

근린의 도로 네트워크 구조와 보행자 교통사고의 연관성 분석: 서울시 TAAS (2012~2014) 자료를 중심으로*

An Analysis of Associations between Neighborhood Road Networks and Pedestrian Traffic Accidents: Focused on the TAAS (2012-2014) in Seoul, Korea

이호준** · 이수기***
Lee, Hojun · Lee, Sugie

Abstract

The complexity, connectivity, and continuity of road network structure affect the speed of vehicle and drivers' vision and driving behavior, which strongly determines pedestrian safety. Thus more objective and in-depth research is required to identify the association between road network and pedestrian safety. In this context, this study examines the relationship between neighborhood environment including road network structure and pedestrian safety using the TAAS (2012-2014) data. We utilize negative binominal regression model. Unlike previous studies, this study includes exposure variables such as pedestrian volume, population, and road congestion level and objective measures of road network structure such as average geodesic distance, network betweenness centrality, average clustering coefficient. Key finding and implications can be organized as follows. First, pedestrian traffic accidents on community living zone road is strongly associated to road network structure of neighborhood-level. Second, we confirm that pedestrian volume and traffic condition are important variables for pedestrian accidents. Third, pedestrian traffic accidents are strongly associated with commercial land use and public transportation systems including median exclusive bus station. This study suggests policy implications for neighborhood road network design in urban planning and design projects and for pedestrian safety.

키 워 드 ■ 보행자, 교통사고, 교통안전, 도로 네트워크, TAAS

Keywords ■ Pedestrian, Traffic Accident, Traffic Safety, Road Network Structure, TAAS

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

산업화와 자동차 교통의 대중화는 편리성과 이동

성 측면에서 현대인의 삶에 긍정적인 영향을 미쳤지만 환경오염, 교통안전, 운동부족과 같은 부작용 또한 함께 야기했다. 전 세계적으로 도시의 환경친화성과 지속가능성, 그리고 도시민들의 건강에 대한 관심의 증대 등으로 인하여 교통의 패러다임이 자

* 이 논문은 2015년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2015R1A2A2A01006865)이며, 2016년 4월 대한국토·도시계획학회 춘계산학술대회에서 우수 논문상을 수상한 논문을 수정·보완한 것임

** Dept. of Urban Planning & Engineering, Hanyang University

*** Dept. of Urban Planning & Engineering, Hanyang University (Corresponding author: sugielee@hanyang.ac.kr)

동차 중심에서 보행 중심으로 전환되면서, 보행환경의 개선과 보행자 안전에 대한 관심 또한 함께 증가하고 있다. 그럼에도 불구하고 우리나라의 교통안전 수준은 여전히 심각한 수준이라고 할 수 있다. 도로교통공단의 교통사고 통계분석 보고서(2015)에 의하면 국가 교통사고 통합DB를 기준으로 2014년도 전국에서 발생한 교통사고는 전체 1,129,374건이며, 차대사람 사고 또한 160,277건 발생하였다. 사고심각도에서도 자동차 1만 대당 사망자 수가 2.0명으로 OECD평균인 1.0명에 비해 현저히 높은 수치를 보였다.

이러한 실정에 따라, 최근 보행자 안전에 대한 연구가 다수 이루어져 왔지만 연구의 방법론, 변수 설정, 자료 등에서 한계를 보이고 있다. 특히 근린지역에서 도로 네트워크의 전체적인 구조와 보행자 교통안전에 대한 연구가 부족하다. 도로 네트워크의 연결성, 연속성, 복잡성은 도로 차량속도와 운전자의 운전 행태 등에 직접적인 영향을 주며 최종적으로 보행자의 안전과 직결되는 요소이기 때문에 이에 대한 더욱 심도 있는 연구가 필요하다.

이에 따라, 본 연구는 도로공단 교통사고분석시스템(TAAS)의 2012~2014년 서울시 교통사고 자료를 이용하여 근린생활권에 해당하는 행정동 단위 도로 네트워크 구조 지표를 포함해 보행자 교통사고에 영향을 미치는 근린환경 특성을 분석하는 것을 목적으로 한다. 근린지역의 도로네트워크 구조에 대한 지표로는 평균 경로거리(average geodesic distance), 네트워크 매개중심성(network betweenness centrality), 평균 군집화계수(average clustering coefficient)를 사용하였다. 도로 구조 변수 외에도 보행자 교통사고 연구에서 중요한 변수인 보행자 교통사고 노출변수, 도로 및 교차로 요인, 토지이용 요인 대중교통시설 요인 등의 변수를 함께 고려하여 분석하였다.

2. 연구의 범위 및 방법

본 연구의 공간적 범위는 서울특별시 423개 행정동을 대상으로 한다. 서울특별시는 대한민국의 수도권 인구, 자동차등록 대수 및 보행자 교통사고 건수가 가장 높기 때문에, 보행자 교통사고에 대한 연구대상지로 적절하다고 할 수 있다. 또한, 행정동보다 작은 공간적 단위에서는 분석 단위의 크기 상 포함된 도로연장이나 교차로의 개수가 근린의 도로 네트워크 구조 특성을 나타내기에는 너무 작다고 판단하여 분석단위를 행정동으로 설정하였다.

시간적 범위는 2012년부터 2014년까지 총 3개년 도로 설정하여, 가장 최근에 공개된 3개년도의 교통사고분석시스템(Traffic Accident Analysis System: TAAS)자료를 사용하였다.

연구방법으로는 STATA 13을 사용해 음이항 회귀분석(negative binominal regression)을 진행하였다. 음이항 회귀모형은 종속변수가 가산변수일 경우 사용할 수 있는 분석 방법으로 포아송 회귀분석(poisson regression)과 달리 과분산된 자료에도 사용할 수 있다.

본 연구는 총 5장으로 구성되어있으며, 전체적인 연구의 흐름도는 아래 그림1과 같다. 2장에서는 본 연구와 관련된 선행연구를 고찰하였다. 선행연구는 보행자 교통사고의 영향요인 분석, 근린환경과 보행자 교통사고, 도로 네트워크 구조와 보행자 교통사고, 보행자 교통사고의 노출변수에 관한 연구를 중심으로 고찰하였으며, 이를 종합하여 선행연구의 한계점을 정리하고 본 연구의 차별성을 제시하였다. 3장에서는 종속 변수와 주요 독립변수들에 대한 의미 및 설정 방법에 대해서 설명한다. 특히, 본 연구에서 중점적으로 다루고 있는 도로 네트워크 구조 변수들(평균 최단 경로거리, 네트워크 매개 중심성, 평균 군집화 계수)에 대해서 산출방식과 그 의미를

자세하게 정리하였다. 4장에서는 설정한 변수들을 사용해 기술통계분석과 음이항 회귀분석을 시행함으로써 보행자 교통사고와 도로네트워크 구조, 설정한 근린환경특성 사이에 상관관계가 있는지를 실증적으로 확인하였다. 마지막으로 5장에서는 분석 결과를 바탕으로 연구를 종합하고, 보행자 교통안전 정책 및 보행 친화적인 근린환경 계획에 대한 시사점을 제시한다.

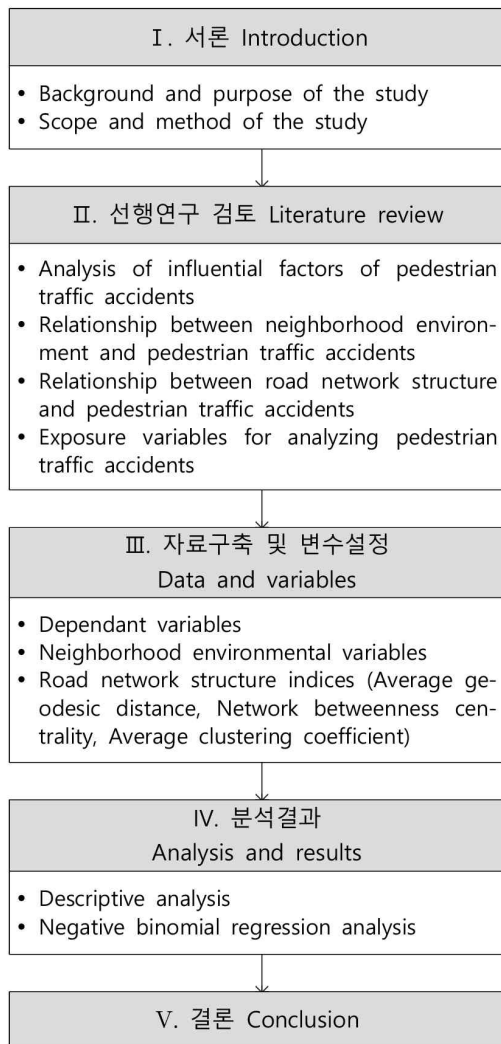


그림 1. 연구의 흐름도
Figure 1. Flow chart of the research

II. 선행연구 검토

1. 보행자 교통사고의 영향요인 분석

선행된 보행자 교통사고의 영향요인을 다룬 연구 중 상당수는 운전자와 보행자 개인특성, 사고 당시 자연적 특성과 같은 비물리적 특성(박준태 외, 2010; 박정순, 2011; 최새로나 외, 2013; 임유진 외, 2014), 세부적 도로 특성(이수범 외, 2009; 이승주 외, 2014; 김진태 외, 2014) 등에 초점을 맞추어 진행되어왔다. 비물리적 특성 중 운전자 및 보행자의 개인특성에 대해서는 성별, 연령, 인적 유발요인 등이 주요하게 다뤄졌다. 박준태 외(2010)는 피해자 성별이 고령보행자 사고에서는 여성일수록, 비고령보행자 사고에서는 남성일수록 사고심각도가 높아지는 것을 밝혔다. 박정순(2011)의 연구에서는 고령보행자일수록 사고심각도가 증가하는 것으로 나타났다. 최새로나 외(2013)는 날씨, 사고시간이 교통사고에 주는 요인을 분석하여 눈, 비가 내릴 때와 야간시간이 교통사고에 부정적인 영향을 미친다는 것을 밝혀냈다. 위와 같은 연구는 보행자 교통사고의 원인이 인적요인 혹은 자연적 요인이기 때문에 명확하게 개선 가능한 대책을 제시하기 어렵다는 한계점을 가진다.

한편, 이승주 외(2014)는 세부적 도로특성이 보행자 교통사고 수에 미치는 영향을 분석한 결과, 도로의 차량 진출입로 개수, 횡단보도 개수, 버스 정류장 개수가 교통사고 발생에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한, 이수범 외(2009)의 연구에서는 도로의 교통섬이 교통사고 발생에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, 큰 교차로에서 교통량이 많은 경우 교통섬은 교통사고를 증가시키는 반면, 큰 교차로에서 교통량이 적을 경우에는 교통섬이 교통사고 횡수를 감소시키는 것으로 나타났다. 김진

태 외(2014)는 사례 대상지 중앙버스전용차로의 무단횡단 행태를 줄일 수 있는 안전시설을 가상으로 적용하여 시뮬레이션 프로그램(VISSIM)과 상충분석 평가프로그램(SSAM)을 사용하여 그 효과를 알아보았다. 연구결과, 횡단보도의 물리적 차단시설, 중앙정류소 끝단 펜스, 노변보도 측 펜스의 설치를 통해 잠재적인 사고 위험을 기존의 35%까지 낮출 수 있음을 확인하였다. 그러나 위와 같이 세부적 도로특성과 교통사고와의 관계를 다룬 연구들은 비물리적 요인을 다룬 연구들과는 다르게 명확한 개선대책을 제시할 수 있는 반면, 대부분의 연구 대상지가 세부적인 도로특성을 변수화하기 위해 좁은 특정 지역으로 한정되어 있어 연구의 결과를 일반화시켜 해석하기 어렵다.

2. 근린환경과 보행자 교통사고

Perry(1929)가 근린 주구론에서 근린의 개념을 설명한 이후, 도시계획에서 근린은 중요한 공간 단위로 인식되어 왔지만 근린의 규모에 대해서는 정확한 규정은 없는 실정이다(유치선·이수기, 2015). Perry(1929)는 근린주구론에서 초등학교를 중심으로 하는 400m 반경의 도보권을 근린의 범위로 설정하고 있다. 미국의 경우 인구 및 주택 센서스 단위인 센서스 트랙(census tract)을 근린지역으로 많이 사용하고 있으며, 한국의 경우 거주지를 기준으로 일정 반경을 설정하거나 행정동 단위를 근린의 범위로 사용하고 있다. 예로, 고은정·안건혁(2014)은 행정동이 지역의 특성을 나타내며, 정치적·사회적 정체성이 공유되고 있는 점을 주요한 이유로 들어 행정동을 근린의 단위로 사용하였다. 또한 이들은 행정동이 보행권 연구에서 일반적으로 가장 많이 사용되는 공간단위라는 점 또한 근린의 단위로 행정동을 사용하는 것의 타당성을 간접적으로 나타

낸다고 하였다. 한편, 이세영·이제승(2014)은 페리가 제시한 초등학교 중심의 보행권과는 차이가 있지만, 이용 가능한 사회·인구·도시 형태의 자료를 고려할 때 자료 구득이 가능한 선에서 근린의 정의와 가장 부합하는 행정동을 근린으로 정의하였다.

근린의 개념이 도보권을 기준으로 하는 소생활권이라는 측면에서 근린내의 보행자안전은 중요한 개념이며 주민들의 생활에 밀접한 영향을 미친다고 할 수 있다. 이러한 측면에서 박승훈(2014), 이세영·이제승(2014), 서지민·이수기(2016)의 연구는 토지이용, 도로현황, 대중교통시설, 인구 사회적 변수 등 근린환경특성 요인과 보행자 교통사고의 관계를 분석했다는 점에서 의미가 있다. 박승훈(2014)은 워싱턴 주 시애틀 시의 근린단위에 해당하는 공간 단위인 센서스 트랙 단위로 근린환경이 보행자 교통사고에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 회전교차로 밀도, 신호등 밀도, 상업지 비율, 혼합적 토지이용 비율이 높을수록, 버스정류장 개수가 많을수록 보행자 교통사고가 많이 일어나는 것을 확인하였다. 이와 비슷한 맥락에서 이세영·이제승(2014)은 서울 시의 행정동을 대상으로 어린이와 노인 보행자 교통사고에 영향을 미치는 근린환경 특성을 파악하고자 했다. 이들은 분석결과를 통해 어린이 인구밀도와 도로면적 비율이 높을수록 어린이 보행자 교통사고 밀도가 높아지고, 노인인구 밀도, 교차로 밀도, 도로면적 비율, 버스정류장 밀도, 지하철 밀도가 높을수록 노인 보행자 교통사고 밀도가 높아지는 것을 확인하였다. 또한, 서지민·이수기(2016)는 분석 단위를 집계구로 설정하여 보행자 교통사고수를 심각도에 따라서 근린환경특성과의 관계를 파악하였다. 이 연구는 보행자 교통사고에 영향을 미치는 물리적 환경을 가로환경, 가로구조, 용도지역, 토지이용 환경요인으로 나누어 분석하고, 각 요인별 세부적인 물리적 환경 변수를 도출하여 정책적 시사점을 제시하였다.

3. 도로 네트워크 구조와 보행자 교통사고

도로 네트워크의 형태와 연결성, 연속성은 자동차 속도와 운전 습관, 운전자의 시야 거리에 영향을 미치고 최종적으로 교통안전에 주요한 영향요인이라고 할 수 있다(Zhang et al., 2015). 이에 따라, 도로 네트워크의 구조와 보행자 교통사고의 관계에 대한 연구가 진행되어 왔다. Ukkusuri et al.(2012)는 도로 네트워크 특성과 보행자 교통사고 수의 관계를 알아보기 위해 교차도로 개수별 교차로 수, 도로 등급, 도로폭, 차로수를 고려하여 분석하였다. 그 결과, 지역에 4지, 5지 교차로 개수가 많을수록, 주도로 연장이 길수록, 도로폭이 클수록 보행자 교통사고가 증가한다는 결과를 확인하였다. 하지만 노드 수, 도로특성으로 지역의 도로 네트워크 구조를 고려하기에는 한계가 있다고 볼 수 있다.

한편, Marshall and Garrick(2011)은 캘리포니아의 24개의 도시를 대상으로 가로 패턴을 8개로 유형화하여, 가로패턴, 가로의 밀도, 가로의 연결성이 전체 교통사고 수에 미치는 영향을 분석하였다. 하지만 이들은 지역의 가로패턴을 보고 연구자가 직접 분류하는 방식으로 가로패턴을 유형화하였기 때문에 주관적 의견이 개입되는 한계를 가지고 있다. 이들은 실제 연구 결과에서도 가로패턴 유형 분류 변수에 대해 유의한 결과 값을 얻지 못하였다. 이러한 측면에서 비교적 최근에 진행된 Zhang et al.(2015)의 연구는 노드(node)-링크(link) 네트워크를 기반으로 하는 위상학적(topological)방법을 사용하여 도로 네트워크 구조를 객관적으로 수치화하여 보행자 교통사고와의 관계를 분석하였다는 점에서 의미가 있다. 이들은 연구결과로 평균 경로거리, 매개중심성, 평균 군집화 계수가 높은 네트워크 구조일수록, 그리고 교차로와 블록의 밀도가 높은 네트워크 구조일수록 보행자 교통사고가 덜 일어나

는 것을 확인하였다. 이들은 연구결과를 통해, 격자형(gridiron) 도로구조일수록 평균 경로거리, 매개중심성, 군집화 계수가 낮고, 쿨데삭형(cul-de-sac) 도로구조일수록 높기 때문에 쿨데삭형 도로구조가 격자형 도로구조보다 더 높은 보행자 교통안전 수준을 가진다고 보았다.

4. 보행자 교통사고의 노출변수

보행량과 자동차 총 주행거리(VMT)는 보행자 교통사고 수에 핵심적인 영향을 미치는 노출변수들이다(Marshall and Garrick, 2011; Ukkusuri et al., 2012). 하지만 보행량과 자동차 총 주행거리 자료는 특정 사례지 혹은 공간적 분석단위를 제외하고는 구득이 어려운 자료이다. 이에 따라, 선행연구에서는 보행량과 자동차 총 주행거리를 대리할 변수를 설정하기 위해 다양한 시도를 하였다. 가장 일반적인 방법은 거주 인구 혹은 종사자 수를 사용하는 방식이다(Hadayeghi et al., 2010; Ukkusuri et al., 2012; Li et al., 2013; Zhang et al., 2015). 하지만, 인구와 종사자 수를 그대로 사용하는 것은 지역 교통량의 통행행태, 도로 네트워크 구조 등 다양한 변수에 영향을 받는 노출변수를 대리하기에는 부족하다고 볼 수 있다(Marshall and Garrick, 2011). 이러한 한계를 극복하고자 Dumbaugh and Li(2010)는 교통량의 증가 요인으로 대규모 상점(big box store)을 고려하였고, 보행량 증가 요인으로 보행자 규모 상점(pedestrian-scaled retail use)을 고려하였다. 또한, Ha et al.(2011)의 연구에서는 보행자 및 교통량 유발요소로 학교개수, 대학교개수, 주택밀도, 고용밀도, 소매업비율, 전산업 사업체비율, 인구밀도, 보행 통근비율을 사용했다. 이와 비슷한 연구로, Delmelle et al.(2012)는 주택밀도, 인구밀도, 사업체 밀도, 고용밀도, 소매점 밀도 등과

같은 교통 유발 요인들을 변수로 설정함으로써 교통량을 간접적으로 고려하였다. 국내연구로는 이세영·이제승(2014)의 연구에서 2009년 서울시 유동인구조사 자료를 사용하였지만, 동별로 조사지점의 불균형이 있고, 조사지점이 공간적으로 연속적이지 않기 때문에 자료의 한계가 존재한다고 할 수 있다.

5. 연구의 차별성

선행연구 고찰을 통해 도출한 기존 보행자 교통사고에 대한 연구의 한계점은 다음과 같이 정리할 수 있다. 우선적으로, 도로 네트워크의 구조가 운전자의 운전행태에 주요 영향요인 중 하나임에도 불구하고 보행자 교통사고와 근린환경을 다룬 기존 연구들에서 대상지의 도로 네트워크 구조에 대한 고려가 부족한 실정이다. 도로 네트워크 구조에 대해 고려한 대부분의 기존 연구들도 네트워크의 구조보다는 도로, 교차로의 양적인 측면만을 집중하거나, 네트워크 구조를 변수화함에 있어 객관성을 확보하지 못하는 등 여러 한계점이 존재한다. 또한, 보행자 교통사고 연구의 노출변수에 해당하는 보행량과 자동차 통행량에 대한 고려가 부족하다. 이는 통계분석 시 독립변수들이 보행자 교통사고에 직접적으로 미치는 영향뿐만 아니라 노출변수에 대리변수로써 미치는 영향력까지 함께 나타나게 되어 왜곡된 해석이나 시사점이 도출될 수 있다(Marshall and Garrick, 2011). 마지막으로, 국내 보행자 교통사고에 대한 연구들은 개인적 특성, 자연적 특성, 세부적 도로특성에 집중해 연구가 진행되어왔다. 개인적 특성, 자연적 특성과 보행자 교통사고와의 관계에 대해서는 명확한 개선방향을 제시하기 힘들다는 한계점이 있다. 그리고 세부적 도로특성에 집중된 연구들은 몇 개의 사례지를 대상으로 하고 있어 일반화에 있어 한계점을 가진다. 또한, 일반화 가능

한 충분한 표본을 가지고 진행한 연구 중 대다수는 노인·어린이와 같이 특정 연령대의 사고를 대상으로 하거나, 해외 도시사례를 대상으로 연구가 진행되어 우리나라의 전반적인 보행 안전 개선에 시사점을 제시할 수 있는 연구는 부족한 실정이다.

이러한 선행연구의 한계점을 극복하기 위해 본 연구는 다음과 같은 차별성을 가진다. 첫째, 객관화된 도로 네트워크 구조에 대한 지표표를 통해 도로 네트워크 구조와 보행자 교통사고 사이의 관계를 분석하였다. 이를 위해, 동별 가로를 노드(node)-링크(link) 네트워크를 기반으로 하는 네트워크 그래프로 만들어 네트워크 분석에서 사용되는 지표인 네트워크 평균 경로거리, 매개중심성, 군집화 계수를 도출하여 변수로 사용하였다. 둘째, 생활권 도로로 설정한 폭 12m 미만 도로에서 일어난 사고와 폭 12m 이상 도로에서 일어난 사고를 나눠서 분석함으로써 도로 네트워크가 생활권 도로에서 일어나는 사고를 감소시킨다는 선행연구들의 해석을 실증적으로 분석해보았다. 이를 위해, 한국 교통연구원 에서 제공하는 2013년 교통주제도의 도로별 차로수에 기준 차로폭을 적용하여 공간적으로 사고를 구분하였다. 셋째, 보행자 교통사고의 노출변수인 보행량과 교통량에 대한 대리변수를 구축하였다. 기존에 일반적으로 사용되던 인구뿐 아니라 SK의 스마트폰 기반 유동인구 자료와 SK Planet의 도로혼잡도 API를 사용해 보행자 교통사고의 노출변수인 보행량과 교통량의 대리변수로 사용하였다. 이는 보행자 교통사고의 가장 중요한 노출변수를 제어함으로서 도로의 네트워크 구조가 보행자 교통사고 발생에 어떤 영향을 미치는지 파악할 수 있다는 점에서 선행연구와 차별성을 가진다. 넷째, 우리나라의 대표적 도시지역이자 가장 높은 사고수를 나타내는 서울시 423개 행정동을 대상으로 하여 일반화를 위한 충분한 표본을 확보하였고, 2012년부터 2014년까지 3년간의 전체 보행자 교통사고를 분석함으로

써 서울시 행정동 차원에서 보행자 교통사고 안전을 제고하기 위한 정책적 시사점을 제시하였다.

Ⅲ. 자료구축 및 변수설정

1. 분석변수와 자료 출처

본 연구에서 사용한 분석변수의 세부적인 내용 및 자료의 출처는 아래 표1과 같다. 도로공단 교통사고 분석시스템(TAAS)의 2012년부터 2014년까지의 보행자 교통사고 수를 종속변수로 사용하였다. 그리고 서울시 새주소 사업DB(2013)를 사용하여 도로 네트워크 구조를 파악할 수 있는 변수를 설정하였다. 또한, 새주소 사업DB(2013), 국가통계포털의 주민등록인구(2013), 서울특별시 교통정보센터 자료(2015), 한국교통연구원 교통주제도(2013), 서

울시 과세대장DB(2013), 서울시 열린 데이터 광장 DB(2013, 2014), SK GeoVision 자료(2012), SK Planet API(2016)를 활용하여 서울시 행정동 단위의 유동인구, 도로혼잡도, 인구, 토지이용, 도로 및 교차로, 대중교통 시설, 교통안전 시설 및 제도 요인에 대한 변수를 구축하여 사용하였다. 자료의 가공에는 ArcGIS 10과 R. 3.2.1, 그리고 STATA 13을 사용하였다.

2. 도로네트워크 구조 변수

도로네트워크 구조 요인으로는 평균 최단경로거리, 네트워크 매개중심성, 평균 군집화계수를 사용하였다. 세 개의 도로네트워크 구조요인 변수는 모두 서울시 새주소 사업 DB(2013)의 도로망 자료를 사용하여 구축하였다. 경로거리, 매개중심성, 군집화

표 1. 분석변수와 자료출처

Table 1. Selected variables and data sources

Variables		Description	Data sources	
Depen. variable	Pedestrian traffic accidents	No. of total pedestrian accidents between car and person	Traffic Accident Analysis System (TAAS), 2012, 2013, 2014	
	Exposure variable	No. of population, Senior population ratio, Pedestrian volume (no. of pedestrian), Average level of road congestion	National Statistics Office, 2013 SK GeoVision, 2012. 09 SK Planet API, 2016	
		Road network structure indices	Average geodesic distance, Network betweenness centrality, Average clustering coefficient	Seoul New Address DB, 2013
	Indepen. variable	Land use factor	Commercial use floor area ratio, Industrial use floor area ratio, Land use mix (Entropy index)	Property Tax Ledger, 2013
		Road and intersection factor	Average speed limit, Average no. of lanes, Intersection density, Road length per intersection	Transportation digital map of the Korea Transport Institute, 2013 Seoul New Address DB, 2013
		Transit infrastructure factor	No. of subway entrances, No. of bus stops, Percent of median exclusive bus stop to all bus stops	Seoul New Address DB, 2013 Seoul Transport Operation and Information Service DB, 2015
		Traffic safety factor	No. of humps, No. of crosswalks, No. of pedestrian bridges, No. of school zone	Seoul Open Data Plaza DB, 2013, 2014

계수 등 네트워크 구조를 객관화할 수 있는 지표를 측정하기 위해서는 GIS 상의 도로 네트워크를 노드(node)와 링크(link)로 구성되어 있는 위상학적 네트워크로 전환해야 한다. 위상학적 네트워크로 전환하는 방식은 크게 두 가지로 Primal Approach와 Dual Approach로 나눌 수 있다(Porta et al., 2006a, 2006b). Primal Approach는 교차로를 노드로, 도로를 링크로 하는 네트워크를 구성한다. 이는 가장 일반적인 네트워크 구성법으로 교차로의 연결성을 분석하기에 적절한 네트워크 구성방법이다.

Dual Approach는 도로를 노드로 하고 교차로를 링크로 하여 네트워크를 구성하는 방식으로, 본 연구와 같이 도로 링크들이 어떻게 연결이 되었는지를 분석할 때 주로 사용된다(Zhang et al., 2015). Dual Approach는 어떠한 기준으로 '도로 세그먼트(segment)'를 한 도로로 볼 것인가에 따라 네트워크 구조가 달라진다. 가장 일반적으로 사용되는 두 가지 방법은 도로명을 기반으로 하는 방법과 Intersection Continuity Negotiation(ICN) 방법이다. 먼저, 이름을 기반으로 하는 방법은 같은 도로명을 가지는 도로 세그먼트를 하나의 도로로 보는 방법이다. 이 방법은 공간적으로 연속되는 도로라도 도로의 만들어진 시기, 도로의 스케일, 사회적 계층의 차이 등의 이유로 두 개의 다른 이름이 붙을 수 있다는 한계가 있다(Porta et al., 2006a). ICN 방법은 공간적으로 나란하게 놓인 도로 세그먼트를 하나의 도로로 보는 방식이다. 이 방법은 격자형 도로구조에서는 적용이 용이하지만, 자연적으로 형성된 부정형 도로의 경우에는 적용 시 오류가 발생할 수 있다는 단점이 있다(Masucci et al., 2014).

따라서 본 연구에서는 Freiria et al.(2015)의 연구에서 사용된 방법을 사용하며 그 방법은 다음과 같다. 우선 1단계로 모든 도로에 ID를 부여한다. 2단계 과정으로 도로가 교차하는 모든 점을 교차로 노드로 하고, 도로는 그 노드들을 잇는 링크로 한

다. 이는 primal graph를 만드는 방법과 같다. 3단계 과정은 2단계에서 만든 primal graph의 노드(교차로)는 링크로, 링크(도로)는 노드로 전환하여 dual graph를 만들고, dual graph의 각 노드와 링크에 ID를 부여하여 분석한다.

2.1 평균 최단 경로 거리

네트워크 분석 방법에서 경로는 각 링크를 반복적으로 허용하지 않으면서 두 노드를 연결하는 네트워크 거리를 뜻한다. 그리고 두 노드를 연결하는 경로 중 가장 짧은 네트워크 거리의 경로를 최단 경로 거리라 한다. dual graph 상에서 최단 경로 거리는 특정 도로부터 다른 도로까지 가장 적게 거치고 갈 수 있는 교차로의 수를 뜻하기 때문에, 네트워크에서 평균적으로 최단 경로 거리가 길다는 것은 네트워크 안에서 다른 도로로 접근할 때 통과하는 교차로 개수가 많다는 것을 의미한다. 통과하는 교차로 개수가 많아지면 운전자는 교차로 통과 시 상충하는 도로의 교통량, 보행자 때문에 운전이 더 신경을 쓰게 되고, 교차로에서 회전을 하면서 시야 거리를 제한받기 때문에 속도를 줄이게 된다(Zhang et al., 2015). 하지만 반대로 이는 교차로에서 보행자와 차량 동선의 상충 횟수를 잠재적으로 증가시켜 사고 위험을 높일 수 있다. 네트워크의 평균 최단 경로 거리를 구하는 공식은 아래 식(1)와 같다.

$$GD_{avg} = \sum_j^n \sum_k^n gd_{jk} / [n(n-1)/2], \quad j \neq k \dots (1)$$

여기서, GD_{avg} 는 네트워크의 평균 최단 경로 거리를 뜻하고, n 은 네트워크의 총 노드의 개수를, gd_{jk} 는 노드 j 에서 k 까지 최단 경로 거리를 뜻하고, 마지막으로 $n(n-1)/2$ 는 네트워크 전체의 노드 쌍의 총 개수를 뜻한다.

2.2 네트워크 매개 중심성

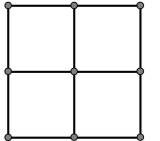
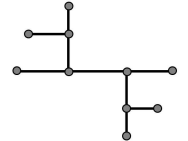
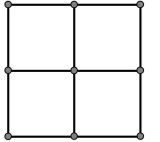
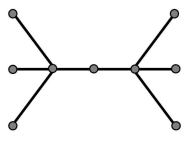
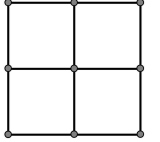
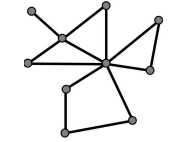
네트워크 분석에서 가장 많이 사용되는 개념 중 하나인 중심성(centrality)은 네트워크에서 한 노드나 링크가 얼마나 중심에 위치하는지를 알 수 있는 지표이다(이수상, 2012). 이 중 일반적으로 가장 널리 사용되는 중심성지표는 Freeman(1979)이 제안한 연결정도중심성(degree centrality), 매개중심성(betweenness centrality), 근접중심성(closeness centrality)이다. Zhang et al.(2011)은 위의 세 중심성 개념을 도로 네트워크를 평가하는데 적용해본 결과, 매개중심성이 도로 네트워크에서 교통류의 분배를 가장 잘 나타내는 중심성 지표인 것을 확인하였다. 매개 중심성은 특정 노드가 네트워크 내 다른 노드와 네트워크를 구축할 때 그 경로 사이에서 중개자의 역할을 얼마나 수행하고 있는지를 측정하는 개념으로 중개역할을 하는 것이 중심성이 높다는 가정에 따라 사용한다(손동원, 2002: 이수상,

2012 재인용). 따라서 특정 노드의 매개 중심성은 네트워크 내 노드 쌍의 최단 경로 거리상에 해당 노드가 존재하는 빈도수를 바탕으로 측정된다(Freeman, 1977). 각 노드의 매개 중심성을 구하는 공식은 아래 식(2)과 같다.

$$C_i^B = \sum_j \sum_k [g_{jk(i)}/g_{jk}], \quad i \neq j \neq k \dots\dots(2)$$

여기서, C_i^B 는 노드 i 의 매개 중심성을, $g_{jk(i)}$ 는 노드 j 에서 k 까지 최단 경로 거리 루트 중 노드 i 가 포함된 횟수를, g_{jk} 는 노드 j 에서 k 까지 최단 경로 거리 루트의 개수를 나타낸다. 따라서 $g_{jk(i)}/g_{jk}$ 는 노드 i 가 무작위로 정한 노드 j 에서 k 까지의 최단 경로 거리 안에 포함될 확률이라고 할 수 있다. 네트워크 매개중심성의 대푯값을 산출하기 위해 각 노드의 매개중심성을 바탕으로 아래 식(3)과 같이 네트워크 매개 중심성을 산출하였다.

표 2. 도로 네트워크 구조 지표의 개념과 예시
Table 2. Concept and examples of road network structure Indices

유형(type)	개념과 정의(concept and definition)	예시(example)	
		Lower value	Higher value
평균 최단경로거리 Average geodesic distance	the average no. of intersections in the shortest routes in the network $GD_{avg} = \sum_j \sum_k gd_{jk}/[n(n-1)/2], \quad j \neq k$	 2.000	 2.444
네트워크 매개 중심성 Network betweenness centrality	the degree of traffic concentration on specific roads within the network $C^B = \sum_{i=1}^n (C_{i*}^B - C_i^B) / [(n-1)^2(n-2)]$	 0.134	 0.246
평균 군집화 계수 Average clustering coefficient	the degree of subnetwork formation in the network $CC = \sum_{i=1}^n CC_i/n$	 0.000	 0.497

$$C^B = \sum_{i=1}^n (C_{i^*}^B - C_i^B) / [(n-1)^2(n-2)] \dots\dots(3)$$

여기서, $C_{i^*}^B$ 는 네트워크 내에서 가장 매개중심성이 높은 노드의 매개중심성 값을, C_i^B 는 노드 i 의 매개 중심성을, n 은 네트워크의 노드 개수를 나타낸다. 따라서 C^B 값은 네트워크에서 가장 매개중심성이 높은 노드의 매개중심성과 다른 모든 노드의 매개중심성의 차이값의 평균을 노드 쌍의 개수로 표준화한 것이다. 네트워크의 매개중심성이 높다는 것은 특정 도로가 네트워크 구조적으로 사용빈도가 가장 높아 높은 위계를 형성하고 있다는 것이다. 일반적으로 격자형 도로구조의 경우 각 도로 간의 연결성이 좋기 때문에 부정형 도로 네트워크에 비해 교통량이 한 도로로 집중되지 않고, 이에 따라 낮은 값의 네트워크 매개중심성을 나타낸다 (Zhang et al., 2011).

2.3 평균 군집화 계수

규모가 큰 네트워크에서 예상보다 밀접하게 하위 네트워크들이 구성되는 현상을 흔히 발견할 수 있으며, 이렇게 하위그룹이 형성되는 현상은 군집화 (clustering) 개념을 통해 설명될 수 있다 (Hanneman and Riddle, 2005). 군집화계수는 인접한 노드들이 얼마나 밀접하게 하위 네트워크를 이루고 있는지를 측정하는 지표이다. 군집화계수는 지역 군집화계수와 전역 군집화계수로 나눌 수 있으며, 지역 군집화계수가 더 널리 사용된다. 지역 군집화계수는 이웃한 네트워크들 사이에 형성되는 국지적인 응집성을 보여주는 수치로 한 노드를 기준으로 이웃한 모든 노드가 연결되어있는 네트워크 링크 수에 대한 현재 이웃한 노드들이 연결되어있는 네트워크 링크 수의 비율을 나타낸다(이수상,

2012). 지역 군집화 계수를 산출하는 공식은 아래 식(4)와 같다.

$$CC_i = \sum_j^m \sum_k^m l_{jk} / [m(m-1)/2], i \neq j \neq k \dots(4)$$

여기서, l_{jk} 는 현재 i 의 이웃 노드인 j 와 k 가 연결되어있는지에 대한 여부를 나타내며, 연결되어있으면 1, 아니면 0으로 나타낸다. 또한, m 은 노드 i 의 이웃노드의 개수를, $m(m-1)/2$ 는 i 의 이웃노드들이 모두 연결되어있을 때의 네트워크 링크 수를 나타낸다. 네트워크 전체를 대표하는 값을 산출하기 위해 본 연구에서는 식(5)와 같이 각 노드의 군집화계수의 평균값을 사용한다.

$$CC = \sum_1^n CC_i / n \dots\dots\dots(5)$$

여기서 CC 는 네트워크에 속한 노드들의 평균 군집화 계수를, n 은 네트워크의 총 노드 개수를 나타낸다. 네트워크의 평균 군집화 계수가 높다는 것은 네트워크 내에 지역적으로 연결성이 높은 하위 네트워크들이 다수 형성되어 있다는 것을 뜻한다. 이는 하위 네트워크가 형성된 도로 사이에서는 연결성이 높지만, 하위 네트워크 간의 연결성이 떨어져, 하위 네트워크 간 이동시 주로 주도로를 거쳐 이동하게 되기 때문에 자동차 총 주행거리가 높아져 교통사고 위험이 증가할 수 있다(Wei and Lovegrove, 2012). 하지만 반대로 생각해보면, 근린지역에 해당하는 하위 네트워크로의 통과교통이 배제되기 때문에 사고가 줄어들게 하는 효과가 있을 수 있다(Zhang et al., 2015).

3. 종속변수 및 근린환경변수

종속변수의 설정에는 도로공단 교통사고분석시스템(TAAS)의 2012년부터 2014년까지 총 3개년도의

전체 교통사고 중 보행자 교통사고를 사용하였다. 여기서 보행자 교통사고란 도로교통공간에서 구분하는 교통사고의 유형 중 ‘차대사람’ 사고로써 차가 보행자를 충격한 사고이며, 2012년부터 2014년까지 3년간 보행자 교통사고는 32,666건이다.

추가적으로 본 연구는 도시·군 계획시설의 결정·구조 및 설치기준에 관한 규칙에서 정하는 도로의 규모별 구분에서 소로의 도로폭 기준인 12m 미만을 적용하여 보행자 교통사고를 두 분류로 구분하여 분석하였다. 소로는 도로의 기능적 구분으로는 가구를 구획하는 도로인 국지도로에 해당하기 때문에 생활권 도로로 볼 수 있다. 따라서 폭 12m 미만 도로에서 일어난 ‘생활권 도로 보행자 교통사고’와 폭 12m 이상 도로에서 일어난 ‘주요 도로 보행자 교통사고’로 나누어 분석하였다.

도로의 폭은 한국교통연구원에서 제공하는 2013년 교통주제도의 도로 차로 수 정보에 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙의 최소 차로 폭을 고려하여 설정한 기준 차로 폭 4m를 곱하여 산출하였다. 분류 결과, 12m 미만 생활권 도로 보행자 교통사고는 19,718건으로 전체 보행자 교통사고의 60.4%에 해당한다. 다른 한편으로, 경찰청의 2014년도 자료를 기준으로 서울시 도로폭 13m 미만 도로에서 발생한 보행자 교통사고가 전체 보행자 교통사고의 69.9%인 것을 고려하였을 때 합리적인 수치라고 볼 수 있다.

보행자 교통사고의 노출변수에 해당하는 유동인구수와 도로혼잡도는 SK GeoVision자료와 SK Planet API를 사용하여 구축하였다. 먼저 보행량의 대리변수인 유동인구수는 2012년 9월 기준 SK GeoVision 자료의 1일 24시간 평균 유동인구수를 사용하였다. SK GeoVision 유동인구자료는 스마트폰 GPS를 기반으로 서울시 전 지역에 대해 블록 단위로 구축이 되어있으며, 이를 동별로 합산하여 구축하였다. 그리고 총 자동차 통행량에 대해서는

SK Planet의 Tmap API를 통해 구축할 수 있는 도로혼잡도를 대리변수로 사용하였다. 도로혼잡도는 실시간으로 도로의 위계, 차선 수, 혼잡도 적용 기준속도를 바탕으로 혼잡단계를 1(원활)~4(정체)단계로 나타낸다. 도로혼잡도 API 자료의 경우 실시간 데이터만을 제공하기 때문에, 도로혼잡도는 연구시점인 2016년 3월 셋째 주 평일(2016. 03. 14. 월요일 ~ 2016. 03. 18. 금요일)자료를 한 시간 단위로 구독하여 사용하였으며, 분석에서는 통근통행 피크시간의 도로혼잡도를 고려하기 위해 8시, 18시 값의 평균값을 사용하였다. 또한, 노출변수로 가장 일반적으로 사용되어왔던 행정동별 인구수와 고용자수를 고려하였다. 마지막으로, 우리나라에서 급격하게 진행되고 있는 고령화현상과 이에 따라 최근 심각성이 커지고 있는 노인 교통사고를 고려하기 위해 인구 특성적 노출변수로 노인 인구비율을 고려하였다. 행정동의 인구수와 노인인구비율은 국가통계포털(KOSIS)에서 제공하는 주민등록인구현황자료(2013)를 사용하였으며, 고용자수는 국가통계포털의 전국사업체조사 자료(2013)를 사용하였다. 그러나 인구수와 함께 많은 선행연구에서 보행자 교통사고의 노출변수로 사용된 고용자수는 통계분석 시 다중공선성이 높아 분석에서 제외하였다.

토지이용요인으로는 주거용도 건축물 비율, 상업용도 건축물 비율, 산업용도 건축물 비율, 토지이용혼합도를 고려하였다. 하지만 주거용도 건축물 비율은 다중공선성 문제로 분석에서 제외하였다. 토지이용요인에 포함되는 변수들은 서울시 과세대장(2013)자료를 사용하여 구축하였다. 용도별 비율은 해당 용도 건축물 연면적을 전체 건축물 연면적으로 나누어 산정하였다. 용도지역면적은 평면적인 토지이용만을 고려할 수 있는 것에 비해 서울시 과세대장은 입체적인 토지이용을 고려할 수 있다는 장점이 있다. 또한 과세대장 자료는 층별로 용도 정보가 포함되어 있어 법적으로 지정된 용도기준에

대한 면적정보만 파악할 수 있는 용도지역면적에 비해 더 실사용 용도에 가까운 자료를 구축할 수 있다. 토지이용혼합도는 주거, 상업, 산업용 건물 연면적을 바탕으로 Frank et al.(2004)의 연구에서 사용한 엔트로피지수 계산식을 사용해 산출하였다. 본 연구에서 사용한 토지이용혼합도(LUM) 계산식은 아래 식(6)과 같다.

$$LUM = (-1) \times \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i / \ln(n) \dots\dots\dots(6)$$

여기서, p_i 는 용도별 건축물 합에 대한 용도별 건축물 연면적의 비율, n 은 용도개수를 뜻한다. 본 연구에서는 주거용도, 상업용도, 산업용도 건축물 연면적을 사용하여 토지이용혼합도를 계산하였다.

도로 및 교차로 요인으로는 평균 자동차 제한속도와 평균 차로 수, 교차로 밀도, 교차로수당 도로연장을 사용하였다. 먼저, 평균 자동차 제한속도와 평균 차로 수는 한국 교통연구원에서 제공하는 교통주제도의 도로망 자료(2013)의 도로 세그먼트(segment) 별 자료를 사용하였다. 행정동의 평균값을 구하기 위해 행정동에 속한 도로 세그먼트의 길이를 각 세그먼트의 제한속도 혹은 차로 수와 곱해 합산한 다음 총 도로 연장으로 다시 나뉘는 방식으로 변수를 산출하였다. 교차로 밀도와 교차로수당 도로연장 변수는 서울시 새주소사업DB를 기준으로 구축하였다. 교차로 밀도는 행정동에 포함된 도로 세그먼트 교차점의 개수를 행정동의 시가화면적으로 나누어서 산출하였다. 행정동의 시가화면적은 행정동 면적에서 50만 m^2 이상의 자연녹지지역과 강면적을 제외하고 구하였다. 교차로수당 도로연장은 행정동에 포함된 도로 세그먼트 길이의 총 합을 교차로 개수로 나누는 방식으로 산정하였다.

대중교통 요인 변수로는 버스정류장 개수, 중앙버스전용차로 정류장 비율, 지하철 입구 개수를 사용하였다. 버스 정류장 개수, 지하철 입구 개수는

일반적인 대중교통 시설로써 기존 선행연구에서는 유동인구수의 대리변수 중 하나로 사용되었다. 하지만 본 연구에서는 유동인구수를 통제했기 때문에 두 변수를 통해 수단선택의 다양성이 보행자 교통사고에 미치는 영향을 보고자 하였다. 중앙버스전용차로 정류장 비율은 중앙버스전용차로 정류장 개수를 총 버스정류장 개수로 나눈 값이다. 김진태 외(2014)의 연구에서 버스 중앙차선 보행안전 측면에서 정류장의 위험성을 강조한 데 반해, 행정동 단위의 보행안전에 미치는 영향을 분석한 선행연구는 매우 부족한 상태이기 때문에 변수로 추가하였다.

IV. 분석결과

1. 기술통계 분석

본 연구에서 사용한 변수에 대한 기술 통계분석의 결과는 아래 표 3과 같다. 변수는 종속변수, 교통사고 노출변수, 도로 네트워크 구조요인, 토지이용 요인, 도로 및 교차로 요인, 대중교통 시설 요인으로 구분하였다. 모형의 다중공선성을 진단할 수

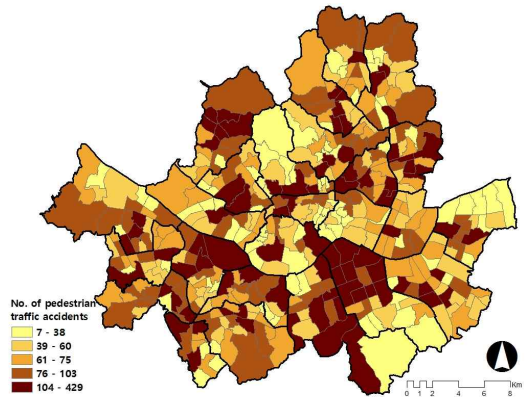


그림 2. 서울시 행정동별 보행자 교통사고 건수 분포 (2012~2014)
Figure 2. Spatial distribution of pedestrian traffic accidents by administrative Dong in Seoul (2012~2014)

있는 VIF 값이 5 이상인 변수들은 다중공선성이 있다고 보고 분석에서 제외하였다. 먼저 동별 종속 변수인 전체 보행자 교통사고 건수의 평균값은 77.2건으로 나타났다. 그림2는 서울시 행정동별 보행자 교통사고(2012~2014) 건수의 분포이다. 보행자 교통사고 건수가 가장 많은 행정동은 역삼1동으로 3년간 429건의 보행자 교통사고가 발생하였다. 가장 보행자 교통사고 빈도가 낮은 행정동은 창신3동으로 3년간 7건의 보행자 교통사고가 발생하였다. 생활권 도로에서 일어난 보행자 교통사고가 동별 평균 46.6건, 생활권 외 도로에서 일어난 사고가 동별 평균 30.6으로 나타나 생활권에서 일어나는 보행자 교통사고가 약 1.5배 정도 더 많은 것으로 파악되었다.

행정동별 1일 유동인구수는 최솟값이 22,343명, 최댓값이 2,144,666명으로 그 차이가 큰 것으로 파악되었으며, 평균값은 248,907명인 것으로 나타났다. 평균 도로혼잡도의 경우 최솟값이 1.13, 최댓값이 3.26로 평균적으로 2.24의 혼잡도를 보였다. 혼잡도가 가장 낮은 지역은 청림동, 가장 높은 지역은 황학동으로 나타났다.

토지이용혼합도의 평균은 0.64로 나타났다. 도로 및 교차로 요인에 해당하는 평균 제한속도의 평균은 43.94km/h, 평균 차로 수는 3.51개, 교차로 밀도는 10,000m²당 3.86개, 행정동 교차로수당 도로연장은 97m로 나타났다. 지하철 입구 개수는 평균 3.2개로 나타났으며, 가장 많이 위치하고 있는 행정동은 종로 1, 2, 3, 4가 동으로 27개의 지하철 입구가 있는 것으로 나타났다. 지하철 입구가 없는 행정동은 고척 1동과 신월 7동을 포함한 170개 동으로 나타났다. 또한, 평균 버스정류장개수는 25.79개이고, 평균적으로 그 중 약 3.6%가 중앙버스 전용 차로 정류장 인 것으로 나타났다. 교통안전 시설 및 제도 요인에 해당하는 변수들의 경우 과속 방지턱 개수의 행정동 평균은 22.39개, 평균 횡단보도 개수는 75.49개, 육교의 경우 평균 0.37개, 어린이 보호구역의 경우 평균 2.84개로 나타났다.

도로 네트워크 구조요인 중 평균 최단거리는 평균 12.38으로 나타났다. 평균 최단거리 최댓값은 27.89로 유기적 도로 네트워크를 가지는 대표적 행정동 중 하나인 우이동에 해당한다. 네트워크 매개 중심성의 평균은 0.12, 평균 군집화계수는 0.52로

그림 3. 도로 네트워크의 유형 예시
Figure 3. Examples of road network

Type	A	B	C	D
Road network structure				
Dong	여의도동 Yeoui dong	논현2동 Nonhyeon2 dong	신길6동 Singil6 dong	불광1동 Bulgwang1 dong
Network indices	Geo. distance: 7.043 Bet. centrality: 0.098 Clust. coeff.: 0.387	Geo. distance: 12.575 Bet. centrality: 0.144 Clust. coeff.: 0.418	Geo. distance: 16.888 Bet. centrality: 0.168 Clust. coeff.: 0.514	Geo. distance: 18.987 Bet. centrality: 0.224 Clust. coeff.: 0.563

표 3. 기술통계 분석 결과
Table 3. Results of descriptive analysis

Variables		Obs.	Mean	Std. Dev.	Min.	Max.	VIF
종속변수 Depend. variable	전체 보행자 교통사고 건수 No. of total pedestrian traffic accidents	423	77.23	51.62	7.00	429.00	-
	생활권 도로(12m 이하) 사고 건수 No. of pedestrian traffic accidents on community living zone road less than 12m width	423	46.62	32.07	3.00	261.00	-
	생활권 도로 외(12m 이상) 사고 건수 No. of total pedestrian traffic accidents on non-community living zone road greater than 12m width	423	30.61	24.34	1.00	193.00	-
교통사고 노출변수 Exposure variables	인구수 Population (1,000 people)	423	23.98	9.26	1.34	56.75	3.15
	노인인구 비율 Senior population (%)	423	0.12	0.03	0.06	0.22	2.09
	유동인구수 Pedestrian volume (1,000 people/day)	423	248.91	198.29	22.34	2144.67	2.78
	평균 도로혼잡도 Average level of road congestion	423	2.24	0.39	1.13	3.26	1.14
도로 네트워크 구조요인 Road network structure indices	평균 최단경로거리 Average geodesic distance	423	12.38	4.24	2.07	27.89	1.40
	네트워크 매개중심성 Network betweenness centrality	423	0.12	0.04	0.05	0.29	1.95
	평균 군집화계수 Average clustering coefficient	423	0.52	0.05	0.39	0.81	4.13
토지이용 요인 Land use factor	상업시설 연면적 비율 Commercial use floor area ratio(%)	423	0.31	0.15	0.04	0.88	3.29
	산업시설 연면적 비율 Industrial use floor area ratio(%)	423	0.05	0.07	0.00	0.63	1.96
	토지이용혼합도 Land use mix (Entropy index)	423	0.64	0.15	0.15	0.99	2.51
도로 및 교차로 요인 Road and intersection factor	평균 제한속도 Average speed limit (km/h)	423	43.94	5.68	30.00	59.79	2.10
	평균 차로 수 Average no. of lanes	423	3.51	0.87	1.85	8.17	2.29
	교차로 밀도 Intersection density (unit/10,000m ²)	423	3.86	2.72	0.05	13.28	3.21
	교차로수당 도로연장(100m) Road length per no. of intersection (100m)	423	0.97	0.94	0.35	10.25	2.36
대중교통 시설 요인 Transit infrast. factor	지하철 입구 개수 No. of subway entrances	423	3.20	4.21	0.00	27.00	1.69
	버스정류장 개수 No. of bus stops	423	25.79	14.57	2.00	90.00	2.41
	중앙 버스전용차로 정류장 비율 Percent (%) of median exclusive bus stops to all bus stops	423	0.04	0.07	0.00	0.56	1.16
교통안전시설 및 제도 요인 Traffic safety factor	과속방지턱 개수 No. of humps	423	22.39	17.68	0.00	122.00	1.39
	횡단보도 개수 No. of crosswalks	423	75.49	48.41	4.00	359.00	4.13
	육교 개수 No. of pedestrian bridges	423	0.37	0.71	0.00	5.00	1.13
	어린이보호구역 개수 No. of school zone	423	2.84	1.88	0.00	11.00	1.28

나타났다. 상업시설 연면적 비율값의 최솟값은 0.04로 개포1동이 이에 해당하고, 최댓값은 0.879의 을지로동으로, 전체평균값은 0.313으로 나타났다. 아래 그림3은 본 연구에서 사용한 행정동의 도로 네트워크 구조의 예시와 네트워크 지표들이다. 유형A 예시인 여의도동은 전형적인 격자형 도로 구조이고, 유형D 예시인 불광1동으로 갈수록 점차 유기적인 도로 구조를 나타낸다고 할 수 있다. 이에 따라, 유형A는 최단경로거리 7.043, 매개중심성 0.098, 군집화계수 0.387으로 세 지표 모두 비교적 낮은 값을 보이는 반면, 유형D로 갈수록 네트워크 구조 지표들의 값이 증가하여 유형D는 최단경로거리 18.987, 매개중심성 0.224, 군집화계수 0.563을 나타내는 것을 확인 할 수 있다.

2. 음이항 회귀분석

음이항 회귀분석의 결과는 아래 표 4와 같다. 음이항 회귀모형의 경우 포아송 모형과 비교해 평균이 분산보다 큰, 과분산된 자료를 분석할 수 있다는 장점을 가진다. 이 조건은 과분산 계수 α 값을 통해서 알 수 있다. α 값이 0일 경우 분산과 평균이 같음을 의미하며, 이러한 경우에는 포아송 회귀분석을 사용하는 것이 합당하다. 본 연구의 모델의 경우 세 모델 모두 α 값이 0보다 크게 도출되었다. 또한, 우도비 검정을 통해 α 값의 유의성을 검정한 결과, $\text{prob} > \chi^2$ 값이 0.00으로 α 값이 유의한 것을 확인하였다. 본 연구에서는 세 가지 모형을 분석했으며, 모형1은 전체 보행자 교통사고를 종속변수로 하였고, 모형2는 생활권 도로(도로폭 12m 미만)에서 일어난 보행자 교통사고를, 모형3은 주요 도로(도로폭 12m 이상)에서 일어난 보행자 교통사고를 종속변수로 하였다.

보행자 교통사고 노출변수에 속한 변수 중 행정동별 인구수, 유동인구수, 평균 도로혼잡도는 모든 모형에서 유의한 것으로 나타났다. 선행연구에서 가장 일반적으로 사용되었던 행정동별 인구수는 세 개 모형 모두에서 가장 유의하게 보행자 교통사고와 양(+의) 관계를 나타내는 변수로 나타났다. 또한, 본 연구에서 보행량과 교통량의 대리변수로써 새롭게 사용한 스마트폰 GPS기반 유동인구수와 평균 도로혼잡도의 경우에도 세 모형 모두에서 보행자 교통사고와 유의한 양(+의) 관계를 가지는 것으로 나타나 보행량과 교통량을 잘 대리한 것으로 판단할 수 있다. 반면, 노인인구 비율의 경우 모형1과 모형2에서는 유의하지 않게 나타났으며, 주요 도로에서 발생한 보행자 교통사고를 종속변수로 하는 모형3에서는 95% 신뢰수준에서 유의한 관계를 가졌다.

도로 네트워크 구조요인의 경우, 평균 최단경로 거리는 모형1과 모형2에서 99% 신뢰수준으로 보행자 교통사고 건수와 양의관계를 나타냈다. 이는 평균 최단경로거리가 높다는 것이 네트워크 내에서 최단거리로 이동시 평균적으로 거치는 교차로 개수가 많을 것을 나타내, 차대 보행자 동선 상충의 증가를 의미하기 때문으로 해석할 수 있다. 네트워크 매개중심성은 모형1과 모형2에서 99% 신뢰수준으로 보행자 교통사고와 음(-)의 관계를 가지는 것을 확인하였다. 네트워크 매개중심성이 높다는 것은 특정 도로에 교통량이 집중되는 경향이 강하다는 것을 나타낸다. 이는 네트워크의 보행자교통안전관리의 용이성이 높다는 것을 뜻하기 때문에 보행자 교통사고와 음(-)의 상관관계를 가지는 것으로 해석할 수 있다. 평균 군집화계수의 경우에는 생활권 도로 보행자 교통사고를 다룬 모형2에서 90% 신뢰수준으로 보행자 교통사고와 음(-)의 상관관계를 가지는 것을 확인하였다. 이는 평균 군집화계수가 높은 지역의 경우에는 네트워크 내 하위 네트워크

표 4. 보행자 교통사고 음이항 회귀 분석 결과

Table 4. Results of negative binomial regression analysis for pedestrian traffic accidents

독립변수 Independent variables		Model1		Model2		Model3	
		전체 보행자 교통사고 Total		생활권 도로 보행자 교통 사고 Community road		비생활권 도로 보행자 교통사고 Non-community road	
		coef.	z	coef.	z	coef.	z
Exposure variables	인구수 Population	0.033***	11.31	0.037***	10.06	0.026***	6.23
	노인인구 비율 Senior pop. ratio	1.380	1.61	0.566	0.52	2.423**	1.97
	유동인구수 Pedestrian volume	0.001***	6.15	0.001***	4.99	0.001***	4.33
	평균 도로혼잡도 Average level of road congestion	0.145***	3.44	0.122**	2.35	0.199***	3.19
Road network structure indices	평균 최단경로거리 Average geodesic distance	0.020***	2.73	0.026***	2.91	0.012	1.15
	네트워크 매개중심성 Network betweenness centrality	-1.126***	-2.83	-1.340***	-2.66	-0.713	-1.25
	평균 군집화계수 Average clustering coefficient	-0.328	-0.80	-0.882*	-1.73	0.871	1.43
Land use factor	상업시설 연면적 비율 Commercial use floor area ratio	1.544***	8.55	1.698***	7.41	1.212***	4.75
	산업시설 연면적 비율 Industrial use floor area ratio	0.158	0.52	0.188	0.49	0.043	0.10
	토지이용혼합도 Land use mix	0.235	1.49	0.172	0.87	0.357	1.60
Road and intersect. factor	평균 제한속도 Average speed limit	0.001	0.24	0.001	0.29	0.002	0.37
	평균 차로수 Average no. of lanes	0.015	0.57	-0.096***	-2.98	0.198***	5.11
	교차로 밀도 Intersection density	0.015	1.52	0.004	0.34	0.026*	1.88
Transit infra. factor	교차로수당 도로연장 Road length per no. of intersection	0.003	0.11	0.011	0.34	-0.021	-0.58
	지하철 입구 개수 No. of subway entrances	0.010**	2.17	0.009	1.62	0.011*	1.65
	버스정류장 개수 No. of bus stops	0.001	0.63	-0.002	-0.79	0.005**	2.03
Traffic safety factor	중앙 버스전용차로 정류장 비율 Percent of median exclusive bus stops	0.732***	3.23	0.454	1.59	1.120***	3.43
	과속방지턱 개수 No. of humps	0.000	0.38	0.001	1.14	-0.002	-1.19
	횡단보도 개수 No. of crosswalks	-0.001	-0.92	-0.001*	-1.66	0.001	1.01
	육교 개수 No. of pedestrian bridges	-0.023	-1.03	-0.031	-1.09	-0.001	-0.03
	어린이보호구역 개수 No. of school zone	-0.009	-1.00	-0.013	-1.22	-0.001	-0.08
constant		1.992***	6.69	2.292***	6.20	-0.524	-1.19
Number of observation		423		423		423	
alpha(α)		0.08		0.12		0.15	
chibar2		574.38		425.89		434.46	
prob>=chibar2		0.000		0.000		0.000	
Log likelihood		-1870.98		-1749.01		-1612.98	
AIC		3787.95		3544.02		3271.95	
BIC		3881.04		3637.11		3365.04	

*p<0.1, **p<0.05, ***p<0.01

가 강하게 형성되어있어 통과교통이 배제되기 때문으로 해석할 수 있다. 반면, 주요 도로 보행자 교통사고를 다룬 모형3에서는 세 가지 네트워크 변수가 모두 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다.

토지이용 요인에서는 상업시설 연면적 비율만이 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는, 상업시설의 이용을 위한 자동차의 잦은 건물진출입으로 인해 보행자와의 충돌기회가 잠재적으로 증가하기 때문으로 해석할 수 있다.

도로 및 교차로 요인에서는 평균 차로수와 교차로 밀도가 유의한 변수로 확인되었다. 평균 차로수는 전체 사고 모형에서는 유의하지 않았고, 생활권 도로 사고에는 음(-)의 영향을, 주요 도로 보행자 사고에는 양(+)의 영향을 나타냈다. 이는, 종속 변수를 구분함에 있어 차로 수에 영향을 받는 도로 폭을 기준으로 했기 때문으로 보인다. 교차로 밀도의 경우 모형3에서 보행자 교통사고와 양(+)의 관계를 보였고, 모형1과 모형2에서는 유의하지 않게 나타났다. 교차로는 차와 보행자의 동선이 상충하는 공간이다. 따라서 교차로의 밀도가 높다는 것은 단위 면적에서 차와 보행자의 충돌기회가 많다는 것을 뜻하며, 사고 위험성이 높다는 것을 뜻한다.

대중교통 시설 요인 중 지하철 입구개수와 중앙버스전용차로 정류장 비율은 모형1과 모형3에서, 버스정류장 개수는 모형3에서 보행자 교통사고와 유의한 양(+)의 관계를 가지는 것을 확인하였다. 반면 모형2에서는 대중교통시설요인 중 유의한 변수가 없어, 생활권 도로 내에서 일어나는 보행자 교통사고는 대중교통 시설과 유의한 관계를 나타내지 않는 것으로 확인되었다. 이는 대중교통시설이 일반적으로 주요 도로에 접하여 위치하고 있기 때문으로 보인다. 중앙 버스전용차로 정류장 비율 변수는 모형1과 모형3에서 99% 신뢰수준에서 유의하여, 대중교통시설 변수 중 가장 유의한 변수로 나타났다. 이는 중앙 버스전용차선 주변의 보행자 교통사

고 방지를 위한 대책의 수립이 필요함을 의미한다.

마지막으로, 교통안전 시설 및 제도 요인에서는 횡단보도 개수가 생활권 도로 보행자 교통사고 건수를 다룬 모형2에서 90% 신뢰수준에서 보행자 교통사고와 유의한 음(-)의 관계를 가지는 것으로 나타나, 생활권 도로에서 횡단보도의 보행자안전 제고 효과를 확인할 수 있었다. 반면, 과속 방지턱, 육교, 그리고 어린이 보호구역의 개수는 세 모형 모두에서 보행자 교통사고와 통계적으로 유의한 상관관계를 나타내지 않았다.

V. 결론

본 연구는 도로공단 교통사고분석시스템(TAAS)의 2012~2014년 서울시 교통사고 자료를 이용하여 행정동 단위로 도로 네트워크 구조 지표를 포함해 보행자 교통사고에 영향을 미치는 근린환경 특성을 분석하였다. 근린단위에서 객관화된 도로 네트워크 구조와 보행사고 사이의 관계를 알아보았다는 점, 유동인구와 같은 교통사고 노출변수의 고려 및 일반화 가능한 표본 확보 등 기존의 보행자 관련 교통사고에 대한 국내연구의 한계점을 보완했다는 점에서 의의가 있다. 또한, 네트워크 구조가 생활권에서 통과교통을 배제하고, 이에 따라 생활권 내의 보행자 교통안전이 제고되는지를 실증하기 위해 도로폭을 기준으로 12m 미만을 생활권 도로로 보고, 생활권 도로에서 일어난 교통사고와 생활권 외 도로에서 일어난 교통사고를 나누어 분석하였다는 점에서 차별성을 가진다.

본 연구는 분석모형으로 과분산 가산 데이터를 분석할 수 있는 음이항 회귀분석을 사용하여 보행자 교통사고와 도로 네트워크 구조, 토지이용, 도로 및 교차로 특성, 대중교통시설 등 근린환경 변수들 사이의 관계에 대해서 분석하였다. 분석결과를 바탕

으로 이끌어낸 결론과 정책적 시사점은 다음과 같이 세 가지로 정리할 수 있다.

첫째, 도로 네트워크 구조 요인 중 네트워크 매개 중심성은 모형2에서, 평균근집화계수는 모형1과 모형2에서 보행자 교통사고와 유의한 음(-)의 상관관계를 보였다. 이는 도로 네트워크 구조가 부정형에 가까울수록 도로 구조의 복잡성이 증가하고, 이로 인해 생활권에서의 통과교통이 배제되어 생활권 내 보행자 교통사고가 감소한다는 선행연구의 주장과도 일치하는 결과이다(Zhang et al., 2015). 반면, 네트워크 내 최단거리 이동시 통과하는 평균 교차로 개수를 나타내는 평균 최단경로거리는 모형1과 모형2에서 보행자 교통사고와 양(+)의 관계를 나타냈다. 분석 결과를 통해, 유기적 도로구조가 근린의 통과교통을 배제하여 근린의 교통안전을 제고하고, 네트워크의 교통량분배에 위계가 뚜렷하여 교통안전관리를 용이하게 하는 등 보행자 교통안전 측면에서 긍정적인 영향을 가지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 동시에 차량의 교차로 통과횟수를 증가시켜 차와 보행자 동선의 상충을 잠재적으로 증가시키는 등 부정적인 영향도 있음을 알 수 있다. 따라서 보행기반 생활권에 해당하는 근린의 설계와 재생, 그리고 보행자 교통안전 대책마련에 있어 이러한 도로 네트워크 구조의 특성을 종합적으로 고려하여야 할 것으로 판단된다. 추가적으로, 평균 통과 교차로 개수를 나타내는 평균 경로거리가 증가할수록 상충하는 방향의 차량과 보행자들 때문에 운전자가 더 신경 쓰게 되고, 교차로 회전 시 시야 거리 제한으로 인해 속도를 줄이게 된다는 Zhang et al.(2015)의 연구를 고려해 볼 때, 사고 심각도를 함께 고려하는 추가적인 연구가 필요하다고 할 수 있다.

둘째, 보행자 교통사고의 노출변수로써 고려한 변수인 인구수, 스마트폰 GPS 기반 이동인구수, 도로혼잡도 변수는 모든 모형에서 매우 유의한 양(+)의 관계를 나타냈다. 이를 통해, 세 변수가 보행자

교통사고에 있어 노출변수가 되는 보행량과 교통량의 대리변수로 적절하다는 것을 확인하였다. 따라서 향후 연구에서 자료의 구득이 제한되는 보행량과 교통량 변수를 대리함으로써 다른 독립변수들이 보행자 교통사고 노출변수의 대리변수로써 가지는 영향력을 통제하고, 보행자 교통사고에 미치는 직접적인 영향을 파악할 수 있을 것으로 보인다.

셋째, 대중교통 시설 요인들 중에서는 지하철 입구 개수와 중앙버스전용차로 정류장 비율은 모형1과 모형3에서, 버스정류장개수는 모형3에서 보행자 교통사고와 유의한 양(+)의 관계를 가지는 것으로 나타났다. 이는 대부분의 대중교통시설이 주요 도로에 접해있기 때문으로 해석할 수 있다. 중앙버스전용차로 정류장 비율은 모형1과 모형3에서 99% 수준으로 유의하게 나타나, 대중교통 시설 요인들 중 가장 유의도가 큰 변수로 나타났다. 이는 차량과 보행자의 충돌 기회에 대한 측면에서 봤을 때, 보행자들이 횡단보도를 건너지 않아도 이용 가능한 일반 버스정류장과는 달리, 중앙 버스전용차로 정류장은 모든 보행자가 횡단보도를 건너야 이용할 수 있고, 이에 따라 잠재적 보행자 교통사고 위험이 증가하는 것으로 해석할 수 있다. 또한, 중앙버스전용차로는 주로 간선도로에 설치되기 때문에 다른 사고들에 비해 사고의 심각도도 클 것으로 예상된다. 지하철, 일반 버스정류장 및 중앙 버스정류장과 같은 대중교통 시설은 도시민들의 기본적인 이동성을 보장하고 수단선택의 다양성을 늘려 편의를 증진시키는 주요 공공시설이다. 하지만, 분석결과와 같이 보행자의 안전에 있어 위험요인으로 작용할 수 있다는 것은 주요한 시사점이라 판단되며, 이에 따라 대중교통 시설 주변에 보행자를 보호하기 위한 안전대책을 강화해야 할 것으로 보인다.

본 연구는 이와 같은 차별성과 시사점을 가지고 있음과 동시에 아래와 같은 한계점이 있다. 먼저, 본 연구에서 보행자 교통사고의 노출변수로써 고려

한 스마트폰 GPS 기반 이동인구수 자료(SK GeoVision)는 SK 통신사의 스마트폰 가입자 정보만을 반영할 수 있다는 한계를 가진다. 미래창조과학부의 유무선 가입자 통계현황(2012. 9월)에 따르면, 사용한 자료의 시점인 2012년 9월을 기준으로 SK 통신사의 스마트폰 가입자 수는 1,500 만 명으로 전체 가입자 수의 48.8%로 해당 자료가 전체 이동인구를 완전히 대리한다고 보기에는 한계가 있다. 또한, 스마트폰의 사용률이 낮은 고령층의 이동인구의 반영에도 한계를 가질 것으로 판단된다. 다음으로, 도로 네트워크 구조의 파악을 위해 분석 단위를 행정동 단위로 설정하여 연구를 진행하였기 때문에 교통사고의 운전자·보행자의 개인 특성 및 사고 일시, 날씨, 사고 원인 등 사고 특성을 반영하지 못하였다는 한계를 가진다. 또한, 행정동 단위의 변수 구축을 위해 차로 수, 제한속도 등의 변수에 대해 행정동 단위의 평균값을 대푯값으로 사용하였기 때문에, 개별 사고 혹은 특정 도로에서 일어난 사고에 본 연구의 결과를 적용함에 있어 생태학적 오류(ecological fallacy)의 가능성이 존재한다. 마지막으로, 본 연구는 도로 네트워크 구조와 보행자 교통사고의 심각도 간의 관계에 대해서는 다루지 못하였다. 향후 연구에서는 보행자 교통사고 전체에서 나아가 근린지역의 도로 네트워크 구조가 사망, 중상, 경상과 같은 사고심각도에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다. 또한, 보행자 교통사고 당사자의 인구 및 사회경제적 특성과 보행자 교통사고 발생 지점에 대한 시간적, 공간적 특성에 대한 심도 있는 연구가 필요하다고 판단된다.

인용문헌
Reference

1. 김진태·김준용·배현식·이동일, 2014. “중앙버스 전용차로 횡단보도 보행안전 확보방안 연구 - 무단횡단 억제시설 설치를 중심으로”, 「교통연구」, 21(2): 13-26.
2. 김, J. T., Kim, J. Y., Bae, H. S. and Lee, D. I., 2014. “A Study on Safety Enhancement of Pedestrians Crossing on an Exclusive Median Bus Corridor - Device Discouraging Illegal Crossing on Signalized Pedestrian Crossings”, *Journal of Transport Research*, 21(2), 13-26.
3. 경찰청, 2015. 「2015년판 교통사고 통계」, 서울. Korean National Police Agency., 2015. *2015 Traffic Accident Chart*, Seoul
4. 박승훈, 2014. “근린환경이 보행자-차량 충돌 사고에 미치는 영향 - 북미 워싱턴 주 시애틀 도시를 대상으로”, 「국토계획」, 49(3): 143-157.
5. Park, S. H., 2014. “The Effect of the Neighborhood Built Environment on Pedestrian-Vehicle Collisions - Focused on the Cases of the City of Seattle, Washington, U.S.”, *Journal of Korea Planning Association*, 49(3), 143-157.
6. 박정순, 2011. “신호교차로의 횡단보행자 사고 심각도 분석”, 「지역정책연구」, 22(1): 1-12.
7. Park, J. S., 2011. “Severity Analysis of the Vehicle-Pedestrian crashes at Signalized Intersection”, *Regional Policy Research*, 22(1), 1-12.
8. 박준태·최병부·이수범, 2010. “지방부 도로 고령 보행자 사고 특성분석연구”, 「대한교통학회지」, 28(5): 155-162.
9. Park, J. T., Choi, B. B. and Lee, S. B., 2010. “A Study on the Characteristics of Traffic Accidents for the Elderly Pedestrians on Rural Highways”, *Journal of Korean Society of Transportation*, 28(5): 155-162.
10. 서지민·이수기, 2016. “서울시 보행자 교통사고에 영향을 미치는 물리적 환경요인에 관한 연구 - 2014 TAAS 자료를 중심으로”, 「국

- 토계획」, 51(3): 197-216.
- Seo, J. and Lee, S., 2016. "A Study on the Physical Environmental Factors Influencing Pedestrian Traffic Accidents in Seoul, Korea : Focused on the 2014 TAAS Data", *Journal of Korean Society of Transportation*, 51(3): 197-216.
7. 손동원, 2002. 「사회 네트워크 분석」, 서울: 경문사.
- Sohn, D. W., 2002. *Social Network Analysis*, Seoul: Kyungmoonsa.
8. 유치선·이수기, 2015. "근린환경, 사회적 자본, 그리고 커뮤니티의 사회적 지속가능성: 인과관계에 관한 탐색적 연구", 「국토계획」, 50(7): 5-23.
- Yoo, C. S. and Lee, S., 2015. "Neighborhood Environment, Social Capital, and Social Sustainability of Community: Explanatory Study on Causal Relationships", *Journal of Korea Planning Association*, 50(7): 5-23.
9. 이수범·김명숙·장일준·김장욱, 2009. "교통섬 설치와 보행자 교통사고에 미치는 영향 연구", 「대한교통학회지」, 27(2): 107-115.
- Lee, S. B., Kim, M. S., Jang, I. J. and Kim, J. W., 2009. "The Influence of Traffic Islands on Pedestrian Safety", *Journal of Korean Society of Transportation*, 27(2): 107-115.
10. 이수상, 2012. 「네트워크 분석 방법론」, 서울: 논형.
- Lee, S. S., 2012. *Network Analysis Methods*, Seoul: Nonhyung Publishing.
11. 이세영·이제승, 2014. "어린이·노인 보행자 교통안전을 위한 근린환경요인", 「한국도시계획학회지」, 15(6): 5-15.
- Lee, S. Y. and Lee, J. S., 2014. "Neighborhood Environmental Factors Affecting Child and Old Adult Pedestrian Accident", *Journal of the Urban Design Institute of Korea Urban Design*, 15(6): 5-15.
12. 이승주·김윤환·박병호, 2014. "토빗모형을 이용한 가로구간 보행자 사고모형 개발", 「한국도로학회논문집」, 16(3): 101-107.
- Lee, S. J., Kim, Y. H. and Park, B. H., 2014. "Developing the Pedestrian Accident Models Using Tobit Model", *International Journal of Highway Engineering*, 16(3), 101-107.
13. 임유진·문학룡·강원평, 2014. "폭원 9m 미만 도로 내 교통사고 영향 요인 분석", 「한국 ITS 학회논문지」, 13(3): 96-106.
- Lim, Y. J., Moon, H. R. and Kang W. P., 2014. "Analysis on Factors of Traffic Accident on Roads having Width of Less than 9 Meters", *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, 13(3): 96-106.
14. 최세로나·정은비·오철, 2013. "보행자-차량 충돌사고 특성분석 방법론 비교 연구", 「대한교통학회지」, 31(6): 53-66.
- Choi, S., Jeong, E. and Oh, C., 2013. "Comparison of Methodologies for Characterizing Pedestrian-Vehicle Collisions", *Journal of Korean Society of Transportation*, 31(6): 53-66.
15. Delmelle, E. C., Thill, J. C. and Ha, H. H., 2012. "Spatial Epidemiologic Analysis of Relative Collision Risk Factors among Urban Bicyclists and Pedestrians", *Transportation*, 39(2): 433-448.
16. Dumbaugh, E. and Li, W., 2010. "Designing for the Safety of Pedestrians, Cyclists, and Motorists in Urban Environments", *Journal of the American Planning Association*, 77(1): 69-88.
17. Dumbaugh, E. and Rae, R., 2009. "Safe Urban Form: Revisiting the Relationship between Community Design and Traffic Safety", *Journal of the American Planning Association*, 75(3): 309-329.

18. Frank, L. D., Andresen, M. A. and Schmid, T. L., 2004. "Obesity Relationships with Community Design, Physical Activity, and Time Spent in Cars", *American Journal of Preventive Medicine*, 27(2): 87-96.
19. Freeman, L. C., 1977. "A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness", *Sociometry*, 35-41.
20. Freeman, L. C., 1978. "Centrality in Social Networks Conceptual Clarification", *Social Networks*, 1(3): 215-239.
21. Freiria, S., Ribeiro, B. and Tavares, A. O., 2015. "Understanding Road Network Dynamics: Link-based Topological Patterns", *Journal of Transport Geography*, 46: 55-66.
22. Ha, H. H. and Thill, J. C., 2011. "Analysis of Traffic Hazard Intensity: A Spatial Epidemiology Case Study of Urban Pedestrians", *Computers, Environment and Urban Systems*, 35(3): 230-240.
23. Hadayeghi, A., Shalaby, A. S. and Persaud, B. N., 2010. "Development of Planning Level Transportation Safety Tools Using Geographically Weighted Poisson Regression", *Accident Analysis & Prevention*, 42(2): 676-688.
24. Hanneman, R. A. and Riddle, M., 2005. *Introduction to Social Network Methods*, Riverside, CA: University of California, Riverside.
25. Li, Z., Wang, W., Liu, P., Bigham, J. M. and Ragland, D. R., 2013. "Using Geographically Weighted Poisson Regression for County-level Crash Modeling in California", *Safety Science*, 58: 89-97.
26. Marshall, W. E. and Garrick, N. W., 2011. "Does Street Network Design Affect Traffic Safety?", *Accident Analysis & Prevention*, 43(3): 769-781.
27. Masucci, A. P., Stanilov, K. and Batty, M., 2014. "Exploring the Evolution of London's Street Network in the Information Space: A Dual Approach", *Physical Review E*, 89(1): 012805.
28. Perry, C., 1929. "The Neighborhood Unit", Larice, M. and Macdonald, E.(eds.), *The Urban Design Reader*, 54-65: Routledge Urban Reader Series.
29. Porta, S., Crucitti, P. and Latora, V., 2006. "The Network Analysis of Urban Streets: A Primal Approach", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 33(5): 705-725.
30. Porta, S., Crucitti, P. and Latora, V., 2006. "The Network Analysis of Urban Streets: A Dual Approach", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 369(2): 853-866.
31. Ukkusuri, S., Miranda-Moreno, L. F., Ramadurai, G. and Isa-Tavarez, J., 2012. "The Role of Built Environment on Pedestrian Crash Frequency", *Safety Science*, 50(4): 1141-1151.
32. Wei, V. F. and Lovegrove, G., 2012. "Sustainable Road Safety: A New (?) Neighbourhood Road Pattern that Saves VRU Lives", *Accident Analysis & Prevention*, 44(1): 140-148.
33. Zhang, Y., Bigham, J., Li, Z., Ragland, D. and Chen, X., 2012. "Associations Between Road Network Connectivity and Pedestrian-bicyclist Accidents", In 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.
34. Zhang, Y., Bigham, J., Ragland, D. and Chen, X., 2015. "Investigating the

- Associations between Road Network Structure and Non-motorist Accidents”, *Journal of Transport Geography*, 42: 34-47.
35. Zhang, Y., Wang, X., Zeng, P. and Chen, X., 2011. “Centrality Characteristics of Road Network Patterns of Traffic Analysis Zones”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2256: 16-24.

Date Received 2016-05-15
Reviewed(1st) 2016-10-27
Date Revised 2016-12-09
Reviewed(2nd) 2017-01-02
Date Accepted 2017-01-02
Final Received 2017-01-05