

황구지천 내 수달(*Lutra lutra*) 서식지 적합성 분석을 통한 관리 전략 제안*

송 원 경

단국대학교 생명자원학부 녹지조경학전공 교수

Management strategy through analysis of habitat suitability for otter (*Lutra lutra*) in Hwangguji Stream*

Song, Won-Kyong

Dept. of Landscape Architecture, Dankook University, Professor.

ABSTRACT

Otters, designated as Class I endangered wildlife due to population declines resulting from urban development and stream burial, have seen increased appearances in freshwater environments since the nationwide ban on stream filling in 2020 and the implementation of urban stream restoration projects. There is a pressing need for scientific and strategic conservation measures for otters, an umbrella and vulnerable species in aquatic ecosystems. Therefore, this study predicts potential otter habitats using the species distribution model MaxEnt, focusing on Hwangguji Stream in Suwon, and proposes conservation strategies. Otter signs were surveyed over three years from 2019 to 2021 with citizen scientists, serving as presence data for the model. The model's outcomes were enhanced by analyzing 'river nature map' as a boundary. MaxEnt compared the performance of 60 combinations of feature classes and regularization multipliers to prevent model complexity and overfitting. Additionally, unmanned sensor cameras observed otter density for model validation, confirming correlations with the species distribution model results. The 'LQ-5.0' parameter combination showed the highest explanatory power with an AUC of 0.853. The model indicated that the 'adjacent land use' variable accounted for 31.5% of the explanation, with a preference for areas around cultivated lands. Otters were found to prefer shelter rates of 10-30% in riparian forests within 2 km of bridges. Higher otter densities observed by unmanned sensors correlated with increasing model values. Based on these results, the

*이 연구는 2022년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음(R202201152).

First author : Song, Won-Kyong, Dept. of Landscape Architecture, Dankook University, Professor,
Tel : +82-41-550-3636, E-mail : parkjh1004@kfca.re.kr

Corresponding author : Song, Won-Kyong, Dept. of Landscape Architecture, Dankook University, Professor,
Tel : +82-41-550-3636, E-mail : parkjh1004@kfca.re.kr

Received : 21 May, 2024. **Revised** : 22 August, 2024 **Accepted** : 1 July, 2024

study suggests three conservation strategies: establishing stable buffer zones to enhance ecological connectivity, improving water quality against non-point source pollution, and raising public awareness. The study provides a scientific basis for potential otter habitat management, effective conservation through governance linking local governments, sustainable biodiversity goals, and civil organizations.

Key Words: Suwon, SDM, River natural map, Camera trap, Urban river, Citizen science

I. 서 론

수달(*Lutra lutra*)은 강이나 해안가, 계곡, 습지 등 수환경 권역에 서식하는 종으로 건강한 수생태계의 지표종이자 하천 생물다양성의 조절자 역할을 하는 우산종이자 핵심종으로 알려져 있다(Forster-Turley et al., 1990). 특히 수달은 하천 중심의 선형 활동 특성으로 인해 하천 매립 등 도시화로 큰 영향을 받고 있다. 인공적인 토지이용 변화로 서식지가 단절되고 번식 활동 등이 제한됨에 따라 다른 육상 포유류에 비해 낮은 개체군 밀도를 보이는 취약종으로 존재하고 있어 보호 대책 마련이 시급하다(Korea Otter Protection Association, 2019).

최근 유역관리 관점에서 하천 및 습지 생태계의 중요성이 높아짐에 따라 하천 생태복원 이후 도시 담수 환경에서 빈번하게 수달이 발견되고 있다. 이에 시민 및 환경단체 등에 의해 자체적으로 수달 모니터링이 진행되고 있으며, 지자체 단위에서도 지역 내 수달 보호를 위한 업무 협력·협약, 보호 방안 연구 등이 수행되고 있다(Suwon Environmental Movement Center, 2020). 그러나 지역에서 수행되는 수달 모니터링과 수달 보호 정책이 유기적으로 연계되지 못하는 등 장기적인 관점에서 지속가능한 수달 보호 전략 마련에는 한계가 있는 상황이다.

수달 서식지 연구 측면에서 GPS, 무인 센서 카메라 및 환경DNA 등 환경 모니터링 융합 기술을 활용해 객관적인 수달의 공간 분포를 파악하기 위한 연구가 확대되고 있다(Jeong et al.,

2015; Kim et al., 2021). 이러한 연구 결과는 공간 통계 모형 등과 결합하여 수달의 잠재 서식지 분석으로 이어지고 있다. 그러나 수달의 선형적인 서식 및 이동 특성을 고려하지 않은 분석 범위 설정, 지역적 공간 단위를 고려하지 않는 출현 지점 및 환경 변수 등의 한계로 연구 결과가 효과적으로 정책 제안으로 이어지지 못한 한계가 있다(Jo et al., 2017; Shin et al., 2020).

본 연구는 수원시 황구지천을 대상으로 시민 과학자들과 함께 3년간 수집한 수달 출현 및 흔적 정보를 바탕으로 수달의 선호 및 위험 환경 요인들을 고려하여 지역 차원에서 수달의 잠재 서식지역을 평가하는데 목적이 있다. 또한 수달 서식지 적합성 분석 결과와 수원시 지역 현황을 연계하여 정책적 관점에서 수달 보호를 위한 대안적 목표를 제시하고자 수행되었다.

II. 연구방법

1. 연구대상지

황구지천 내 수달의 서식지 적합성을 분석하기 위해 본 연구는 황구지천 지방하천 수계 북쪽인 의왕시 왕송저수지부터 남쪽 원천리천 합류부 지점까지 약 12.75km를 연구 대상지로 선정하였다. 수원시 도시생태현황도(2019)에서 제작된 하천자연도 자료의 황구지천 25개 구간을 분석 범위로 설정하였다(Figure 1). 수달은 광역적 범위에서 직선 형태의 서식 공간을 점유하는 특성이 있다. 일반적으로 수컷은 약 15km, 암컷의 경우 7km 정도의 수계 구간을 서식지로 이

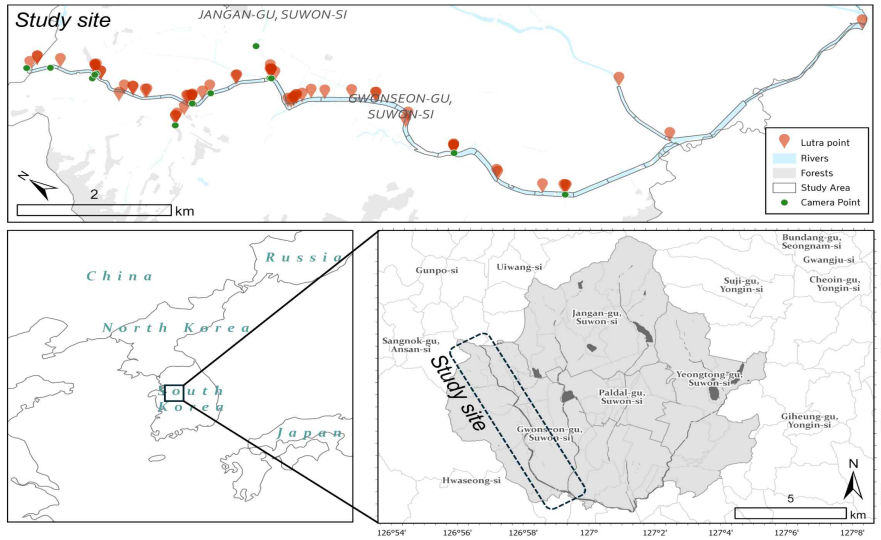


Figure 1. Research site. Red pins indicate the location of otter tracks. Bold black boundaries represent 25 sections of the Hwanggugicheon River Natural Map.

용한다. 각 세력권은 일부 중첩되기도 하므로 황구지천은 약 1-2개의 세력권이 형성될 수 있는 지역으로 추정된다.

수원시를 통과하는 황구지천은 지방하천으로서 유역면적은 84.75km²이며, 유로연장은 18.81km로 황구지천(국가하천) 유역의 중·상류에 위치한 안성천의 제2류이다. 황구지천은 의왕시 오봉산에서 발원하여 왕송저수지를 통해 남류하며 서호천과 합류한 후 본류로 연결된다. 행정구역상으로는 경기도 수원시, 화성시, 군포시, 의왕시를 포함하고 있으며 동쪽으로는 수원천, 북쪽으로는 군포시 삼성산을 경계로 서쪽으로는 칠보산 능선을 분수령으로 하고 있다. 제내지를 포함한 황구지천 유역은 시가지지역이 약 47.3%로 하천 주변이 주거지역이며, 그 외 임지 약 26.5%, 농경지역 약 23.5% 순으로 다른 하천과 비교해 농경지 및 임지의 비중이 높은 것으로 확인된다. 현재까지 토지이용변화를 고려할 때 황구지천은 지속적인 택지개발사업 등의 영향으로 도시화율이 지속해서 증가할 것으로 예상된다.

Gyeonggi Provincial Assembly(2018)에 따르면

황구지천 지방하천의 하류 구간의 하상 경사는 1/1,530으로 매우 완만한 편으로 확인되었으며 평균 유속은 1.21~3.73m/s, 주요 하폭은 26~120m 정도로 좁아 유속과 계절별 수심 차이에 영향을 미칠 수 있을 것으로 확인되었다. 또한 4개의 취수보가 설치되어 생물 이동이 단절될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 환경부의 물환경정보시스템을 통해 황구지천 지방하천 수질측정망 2개소 지점에서 수질을 확인할 수 있는데, 수질은 약간 좋음과 매우 나쁨 사이로 나타났다. 수질은 하류지역인 황구지천1(배양교) 지점보다 상류인 황구지천-2(왕송저수지유출구) 지점이 더 우수하였으며, 최근 5년간 전반적으로 개선되는 추세가 확인되었다. 수달의 주요 먹이자원인 어류 조사 결과, 황구지천(대황교동 지점) 내 어류 건강성 평가 등급은 2016년 D등급(나쁨)에서 2019년 C등급(보통)으로 좋아졌으며, 붕어(*Carassius carassius*)와 모래무지(*Pseudogobio esocinus*) 등이 우점하여 수달의 주요 먹이자원 역할을 할 것으로 확인되었다.

2. 수달 출현 자료 구축

2019년부터 2021년까지 3년간 봄(4-5월), 여름

Table 1. List of Spatial Variables Applied to the Species Distribution Model

Category	Environmental variables	Data source	Data type	Variable Inclusion Status	reference
Cover	Channel development	Suwon City River Naturalness map	Categorical	O	kim et al.(2006)
	Transverse structures			O	shin et al.(2017)
	Width diversity			O	park et al.(2012)
	Flow diversity			O	Gomez et al.(2009)
	Bank diversity			O	kim et al.(2006)
	Vegetation diversity			O	kang(2012)
	Revetment			O	shin(2016)
	Longitudinal arrangement along the low flow channel			O	Gomez et al.(2009)
	Adjacent land use			O	Ail et al.(2010)
	Riparian vegetation cover			O	Gomez et al.(2009)
Disturbance	Distance from agricultural areas	Land cover map	Continuous	X	Jung et al.(2015)
	Altitude	National Geographic Information Institute (NGII)		X	Mirzaei et al.(2009)
	Slope			O	
	NDVI	Sentinel-2 L2A		X	sentinelhub(2024)
	NDWI			X	
Disturbance	Distance from roads	Land cover map		X	Mirzaei et al.(2009)
	Distance from transportation corridors	Suwon City River Naturalness map		O	Jang et al.(2008)
	Distance from weir			O	
	Distance from stormwater outfall			X	

(6-8월), 가을(9-10월) 각 1회씩 황구지천에 서식하는 수달의 흔적을 조사하였으며, 그 외 황구지천을 이동할 때 발견되는 흔적들을 추가로 야장에 기입하였다. 추가적으로 황구지천 내 수달 개체 수를 파악하기 위해 2021년 4월 8일 21시부터 24시까지 전문가와 시민과학자 8명으로 구성된 조사자들이 도보로 이동하면서 관찰 조사를 수행하였다. 조사 결과 수달 흔적 외 실체는 발견하지 못하였으나, 황구지천에 서식하는 수달 흔적 지점을 64개 수집하여 이를 공간 분석에 활용하였다(Suwon City Research Institute, 2000).

3. 수달 생육 특성 및 환경변수 선정

수달은 반수생 포유류 족제비과로 수달아과로 분류된다. 국내에는 Eurasian Otter(*Lutra lutra*)라고 불리는 1종이 서식하며 멸종위기야생생물 I급, 천연기념물 제330호로 지정되어 보호되고 있다(Association of Korean Otter Conservation, 2019). IUCN에는 적색리스트의 ‘취약(Vulnerable)’급으로 분류되어 전 세계적으로

로 보호가 필요한 종으로 관리되고 있다. 특히 수달은 건강한 담수 환경 지표종이자 수생태계 우산종으로서 생물다양성을 유지하는 조절자 역할을 담당하고 있다(Daegu Metropolitan City, 2015). 수달은 유선형의 몸으로 몸길이는 1,000~1,370mm 사이로 주로 겨울에 짝짓기하며, 약 60일간의 임신 기간을 통해 2~3마리의 새끼를 낳는 것으로 알려져 있다(Association of Korean Otter Conservation, 2019).

수달의 서식 적합성을 평가하기 위해 일반적으로 수달 번식 및 휴식에 영향을 미치는 커버 자원과 먹이자원, 방해요인, 서식지 충실도 등을 고려하고 있다(Ha et al., 2020). 본 연구에서는 선행연구를 통해 수달의 서식에 영향을 미칠 것으로 판단되는 77개 후보 데이터를 검토하였으며, 이 가운데 GIS 상 20m 고해상도 공간 데이터로 수집이 가능한 환경 변수 19개를 최종적으로 구축하였다(Table 1).

먼저 커버자원으로 ‘수로의 발달’, ‘황구조물’, ‘호름의 다양성’, ‘폭다양성’, ‘저질다양성’,

‘저수로변 식생’, ‘호안공’, ‘저수로변 종방향 배열’, ‘인접 토지이용’, ‘하천변 대상 수립’ 등의 범주형 변수를 수원시 하천자연도 25개 구간에서 취득하였다. 하천자연도는 환경부(2012)의 ‘하천자연도 평가기법’과 국토교통부(2014)의 ‘하도유지관리 기준 및 적용지침’에 따라 현장에서 권역별로 조사 야장을 이용하여 우점식생, 지형, 재료, 토지이용 현황 등을 조사하여 기록한 자료로, 총 19개 항목으로 구분되며 5개 등급으로 평가된 자료이다(부록 1; 수원시, 2019).

그 외 토지피복지도를 통해 ‘농경지로부터 거리’를 구축했으며 1:5,000 수치지형도를 통해 ‘고도’, ‘경사’ 변수를 산출했다. 또한 식생과 수환경의 건강성을 평가하기 위해 2021년 8월 15일에 촬영된 Sentinel-2 L2A 영상을 취득하여 ‘정규화 식생지수(NDVI)’, ‘정규화습윤지수(NDWI)’를 확인하였으며 변수의 공간해상도는 20m로 통일하였다. NDVI와 NDWI는 2020~2021년 여름철 평균 변화량을 확인했다(Pasqualotto et al., 2019). 수달 서식의 방해요인으로 ‘도로로부터 거리’, ‘교량으로부터 거리’, ‘보로부터 거리’, ‘우수 토구로부터 거리’ 등 인위적 요소와의 물리적 거리를 확인하였다. 선정된 19개 환경 변수 중 다중공선성을 가진 변수를 제거하고 공간자기상관을 최소화하기 위해 변수 간 피어슨 상관계수를 확인하여 $r=0.80$ 이상인 변수는 초기모델 결과에서 설명력이 낮은 변수 순서로 제거하였다. 이후 연구자가 직접 출현 지점과 환경 변수를 대조하면서 모형 결과에 오인을 일으킬 것으로 판단되는 변수를 추가로 제거했다.

4. 종분포모형 매개변수 최적화

본 연구에서는 황구지천에서 확인된 수달의 흔적을 토대로 잠재 서식지역 적합성을 분석하기 위해 종분포모형(SDM, Species Distribution Model)을 이용했다. SDM 중 종의 출현 자료를 기반으로 생물종분포의 무질서도(entropy)를 극대화할 수 있는 값을 추정하여 공간에서 확률분

포를 나타내는 MaxEnt를 활용했다(Phillips et al., 2008). MaxEnt는 목표종의 출현 위치 자료를 입력했을 때 출현 위치의 환경적 특성을 학습하여 비출현 확률을 추정하여 이를 기반으로 생물종의 점유 및 분포를 예측하는 기계학습 방법이다.

MaxEnt는 다양한 환경 설정에 의해 결과값이 매우 달라지기 때문에 매개변수 설정이 중요하다. 대표적으로 MaxEnt는 기능 조합(FC; feature class)과 정규화 승수(RM; regularization multiplier) 두 가지 매개 변수 조합에 의해 예측 성능 결과가 영향을 받는다(Kim et al., 2022). FC는 L(linear), Q(quadratic), P(product), T (threshold), H(hinge), C(categorical) 6개 조합으로 기능 조합이 가능하며, 이는 모델에 적용한 독립변수들의 수학적인 변화 종류를 의미한다(Elith et al., 2011). RM은 모형에 적용한 FC의 강도를 제어하고 모형 복잡성 및 과적합을 방지하는 매개변수로 활용된다(Oh et al., 2021). 일반적으로 RM 값이 클수록 지역 단위에서 광범위하게 적용할 수 있도록 성능을 향상시키며, 반대로 RM 값이 작을수록 국지적 단위에서의 분포 예측에 적합하다(Kim et al., 2022). 본 연구에서는 RM 값을 0.5부터 5.0까지 0.5씩 등차로 증가시켜 상수 조건을 확인하였다. 최종적으로 6가지 FC와 10가지 RM 조건을 각각 적용하여 총 60개 매개변수에 따른 성능을 비교하고 AICc값이 가장 낮은 매개변수를 설정했다(Warren and Seifert, 2011). 모형 매개변수 최적화 설정은 R package ‘*raster*’, ‘*ENMTools*’, ‘*ENMeval*’ 등을 활용하였다.

MaxEnt 분석에 활용한 종 출현 지점은 무작위로 일관되게 조사되었다는 것을 기본 가정으로 설정한다(Kramer-Schadt et al., 2013). 그러나 조사자의 주관에 따라 실제로 종의 출현 지점은 공간적으로 편향되어 모형의 결과가 과소적합 되거나 과적합 될 수 있다(Yackulic et al., 2013). 따라서 본 연구에서는 종 출현 지점을 기반으로 2차원 커널 밀도 추정치를 제공하는 R package ‘*MASS*’의 *kde2d* 함수를 사용하여 bias

Table 2. AICc Values for Models by Feature Combination (FC) and Regularization Multiplier (RM) Parameters (RM: Feature Combination, RM: regularization multiplier, AUC.train: AUC on training data, delta.AICc: change in AICc, w.AIC: AIC weight, ncoef: number of variables used)

FC	RM	AUC.train	AICc	delta.AICc	w.AIC	ncoef
LQ	5.0	0.849	685.260	0.000	0.418	16
LQH	4.0	0.881	685.546	0.286	0.362	20
LQH	3.5	0.884	688.195	2.935	0.096	21
LQH	5.0	0.873	689.145	3.885	0.060	19
LQH	4.5	0.877	690.257	4.997	0.034	20
LQH	3.0	0.887	691.888	6.628	0.015	22
LQ	4.5	0.854	692.916	7.656	0.009	18
LQ	4.0	0.858	696.149	10.889	0.002	19
L	4.0	0.860	697.314	12.055	0.001	19
LQHP	4.5	0.873	698.341	13.081	0.001	20

layer를 생성하고 모형에 적용하여 모델 결과의 과적합을 방지했다(Kim et al., 2022). 추가적으로 ‘Replicates’는 10회, ‘Replicated run type’은 ‘Bootstrap’으로 선택하여 모형의 불확실성을 감소시켰다. 모형에서 사용 가능한 배경 지점이 약 2,000개로 확인되어 ‘Max number of background points’를 2,000으로 설정했다(Barbet-Massin et al., 2012).

MaxEnt의 신뢰도는 ROC(Receiver Operating Characteristics) 곡선을 활용했으며 AUC(Area Under the Curve) 값을 정확도의 기준으로 삼았다. AUC 값이 모형의 성능을 평가하는데 절댓값은 아니지만, 일반적으로 동물은 이동성을 고려하여 0.70-0.80 사이의 AUC 값은 ‘수용 가능’하며, 0.80 이상의 AUC 값이라면 모형을 ‘신뢰’할 수 있다고 판단한다(Hansson et al., 2005; Carter et al., 2016). 변수의 중요성은 순열 중요도(permutation importance)와 백분율 기여도(percent contribution)로 확인하며 변수 간 중요도는 Jackknife 검정을 수행하여 확인했다. 또한 개별 변수별 반응곡선을 확인하여 변수 내 수달 출현에 영향을 미치는 분포확률 범위를 확인했다. 마지막으로 모형 결과에 따른 잠재 출현 임계값 설정을 위해 보편적으로 활용하는 ‘최대 테스트 민감도 + 특이도 임계값’인 ‘Maximum test sensitivity plus specificity

Logistic threshold’를 사용했다(Liu et al., 2005).

5. 모형검증

모형 결과를 검증하기 위해 유사한 시기에 황구지천에서 무인센서 카메라를 통해 수집된 수달 밀도 정보와 비교 분석하였다. 무인센서 카메라는 황구지천 내 보, 굴다리 등 주요 수달 출현 지점에서 2021년 6월부터 10월까지 약 5개월 간 13곳에서 수집된 자료를 활용하였다(Figure 1). 카메라로 취득된 수달은 형태학적으로 유사하고, 암수 구분이 어려우므로 같은 개체 수의 무리더라도 무리 내 크기 차이가 명확하다면 다른 무리로 판단하였고 단독 개체가 촬영되었을 때 인접 카메라와 연계 분석하여 특정 방향으로 연속적으로 촬영되었을 경우 같은 개체로 판단하는 등 명확한 기준에 따라 개체를 판독하였다. 판독된 수달 개체 밀도는 중분포모형 결과와 상관성을 확인하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 모형 성능 및 변수 중요도 평가

19개의 환경 변수 중 0.80 이상 상관관계가 확인된 변수 중 초기 모형에서 설명력이 낮거나 NDVI와 NDWI와 같이 위성 기반으로 교량 하

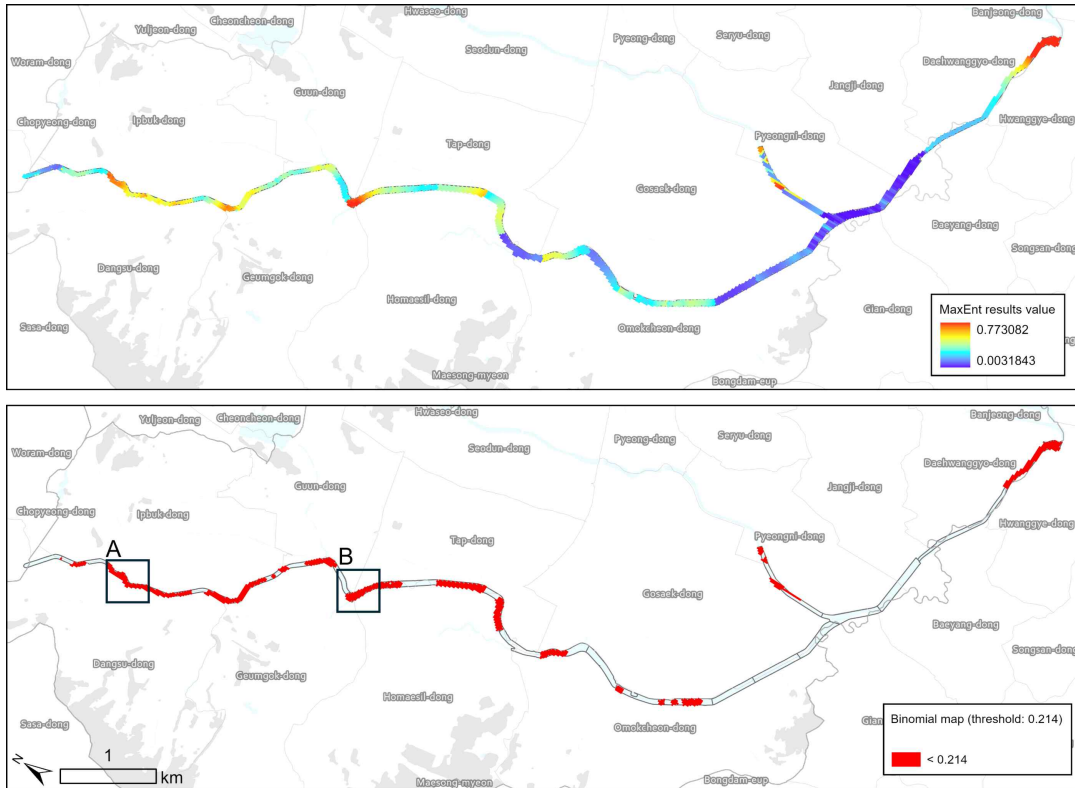


Figure 2. (Above) Final MaxEnt analysis map according to 13 environmental variables. (Below) Binary map of potential occurrence of Eurasian otter based on 'Maximum test sensitivity plus specificity Logistic threshold'.

부 지역에 대한 식생 및 습윤 정도에 대한 해석이 어려운 변수를 제거하여 최종적으로 본 모형에는 13개의 환경 변수를 적용했다(Table 1).

모형의 매개변수 설정 결과 FC 값은 'LQ', RM 값은 '5.0'을 선택하는 'LQ-5.0'가 가장 설명력이 높은 것으로 확인되었다(Table 3). LQ-5.0 매개변수를 적용한 모형의 훈련데이터에서의 AUC는 0.849로 가장 높았으며 AICc는 685.55로 확인되었다.

해당 매개변수 조합을 MaxEnt에 적용하여 황구지천 내 수달의 잠재 서식지역을 분석 결과, 10회 평균 부트스트랩 모형 기반 평균 AUC 값은 0.853으로 확인되어 모형의 성능이 우수한 것으로 평가되었다(부록 2). 분석 결과, 황구지천 수달 출현에 있어 인접 토지이용(31.5%) 변

수가 모델 결과를 설명하는데 가장 높게 기여한 것으로 확인되었으며, 그 외 교량으로부터 거리(10.9%), 하천변 대상 수림의 차폐율(9.1%), 수로의 발달(8.6%), 황구조물(8.4%) 순으로 변수 기여도가 확인되었다. 기여도가 높은 변수들에 대해 개별 반응 곡선을 확인한 결과, 인접 토지이용이 시가지 또는 경작지가 50% 이상, 교량으로부터 거리가 2km 이내, 하천변 차폐율이 10~30%, 수로의 발달 정도(굴곡, 구조 등)가 70% 정도, 황구조물이 없을수록 수달 출현에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 확인되었다(Figure 3).

특히 재내지 토지이용이 시가지 및 농경지인 경우 수달 출현에 긍정적인 영향을 미친 것으로 확인되었는데, 해당 지역의 재내지 토지피복 대

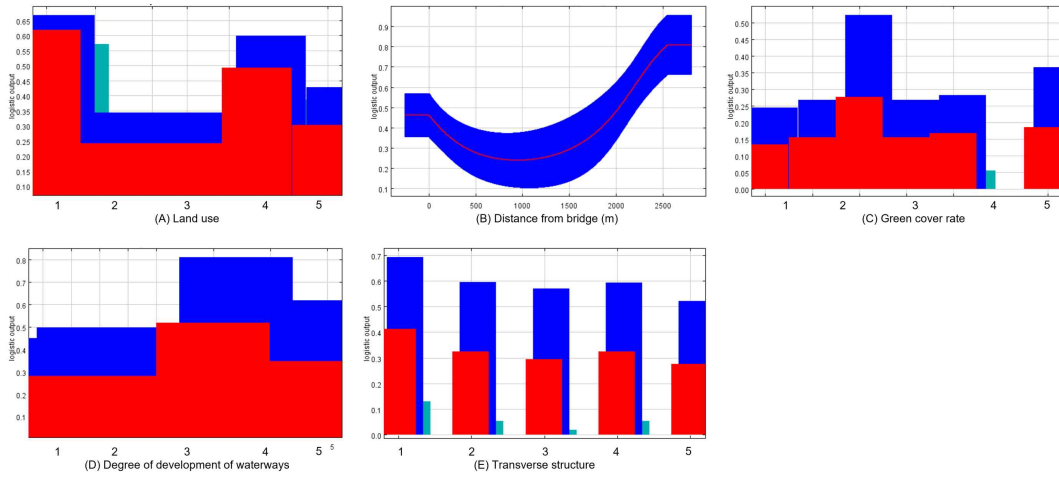


Figure 3. Individual response curve graphs for the environmental variables contributing to the MaxEnt model. (A) represents adjacent land use, (B) represents distance from bridge, (C) represents riparian vegetation cover, (D) represents channel development, and (E) represents transverse structures. For the legend of individual variables, refer to Appendix 1.

부분이 경작지이고, 전답을 포함하여 단독 건물 형태의 주거지역이 분포하고 있기 때문에 해석된다. 낙동강 대권역을 대상으로 수달의 서식 환경을 평가한 Shin(2016)의 연구에서는 녹지가 혼재된 자연 상태의 지역을 가장 선호하는 것으로 확인되었으나, 일부 경작지 및 시가지에서 수달 출현의 긍정적 영향이 확인되었다. 시가지 개발과 함께 하천 정비 등 친환경적 관리가 병행되면서 수달의 서식환경이 개선된 것으로 해석될 수 있다. 도시화 과정에서 적절히 수행된 하천 식생 보호와 서식지 관리가 수달의 서식지의 질과 연결성, 먹이 자원의 가용성 등을 향상해 도시 지역에서도 긍정적인 생물 서식환경이 유지될 수 있다는 연구와도 유사한 결과라 판단된다 (Tolrà et al., 2024). 또한 최근 하천 정비 사업 등으로 하천의 연결성이 확보됨에 따라 도심 하천에서도 빈번하게 수달이 목격되고 있는 최근의 동향과 유사한 결과라 판단된다.

하천의 황구조물은 유량 및 용수 확보를 위해 조성한 인공 구조물이지만 어류 등 수생생물의 이동 흐름을 방해하는 요인이므로 서식지에 영향을 미칠 수 있는 요인으로 판단된다. 반면 교

량은 인공 구조물임에도 불구하고 수달이 헤엄을 치고 난 후 휴식을 취하는 장소로 수달 출현에 유의한 영향을 미친 것으로 기존 연구들과 유사한 결과로 확인되었다(Han, 1997; Han, 2012). 또한 황구지천 내 수달은 하천변 수림의 차폐율이 10~30% 정도 포함되는 것을 선호하는 것으로 확인되었으나 모형 분석 결과, 저수로변의 식생 유무와 서식 가능성은 큰 관련이 없는 것으로 확인되었다. 또한 보로부터 거리나 하천 흐름의 다양성 역시 수달 출현에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 본 연구에서는 교량, 보 등 인공 구조물과의 물리적인 거리 변수만을 확인하였기에 향후 연구에서는 구조물의 형태적인 특징이나 어도의 존재 유무 등 속성 변수를 반영한 환경 변수를 서식지 분석에 활용할 필요가 있음을 확인할 수 있었다.

2. 황구지천 주요 수달 잠재 서식 지역 분석

황구지천 내 수달 잠재 서식지를 이진으로 평가하기 위해 활용한 모형의 ‘최대 테스트 민감도 및 특이도 임계값’은 0.214로 확인되었다. 황구지천 내 주요 수달 잠재 지역을 세부적으로

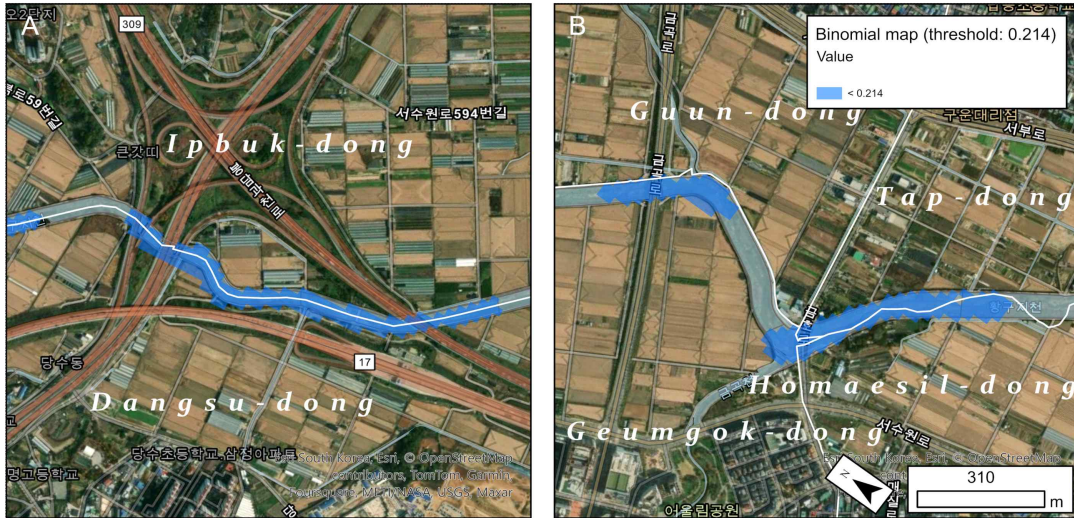


Figure 4. (Above) Final MaxEnt analysis map according to 13 environmental variables. (Below) Binary map of potential occurrence of Eurasian otter based on 'Maximum test sensitivity plus specificity Logistic threshold'.

확인한 결과, 수원시 당수동과 입북동 경계 중 서수원 IC 일대가 수달 서식 가능성이 큰 것으로 평가되었다. 이는 봉담과천로-서수원 IC를 잇는 대규모 입체 구조물이 수달의 휴식과 서식처 기능을 제공하는 역할을 했기 때문으로 판단된다(Figure 4A). 이 지역은 교량 내 인공적인 차폐막이 설치되어 있어 물리적으로 인간의 영향이 최소화되어 있는 지역으로 확인되었다. 향후 지속적인 수달 서식지 확보를 위해 산책로와 하천을 물리적·시각적으로 분리하는 등의 관리 방안이 도입될 필요가 있다.

또한 금곡동, 호매실동, 구운동, 탑동을 잇는 황구지천 금곡교 수계에서 수달의 서식 가능성이 있는 것으로 확인되었다(Figure 4B). 특히 서수원 IC의 대규모 교통량과 함께 금곡교 도로, 공장 등으로 인해 인위적인 교란 요인이 있었음에도 주변 자연 지역 보다 수달의 서식 가능성이 높았는데, 이는 도시생태계 내 수달의 서식 환경을 유지하기 위해 교량보다도 교량 등 휴식처가 될 수 있는 공간의 유무가 더 중요할 수 있다는 것으로 해석되었다. 따라서 황구지천 수달 보전을 위해서는 도시 하천의 교량 하부 주변을

집중적으로 관리하는 것이 가장 중요하며, 추가적으로 하부 주변은 차폐식재를 통해 시민으로부터 수달의 시각적 노출을 막는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3. 모형검증

기간 내 황구지천에 설치된 13대의 개별 무인센서 카메라에 최소 0회부터 최대 27회까지 수달이 포착되었다. 수달의 출현 밀도와 모형 결과 간 상관관계를 확인한 결과, 수달 출현 빈도가 높을수록 모형의 서식 가능성이 함께 증가하는 경향을 보였으나 통계적으로 유의한 수준은 아니었다($r=0.390$; $p=0.20$). 이는 무인센서 카메라가 설치된 위치가 전문가 판단에 따라 소수만이 설치되어 다양한 환경정보를 반영하지 못했기 때문으로 판단된다. 또한 카메라 설치 기간이 여름철 5개월 정도로 한정되어 충분한 정보를 분석에 반영하지 못한 것도 한계로 평가된다. 향후 연구에서는 표본과 주기 해상도를 높이는 방식으로 실제 관찰 데이터를 통해 서식 가능성 모형을 보완될 필요가 있다고 판단된다.

4. 황구지천 수달 보호 전략 제안

황구지천은 수원시의 유일한 자연형 하천으로, 모형 분석 결과 넓은 농경지의 분포 그리고 차폐된 교량 하부 지역 등 유리한 수달 서식 조건을 갖추고 있는 것으로 확인되었다. 특히 수원시는 2030 지속가능발전목표 중 주요 목표로 「건강하고 조화로운 생물다양성」과 세부 목표로 「8대 깃대종과 기후변화 지역지표종 모니터링」으로 설정하는 등 생물다양성 증진에 대한 높은 의지가 있다. 따라서 본 연구를 통한 수달 잠재 서식 지역에 대한 과학적 근거, 지자체 차원의 목표, 시민단체가 진행하는 수달 모니터링 프로젝트가 연계된다면 민·관·학 분야의 거버넌스로 효과적인 수달 보전이 가능할 것으로 판단된다.

연구 결과를 토대로 수달 보호를 위한 2가지 전략을 제안하고자 한다. 첫째, 인간 교란을 최소화할 수 있는 차폐 역할을 할 수 있는 완충지대 설정이 필요하다. 모형 분석 결과, 경작지 및 교량을 선호할 것으로 예측되었기 때문에 연결성 확보 측면에서 인간과의 행동권을 분리하고 교량 하부에 인공 보금자리를 조성하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 둘째, 수달 보호를 위한 시민 역량 제고는 지속적인 인간의 부정적인 간섭을 시민이 주체적으로 관리할 수 있는 효과적인 대응방안이 될 수 있다. 수달 서식지 보호를 위한 시민과학 프로젝트 참여를 적극적으로 장려하여 수달 모니터링 체계를 구축하고, 주민 교육과 홍보 등을 통해 수달 서식의 위협 요인을 관리하는 것이 장기적인 수달 보호에 효과적일 것으로 판단된다.

수달은 오염 없이 깨끗한 담수 환경을 선호하므로 향후 연구에서는 지속가능한 수달 서식과 수계의 수질 및 비점오염원과의 관계를 탐지하고 해석하는 연구가 함께 접목될 필요가 있다. 특히 대상지 주변 농경지에서의 화학 비료 사용과 계획인구 약 3만 명에 달하는 당수 1,2지구 택지 개발은 대상지 수계 오염을 가속할 수 있다. 광역적인 수준에서 황구지천 전체 수계에서의 수질 및 유역환경 관리를 체계화하고 수달 서식지 보전과 관리

정책을 연계하여 추진할 필요가 있다.

V. 결론

본 연구는 수원시 황구지천을 대상으로 수달에 대한 보호 방안을 마련하기 위해 종분포모형을 활용하여 잠재 서식 적합성 분석을 수행하고 이에 따른 수달 보호 전략을 제안한 논문이다. 종분포모형 결과를 개선하기 위해 하천자연도를 분석 경계로 설정하였으며, 시민과학자들과 함께 대상지 내 수달 출현 흔적을 직접 모니터링하여 지역 단위에 분석에 적합한 출현 지점 및 환경 변수 자료들로 활용하였다. 모형 분석 결과, 대상지에서 중요한 수달 서식 가능 지역을 확인하였으며 대표적으로 농경지 및 교량 하부 지역을 서식지로 파악하여 수달 보호 및 관리 방안과 연계하였다.

본 연구에서는 모형 결과와 대상지 특성을 고려하여 수달 보호 전략을 제안하였다. 특히 지자체에서 추구하는 생물다양성전략과 함께 지역에서 활동하는 시민과학자들과 연계하여 민·관·학 기반의 지속가능한 수달 보호 체계가 마련될 필요가 있다고 제안하였다. 안정적인 완충 지역을 설정함으로써 수달의 서식을 안정화시키고 생태적 연결성을 강화해야 한다. 비점오염원에 따른 수질 오염 개선 및 관리 시스템, 시민의식 제고 등을 통한 지역 차원의 수달 보호 전략은 장기적으로 수원시에서 추진할 만한 환경 정책으로 제안된다.

최근 도시 하천 복원 공사로 인해 수달 서식 환경이 개선됨에 따라 수달 출현이 증가하고 있다. 본 연구는 황구지천 지역하천 수계를 대상으로 연구를 수행하였지만, 수달의 서식지가 인간에 의해 규정된 공간 범위에 구애받지 않으므로 수달 보호 정책은 광역적 차원으로 확대되어야 함을 주장하고자 한다. 국가-지방-소하천으로 연계되는 수달 보호 전략을 지역단위가 아닌 유역단위에서 체계화할 필요가 있다. 향후 환경

DNA, GNSS 기반 추적 기술 등 최신 모니터링 기법을 도입하여 유역 단위에서 수달의 행동권 및 세력권을 확인하고 장기적으로 도시개발 행위에 능동적으로 대응할 수 있는 서식지 관리 방안이 수립되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 수원시정연구원 김은영 박사, 경기연구원 김휘문 박사의 도움으로 데이터 취득 및 분석이 진행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Association of Korean Otter Conservation. 2019. Research on precise monitoring and protection measures for otters in the southern Gyeonggi watershed. Osan-si.
- Barbet Massin, M · F. Jiguet · CH. Albert and W. Thuiller. 2012. Selecting pseudo absences for species distribution models: How, where and how many?. *Methods in ecology and evolution*. 3(2): 327-338.
- Carter, JV · P. Jianmin · R. Shesh N and G. Susan. 2016. ROC-ing along: Evaluation and interpretation of receiver operating characteristic curves. 「Surgery」. 159(6): 1638-1645.
- Daegu Metropolitan City. 2015. Research service to investigate the ecological environment of otters living in Sincheon and Geumho River areas.
- Elith, J · SJ. Phillips · T. Hastie · M. Dudík · YE. Chee and CJ. Yates. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions*. 17(1): 43-57.
- Forster-Turley, P · SM. Macdoldald and CF. Mason. 1990. Otters; An action plan for their conservation. IUCN/SSC Otter Specialist Group.
- Gyeonggi Provinclai Assembly. 2018. A study on river management plans centered around the Hwangguji Stream in Gyeonggi Province.
- Ha, JW · KH Ahn, YS Bae, HH Kim, HY Shin and SK Song. 2020. The Analysis of Habitat Using Character of Otter at a Yeongsan River Watershed Otters Habitat Usage at a Yeongsan River Watershed. *The Journal of Korean Island*. 32(4): 253-267.
- Han, CW. 2012. The ecological studies on eurasian otters(*Lutra lutra*) inhabiting around the Busan new port. Kyungung University, PhD dissertation.
- Han, SY. 1997. The ecological studies of Eurasian otter(*Lutra lutra*) in South Korea. Kyungnam University, PhD dissertation.
- Hansson, S · A. Svanströmröjvall · M. Rastam · C. Gillberg · C. Gillberg. and H. Anckarsäter. 2005. Psychiatric telephone interview with parents for screening of childhood autism - tics, attention - deficit hyperactivity disorder and other comorbidities (A-TAC): Preliminary reliability and validity. *British Journal of Psychiatry*. 187(3): 262-267.
- Jeong, SG · JH Park · DG Woo · **CW Seo** and HG Kim. 2015. Selecting Core Areas for Conserving Riparian Habitat Using Habitat Suitability Assessment for Eurasian Otter. *The Korea Society of Environmental Restoration Technology*. 18(2): 19-32.
- Jo, YS · CM Won · SR Fritts · MC Wallace and JT Baccus. 2017. Distribution and habitat models of the Eurasian otter, *Lutra lutra*, in South Korea. *Journal of Mammalogy*. 98(4): 1105-1117.
- Kim, SK · C Kim · NI Jang · SH Lee and YS Cho. 2006. Analysis of correlation between physical, chemical, and ecological characteristics of otter habitats and rivers. Korean Society of Civil Engineers regular academic conference. p1530-1533.

- Kim, WM · CY Kim · JP Cho · JN Hur and WK Song. 2022. Prediction of *Acer pictum* subsp. *mono* Distribution using Bioclimatic Predictor Based on SSP Scenario Detailed Data. Ecology and Resilient Infrastructure. 9(3): 163-173.
- Kim, YH · YH Han · JY Park · HG Kim · SH Cho and YG Song. 2021. Monitoring the presence of wild boar and land mammals using environmental DNA metabarcoding - Case study in Yangpyeong-gun, Gyeonggi-do -. Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology. 24(6): 133-144.
- Korea Otter Protection Association. 2019. Research on precise monitoring and protection measures for otters in the southern Gyeonggi watershed. Osan city.
- Kramer Schadt, S · J. Niedballa · JD. Pilgrim · B. Schröder · J. Lindenborn · V. Reinfelder ... and A. Wilting. 2013. The importance of correcting for sampling bias in MaxEnt species distribution models. Diversity and distributions. 19(11): 1366-1379.
- Liu, C · PM. Berry · TP. Dawsong and RG. Pearson. 2005. Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. Ecogaphy. 28(3): 385-393.
- Oh, YJ · MH Kim · SK Choi · MK Kim · J Eo · SJ Yeob ... and YH Lee. 2021. Prediction of the spatial distribution of suitable habitats for *Geranium carolinianum* under SSP scenarios. Ecology and Resilient Infrastructure. 8(3): 154-163.
- Park, BH and SD Lee. 2012. Studies on river otter habitat use pattern on Hongchun river in Gangwon province. Journal of Wetlands Research. 14(3): 413-418.
- Pasqualotto, N · J. Delegido · S. Van Wittenberghe · M. Rinaldi and J. Moreno. 2019. Multi-crop green LAI estimation with a new simple Sentinel-2 LAI Index (SeLI). Sensors, 19(4): 904.
- Phillips, SJ and M. Dudik. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. Ecography, 31(2): 161-175.
- Shin, HY · GH Shin · SY Han · PH Rho and JW 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.
- Shin, JH and BH No. 2017. Impacts of Aquatic and Riparian Environmental Factors on Eurasian Otter (*Lutra lutra*) Presence Characteristics in the Nakdong River Basin. Journal of Environmental Science International. 26(12): 1341-1353.
- Shin, JH. 2016. Study on utilizing DB of the aquatic ecosystem health analysis. Keimyung University, master dissertation.
- Suwon Environmental Movement Center. 2020. Suwon Sustainable City Foundation resident proposal contest <Hwanggujicheon survives only when otters survive> final result report.
- Warren, DL and SN. Seifert. 2011. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. Ecological applications. 21(2): 335-342.
- Yackulic, CB · R. Chandler · EF. Zipkin · JA. Royle · JD. Nichols · EH. Campbell Grant and S. Veran. 2013. Presence only modelling using MAXENT: when can we trust the inferences?. Methods in Ecology and Evolution. 4(3): 236-243.

Appendix 1. Evaluation Grades by River Naturalness Types

category	grade	Content	Mean
Channel development	5	Degree of Channel Meandering and Low Flow Channel Sinuosity	Meandering
	4		Strongly Curved
	3		Moderately Curved
	2		Slightly Curved
	1		Straight
Transverse structures	5	Degree of obstruction by artificial structures blocking fish movement	No transverse structures
	4		Drop with bypass, uneven inclined channel
	3		Drop with fishway
	2		Flat inclined channel, drop of 0.3-0.4m
	1		Drop of more than 0.7m
Flow diversity	5	Diversity of longitudinal and transverse water flow	Very high
	4		High
	3		Moderate
	2		Low
	1		None
Width diversity	5	Width diversity of low flow channels	Very high
	4		High
	3		Moderate
	2		Low
	1		None
Bank diversity	5	Diversity of substrate composition	Very high
	4		High
	3		Moderate
	2		Low
	1		None
Riparian vegetation growth	5	Presence of riparian vegetation and types of plant communities	Absent due to natural conditions
	4		Monospecific stands of reeds, cattails, etc.
	3		Grassland, trees
	2		Absent due to erosion
	1		Absent due to blockage
Revetment	5	Types and degree of artificiality of channel revetments	No revetments
	4		Vegetative revetments
	3		Gabions, boulders, riprap, or wooden fences
	2		Permeable concrete blocks, stone revetments (dry masonry)
	1		Impermeable concrete retaining wall
Longitudinal arrangement along the low flow channel	5	Diversity of longitudinal arrangement along the low flow channel by microtopography and vegetation	Very high
	4		High
	3		Moderate
	2		Low
	1		None
Adjacent land use	5	Degree of artificiality of dominant land use	Natural forest over 10%
	4		Natural grassland and low shrubland over 10%, orchard 10-50%
	3		Orchard over 50%, cropland 10-50%
	2		Cropland over 50%, densely used facilities 10-50%
	1		Urban areas and residential areas with densely used facilities over 50%

Appendix 1. continue

category	grade	Content	Mean
Riparian vegetation cover	5	Canopy cover of riparian vegetation	Complete, over 90%
	4		Slightly porous, 70-90%
	3		Porous, 30-70%
	2		Excessively absent, 10-30%
	1		Absent, less than 10%

Appendix 2. Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve for MaxEnt Model Predicting lutra lutra Habitat Suitability