

Research Paper

공간 군집지역 탐색방법에 따른 로드킬 다발구간 분석

송익근 · 서현진 · 김경민 · 우동걸 · 박태진 · 최태영

국립생태원

Analysis of Roadkill Hotspot According to the Spatial Clustering Methods

Euigeun Song · Hyunjin Seo · Kyungmin Kim · Donggul Woo ·

Taejin Park · Taeyoung Choi

National Institute of Ecology

요약: 본 연구는 로드킬 다발구간을 선정하기 위한 공간 군집지역 탐색방법을 비교하기 위하여 영주시, 문경시, 안동시, 청송군 로드킬 핫스팟 분석을 수행하였다. 국지적 공간 자기상관 지수인 Getis-Ord G_i^* 통계량은 분석 단위를 달리하여 산출하였으며, 전체 도로면적 기준으로 300m에서 9%, 1km에서 14%의 핫스팟 지역을 도출하였다. 1km 단위 핫스팟 지역의 Z-score를 5개로 등급화한 결과, 예천군과 영주시 경계에 있는 28번 국도 구간의 Z-score가 가장 높게 나타났다. 커널 밀도 방법은 일반 커널 밀도 추정과 네트워크 커널 밀도 추정 분석을 수행하였다. 두 방법 모두 구역 단위의 분석보다 로드킬 다발구간의 시각적 확인이 용이했으나, 통계적으로 유의한 우선순위를 산정하기 어려운 한계가 있었다. 결과적으로 군집 분석 방법에 따라 국지적인 핫스팟 지역이 다르게 나타나고 있음이 확인되었으며, 공통적으로 저감 대책이 시급한 지역은 영주시와 예천군을 통과하는 28번 국도의 다발구간으로 나타났다. 본 연구의 결과는 향후 로드킬 다발구간 도출 및 저감 대책 수립시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 로드킬, 군집 분석, 국지적 공간 자기상관성, 커널밀도추정, 네트워크 커널밀도추정

Abstract: This study analyzed roadkill hotspots in Yeongju, Mungyeong-si Andong-si and Cheongsong-gun to compare the method of searching the area of the spatial cluster for selecting the roadkill hotspots. The local spatial autocorrelation index Getis-Ord G_i^* statistics were calculated by different units of analysis, drawing hotspot areas of 9% from 300 m and 14% from 1 km on the basis of the total road area. The rating of Z-score in the 1km hotspot area showed the highest Z-score in the 28th National Road section on the border between Yecheon-gun and Yeongi-si. The kernel density method performed general kernel density estimation and network kernel density estimation analysis, both of which made it easier to visualize roadkill hotspots than district unit analysis, but there were

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

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

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

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

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

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

Received: 7 October, 2019. Revised: 4 December, 2019. Accepted: 5 December, 2019.

limitations that it was difficult to determine statistically significant priority. As a result, local hotspot areas were found to be different according to the cluster analysis method, and areas that are in common need of reduction measures were found to be the hotspot of 28th National Road through Yeongju-si and Yecheon-gun. It is deemed that the results of this study can be used as basic data when identifying roadkill hotspots and establishing measures to reduce roadkill.

Keywords : Roadkill, Clustering Analysis, Local Spatial Autocorrelation, KDE, Network KDE

I. 서론

도시의 공간적 확산에 따라 증가하는 도로는 토지파편화의 가장 주요한 원인으로 지적되고 있다(Forman & Alexander 1998). 도로 건설로 인한 생태계 단절이 생물종의 감소 및 생태계 기능 저하로 이어지게 되자 국가별로 이러한 영향을 최소화하기 위한 실험 및 분석이 수행되고 있다. 이러한 연구결과들은 유럽 등의 도로설계지침에서 구체적으로 활용되고 있으며(EEA 2011), 우리나라의 경우 「자연환경보전법」이나 국토교통부의 「환경친화적인 도로건설지침」 등에서 로드킬 다발구간 및 신규 도로건설에서 로드킬 저감조치 방안으로 생태통로 설치계획 등을 수립하도록 정하고 있다.

로드킬은 야생동물들이 파편화된 서식지를 이동하기 위해 도로를 횡단하는 과정에서 발생하는 ‘동물 찾길 사고’로 정의된다(NIE 2018). 우리나라 도로의 연장과 교통량은 점차 증가하고 있고, 이에 따라 로드킬이 해마다 증가하는 상황에서 환경부, 국립공원관리공단, 국토교통부, 한국도로공사, 일부 지자체 등에서는 로드킬 예방 및 관리를 위해 로드킬 현황을 조사해왔다.

일반적으로 로드킬과 같은 점(Point)사상이 집중되어 있는 공간적 군집 혹은 클러스터는 “지리적 혹은 시간적으로 우연하게 발생한 것으로 판단하기 어려울 정도로 충분히 크고 밀집된 사건들의 집합체”로 인식된다(Knox 1989; Cho 2013). 따라서 로드킬 다발구간은 로드킬이 무작위적으로(Randomly) 분포하지 않고, 특정 도로구간에 밀집되어 공간적인 군집현상(Custering)을 보이는 것을 의미한다.

로드킬 다발구간은 저감 조치가 필요한 위치를 확인하여 현장을 조사하기 위한 가장 기초적인 자료가

므로 적합한 분석방법을 선택하는 것이 상당히 중요하다. 공간 군집지역 탐색방법은 질병의 지리적 분포 및 확산 등을 연구하는 보건역학(Geographical Epidemiology), 범죄학의 지리적 프로파일링, 교통사고 다발지역 분석에서 핫스팟(Hotspot)을 확인하는데 많이 활용되고 있다(Park & Lee 2015).

이러한 점 자료의 핫스팟 측정 지수는 그 성격에 따라 필드(Field) 기반 방법과 객체(Object) 지향 방법으로 구분되기도 하며(Cromley & Hanink 2012), 특히 로드킬 핫스팟 분석은 대표적으로 거리 기반의 K-function 분석, 국지적 공간 자기상관성 측정지수인 Getis-Ord G_i^* , 밀도 기반의 커널 밀도 추정 등이 많이 활용되었다(Clevenger et al. 2003; Seo et al. 2015; Girardet et al. 2015; Seok & Lee 2015; Shilling & Waetjen 2015). 이러한 분석들은 연구목적에 따라 통계적 혹은 시각적인 측면의 로드킬 핫스팟을 확인하는데 유용하게 활용되고 있다.

한편, 로드킬 발생정보의 수집 및 관리를 위해 많은 국가 및 단체에서 정보시스템을 운영하고 있다.¹⁾ 이러한 정보시스템은 정부부처 및 시민사회에서 로드킬 발생정보를 웹이나 앱으로 등록할 수 있는 기능과 다발구간 등을 분석할 수 있는 기능등을 포함하고 있다. 최근 국내에서도 환경부·국토부·한국도로공사 등 다양한 도로관리기관의 분산된 로드킬 발생정보를 통합적으로 운영하기 위하여 로드킬 정보시스템이 개발되었다(NIE 2018).²⁾ 이로 인해 실시간으로 전국

1) Global Roadkill Network (<http://globalroadkill.net>)는 전세계 로드킬 정보시스템 12개를 소개하며, 각 지역의 로드킬 정보를 공유하고 있다.

2) 「야생동물 동물 찾길사고(로드킬) 조사 및 관리지침」(환경부·국토부 행정예규, '18.5.28.)에 의해 각 도로관리기관의 도로조사원들은 로드킬 발생정보를 로드킬정보시스템에 접

단위의 표준화된 로드킬 정보를 확인할 수 있으며, 로드킬 다발구간 측정을 위한 신뢰성 있는 자료가 축적되고 있어서 앞으로 효율적인 조사와 저감대책 수립이 가능한 상황이다. 이에 반해 국내 환경에 적합한 로드킬 다발구간 분석방법을 비교·탐색하는 연구는 아직 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구는 로드킬 다발구간을 선정하기 위한 공간 군집지역 탐색방법을 검토하기 위하여 시범적으로 영주시, 문경시, 안동시, 청송군 내 로드킬 접수건을 바탕으로 로드킬 핫스팟 분석을 수행하여 국내 상황에 적합한 로드킬 다발구간 분석방법을 제시하고자 한다. 이를 위해 먼저 로드킬 발생의 분포현황과 종별 특성을 파악하였다. 다음으로 일부 부정확한 로드킬 위치를 보정하고 도로 자료를 검토하여 분석에 적합한 자료를 선정하였다. 마지막으로 격자 단위로 로드킬 발생수를 지도화하여 공간적 자기상관성을 측정하고, 로드킬 분포에 대한 커널밀도를 추정하여 분석방법에 따른 핫스팟을 비교하였다.

II. 로드킬 관련 선행연구

로드킬에 대한 국내·외 선행연구는 내용적인 관점과 방법론적 관점에서 검토하였다. 먼저 내용적인 관점에서 보면, 포유류, 양서·파충류 등 분류군을 대상으로 도로유형, 시기, 주변지역 특성 등에 대한 로드킬 분석(Choi & Park 2006; Lee et al. 2014), 로드킬 핫스팟 분석방법에 대한 고찰(Clevenger et al. 2003; Park & Lee 2015), 로드킬에 영향을 주는 요인 분석(Seo et al. 2015; Kim et al. 2019), 로드킬 증가로 인한 개체군의 감소(Fahrig & Rytwinski 2009), 로드킬 경고 표지판의 위치나 방지 울타리 높이 등 효율적인 로드킬 저감시설 개선방안(Gilsta et al. 2009; Park et al. 2018), 로드킬과 교통사고 간의 상관성 분석(Oh & Lee 2018) 등 생물학적, 공간통계학적, 제도적 측면에서 다양한 연구가 수행되었다.

한편, 방법론적 관점은 로드킬 핫스팟 분석방법을 중심으로 검토하였으며, 특정 구역 단위 내에서 빈도수, 비율, 표준화 지수 값 등을 집계하는 분석과 밀도 분석이 주로 활용되고 있었다. 특히, 구역 단위에

서 계산되는 Getis-Ord G_i^* 지수는 Z-score와 P-value를 바탕으로 통계적으로 유의한 핫스팟 지역을 확인할 수 있다는 장점이 있어 부동산 가격변동을 분석(Son & Park 2008), 교통사고 다발지역 시각화(Jo et al. 2018), 범죄의 시공간적 분포 특성(Jeong et al. 2010), 도시화에 따른 녹지의 파편화 지역 도출(Seo 2017) 등 다양한 관측치의 공간패턴을 확인하는데 활용되었고, 로드킬 핫스팟을 도출하는데 많은 연구에서 사용하였다(Seo et al. 2015; Seok & Lee 2015; Shilling & Waetjen 2015).

한편, 커널 밀도 추정은 시각적으로 핫스팟을 확인하는데 유용한 방법으로 교통사고 다발구간 도출(Xie & Yan 2008), 범죄 위험지도 등에 적용되었고, 로드킬 핫스팟을 도출하는데 많은 연구에서 사용하였다(Ramp et al. 2005; Girardet et al. 2015). 그러나 분석결과에 대한 통계적인 유의성을 검증할 수 없고, 탐색반경(Bandwidth)이 커질수록 공간패턴이 평활화(Smooth)되는 경향이 있다(Teixeira et al. 2013). 최근에는 로드킬이 도로 위에서만 나타나는 공간현상이라는 점에 주목하여 네트워크 기반의 분석 방법 등이 제안되었다(Xie & Yan 2008; Xie & Yan 2013; Mohaymany et al. 2013).

이러한 내용을 종합하면, Getis-Ord G_i^* 는 통계적으로 유의한 로드킬 핫스팟 지역을 확인하는 것이 가능하지만, 격자나 행정단위 등 연구목적에 따라 설정한 구역의 단위에 따라 핫스팟 상이할 수 있다는 한계가 있다. 커널 밀도 추정도 탐색반경 내 로드킬의 전체 밀도만 고려하기 때문에 각 지점 간의 거리 파악이 어렵다. 따라서 본 연구는 통계적 및 시각적 로드킬 핫스팟 분석방법으로 Getis-Ord G_i^* 와 커널 밀도 추정을 사용하였다. Getis-Ord G_i^* 분석 단위는 선행연구와 탐색적 분석을 바탕으로 300m 및 1km를

수하도록 되어있다. 로드킬 정보시스템의 운영체제는 도로 조사원이 로드킬 발생지점에서 모바일 조사앱(App)을 실행하여 로드킬 사진을 촬영 및 전송하면 로드킬 정보시스템 DB (<http://ecobank.nie.re.kr>)에 실시간으로 업로드 되도록 설계되어 있다. 정보시스템에 접속되는 정보는 로드킬 발생의 경위도 좌표와 접수시간, 로드킬 당한 동물의 유형, 도로 유형 등이 있으며, 웹에서는 해당 정보들의 통계도 제공된다.

선정하였으며, 커널 분석은 커널 밀도 추정과 네트워크 커널 밀도 추정 모두 수행하였다. 최종적으로 이러한 분석방법에 따른 핫스팟 지역의 차이를 비교해 보고자 하였다.

III. 연구자료 및 방법

1. 로드킬 발생현황 및 자료보정

1년 동안('18.8.1.~'19.8.31.) 로드킬 정보시스템에 접수 및 승인된 전국의 로드킬은 총 5,132건이다. 시스템 안정화 및 지속적인 활용교육에 따라 각 도로관리기관에서 참여율이 점차 증가하고 있으며, 이 가운데 영주 국토관리사무소, 진주 국토관리사무소, 당진시 등의 참여율이 상대적으로 높았다. 따라서 본 연구에서는 '18년 시스템 초기부터 정보시스템을 활발하게 사용하고 있는 영주 국토관리사무소에서 관리하는 도로를 기준으로 영주시, 문경시, 안동시, 청송군 내 로드킬 발생 자료를 사용하였다. 이 중 개와 고양이 등 야생동물이 아닌 종을 제외한 총 549건을 분석에 활용하였다(Figure 1).

로드킬 유형 및 빈도를 보면 포유류 10종으로 513건,

조류가 8종으로 36건이 확인되었다. 여기에는 멸종위기종 I급이자 천연기념물인 수달 로드킬이 9건, 멸종위기종 II인 삼의 로드킬이 28건, 수리부엉이 6건, 올빼미 2건이 포함되었다.

로드킬 정보시스템에 접수된 일부 자료는 GPS 오차 등으로 인해 좌표가 부정확한 문제가 있는 것으로 확인되었다. 이를 보정하기 위하여 로드킬 발생 포인트가 도로에서 벗어난 경우, 가장 인접한 도로로 위치를 보정하기 위해 ArcGIS 10.5의 near 툴을 활용하였다. 도로자료는 행정안전부에서 제공하는 새주소도로구간 자료에서 로드킬이 조사된 도로구간을 추출하여 사용하였다.

2. 공간 군집지역 탐색방법

로드킬의 공간적 자기상관성은 국지적 공간 연관성지수(LISA: Local Indicator of Spatial Association)인 Getis-Ord G_i^* (Getis & Ord 1992) 통계값을 활용하여 측정하였다. LISA는 연구지역 내에서 발생할 수 있는 공간 연관성의 국지적 변이(Local Variations)를 고려한 시각적 지표로서 국지적인 공간적 자기상관 통계량을 의미한다. Local Moran's I, Getis-Ord's

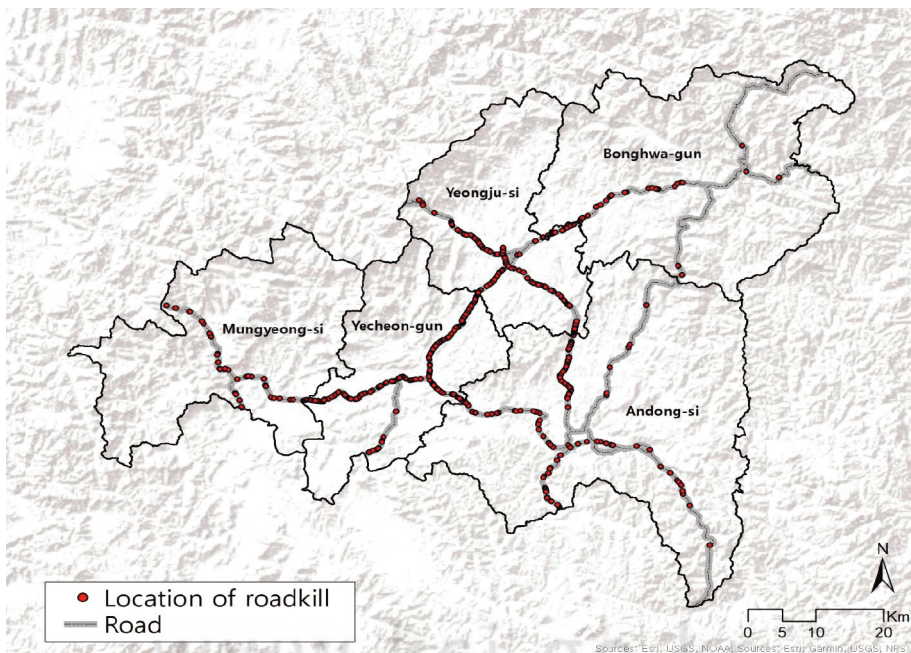


Figure 1. Study area.

G_i & G_i^* 등이 대표적이며(Seo 2017), Local Moran's I 가 해당 지역과 그 이웃에 투입되는 변수의 유사성을 측정한다면, Getis-Ord G_i^* 는 변수의 집중도를 측정하는데 유용하다(Cho 2013).

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}x_j - \bar{x}w_{ij}}{s \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2}{n-1}}} \quad (1)$$

여기에서 s 는 표준편차, w_{ij} 는 공간 가중행렬의 값, n 은 전체 케이스의 수, x_j 는 개체 j 의 공간단위 속성 값, $\bar{x}$ 는 공간단위의 평균값을 의미한다(Eq. 1). i 와 j 는 개별 개체의 공간단위를 의미하는 것으로 두 공간단위가 이웃으로 정의되면 $w_{ij}=1$, 그렇지 않으면 $w_{ij}=0$ 이 되며, 통계량의 기댓값은 0이고, 분산은 거의 1이다(Seo 2017).

G_i^* 통계량은 각 개체에 Z-score 값을 할당하기 때문에 G_i^* 값 자체가 Z-score가 된다. 따라서 Getis-Ord G_i^* 분석은 통계적으로 유의한 수준에서 G_i^* 값이 양수이면 높은 속성 값들이 군집된 핫스팟을, 반대로 그 값이 음수이면 낮은 속성 값들이 군집된 쿨드스팟을 나타낸다. 이러한 특성으로 인해 G_i^* 통계량은 로드킬이 집중적으로 발생한 지역을 직관적으로 확인하는데 유용하게 활용된다.

커널 밀도 추정은 점 개체의 분포를 토대로 공간밀도를 추정하여 시각화하는 방법이다. 관측된 점들로부터 일정한 탐색반경(대역폭) 안에 포함된 점사상의 밀도를 측정하여 커널함수 K 로 표현한다. 커널 밀도 분석에서 K 값은 거리가 멀어짐에 따라 그 값이 작아지는 거리조락을 따르고, 탐색반경을 벗어나면 그 값이 부여되지 않는다(Silverman 1986). 따라서 탐색반경의 중심점 간의 거리가 증가할수록 공간적 연관성이 감소한다.

$$f(x,y) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{d_i}{h}\right) \quad (2)$$

여기에서 $f(x,y)$ 는 (x,y) 위치에서 밀도 추정, n 은 관측치의 수, h 는 탐색반경, K 는 커널함수, d_i 는 (x,y) 위치와 i 관측치 위치 간의 거리이다(Eq. 2). 한편, 구역 단위 분석은 정방형의 표본지역이나 행정구역과

같이 연구자가 선정한 단위구역에 따라 관측치의 공간패턴이 달라질 수 있다. 이러한 공간 단위 수정의 문제(MAUP: Modified Areal Unit Problem)는 집계를 위한 표준화된 방법이 없으며, 주로 선행연구를 참고하거나 단위변화에 따른 민감도 분석, 연구지역의 특성을 반영하는 방법 등이 사용되어 왔다(Seo 2017). 로드킬 핫스팟 분석을 위한 구역단위 연구로 Shilling & Waetjen(2015)은 고속도로를 0.4km, 0.8km, 1.6km 구획하여 민감도 분석 결과를 비교하였고, Seok & Lee(2015)는 로드킬 사이의 평균거리를 계산하여 50m×50m 단위를 선정하였다. 또한 커널 밀도 추정 연구에서도 탐색반경 크기 결정을 위해 선행연구나 연구지역 특성 등을 반영하였으며, 실제 Ramp et al.(2005) 및 Girardet et al.(2015)는 500m, Mohaymany et al.(2013)은 1km 단위로 로드킬 핫스팟 분석을 수행하였다.

이에 본 연구에서는 분석 단위 비교를 위해 도로교통공단 교통사고분석시스템에서 사용하는 교통사고 다발구간 분석 단위와 탐색적 분석결과를 참고하여 300m 및 1km 정사각형 격자를 분석 단위로 적용하였다(NIE 2018).

Getis-Ord G_i^* 는 공간 인접규칙을 설정하여 공간 가중치 행렬을 정의해야 한다. 격자형 자료에 대한 여러 형태의 인접규칙 중 본 연구에서는 중심 격자의 주변 이웃 격자를 최대한 고려하기 위해 8방향 이웃을 적용하였다. 또한, 커널 함수는 다양한 유형이 있으며, 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되는 가우시안(Gaussian) 함수를 적용하였다. 분석 프로그램은 Arc GIS (Ver10.5) 및 SANET (Ver4.1)을 활용하였다(Okabe et al. 2006).

IV. 연구결과

1. 격자별 로드킬 빈도

구역 단위 분석에서 로드킬의 수에 따른 공간적 분포를 확인하고, 로드킬 핫스팟 결과 분석 비교를 위한 지역을 미시적으로 파악하기 위해 도로를 따라 1km×1km 정사각형 격자 내 로드킬 빈도를 확인하였다(Figure 2). 분석 결과, 497개의 격자가 생성되

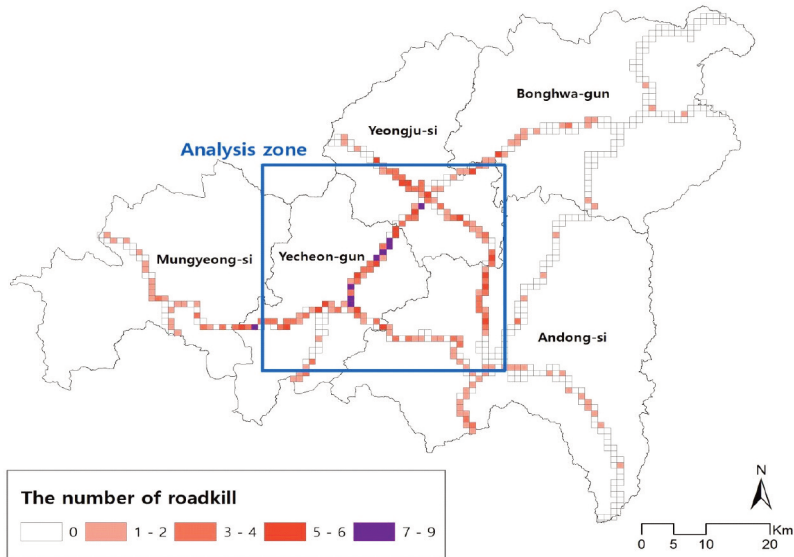


Figure 2. The number of roadkill on 1km x 1km and analysis zone.

었고, 로드킬 빈도수에 따른 격자 수는 1~2건이 24%(120개), 3~4건이 12%(58개), 5~6건이 4%(22개), 7~9건이 2%(9개), 그 외의 58%(288개) 격자에서는 로드킬이 나타나지 않는 것으로 집계되었다.

특히, 봉화군-영주시-예천군으로 연결되는 28번 국도 일부, 영주시-안동시를 통과하는 5번 국도 일부, 문경시-예천군-안동시로 연결되는 34번 국도 일부 지역의 경우 격자별 로드킬 빈도수가 상당히 높은 것으로 확인되었다. 이에 Getis-Ord G_i^* 도출 및 커널 밀도 추정을 실시한 후 이 지역을 중심으로 로드킬 핫스팟 여부를 파악하였다.

2. Getis-Ord G_i^*

로드킬의 국지적(Local) 공간 자기상관성을 측정하기 이전에 전역적(Global)으로 공간 자기상관성이 나타나는지 확인하기 위하여 Moran's I 를 측정하였다.

분석 결과, 300m 및 1km 모두 유의한 수준에서 강한 공간적 군집이 확인되었으며, 300m의 Z-score가

11.74이고, 1km의 Z-score가 13.33으로 1km에서 로드킬 군집경향이 보다 큰 것으로 나타났다(Table 1). 전역적 분석에서는 핫스팟의 국지적 위치를 확인할 수 없으므로 Getis-Ord G_i^* 를 측정하였다.

분석 단위에 따른 결과를 보면, 300m에서는 총 1,740개의 격자가 생성되었고, 그 중 9% 해당하는 163곳의 격자가 통계적으로 유의한 핫스팟으로 나타났다(Figure 3(a)). 1km에서는 총 497개의 격자가 생성되었고, 그 중 14%에 해당하는 68곳의 격자가 통계적으로 유의한 핫스팟으로 분석되었다(Figure 3(b)). G_i^* 분석 결과를 종합하면, 로드킬 빈도가 높은 격자가 집중되어 있는 핫스팟 지역을 직관적으로 확인할 수 있다는 장점이 있었다. 그러나 G_i^* 에서 핫스팟은 해당 공간 단위 주변에 유사한 값의 공간 단위들이 인접해 있다는 것을 의미하기 때문에 그 공간 단위 자체의 속성 값 자체가 높거나 낮은지 판단하기 어렵다. 따라서 격자별 로드킬 다발구간을 해석하는데 있어서 주의가 필요하다(Seo 2017). 한편, 유의한 로드킬 콜

Table 1. Global Moran's I summary

	Moran's index	Expected index	Variance	Z-score	P-value
300m	0.21	-0.00	0.00	11.74	0.00
1km	0.44	-0.00	0.00	13.33	0.00

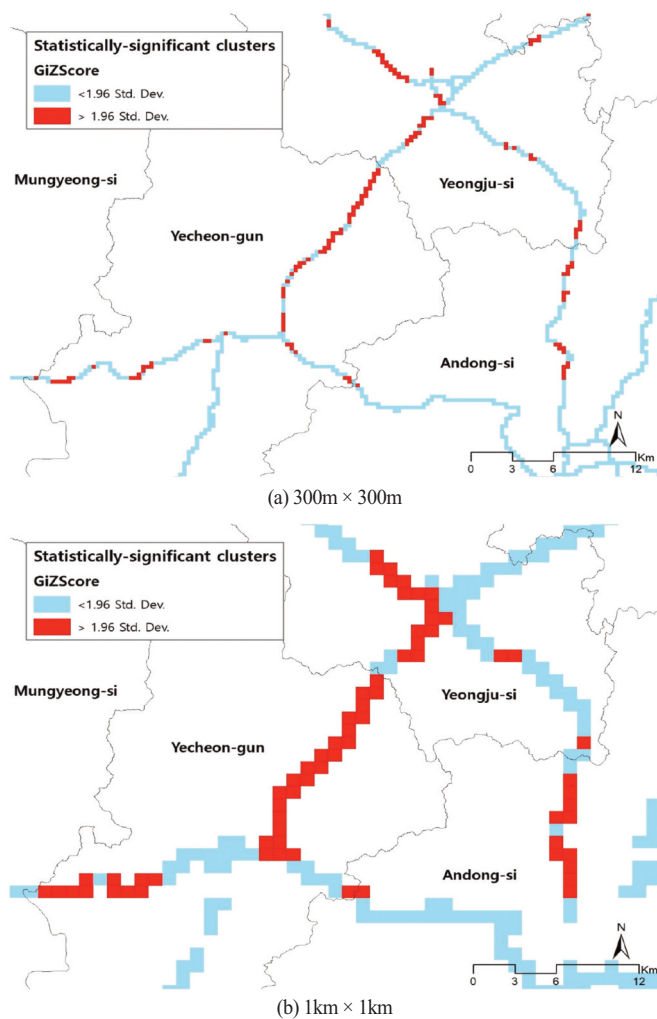


Figure 3. Results of Getis-Ord G_i^* .

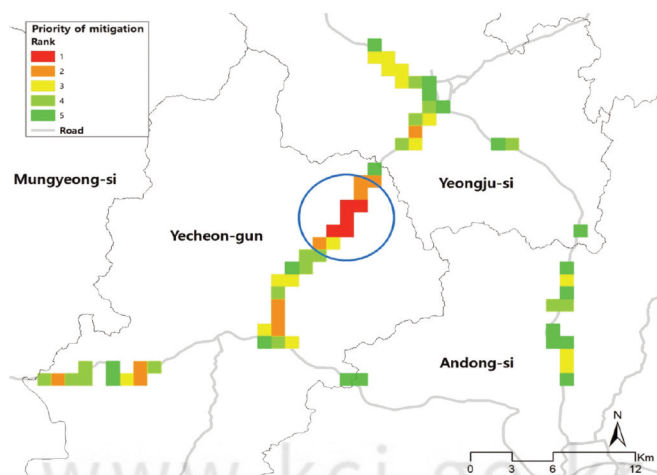


Figure 4. Priority of mitigation by G_i^* (1km × 1km).

드스팟은 나타나지 않았는데, 이는 연구지역 전체 면적 대비 발생한 로드킬의 수가 상대적으로 적은 경우에 발생할 수 있는 현상이다(Girardet et al, 2015).

G_i^* 는 각 공간단위별로 Z-score와 P-value 값이 계산되어 있어 로드킬 핫스팟 지역 중에서도 가장 우선적으로 저감대책을 수립해야하는 지역을 도출할 수 있다. Figure 4는 핫스팟 비율이 더 높게 나온 1km 구역 단위를 기준으로 P-value 값이 0.05 미만인 격자를 추출하여 Z-score에 따라 5개의 범위로 등급화

한 결과이다. 예천군과 영주시 경계에 있는 28번 국도 구간에서 Z-score 값이 가장 높게 나타나 향후 로드킬 저감대책 수립시 우선적으로 고려해야할 것으로 사료된다.

3. 커널 밀도 추정

커널 밀도 추정은 연구지역 전체를 대상으로 한 커널 밀도 분석과 도로를 따라 커널 밀도를 추정하는 네트워크 커널 밀도 분석을 실시하였다. 로드킬 밀도 추

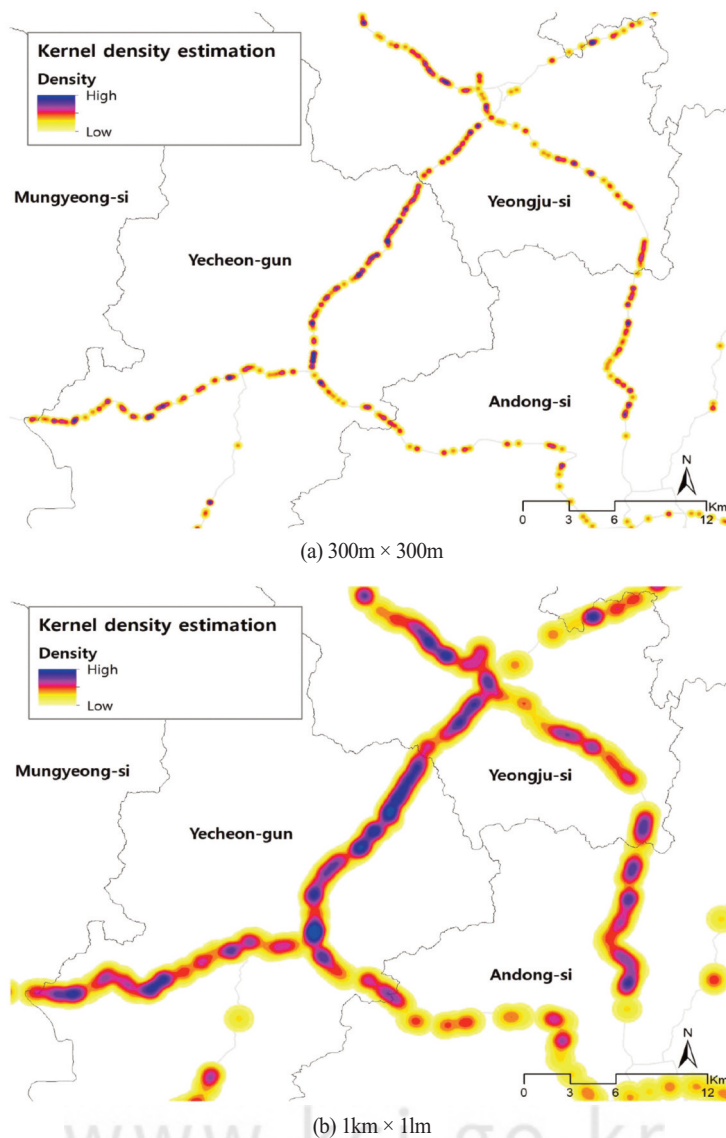


Figure 5. Results of kernel density estimation.

정 결과는 편의상 도로 경계 버퍼 50m 내 결과를 추출하여 시각화하였다.

커널 밀도 추정 결과, 탐색반경에 따라 밀도표면 생성 결과가 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 커널의 탐색반경이 넓은 1km가 300m 보다 평활한(smooth) 밀도표면이 생성된 것을 시각적으로 확인할 수 있다(Figure 5). Gi* 분석결과와 비교하면, 통계적 의미보다는 도로 구간에 따른 상대적인 특성을 시각적으로 확인할 수 있다는 장점이 있었으나, 통계

적인 유의성을 검증할 수 없다는 한계가 있었다.

한편, 네트워크 커널 밀도 추정은 일반적으로 연구 지역의 범위가 넓어서 도로를 선으로 가정할 수 있을 때 적합한 방법이다(Yang et al. 2016). 네트워크 커널 밀도 추정은 일반 커널 밀도 추정과는 달리 거리 계산 시 도로를 따라 분석을 수행하기 때문에 보다 현실에 가까운 로드킬 핫스팟 구간을 도출할 수 있다는 장점이 있었다. 분석 단위별로 보면, 300m가 1km 보다 핫스팟 구간이 더 많은 것으로 나타났다(Figure 6).

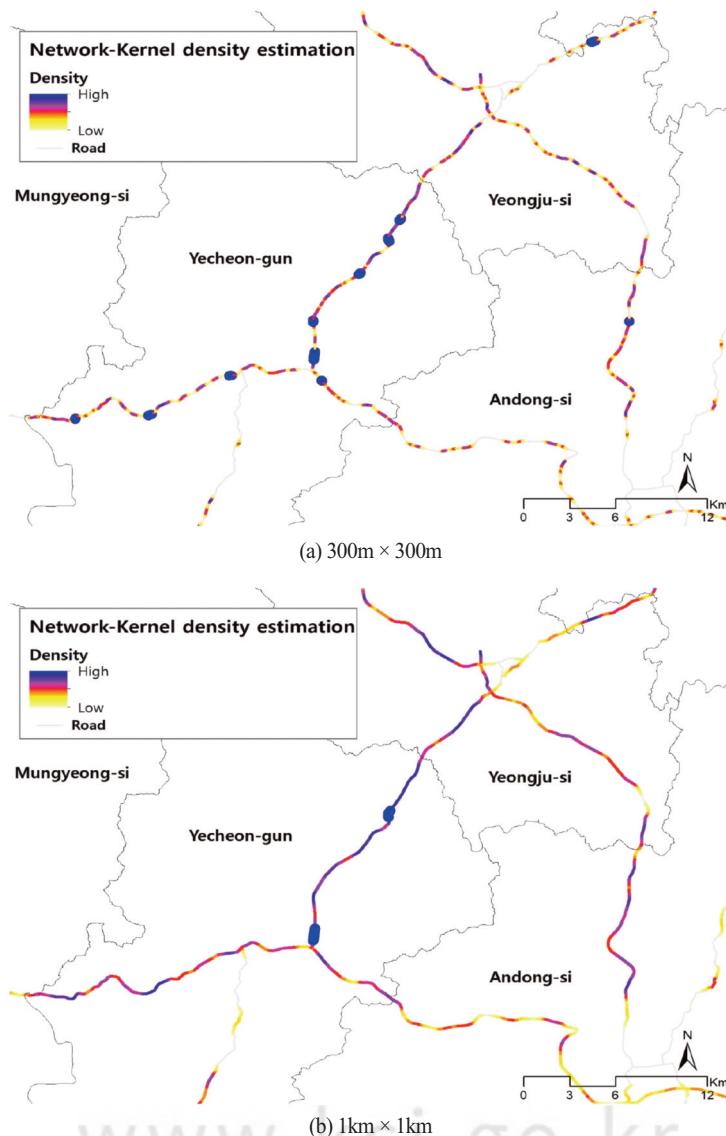


Figure 6. Results of network kernel density estimation.

이는 중앙을 중심으로 부드러운 곡면을 생성하는 커널 밀도분석 특성에 기인하며, 탐색반경이 넓을수록 커널의 형태가 평평해지는 현상과 관련된 것으로 사료된다. 일반적으로 많이 사용되는 커널 밀도 추정과 비교해 보면, 여러 개의 도로가 교차하는 교차로에서 보다 정확한 핫스팟 구간을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

V. 요약 및 결론

본 연구는 국내 환경에 적합한 로드킬 다발구간 분석방법을 비교하기 위하여 영주시, 문경시, 안동시, 청송군 로드킬 핫스팟 분석을 수행하였다. 분석 결과, 전반적인 특성은 유사하였으나, 분석 방법에 따라 일부 구간에서 차이가 존재하는 것을 알 수 있었다. 먼저 도로 1km² 격자 내 로드킬 빈도수를 확인한 결과, 7~9건의 로드킬 격자가 핫스팟으로 분석되었다. 전역적 공간 자기상관성 지수인 Moran's I 는 300m 보다 1km에서 군집의 경향이 더 크게 나타났고, 국지적 공간 자기상관 지수인 Getis-Ord Gi* 는 300m에서 핫스팟이 9%, 1km에서 핫스팟이 14%로 분석되었다. 이에 1km 단위에서 핫스팟의 Z-score 값을 5개의 순위로 등급화한 결과, 예천군과 영주시 경계에 있는 28번 국도 구간이 Z-score 값이 가장 높게 나타나서 향후 로드킬 저감대책 수립시 우선적으로 고려해야할 지역으로 나타났다. 한편, 커널 밀도 추정은 로드킬이 빈번하게 발생하는 지역을 시각적으로 확인하는데 있어서 구역 단위 분석보다 효과적으로 활용할 수 있었다. 특히 네트워크 커널 밀도 추정은 도로를 따라 네트워크 거리 기반으로 공간적 군집지역을 분석하기 때문에 일반 커널 밀도 추정보다 현실에 더 가까운 로드킬 핫스팟 지역을 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 커널 밀도분석의 특성상 공간적 군집지역의 통계적 유의성 도출이 어렵기 때문에 로드킬 저감대책 수립시 우선 순위 결정에 있어 판단이 어렵다는 한계가 있었다.

로드킬 핫스팟 분석 결과를 비교한 결과, Getis-Ord Gi*는 로드킬 빈도가 높은 지역이 군집되어 있는 지역을 통계적 유의성에 기반하여 효과적으로 도

출할 수 있었으며, 또한 Z-score에 따라 우선순위를 결정할 수 있다는 장점이 있었다. 그러나 로드킬 빈도가 낮더라도 주변에 빈도가 높은 격자가 집중되어 있을 경우 같은 핫스팟 지역으로 묶이게 되기 때문에 각각의 격자별로 로드킬 빈도를 재확인할 필요하다는 한계가 있었다. 커널 밀도 추정의 경우 시각적인 로드킬 핫스팟 확인을 위해 유용하게 활용될 수 있지만, 탐색반경 내에서 로드킬 분포의 분산이 달라도 밀도 값이 같으면 동일한 값을 가진다는 한계가 있었다. 즉, 연구자가 선택한 범위 내에서 로드킬 간 거리를 파악하기 어렵다. 따라서 향후 연구에서는 로드킬 간 다중거리 분석이 가능한 K-function 함수의 적용이 필요하다(Teixeira et al, 2013; Girardet et al, 2015). 또한, 로드킬이라는 공간 데이터에 내제된 공간적 자기상관성을 효과적으로 고려할 수 있는 공간회귀분석 및 포아송 등의 비모수적 통계방법(Malo et al, 2004; Park & Lee 2015)을 검토할 필요가 있다.

사 사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립생태원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIE-기반연구-2019-28).

References

- Cho DH. 2013. Trends and methodological issues in spatial cluster analysis for count data. *Journal of the Korean Geographical Society* 48(5): 768-785. [Korean Literature]
- Choi TY, Park JH. 2006. The effect of land use on frequency of mammal roadkill in Korea. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 34(5): 52-58. [Korean Literature]
- Clevenger AP, Chruszcz B, Gunson KE. 2003. Spatial patterns and influencing small vertebrate fauna road-kill aggregations. *Biological Conservation* 109: 15-26.
- Cromley RG, Hanink DM. 2012. Focal location quotients: specification and application.

- Geographical Analysis 44(4): 398-410.
- EEA (European Environmental Agency), 2011, Landscape fragmentation in Europe, EEA Report, 87pp.
- Fahrig L, Rytwinski T. 2009. Effects of roads on animal abundance - an empirical review and synthesis. *Ecology and Society*
- Forman RTT, Alexander LE. 1998. Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics* 29: 207-231.
- Gilsta D, DeVault TL, DeWoody JA. 2009. A review of mitigation measure for reducing wildlife mortality on roadways. *Landscape and Urban Planning* 91: 1-7.
- Girardet X, Contruyt-Rogéon G, Foltete JC. 2015. Does regional landscape connectivity influence the location of roe deer roadkill hotspot?. *European Journal of Wildlife Research* 61(5): 731-742.
- Jeong KS, Moon TH, Jeong JH. 2010. Hotspot analysis of urban crime using space-time scan statistics. *Journal of Korean Association of Geographic Information Studies* 13(3): 14-28.
- Jo NH, Jun CM, Kang YO. 2018. A visualization of traffic accidents hotspot along the road network. *Journal of Cadastre & Land InformatiX* 48(1): 201-213. [Korean Literature]
- Kim KM, Serret H, Clauzel C, Andersen D, Jang IK. 2019. Spatio-temporal characteristics and predictions of the endangered leopard cat *Prionailurus bengalensis euptilura* road-kills in the Republic of Korea. *Global Ecology and Conservation* 19: e00673.
- Knox EG. 1989. Detection of clusters, in Elliott P ed. *Methodology of Enquiries into Disease Clustering*, London: Small Area Health Statistics Unit, 17-20.
- Lee KJ, Tak JH, Park SI. 2014. Spatial and temporal patterns on wildlife road-kill on highway in Korea. *Journal of Veterinary Clinics* 31(4): 282-287. [Korean Literature]
- Malo JE, Suarez F, Diez A. 2004. Can we mitigate animal-vehicle accidents using predictive models?. *Journal of Applied Ecology* 41: 701-710.
- Mohaymany AS, Shahri M, Mirbagheri B. 2013. GIS-based method for detecting high-crash-risk road segments using network kernel density estimation. *Geo-spatial Information Science* 16(2): 113-119.
- NIE (National Institute of Ecology). 2018. Fundamental research on the conservation of national ecological network. [Korean Literature]
- Oh YJ, Lee KJ. 2018. A study on the spatial correlation between roadkill and traffic accidents on roads in Chungcheongnam-do. *Environmental Policy* 26(2): 147-166. [Korean Literature]
- Okabe A, Okunuki K, Shiode S. 2006. SANET: A Toolbox for Spatial Analysis on a Network. *Geographical Analysis* 38(1): 57-66.
- Park SI, Lee KJ. 2015. A study on building methodology for identifying road-kill hot-spots on highways and its empirical application. *Journal of Korea Planners Association* 50(3): 319-333. [Korean Literature]
- Ramp D, Caldwell J, Edwards KA, Warton D, Croft DB. 2005. Modelling of wildlife fatality hotspots along the snowy mountain highway in new south wales, Australia. *Biological Conservation* 126: 472-490.
- Seo CW, Thorne JH, Choi TY, Kwon HS, Park CH. 2015. Disentangling roadkill: the influence of landscape and season on cumulative vertebrate mortality in South

- Korea. Landscape Ecology Engineering 11: 87-99.
- Seo HJ. 2017. Spatial change analysis and future prediction of urban green spaces in Dadgu - a case study of forests and grasslands -. Dissertation of Ph,D, Kyungpook National University. [Korean Literature]
- Seok SM, Lee JY. 2015. A study on the correlation between road-kill hotspot and habitat patches. Journal of Environment Impact Assessment 24(3): 233-243. [Korean Literature]
- Shilling FM, Waetjen DP. 2015. Wildlife-vehicle collision hotspots at US highway extents: scale and data source effects. Nature Conservation 11: 41-60.
- Silverman BW. 1986. Probability density estimation for statistics and data analysis, Chapman and Hall, NY.
- Son HG, Park KH. 2008. A spatial statistical method for exploring hotspots of house price volatility. Journal of the Korean Geographical Society 43(3): 392-411. [Korean Literature]
- Teixeira FZ, Coelho IP, Esperandio IB, Oliveira NR, Peter FP, Dornelles SS, Delazeri NR, Tavares M, Martins MB, Kindel A. 2013. Are road-kill hotspots coincident among different vertebrate groups?. Oecologia Australis 17(1): 36-47.
- Xie Z, Yan J. 2008. Kernel density estimation of traffic accidents in a network space. Computers, Environment, and Urban System 35(5): 396-406.
- Xie Z, Yan J. 2013. Detecting traffic accident clusters with network kernel density estimation and local spatial statistics : an integrated approach. Journal of Transport Geography 31: 64-71.
- Yang JH, Kim JO, Yu KY. 2016. A selection of high pedestrian accident zones using traffic accident data and GIS : a case study of Seoul. Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Catography 34(3): 221-230. [Korean Literature]