

Research Paper

뉴트리아(*Myocastor coypus*) 분포밀도 및 잠재적 서식가능지역 예측에 따른 관리방향

김아름 · 김영채 · 이도훈
국립생태원

A Management Plan According to the Estimation of Nutria (*Myocastor coypus*) Distribution Density and Potential Suitable Habitat

Areum Kim · Young-Chae Kim · Do-Hun Lee
National Institute of Ecology

요약 : 본 연구는 국내에 서식하는 뉴트리아의 집중분포지역과 잠재적인 서식가능지역을 예측하여 효과적인 관리방향 설정에 유용한 자료를 제공하고자 하였다. 뉴트리아의 전국 분포 자료를 토대로 CVh(가능도 교차타당성)값을 띠폭(bandwidth)에 적용하여 분포밀도를 분석한 결과, 부산광역시, 대구광역시, 경상남도 소재 11개 시·군, 경상북도 소재 1개 군 등 낙동강수계에 위치한 14개 행정구역 내에서 우선적인 제거가 필요한 집중분포지역이 확인되었다. MaxEnt 모델을 이용한 잠재적인 서식가능지역 예측에서는 낙동강 중하류 일대와 섬진강 하류, 가화천 일대에서 출현 가능성이 나타났다. 모형의 변수별 기여도는 고도, 건조한 달의 강수량, 가장 추운달의 최저온도, 수계로부터의 거리 순으로 높은 기여도를 보였으며, 출현확률과의 관계를 살펴보면, 고도 34m 이하의 저지대, 가장 추운달의 최저온도가 -5.7°C 이상 -0.6°C 이하인 지역, 가장 건조한 달의 강수량이 15~30mm, 수계로부터 1,373m 이하인 지역에서 임계값보다 높은 출현확률을 보였다. 뉴트리아의 생태적 특성과 본 연구결과를 종합하면, 고도, 물과의 접근성 및 이용성, 겨울철 낮은 기온이 뉴트리아의 정착과 확산에 영향을 주는 주요 요인으로 판단되므로 향후 서식가능지역의 검출과 확산 예측 모델링에 있어 중요한 변수로 검토될 수 있다. 뉴트리아와 같은 침입외래생물의 집중분포지역과 관리대상지역을 구분하고 그에 적합한 관리전략을 수립하여 관리현장에 적용하는 것은 영구적인 제어 목적의 관리에 있어 필수적인 사항이다. 본 연구에서 제시된 결과는 우선관리대상지역의 신속한 관리와 확산가능지역에 대한 사전 예방적 관리 등 전략적인 관리의 실행에 있어 유용한 자료로 활용될 수 있다.

주요어 : 침입외래생물, 최대 엔트로피 모형, 밀도분석, 분포자료, 관리전략

First Author: Areum Kim, Division of Ecological Conservation, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea, Tel: +82-41-950-5622, E-mail: silkefma@nie.re.kr

Co-Author: Young-Chae Kim, Division of Ecological Conservation, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea, Tel: +82-41-950-5394, E-mail: yckim84@nie.re.kr

Corresponding Author: Do-Hun Lee, Division of Ecological Conservation, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea, Tel: +82-41-950-5399, E-mail: eco0407@nie.re.kr

Received: 26 March, 2018. Revised: 3 April, 2018. Accepted: 6 April, 2018.

Abstract : The purpose of this study is to estimate the concentrated distribution area of nutria (*Myocastor coypus*) and potential suitable habitat and to provide useful data for the effective management direction setting. Based on the nationwide distribution data of nutria, the cross-validation value was applied to analyze the distribution density. As a result, the concentrated distribution areas that required preferential elimination is found in 14 administrative areas including Busan Metropolitan City, Daegu Metropolitan City, 11 cities and counties in Gyeongsangnam-do and 1 county in Gyeongsangbuk-do. In the potential suitable habitat estimation using a MaxEnt (Maximum Entropy) model, the possibility of emergency was found in the Nakdong River middle and lower stream area and the Seomjin river lower stream area and Gahwacheon River area. As for the contribution by variables of a model, it showed DEM, precipitation of driest month, min temperature of coldest month and distance from river had contribution from the highest order. In terms of the relation with the probability of appearance, the probability of emergence was higher than the threshold value in areas with less than 34m of altitude, with $-5.7^{\circ}\text{C}\sim-0.6^{\circ}\text{C}$ of min temperature of the coldest month, with 15-30mm of precipitation of the driest month and with less than 1,373m away from the river. Variables that Altitude, existence of water and winter temperature affected settlement and expansion of nutria, considering the research results and the physiological and ecological characteristics of nutria. Therefore, it is necessary to reflect them as important variables in the future habitable area detection and expansion estimation modeling. It must be essential to distinguish the concentrated distribution area and the management area of invasive alien species such as nutria and to establish and apply a suitable management strategy to the management site for the permanent control. The results in this study can be used as useful data for a strategic management such as rapid management on the preferential management area and preemptive and preventive management on the possible spreading area.

Keywords : Invasive alien species, MaxEnt, Density analysis, Distribution data, Management strategy

I. 서론

산업과 기술의 급속한 발달에 따른 생물종의 이동 증가는 침입외래생물의 전 세계적인 확산으로 이어지며, 인간에 의한 서식지 파괴, 기후변화 등 다양한 지구 환경 변화 요인과 함께 생태계를 위협하는 주요 원인으로 지목되고 있다. 생물종 본래의 서식지를 벗어나 빠르게 번성하고 확산하는 침입외래생물은 새로운 환경에 대한 생리학적 적응력과 다양한 먹이 유형이나 환경에 대한 생존 능력을 바탕으로 유입된 지역에 정착하여 생물다양성을 위협한다. 침입외래생물의 전 지구적인 확산은 생태계의 보전과 기능저하, 생물다양성 손실 뿐 아니라, 인간생활에 있어서도 막대한 경제적, 환경적 손실을 가져온다(Wilcove et al. 1998). 이들로 인해 발생하는 다양한 문제는 광범위

한 분야에서 지속적이고 만성적인 위협이 되고 있다 (Cronk & Fuller 1995; Zietsman 2011).

침입외래생물 확산에 따른 부정적인 영향의 증가로 인해 생물다양성협약 제10차 당사국총회(Conference of the Parties 10, Nagoya)에서는 2020년까지 생물다양성 보전을 위해 전 세계가 함께 노력해야 할 20개 목표에 침입외래생물 문제를 포함하였으며, 우선순위 설정에 따른 관리, 조절과 제거, 도입과 정착을 방지하기 위한 대응 방안을 논의한 바 있다(SCBD 2014).

세계자연보호연맹(International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, IUCN)에서 선정한 세계 100대 침입외래생물 목록에 포함되어 있는 남미 원산의 뉴트리아(*Myocastor coypus* Molina)는 설치목(Rodentia) 뉴트리아과

(*Myocastoridae*)에 속하는 포유동물이다(Woods & Howland 1979; Lowe et al. 2000; Lee et al. 2017).

높은 침입성을 지닌 뉴트리아는 모피획득과 식량 자원으로서의 이용 등 경제적 이익을 목적으로 유럽, 북미, 아시아, 아프리카 등에 도입되었으나(Aliev 1966; Miura 1976; Hall 1981; Bar-Ilan & Marder 1983; Bounds 2000), 이용성 저하에 따라 경제적인 가치가 하락하며 도입지역의 자연생태계에 유입되었다. 세계 여러 나라의 자연에 성공적으로 정착한 뉴트리아는 생물다양성 손실 등 다양한 문제를 발생시키며 적극적 관리가 필요한 생물종으로 인식되고 있다(Borgnia et al. 2000; Lee et al. 2012).

먹이자원이 풍부한 수계를 중심으로 살아가는 뉴트리아는 반수생(Semi-aquatic) 포유동물로 강과 호소, 농수로, 기수역 등 물이 있는 지역이라면 어디든지 쉽게 정착할 수 있다(Borgnia et al. 2000). 설치류 특유의 뛰어난 번식 능력을 바탕으로 연 2-3회 출산이 가능하며, 1회 출산 시 약 1-12개체 범위에서 평균 3-6개체를 생산하는 등 단시간 빠른 속도의 밀도 증식이 가능하다(Gosling et al. 1980; Gosling & Baker 1981).

뉴트리아가 정착하고 번성한 생태계에서는 이들의 굴을 파는 습성과 과도한 섭식활동으로 인해 부정적인 영향이 발생된다(Lee et al. 2013). 수변 제방이나 둑에 굴을 파고 생활하는 뉴트리아는 정착지역의 배수시설과 식물상에 피해를 주는 한편, 일일 체중의 약 20% 이상을 섭식하는 먹이활동으로 인해 토속생물종과의 경쟁, 식물다양성의 손실, 경제작물의 피해를 불러온다(Gosling 1974; Abbas 1988; Wood et al. 1992; Leblanc 1994). 뉴트리아에 의한 피해는 이들이 성공적으로 정착한 대부분의 지역에서 동일한 양상으로 나타난다(D'adamo et al. 2000).

국내 뉴트리아는 1985년 프랑스로부터 식량자원과 모피 활용을 목적으로 도입되었으나 전수 폐사하였고, 1987년 불가리아를 통해 종자유용으로 도입한 60개체가 증식에 성공하며 전국적으로 유통되었다(Lee et al. 2012). 2000년대에 들어 축산법 상 가축에 등재될 정도로 뉴트리아 관련 산업이 성장하였

으나, 취약한 유통구조와 관리 규정의 미비, 수요처 확보 실패가 직접적인 원인이 되어 농가의 사육폭기로 이어졌으며, 결국 자연생태계에 유입되는 결과를 초래하였다(Lee & Kil 2015). 국내 자연에 유입된 뉴트리아의 지속적인 증가 추세에 따라 2009년 환경부에서는 뉴트리아를 생태계교란 생물로 지정(환경부 고시 제2017-265호)하여 법적적인 관리를 시행하였지만, 특정 지역만을 대상으로 이루어진 간헐적인 관리의 한계로 인하여 서식 영역은 점차 확대되었고, 2012년에 들어 전국 13개 행정구역에서 서식이 관찰되는 등 광역적인 확산 추세를 나타내었다(NIER 2006; Lee et al. 2013). 이에 2014년 환경부에서는 국토 내 서식하는 뉴트리아의 서식 근절을 목표로 설정한 「뉴트리아 퇴치프로그램」을 수립하여 국가적인 차원에서의 관리에 나서고 있다.

영구적인 제어를 목표로 실행되는 관리가 성공적인 결과로 이어지기 위해서는 관리대상지역별로 관리대상종의 서식실태를 반영한 관리전략을 수립하고 지역별 실정에 적합한 현장 관리방안을 선택하여 적용하는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 국내 서식하는 뉴트리아의 분포밀도를 분석하여 집중서식지역을 확인하였고, 종분포모형 중 기계학습 모델인 MaxEnt를 활용하여 잠재적인 서식가능지역을 파악하는 등 최우선 관리대상지역과 확산가능지역을 구분함으로써 관리대상지역별 효과적인 관리전략 수립과 관리방향 설정에 유용한 자료를 제공하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 뉴트리아 분포밀도 분석

낙동강 수계를 중심으로 서식하는 뉴트리아의 집중 분포지역을 확인하기 위해 분포밀도를 분석하였다. 밀도분석에는 2015년 전국 뉴트리아 서식실태조사에서 목견과 흔적조사를 통해 얻어진 뉴트리아 분포 좌표를 이용하였고(NIE 2015), ArcGIS 10.3.1에서 제공하는 kernel density tool로 분석하였다. kernel density tool은 커널함수를 사용하며, 단위 면적 당 분포 집중 정도를 측정할 수 있다(<http://pro.arcgis.com>).

com). 커널밀도추정은 위치 데이터를 평활화 하는 과정을 거치므로 히스토그램보다 효과적인 결과를 얻을 수 있으며, 커널함수를 이용한 확률밀도함수 추정방법은 커널함수의 선택보다 커널추정량의 평활모수인 띠폭(bandwidth)의 선택이 커널 추정량 정도에 더욱 큰 영향을 준다(Worton 1989; Huh 2012).

본 연구의 kernel density tool은 Silverman(1986)의 커널함수를 기반으로 분석되었다. 띠폭을 설정하는 방법에는 최소제곱교차타당성(LSCVh: least squares cross-validation), 가능도교차타당성(CVh: Cross-validation), 기준 방법(h_ref: reference method) 등이 알려져 있으며(Worton 1995), LSCVh 값과 CVh 값이 가장 많이 사용되는 값으로 대상지역과 점의 분포에 따라 적합한 띠폭의 값이 다를 수 있다(Yoo et al, 2013). 본 연구에서는 적절한 띠폭의 값을 선택하기 위하여 kernel density tool의 띠폭을 설정해 주는 값인 Search radius를 기본 설정값(5485.4m)과 Animal Space Use 1.3 Beta 프로그램으로 계산된 LSCVh, CVh, h-ref값을 적용함으로써 가장 적절한 값을 선택하고자 하였다.

2. 종분포모형을 이용한 잠재적 서식가능지역 분석

(1) 출현자료 및 환경변수 구축

잠재적 서식가능지역을 추정하기 위해 NIE(2015)가 보고한 2015년 전국 뉴트리아 출현지점을 활용하였다. 출현지점은 뉴트리아의 전국적인 서식실태를 조사하여 획득한 출현좌표를 토대로 100m 격자에 한 지점만 들어가도록 중복지점을 제거하여 총 1,449개의 지점을 이용하였다(Figure 1).

모형에는 기후변수(bio 01-bio 19)와 지형변수(DEM, Aspect, Slope), 수계로부터의 거리(d_river)를 환경변수로 사용하였다. 기후변수는 WorldClim 웹사이트(<http://worldclim.org>)에서 제공하는 WorldClim Version 2(1970-2000년)의 생물기후변수(1km×1km) 19개를 사용하였다. 지형변수는 국가공간정보포털 오픈마켓에서 제공하는 90m×90m해상도의 수치표고모형(Digital Elevation Model)을 사용하였고, 이를 이용해 경사(Slope), 향(Aspect) 변

수를 생성하였다. 수계로부터의 거리는 국가공간정보포털 오픈마켓에서 제공하는 하천망도의 국가하천과 지방하천을 이용하여 계산하였다. 모든 환경변수는 ArcGIS 10.3.1을 이용하여 100m×100m의 공간해상도로 변경하여 사용하였다. 총 23개 환경변수의 다중공선성을 방지하기 위하여 실제 출현좌표로 사용된 1,449개의 지점과 대상 지역 내에서 무작위로 생성한 1,400개의 지점을 SPSS(version 22 IBM SPSS Statistics, 2013)를 이용하여 상관분석 하였다(Kumar & Stohlgren 2009).

Pearson 상관계수가 0.7이상인 강한 상관관계에 있는 변수들은 종의 생태특성과 모형에 대한 기여도를 반영하여 두 변수 중 하나의 변수만을 선택하였다. 이를 통해 최종적으로 등온성(bio 03), 가장 추운 달의 최저 온도(bio 06), 연강수량(bio 12), 가장 건조한 달의 강수량(bio 14), 가장 습한 분기의 강수량(bio 16), 고도(DEM), 경사(Slope), 수계로부터의 거리(d_river) 등 8개의 환경변수가 선택되었다(Table 1).

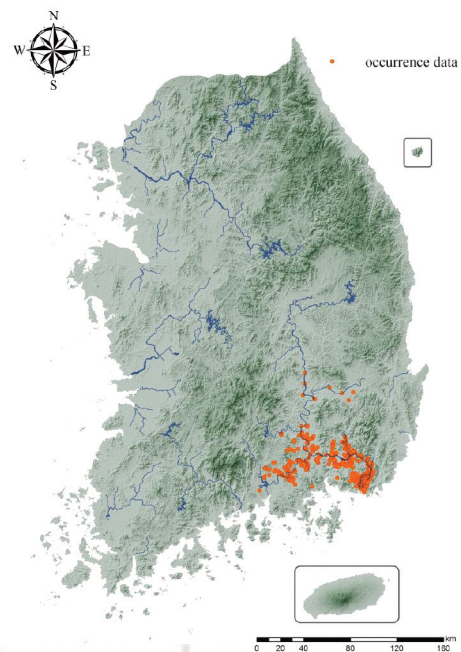


Figure 1. The occurrence data of Nutria used in this study (NIE 2015).

Table 1. Descriptions of environmental variables

Variables	Description		Variables	Description	
DEM	Digital Elevation Model	○	Bio 09	Mean temperature of Driest Quarter	
Slope	Slope (0° - 90°)	○	Bio 10	Mean temperature of Warmest Quarter	
Aspect	Aspect (0° - 360°)		Bio 11	Mean temperature of Coldest Quarter	
d_river	Distance from river	○	Bio 12	Annual Precipitation	○
Bio 01	Annual Mean Temperature		Bio 13	Precipitation of Wettest Month	
Bio 02	Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp - min temp))		Bio 14	Precipitation of Driest Month	○
Bio 03	Isothermality (Bio 02/Bio 07) (*100)	○	Bio 15	Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)	
Bio 04	Temperature Seasonality (standard deviation*100)		Bio 16	Precipitation of Wettest Quarter	○
Bio 05	Max temperature of Warmest Month		Bio 17	Precipitation of Driest Quarter	
Bio 06	Min temperature of Coldest Month	○	Bio 18	Precipitation of Warmest Quarter	
Bio 07	Temperature Annual Range (Bio 05 - Bio 06)		Bio 19	Precipitation of Coldest Quarter	
Bio 08	Mean temperature of Wettest Quarter				

※ “○” is included in final analysis.

(2) MaxEnt 모형에의 적용

MaxEnt는 최대 엔트로피를 기반으로 하는 기계학습모형이며, 환경변수로 고도와 같은 연속적인 자료 뿐만 아니라 영급과 같은 명목형 자료도 사용할 수 있다(Phillips et al. 2006). 본 연구에서는 1,449개의 종 출현자료와 8개의 환경변수를 MaxEnt 3.4.1 프로그램에 입력하여 뉴트리아의 잠재적 서식가능지역을 예측하였다. 모형은 subsample의 재추출(resampling) 방법으로 10회 반복하였으며, 평균값을 모형의 결과값으로 취하였다.

모형의 예측 능력을 평가하기 위해서는 검증이 필요한데, 독립적인 데이터 세트를 사용하여 모델 능력을 검증하는 것이 이상적이지만, 불가능한 경우가 많아 자료를 무작위로 훈련데이터(training data)와 검증데이터(test data)로 나누어 모형을 검증하기 위한 준독립적 자료를 만드는 방법이 사용된다(Kumar & Stohlgren 2009). 이에 검증데이터를 25%로 설정하였으며, 반복된 예측 결과가 수렴(convergence)하는 데까지 충분한 시간을 할당할 수 있도록 maximum iterations의 값을 최댓값인 5,000으로 설정하였다(Lee et al. 2016).

모형의 수행능력(performance)은 ROC(Receiver

operating characteristics) curve의 AUC(Area under the curve)값을 이용해 평가하였다. 종의 출현확률 추정 값을 0에서 1사이의 값으로 나타내주는 logistic output을 결과 출력형식으로 선택하였으며, 이는 raw, cumulative 형태보다 해석하기 용이하다는 장점이 있다(Phillips & Dudik 2008).

중분포모형의 결과를 출현 지역과 비출현 지역으로 구분하기 위해서는 임계값(threshold)이 필요하며, 기준 값으로는 0.5, 실제 값과 예측된 값의 오차 합이 최소가 되도록 하는 값 등이 사용되고 있다(Song 2015). 본 연구에서는 출현확률을 출현예측정확도(sensitivity)와 비출현율예측정확도(specificity)가 최대가 되는 지점의 값인 0.1262를 임계값으로 하여 잠재적인 서식가능지역을 구분하고 지도로 표현하였다(Heibl & Renner 2012).

III. 결과 및 고찰

1. 낙동강 수계의 뉴트리아 분포밀도

본 연구에서는 분포지점을 이용하여 계산된 띠폭의 값인 CVh 1,011.6m, LSCVh 129.1m, h_ref 5,576.1m와 기본 설정 값 5,485.4m를 적용하여 커널밀도를

구하였다. 각 띠폭에 따른 커널밀도를 살펴보면, LSCVh 값은 다수의 고밀도 영역이 좁은 형태로 분포하였고, h_ref와 기본 설정 값은 적은 수의 고밀도 영역이 넓게 분포하는 형태를 나타내었다. CVh 값은 다른 값의 적용 결과와 비교하여 중간 형태를 보였는데, 밀도가 높은 곳의 면적은 LSCVh보다 넓고, h-ref와 기본 설정 값보다는 좁았다(Figure 2). 이에 최우선적으로 관리가 필요한 지역을 산출하고 그 결과를 관리 현장에 적용하기 위해서는 CVh 값을 이용한 분석이 가장 적합할 것으로 사료되어 상위 1%의 고밀도 집중분포지역을 확인하였다.

CVh 값을 이용하여 분석한 고밀도 집중분포지역은 경상남도의 창원시, 진주시, 김해시, 밀양시, 양산시, 함안군, 창녕군, 합천군, 산청군, 의령군, 사천시, 부산광역시, 대구광역시, 경상북도의 고령군 등 14개 행정구역 내에 분포하고 있으며, 해당지역에 대해서는 관리자원의 집중 투입을 통한 집중분포지역 제거가 시급히 이루어져야 할 것으로 판단된다(Figure 3).

집중분포지역에 대한 신속한 관리는 지역 내 개체군의 급속한 붕괴와 핵심 분포지역의 제거를 불러오며, 전체적인 개체군 밀도 감소 효과를 가져 온다. 한편, 뉴트리아는 선호하는 환경이 조성된 지역에서 지속적인 서식 경향을 보이므로(Aliev 1968), 집중분포지역 내 서식하는 모든 개체가 포획된 이후에도 재유입을 방지하기 위한 모니터링이 지속될 필요가 있다. 또한 향후 추가되는 연구에서 집중서식지역의 식생 정보와 환경정보 등을 반영하여 선호 서식지역의 특성을 규명하면 주요 서식지역의 검출과 이를 통한 관리 효율 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 뉴트리아의 잠재적 서식가능지역

뉴트리아의 잠재적 서식가능지역을 예측한 AUC 값은 0.948(sd=0.002)로 나타나 모형의 신뢰성을 확인하였다. 모형의 수행능력을 나타내는 AUC 값이 0.5~0.7일 경우 좋지 않은 수행능력, 0.7~0.9는 적절한 수행능력, 0.9 이상은 높은 수행능력을 나타낸

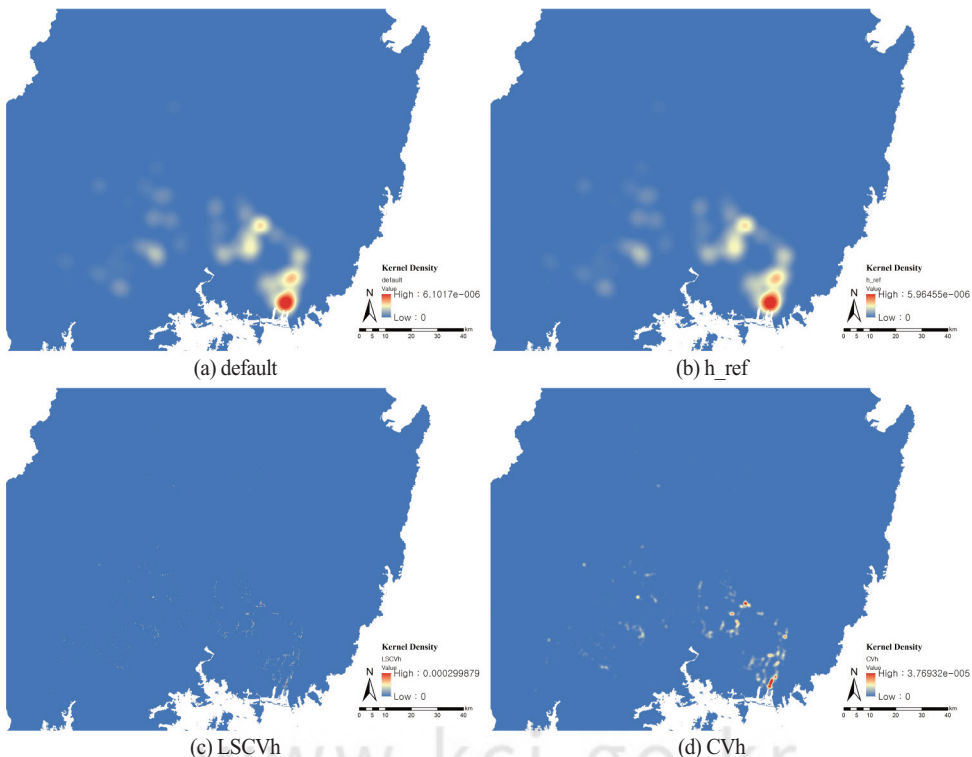


Figure 2. Kernel density using 4 search radiuses.

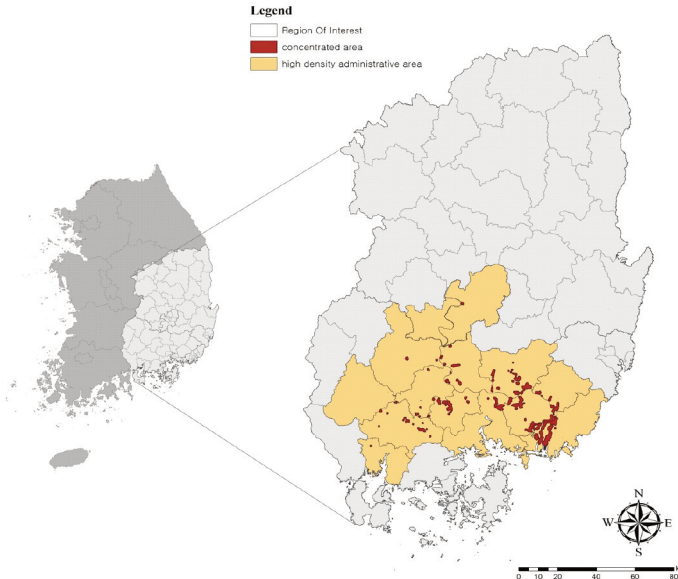


Figure 3. Administrative area including high density area.

(a) default : using default value for bandwidth of kernel function; (b) h_ref : value that calculated by reference method used for bandwidth of kernel function; (c) LSCVh : value that calculated by Least Squares Cross-Validation used for bandwidth of kernel function; (d) CVh : value that calculated by Cross-Validation used for bandwidth of kernel function.

다(Franklin 2009). 임계값을 기준으로 잠재적 서식 가능지역을 출현가능지역과 비출현지역으로 구분하여 예측하면, 낙동강 중하류 일대를 포함하여 섬진강 하류와 가화천 일대에서 뉴트리아의 출현 가능성이 예측되었다(Figure 4). Figure 5에 제시된 뉴트리아 서식확률은 0~1의 범위에서 붉은색을 보일수록 높은 출현확률을 의미한다.

낙동강 중하류의 출현가능지역은 기 보고된 출현 지역과 일치하는 경향을 보였지만, 섬진강 하류에서는 뉴트리아의 출현이 보고된 바 없다(NIE 2017). 이는 지형적인 조건에 따른 이동경로 확보의 어려움이 확산을 제어하는데 일정 부분 영향을 준 결과로 판단된다. 외래생물의 정착과 확산은 생물학적 요인과 비생물학적 요인의 영향을 받는다. 특히, 비생물학적 요인 가운데 지형적인 장애물의 존재는 지리적 연결성 확보 여부를 결정하므로 생물종의 서식 영역 확대를 제한할 수 있다(With 2002; Lockwood et al. 2007; Leuven et al. 2009; Minor et al. 2009). 출현 가능성이 예측된 가화천은 남강과 연결되어 있

므로 사전에 유입을 차단하기 위한 관리방안의 적용과 지속적인 모니터링이 필요하다. 지형적인 조건이 이동경로 확보에 적합할 경우 뉴트리아와 사향쥐 (*Ondatra Zibethicus*) 같은 높은 침입성의 반수생 설치류는 빠르게 확산하여 서식 영역을 확대할 수 있으며, 이러한 사례는 이미 유럽 여러 나라에서 보고된 바 있다(Skyriene & Paulauskas 2012).

각 변수가 모형에 미친 영향을 나타내는 변수별 기여도(percent contribution)에서는 고도(DEM)가 60.5%로 높은 기여도를 보였으며, 가장 건조한 달의 강수량(bio 14)이 15%, 가장 추운 달의 최저 온도(bio 06)가 11.6%, 수계로부터의 거리(d_river)가 9% 순으로 높은 기여도를 나타내었다(Table 2). 모형에 대한 변수의 영향을 보여주는 잭나이프테스트(Jackknife test) 결과, 그 변수만을 사용해서 모형을 만들었을 때 고도와 가장 추운 달의 최저온도가 가장 중요한 영향으로 확인되었고, 가장 건조한 달의 강수량과 고도는 그 변수만을 제거한 결과에서 가장 많은 영향을 준 것으로 나타났다. 고도의 높은 기여도는 실제 뉴

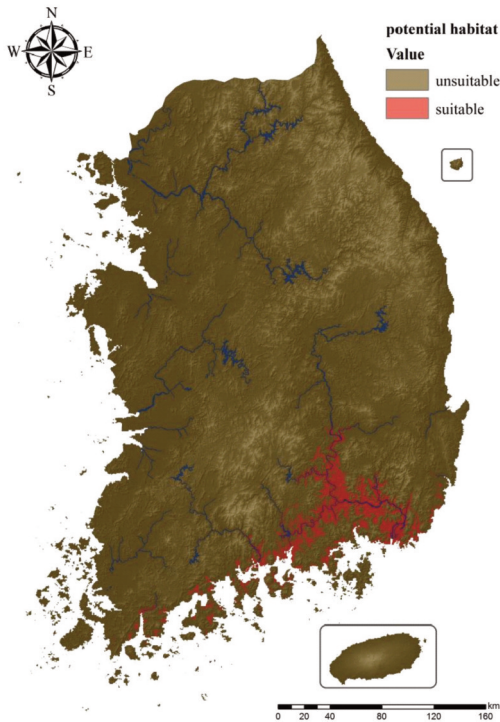


Figure 4. Potential habitat of Nutria in South Korea.

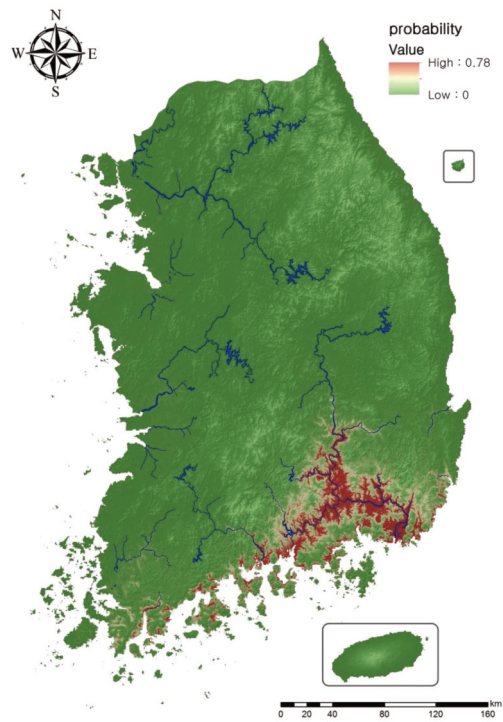


Figure 5. Nutria's probability of presence.

Table 2. Percent contribution of each variable affecting model construction

Variables	Percent Contribution (%)
DEM (Digital Elevation Model)	60.5
bio 14 (Precipitation of Driest Month)	15.0
bio 06 (Min temperature of Coldest Month)	11.6
d_river (Distance from river)	9.0
bio 16 (Precipitation of Wettest Quarter)	1.7
bio 03 (Isothermality)	1.4
bio 12 (Annual Precipitation)	0.6
Slope	0.1

트리아 분포지점이 저지대 하천을 중심으로 집중되어 나타난 특성을 그대로 보여준다. 그리고 Gosling et al.(1983)의 연구에서 밝힌 바 있는 겨울철 낮은 기온이 뉴트리아의 확산과 생존에 주는 부정적인 영향과 뉴트리아의 생태적 특성 상 물과의 접근성 및 이용성에 따라 서식범위가 제한되는 부분은 본 연구 결과를 잘 설명해 준다. 또한 Sheffels(2013)의 기계론적 모델을 이용한 뉴트리아 서식지 적합성 연구에서도 겨울철 기온, 수계로부터의 거리, 수량이 뉴트

리아의 서식가능지역을 예측하는데 있어 가장 중요한 변수임을 확인한 바 있다. 한편, 사용된 환경변수와 출현확률의 관계를 살펴보면, 고도 34m이하의 저지대, 가장 추운 달의 최저온도가 -5.7°C 이상 -0.6°C 이하, 가장 건조한 달의 강수량이 15-30mm, 수계로부터의 거리가 1,373m이하인 서식환경에서 출현확률이 임계값보다 높게 나타났다.

본 연구에서는 기계학습 모형인 MaxEnt를 이용하여 뉴트리아의 서식가능지역을 예측하였지만, 수

변부 일부 지역만을 서식에 활용하는 뉴트리아의 생활 습성을 반영하지 못하였다. 뉴트리아는 수중지역과 고지대 사이의 전이구역 이외의 지역은 서식에 활용하지 않으며, 수량은 서식 적합성에 높은 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Doncaster & Micol 1989; D'adamo et al 2000; Guichon et al. 2003; Lee et al. 2012). 향후 개선된 연구에서는 뉴트리아가 서식에 주로 이용하는 하천과 고지대 사이 전이구역을 대상으로 식생과 하상유형 등을 반영하여 정밀한 공간 지도를 구축하고 다양한 범위의 서식지 환경조건, 생물학적 조건, 생리학적 제약에 관한 변수를 추가하면 보다 활용도 높은 서식가능지역 예측이 가능할 것으로 판단된다. 아울러, 기후변화모델을 통해 뉴트리아의 잠재적 서식 범위 변화 양상을 평가하고 이를 활용하여 세부적인 관리전략을 수립하면 뉴트리아 관리 측면에서 유용한 자료로 활용될 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 뉴트리아의 집중분포지역을 파악하여 우선관리대상지역을 선정하고 잠재적인 서식가능지역을 예측함으로써 효과적인 관리방향 설정에 필요한 기초자료를 구축하고자 하였다. 2015년 생산된 분포자료를 토대로 CVh값을 적용하여 상위 1%에 해당하는 고밀도 집중분포지역을 파악한 결과, 부산광역시, 대구광역시, 경상남도 창원시, 진주시, 김해시, 밀양시, 양산시, 함안군, 창녕군, 합천군, 산청군, 사천시, 의령군, 경상북도 고령군 등 14개 행정구역 내에서 집중적인 분포지역이 확인되어 우선적인 제거가 시급히 이루어져야 할 것으로 판단된다.

잠재적 서식가능지역 예측 모형의 AUC값은 0.948로 나타나 높은 신뢰도를 보였으며, 모형의 변수별 기여도는 고도, 가장 건조한 달의 강수량, 가장 추운달의 최저온도, 수계로부터의 거리 순으로 나타났다. 환경변수와 출현확률과의 관계를 살펴보면, 고도 34m 이하의 저지대, 가장 추운달의 최저온도가 -5.7°C 이상 -0.6°C 이하인 지역, 가장 건조한 달의 강수량이 15-30mm, 수계로부터의 거리가 1,373m 이하인 서식환경에서 임계값보다 높은 출현확률을

나타내었다. 물에 의존하여 살아가는 뉴트리아의 생태적인 특성과 수계와 고지대 사이의 수변 전이구역만을 제한적으로 이용하는 특성, Sheffels(2013)과 Gosling et al.(1983)이 제시한 바 있는 낮은 기온이 뉴트리아 생존에 미치는 부정적 영향을 고려하면, 뉴트리아의 출현은 저지대에서의 물의 존재와 겨울철 기온에 영향을 받는 것으로 추정된다. 이러한 영향 요인은 향후 뉴트리아의 서식가능지역 검출과 확산 예측에 있어 주요 변수로 검토될 수 있다.

임계값을 기준으로 출현가능지역과 비출현지역을 구분한 결과, 낙동강 중하류 및 섬진강 하류와 가화천 일대에서 출현 가능성을 나타내었다. 낙동강 중하류 일대의 출현가능지역은 뉴트리아 분포지역과 일치하는 경향을 보였지만, 섬진강 하류는 그간 뉴트리아의 유입이 관찰되지 않은 지역으로 지형적인 조건에 따른 이동경로 미확보가 확산을 제어한 주요 원인으로 추정된다. 출현가능지역으로 분류된 가화천은 남강과 연결되어 유입의 우려가 있으므로 지속적인 모니터링을 통한 사전 예방적 관리가 필요하다.

2014년부터 환경부에서는 뉴트리아 퇴치프로그램을 실행하며 국가적인 차원의 관리를 이어가고 있다. 퇴치프로그램에는 16명의 현장 포획전문가가 참여하고 있으며, 각각의 할당된 관리구역 내에서 포획을 실시한다. NIE(2017)는 매년 현장조사를 통해 국토 내 서식하는 뉴트리아의 분포지역을 파악하고 있으며, 이를 토대로 포획하여 2017년까지 4년간 24,812개체를 포획한 것으로 보고하였다. 이러한 포획 성과에도 불구하고 영구적인 제어 목표에 도달하기 위해서는 서식실태 변화상을 현장에 즉각 반영할 수 있는 관리전략의 유연성 확보와 능동적인 대처를 위한 관리방향의 설정이 필요하다.

이를 위해 본 연구에서 파악한 집중분포지역과 잠재적인 서식가능지역 예측 결과, 그리고 Baker(2010)가 제시한 영국에서의 성공적 퇴치전략을 종합하면 다음과 같은 관리방향이 검토될 수 있다. 첫째, 서식 현황에 따라 관리대상지역을 고밀도, 중밀도, 저밀도, 확산가능지역으로 구분하고 이에 적합한 관리 전략을 수립한다. 둘째, 외곽지역부터 해안 방향으로 포획활동을 이어가며 서식지역의 면적을 축소하는 방

향으로 관리를 전개한다. 셋째, 현장 포획 전문가는 포획 개시 초반 3개월 동안 각각의 할당된 관리구역 전체를 대상으로 포획을 전개하고, 3개월이 경과된 시점부터 대량으로 포획된 지역에 자원을 집중 투입하여 밀도 저하를 촉진한다. 이와 병행하여 선별된 집중분포지역에 대해서는 포획활동 초반부터 관리자원을 집중하며, 전체적인 개체군 밀도 저하를 유도한다. 넷째, 고밀도 지역에 대한 집중 포획 활동과 동시에 저밀도 지역에 대해서도 지속적인 포획 압력을 유지하여 빈틈없는 관리를 실행한다. 다섯째, 각 서식지 간 이동로를 사전에 차단하여 확산을 미연에 방지하는 등 개체군간 격리된 환경을 조성한다. 여섯째, 모든 활동의 최종 목표는 침입외래생물로 인하여 훼손된 생태계를 복원하는데 있음을 주지하며 관리활동을 전개한다.

사 사

본 연구는 환경부와 국립생태원의 “전국 뉴트리아 서식실태조사” 연구사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Abbas A. 1988. Impact du Ragondin (*Myocastor coypus* Molina) sur une Culture de Mais (*Zea mays* L.) dans le Marais Poitevin. Acta Oecol-Oec Appl. 9(2): 173-189.
- Aliev FF. 1966. Numerical Changes and the Population Structure of the Coypu (*Myocastor coypus*) in Different Countries. Sauguetierkd Mitt. 15: 238-242.
- Aliev FF. 1968. Contribution to the Study of Nutria-Migrations (*Myocastor coypus*). Sauguetierkd Mitt. 16: 301-303.
- ArcGIS Pro. Tool Reference; [Cited 2017 February 8]. Available from: <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/kernel-density.htm>
- Baker SJ. 2010. Control and Eradication of Invasive Mammals in Great Britain. Rev Sci Tech. 29: 311-327.
- Bar-Ilan A, Marder J. 1983. Adaptations to Hypercapnic Conditions in the Nutria (*Myocastor coypus*)-in vivo and in vitro CO₂ Titration Curves. Comp. Biochem. Physiol. 75(4): 603-608.
- Borgnia M, Galante ML, Cassini MH. 2000. Diet of the Coypu (Nutria, *Myocastor coypus*) in Agro- Systems of Argentinean Pampas. J Wildl Manage. 64(2): 354-361.
- Bounds DL. 2000. Nutria: An Invasive Species of National Concern. Wetland Journal. 12(3): 9-16.
- Cronk QCB, Fuller JL. 1995. Plant Invaders: The Threat to Natural Ecosystems. Biodivers Conserv. London. 241p.
- D'adamo P, Guichon ML, Bo RF, Cassini MH. 2000. Habitat Use by *Myocastor coypus* in Agro-Systems of the Argentinean Pampas. Acta Theriol. 45: 25-33.
- Doncaster CP, Micol T. 1989. Annual Cycle of a Coypu (*Myocastor coypus*) Population: Male and Female Strategies. J. Zool. (London). 217: 227-240.
- Franklin J. 2009. Mapping Species Distributions Spatial Inference and Prediction. Cambridge University Press.
- Gosling LM. 1974. The Coypus in East Anglia. Transactions of the Norfolk and Norwich Naturalists' Society. 23: 49-59.
- Gosling LM, Hudson LW, Addison GC. 1980. Age Estimation of Coypus (*Myocastor coypus*) from Eye lens Weight. J Appl Ecol. 17: 641-648.
- Gosling LM, Baker SJ. 1981. Coypu (*Myocastor coypus*) Potential Longevity. J. Zool. (London). 197: 285-312.

- Gosling LM, Baker SJ, Skinner JR. 1983. A Simulation Approach to Investigating the Response of a Coypu Population to Climatic Variation. *Bull. OEPP*. 13(2): 183-192.
- Guichón ML, Doncaster CP, Cassini MH. 2003. Population Structure of Coypus (*Myocastor coypus*) in Their Region of Origin and Comparison with Introduced Populations. *J. Zool*. 261(3): 265-272.
- Hall ER. 1981. *The Mammals of North America*. Second Edition. John Wiley and Sons, New York, 2: 601-1181.
- Heibl C, Renner SS. 2012. Distribution Models and a Dated Phylogeny for Chilean Oxalis Species Reveal Occupation of New Habitats by Different Lineages, not Rapid Adaptive Radiation. *Syst Biol*. 61(5): 823-834.
- Huh J. 2012. Bandwidth Selections based on Cross-Validation for Estimation of a Discontinuity Point in Density. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*. 23(4): 765-775. [Korean Literature]
- Kil JH, Lee DH, Kim YC. 2015. Effective Management of Invasive Nutria (*Myocastor coypus*) in the UK and the USA. *Ecol. Resil. Infrastruct*. 2(4): 265-273. [Korean Literature]
- Kumar S, Stohlgren TJ. 2009. Maxent Modeling for Predicting Suitable Habitat for Threatened and Endangered Tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *J. Ecol. Nat. Environ*. 1(4): 094-098.
- LeBlanc DJ. 1994. Nutria. Prevention and Control of Wildlife damage. B71-B80.
- Lee DH, Kil JH, Yang BG. 2012. Ecological Characteristics for the Sustainable Management of Nutria (*Myocastor coypus*) in Korea. National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- Lee DH, Kil JH, Kim DE. 2013. The Study on the Distribution and Inhabiting Status of Nutria (*Myocastor coypus*) in Korea. *Korean J. Environ. Ecol*. 27: 316-326. [Korean Literature]
- Lee DH, Kil JH. 2015. Analysis of the best practices for nutria management in Europe and North America. National Institute of Ecology. 144p. [Korean Literature]
- Lee DH, Lee MS, Kim YC, Kim IR, Kim HK, Jeong DG, Lee JR, Kim JH. 2017. Complete Mitochondrial Genome of the Invasive Semi-Aquatic Mammal, Nutria *Myocastor coypus* (Rodentia; Myocastoridae). *Conserv Genet Resour*. 1-4.
- Lee SH, Cho KH, Lee WJ. 2016. Prediction of Potential Distributions of Two Invasive Alien Plants, *Paspalum distichum* and *Ambrosia artemisiifolia*, Using Species Distribution Model in Korean Peninsula. *Ecol. Resil. Infrastruct*. 3(3): 189-200. [Korean Literature]
- Leuven RSEW, Velde GVD, Baijens I, Snijders J, Zwart CVD, Lenders HJR, Vaate ABD. 2009. The River Rhine: a Global Highway for Dispersal of Aquatic Invasive Species. *Biol Invasions*. 11: 1989-2008.
- Lockwood JL, Hoopes MF, Marchetti MP. 2007. *Invasion Ecology*. Blackwell Publishing, Oxford, UK.
- Lowe S, Browne M, Boudjelas S, Poorter MD. 2000. 100 of the World's Worst Invasive Alien Species: a Selection from the Global Invasive Species Database. Invasive Species Specialist Group. Auckland. New Zealand.
- Minor ES, Tessel SM, Engelhardt KAM, Lookingbill TR. 2009. The Role of Landscape Connectivity in Assembling Exotic Plant Communities: a Network

- Analysis. Ecology, 90: 1802-1809.
- Miura S. 1976. Disposal of Nutria in Okayama Prefecture. J. Mammal. Soc. Jpn. 6: 231-237.
- National Institute of Ecology. 2015. The Study on the Inhabitation Status of Nutria (*Myocastor coypus*). National Institute of Ecology Press. Seocheon. 186p. [Korean Literature]
- National Institute of Ecology. 2017. The Study on the Inhabitation Status of Nutria (*Myocastor coypus*). National Institute of Ecology Press. Seocheon. 197p. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research. 2006. A Study of Detailed Survey on Invasive Alien Species in Korea and Designation of Invasive Alien Species in Foreign Countries. National Institute of Environmental Research Press. Incheon. 408p.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. 2006. Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distributions. Ecol Modell. 190: 231-259.
- Phillips SJ, Dudik M. 2008. Modeling of Species Distributions with Maxent: New Extension and a Comprehensive Evaluation. Ecography. 31: 161-175.
- SCBD. Secretariat of the Convention on Biological Diversity. 2014. Global Biodiversity Outlook 4. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Canada.
- Sheffels TR. 2013. Status of Nutria (*Myocastor coypus*) Populations in the Pacific Northwest and Development of Associated Control and Management Strategies, with and Emphasis on Metropolitan Habitats. Thesis for degree of Doctor of Philosophy. Portland State University, Portland, USA.
- Silverman BW. 1986. Density Estimation for Statistics and Data Analysis. New York: Chapman and Hall. 76p.
- Skyrienié G, Paulauskas A. 2012. Distribution of Invasive Muskrats (*Ondatra zibethicus*) and Impact on Ecosystem. Ekologija. 58: 357-367.
- Song WK. 2015. Habitat Analysis of *Hyla sswuonensis* in the Breeding Season Using Species Distribution Modeling. J. Korean Env. Res. & Reveg. Tech. 18(1): 71-82. [Korean Literature]
- Wilcove DS, Rothstein D, Dubow J, Phillips A, Losos E. 1998. Quantifying Threats to Imperiled Species in the United States. Bioscience. 48: 607-615.
- With KA. 2002. The Landscape Ecology of Invasive Spread. Conservation Biology. 16: 1192-1203.
- Woods CA, Howland EB. 1979. Adaptive Radiation of Capromyid Rodents: Anatomy of the Masticatory Apparatus. J. Mammal. 60: 95-116.
- Woods CA, Contreras L, Willner-Chapman G, Whidden HP. 1992. *Myocastor coypus*. Mammalian Species. 398: 1.
- World Clim - Global Climate Data. WorldClim Version2. bio 30s; [Cited 2017 July 13]. Available from: <http://worldclim.org/version2>
- Worton BJ. 1989. Kernel Methods for Estimating the Utilization Distribution in Home-Range Studies. Ecology. 70: 164-168.
- Worton BJ. 1995. Using Monte Carlo Simulation to Evaluate Kernel Based Home-Rang Estimators. J. Wildl. Manage. 59: 794-800.
- Yoo SH, Lee KS, Park CH. 2013. MCP, Kernel Density Estimation and LoCoH Analysis for the Core Area Zoning of the Red-crowned Crane's Feeding Habitat in Cheorwon, Korea. Korean J. Environ. Ecol. 27(1): 11-21. [Korean Literature]
- Zietsman L. 2011. Observations on Environmental Change in South Africa. SUN Press. 177p.