

Research Paper

야생동물 이용빈도 및 종다양도를 활용한 생태통로 효율성 평가

우동걸 · 서현진 · 박태진 · 송의근 · 김경민 · 최태영
국립생태원

Evaluation of Wildlife Crossings Effectiveness on Use Frequency and Diversity Indicators of Wildlife

Donggul Woo · Hyunjin Seo · Taejin Park · Euigeun Song ·
Kyungmin Kim · Taeyoung Choi

National Institute of Ecology

요약: 본 연구는 백두대간 등 주요 생태축에 위치한 생태통로 49개소를 대상으로 야생동물 일평균 이용빈도 지표와 주변 서식지와 출현종의 수를 비교한 종다양도 지표를 활용하여 생태통로 효율성을 평가하였다. 분석 결과, 전체 생태통로 일평균 이용빈도는 1.4회였으며, 평균을 상회하는 생태통로는 17개로 전체의 34.7%로 확인되었다. 주변 서식종의 수와 출현종의 수가 동일한 종다양도 1.0 이상인 생태통로는 18개로 전체의 36.7%로 나타났다. 일평균 이용빈도와 종다양도 모두 양호한 생태통로는 10개로 전체의 20.4%로 분석되었다. 효율성이 양호한 생태통로 중 4개소의 생태통로 지침 준수율 등에 대한 현장조사 결과를 검토한 결과, 위치선정·규격·식재 및 토양·유도울타리 등에서 덕산재 육교형 생태통로의 지침 준수율이 가장 양호했다. 본 연구결과는 신규 생태통로 및 시설치된 생태통로의 기능개선 등 생태통로 효율성 연구의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 생태통로, 효율성 평가, 이용빈도 지수, 종다양도

Abstract: In this study, 49 major WCS(Wildlife Crossing Structure), including Baekdu-daegan, were evaluated for the effectiveness of WCS on using the daily average frequency index and diversity Index comparing the number of species that appear with the surrounding habitats. According to the analysis, the average use frequency of the entire WCS was 1.4 times, and the average number of WCS exceeded the average was 17 and 34.7 percent of the total. There were 18 WCS with the same number of habitats and species that appeared in the same area, or 36.7 percent of the total. The daily average use frequency and variety were all analyzed at 10 efficient WCS, accounting for 20.4 percent of the total. According to the results of an site survey on the compliance

First Author: Donggul Woo, Tel: +82-41-950-5475, E-mail: martes@nie.re.kr, ORCID: 0000-0002-1257-5990

Corresponding Author: Hyunjin Seo, Tel: +82-41-950-5476, E-mail: hjseo8427@nie.re.kr, ORCID: 0000-0002-3289-6417

Co-Authors: Taejin Park, Tel: +82-41-950-5481, E-mail: ttobogi@nie.re.kr, ORCID: 0000-0002-0019-6897

Euigeun Song, Tel: +82-41-950-5426, E-mail: song@nie.re.kr, ORCID: 0000-0002-1189-2513

Kyungmin Kim, Tel: +82-41-950-5480, E-mail: kkim@nie.re.kr ORCID: 0000-0003-3138-7511

Taeyoung Choi, Tel: +82-54-680-7230, E-mail: wildlife@nie.re.kr, ORCID: 0000-0002-4596-989X

Received: 19 September, 2019. Revised: 22 November, 2019. Accepted: 5 December, 2019.

rate of 4 efficient WCS, the compliance rate of the Deoksanjae overpass was the best in location selection, specifications, vegetation cover and soil, fence. The results of this research will be used as basic data for the study of WCS effectiveness, including the improvement of functions of new and installed WCS.

Keywords : Wildlife Crossing Structure, Effectiveness Assessment, Frequency Index, Diversity Index

I. 서론

오늘날의 도시는 인구 및 물자 흐름의 양과 속도가 가장 빠르게 증가하는 곳으로 도시화가 진행될수록 도로의 신설과 확장, 폐도의 증가 등이 필연적인 결과로 나타난다. 우리나라 전체 도로의 연장은 2018년 개통기준 110,091km이며, 1980년 46,950km 보다 약 2.3배 증가하였고, 해마다 도로의 설치는 지속적으로 증가되고 있는 실정이다(MOLIT 2018). 많은 연구에서 도로는 서식지의 파편화 혹은 서식지의 단절 및 격리를 초래하는 가장 주요한 원인으로 지적되어 왔고, 실제로 도로 위에서 차량에 의한 야생동물 차량사고인 로드킬이 빈번하게 확인되고 있다.

이러한 가운데 생태통로는 로드킬 저감과 단절된 생태계의 연결을 위한 대표적인 복원 수단으로서 많이 활용되고 있다(Park et al. 2012; Clevenger & Barrueto 2014; Wang 2014; Wang et al. 2017). 자연환경보전법에서 생태통로는 어도, 식생의 연결, 야생동물의 이동통로 등을 포괄하는 개념으로서 '도로, 댐, 수중보, 하구언 등으로 인하여 야생동식물의 서식지가 단절되거나 훼손 또는 파괴되는 것을 방지하고 야생동식물의 이동을 돕기 위하여 설치되는 인공구조물이나 식생 등의 생태적 공간'으로 정의하고 있다. 우리나라에서는 1998년 지리산 시암재에 최초의 생태통로가 설치된 이후, 지난 20년 동안 다양한 설치 주체들에 의해 약 500여개 이상의 생태통로가 조성되었다(NIE 2018). 그러나 많은 생태통로가 도로의 신설을 위한 환경영향평가 과정에서 설치된 경우여서 야생동물 이용에 대한 실효성 문제가 지속적으로 제기되고 있다. 이에 2013년 국무회의 보고를 기점으로 한반도 생태축 연결 복원사업이 추진되었고, 추진 대상지 50개소에 생태통로 조성 사업 등이 실시되고 있는 상황이다(NIE 2015). 이러한 복원지점에 설치되

는 생태통로의 효율성을 높이기 위해서는 주요 생태축에 위치한 생태통로의 야생동물 이용특성을 분석하여 문제점을 파악하는 것이 그 어느때 보다 필요한 상황이다.

야생동물 이동 통로로서의 생태통로에 대한 선행연구는 다양한 측면에서 수행되었다. 야생동물 이동의 저항값과 연결성을 고려한 설치의 우선순위 도출(Jonsson 2017), 특정 종의 활동권이나 이동특성을 고려한 생태통로 설치 검토(Lee & Lee 2006; Soanes et al. 2018), 국내 포유류에 적합한 생태통로의 유형과 규격 제시(Choi et al. 2012), 생태통로 이용에 영향을 미치는 다양한 요인 도출(Bellis 2008; Wang 2014), 고속도로의 생태통로 적지 선정 연구(Shin & Ahn 2008) 등이 있다. 그러나 대체로 특정 지역이나 도로에 국한된 사례 연구 중심으로 수행되어 생태통로 효율성과 관련된 공통된 특성을 도출하기 어려운 한계를 가진다. 따라서 생태통로 효율성 평가는 다양한 지역 및 도로 유형에 설치된 생태통로를 대상으로 공통적으로 적용할 수 있는 정량화된 평가 기준을 설정하는 것이 필요하다(Clevenger 2011).

한편, 생태통로 효율성 평가 연구는 생태통로 설치의 목적이 앞서 언급한 로드킬 저감과 단절 생태계 연결성 향상이라는 측면에서 크게 두 가지 유형으로 구분할 수 있다. 첫째는 생태통로 설치 전·후 로드킬 빈도의 변화에 집중하여 저감 시설로서의 생태통로 효율성을 확인하는 연구이며(Clevenger & Barrueto 2014), 둘째는 야생동물 이용 효율성을 증대시킬 수 있도록 내부적 및 외부적 요인을 검토하고 개선하는 연구이다(Clevenger & Waltho 2000; Korea National Park Service 2009). 야생동물 이용 효율성은 생태통로를 이용하는 횟수(Barrueto et al. 2014; Van der Grift & Van der Ree 2015; Bergen 2018)와 생

태통로에 출현하는 종의 특성을 활용하여 평가할 수 있다(Clevenger & Waltho 2000). 특히, 생태통로가 지속적으로 증가하는 상황에서 기존 생태통로의 문제점을 파악하고 보다 개선된 제도를 마련하기 위해서는 전국을 대상으로 생태통로 유형에 따른 이용빈도와 출현종 특성을 바탕으로 정량화된 지표가 필요하다.

따라서 본 연구는 기존의 생태통로 효율성 연구에서 가장 기초적인 자료인 야생동물 일평균 이용빈도 지표와 주변 서식지와 생태통로 출현종 비율을 계산한 종다양도 지표를 활용하여 효율성 평가를 시도해 보고자 한다. 연구지역은 백두대간 등 주요 생태축이 도로에 의해 단절된 지점에 조성된 생태통로 49개소를 대상으로 하였으며, 2016년부터 지속적으로 모니터링한 결과를 바탕으로 생태통로 유형별 빈도 및 멸종위기종 이용현황 등 다양한 측면에서 이용특성을 분석하였다. 이를 바탕으로 일평균 이용빈도 및 종다양도를 도출하였으며, 효율성이 양호하다고 판단된 일부 생태통로에 대해서 추가적으로 현장조사 결과를 검토하여 생태통로 설치 및 관리와 관련된 지침 준수 등을 확인하였다.

II. 연구대상지 및 연구방법

1. 생태통로 현황

2018년 기준 생태통로 네트워크(<http://wildlife-crossing.nie.re.kr>)¹⁾에 등록된 생태통로는 총 487개소이며, 자연환경보전법에 의해 국립공원, DMZ, 백두대간 보호구역, 생태자연도 1등급 권역 등과 같은 보호지역(Figure 1)에 설치되는 생태통로인 법정생태통로 45개소 중 아직 시스템에 등록되지 않은 15개소를 포함하면 전국 생태통로는 총 502개소이다.

유형별로는 육교형 293개소(58%), 터널형 176개소(35%), 양서파충류통로 18개소(3%), 기타시설 20개소(4%)로 구분된다(Figure 2). 여기에서 기타시설은 도시 내에서 산책로 등으로 이용될 가능성이 높아 야생동물의 이동에 부적합하므로 분석대상에서 제외하였다.

1) 2015년에 구축된 생태통로 통합 DB이다. 생태통로 설치 및 관리 주체들이 개별적으로 DB에 접속하여 신규 생태통로 및 기존에 설치된 생태통로 모니터링 결과 등 관리 내용을 정기적으로 업데이트 하도록 하는 시스템이다(NIE 2017).

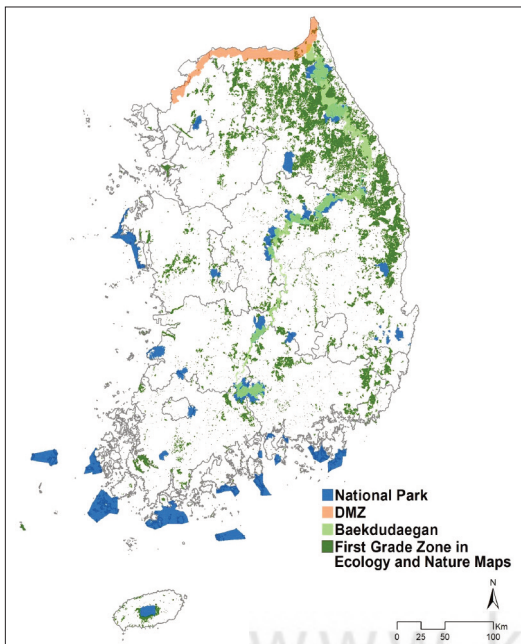


Figure 1. Status of protected areas where WCS are installed.

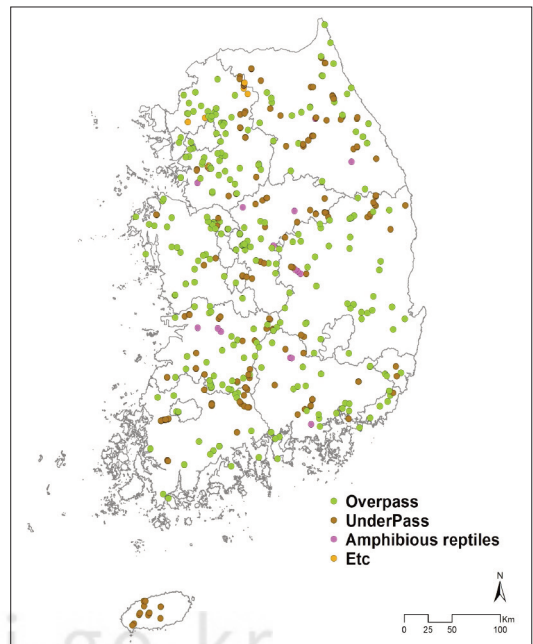


Figure 2. Types of WCS.

2. 효율성 평가 방법

(1) 이용빈도

생태통로가 야생동물의 이동을 돕기 위해 설치되는 시설이라는 측면에서 이용빈도는 생태통로 효율성을 평가하는데 가장 기본적인 정량적 지표로 활용되고 있다(Barrueto et al, 2014; Van der Grift & Van der Ree 2015; Bergen 2018). 본 연구에서는 이러한 내용을 바탕으로 하루 동안 생태통로를 이용하는 야생동물의 평균 이용빈도를 효율성 평가 지표로 선정하였으며, 49개소 생태통로별로 모니터링 일수 대비 출현횟수에 대한 비율을 계산하였다(Eq. 1). 전체 생태통로 일평균 이용빈도는 앞서 계산된 개별 생태통로 이용빈도를 바탕으로 도출하여 종다양도와 함께 생태통로 효율성 평가 기준으로 활용하였다.

$$FI = \frac{\sum \text{The number of crossing time}}{\sum \text{Total monitoring days}} \quad (1)$$

생태통로의 야생동물 이용실태를 파악하기 위한 대표적인 모니터링 시설로는 동물 발자국을 확인하는 족적판, 무인센서카메라(스틸), CCTV(동영상) 등이

있다. 무인센서카메라는 초기 설치비용이 적고, 모니터링 주기가 길며 야생동물의 체온과 움직임을 감지하여 자동으로 스틸컷 촬영이 이루어지므로 모니터링 결과를 정리하기 쉽다는 장점이 있다.

이에 본 연구에서는 국립생태원에서 '16년부터 지속적으로 모니터링 중인 49개소를 대상으로 무인센서카메라(HC600, Reconyx, USA)를 2~4대 설치하여 야생동물의 출현 빈도를 유형별, 출현종별, 멸종위기종별로 등으로 파악하였다. 무인센서카메라의 설치의 경우, 육교형 생태통로는 카메라 센서의 범위가 미치는 거리를 고려하여 7~8m 간격으로 나란히 설치하여 생태통로를 이용하는 야생동물을 촬영하였다. 터널형 생태통로는 벽면이나 천장에 카메라를 설치하였으며, 센서의 범위가 통로 전체를 포함하지 못하는 경우에는 양쪽 벽면에 각각 1대씩을 설치하여 생태통로를 통과하는 야생동물을 촬영하는 방법을 적용하였다(NIE 2016). 조사 대상 생태통로의 지역별 현황을 보면, 강원도 15개소, 전라북도 14개소, 경상북도 12개소, 전라남도 4개소, 충청남도 3개소, 충청북도 1개소로 분포한다(Table 1).

Table 1. List of WCS for monitoring wildlife usage

| ID | Address | Type | Road | Completion year |
|------|--|-----------|---------------------------|-----------------|
| GW01 | Bogwang-ri, Seongsan-myeon, Gangneung-si, Gangwon-do | Underpass | Yeongdong Expressway | 2001 |
| GW02 | Bogwang-ri, Seongsan-myeon, Gangneung-si, Gangwon-do | Underpass | Yeongdong Expressway | 2001 |
| GW03 | Songhyeon-ri, Wangsan-myeon, Gangneung-si, Gangwon-do | Overpass | National highway 35 | 2003 |
| GW04 | Wangsan-ri, Wangsan-myeon, Gangneung-si, Gangwon-do | Overpass | Local highway 415 | 2005 |
| GW05 | Jinbu-ri, Ganseong-eup, Goseong-gun, Gangwon-do | Overpass | National highway 46 | 2003 |
| GW06 | Jejin-ri, Hyeonae-myeon, Goseong-gun, Gangwon-do | Overpass | National highway 7 | 2012 |
| GW07 | Musa-ri, Miro-myeon, Samcheok-si, Gangwon-do | Overpass | National highway 38 | 2008 |
| GW08 | Beoncheon-ri, Hajang-myeon, Samcheok-si, Gangwon-do | Underpass | National highway 28 | 2004 |
| GW09 | Naedeok-ri, Sangdong-eup, Yeongwol-gun, Gangwon-do | Overpass | National highway 31 | 2003 |
| GW10 | Hutan-ri, Hanbando-myeon, Yeongwol-gun, Gangwon-do | Overpass | National highway 38 | 2004 |
| GW11 | Yongdae-ri, Buk-myeon, Inje-gun, Gangwon-do | Underpass | National highway 44 | 2009 |
| GW12 | Yongdae-ri, Buk-myeon, Inje-gun, Gangwon-do | Underpass | National highway 44 | 2009 |
| GW13 | Jigwon-ri, Imgye-myeon, Jeongseon-gun, Gangwon-do | Overpass | National highway 42 | 2003 |
| GW14 | Jinae-ri, Dong-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do | Overpass | National highway 5 | 2005 |
| GW15 | Seongdong-ri, Bukbang-myeon, Hongcheon-gun, Gangwon-do | Underpass | Seoul Yangyang Expressway | 2009 |
| GB01 | Saengok-ri, Seonsan-eup, Gumi-si, Gyeongsangbuk-do | Overpass | National highway 33 | 2009 |
| GB02 | Unsan-ri, Sanseong-myeon, Gunwi-gun, Gyeongsangbuk-do | Overpass | Gun road 10 | 2010 |
| GB03 | Masan-ri, Guseong-myeon, Gimcheon-si, Gyeongsangbuk-do | Overpass | Local highway 901 | 2005 |

Table 1. Continued

| ID | Address | Type | Road | Completion year |
|------|--|-----------|---|-----------------|
| GB04 | Jakcheon-ri, Gaeun-eup, Mungyeong_si, Gyeongsangbuk-do | Overpass | Gun road 11 | 2001 |
| GB05 | Sinhyeon-ri, Maseong-myeon, Mungyeong_si, Gyeongsangbuk-do | Overpass | National highway 3 | 1999 |
| GB06 | Uguchi-ri, Chunyang-myeon, Bonghwa-gun, Gyeongsangbuk-do | Overpass | Local highway 534 | 2005 |
| GB07 | Gogok-ri, Naeseo-myeon, Sangju-si, Gyeongsangbuk-do | Underpass | Cheongju Sangju Expressway | 2007 |
| GB08 | Seowon-ri, Naeseo-myeon, Sangju-si, Gyeongsangbuk-do | Underpass | Cheongju Sangju Expressway | 2007 |
| GB09 | Ongcheon-ri, Bukhu-myeon, Andong-si, Gyeongsangbuk-do | Overpass | National highway 5 | 2010 |
| GB10 | Icheon-dong, Andong-si, Gyeongsangbuk-do | Overpass | National highway 5 | 2014 |
| GB11 | Jidong-ri, Isan-myeon, Yeongju-si, Gyeongsangbuk-do | Overpass | National highway 36 | 2005 |
| GB12 | Jidong-ri, Isan-myeon, Yeongju-si, Gyeongsangbuk-do | Overpass | National highway 36 | 2005 |
| JN01 | Sado-ri, Masan-myeon, Gurye-gun, Jeollanam-do | Underpass | National highway 19 | 2009 |
| JN02 | Pado-ri, Toji-myeon, Gurye-gun, Jeollanam-do | Underpass | National highway 19 | 2011 |
| JN03 | Sinhak-ri, Gunoe-myeon, Wando-gun, Jeollanam-do | Overpass | National highway 13 | 2012 |
| JN04 | Wolsong-ri, Hyeonsan-myeon, Haenam-gun, Jeollanam-do | Overpass | National highway 13 | 2012 |
| JB01 | Jujin-ri, Asan-myeon, Gochang-gun, Jeollabuk-do | Underpass | Gun road 15 | 2013 |
| JB02 | Hakjeon-ri, Asan-myeon, Gochang-gun, Jeollabuk-do | Underpass | Gun road 15 | 2013 |
| JB03 | Chuksan-ri, Impi-myeon, Gunsan-si, Jeollabuk-do | Underpass | National highway 27 | 2006 |
| JB04 | Yangga-ri, Ibaek-myeon, Namwon-si, Jeollabuk-do | Overpass | National highway 24 | 2003 |
| JB05 | Geumpyeong-ri, Mupung-myeon, Muju-gun, Jeollabuk-do | Overpass | National highway 30 | 2003 |
| JB06 | Samgeo-ri, Mupung-myeon, Muju-gun, Jeollabuk-do | Overpass | National highway 37 | 2007 |
| JB07 | Jang-an-ri, Bunam-myeon, Muju-gun, Jeollabuk-do | Overpass | Local highway 635 | 2000 |
| JB08 | Guryong-ri, Paldeok-myeon, Sunchang-gun, Jeollabuk-do | Overpass | Road in agricultural and fishing villages 202 | 2006 |
| JB09 | Wolgok-ri, Paldeok-myeon, Sunchang-gun, Jeollabuk-do | Overpass | Road in agricultural and fishing villages 202 | 2006 |
| JB10 | Jangam-ri, Deokchi-myeon, Imsil-gun, Jeollabuk-do | Overpass | National highway 27 | 2012 |
| JB11 | Jiji-ri, Beonam-myeon, Jangsu-gun, Jeollabuk-do | Overpass | Local highway 743 | 2008 |
| JB12 | Myeongdeok-ri, Janggye-myeon, Jangsu-gun, Jeollabuk-do | Overpass | National highway 26 | 2002 |
| JB13 | Myeongdeok-ri, Janggye-myeon, Jangsu-gun, Jeollabuk-do | Overpass | Local highway 743 | 2006 |
| JB14 | Sinjeong-ri, Bugwi-myeon, Jinan-gun, Jeollabuk-do | Overpass | National highway 26 | 2013 |
| CN01 | Dugok-ri, Geumseong-myeon, Geumsan-gun, Chungcheongnam-do | Overpass | Gun road 103 | 2007 |
| CN02 | Madae-ri, Pangyo-myeon, Seocheon-gun, Chungcheongnam-do | Overpass | National highway 4 | 2014 |
| CN03 | Jeosan-ri, Pangyo-myeon, Seocheon-gun, Chungcheongnam-do | Overpass | National highway 4 | 2014 |
| CB01 | Banggok-ri, Daegang-myeon, Danyang-gun, Chungcheongbuk-do | Overpass | Local highway 543 | 2009 |

2) 종다양도

생태통로를 이용하는 야생동물 유형을 확인하고, 각 분류군(Taxon) 혹은 종(Species)에 따라 상이하게 나타나는 이용특성을 분석한 자료는 생태통로 효율성 평가 연구에서 매우 중요한 지표로 활용될 수 있다 (Clevenger & Barrueto 2014). 특히, 생태통로의 위치 및 규격 등을 결정하기 위해 목표종(Target Species)

을 설정하고 활동권을 확인할 수 있는 이동(Movement) 자료, 활동 시간과 생태통로 이용빈도 간의 상관성 등을 효율성 평가에 활용하는 것은 이미 많은 사례연구에서 그 유용성이 입증되었다(Clevenger & Waltho 2000; Clevenger & Barrueto 2014).

본 연구에서는 이러한 내용을 바탕으로 생태통로 모니터링 결과에서 확인된 출현종의 유형과 생태통로

주변에 서식하는 종의 유형 간 비례값을 산출하여 생태통로 주변 서식종들이 생태통로를 충분히 잘 이용하고 있는지 정량적으로 평가하였다.

생태통로 주변 서식종은 연구자가 실제 모니터링을 통해 파악하는 방법이 보편적으로 활용되고 있으나(Clevenger 2011), 본 연구에서는 전국을 대상으로 서식종의 수를 정량화된 방법으로 확인하기 위하여 전국자연환경조사 포유류 조사 자료를 활용하였다. 전국자연환경조사 자료는 제2차('97~'05) 및 제3차('06~'13) 전국자연환경조사(Investigation of Natural Environment, INE)의 전체 포유류 조사결과 자료를 종합하여 사용하였다. INE 포유류 조사단위 격자는 1:25,000 도엽을 9개의 구역으로 분할한 것으로서 총 6,748개의 격자로 세분된다. 각 격자에 49개 생태통

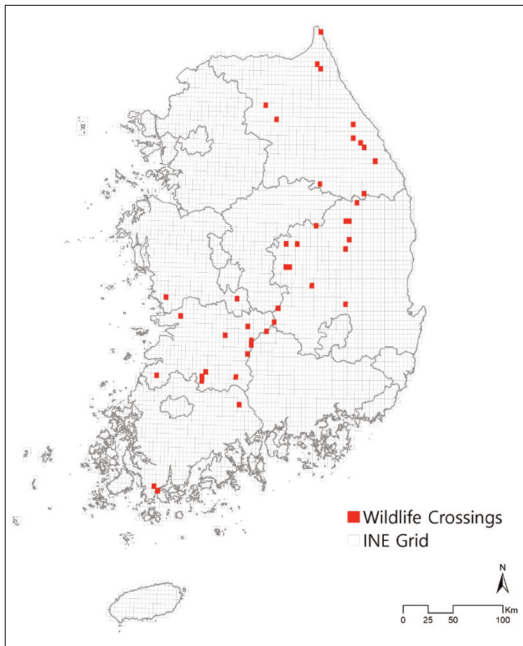


Figure 3. Monitoring WCS within the INE grid.

로 위치를 중첩한 결과, 6개의 생태통로가 동일 격자에 포함되어 최종적으로 분석대상이 되는 격자는 43개로 확인되었다(Figure 3).

$$DI = \frac{\sum \text{The number of species in WCS}}{\sum \text{The number of species in INE grid}} \quad (2)$$

3) 효율성 평가

생태통로 효율성 평가와 관련된 선행연구(Clevenger & Waltho 2000; Clevenger & Barrueto 2014; Wang 2014; Simpson et al. 2016) 및 탐색적 분석을 바탕으로 연구지역의 생태통로 효율성 양호 및 미흡에 대한 기준을 산정하였다. 효율성이 양호한 생태통로는 평균 이상의 이용빈도를 보이고, 주변 서식종의 수와 비교하여 생태통로 출현종의 수가 같거나 많은 곳으로 판단하였다. 따라서 생태통로 효율성은 전체 생태통로 일평균 이용빈도 평균값을 상회하는 동시에 개별 생태통로 서식종 대비 출현종 비율인 종다양도가 1.0 이상인 곳을 양호한 곳으로 평가하였다(Eq. 3).

$$F(E) = \begin{cases} FI \geq \text{the average of total frequency} \\ DI \geq 1.0 \end{cases} \quad (3)$$

III. 연구결과

2016년부터 생태통로 49개소(육교형 36개소, 터널형 13개소)에 무인센서카메라를 설치하여 모니터링을 실시한 결과 총 누적 일수 13,623일 동안 20,958회의 이용이 확인되었다. 생태통로 전체 일평균 이용빈도는 1.4회로 분석되었으며, Simpson et al. (2016)의 연구에서 2010년~2014년까지 미국 네바다주 북동부 지역의 고속도로(US93)에 설치된 육교형 및 터널형 생태통로를 대상으로 노새사슴(mule deer)의 이용빈도를 조사한 결과에서 확인된 이용빈도(육교형:

Table 2. List of FI evaluation

| FI | ratio | WCS ID |
|------|-----------|--|
| ≥1.4 | 17(34.7%) | GB04(13.3), GB12(4.4), JB12(3.2), JB11(3.0), JB05(2.7), GW08(2.4), GB09(2.3), CN02(2.2), CN03(2.2), GW05(2.0), GW09(1.7), GW06(1.6), GB10(1.6), JB08(1.6), CN01(1.6), GW03(1.5), JN03(1.4) |
| <1.4 | 32(65.3%) | GB08(1.3), JB09(1.3), CB01(1.2), GB11(1.2), GB03(1.1), JB01(1.1), GW14(1.1), GB02(1.1), JB14(1.0), JB04(1.0), JB07(0.8), GW04(0.8), JN02(0.8), JB13(0.7), GB05(0.7), JB06(0.7), GW12(0.7), GW10(0.6), JN04(0.6), JB10(0.5), GB01(0.4), JB02(0.4), GW13(0.4), GW07(0.3), GW11(0.3), GW01(0.3), GW15(0.3), JB03(0.3), JN01(0.2), GB06(0.1), GB07(0.1), GW02(0.1) |

0.89~0.98; 터널형: 0.27~0.79)와 비교해봤을 때, 본 연구에서 조사된 생태통로가 약 2배 가까이 높은 이용률을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 연구대상 중 평균을 상회하는 생태통로는 전체의 34.7%(17개소), 일평균 1.4회 미만인 생태통로는 65.3%(32개소)로 나타났다(Table 2).

야생동물 이용빈도가 평균 1.4회 이상으로 분석된 생태통로 17개소 가운데 터널형 GW08을 제외한 나머지 16개소는 모두 육교형으로 확인되었다. 특히, 빈도수가 가장 높은 생태통로는 GB04로 하루 평균 13.3회 야생동물의 이동이 확인되었다. 이 외에 생태통로 전체 일평균 빈도 1.4회를 상회하는 생태통로는 GB12(4.4회), JB12(3.2회), JB11(3.0회), JB05(2.7회), GW08(2.4회), GB09(2.3회), CN02(2.2회), CN03(2.2회), GW05(2.0회), GW09(1.7회), GW06(1.6회), GB10(1.6회), JB08(1.6회), CN01(1.6회), GW03(1.5회), JN03(1.4회)순으로 높게 나타났다(Figure 4).

이를 생태통로 유형별로 분석한 결과, 육교형의 경우 일평균 이용빈도가 1.9회로 나타났고, 육교형 전체의 36%에 해당하는 13곳이 평균 이용빈도 1.9회 보다 높은 빈도수를 보였다. 터널형 일평균 이용빈도는

0.7회로 분석되었고, 전체의 46%에 해당하는 6곳이 평균 이용빈도 0.7회 보다 높은 빈도수를 보였다. 육교형은 터널형 평균 이용빈도 보다 0.8회 높아 상대적으로 육교형의 이용빈도 수가 더 많은 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 선행 연구결과와 유사한 패턴으로서(Clevenger & Barrueto 2014; Simpson et al. 2016), 향후 생태통로 유형에 따른 효율성 평가 기준을 다르게 적용할 필요성이 있음을 시사한다.

생태통로 종다양도를 평가하기 위해 생태통로 전체 출현종을 확인한 결과, 육교형은 유제류 일평균 0.9회, 식육목 일평균 0.3회 이용하였고, 터널형은 유제류 일평균 0.8회, 식육목 0.3회로 확인되었다. 출현종의 수는 총 18종(개, 고라니, 고슴도치, 고양이, 너구리, 노루, 다람쥐, 담비, 멧돼지, 멧토끼, 박쥐, 산양, 삿, 설치류, 수달, 오소리, 조류, 족제비, 청설모 등)으로 그 비율은 육교형의 경우 고라니, 너구리, 노루 순으로 나타났으며, 터널형의 경우 너구리, 고라니, 삿, 오소리 순으로 확인되었다. 이러한 결과는 Clevenger & Barrueto(2014)의 연구에서 1996년~2014년까지 캐나다 밴프 국립공원에 설치된 생태통로에 출현한 12개의 종의 수보다 높은 것을 알 수 있다.

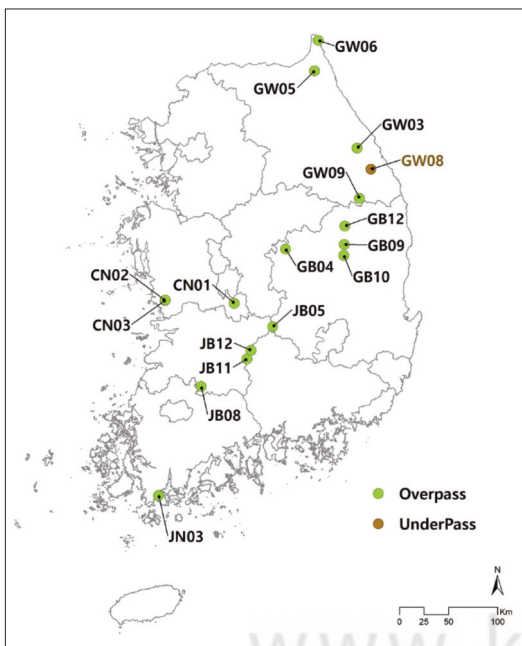


Figure 4. Map of total daily average FI.

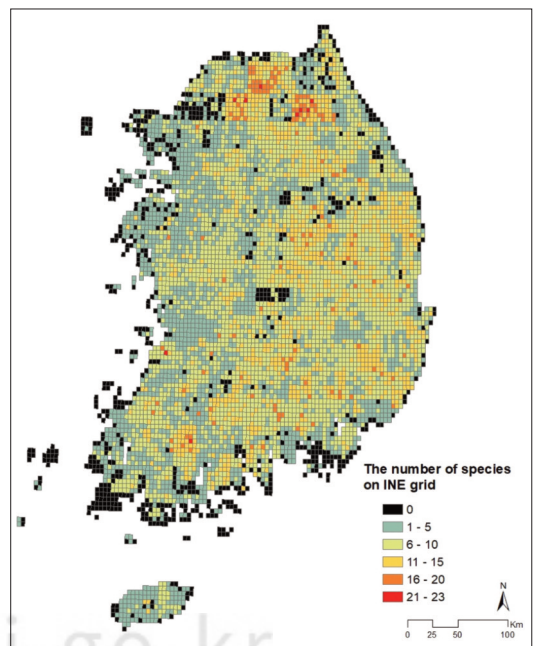


Figure 5. The number of species on INE grid.

Table 3. List of DI evaluation

| DI | ratio | WCS ID |
|------|-----------|--|
| ≥1.0 | 18(36.7%) | GW13(4.0), GW15(3.5), CN03(3.5), CN02(3.0), GB03(2.5), JB06(2.0), GB02(1.8), GB04(1.8), GW03(1.8), GW08(1.6), JN03(1.3), CN01(1.3), JB05(1.3), GW07(1.3), JB12(1.1), JB03(1.0), GW09(1.0), GW10(1.0) |
| <1.0 | 31(63.3%) | GW01(0.9), GW05(0.9), JB02(0.8), JB01(0.8), JB09(0.8), GW04(0.8), GB12(0.8), JB10(0.8), JB11(0.7), GB05(0.7), GW06(0.7), JB08(0.6), JB07(0.6), GB06(0.6), JB13(0.6), GB07(0.6), GW02(0.6), GB09(0.6), JN02(0.6), CB01(0.5), GB10(0.5), GB08(0.5), JN01(0.4), JN04(0.3), JB04(0.3), JB14(0.3), GB11(0.3), GB01(0.3) |

전국자연환경조사 포유류 조사 자료를 바탕으로 6,748개의 INE 격자 내 서식종의 수를 계산한 결과, 서식 흔적이 발견되지 않은 격자에서부터 최대 23종의 흔적이 나타난 격자까지 확인할 수 있었다(Figure 5). 이 가운데 생태통로가 포함된 43개의 격자(Figure 3)를 대상으로 출현종의 수와 비교한 종다양도 분석 결과, 출현종의 수가 더 많은 생태통로는 18개소로 전체의 36.7%, 서식종의 수가 더 많은 경우 31개소로 전체의 63.3%로 나타났다(Table 3). 다양도 지수값이 1.0이 넘는 18개소의 생태통로 중에서도 GW13이 다양도 지수값 4.0으로 INE 조사 결과보다 생태통로를 이용하는 종의 수가 약 4배가 높은 것으로 분석되었다. 또한, 생태통로 유형별로 보면, 터널형 생태통로인 GW15, GW08, JB03을 제외한 나머지는 15개

소는 모두 육교형 생태통로로 확인되었다(Figure 6).

앞서 분석된 내용을 바탕으로 전체 생태통로 일평균 이용빈도 평균값 1.4회를 상회하는 동시에 개별 생태통로 서식종 대비 출현종 비율이 동일한 종다양도값 1.0 이상인 곳을 효율성이 양호한 생태통로로 평가하였다. 분석 결과, 전체 49개소 중 10개소가 효율성이 양호한 것으로 확인되었으며 이는 전체의 20.4%에 해당된다(Table 4). 여기에 포함되는 생태통로는 GB04, JB12, JB05, GW08, CN02, CN03, GW09, CN01, GW03, JN03이며, 터널형인 GW08을 제외한 나머지는 모두 육교형 생태통로로 나타났다(Figure 7).

한편, 생태통로 이용이 확인된 멸종위기종은 49개소 중 37개소(육교형 11개소, 터널형 26개소)로 일평균 0.04회의 이용빈도를 보였으며, 출현종은 산양,

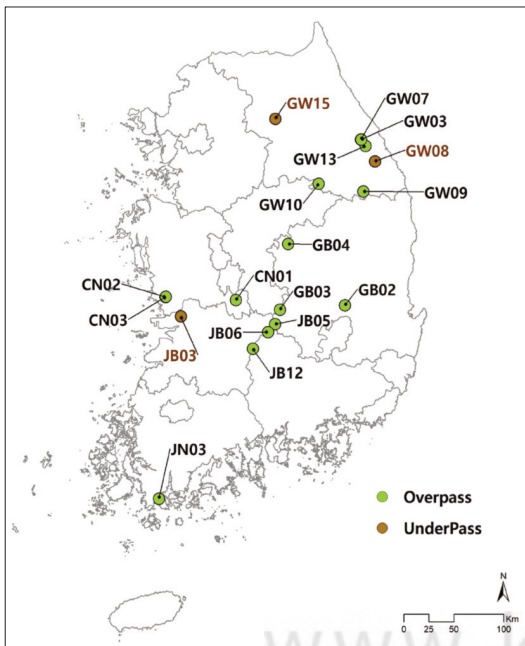


Figure 6. Map of DI evaluation.

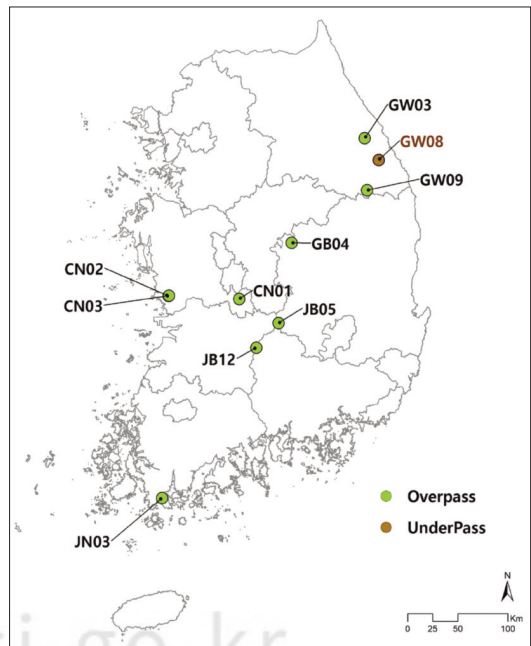


Figure 7. Map of effectiveness evaluation WCS

Table 4. Results of Effectiveness evaluation WCS

| | ratio | WCS ID |
|---------------|-----------|--|
| Efficient WCS | 10(20.4%) | GB04, JB12, JB05, GW08, CN02, CN03, GW09, CN01, GW03, JN03 |

수달, 삿, 담비, 청설모 5종으로 나타났다. 평균 이용 빈도 이상의 생태통로는 19곳(51%)으로 GB04(1.0회), JB14(0.19회), GB12(0.18회), GW05(0.14회), GB07(0.08회), GW12(0.08회), GB05(0.08회), GB08(0.07회), GW09(0.07회), GW10(0.07회), GW01(0.06회), GW14(0.05회), JB06(0.05회), GW15(0.05회), GW11(0.05회), JB01(0.05회), JN03(0.05회), GW08(0.05회), GB02(0.04회) 순으로 높게 나타났고, 특히 GB04는 전체 이용빈도 및 멸종위기종 이용빈도가 가장 높은 생태통로로 확인되었다.

효율성이 양호한 것으로 평가된 생태통로 현장조사 결과를 파악하기 위하여 NIE(2018)에서 수행된 생태통로 45개소의 지침준수율 조사 내용을 검토하였다. 검토 결과, 지방도나 시·군도를 관리하는 지자체의 지침준수율이 육교형 63.3% 터널형 79.9%로 고속도로(육교형 84.5%, 터널형 76.9%)나 국도(육교형 83.9%, 터널형 100%)에 비해 낮은 것으로 나타났다. 특히, 생태통로의 지형연결성 조사 결과에서 절토사면과 맞닿아 설치되어 구조적으로 야생동물의 이용이 어려운 곳이 많았고, 일부 생태통로는 진출입부가 급경사 절개지와 맞닿아 있어 물리적으로 야생동물 진출입 자체가 어려운 경우가 있었다. 현장조사가 완료된 45개소 가운데 본 연구에서 효율성이 양호한 생태통로로 평가된 생태통로는 백두대간 생태축에 위치한 육십령(JB12), 덕산재(JB05), 삼당령(GW03), 댕재(GW08)로 총 4개소로 확인되었다.

육교형 생태통로인 육십령, 덕산재, 삼당령 생태통로의 통로규격 지침으로는 주요 생태축에 위치하여 중앙 최소폭이 최소 30m 이상 확보되어야 하고, 보행자와 차량의 접근을 최대한 배제한 설계 여부, 차량의 불빛 및 소음을 줄이기 위한 차단벽 설치 여부, 곤충·조류·양서류 등을 위한 설계적용 여부, 통로내부에 물이 흐르는 것을 예방하기 위한 입구부 배수로 설치 여부 등이 있다. 조사 결과, 주변지형과의 연결성과 설치위치, 차단벽 등의 설계가 모두 양호하고,

통로 중앙폭은 육십령 24m, 덕산재 30m, 삼당령 32m로 나타났다. 덕산재와 삼당령은 입구부 배수로가 설치되어 있지 않았으며, 육십령과 삼당령의 유도울타리는 높이(1.2~1.5m 이상)와 구조물 및 지표면과의 연결성 등이 부족하였다.

터널형 생태통로인 댕재 생태통로의 통로규격 지침으로는 통로 높이 2m 이상(4차선 이상은 3m 이상)이 확보되어 있어야 하고, 입구면적/길이로 계산되는 개방도가 0.7 이상 확보 여부, 통로내부 배수처리 여부, 양서·파충류 이동을 위한 소규모 도랑 설치 여부 등이 있다. 조사 결과 통로 높이, 개방도, 내부 배수처리가 양호하였으나, 양서·파충류의 소규모 도랑이 설치되어 있지 않았고, 유도울타리의 규격과 관리상태가 좋지 않아 보완이 필요한 것으로 나타났다.

이러한 내용을 종합하면, 효율성이 높은 육십령, 덕산재, 삼당령, 댕재 중에서도 위치선정, 통로규격, 식재 및 토양, 유도울타리 등에서 덕산재 육교형 생태통로가 지침의 기준에 가장 가깝게 설치된 것으로 조사되었다.

IV. 결론

생태통로의 수는 지속적으로 증가하는 추세이며, 생태통로의 문제점을 파악하고 보다 실효성 있는 제도를 마련하기 위해서는 기존 생태통로 효율성에 대한 실태파악이 필요하다. 이에 본 연구는 백두대간 등 주요 생태축에 위치한 생태통로 49개소를 대상으로 야생동물 일평균 이용빈도 지표와 생태통로 출현종의 수와 주변 서식종의 수를 비교한 종다양도 지표를 활용하여 생태통로 효율성을 정량적으로 평가하였다. 최종적으로 전체 생태통로의 20.4%인 10개소가 양호한 효율성을 보였으며, 터널형 보다 육교형의 효율성이 상대적으로 높았다. 효율성이 양호한 10개소 중 4개소의 현장조사 결과를 검토하였으며, 유도울타리 등의 시설 관리가 다소 미흡한 곳이 확인되었으나 주변 지역과의

연결성 등이 대체로 양호하고, 덕산재 생태통로의 지 침준수율이 가장 높은 것으로 확인되었다.

생태통로 이용빈도 및 출현종 유형을 활용하여 효율성을 평가한 선행연구 결과와 비교하면(Clevenger & Barrueto; Simpson et al. 2016), 일평균 이용빈도는 약 2배 가까이 높았으며, 출현종의 수도 더 많은 것을 알 수 있었다. 특히, 본 연구에서는 생태통로에 출현한 종 뿐만 아니라 전국자연환경조사 자료를 바탕으로 한 생태통로 주변에 서식종의 수를 계산하여 실제 생태통로를 어느 정도 이용하는지 평가하였다는 점에서 의의가 있다. 또한, 국내에서 보호지역 등 특정 지역에 국한된 생태통로 모니터링 범위를 확장하여 전국을 대상으로 다양한 지역 및 도로유형에 설치된 생태통로를 대상으로 모니터링을 실시하였다는 점에서도 의의가 있다.

향후 연구에서는 생태통로 효율성에 영향을 미치는 주요 변수로 확인된 생태통로 주변 시설, 경관특성, 도로밀도, 교통량 등에 대한 특성을 포함하여 포괄적으로 생태통로 이용에 영향을 주는 요인 분석이 함께 고려되어야 할 것으로 사료된다. 특히, 생태통로 조성 초기의 주변 토지피복과 현재의 토지피복이 상이한 지역에서 인간활동에 의해 훼손된 지역의 현황을 파악하고, 대책수립이 필요하다. 본 연구 결과는 신규 생태통로 및 기설치된 생태통로의 기능개선 등 효율성을 향상하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립생태원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIE-기반연구-2019-07).

References

- Barrueto M, Ford AT, Clevenger AP. 2014. Anthropogenic effects on activity patterns of wildlife at crossing structures. *Ecosphere* 5(3): 1-19.
- Bellis M. 2008. Evaluating the effectiveness of wildlife crossing structures in Southern Vermont, Master Theses in University of Massachusetts Amherst
- Bergen NH. 2018. Evaluating the success and monitoring the usage of wildlife crossing structures in Bedminser, NJ
- Choi TY, Park CH. 2006. The effects of land use on the frequency of mammal roadkills in Korea. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 34(5): 52-58. [Korean Literature]
- Choi TY, Yang BG, Woo DG. 2012. The Suitable Types and Measures of Wildlife Crossing Structures for Mammals of Korea. *Journal of Environmental Impact Assessment* 21(1): 209-218. [Korean Literature]
- Clevenger AP. 2011. *Wildlife Crossing Structure Handbook Design and Evaluation in North America*. The Federal Highway Administration (FHWA) Report.
- Clevenger AP, Waltho N. 2000. Factors Influencing the Effectiveness of Wildlife Underpasses in Banff National Park, Alberta, Can.
- Clevenger AP, Barrueto M. 2014. *Trans-Canada Highway Wildlife and Monitoring Research. Final Report Part B. Radium Hot Springs, British Columbia*.
- Jonsson. 2017. Spatial modeling of wildlife crossing_ GIS-based approach for identifying high-priority locations of defragmentation across transport corridors
- Korea National Park Service. 2009. *Comprehensive plan on mitigation measures to reduce roadkill in National Park*.
- Lee YU, Lee MW. 2006. Eco-corridor positioning for target species -by field surveying of mammals' road-Kill-, *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* [Korean Literature]

- NIE (National Institute of Ecology). 2015. A study on analysis of habitat fragmentation and improvement of wildlife passage effectiveness.
- NIE (National Institute of Ecology). 2016. Fundamental research on the conservation of national ecological network.
- NIE (National Institute of Ecology). 2017. Fundamental research on the conservation of national ecological network.
- NIE (National Institute of Ecology). 2018. Fundamental research on the conservation of national ecological network.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport). 2018. Investigation of Roads Status
- Park JJ, Woo DG, Oh DH, Park JH. 2012. Site selection of wildlife passage for Leopard Cat in urban area using space syntax. *Journal of Korean Institute of landscape architecture* 40(1):92-99. [Korean Literature]
- Shin SA, Ahn DM. 2008. Approach to the Location of Wildlife Corridors on Highways -Between Yang-jae and Pan-gyo ICs of Seoul -Busan Highway, Korea-, *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* [Korean Literature]
- Simpson NO, Stewart KM, Schroeder D, Cox M, Huebner K, Wasley T. 2016. Overpass and underpass: effectiveness of crossing structures for Migratory Ungulates. *The Journal of Wildlife Management* 80(8): 1370-1378.
- Soanes K, Taylor AC, Sunnucks P, Vesk PA, Cesarini S, Ree RVD. 2018. Evaluating the success of wildlife crossing structures using genetic approaches and an experimental design-Lessons from a gliding mammal. *Journal of Applied Ecology* 55(1): 129-138.
- Van der Griff EA, Van der Ree R. 2015. Guidelines for evaluating use of wildlife crossing structures. *Handbook of Road Ecology*, John Wiley & Sons, Ltd.
- Wang J. 2014. Effectiveness of Wildlife Crossing Structures on Providing Habitat Connectivity for Wild Animals. Master Theses in University of British Columbia.
- Wang Y, Guan L, Piao Z, Wang Z, Kong Y. 2017. Monitoring wildlife crossing structures along highways in Changbai mountain China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 50:119-128.