M	65.98	88
5	M	75.97	36
6	M	129.24	71
7	F	48.46	66
8	M	74.88	112
9	F	46.43	20
10	M	72.07	62
11	M	95.11	14

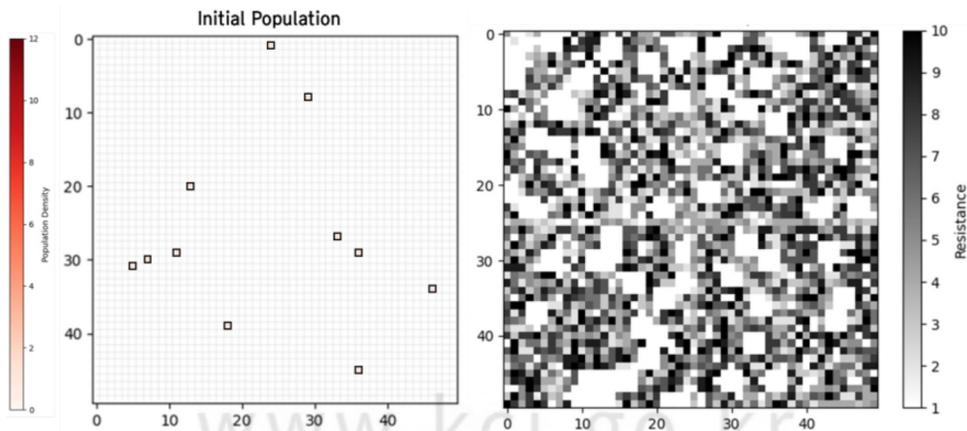


Figure 2. Spatial distribution of initial population density and resistance surface

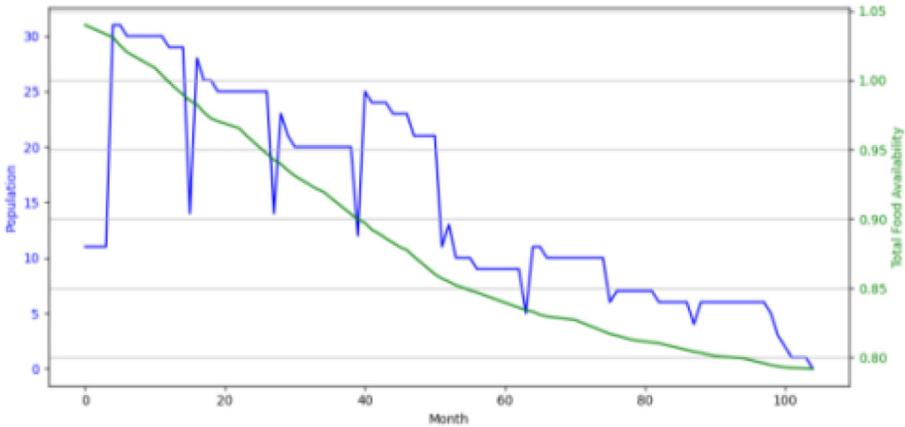


Figure 3. Population and food dynamics over time

이동 환경의 이질성을 반영하기 위해, 산림 지역을 제외한 모든 격자에 대해 1에서 10 사이의 값을 무작위로 부여하여 환경적 저항도를 설정하였다. 산림 지역은 멧돼지의 주요 서식지이자 이동이 용이한 공간으로 간주되어, 저항도 1의 균일한 값으로 정의하였다.

2) 개체군 밀도 및 먹이량 밀도 변화

본 연구에서는 생애주기 기반의 개체군 시뮬레이션 모델을 활용하여 멧돼지의 공간적 밀도 변화를 모의하였다. 시뮬레이션은 총 104개월간 진행되었으며, 개체군 밀도 변화와 자원 이용 패턴을 4개월 단위로 시각화하여 분석하였다.

모델 실행 초반, 개체군이 빠르게 증가하며 최대 약 30마리까지 도달하였으나, 이후 먹이 자원의 지속적인 감소와 함께 개체군 규모가 점진적으로 축소되었다. 특히, 자원의 고갈이 임계 수준에 도달하는 시점 이후 급격한 개체수 감소가 발생하였으며, 100개월 시점에서는 개체군이 완전히 소멸하는 것으로 나타났다.

시간 경과에 따른 공간 분포의 변화를 살펴보면, 초기에는 개체군이 산발적으로 분포하고 자원이 넉넉한 상태였으나, 시간이 지남에 따라 개체의 개체수와 분포가 증가하고, 자원이 집중된 지역으로 군집이 형성되는 양상이 관찰되었다. 이는 멧돼지가 먹이 자원 밀도가 높은 지역을 중심으로 선택적으로 공간을 이용하고, 집단 밀집이 자원 소모를 가속화시킨다는 것을 시사한다.

3) 이동 결과

모델의 이동 알고리즘을 검증하고 개체의 공간 이용 행태를 시각적으로 파악하기 위해, 시뮬레이션된 멧돼지 중 무작위로 한 개체를 선택하여 일정 기간 동안의 이동 경로를 추적하였다. 추적 결과, 개체는 주변 먹이 자원의 분포에 반응하여 상대적으로 먹이 밀도가 높은 방향으로 이동하는 경향을 보였다. 특히, 동일한 공간

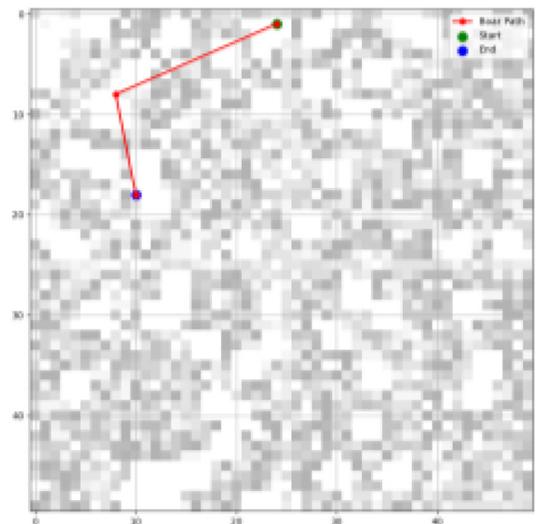


Figure 4. Result of tracked wild boar

Table 7. Characteristics of the Selected Wild Boar

#	Sex	Mass (kg)	Age (month)
1	F	71.53	77

에 위치한 다른 개체들의 활동으로 인해 이미 자원이 고갈된 패치를 피하고, 일정 거리 이상 떨어져 있더라도 높은 먹이량이 존재하는 지역으로 이동하는 행동이 관찰되었다.

2. 밀도 분포 양상 분석

시뮬레이션 결과, 암컷 개체의 번식은 약 4개월 주기로 관찰되었으며, 이는 모형 내 설정된 생식 주기와 일치하는 양상이다. 예를 들어, 시뮬레이션 월 4월에는 A 위치의 암컷이 6마리의 새끼를, B 위치의 암컷이 5마리, 그리고 C 위치의 암컷이 4마리의 새끼를 출산하는 등 번식 활동이 확인되었다. 이러한 결과는 연령과 체중이라는 생식 가능 조건을 충족한 개체에서 번식이 발생하도록 설정한 모델 구조를 반영한 것으로, 번식 활동이 공간적으로 분산되어 나타나는 경향도 함께 관

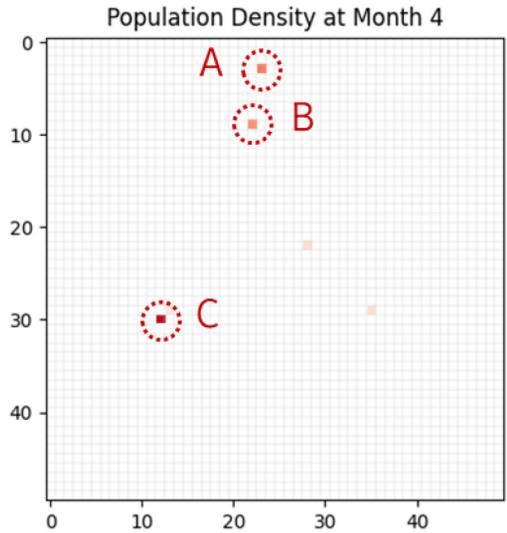


Figure 5. Simulated Reproduction Events of Adult Female Wild Boars

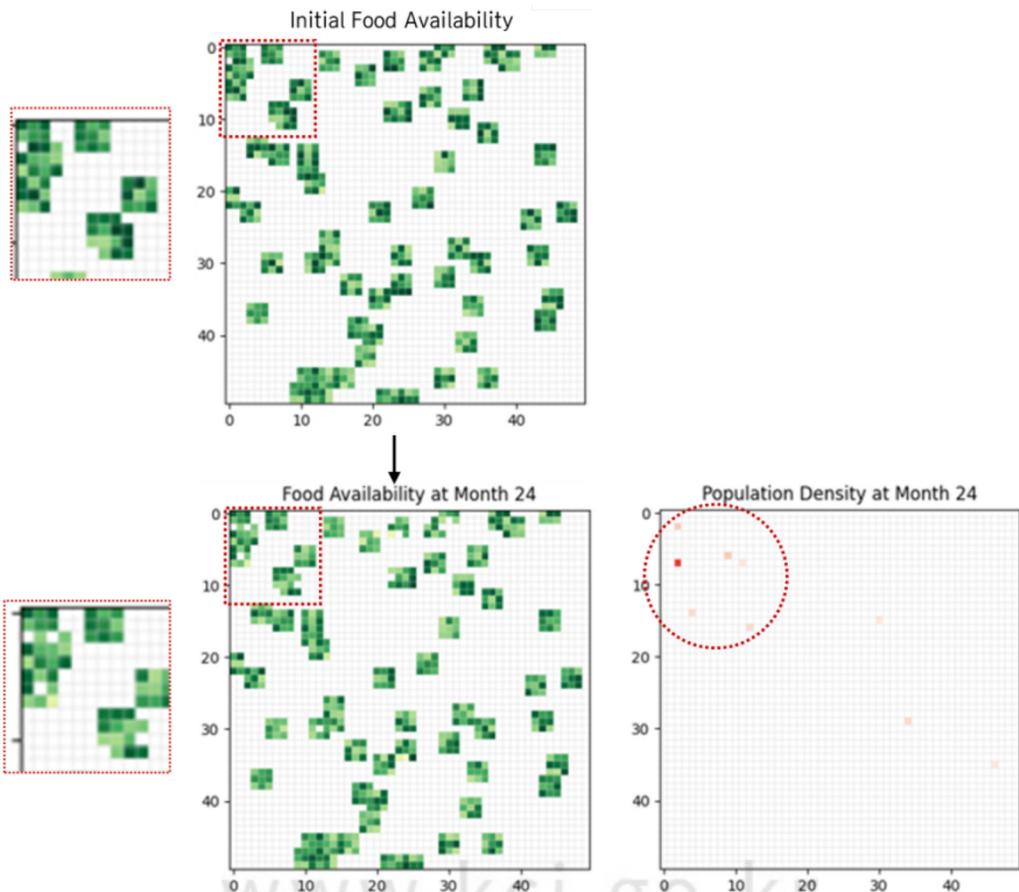


Figure 6. Decline in Total Food Availability Throughout the Simulation

찰되었다.

시물레이션 24개월 시점에서는 특정 지역에 멧돼지 개체군이 밀집된 공간 분포를 나타냈으며, 해당 지역의 먹이 자원은 초기보다 현저히 감소한 것으로 확인되었다(Figure 6). 개체 밀도가 높은 구역일수록 먹이 자원의 소비 속도가 빠르게 나타났고, 이는 공간 내 자원 이용과 개체군 분포 간의 밀접한 상호 관계를 보여준다. 아울러, 먹이 자원이 고갈된 지역 인근에서는 여전히 암컷 개체의 번식 활동이 확인되었으며, 이는 개체군이 과거 자원이 집중되었던 공간에 일정 기간 잔류하면서 생식 활동을 지속하고 있음을 보여준다. 초기에는 먹이 자원이 비교적 균일하게 분포되어 있었으나, 시간이 경과함에 따라 개체들이 자원 밀도가 높은 영역으로 집중되었고, 이로 인해 특정 지역에서 자원 고갈 현상이 두드러지게 발생하였다. 특히 개체가 다수 분포한 공간에서는 자원의 감소가 주변에 비해 뚜렷하게 진행되었으며, 이는 자원 기반 이동 전략이 군집 형성과 자원 소모의 공간적 불균형을 유발할 수 있음을 보여준다.

3. 모형의 활용 가능성과 발전 방향

고밀도 지역은 병원체의 지속적인 잔존과 전파 가능성이 높은 공간으로, 이는 질병 확산뿐 아니라 인간-야생동물 간 접촉 위험을 동시에 증가시키는 요인으로 작용한다(Plowright et al., 2024). 본 연구에서는 개체의 생애주기를 기반으로 한 IBM을 구축하여 멧돼지 개체군의 시공간적 밀도 변화를 정량적으로 분석하였다. 개체의 행동학적 특성을 반영한 기계적 접근(mechanistic approach)을 통해 개체군의 동태를 모의하고, 고밀도 지역의 발생 위치를 추정할 수 있었다.

그러나 실제 생태계의 복잡성과 환경의 동적 특성을 보다 정밀하게 반영하기 위해서는 몇 가지 보완이 필요하다. 우선, 본 모형은 가상의 공간 조건을 전제로 작동하므로, 현실적 시물레이션을 위해 실제 환경 데이터를 통합하는 것이 필요하다. 예를 들어, 순1차생산량(NPP)을 활용하여 먹이 자원의 가용성을 정량화하거나, Circuitscape 결과를 통합하여 이동 경향성을 반영함으로써 멧돼지의 실제 서식 조건과 공간적 이동 특성을 보다 정밀하게 재현할 수 있을 것이다.

또한, 본 모형의 에너지 소비 구조는 기초대사와 체중 증가 과정에 한정되어 있으며, 생태적 행동에 따른 에너지 소모는 반영되지 않았다. 실제 야생동물은 이동, 사회적 상호작용, 번식 활동 등 다양한 생리·행동적 과정에서 에너지를 소비하며, 이는 개체의 건강 상태, 생존률, 번식 성공률에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 이러한 행동 기반의 에너지 소비 구조를 모형에 통합함으로써, 보다 생태적으로 정합성이 높은 개체군 동태 시물레이션이 가능할 것으로 판단된다. 이러한 시물레이션 기반 복원 대상지의 식별은 기존의 정성적 판단에 의존한 전략과 달리, 정량적이며 공간적으로 구체화된 근거를 제공함으로써 자원의 효율적 배분과 과학적 복원 계획 수립에 기여할 수 있다.

IV. 결론

본 연구는 멧돼지의 생태적 특성과 공간 이용 행태를 반영한 생애주기 기반 개체군 시물레이션 모형을 구축하고, 이를 활용하여 개체군의 시공간적 밀도 분포와 먹이 자원 이용 양상을 정량적으로 분석하였다. 제안된 모형은 체중 기반 성장, 에너지 섭취와 대사, 번식, 사망, 이동 등의 과정을 통합적으로 고려하였으며, 104개월에 걸친 시물레이션을 통해 개체군의 군집 형성 및 붕괴, 자원 고갈, 번식 활동의 시점과 공간적 분포 등을 재현하였다.

시물레이션 결과, 먹이 자원이 풍부한 지역에서 개체군이 선택적으로 밀집되는 경향이 뚜렷하게 나타났으며, 이로 인해 해당 지역의 자원 소모 속도가 가속화되는 양상이 확인되었다. 또한 체중과 연령 등 생리적 조건을 충족한 암컷 개체의 주기적 번식이 재현되어, 생리·행동적 요인이 실제 개체군 동태에 미치는 영향을 효과적으로 반영하였다.

본 모형은 개체 단위의 행동을 기계적으로 구현함으로써 개체군의 밀도 변화와 서식지 이용 양상을 예측할 수 있다는 점에서, 아프리카돼지열병(ASF)과 같은 질병 확산 위험 지역을 사전에 식별하고 이에 대한 대응 전략을 수립하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 개체 밀도가 높은 지역은 병원체의 유지와 전파가 용이한 공간으로 기능할 수 있으므로,

방역·서식지 관리 및 생태 복원 대상지의 우선순위 설정 등 공간 기반 의사결정의 과학적 근거로 활용될 수 있다. 다만, 본 모형은 가상의 공간 조건을 전제로 작동하므로 향후 연구에서는 실제 환경 데이터를 통합하고, 사회적 상호작용 및 이동 활동에 따른 에너지 소비를 반영함으로써 보다 현실적이고 생태적으로 정합

성 높은 결과를 도출할 필요가 있다. 이를 통해 본 모형의 예측력을 향상시키고, 질병 관리 및 생태 복원 계획 수립에 있어 보다 정량적이고 실증적인 근거를 제공할 수 있을 것이다.

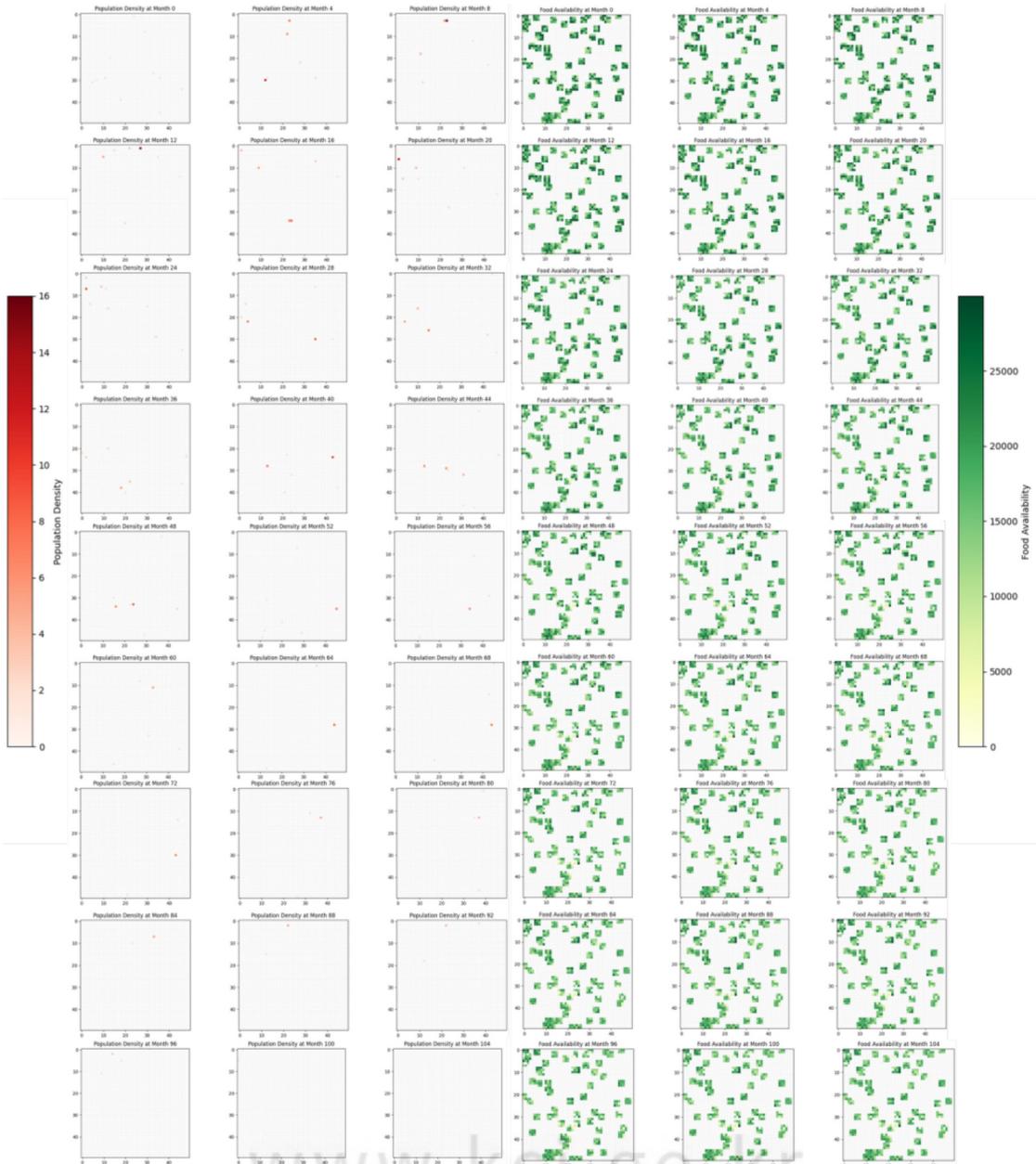


Figure 7. Result of simulation

V. Appendix

시뮬레이션 기간 동안(0개월부터 100개월까지) 멧돼지의 개체군 밀도와 먹이 자원 분포의 시공간적 변화를 월 단위(4개월 간격)로 시각화하였다. 개체군 밀도는 붉은 색조로 표현되며, 진한 색일수록 해당 격자 내 개체 수가 많은 지역을 의미한다. 먹이 자원은 녹색 색조로 나타나며, 색이 진할수록 해당 지역의 자원 밀도가 높음을 나타낸다. 각 행은 특정 시점의 공간 분포를 보여주며, 이를 통해 개체군의 공간 집중 양상과 이에 따른 자원 고갈 과정을 동시에 비교할 수 있다. 초기에는 개체군이 산발적으로 분포하고 자원이 전반적으로 풍부한 상태였으나, 시뮬레이션이 진행됨에 따라 개체들이 자원이 풍부한 지역으로 군집하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 이로 인해 해당 지역의 자원 소모가 가속화되며, 공간 내 자원과 개체군 분포 간 상호작용이 심화되는 양상을 확인할 수 있다.

References

- Bieber, C., & Ruf, T. (2005). Population dynamics in wild boar *Sus scrofa*: ecology, elasticity of growth rate and implications for the management of pulsed resource consumers. *Journal of Applied Ecology*, 42(6), 1203-1213.
- Cwynar, P., Stojkov, J., & Wlazlak, K. (2019). African Swine fever status in Europe. *Viruses*, 11(4), 310.
- Doherty, T. S., Hays, G. C., & Driscoll, D. A. (2021). Human disturbance causes widespread disruption of animal movement. *Nature Ecology & Evolution*, 5(4), 513-519.
- Elston, J. J., & Hewitt, D. G. (2010). Intake of mast by wildlife in Texas and the potential for competition with wild boars. *The Southwestern Naturalist*, 55(1), 57-66.
- Focardi, S., Gaillard, J. M., Ronchi, F., & Rossi, S. (2008). Survival of wild boars in a variable environment: unexpected life-history variation in an unusual ungulate. *Journal of Mammalogy*, 89(5), 1113-1123.
- Gamelon, M., Gaillard, J. M., Servanty, S., Gimenez, O., Toigo, C., Baubet, E., ... & Lebreton, J. D. (2012). Making use of harvest information to examine alternative management scenarios: a body weight-structured model for wild boar. *Journal of Applied Ecology*, 49(4), 833-841.
- Guberti, V., Khomenko, S., Masiulis, M., & Kerba, S. (2022). *African swine fever in wild boar: ecology and biosecurity* (Vol. 28). Food & Agriculture Org.
- Keuling, O., Baubet, E., Duscher, A., Ebert, C., Fischer, C., Monaco, A., ... & Thurfjell, H. (2013). Mortality rates of wild boar *Sus scrofa* L. in central Europe. *European Journal of Wildlife Research*, 59, 805-814.
- Kleiber, M. (1975). Metabolic turnover rate: a physiological meaning of the metabolic rate per unit body weight. *Journal of theoretical biology*, 53(1), 199-204.
- McNab, B. K. (1980). Food habits, energetics, and the population biology of mammals. *The American Naturalist*, 116(1), 106-124.
- Náhlik, A., & Sándor, G. (2003). Birth rate and offspring survival in a free-ranging wild boar *Sus scrofa* population. *Wildlife Biology*, 9, 37-42.
- Plowright, R. K., Ahmed, A. N., Coulson, T., Crowther, T. W., Ejotre, I., Faust, C. L., ... & Keeley, A. T. (2024). Ecological countermeasures to prevent pathogen spillover and subsequent pandemics. *Nature Communications*, 15(1), 2577.
- Scillitani, L., Monaco, A., & Toso, S. (2010). Do intensive drive hunts affect wild boar (*Sus scrofa*) spatial behaviour in Italy? Some evidences and management implications. *European Journal of Wildlife Research*, 56(3), 307-318.
- 서창완, & 박종화. (2000). GIS 와 로지스틱 회귀분석을 이용한 멧돼지 서식지 모형 개발. 한국 GIS 학회지, 8(1), 85-99.
- Seo, C. W. (2000). Wild boar (*Sus scrofa coreanus* Heude) habitat modeling using GIS and logistic regression. Ph. D. thesis in Graudate School of Environmental

- Science of Seoul National University.
- Tack, J. (2018). Wild boar (*Sus scrofa*) populations in Europe. A scientific review of population trends and implications for management. Brussels (Belgium): European Landowners' Organization
- Weiler, U., Claus, R., Schnoebelen-Combes, S., & Louveau, I. (1998). Influence of age and genotype on endocrine parameters and growth performance: a comparative study in Wild boars, Meishan and Large White boars. *Livestock Production Science*, 54(1), 21-31.
- White, C. R., & Seymour, R. S. (2003). Mammalian basal metabolic rate is proportional to body mass $2/3$. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(7), 4046-4049.
- 이현정, 김휘문, 김경태, 정승규, 김유진, ... & 송원경. (2022). 멧돼지 (*Sus scrofa*) 서식지 및 이동 특성을 고려한 연결성 모델링 연구. *한국환경복원 기술학회지 (환경복원기술)*, 25(4), 33-47.
- Lee, H.-J., Kim, H.-M., Kim, K.-T., Jung, S.-G., Kim, Y.-J., & Song, W.-K. (2022). Connectivity modeling considering habitat and movement characteristics of wild boar (*Sus scrofa*). *Journal of Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 25(4), 33-47.
- Podgórski, T., Borowik, T., Łyjak, M., & Woźniakowski, G. (2020). Spatial epidemiology of African swine fever: Host, landscape and anthropogenic drivers of disease occurrence in wild boar. *Preventive veterinary medicine*, 177, 104691.
- 이동근, 송원경, & 전성우. (2008). 경관투과성 및 최소비용경로 분석을 통한 수도권 지역의 광역생태축 구축 연구. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, 11(3), 94-106.
- Lee, D.-G., Song, W.-K., & Jeon, S.-W. (2008). A study on the establishment of a metropolitan ecological network in the Seoul metropolitan area using landscape permeability and least-cost path analysis. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, 11(3), 94-106.
- Theobald, D. M. (2004). Placing exurban land-use change in a human modification framework. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(3), 139-144.
- 최태영, 이윤수, & 박종화. (2006). 지리산의 멧돼지 *Sus scrofa* 행동권. *Journal of Ecology and Environment*, 29(3), 253-257.
- Choi, T.-Y., Lee, Y.-S., & Park, J.-H. (2006). Home range of wild boar (*Sus scrofa*) in Jirisan National Park, Korea. *Journal of Ecology and Environment*, 29(3), 253-257.