

# 수달의 보전을 위한 전국자연환경조사 시계열 자료 기반 잠재 서식적합지역 분석<sup>1a</sup>

- 강원도를 대상으로 -

김호걸<sup>2</sup> · 모용원<sup>3\*</sup>

## Potential Habitat Area Based on Natural Environment Survey Time Series Data for Conservation of Otter (*Lutra lutra*)<sup>1a</sup>

- Case Study for Gangwon-do -

Ho Gul Kim<sup>2</sup>, Yongwon Mo<sup>3\*</sup>

### 요약

전 세계 다양한 국가들을 비롯하여 우리나라도 생물다양성을 보전하기 위한 노력에 동참하고 있다. 특히 생물종과 관련해서는 특정 생물종을 대상으로 서식적합분석을 실시하여 잠재적인 서식 적지를 찾고 보전방안을 수립하는 연구들이 활발하게 수행되고 있다. 그러나 현재까지 축적된 정보를 바탕으로 한 서식적합지역의 중장기 변화에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구는 강원도 지역을 대상으로 멸종위기 야생생물 1급으로 지정된 수달을 대상으로 서식적합지역의 시계열 변화를 분석하고 변화 양상을 살펴보고자 하였다. 시계열 변화 분석을 위해서 약 20년간 수행된 2차, 3차, 4차 전국자연환경조사의 수달 종 출현지점 조사자료를 이용하였다. 또한 각 조사시기 별 서식환경을 반영하기 위해 조사시기와 일치하는 토지피복도를 환경변수 제작에 활용하였다. 서식적합지역 분석을 위해서는 종의 출현 정보만을 바탕으로 모델 구동이 가능하며, 선행연구를 통해 신뢰도가 높다고 입증된 MaxEnt 모형을 사용하였다. 연구결과, 각 조사시기 별 수달의 서식적합지역 지도가 도출되었으며, 하천을 중심으로 서식지가 분포하는 경향이 나타났다. 모델링 결과 도출된 환경변수의 반응곡선을 비교하여 수달이 선호하는 서식지의 특성을 파악하였다. 조사시기 별 서식 적지의 변화를 살펴본 결과, 2차 전국자연환경조사를 기반으로 한 서식 적지가 가장 넓은 분포를 나타냈으며, 3, 4차 조사의 서식 적지는 면적이 줄어드는 경향을 나타냈다. 또한, 3개 조사시기 분석결과를 종합하여 서식 적지의 변화 양상을 분석하고 유형화하였다. 변화 유형에 따라서 현장조사, 모니터링, 보호지역 설정, 복원계획과 같이 서로 다른 보전계획을 제안하였다. 본 연구는 수달 서식 적지의 위치와 면적의 시계열 변화를 볼 수 있는 종합분석 지도를 제작하고, 지역별 서식 적지 변화 유형에 따라 필요한 보전계획을 제안하였다는 점에서 의의를 갖는다. 본 연구에서 제안된 방법과 결과는 향후 서식지 보전 및 관리 방안 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

**주요어:** MaxEnt, 보호지역, 서식지 분포 변화, 서식지 적합성 지도, 서식지 선호 특성

1 접수 2020년 10월 16일, 수정 (1차: 2020년 11월 28일, 2차: 2020년 12월 9일), 게재확정 2020년 12월 15일

Received 16 October 2020; Revised (1st: 28 November 2020, 2nd: 9 December 2020); Accepted 15 December 2020

2 청주대학교 조경도시계획전공 교수 Major in Landscape Urban Planning, Dept. of Human Environment Design, Cheongju University., Daeseong-ro 298, Cheongju-si, Korea (khgghk87@gmail.com)

3 영남대학교 산림자원 및 조경학과 교수 Dept. of Forest resources and Landscape architecture, Yeungnam Univ., Gyeongsan 38541, Korea (csmo12@yu.ac.kr)

a 이 논문은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 도시생태 건강성 증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다.(2019002770001)

\* 교신저자 Corresponding author: csmo12@yu.ac.kr

## ABSTRACT

Countries around the world, including the Republic of Korea, are participating in efforts to preserve biodiversity. Concerning species, in particular, studies that aim to find potential habitats and establish conservation plans by conducting habitat suitability analysis for specific species are actively ongoing. However, few studies on mid- to long-term changes in suitable habitat areas are based on accumulated information. Therefore, this study aimed to analyze the time-series changes in the habitat suitable area and examine the otters' changing pattern (*Lutra lutra*) designated as Level 1 endangered wildlife in Gangwon-do. The time-series change analysis used the data on otter species' presence points from the 2nd, 3rd, and 4th national natural environment surveys conducted for about 20 years. Moreover, it utilized the land cover map consistent with the survey period to create environmental variables to reflect each survey period's habitat environment. The suitable habitat area analysis used the MaxEnt model that can run based only on the species presence information, and it has been proven to be reliable by previous studies. The study derived the habitat suitability map for otters in each survey period, and it showed a tendency that habitats were distributed around rivers. Comparing the response curves of the environmental variables derived from the modeling identified the characteristics of the habitat favored by otters. The examination of habitats' change by survey period showed that the habitats based on the 2nd National Natural Environment Survey had the widest distribution. The habitats of the 3rd and 4th surveys showed a tendency of decrease in area. Moreover, the study aggregated the analysis results of the three survey periods and analyzed and categorized the habitat's changing pattern. The type of change proposed different conservation plans, such as field surveys, monitoring, protected area establishment, and restoration plan. This study is significant because it produced a comprehensive analysis map that showed the time-series changes of the location and area of the otter habitat and proposed a conservation plan that is necessary according to the type of habitat change by region. We believe that the method proposed in this study and its results can be used as reference data for establishing a habitat conservation and management plan in the future.

**KEY WORDS: MAXENT, PROTECTED AREA, CHANGES OF HABITAT DISTRIBUTION, HABITAT SUITABILITY MAPPING, HABITAT PREFERENCE CHARACTERISTICS**

## 서론

전 세계적으로 생물다양성의 보전에 대한 노력이 진행되고 있다. 생물다양성협약(Convention on Biological Diversity)은 1993년부터 본격적으로 발효되어 현재 196개국에 참여하고 있는 국제조약이다. 많은 국가들이 생물다양성 보전, 지속가능한 이용, 유전자원 이익의 공정하고 공평한 배분을 목표로 시기별로 달성해야 할 전략과 세부적인 목표에 대해 합의해왔다 (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2014). 또한, 2050년의 비전을 “Living in harmony with nature”로 설정하고 지속적으로 생물다양성 보전을 위해 노력하고 있다.

생물다양성 보전과 관련된 연구는 생태계, 종, 유전자 수준에서 다양하게 수행되고 있다(Hoban et al., 2020; Tsioumani, 2020). 특히 종과 관련된 분야에서는 특정 생물종을 대상으로 서식지의 특성을 분석하고 이를 바탕으로 서식지 보전방안을 수립하는 연구가 중요한 목표이다. 이를 위해서 생물종 서식지에 대한 현장 조사, 환경변수 구축, 서식적합분석을 통해 잠재적인 서식 적지를 찾는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

Zhao et al.(2019)는 중국의 강활(*Notopterygium incisum*)이라는 식물종의 잠재 서식지의 분포를 기후변화를 고려하여 예측하는 연구를 수행하였다. Evcin et al.(2019)는 유럽 흑해 지역에 서식하는 유럽노루를 대상으로 Maximum Entropy 접근법을 바탕으로 잠재적 서식지 분포를 분석하였다.

Ghanbarian et al.(2019)는 R statistics의 Generalized linear model을 이용하여 *Artemisia aucheri*라는 식물종의 서식적합 지역을 지도화하였다. Slauson et al.(2019)는 멸종위기에 처한 흙볼트 담비(*Martes caurina humboldtensis*)의 서식적합성평가를 캘리포니아 해안과 오리건 해안에 대해서 수행하였다. 이상의 연구들은 공통적으로 서식적합분석이 생물종의 보전을 위한 정책 결정 수립을 지원하는 강력한 도구임을 밝히고 있다.

우리나라에서도 환경부와 국립생태원을 중심으로 생물종의 서식지를 파악하고 보전하기 위한 다양한 사업과 정책을 시행하고 있다. 특히 1986년부터 4차에 걸쳐서 수행된 전국자연환경조사가 대표적인 사업이다. 1차 조사는 1986년에서 1990년까지 수행되었으며, 2차 조사는 1997년에서 2005년, 3차 조사는 2006년에서 2013년, 4차 조사는 2014년에서 2018년까지 수행되었다. 다만, 1차 조사는 GIS 자료의 구축이 되지 않았기 때문에 분석에 활용이 어려운 상황이다. 이러한 노력에도 불구하고, 우리나라의 서식적합지역 관련 중장기 변화 분석에 관한 연구는 미흡한 상황이다.

해외에서는 IUCN red list에 속하는 생물종 서식지 및 인구 밀도 모델을 시계열 토지 피복을 바탕으로 분석한 연구(Santini et al., 2019), 시계열 이미지 변환 분석을 통해 장기간의 야생동물 서식지 변화 패턴을 분석하는 연구(Zheng et al., 2019)와 같이 시계열 자료를 기반으로 한 연구가 수행되고 있다. 우리나라에서도 장기간 축적된 전국자연환경조사 자료를 활용한 시계열 서식적합지역 분석 연구를 수행하여, 잠재적 서식 적지의 변화를 살피고 이에 대응하기 위한 정책 수립을 지원하는 연구가 필요하다.

본 연구에서 선정된 대상 종인 수달(*Lutra lutra*)은 하천생태계의 건강성을 판단하는 데 도움을 주는 지표종이다. 과거 모피획득을 목적으로 한 남획과 1960년대 개발사업으로 인한 수질오염과 하천의 직강화 사업 등으로 인하여 서식지가 파괴되어 개체 수가 감소하게 되었다 (Sim et al., 2020). 그로 인해 1982년에는 문화재청 지정 천연기념물 제330호로 지정되었고, 2005년에는 환경부의 멸종위기 야생생물 1급으로 지정되어 보호 및 관리되고 있으며, 국제환경보전기구에서도 red list에 포함하고 있는 중요 생물종이다 (Shin et al., 2020; Sim et al., 2020). 수달은 식육목 족제비과에 해당하며, 전 세계에 총 13개 종이 분포하며, 그 중 Eurasian Otter 한 종만 우리나라에 서식하고 있다 (Jeong, 2014). 일반적으로 육상에 서식하는 포유류들이 일정한 반경을 중심으로 행동권을 가지는 것과 다르게, 수달은 69% 이상이 하천으로 형성된 선형의 서식지에서 살아가는 특징을 갖는다 (Kim et al., 2015).

이에 본 연구에서는 수달을 대상으로 2차에서 4차에 이르기까지 약 20년간 수행된 전국자연환경 조사 시계열 자료를 활용하여 조사시기 별 서식적합지역을 분석하고, 3개 조사시기 분

석 결과를 종합하여 현장 조사, 모니터링, 보호지역 설정, 복원 계획과 같은 보전계획 관련 정책의 수립이 필요한 지역을 찾고자 한다. 특히 각 조사시기에 일치하는 토지피복도를 환경변수 제작에 활용함으로써, 사실적인 서식 적지 변화를 분석하고자 한다. 조사시기 별 서식 적지의 중첩분석을 통해 수달 서식 적지의 위치와 면적의 시계열 변화를 볼 수 있는 종합분석 지도를 제작하고, 지역별로 필요한 보전계획을 제안하고자 한다. 또한, 환경변수의 반응곡선을 비교하여 수달이 선호하는 서식지의 특성을 파악하고자 한다. 본 연구에서 제안된 방법과 결과는 향후 서식지 보전 및 관리 방안 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 연구방법

### 1. 연구의 범위

본 연구에서는 2, 3, 4차 자연환경조사에서 지속적으로 조사된 생물종이자, 멸종 위기 생물로 지정된 수달을 대상 종으로 선정하였다. 연구의 공간적 범위는 강원도로 설정하였다(Fig. 1). 환경변수에 사용된 토지피복도가 강원도 북부지역에 대해서는 제공되지 않아 평가가 불가능하였기 때문에, 강원도 북부 지역 일부는 대상지에서 제외되었다. 전국자연환경조사는 조사시기 별로 생물종 조사방식에 차이가 있는데, 2차는 지형과 생태권을 고려한 산지를 중심으로, 3, 4차는 도엽의 격자를 중심으로 조사되었다 (Table 1)(National Institute of Ecology, 2016). 따라서 서로 다른 조사방식으로 인해 생물종 출현 여부 조사의 결과가 달라질 수 있다. 강원도는 대부분 지역이 산지로 구성되어 있어 이와 같은 조사방식의 차이에도 불구하고 유사한 조사 결과가 도출될 수 있을 것이라고 판단하여 대상지로 설정하였다.

3개 시기의 전국자연환경조사 자료에서 종분포모형에 입력할 수달의 출현자료 정보를 추출하였다. 각 조사시기 별로 구축된 좌표 정보를 바탕으로 ESRI사의 ArcMap 10.5을 활용하여 공간자료로 구축하였다. 전국의 수달 출현지점 중에서 강원도 행정구역으로부터 2km 이내에 있는 출현지점들을 선정하였다(Fig. 1). 비록 강원도를 연구대상지로 선정하였더라도 수달과 같은 생물종은 정확히 행정구역의 경계를 따르거나 구분하면서 서식하지 않는다. 따라서 강원도 행정 경계 인근에 서식하는 수달의 서식지 특성까지도 같이 고려하기 위해서 더 넓은 반경의 출현지점까지 포함하였다. 또한, 분석 결과의 신뢰도를 높이기 위하여 전국자연환경조사 자료의 조사 방법상에 청문으로 표기된 출현지점 자료는 제외하였다.

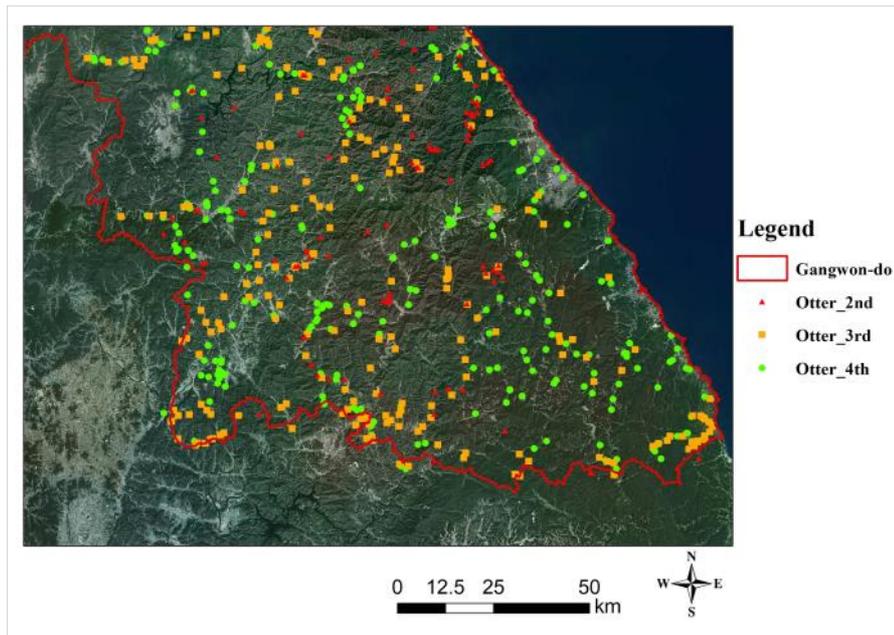


Figure 2. Scope of study and presence points of Otter (2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup>, 4<sup>th</sup> natural environment survey).

Table 1. Properties of natural environment survey

Classification	Period	Investigation unit	Apply to this study
1 <sup>st</sup> survey	1986 - 1990	Administrative district	X
2 <sup>nd</sup> survey	1997 - 2005	Topography and mountain area	O
3 <sup>rd</sup> survey	2006 - 2013	Index of digital topographic map	O
4 <sup>th</sup> survey	2014 - 2018	Index of digital topographic map Ecosystem and Nature Map	O

## 2. 서식적합지역 분석 방법

수달의 잠재적 서식적합지역을 분석하기 위한 중분포모형으로는 Maximum Entropy Model (MaxEnt)를 활용하였다. MaxEnt 모형은 종속변수로 생물종의 출현지점 자료만을 요구하므로, 전국자연환경조사 자료에 비출현지점 정보가 없는 현재 상황에서 사용하기에 적합한 모형이다. 또한, 출현지점 자료만 요구하는 모형 중에서 높은 신뢰도를 보이는 것으로 평가되어 (Phillips et al., 2006), 개발 이후 현재까지 널리 활용되고 있는 모형이다 (Kim et al., 2013; Bradie and Leung, 2017; Zhang et al., 2018). 본 연구에서는 3.4.1 버전의 MaxEnt 소프트웨어를 활용하였다.

MaxEnt 모형을 구동하는 과정에서는 5 fold cross validation을 실시하여 모형의 구동에서 발생하는 불확실성을 고려하고자 하였다. 모형에서 도출된 결과의 신뢰도 평가를 위

해서는 Receiver Operating Characteristic (ROC) 곡선 분석을 실시하였고, ROC 곡선 분석을 통해서 도출된 Area Under Curve (AUC) 값을 신뢰도 평가 기준으로 활용하였다. 모형 구동의 결과물로 도출된 수달의 출현확률지도로 잠재 서식적합지도로 제작하기 위해 필요한 임계값으로는 Maximum training sensitivity plus specificity의 값을 이용하였다. 이 방법은 훈련 데이터의 민감도와 특이도 값의 합이 최대가 되는 경우의 임계값으로, Liu et al.(2013)에 따르면 출현지점만을 이용할 때 가장 신뢰도가 높은 임계값 계산 기준으로 확인되었다. 또한, MaxEnt를 이용하여 잠재적인 서식 적지를 파악하고 보전계획을 수립하는 여러 연구에서 임계값 계산 방법으로 활용되었다(Sen et al., 2016; Ning et al., 2017).

모형에 입력된 환경변수의 기여도 및 중요성을 평가하기 위해서 Jackknife 방식을 이용하였다. 또한, 환경변수별 반응곡선을 제작하여 각 조사시기 별로 수달이 선호하는 서식지의

Table 2. List of environmental variables

Variable	Abbreviation	Type	Reference
Elevation	elevation	Continuous	Jeong et al., 2015
Slope	slope	Continuous	Jeong et al., 2015; Kim et al., 2015
Stream order of watershed	watershed	Categorical	Eknesh and Randhir, 2007; Lee and Kim, 2010
Landcover <sup>1)</sup>	landcover	Categorical	Jeong et al., 2015
Distance from forest	forest	Continuous	
Distance from industrial area	indus	Continuous	Lee and Kim, 2010;
Distance from residential area	resi	Continuous	Jeong et al., 2015;
Distance from river	river	Continuous	Sim et al., 2020
Distance from road	road	Continuous	

특성을 분석하였다. MaxEnt 모형은 2, 3, 4차 조사시기 별로 따로 구동하였다. 각 조사시기 별로 도출된 잠재 서식적합지역을 중첩분석을 기반으로 종합하고, 시계열 분석을 고려하여 분류된 공간 단위 별로 수달의 서식지 보전에 필요한 대책을 제안하고자 하였다.

### 3. 연구자료

본 연구에 활용된 환경변수의 해상도는 활용 가능한 Digital Elevation Model(DEM)과 통일하기 위해 30m × 30m로 설정하였다. MaxEnt가 Raster기반으로 분석이 되므로, Polygon으로 제공되는 토지피복도를 30m × 30m의 Raster 지도로 변환하였다. 환경변수로는 고도, 경사, 하천 차수, 토지 피복, 산림으로부터의 거리, 농업지역으로부터의 거리, 주거지역으로부터의 거리, 하천으로부터의 거리, 교통지역으로부터의 거리를 활용하였다 (Table 2). 모형의 입력자료 및 결과에서는 변수명을 줄여서 약어로 표기하였다 (Table 2). 환경변수의 값의 특성에 따라서 모형을 구동할 때에는 연속형 변수와 범주형 변수로 구분하여 입력하였다. 각 환경변수는 선행연구를 참조하여 제작 및 선정하였다.

본 연구에서는 조사시기에 맞는 환경변수의 구축을 위해서 전국자연환경조사 2, 3, 4차 시기와 일치하는 토지피복도를 환경부 E-GIS 시스템에서 수집하였다. 4차 조사시기의 경우, 세

분류로 제공된 지도를 ArcMap 10.5의 Dissolve 기능을 이용하여 제작하였다. 이를 통해, 수달의 출현지점 변화뿐만 아니라, 각 조사시기에 맞는 토지 피복 기반의 환경변수의 변화까지 반영한 서식적합지역 분석이 가능하였다. 2차 조사시기 (1997-2005년)에 맞는 토지피복으로 2000년도, 3차 조사시기 (2006-2013년)에 맞는 토지피복으로 2010년도, 4차 조사시기 (2014-2018년)에 맞는 토지피복으로 2017년도의 자료를 제작하였고, 시기별 환경변수를 제작하고 모형에 입력하였다. 다만, 환경변수 중에서 고도, 경사, 하천 차수는 시간에 따라 큰 변화가 없을 것으로 판단하고 동일하게 적용하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 결과

#### 1) 2차 조사 기반 서식적합분석

전국자연환경조사 2차 자료를 바탕으로 MaxEnt 모형을 구동한 결과, AUC 값은 0.832로 분석되었다. Carter et al.(2016)에 따르면, ROC 분석을 통해 도출된 AUC 값이 0.9에서 1.0이면 뛰어남, 0.8에서 0.89이면 좋음, 0.7에서 0.79면 공정함, 0.51에서 0.69이면 좋지 못하다고 평가된다고 한다. 따라서 2차 조사기반 분석의 결과는 신뢰도가 좋다고 판단된다. 5회 구동을 통해 도출된 임계값은 0.296으로 나타났다 (Table 3). 임계값은 0에서 1의 값을 갖는 수달의 출현확률 지도에서 서식적합지역을 추출하는 기준값으로 활용되었다.

모형에 입력된 환경변수의 기여도와 중요도는 Table 4와 같이 도출되었다. 기여도는 주거지역으로부터의 거리, 하천 차수, 하천으로부터의 거리, 고도, 농업지역으로부터의 거리, 산

Table 3. MaxEnt model run of 2<sup>nd</sup> natural environment survey

MaxEnt model run					Average
1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>	5 <sup>th</sup>	
0.295	0.335	0.301	0.238	0.313	<b>0.296</b>

1) 토지피복 변수의 범례는 다음과 같음. 1:시가화 건조지역, 2:농업지역, 3:산림지역, 4:초지, 5:습지, 6:나지, 7:수역

Table 4. Contribution and importance of variable for 2<sup>nd</sup> natural environment survey (average value of five run)

Variable	Percent contribution	Permutation importance
resi	40.0	45.6
watershed	31.7	20.4
river	13.2	15.6
elevation	7.2	7.8
indus	4.0	1.4
forest	2.4	6.3
road	0.6	0.6
landcover	0.5	1.6
slope	0.3	0.6

림으로부터의 거리, 교통지역으로부터의 거리, 토지 피복, 경사의 순서로 도출되었다. 이 중에서 상위 4개 변수(주거지역으로부터의 거리, 하천 차수, 하천으로부터의 거리, 고도)의 기여도의 합이 91%가 넘는 것으로 나타나, 수달의 서식지 분석에 있어서 중요한 역할을 하는 것으로 확인되었다.

## 2) 3차 조사기반 서식적합분석

전국자연환경조사 3차 자료를 바탕으로 MaxEnt 모형을 구동한 결과, AUC 값은 0.872로 나타났다. 이는 2차 조사기반 분석 결과보다 더 높은 수치이며, 3차 조사기반 분석의 결과도 신뢰도가 좋다고 판단된다. 5회 구동을 통해 도출된 임계값은 0.258로 도출되었다 (Table 5). 2차 조사기반 분석에서와 마찬가지로 임계값은 수달의 출현확률 지도에서 서식적합지역을 추출하는 기준값으로 활용되었다.

Table 5. MaxEnt model run of 3<sup>rd</sup> natural environment survey

MaxEnt model run					Average
1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>	5 <sup>th</sup>	
0.209	0.237	0.241	0.256	0.346	<b>0.258</b>

Table 6. Contribution and importance of variable for 3<sup>rd</sup> natural environment survey (average value of five run)

Variable	Percent contribution	Permutation importance
resi	49.8	32.3
watershed	27.2	19.8
river	6.6	17.0
elevation	5.7	8.0
indus	4.3	9.2
forest	2.9	6.2
road	1.6	4.6
landcover	1.1	2.2
slope	0.7	0.6

모형에 입력된 환경변수의 기여도와 중요도는 Table 6과 같이 도출되었다. 기여도는 하천 차수, 하천으로부터의 거리, 고도, 교통지역으로부터의 거리, 산업지역으로부터의 거리, 토지 피복, 산림으로부터의 거리, 경사, 주거지역으로부터의 거리 순서로 분석되었다. 2차 조사기반 분석 결과와는 다르게, 주거지역으로부터의 거리 변수는 최하위로 기여도가 낮아졌다. 한편, 하천 차수, 하천으로부터의 거리, 고도의 3개 변수는 2차 조사기반 분석과 동일하게 상위의 기여도를 나타냈다.

## 3) 4차 조사 기반 서식적합분석

전국자연환경조사 4차 자료를 바탕으로 MaxEnt 모형을 구동한 결과, AUC 값은 0.871로 나타났다. 이는 3차 조사기반 분석 결과와 비슷한 수치로, 4차 조사기반 분석의 결과도 신뢰도가 좋다고 판단된다. 5회 구동을 통해 도출된 임계값은 0.317로 나타났다 (Table 7). 2, 3차 조사기반 분석에서와 마찬가지로 임계값은 수달의 출현확률 지도에서 서식적합지역을 추출하는 기준값으로 활용되었다.

Table 7. MaxEnt model run of 4<sup>th</sup> natural environment survey

MaxEnt model run					Average
1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>	5 <sup>th</sup>	
0.362	0.288	0.331	0.294	0.309	<b>0.317</b>

모형에 입력된 환경변수의 기여도와 중요도는 Table 8과 같이 도출되었다. 기여도는 하천으로부터의 거리, 하천 차수, 고도, 교통지역으로부터의 거리, 산업지역으로부터의 거리, 주거지역으로부터의 거리, 토지 피복, 산림으로부터의 거리, 경사의 순서로 도출되었다. 3차 조사기반 분석 결과와 상위 5개 변수는 동일하고, 기여도의 값에는 차이가 있는 것으로 확인되었다. 특히 하천으로부터의 거리, 하천 차수, 고도 변수가 높은 기여도를 갖는 공통점을 보였다.

Table 8. Contribution and importance of variable for 4<sup>th</sup> natural environment survey (average value of five run)

Variable	Percent contribution	Permutation importance
resi	44.4	36.5
watershed	34.3	15.8
river	9.1	19.1
elevation	5.2	10.8
indus	2.8	10.1
forest	2.1	3.0
road	1.0	0.5
landcover	0.6	2.6
slope	0.4	1.6

4) 2, 3, 4차 조사기반 잠재 서식 지도

수달의 출현확률 지도에서 임계값을 적용하여 2차, 3차, 4차 전국자연환경조사 자료 기반의 잠재적인 서식적합지역 지도를 제작하였다(Fig. 2). 초록색으로 표시된 지역이 수달의 잠재적 서식 적지로 파악된 지역이다. 2차 조사시기를 기반으로 한 서식적합지역은 주로 강원도 중심지역과 북동부의 산림과 하천

에서 넓게 분포하는 것으로 나타났으며, 남동부에서는 서식 적지가 좁게 나타났다. 3차 조사시기를 기반으로 한 서식적합지역은 강원도 곳곳의 하천을 따라서 수달의 서식 적지가 나타나는 경향을 보였다. 2차 조사기반 분석 결과와 비교했을 때, 넓은 면적으로 나타나는 경향은 줄어들고, 하천을 중심으로 선형의 서식 적지를 보여주었다. 4차 조사기반 서식적합지역은 3차 조사기반 분석 결과와 유사한 경향을 보였다. 강원도 곳곳의

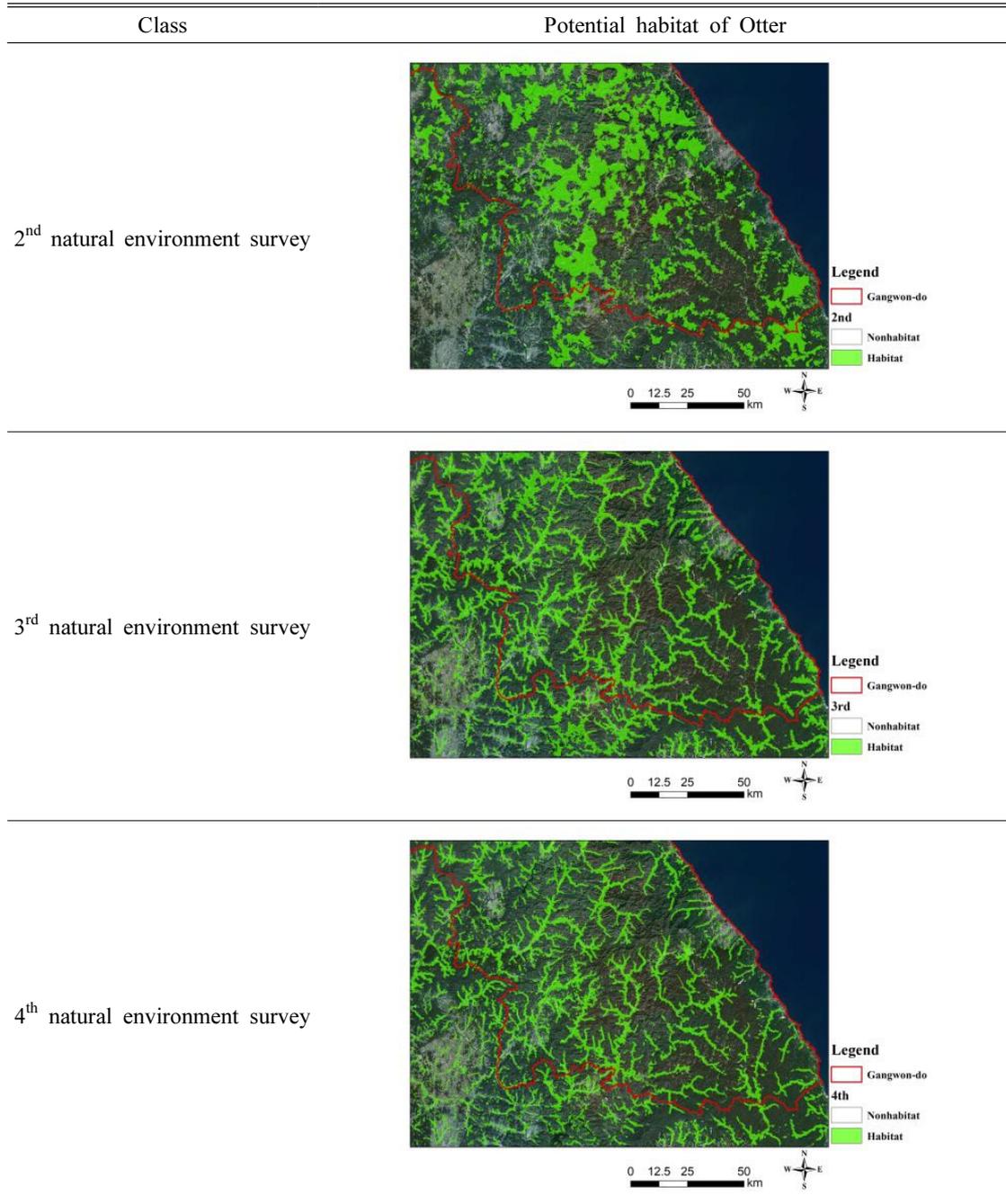


Figure 3. Potential habitat of Otter for each period of natural environment survey.

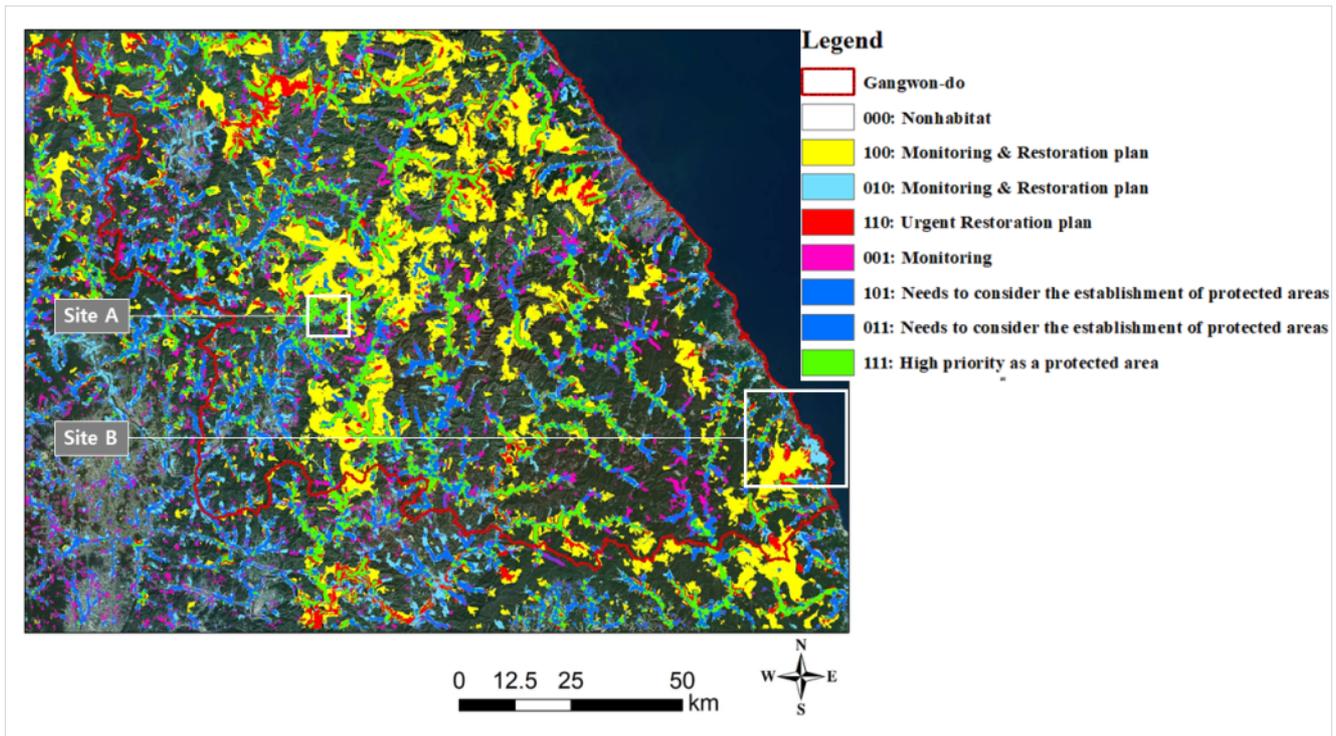


Figure 4. Comprehensive map of potential habitat for three survey periods and the sample areas (Site A and B) for finding the causes of habitat suitability changes (Fig. 4).

하천을 따라서 수달의 서식 적지가 나타났다. 2차 조사기만 분석 결과와 비교했을 때, 넓은 면적으로 나타나는 경향은 크게 줄어들고, 하천을 중심으로 선형의 서식 적지를 보여주었다. 다만, 3차 분석 결과보다 선형 서식 적지의 폭이 줄어들고, 전체적인 면적도 줄어드는 경향이 나타났다.

## 2. 고찰

### 1) 서식 적지 종합분석을 통한 지역별 서식 보전 정책 도출

2차, 3차, 4차 조사시기를 기반으로 분석된 각각의 잠재 서식 적지를 종합하여 수달 서식지의 복원 및 보전계획 수립을 위해 중요한 지역을 파악하였다. 2차 서식지의 범례를 서식지 100, 비서식지 0으로, 3차 서식지의 범례를 서식지 10, 비서식지 0으로, 4차 서식지의 범례를 서식지 1, 비서식지 0으로 설정하고 중첩분석을 실시하였다. 이를 통해 조사시기에 따라서 해당 격자(30m × 30m)가 지속적으로 서식지로 유지되었는지, 유지되지 못했거나 새롭게 서식지로 포함되었는지를 확인할 수 있었다 (Fig. 3). 이러한 시계열 변화의 정보를 바탕으로 격자가 갖는 값의 유형에 따라서 수달의 서식 보전을 위해 필요한 정책을 제안하고, 면적과 비율을 계산하였다 (Table 9).

중첩분석 결과 111의 값을 갖는 격자는 3개 조사시기에서 모두 서식 적지로 평가된 지역으로 보호지역 설정을 위한 우선

순위가 높은 지역으로 고려되어야 한다. 011과 101의 값을 갖는 격자는 현재에 가까운 4차 조사시기에 서식 적지로 공통적으로 평가되었으나, 2차 혹은 3차 조사시기에 비서식지로 평가된 지역으로 세심한 현장 조사를 실시하고 보호지역 설정의 필요성에 대한 전문가의 판단이 필요한 지역이다. 110의 값을 갖는 격자는 2, 3차 조사시기에 서식 적지로 평가되었으나 4차 조사시기에 비서식지로 평가된 지역으로 개발로 인해 서식환경의 파괴가 우려되는 지역이다. 이러한 지역에 대해서는 현장 조사를 기반으로 복원계획의 수립이 시급하다고 판단된다. 001의 값을 갖는 격자는 2, 3차 조사시기에 비서식지로 평가되었다가 4차 조사시기에만 서식지로 평가된 지역으로, 지속적인 모니터링을 통해서 어떤 요인이 수달의 서식지로 적합하게 만들었는지, 향후 수달의 서식 적지로 유지가 될 수 있는지에 대한 조사가 필요하다. 010과 100의 값을 갖는 격자는 3개 조사시기 중에서 2차 혹은 3차 조사시기 중에 한 번만 서식 적지로 평가된 지역이다. 이들 지역에 대해서는 모니터링을 통해서 과거에 서식 적지였던 공간에 대한 복원계획의 수립이 검토되어야 한다. 000의 값을 갖는 지역은 3개 조사시기에서 모두 비서식지로 확인된 지역으로 보전정책이 필요하지 않다고 판단된다.

시계열 서식 적지 변화로 구분된 지역 간 공간분포를 확인하면, 111의 값을 갖는 격자를 중심으로 101, 011, 110의 값을

Table 9. Comprehensive analysis of potential habitat for three survey periods

2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>	Sum	Number of overlaid habitat	Required policy considering time difference	Area (km <sup>2</sup> )	Ratio(%)
100	10	1	111	3	High priority as a protected area	1,657.8	6.6%
0	10	1	011	2	Needs to consider the establishment of protected areas with careful survey	805.5	3.2%
100	0	1	101	2		210.5	0.8%
100	10	0	110	2	Urgent Restoration plan	2,177.3	8.7%
0	0	1	001	1	Monitoring	2,554.1	10.2%
0	10	0	010	1	Monitoring & Restoration plan	1,284.1	5.1%
100	0	0	100	1		1,011.2	4.0%
0	0	0	000	0	Non-habitat	15,278.3	61.2%

갖는 격자들이 연계되어 나타나는 경향을 확인할 수 있었고, 이들 4개 유형의 격자들은 모두 서식 적지로서 중요한 역할을 할 수 있는 지역이므로 상호 연계를 통한 관리전략을 수립하는데 본 연구의 결과가 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 예를 들어, 111의 값을 갖는 격자 인근에서 011의 격자가 있는 경우를 최우선으로 고려하여 연계해야 할 서식지로 판단할 수 있을 것이며, 101의 격자를 다음으로 고려, 110이 있는 격자들 마지막으로 고려하는 단계적인 의사결정이 가능할 것으로 사료된다. 다만, 본 연구에서 도출한 시계열 서식 적지 종합분석결과(Fig. 3)를 기반으로 세부적인 관리전략을 제안하는 것에는 한계가 있으므로, 문헌 조사, 현장 조사, 전문가의 견해를 바탕으로 수달이 요구하는 핵심, 완충, 전이지역의 면적, 하천의 폭과 길이와 같은 세부적인 요소에 관한 연구가 필요하다.

앞서 도출된 종합지도를 확대하여 서식 적지가 유지된 지역과 변화된 지역을 찾아보고, 변화의 원인을 파악하고자 2개 지역(Site A, B)에 대한 상세 지도를 제작하였다(Fig 3 and 4). Site A는 강원도 횡성군 포동교 주변 지역으로 111의 값을 나타내어, 수달의 서식 적지가 2차 조사시기 이후부터 4차 조사까지 잘 유지된 것으로 파악되는 지역이다. 이 지역의 2000년도와 2017년도의 토지 피복을 비교해보면, 개발의 영향이 거의 없었던 것으로 파악되며, 수달이 선호하는 하천과 산림이 잘 보전되고 있는 것으로 판단된다. 한편, Site B는 A와 비교해서 더 큰 규모의 지역으로 7번 국도 울진~삼척 구간 인근에 있는 지역이다. 해당 지역은 종합지도에서 010의 값을 갖는 지역으로, 3차 조사기반의 분석에서 서식 적지로 파악된 지역이나, 4차 조사기반 분석에서는 비서식지로 파악된 지역이다.

Site B의 넓은 지역이 4차 조사기반 분석에서 비서식지로

변화된 원인을 파악하기 위해 해당 지역의 개발사업 내용을 찾아보았다. 그 결과, 2009년 8월 말에 해당 지역에 존재하는 7번 국도 울진~삼척 구간의 4차선 도로가 완공되었고, 도로구간에 장호터널의 시공도 포함된 것으로 확인되었다. 도로가 완공된 2009년은 3차 전국자연환경조사기간(2006~2013)에 포함되는 시기이며, 3차 조사시기에서는 남부지역에 수달이 출현한 것으로 확인되었다. 하지만, 4차 조사에서는 해당 지역에 수달이 출현하지 않은 것으로 조사되었으며, 이는 도로 완공 후에 증가한 교통량으로 인한 소음 발생, 하천 및 산림의 코리터 단절 등으로 인해 서식처의 질이 저하된 것이 원인으로 판단된다. 대규모 도로개발사업이 수달의 출현지점에 변화를 가져오게 되었고, 이로 인해 서식적합성분석에서 서식 적지로 평가되었던 지역이 비서식지로 변화된 것으로 파악된다.

Site B의 사례는 대규모 개발사업의 수행이 중요 생물종의 서식에 부정적 영향을 미칠 수 있다는 점을 보여준다. 특히 하천을 따라서 선형의 서식처를 갖는 수달과 같은 생물종에게는 도로와 같은 선형개발사업이 하천을 따라 수행될 경우에 큰 영향을 줄 수 있으므로 환경영향평가 단계에서 세심한 주의와 대책이 필요하다. 또한, 환경영향평가 시 중요생물종의 출현지점과 반경만을 고려하는 것이 아니라, 생물종의 출현지점을 바탕으로 잠재적 서식 적지를 분석하여 생물종이 서식할 수 있는 지역에 대해서도 개발영향을 최소화하는 대책을 마련하도록 권고하여야 할 것이다.

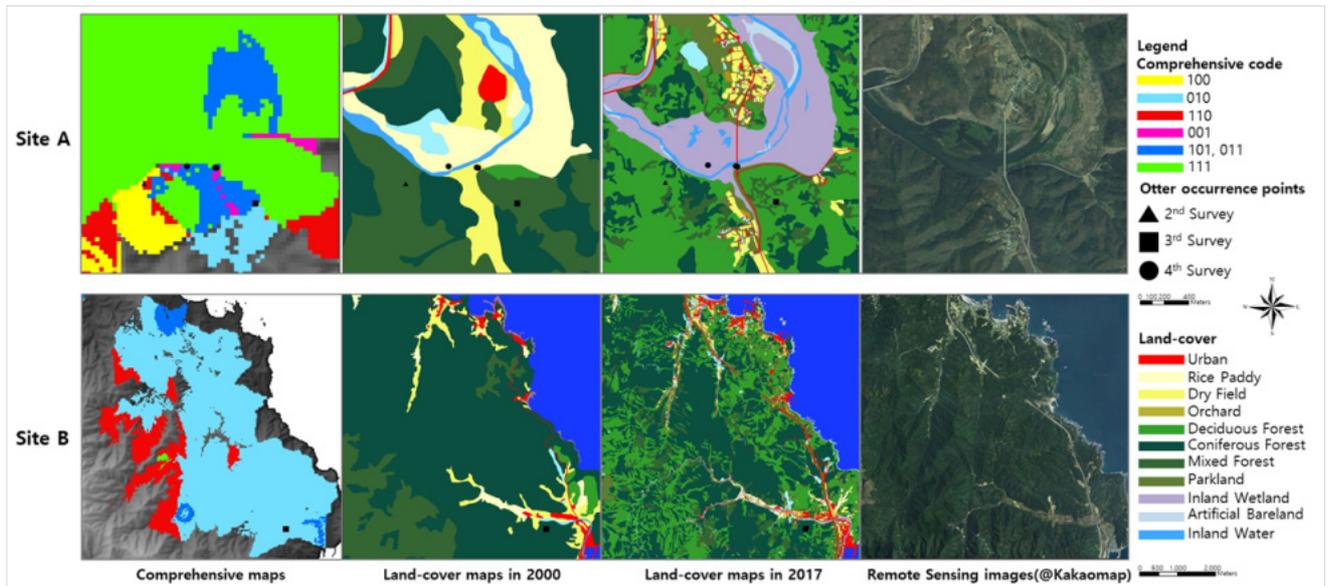


Figure 5. Effects of development projects on potential habitats for otters.

## 2) 수달의 서식지 선호 특성

Maxent 모형을 구동하여 도출된 변수별 반응곡선 그래프를 이용하여 수달의 서식지 선호 특성을 분석하고자 조사시기 별 반응곡선을 정리하였다 (Table 10). MaxEnt 분석 결과, 기여도가 높게 나타난 하천 차수, 하천으로부터의 거리, 고도 변수의 경우에 반응곡선이 모두 유사한 경향을 나타냈다. 이는 조사시기의 차이나 토지 피복의 변화와는 상관없이 수달이 가장 선호하는 서식지의 특성이 변화하지 않았다는 점을 보여준다. 따라서 개발사업으로 인해 수달의 기존 서식지가 파괴되었을 경우, 어떻게 대체 서식지를 확보해야 할지 결정할 때에 3개 변수가 중요한 요인으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 고도 변수의 경우, 200m에서 400m에서 서식적합성이 가장 높은 특징을 보였다. 해당 고도 범위는 수달이 선호하는 하천 및 유역의 평균고도와 연관된다고 파악된다. 일반적으로 낮은 고도에 더 큰 규모의 하천이 위치하기 때문에, 수달이 선호하는 먹이자원도 풍부하고 인간의 간섭도 상대적으로 작은 것으로 판단된다. 선행연구를 통해서도 이에 대한 구체적인 근거를 파악하기는 어려우며, 본 연구에서도 고도와 수달 서식지와의 연관성을 명확하게 밝히는 것에는 한계가 있다. 따라서 고도를 비롯한 환경변수와 수달의 상관관계와 해석에 대해서는 향후 심층적인 연구가 필요하다.

나머지 변수들은 기여도가 상대적으로 낮아서 서식 적지의 분포에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단되나, 유사한 경향을 나타낸 변수로는 산림으로부터의 거리 변수로 수달은 산림으로부터 가까운 곳에서 출현할 확률이 높은 것으로 확인되었다. 조사시기 별로 다른 경향을 보이는 반응곡선의 경우, 경사, 토지 피복, 산업지역으로부터의 거리, 주거지역으로부터

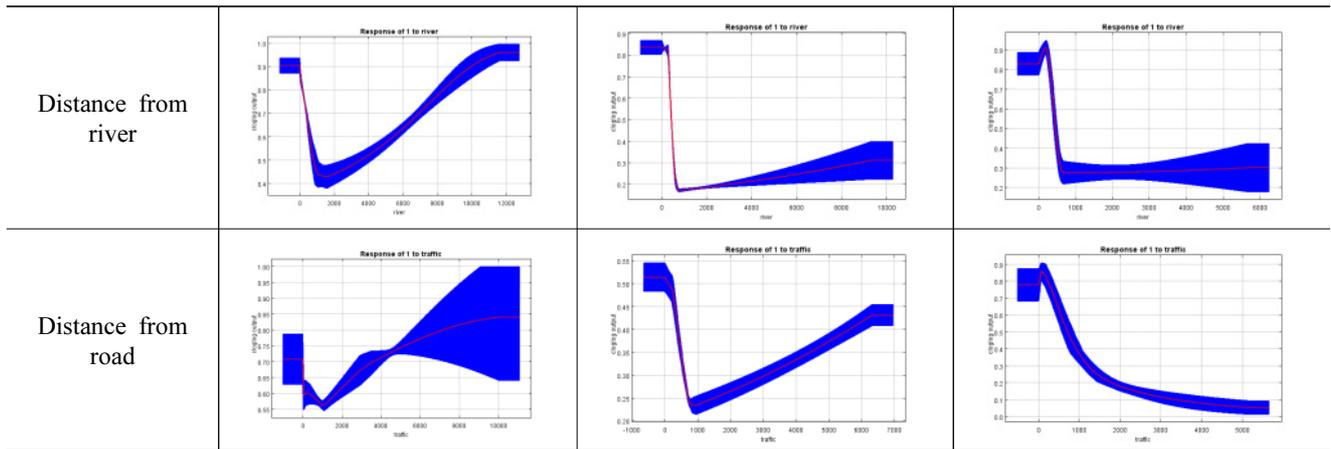
의 거리, 교통지역으로부터의 거리 변수로 나타났다. 반응곡선의 차이는 조사시기에 따라서 수달의 출현지점이 달라지면서 주변 환경과의 관계가 달라졌음을 보여준다. 이와 같은 환경변수들은 인간의 개발행위로 인한 토지 피복의 변화로 인해 수달이 선호하는 서식지의 세부적인 특성은 변화할 수 있다는 점을 시사한다.

한편, 교통지역으로부터의 거리의 경우, 2차 조사시기와 3, 4차 조사시기의 반응곡선의 특징이 확연히 다르게 나타난다. 2차에서는 교통지역으로부터 멀어질수록 서식확률이 높아지고, 3, 4차에서는 교통지역에 가까운 지역에서 서식확률이 높게 나타난다. 이러한 차이에는 2가지 원인이 있는 것으로 판단된다. 첫째로는 하천 인근 도로의 증가를 꼽을 수 있다. 실제로 강원도 내에서 2차 조사시기 이후에 삼척-울진 간 도로, 미시령 터널, 양양고속도로 등 다수의 도로개발공사가 이루어졌으며, 이들 중에는 하천에 인접하여 개발된 경우도 있는 것으로 확인되었다. 둘째로는 토지 피복 제작에 사용된 위성영상의 해상도의 차이이다. 2차 조사시기에 제작된 토지 피복은 5 × 5 m의 해상도를 갖는 위성영상으로 제작되었으나, 3, 4차 조사시기에 제작된 토지피복도는 1 × 1 m의 해상도를 갖는 위성영상으로 제작되었다. 이로 인하여 3, 4차 조사시기의 토지피복도는 2차 조사시기에 비해 세부적인 도로의 표현이 가능하였고, 하천 인근의 작은 도로들이 많이 포함되면서 반응곡선의 특징이 달라진 것으로 판단된다. 이러한 한계를 개선하기 위해서는 동일한 해상도의 위성영상으로 제작된 토지피복도를 제작하여 연구에 반영하는 향후 연구가 필요하다고 사료된다.

한편, 토지피복과 같은 범주형 변수를 살펴보면, 2차 조사에서 수역, 나지, 산림을 선호하고 3차 조사에서 습지, 수역, 나지

Table 10. Response of environmental variables

Variable	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>
Elevation			
Slope			
Stream order of watershed			
Landcover			
Distance from forest			
Distance from industrial area			
Distance from residential area			



를 선호하고, 4차 조사에서 습지, 농업지역, 수역을 선호하는 것으로 나타났다. 수달은 3개 조사시기에서 선호하는 정도의 차이는 있지만, 수역을 공통적으로 선호하고, 습지와 농업지역과 같은 습도가 높은 토양이 있는 공간을 선호하는 것으로 판단된다. 비록 하천 차수, 하천으로부터의 거리, 고도 변수와 비교해서 기여도는 낮게 나타났으나, 토지 피복 변수는 서로 다른 조사시기에도 불구하고 수달이 공통적으로 선호하는 공간의 특성을 해석하는 데 도움이 될 수 있다. 따라서 기여도가 낮은 변수들에서도 공통적인 선호 경향을 발견하고, 이를 기반으로 중요 서식지를 확인하고 보전계획을 수립할 필요성이 있다고 판단된다.

### 3) 소결

본 연구에서는 멸종위기 야생생물 1급으로 지정된 수달을 대상으로 2, 3, 4차 전국자연환경조사와 조사시기에 맞는 토지 피복도의 시계열 자료를 활용하여 조사시기 별 잠재적인 서식적합지역을 분석하였다. 시계열 분석을 통해서 수달의 서식적지 변화를 면밀하게 파악할 수 있었고, 시계열 변화의 경향에 따라서 필요하다고 판단되는 보전계획을 제안할 수 있었다는 점이 본 연구의 의의라고 판단된다. 다만, 현재 연구에 활용된 환경변수는 수달의 먹이자원, 시기별 기상자료 등을 고려하지 못하는 한계가 있으므로 향후 연구에서 개선이 필요하다. 더불어 2차 조사시기와 3, 4차 조사시기 분석에 사용된 토지피복도의 제작에 사용된 위성영상의 해상도에 차이가 있어 잠재 서식지의 분포와 변수의 반응곡선과 같은 서식적합지역 분석 결과에 영향을 준 것으로 파악되므로, 향후 동일한 기초자료를 활용한 토지피복도의 제작을 통한 한계점 개선이 필요하다. 또한, 전국자연환경조사 자료가 갖는 한계로 인해 연구결과를 해석하는데 주의가 필요하다. 특히 2차 조사자료와 3, 4차 조사자료는 조사단위가 달라지면서 수달의 출현지점 정보가 동일한 조사체계를 바탕으로 수집되지 않았을 가능성이 있다. 이러한 한계를 최소화하기 위하여 조사단위의 영향이 적은 강원도를 대상으로

연구를 수행하였으나, 분석 결과에 영향을 미칠 수 있었을 것이다. 따라서 향후 수행될 전국자연환경조사에서는 기존 조사와 동일한 조건의 조사경로, 조사 방법, 조사자의 능력을 유지하면서 수행되어야 할 것이며, 이는 비출현지역에 대한 정보의 신뢰도를 높여 정밀한 서식적합성평가에도 도움이 될 것이다. 또한, 축적되는 자료를 바탕으로 수달뿐만 아니라 다양한 생물종에 대한 시계열 서식 적지 변화 연구를 지속적으로 수행하여 우리나라의 생물다양성 보전에 기여해야 할 것이다.

## REFERENCES

- Bradie, J. and B. Leung(2017) A quantitative synthesis of the importance of variables used in MaxEnt species distribution models. *Journal of Biogeography* 44(6): 1344-1361.
- Carter, J.V., J. Pan, S.N. Rai and S. Galandiuk(2016) ROC-ing along: Evaluation and interpretation of receiver operating characteristic curves. *Surgery* 159(6): 1638-1645.
- Evcin, O., O. Kucuk and E. Akturk(2019) Habitat suitability model with maximum entropy approach for European roe deer (*Capreolus capreolus*) in the Black Sea Region. *Environmental Monitoring and Assessment* 191(11): 669.
- Ghanbarian, G., M.R. Raoufat, H.R. Pourghasemi and R. Safaeian(2019) Habitat Suitability Mapping of *Artemisia aucheri* Boiss Based on the GLM Model in R. In *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*, H.R. Pourghasemi and C. Gokceoglu (Eds.), Elsevier Inc., 213-227pp.
- Hoban, S., M. Bruford, J.D. Jackson, M. Lopes-Fernandes, M. Heuertz, P.A. Hohenlohe, I. Paz-Vinas, P. Sjögren-Gulve, G. Segelbacher and C. Vernesi(2020) Genetic diversity targets and indicators in the CBD post-2020 Global Biodiversity Framework must be improved. *Biological Conservation* 248:

- 108654.
- Jeong, S.G.(2014) Evaluation model of riparian corridor connectivity: A case study of Seom river basin, Gangwon-do. Doctoral Thesis, Seoul National University. (in Korean with English summary)
- Kim, H., D. Lee, Y. Mo, S. Kil and C. Park(2013) Prediction of Landslides Occurrence Probability under Climate Change using MaxEnt Model. *Journal of Environmental Impact Assessment* 22(1): 39-50. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.G., G.Y. Ko, C. Kim and D.W. Ha(2015) Analysis of Hydraulic and Ecological Environment of Eurasian Otter (*Lutra lutra*) Habitat Using River Spatial Information. *Journal of Korean Society of Environmental Technology* 16(2): 169-176. (in Korean with English abstract)
- Lee, D.K. and H.G. Kim(2010) Habitat Potential Evaluation Using Maxent Model-Focused on Riparian Distance, Stream Order and Land Use-. *Journal of Korean Environmental Restoration Technology* 13(6): 161-172. (in Korean with English abstract)
- Liu, C., M. White and G. Newell(2013). Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. *Journal of Biogeography* 40(4): 778-789.
- National Institute of Ecology(2016) Natural Environment Survey 30 year. (in Korean)
- Ning, S., J. Wei and J. Feng(2017) Predicting the current potential and future world wide distribution of the onion maggot, *Delia antiqua* using maximum entropy ecological niche modeling. *PLoS ONE* 12(2): 1-15.
- Phillips, S., R. Anderson and R. Schapire(2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190(3-4): 231-259.
- Santini, L., S.H.M. Butchart, C. Rondinini, A. Ben'itez-López, J.P. Hilbers, A.M. Schipper, M. Cengic, J.A. Tobias and M.A.J. Huijbregts(2019) Applying habitat and population-density models to land-cover time series to inform IUCN Red List assessments. *Conservation Biology* 33(5): 1084-1093.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity(2014) Global Biodiversity Outlook 4. Montréal, 155pp.
- Sen, S., K.N. Shivaprakash, N.A. Aravind, G. Ravikanth and S. Dayanandan(2016) Ecological niche modeling for conservation planning of an endemic snail in the verge of becoming a pest in cardamom plantations in the Western Ghats biodiversity hotspot. *Ecology and Evolution* 6(18): 6510-6523.
- Shin, H., G. Shin, S. Han, P. Rho and J. Lee(2020) Habitat Suitability Assessment of the Saemangeum Lake Area for Eurasian Otter (*Lutra lutra*) and Correlation Analysis with Spatial Variables. *Journal of Environmental Impact Assessment* 29(4): 298-306.
- Sim, Y., S.R. Kim, K.B. Yoon, J.W. Jung, S.U. Park and Y.S. Park(2020) Evaluation of Alternative Habitats Using Habitat Suitability Index Model of *Lutra lutra* in Banbyeoncheon Stream. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* 23(1): 63-76.
- Slauson, K.M., W.J. Zielinski, T.A. Kirk and D.W. LaPlante(2019) A Landscape Habitat Suitability Model for the Humboldt Marten (*Martes caurina humboldtensis*) in Coastal California and Coastal Oregon. *Northwest Science* 93(1): 30-51.
- Tsioumani, E.(2020). Convention on Biological Diversity: A Review of the Post-2020 Global Biodiversity Framework Working Group Negotiations. *Environmental Policy and Law* 50(1-2): 55-59.
- Zhang, K., L. Yao, J. Meng and J. Tao(2018) Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change. *Science of the Total Environment* 634: 1326-1334.
- Zhao, Z., Y. Guo, H. Wei, Q. Ran, J. Liu, Q. Zhang and W. Gu(2020) Potential distribution of *Notopterygium incisum* Ting ex HT Chang and its predicted responses to climate change based on a comprehensive habitat suitability model. *Ecology and Evolution* 10(6): 3004-3016.
- Zheng, R., Z. Luo and B. Yan(2019) Exploiting time-series image-to-image translation to expand the range of wildlife habitat analysis. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* 33: 825-832.