pISSN: 1226-7147, eISSN: 2383-9171
https://doi.org/10.17208/jkpa.2021.10.56.5.83

Journal of Korea Planning Association Vol.56, No.5 (2021)
대한국토·도시계획학회지 「국토계획」 제56권 제5호 pp.83-96

서울시 자전거 교통사고의 물리적 환경요인 분석*

Analysis of Physical Environment Factors of Bicycle Accidents in Seoul, Korea

황선근** · 이수기***
Hwang, Sun-Geun · Lee, Sugie

Abstract

Car-dependent cities have many urban problems, such as traffic jams, air pollution, and traffic accidents. In contrast, non-motorized bicycles are a sustainable mode of transportation. During the past decade, the city of Seoul has invested heavily in bicycle infrastructures, including public bike-sharing programs and bicycle road infrastructure. However, as bicycle users have increased, bicycle accidents have increased as well. The problem of bicycle accidents can be more serious than pedestrian traffic accidents because most bicycle riders often do not wear safety equipment. Therefore, this study analyzes the physical environmental factors of bicycle accidents using the Traffic Accident Analysis System (TAAS) data (2017-2019) and suggests policy implications for the safety of bicycle users. The major physical environmental factors that affect bicycle accidents are crosswalks and three-way intersections. In addition, this study confirms that bicycle infrastructures are critical factors in bicycle accidents. The bicycle-only roads show significant associations for accidents between bicycles and cars. In contrast, the bicycle-pedestrian roads show significant associations for accidents between bicycles and pedestrians. The analysis results also show significant associations between bicycle accidents and bicycle facilities such as convenience facilities for bicycle users, incomplete bicycle roads, and trees on bicycle roads. Finally, this study discusses policy implications to improve the safety of bicycle users.

주제어 자전거 교통사고, 자전거도로, 물리적 환경요인, 공간적 자기상관, TAAS
Keywords Bicycle Accident, Bicycle Road, Physical Environment, Spatial Autocorrelation, TAAS

Ⅰ. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

도시화와 산업화는 도시공간을 자동차 중심의 도시 체계로 재편하였고 그 결과 교통체증, 교통사고, 대기오염과 같은 도시문제를 야기하였다. 이에 서울시는 시민들의 삶의 질과 교통안전을 위해 보행친화도시 조성과 공공자전거와 같은 비동력 교통수단의 확산을 위해 노력하고 있다. 그동안 일상생활 교통수단보다는 여가목적으로 많이 이용되었던 자전거가 서울시 공공자전거의 확충과 함께 출·퇴근과 같은 통근통행의 수단으로 활용이 증가하고 있다. 따라서 여가시간대를 비롯하여 출퇴근 시간대 모두 자전거 통행이 증가하게 되었고 자전거와 자동차와의 교통사고 증가에도 영향을 미치게 되었다. 최근 우리나라 전체 자전거 교통

* 이 논문은 2018년 11월 한국도시설계학회 추계학술대회에서 발표한 논문을 수정·보완한 것이며, 2020년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2020S1A5A2A01044573).
** Doctoral Student, Department of Urbn Planning & Eengineering, Hanyang University (First Author: hsg8023@naver.com)
*** Professor, Department of Urban Planning & Engineering, Hanyang University (Corresponding Author: sugielee@hanyang.ac.kr)

사고 건수는 2017년 5,659건에서 2018년 4,771건으로 감소하였다가, 2019년 5,633건으로 다시 증가하고 있는 추세이다(TAAS, 2021). 자전거 교통사고의 문제점으로는 자전거 운전자 대부분이 보호 장비를 제대로 착용하지 않고, 빠른 속도로 주행하기 때문에 사고가 발생하는 경우 중상이나 사망과 같은 심각한 사고를 초래할 수 있다는 점이다. 또한, 수도권의 경우 아직까지 대부분의 자전거 인프라가 하천이나 한강 주변으로 설치되어 있고 도시 내부의 자전거 인프라는 미비한 실정이기 때문에 자전거 안전사고의 위험이 높다고 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 도로교통공단의 Traffic Accident Analysis System(TAAS) 자전거 교통사고 데이터(2017~2019)를 활용하여 서울시 자전거 교통사고에 영향을 미치는 물리적 환경요인을 분석하였다. 분석결과를 바탕으로 향후 자전거 교통사고를 저감하기 위한 정책적 시사점을 제시하였다.

2. 연구의 방법 및 범위

본 연구의 공간적 범위는 서울시이다. 서울시는 우리나라의 수도로 인구밀도가 매우 높고, 평일뿐만 아니라 주말에도 많은 인구가 유입되는 지역이다. 또한, 2015년부터 공공자전거가 출범하면서 자전거 인프라에 관한 관심이 높아지면서 자전거 교통사고의 물리적 환경을 고려하기에 가장 적합한 도시라고 판단하였다. 분석에 활용한 공간 분석 단위는 500×500m 격자 2,155개로 설정하였다.

연구의 시간적 범위는 2017년부터 2019년 동안 발생한 서울시 자전거 교통사고의 총 3개년의 자료를 활용하였다. 3년 동안 발생한 서울시 전체 자전거사고는 4,653건으로 집계되었다. 집계된 자전거사고는 가해자나 피해자에 자전거가 포함되어 있는 모든 사고이며 본 연구에서 활용하기 위해 자전거사고 유형을 분류하였다. 자전거사고 유형으로는 자동차, 자전거, 보행자 등이 관련되어 있으며 이는 "자동차 대 자전거", "자전거 대 자동차", "자전거 대 보행자", "보행자 대 자전거"로 나눠질 수 있다.

본 연구에서는 자전거 관련 교통사고에서 가해자와 피해자의 관계에서 상대적 교통약자가 포함되어 있는 "자동차 대 자전거", "자전거 대 보행자" 사고에 집중하여 분석을 진행하였다. 전체 자전거 관련 사고 4,653건에서 "자동차 대 자전거" 사고 3,173건(68.2%)과 "자전거 대 보행자" 사고 1,090건(23.4%)을 활용하였으며, 이는 전체 자전거 관련 사고의 대부분인 91.6%를 차지하고 있다.

〈그림 1〉은 연구의 전체적인 흐름이다. 서울시 전체 500×500m 격자 개수는 2,634개이지만 자전거를 이용할 수 없는 산악지형, 한강 그리고 도로망이 없는 격자 479개는 분석에서 제외하였다. 따라서 2,155개 격자에 대한 자전거 교통사고와 물리적 환경변수를 구축하였다. 가산변수인 종속변수의 특성을 고려하여 최종 분석 모형은 음이항 회귀 모형을 활용하였다. 마지막으로 분석결과를 토대로 결론 및 정책적 시사점을 제시하였다.

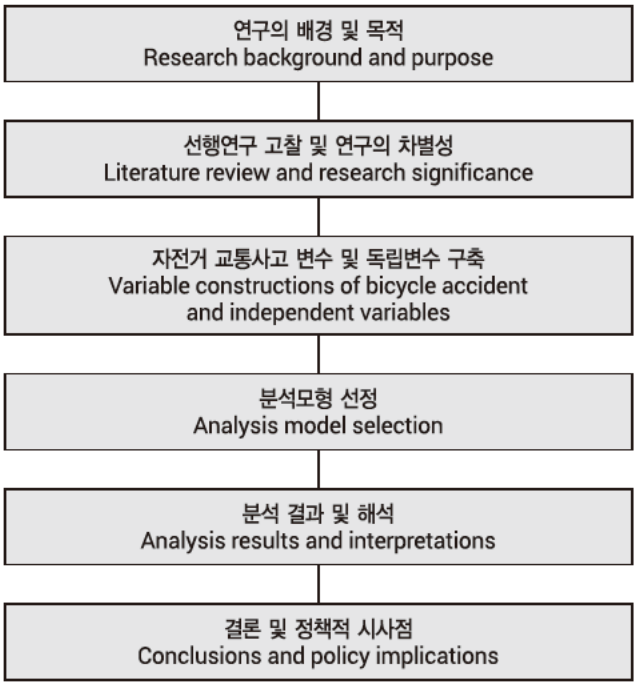

그림 1. 연구흐름
Figure 1. Research flow

II. 선행연구 고찰

본 연구의 목적은 자전거 관련 교통사고 중 사고의 대부분을 차지하고 있는 "자동차 대 자전거"와 "자전거 대 보행자" 교통사고에 영향을 미치는 물리적 환경요인을 분석하고 정책적 시사점을 제공하는 것이다. 〈표 1〉은 자전거 교통사고에 영향을 미치는 요인에 관한 선행연구를 정리한 도표이다. 본 연구는 자전거 교통사고와 밀접한 관련을 가지는 요인을 개인특성, 물리적 환경특성, 그리고 자전거 인프라 특성으로 나누어 문헌고찰을 수행하고 연구의 차별성을 도출하였다. 자전거 인프라의 경우 크게는 물리적 환경요인에 포함될 수 있으나 자전거 교통사고와 관련된 자전거 인프라의 특성과 중요성을 고려하여 구분하였다.

1. 개인 특성과 자전거 교통사고

자전거 교통사고의 선행연구들은 크게 개인특성, 물리적 환경 부문으로 구분할 수 있다. 특히, 개인특성은 자전거 교통사고의 빈도와 심각도에 밀접한 관계를 가지고 있다(〈표 1〉 참조). 이와 같은 특성 중에서 성별과 연령이 대표적 요인이다. 먼저 도시 규모별 자전거사고 피해자의 연령대를 기초통계 분석한 신희철·박재영(2012)의 연구에서는 20세 이하 어린이 및 청소년의 경우 사고 발생이 높고, 수도권에 비해 지방 소도시에서 고령의 운전자가 사고 발생률이 높아진다고 하였다. 다음으로 연령에 따른 자전거사고의 심각도를 분석한 Brown(2002)은 자전거 운전자가

표 1. 자전거 교통사고 영향요인 선행연구 고찰
Table 1. Literature review on determining factors of bicycle accidents

선행연구 Previous studies	개인특성 Personal characteristics	사고시간 Accident time	교차로 Inter-section	대중교통 Public transport	도시유형 City type	도로상황 Road condition	차량속도 Vehicle speed	통행량 Traffic volume	자전거 도로 Bicycle road
Kim et al. (2008)			○	○		○			
Kim et al. (2007)			○	○		○			
Kwon et al. (2015)									○
Shin and Park (2012)	○				○				
Oh et al. (2007)			○	○					
Lee et al. (2016)			○				○		
Boufous et al. (2012)	○			○			○		○
Brown et al. (2002)	○								
Buehler (2016)									○
Daniels et al. (2009)			○						
Teschke et al. (2016)	○			○					
Doherty et al. (2000)						○			
Harris et al. (2013)		○							
Hoque (1990)	○	○			○		○		
Johnson et al. (2013)	○	○					○		
Kaplan et al. (2015)							○		○
Kim and Kim (2015)						○	○		
Lusk et al. (2011)									○
Marqués and Herrador (2017)									○
Morrison et al. (2019)			○				○		○
Mulvaney et al. (2015)									○
Roders (1997)	○	○							
Saha et al. (2018)					○	○	○		
Wang and Nihan (2004)		○	○				○	○	

16세 이하의 어린이일 경우 성인에 비해 부상의 심각도가 더 크다고 하였다. 도로에서 발생한 자전거사고를 분석한 Johnson et al. (2013) 연구는 자전거 운전자가 남성이며, 18세 이상의 성인이고 차량의 속도가 높은 곳에서 사고가 빈번하게 발생하는 것으로 보고하였다.

추가로 연령과 사고시간이 자전거 교통사고에 미치는 영향을 분석한 연구가 있다(Hoque, 1990; Roders, 1997). 특히, Hoque(1990)의 연구는 대도시에서 사고가 발생한 시간과 사고자의 연령을 대상으로 분석하고 있다. 연구 결과로 오전 첨두시간(08:00~09:00)에 발생한 자전거 교통사고는 5~17세에서 주로 발생하고 있고, 성인의 경우에는 오후 시간(18:00~19:00)에 주로 발생한다고 하였다. 그리고 야간에 일어나는 대부분 사고의 경우 간선도로와 같이 차량의 제한속도가 높은 지역에서 발생하는 것을 밝히고 있다. 이와 비슷한 맥락에서 Roders(1997)의 연구는 야간의 경우 15세 이하의 청소년 운전자보다 25~64세의 자전거 운전자들의 사고 심각도가 2배 이상, 65세 이상의 자전거 운전자는 6~9배 이상 위험하다는 것을 밝혔다.

자전거 교통사고를 유발하는 개인특성과 관련하여 기존 선행연구에서 밝히고 있는 주요 원인은 자전거 운전자의 연령이다. 또한, 연령과 같은 개인특성과 자전거 교통사고가 일어난 시간대를 분석하고 있는 것을 알 수 있다. 이들의 연구는 자전거 교통사고 지점의 물리적 환경특성을 구체적으로 파악하지 못하는 한계점을 가지고 있다.

2. 도시 물리적 환경과 자전거 교통사고

자전거 교통사고는 지역에 형성되어 있는 물리적 환경에 따라 영향을 받을 수 있다. 물리적 환경으로는 교차로, 토지이용, 자동

차의 통행량과 속도 그리고 대중교통시설 등이 있다. 먼저 도시의 교차로에서 발생하는 자전거사고를 분석한 김도훈 외(2008) 연구는 인천광역시 사거리 교차로에서 발생한 56건의 자전거사고 자료를 다항 로지스틱모형을 활용하여 분석하였다. 연구결과로 자전거 교통사고는 도로 위계, 버스정류장의 유무, 차도의 폭 등이 영향을 미치는 변수로 나타났다. 이와 비슷한 연구로 인천광역시를 대상으로 분석한 연구에서 자동차 교통량의 증가가 자전거 교통사고에 가장 큰 영향을 미친다고 하였다(오주택 외, 2007). 추가로 부도로의 경우에는 자전거사고가 감소하는 것을 밝히고 있다.

한편, 이유식 외(2016)의 연구는 교차로에서 발생한 자전거사고를 유형별로 구분하여 자전거사고의 발생 원인을 파악하였다. 연구결과로 자동차의 진행 방향이 직진일 경우에 속도 0~50km/h에서 자전거사고가 발생하고, 자동차의 진행 방향이 좌, 우회전을 할 때는 속도가 0~30km/h일 때 사고가 발생하고 있는 것을 밝히고 있다. 다른 한편으로, 자전거를 이용하는 2,945명의 성인 운전자를 대상으로 분석한 Doherty et al.(2000)의 연구에서는 자전거사고가 도로 표면의 상태와 밀접한 관련이 있음을 보였다.

교차로에서 발생한 자전거사고 관련 연구 중 교차로와 차도를 분석한 연구가 있으며(Moore et al., 2011; Harris et al., 2013), 일반 교차로와 회전 교차로에서 발생한 자전거사고를 비교 분석한 연구가 있다(Daniels et al., 2009). 이 연구는 일반 교차로보다 회전 교차로에서 사고가 더 빈번하며 회전 교차로 중에서도 자전거의 통행이 많은 교차로의 경우 사고가 더 많이 발생한다고 하였다. 또한, Wang and Nihan(2004)의 연구는 1992년부터 1995년 사이 Tokyo의 115개 신호 교차로에서 발생한 자료를 사용하여 사고예측모형을 제시하였다. 음이항 회귀모형의 분석결과 자동차 및 자전거의 교통량, 교차로의 위치와 자동차의 속도가 자전거사고에 영향을 주는 것을 밝히고 있다.

자전거사고가 발생한 지점과 사고가 발생하지 않은 지역을 포함한 분석에서는 자전거사고에 영향을 미치는 요인으로 횡단보도와 교차로 그리고 공업지역인 경우 자전거사고가 증가하는 것을 밝히고 있으며, 반대로 버스정류장은 자전거사고에 음(-)의 영향을 미치는 것을 확인하였다(김응철 외, 2007).

도시 물리적 환경으로 도시에 형성되어 있는 트램이나 버스정류장이 자전거 교통사고에 미치는 영향을 분석한 연구(Teschke et al., 2016)도 있다. 캐나다 토론토에서 발생한 189건의 자전거사고를 분석한 결과 전체 자전거사고 중 32%가 트램과 직접적인 충돌로 인해 사고가 발생하였으며 여성 운전자의 사고가 빈번하게 발생하고 있다고 하였다. 한편 자전거사고가 빈번하게 발생하는 지역은 차량의 속도가 높고 도로의 폭의 넓이에 따라 자전거사고가 발생하는 것을 밝히고 있다(Kim & Kim, 2015). 더 나아가 자전거사고가 빈번하게 발생하는 하나의 지역이 아닌 근린 수준에서 발생하는 자전거사고의 원인을 분석한 연구가 있다. 이 연구에서는 미국 플로리다의 11,355개의 센서스 분석 단위에서 발생한 자전거사고를 분석하였으며 분석 단위 내에 인구가 많고 차량의 주행거리가 많으며 일반도로의 밀도가 높고 자전거의 이동거리가 많을수록 자전거사고에 영향을 미친다고 하였다(Saha et al., 2018).

도시의 물리적 환경이 자전거 교통사고에 영향을 분석한 대부분의 선행연구는 자전거 교통사고가 도로환경 특성, 교차로, 주변 토지이용, 대중교통 등과 밀접한 관련이 있음을 보이고 있다. 그러나 대부분의 연구는 도시 전체를 대상으로 하기보다는 교차로와 같은 특정 지역을 중심으로 분석을 진행하였고 자전거 교통사고 발생과 관련된 물리적 환경요인을 종합적으로 고려하지 못하였다. 또한, 자전거 교통사고와 밀접한 관련이 있는 노출변수인 자동차 통행량, 자전거 통행량, 보행자 유동인구 등에 대한 고려가 부족하였다.

3. 자전거 인프라 환경과 자전거 교통사고

도시의 자전거 인프라는 크게 자전거도로, 자전거 보관시설과 자전거 이용자들이 쉴 수 있는 편의시설이나 쉼터로 구분할 수 있다. 그리고 자전거도로의 경우 구체적으로 자전거 우선도로, 자전거 전용도로, 자전거-보행자 겸용도로 등으로 구분할 수 있다. 또한, 자전거 보관시설이나 편의시설은 자전거 이용자의 편의성을 향상시키고 자전거 활용을 장려할 수 있는 방안으로 볼 수 있다. 먼저 자전거도로 인프라와 자전거 교통사고와의 관계를 분석한 논문이 있다(Kaplan et al., 2015; Lusk et al., 2011; Mulvaney et al., 2015). Kaplan et al.(2015)의 연구는 코펜하겐에서 발생한 5,349건의 자전거사고를 포아송 모형을 활용하여 분석하였다. 분석결과, 자전거사고의 발생과 심각도는 자전거도로의 유무와 자전거와 차량의 속도에 따라서 영향을 미친다고 하였다. 또한, 자전거 인프라를 확장할 때에는 자전거 전용도로와 그리고 일반도로의 교통량에 따라 설치해야 한다고 하였다. 또한, Lusk et al.(2011)은 캐나다 몬트리올에 설치되어 있는 자전거도로에서 발생한 자전거사고를 분석하였다. 모든 자전거도로가 길이나 면적이 다르기 때문에 면적대비 자전거사고를 나누어 분석을 진행하였다. 분석결과로는 자전거도로에서는 자전거를 이용하는 것은 일반도로에서 자전거를 이용하는 것보다 안전하다는 것을 밝혀냈다. 이와 같이 특정 지역에 형성되어 있는 자전거도로에서 발생한 자전거사고를 분석한 연구와는 다르게 하나의 지역이 아닌 여러 지역의 자전거도로를 비교·분석한 연구가 있다(Mulvaney et al., 2015). 분석결과 자전거도로에서 자전거사고를 감소하려면 자전거도로의 속도를 제한하고 차량의 통행량이 많은 지역에서는 자전거 인프라의 재설계가 필요하다고 하였다. 또한, 일반 교차로를 회전 교차로로 변환하는 경우 자전거사고가 증가하는 것을 밝히고 있다.

다른 한편으로, 자전거 인프라의 네트워크가 자전거 교통사고에 영향을 분석한 연구가 있다(Buehler, 2016; Marqués et al., 2017; Morrison, 2019). Buehler(2016)의 연구는 뉴욕시 자전거도로에서 발생하는 여러 유형의 사고를 음이항과 포아송 회귀모형을 활용하여 분석하였다. 분석결과, 자전거도로가 추가적으로 설치되어도 자전거사고는 증가하지 않는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 자전거도로가 확장됨에 따라 일반도로의 폭이 감소하여 차량의 속도가 감소하기 때문이라고 해석하였다(Buehler, 2016). 이와 비슷한 맥락으로 Marqués et al.(2017)의 연구는 스페인 세비아의 자전거도로 네트워크를 분석하였으며 일반도로와 분리된 자전거도로가 설치될수록 자전거사고는 감소하며, 자전거도로의 네트워크가 유기적으로 잘 연결될수록 자전거 교통사고가 감소함을 밝혔다. 또한, Morrison(2019)의 연구도 호주 멜버른을 대상으로 자전거도로의 유형과 자전거 교통사고를 분석한 결과, 도로와 완전하게 분리된 자전거 전용도로가 다른 자전거 도로 유형과 비교할 때 사고 위험이 낮은 것을 보였다.

이와 유사한 맥락에서 국내 사례로 권성대 외(2015)는 2009~2011년 동안 발생한 자전거 교통사고 자료를 활용하여 전국의 데이터를 기반으로 자전거사고가 발생하는 특성을 분석하였다. 이후 분석결과를 기반으로 전라남도 자전거사고의 특성을 분석하고, 그에 따른 영향변수를 선정하여 회귀분석을 통해 사고예측 모형을 개발하였다. 또한, 자전거사고의 원인으로 자전거도로의 연계성이 부족하고 설치기준이 미흡하다는 문제점을 제시하였다.

이와 같이 자전거 인프라 환경과 자전거 교통사고는 밀접한 관련이 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 국내의 자전거 인프라 환경은 해외 도시사례와 상당한 차이를 가지고 있어 자전거 인프라 환경에 대한 종합적인 분석이 필요한 시점이다. 또한, 자전거 교통사고 관련 국내 연구에서도 자전거 인프라를 구체적으로 유형화하여 자전거 교통사고와의 관계를 도시전체에 대해 종합적으로 분석한 사례는 미흡한 실정이다.

4. 선행연구의 한계점 및 차별성

선행연구의 고찰 결과 자전거 교통사고 관련 연구는 미시적인 분석 수준에서 교차로, 자전거도로와 같이 특정 구간을 대상으로 연구가 많이 진행되었다. 이는 도시 전체의 자전거 교통사고 유형별 물리적 환경요인을 제시하는 데 한계가 있음을 의미한다. 또한, 거시적 분석 수준에서 일반적으로 사용하는 행정동과 같은 공간단위는 자전거 교통사고의 미시적인 물리적 환경 요인을 분석하기에 한계가 있다고 볼 수 있다. 다음으로 대부분의 자전거 교통사고 선행연구는 자전거 교통사고 유형별로 자전거 교통사고에 영향을 미치는 노출변수인 자동차 교통량, 자전거 교통량, 보행량 등에 대한 고려가 제대로 이루어지지 않았다. 또한, 자전거 교통사고에 영향을 미치는 요인으로 자전거 인프라를 세부적으로 유형화하여 분석한 사례는 매우 부족한 실정이다. 마지막으로, 자전거 교통사고의 경우에도 특정 공간에서 집중되는 공간적 자기상관성을 가지고 있지만, 대부분의 선행연구의 분석모형은 공간적 자기상관을 고려하고 있지 않은 한계를 가지고 있다.

따라서 본 연구는 이러한 한계점을 해결하기 위해서 서울시 전역에서 발생한 자전거 교통사고를 "자전거 대 자동차", "자전거 대 보행자" 유형으로 분류하여 서울시 전체를 500×500m 격자로 나누어 분석을 실시하였다. 또한, 자전거 교통사고의 노출변수인 통행량 요인과 자연환경 요인, 토지이용 요인, 가로환경 요인, 자전거 인프라 요인 등을 종합적으로 고려하였다. 나아가 자전거 교통사고의 공간적 자기 상관을 제어할 수 있는 자동공변량(auto-covariate)을 독립변수에 추가하여 분석에 활용하였다.

Ⅲ. 분석의 틀

1. 분석자료 구축

본 연구에서는 서울시 500m 격자 내에서 발생한 자전거 교통사고와 물리적 환경을 분석하기 위해서 도로교통공단의 교통사고분석시스템(TAAS) 데이터를 활용하였다. TAAS 데이터는 경찰, 보험사, 공제조합에서 받은 모든 종류의 교통사고 데이터를 통합하여 서비스하는 시스템이다. 본 연구에서는 2017년부터 2019년 사이 발생한 자동차 대 자전거사고 3,173건과 자전거 대 보행자사고 1,090건을 분류하여 활용하였다. TAAS 데이터는 모든 종류의 교통사고 위치를 웹기반 지도 위에 제공하고 있지만 정확한 좌표는 제공하고 있지 않다. 따라서 GIS 지오코딩을 통해 최대한 정확한 위치를 매핑하고 본 연구의 분석단위인 500×500m 격자로 취합하였다(〈그림 2〉 참조). 그리고 통계분석과 데이터 전처리를 위해 R Studio를 활용하였고, 공간단위 각 변수를 연계(join)하기 위해서 ArcGIS Pro를 활용하였다.

2. 변수선정

본 연구에서는 자전거 교통사고에 영향을 미치는 지역의 물리적 환경을 분석하기 위해 서울시 500×500m 격자 내에서 발생한 자동차 대 자전거 사고와 자전거 대 보행자 사고를 종속변수로 활용하였다. 다음으로 독립변수로 구축된 변수들은 크게 자연환경요인, 인구 요인, 통행량 요인, 토지이용 요인, 가로구조요인, 자전거 인프라 요인으로 나누었으며 변수들은 연구범위인 500m 격자 내에 집계된 데이터를 활용하였다(〈표 2〉 참조).

첫째, 자연환경요인은 하천면적과 평균 경사도가 있다. 하천은 대부분의 자전거도로가 하천변을 따라 형성되어서 자전거 교통사고에 영향을 미칠 것이라고 판단하여 변수로 사용하였다. 다음

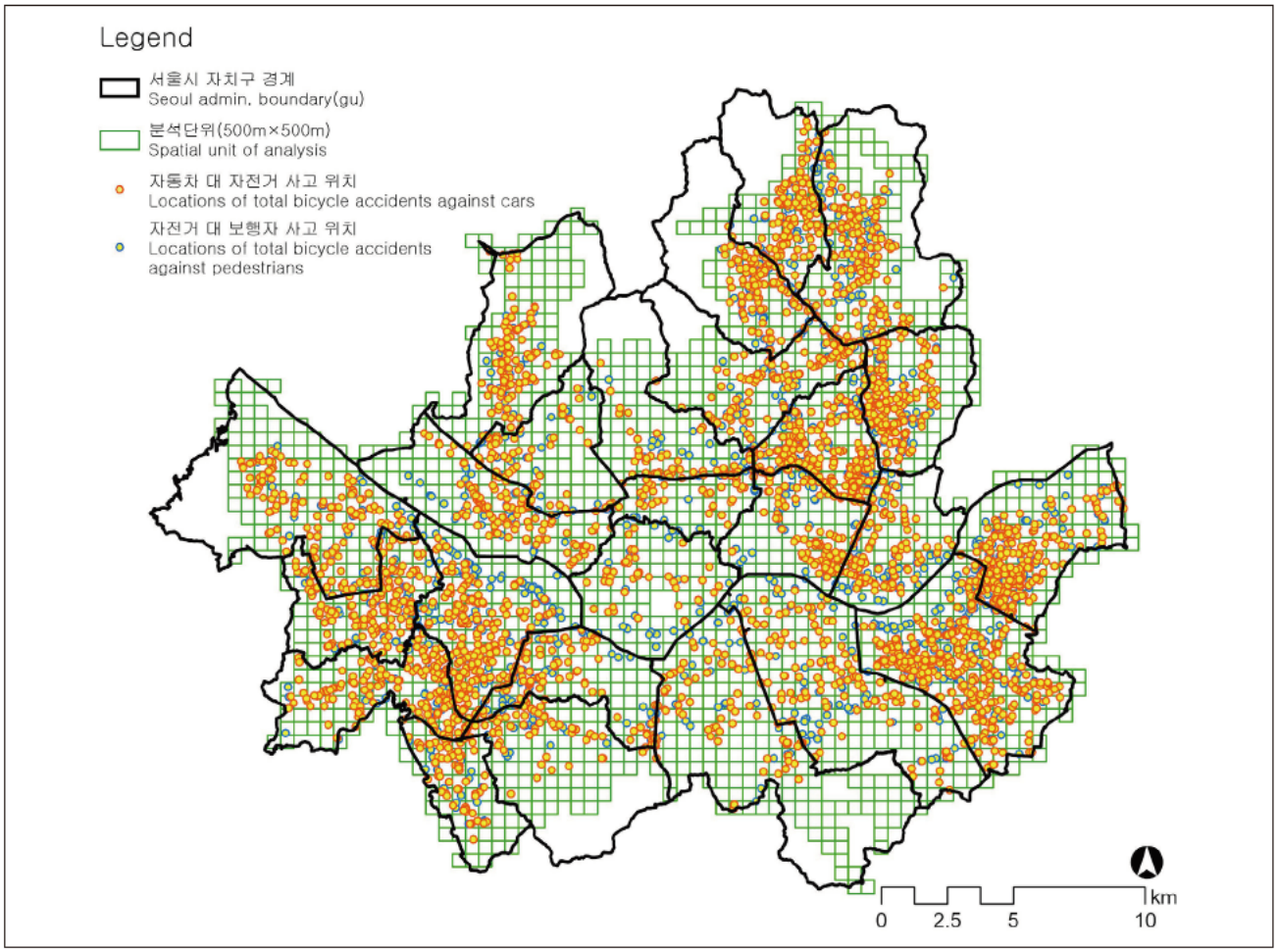

그림 2. 서울시 자전거 교통사고의 공간적 분포와 분석의 공간 단위
Figure 2. Spatial distributions of bicycle accidents and spatial unit of analysis in Seoul

표 2. 변수 및 출처
Table 2. Variables and data sources

Variable		Descriptions	Data sources
종속변수 Dependent variables	자전거 대 자동차 사고 No. of total bicycle accidents against car	분석단위 내 자전거 대 자동차 교통사고 건수 No. of total bicycle accidents against cars from 2017 to 2019	Traffic Accident Analysis System (TAAS)
	자전거 대 보행자 사고 No. of total bicycle accidents against pedestrians	분석단위 내 자전거 대 보행자 교통사고 건수 No. of total bicycle accidents against pedestrians from 2017 to 2019	
자연환경 요인 Natural envir. factors	하천 면적 River area	분석단위 내 하천면적(m^2) River area (m^2)	새주소 DB New address DB, Ministry of Land, Infra. & Trans.
	평균 경사도 Average slope	분석단위 내 평균경사도(°) Average slope (°)	
인구 요인 Population		분석단위 내 인구수(백명) Population (hundreds)	국토지리원 National Geographic Information Institute
통행량 요인 Traffic factors	자동차 통행량 Car traffic	분석단위 내 통행하는 자동차대수(백대) No. of vehicles passing through (hundreds)	국가 교통 정보 센터 National Transport Information Center
	자전거 통행량 Bicycle traffic	통행하는 자전거대수(백대) No. of bicycle passing through (hundreds)	서울시 정책지도 Seoul Policy Map

(Continue on next page)

	Variable	Descriptions	Data sources
토지이용 요인 Land use factors	주거용 연면적 Residential total floor area	분석단위 내 주거용 건물 연면적(m^2) Residential total floor area (m^2)	세움터 Electronic Architectural administration Information System (E-AIS)
	상업용 연면적 Commercial total floor area	분석단위 내 주거용 건물 연면적(m^2) Commercial total floor area (m^2)	
	업무용 연면적 Office total floor area	분석단위 내 주거용 건물 연면적(m^2) Office total floor area (m^2)	
	토지이용혼합도 Land use mix	엔트로피 지수를 활용한 토지이용(주거, 상업, 업무) 혼합도 Entropy index of land use mix (residential, commercial, office)	
가로환경 요인 Road environment factors	신호등 개수 No. of traffic lights	분석단위 내 신호등 개수 No. of traffic lights	국가 교통 정보 센터 National Transport Information Center
	횡단보도개수 No. of crosswalks	분석단위 내 횡단보도 개수 No. of crosswalks	
	과속방지턱 개수 No. of speed humps	분석단위 내 과속방지턱 개수 No. of speed humps	서울 열린 데이터 광장 Seoul Open Data Plaza
	3지 교차 개수 No. of three-way intersections	분석단위 내 삼거리 개수 No. of three-way intersections	새주소 DB New Address Data Base
	4지 교차로 개수 No. of four-way intersections	분석단위 내 사거리 개수 No. of four-way intersections	
	평균 차선수 Average no. of road lanes	분석단위 내 평균 차선수 Average no. of road lanes	
	생활권 도로길이 비율 Road length ratio of neighborhood living area	분석단위 내 생활권 도로길이/전체도로길이 Length of roads in neighborhood living area/total length of roads	
자전거 인프라 요인 Bicycle infra. factors	자전거우선도로 면적 Bicycle-priority road area	분석단위 내 자전거우선도로 면적(m^2) Bicycle-priority road area (m^2)	서울 열린 데이터 광장 Seoul Open Data Plaza
	자전거전용도로 면적 Bicycle-exclusive road area	분석단위 내 자전거전용도로 면적(m^2) Bicycle-exclusive road area (m^2)	
	보행자겸용도로 면적 Bicycle-pedestrian road area	분석단위 내 보행자겸용도로 면적(m^2) Bicycle-pedestrian road area (m^2)	
	자전거도로 가로수 갯수 No. of trees on bicycle roads	분석단위 내 자전거도로 위 가로수 개수 No. of trees on bicylce roads	
	자전거 편의시설 No. of bicycle convenience facilities	분석단위 내 자전거 편의시설 개수 No. of bicycle convenience facilities	
	자전거도로 단절지점 No. of bicycle road breakpoints	분석단위 내 자전거도로 단절점 개수 No. of bicycle road breakpoints	

으로 평균 경사도는 국가 공간 정보 포털에서 구득하였으며, 경사도에 따라 자전거의 속도나 차량의 시야에 따라 사고 건수가 상이할 것으로 판단되어 변수로 활용하였다.

둘째, 인구는 제어변수로서 시간적 범위는 2019년을 활용하였다. 국토교통부에서 제공하는 국토정보 플랫폼에서 자료를 구득하였으며, 500m 격자 단위로 추정된 인구를 변수로 활용하였다. 인구수는 자전거 교통사고의 빈도수에 영향을 미칠 수 있기 때문에 노출변수(exposure variable)로 제어해줄 필요가 있다.

셋째, 자동차와 자전거 통행량 변수도 자전거 교통사고의 빈도에 있어 노출변수이기 때문에 제어가 필요하다. 통행량 요인으로 자동차 통행량과 자전거 통행량이 있다. 먼저 자동차 통행량은 한국교통연구원에서 운영하는 국가교통정보센터에서 구득하였다. 자동차 통행량 변수는 차도 수에 따라 격자별로 자동차의 통행량이 크게 차이나기 때문에 본 연구의 분석에서는 격자별로 전체 자동차 통행량과 차선수를 나누어서 변수로 활용하였다. 통행량 요인에서 자전거 통행량은 서울 정책지도에서 제공하고 있으며 데이터 형식은 각 지점을 지나가는 자전거의 통행량을 제공하고 있다. 또한, 출근, 퇴근, 여가와 기타로 나누어서 제공하고 있으며 본 분석에서는 평균값을 분석에 활용하였다.

넷째, 토지이용요인으로 주거용 건물 연면적, 상업용 건물 연면적, 업무용 건물 연면적과 토지이용혼합도가 있다. 분석에 활용한 자료는 세움터에서 구득하였으며 기준연도는 2019년이다. 분석에서는 500m 격자 내 있는 각 토지이용의 면적을 합하여 분석에 활용하였다. 토지이용혼합도의 경우 엔트로피 지수(Frank & Pivo, 1994)를 활용하여 계산하였다. 토지이용혼합도는 1에 가까울수록 주거, 상업과 업무의 혼합도가 높다는 것을 의미하며,

반대로 0에 가까울수록 토지이용혼합이 낮은 것을 의미한다.

다섯째, 가로환경요인은 자전거 교통사고의 빈도와 심각도에 큰 영향을 미칠 수 있는 중요한 요소이다. 먼저 가로환경 요인으로 신호등 밀도가 있다. 신호등은 자동차의 통행을 통제하고 자동차의 속력에도 영향을 미칠 수 있어 분석에 활용하였으며 국가교통정보센터에서 구득하였다.

다음은 횡단보도 개수이며 서울 열린 데이터 광장에서 구득하였다. 횡단보도는 자전거가 자동차에 노출될 수 있는 도로 시설물로서 자전거 교통사고에 영향을 미칠 것으로 판단되었다. 과속방지턱은 자동차의 속력을 저감시켜줄 수 있는 도로 시설물로서 자전거 교통사고와 밀접한 관계가 있을 것으로 판단되어 변수로 추가하였다. 다음으로 도로 네트워크를 확인할 수 있는 변수로 삼거리와 사거리 개수를 분석에 활용하였다. 삼거리가 많은 지역은 구시가지 지역으로 골목이 많이 형성되어 있는 지역이며, 사거리 밀도가 높은 곳은 강남과 같이 격자형구조를 가진 도로 네트워크를 가진 지역을 의미한다. 교차로는 행정안전부의 새주소 DB에서 구득하였으며 국가교통정보센터에서 제공하는 ITS 노드보다 작은 단위의 골목길 가로 구조를 확인할 수 있어 분석에 활용하였다.

다음으로 평균 차선수 변수를 분석에 활용하였다. 평균 차선수는 500m 격자 내에 있는 도로의 면적과 도로의 폭을 대변할 수 있는 변수로서 자전거 교통사고와 밀접한 관계를 나타낼 것으로 판단되었다. 가로구조요인 중 마지막인 생활권 도로는 12m 이하의 도로이다. 자전거사고가 일반도로와 교차로뿐만 아니라 이면도로에서도 빈번하게 발생하는 것으로 판단되었다. 이에 분석에서는 500m 격자 내에 12m 이하 도로 길이를 전체도로와 나누어서 분석에 활용하였다.

마지막으로 자전거 인프라 요인이 있다. 자전거 인프라 요인에는 자전거도로 유형에 따른 면적이 있으며 자전거도로의 가로수 개수와 자전거 편의시설 개수와 자전거도로 단절지점 개수로 활용하였다. 자전거도로 유형은 「자전거 이용 활성화에 관한 법률」에 따라 자전거 우선도로, 자전거 전용차로, 자전거 전용도로와 보행자 겸용도로로 총 4가지 유형으로 나누어져 있다.

먼저 자전거 우선도로와 자전거 전용차로는 차로에 경계석이나 분리대 없이 설치되어 있는 도로로서 같은 유형의 도로라고 판단되어 자전거 우선도로와 합하여 분석을 진행하였다. 자전거 전용도로의 경우에는 자전거 우선도로와 마찬가지로 차도에 설치되어 있지만 분리대나 경계석으로 일반차로와 분리하였으며 자전거만 운행할 수 있는 도로를 말한다.

자전거 전용도로는 자전거만 이용할 수 있는 대신 자전거의 속도가 높을 것이라고 예상되어 분석에 활용하였다. 자전거도로 중 마지막인 보행자 겸용도로는 보행자도로와 함께 설계되는 시설물로서 도심에서 흔히 볼 수 있는 자전거도로이다. 보행자 겸용도로는 일반차도로 진입하기 쉽고 교차로를 횡단할 시에 단절되는 지점이 많아 사고에 영향을 미칠 것이라 판단되어 분석에 활용하였다.

자전거도로 면적은 서울 열린데이터 광장에서 구득하였으며 기존 데이터에 포함되어 있는 자전거도로 폭을 ArcGIS Pro를 활용하여 버퍼를 주어 면적으로 변환하였다. 자전거도로 폭 자료가 누락된 경우 「도시·군 계획시설의 결정·구조 및 설치기준」에 따라 최소 폭인 1.5m를 자전거도로 폭으로 설정하여 분석에 활용하였다.

다음으로는 자전거도로 가로수 개수이다. 가로수는 서울 열린데이터 광장에서 구득하였으며 변수 구축방법은 자전거도로 면적 위에 겹치는 가로수를 분석에 활용하였다. 자전거 편의시설은 서울시 열린 데이터 광장에서 제공하고 있으며, 크게 도시, 하천으로 나누어져 있고 세부적으로는 자전거 거치대, 대여소, 식수대, 화장실, 자전거 출입구가 있다.

자전거 편의시설은 자전거 운전자가 주행 중에 휴식을 취하기 위한 시설로서 자전거 운전자가 많이 모이는 장소이기 때문에 자전거 교통사고에 영향이 있을 것으로 판단하였다. 자전거 인프라 요인에서 마지막 변수인 자전거도로 단절지점은 자전거도로가 연결되어 있지 않고 끊어지는 지점을 의미한다. 현재 설치된 자전거도로는 유기적으로 연결되어 있지 않으며 일반도로와 만나는 지점에서 단절되어 있는 경우가 있다.

3. 최종 분석 모형

본 논문은 500m격자 내 물리적 환경이 자전거 교통사고 발생에 미치는 영향을 분석하기 위해 가산자료인 자전거 교통사고 건수의 특성을 고려하여 음이항 회귀모형을 활용하였다. 교통사고 발생 빈도는 정해진 공간 범위와 시간에 따라 사고가 발생할 수 있는 확률이 적다고 볼 수 있다. 따라서 분석단위인 500m 격자별로 자전거 교통사고 건수를 집계할 경우 0 값이 많은 비정규 분포 형태를 가진다. 이 경우 포아송 회귀모형이나 음이항 회귀모형으로 분석을 진행하는 것이 바람직하다. 포아송 회귀모형의 경우 분산과 평균값이 같을 때 주로 활용하며, 최종 모형의 alpha(α) 값이 0 값으로 도출된다면 이는 분산과 평균값이 같다는 것을 의미한다. 분석결과 alpha 값이 0 이상의 값으로 유의하게 나타나 음이항 회귀모형을 활용하는 것이 타당한 것으로 나타났다.

추가로, 분석모형의 종속변수인 자전거 교통사고 건수는 공간적 자기상관을 가지고 있는 변수이기 때문에 음이항 회귀모형에서도 공간자기상관성을 제어할 수 있는 자동공변량(auto-covariate)을 분석모형에 추가하였다. 자동공변량은 하나의 공간단위와 인접해 있는 다른 공간단위들 간의 변수를 통해 가중치를 계산한 값으로 독립변수에 추가하여 종속변수인 자전거 교통사고가 가지는 공간적인 자기상관을 제어해줄 수 있다 (Dormann et al., 2007; Lee et al., 2020).

Ⅳ. 분석결과

1. 기초통계 분석 및 다중공선성 검증

본 논문의 기초통계분석은 〈표 3〉과 같다. 본 분석은 서울시의 500m 격자를 공간 단위이며 분석을 진행하기 위해 2,155개의 격자로 모든 변수를 구축하였다. 종속변수로 자동차 대 자전거 사고 건수의 경우 평균 1.48건으로 확인할 수 있으며 자전거 교통사고가 가장 많이 발생한 격자는 17건으로 나타났다. 다음으로 자전거 대 보행자 사고의 경우 평균 0.50건, 가장 많은 사고는 9건으로 나타났다.

독립변수를 살펴보면 인구수의 경우 평균 4,560명이 거주하는 것으로 확인되었지만 사람이 거주하지 않는 0 값도 확인할 수 있었다. 이러한 경우는 격자를 선정할 때 도로망이 있는 격자를 선정하였기 때문이다. 한강 다리에 있는 도로망으로 인해 격자가 한강 한 가운데 있어 인구의 최솟값이 0 값으로 도출되었음을 의미한다. 통행량 요인의 경우 자동차 통행량이 자전거 통행량보다 월등히 높은 것을 알 수 있다. 반면, 삼거리 개수에서는 평균 41.36개, 최댓값이 303개인 것을 확인할 수 있었다. 삼거리는 일반적인 교차로뿐만 아니라 이면도로로 진입하는 경우에도 삼거리 변수이기 때문에 최댓값이 높은 것으로 볼 수 있다. 자전거도로의 평균값은 보행자 겸용도로가 가장 많은 것으로 도출되었다. 반면, 최댓값에서는 자전거 우선도로가 가장 높은 것을 확인할 수 있었다. 자전거도로 가로수 개수는 평균 10개로 나타났으며 자전거 편의시설의 경우 0.32개로 확인되었다. 마지막으로 자전거도로 종료지점은 평균 3.59개로 나타났다. 다음으로 다중공선성 문제의 경우 최종선정 변수들이 5를 넘지 않아 문제가 없다고 판단하여 분석에 활용하였다.

2. 음이항 회귀분석 결과

본 연구에서 분석에 활용한 최종 모형은 음이항 회귀모형이다. 최종 모형에 대한 분석에 앞서 분석에 활용한 모형이 합당한지에 대한 검증이 필요하다. 본 연구에서 활용한 모든 모형의 종속변수들이 포아송 분포를 나타내고 있다. 이에 따라 포아송과 음이항 회귀분석을 실시해야 하는데 최종모형의 alpha(α)값에 따라 분석 모형을 검증할 수 있다.

〈표 4〉에서 확인할 수 있듯이 최종모형 결과의 alpha(α)값이 0.26, 0.27과 0.26로 나타났다. 결과적으로 0이 아닌 값이 도출되어 평균과 분산 값이 다르다는 것을 의미하며 음이항 회귀모형이 적합함을 시사한다. 따라서 본 연구는 음이항 회귀모형을 활용하였으며 공간적 자기상관성을 제어하기 위해서 독립변수에 자동 공변량을 추가하여 분석하였다.

자연환경요인 중 하천면적은 모형에 따라 반대의 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 자동차 통행량과 차이가 나는 것으로 판단된다. 자동차의 경우 하천 주변에서 통행이 적지만 보행자의 경우 산책 또는 운동과 여가를 위해서 하천을 많이 이용하기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 볼 수 있다. 다른 변수인 평균 경사도에서는 모두 음의 결과를 나타낸 것으로 보아 경사가 높은 지역에서는 자전거의 통행이 쉽지 않아 사고가 적을 수 있다고 생각된다. 노출변수라고 할 수 있는 인구수와 통행량 요인 중 인구수와 자전거 통행량이 두 모형에서 유의한 결과를 나타내고 있다.

토지이용 요인에서는 상업 연면적과 토지이용 혼합도 변수가 자전거 대 보행자 사고 모형에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 상업지역과 토지이용혼합도가 높은 지역에서 자전거와 보행자와의 접촉이 빈번하게 일어나기 때문에 자전거 대 보행자 교통사고 건수가 높은 것으로 볼 수 있다. 가로 환경요인에서는 과속방지턱과 사거리 개수를 제외한 변수에서 통계적으로 유의함을 보이고 있다. 횡단보도의 경우 자동차, 자전거, 보행자가 모두 빈번하게 접촉할 수 있는 도로 시설이기 때문에 사고 발생이 높게 나타나는 것으로 볼 수 있다. 특히 자동차 대 자전거사고 모형에서 영향이 크게 나타났다. 반면, 신호등 밀도는 자동차 대 자전거 사고에만 통계적으로 양의 관계로 유의하게 나타났다. 또한, 교차로의 유형에 따라 차이가 있는데, 삼거리와 사거리의 차이에 따른 것으로 볼 수 있다. 사거리의 경우 대부분 직진으로 통행이 이루어져 시야가 확보되지만, 삼거리는 설치 위치에 따라 통행의 각도가 달라 자동차나 자전거 운전자가 더 주의를 가져야 한다. 이와 같은 이유로 삼거리에서 사고가 더 빈번하게 나타나는 것으로 판단된다. 평균 차선수의 경우 두 모형에서 모두 유의함을 나타내고 있다. 이는 도로 차선이 더 많을수록 자전거 교통사고 가능성이 증가하는 것을 의미하며, 특히 자동차와 자전거 교통사고 가능성이 더 높은 것으로 나타났다.

자전거 인프라 요인의 경우 두 모형 간에 차이가 있는 것으로 나타났다. 특히 보행자 겸용도로, 자전거도로 가로수, 자전거도로의 단절지점 변수 등에서 차이가 뚜렷하게 나타났다. 먼저 보행자 겸용도로 면적의 경우에는 자전거와 보행자 사고에서만 유의함을 나타내고 있는데 이는 보행자 겸용도로가 대부분 보행로 옆으로 설치되어 있기 때문으로 판단된다. 다음으로 자전거도로 가로수 개수와 자전거도로 단절지점 변수는 자동차 대 자전거 모형에서만 유의하게 나타났다. 자전거 도로 가로수의 경우 차량이나 자전거 운전자의 시야를 방해할 수 있는 요인으로 작용할 수 있기 때문에 나타난 결과로 판단되며, 자전거도로 단절지점의 경우에는 자전거도로가 일반 차도를 만나면서 자동차와 접촉 가능성이 높아지기 때문에 나타난 결과로 해석된다.

다음으로 자전거 전용도로, 자전거 편의시설 개수 변수는 자동차 대 자전거 사고, 자전거 대 보행자 사고 모든 모형에서 통계적으로 유의하게 나타났다. 자전거 전용도로의 경우 차도 옆에 설

표 3. 기초통계 분석
Table 3. Descriptive analysis

변수 Variables			표본수 Obs.	평균 Mean	분산 Std.Dev.	최솟값 Min	최댓값 Max	분산팽창계수 VIF
종속 변수 Depen. Variable	자전거 대 자동차 사고 No. of total bicycle accidents against cars		2,155	1.48	2.21	0	17	-
	자전거 대 보행자 사고 No. of total bicycle accidents against edestrians		2,155	0.50	0.92	0	9	-
독립 변수 Indepen. Variables	자연환경 요인 Natural environ. factors	하천 면적 River area*	2,155	14.62	44.45	0.00	250.00	1.73
		평균 경사도 Average slope	2,155	3.73	4.87	0.00	28.06	1.67
	인구수 Population		2,155	4,560.61	3,861.61	0.00	19,391.00	2.12
	통행량 요인 Traffic factors	자동차 통행량 Car traffic	2,155	5,624.57	3,990.65	0.00	26,727.33	1.28
		자전거 통행량 Bicycle traffic	2,155	26.35	48.24	0.00	340.75	1.66
	토지이용 요인 Land-use factors	주거용 연면적 Residential total floor area	2,155	188.94	1,992.71	0.00	92,400.00	1.01
		상업용 연면적 Commercial total floor area	2,155	25.14	33.94	0.00	262.61	2.26
		업무용 연면적 Office total floor area	2,155	13.40	49.65	0.00	692.24	1.31
		토지이용혼합도 Land use mix	2,155	0.12	0.10	0.00	0.63	1.14
	가로환경 요인 Road environment factors	신호등 개수 No. of traffic lights	2,155	3.12	2.73	0.00	26.57	1.24
		횡단보도개수 No. of crosswalks	2,155	14.87	13.19	0.00	92.00	2.54
		과속방지턱 개수 No. of speed humps	2,155	4.38	5.90	0.00	53.00	1.47
		3지 교차 개수 No. of three-way intersections	2,155	41.36	48.28	0.00	303.00	2.42
		4지 교차로 개수 No. of four-way intersections	2,155	6.60	8.50	0.00	104.00	2.43
		평균 차선수 Average no. of road lanes	2,155	2.81	0.88	0.00	6.94	1.71
		생활권 도로 비율 Road length ratio of neighborhood living area	2,155	62.98	32.55	0.00	100.00	1.73
	자전거 인프라 요인 Bicycle infrastructure factors	자전거우선도로 면적 Bicycle-priority road area	2,155	545.75	1,893.62	0.00	36,815.96	1.35
		자전거전용도로 면적 Bicycle-exclusive road area	2,155	325.43	1,157.92	0.00	10,417.56	1.18
		보행자겸용도로 면적 Bicycle-pedestrian road area	2,155	1,736.16	2,593.96	0.00	17,021.11	1.97
		자전거도로 가로수 갯수 No. of trees on bicycle roads	2,155	10.10	21.46	0.00	216.00	1.49
		자전거 편의시설 No. of bicycle convenience facilities	2,155	0.32	0.93	0.00	10.00	1.24
		자전거도로 단절지점 No. of bicycle road breakpoints	2,155	3.59	5.80	0.00	43.00	1.92

*Mean, variance, and maximum of river area are divided by 1,000

표 4. 음이항 회귀분석 결과
Table 4. Results of negative binomial regression analysis

변수 Variables		자전거 대 자동차 사고 건수 No. of total bicycle accidents against cars		자전거 대 보행자 사고 건수 No. of total bicycle accidents against pedestrians	
		Coef.	z	Coef.	z
자연환경 요인 Natural environ. factors	하천 면적 River area	-0.006***	-4.61	0.003***	2.75
	평균 경사도 Average slope	-0.126***	-10.67	-0.120***	-6.85
인구 Population		0.005***	5.76	0.008***	6.26
통행량 요인 Traffic factors	자동차 통행량 Car traffic	0.001	1.52	0.001	1.02
	자전거 통행량 Bicycle traffic	0.115*	1.72	0.305***	3.92
토지이용 요인 Land-use factors	주거용 연면적 Residential total floor area	-8.669	-0.89	-0.135	-0.01
	상업용 연면적 Commercial total floor area	0.074	0.86	0.233*	1.71
	업무용 연면적 Office total floor area	-0.035	-0.76	-0.130	-1.44
	토지이용혼합도 Land use mix	0.381	1.16	0.931**	2.35
가로환경 요인 Road environment factors	신호등 개수 No. of traffic lights	0.031***	2.98	0.017	1.06
	횡단보도개수 No. of crosswalks	0.189***	8.33	0.084**	2.33
	과속방지턱 개수 No. of speed humps	-0.004	-0.93	-0.006	-0.93
	3지 교차 개수 No. of three-way intersections	0.002***	3.30	0.004***	4.49
	4지 교차로 개수 No. of four-way intersections	0.005	1.55	0.001	0.24
	평균 차선수 Average no. of road lanes	0.164***	5.20	0.091**	2.01
	생활권 도로 비율 Road length ratio of neighborhood living area	0.003**	2.01	-0.001	-0.61
자전거인프라 요인 Bicycle infrastructure factors	자전거우선도로 면적 Bicycle-priority road area	-0.001	-0.05	0.010	0.64
	자전거전용도로 면적 Bicycle-exclusive road area	0.054***	2.92	0.042*	1.65
	보행자겸용도로 면적 Bicycle-pedestrian road area	0.006	0.55	0.036**	2.39
	자전거도로 가로수 No. of trees on bicycle roads	0.003**	2.53	0.001	0.52
	자전거 편의시설 No. of bicycle convenience facilities	0.079***	3.63	0.123***	4.26
	자전거도로 단절지점 No. of bicycle road breakpoints	0.014***	3.12	0.007	1.08
자동공변량(auto-covariate)		0.179***	12.19	0.199***	3.31
Constant		-1.538***	-11.36	-2.173***	-11.68
obs.		2155		2155	
alpha(α)		0.36***		0.36***	
chibar2		290.16		42.67	
Log likelihood		-2837.01		-1772.65	
AIC		5722.01		3593.30	
BIC		5858.23		3729.51	

*p < 0.10, **p < 0.05, ***p < 0.01

치된 자전거도로의 경우 자전거가 자동차 교통에서 분리되어 운행되지만 대부분 도로 위에 선으로만 구분되어 있다. 이는 도로의 상황에 따라서 자동차와 자전거 전용도로에서 운행하는 자전거와의 접촉이 빈번하게 일어날 수 있음을 의미한다. 마지막으로 자전거 편의시설 수는 모든 모형에서 통계적으로 유의하게 나타났다. 국내의 경우 한강이나 주요 하천을 따라서 자전거 편의시설이 설치되어 있다. 특히, 한강의 경우 자전거 편의시설 주변으로 한강공원을 이용하기 위해 진입하는 차량과 편의시설을 이용하기 위해 진입하는 자전거 및 보행자 등에 의해 사고 가능성이 높은 것을 의미한다.

V. 결 론

본 연구는 자전거 교통사고 발생에 영향을 미치는 물리적 환경을 분석하기 위해 2017년부터 2019년 사이 서울시에서 발생한 자동차 대 자전거 사고와 자전거 대 보행자 사고를 활용하였다. 분석모형에 활용한 노출변수인 인구수와 자전거 통행량 그리고 공간적 자기상관을 제어하기 위해 활용한 자동 공변량 변수는 통계적으로 양(+)의 값으로 유의하게 나타났다. 분석결과 자전거 교통사고 발생 건수에 영향을 미치는 주요 물리적 환경변수와 정책적 시사점은 다음과 같다.

첫째, 토지이용 요인에서는 상업 연면적과 토지이용혼합도 변수가 자전거 대 보행자 교통사고에만 통계적으로 유의한 변수로 나타났다. 이러한 결과는 상업지역이나 토지이용혼합도가 높은 곳에 유동인구가 많고 다양한 일상활동이 일어나기 때문에 자전거와 보행자 사이의 접촉 사고가 빈번하게 일어날 수 있음을 의미한다. 따라서 이러한 지역의 경우 자전거 통행과 보행자 사이의 접촉을 완화해 줄 수 있는 가로환경 디자인이 필요할 것으로 판단된다. 예를 들어 자전거-보행자 겸용도로 보다는 자전거도로를 도로 위에 전용도로로 분리하는 것이 더 바람직 할 것으로 판단된다.

둘째, 대부분의 가로환경 요인은 자전거 교통사고 발생건수와 밀접한 관련을 가지는 것으로 나타나 가로환경 디자인의 중요성을 알 수 있다. 횡단보도 개수, 삼거리 개수, 평균 차선수 변수 등은 모든 모형에서 양(+)의 방향으로 통계적으로 유의하게 나타났다. 특히, 횡단보도의 경우 자동차 대 자전거 교통사고 모형에서 계수값(coef.)이 상대적으로 값이 크게 나타났다. 또한, 신호등 밀도와 생활도로 비율은 자동차 대 자전거 교통사고 모형에서만 양(+)의 값으로 유의하게 나타났다. 이는 신호등이 있는 교차로와 횡단보도 주변에서 자동차 대 자전거 교통사고 발생이 높은 것을 의미한다. 횡단보도의 경우 자전거가 자동차에 노출되는 공간이며, 신호주기가 짧은 상황에서 자전거 운전자가 내리지 않고 횡단보도로 진입하게 될 경우 자동차 및 보행자와 접촉사고 가능성이 높아짐을 의미한다.

다음으로 평균 차선수가 많은 지역에서 자전거사고가 높은 것으로 나타났다. 평균 차선수가 많은 지역은 자동차의 통행과 주행속도가 높고 횡단보도의 폭이 넓기 때문에 자전거 운전자가 급하게 차선을 횡단하거나 횡단보도로 진입하는 경우 자동차 및 보행자와의 교통사고 위험이 높아질 수 있음을 의미한다. 따라서 자전거 운전자가 횡단보도를 지나갈 때 자전거에서 내려서 자전거를 끌고 건널 수 있도록 자전거 교통안전에 대한 시민들의 인식을 제고할 필요성이 있다.

가로환경 요인에서 삼거리 개수 변수는 모든 모형에서 통계적으로 양(+)의 방향으로 유의하게 나타났다. 이는 삼거리 교차로가 많이 분포된 지역에 자전거 교통사고가 빈번하게 일어날 수 있음을 시사한다. 따라서 삼지 교차로 주변에 자전거사고 예방을 위해 자동차 운전자, 자전거 운전자, 보행자 모두에게 인지하기 쉽고 명확한 도로 시설물을 추가로 설치하는 방안을 고려해볼 수 있다.

셋째, 자전거 인프라 요인은 자전거 교통사고 유형과 밀접한 관련을 가지는 것으로 나타났다. 자전거 전용도로의 면적은 모든 모형에서 양(+)의 방향으로 유의하게 나타났으며, 자동차 대 자전거 모형에서 계수 값의 영향력이 조금 높게 나타났다. 이는 자동차 대 자전거 교통사고가 자전거 전용도로와 밀접한 관련이 있음을 시사한다. 특히 서울시의 경우 자전거 인프라 확충을 위해 기존 도로에 자전거 전용도로를 설치하는 사례가 증가하고 있다. 이 경우 자전거도로의 폭이 좁고 도로 위에 선으로만 구분되어 있는 경우가 많아 자동차와 자전거의 접촉이 빈번하게 일어날 수 있다. 반면, 보행자 겸용도로는 자전거 대 보행자 교통사고에만 양(+)의 방향으로 유의하게 나타났다. 자전거 전용도로와 보행자 겸용도로의 이러한 분석결과는 차량이나 보행자와 완전히 분리되어 있는 자전거 전용도로의 확충이 중요함을 시사한다.

다른 한편으로, 자전거도로 단절지점 개수와 자전거도로 가로수 개수는 자동차 대 자전거 교통사고에만 양(+)의 방향으로 유의하게 나타났다. 특히 기존 도심에 설치된 자전거 전용도로의 경우 단절지점이 많이 존재하여 단절지점에서 자동차 교통과 충돌할 가능성도 높다고 판단된다. 또한, 자전거도로의 가로수의 경우 자동차 운전자나 자전거 운전자의 시야를 가릴 수 있어 사고위험이 높게 나타난 것으로 판단된다. 자전거 편의시설의 개수는 모든 모형에서 양(+)의 방향으로 유의한 변수로 나타났다.

넷째, 자전거 인프라 요인에서 자전거 편의시설은 자동차 대 자전거 사고와 자전거 대 보행자 사고에 양(+)의 관계를 가지는 것으로 나타났다. 그리고 자전거 편의시설은 자전거 대 보행자 교통사고 발생에 더 큰 영향을 가지는 것으로 나타났다. 서울시의 경우 한강이나 주요 하천을 따라 위치하고 있는 자전거 편의시설 주변은 한강공원을 이용하기 위해 출입하는 자동차, 자전거 이용자, 보행자 등의 접촉이 빈번하게 발생하는 지역이다. 따라서 자전거 편의시설 주변의 교통사고 원인을 면밀하게 분석하여 자전거 교통사고 저감 대책의 수립이 필요하다. 또한, 향후 자전

거 편의시설을 설치할 때, 자동차 교통과의 완전한 분리와 자전거 이용자들의 접근성을 고려하여 배치해야 할 필요가 있음을 시사한다.

서울시뿐만 아니라 많은 지방자치단체에서 자전거 인프라를 확충하고 자전거 이용을 장려하는 정책은 도시교통과 환경측면에서 매우 바람직하다. 그러나 현재 설치되어 있는 일반도로와 보행로의 상황을 면밀하게 고려하지 않고 일방적으로 자전거 전용도로와 보행자 겸용도로를 만드는 경우 자전거와 보행자 교통사고 위험을 더욱 높일 수 있다. 따라서 향후 자전거 인프라 구축은 기존에 조성되어 있는 자전거 인프라와의 유기적인 연계뿐만 아니라 자동차의 교통이나 보행자의 흐름과 분리될 수 있는 체계가 필요하다. 그리고 자전거 교통사고가 빈번하게 발생하는 횡단보도 주변의 경우 자전거 운전자들은 횡단할 때 자전거에서 내려서 건너도록 하는 것이 필요하고, 자전거 주행시 헬멧과 같은 안전장비를 갖추는 것이 중요하다고 판단된다. 삼거리의 경우 자전거 사고 발생 위험이 높은 장소이기 때문에 자전거 운전자의 안전을 위한 사각지역 거울이나 자동차의 속도를 줄이기 위한 속도 방지턱의 설치가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구의 한계점은 다음과 같다. 첫째, 자전거 교통사고에서 실제 중요하게 영향을 미치는 개인의 행태를 고려하지 못한 한계를 가지고 있다. 이는 물리적인 환경보다 자전거 운전자 개인의 운전능력이나 운전 시 부주의함으로 인해 사고가 발생할 수 있기 때문이다. 이러한 개인의 행태를 고려하기 위해서는 블랙박스나 CCTV 등 사고 과정을 담고 있는 영상자료의 활용을 고려해 볼 필요가 있다. 둘째, TAAS 데이터는 경찰이나 보험사에 신고가 접수된 데이터만을 통합하여 제공하고 있다. 이에 사고 심각도가 낮거나 자전거 개인이 단독으로 발생한 사고는 집계가 되지 않을 수도 있어 지역에 따라 자전거사고 발생 건수가 다르게 집계되었을 수도 있다. 셋째, 본 연구에서는 행정동이나 집계구 같은 통계구역을 분석단위로 활용하지 않고 크기가 동일한 500×500m 격자 단위를 활용하였다. 따라서 행정동이나 집계구 수준에서 활용 가능한 다양한 사회·경제 지표를 활용하지 못하였다. 또한, 크기가 동일한 격자로 분석하였다고 할지라도 다른 분석단위로 분석할 경우 분석의 결과가 달라질 수 있는 Modifiable Areal Unit Problem(MAUP)의 문제(Openshaw, 1984)가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 다양한 공간 분석 단위에서 분석한 결과를 비교해볼 필요가 있다.

인용문헌
References

1. 권성대·김윤미·김재곤·하태준, 2015. "자전거 사고예측모형 개발 및 개선방안 제시에 관한 연구", 「대학토목학회논문집」, 35(5): 1135-1146.
   Kwon, S.D., Kim, Y.M., Kim, J.G., and Ha, T.J., 2015. "Development of Bicycle Accident Prediction Model and Suggestion of Countermeasures on Bicycle accidents", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 35(5): 1135-1146.
2. 김도훈·조한선·김응철, 2008. "도시부 교차로에서의 자전거 사고 유형 분석에 관한 연구", 「한국도로학회논문집」, 10(4): 117-125.
   Kim, D.H., Cho, H.S., and Kim, E.C., 2008. "A study on Bicycle Accident Patterns at Urban Intersections", *International Journal of Highway Engineering*, 10(4): 117-125.
3. 김응철·오주택·김명섭, 2007. "비선형 회귀모형을 이용한 자전거사고 요인분석에 관한 연구", 「국토계획」, 42(3): 261-272.
   Kim, E.C., Oh, J.T., and Kim, M.S., 2007. "A Study on Crash Causations for Bicycles in Signalized Intersections Using Non-linear Regression models", *Journal of Korea Planning Association*, 42(3): 261-272.
4. 신희철·박재영, 2012. "연령과 도시규모에 따른 자전거 교통사고 분석", 「월간교통」, 12: 68-72.
   Shin, H.C. and Park, J.Y., 2012. "Analysis of Bicycle Accident by Age and City Size", *Monthly Transportation*, 12: 68-72.
5. 오주택·김응철·지민경, 2007. "도시부 신호교차로에서의 자전거사고 분석", 「한국도로학회논문집」, 9(2): 1-11.
   Oh, J.T., Kim, E.C., and Ji, M.K., 2007. "A Study of Bicycle Crash Analysis at Urban Signalized Intersections", *International Journal of Highway Engineering*, 9(2): 1-11.
6. 이유식·황윤형·성광모·김성진·이정욱, 2016. "교차로내 자전거 교통사고 유형 분석에 관한 연구", 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회, 대구광역시: EXCO.
   Lee, Y.S., Hwang, Y.H., Sung, G.M., Kim, S.J., and Lee, J.Y., 2016. "Analysis of Bicycle Accident Patterns at Intersections", The Korean Society of Automotive Engineers, Daegu: EXCO.
7. Boufous, S., de Rome, L., Senserrick, T., and Ivers, R., 2012. "Risk Factors for Severe Injury in Cyclists Involved in Traffic Crashes in Victoria, Australia", *Accident Analysis & Prevention*, 49: 404-409.
8. Brown, R.L., Koepplinger, M.E., Mehlman, C.T., Gittelman, M., and Garcia V.F., 2002. "All-terrain vehicle and bicycle crashes in children: Epidemiology and comparison of injury severity", *Journal of Pediatric Surgery*, 37(3): 375-380.
9. Buehler, R., 2016. "Bikeway Networks: A Review of Effects on Cycling", *Transport Reviews*, 36(1): 9-27.
10. Daniels, S., Brijs, T., Nuyts, E., and Wets, G., 2009. "Injury Crashes with Bicyclists at Roundabouts: Influence of Some Location Characteristics and the Design of Cycle Facilities", *Journal of Safety Research*, 40(2): 141-148.
11. Doherty, S.T., Aultman-hall, L., and Swaynos, J., 2000. "Commuter Cyclist Accident Patterns in Toronto and Ottawa", *Journal of Transportation Engineering*, 126(1): 21-26.
12. Dormann, C.F., Mcpherson, J.M., Araujo, M.B., Bivand, R., Bolliger, J., Carl, G., Davies, R.G., Hirzel, A., Jetz, W., Kissling, W.D., Kuhn, I., Ohlemuller, R., Peres-Neto, P.R., Bjorn, R., Schroder, B., Schurr, F.M., and Wilson, R., 2007. "Methods to Account for Spatial Autocorrelation in the Analysis of

Species Distributional Data: A review", *A Journal of Space and Time in Ecology*, (30)5: 609-628.

13. Frank, L.D. and Pivo, G., 1994. "Impacts of Mixed Use and Density on Utilization of Three Modes of Travel: Single-occupant Vehicle, Transit, and Walking", *Transportation Research Record*, 1466: 44-52.

14. Harris, M.A., Reynolds, C.O., Meghan, W., Peter, A.C., Hui, S., Mary, L.C., Michael, D.C., Shelina, D., Jeffey, R.B., Steven, M.F., Garth, H., Melody, M., Lee, V., and Kay, T., 2013. "Comparing the Effects of Infrastructure on Bicycling Injury at Intersections and Non-intersections Using a Case–crossover Design", *Injury Prevention*, 19(5): 303-310.

15. Hoque, M., 1990. "An Analysis of fatal Bicycle Accidents in Victoria(australia) with a Special Reference to Nighttime Accidents", *Accident Analysis & Prevention*, 22(1): 1-11.

16. Johnson, M., Newstead, S., Oxley, J., and Charlton, J., 2013. "Cyclists and Open Vehicle Doors: Crash Characteristics and Risk Factors", *Safety Science*, 59: 135-140.

17. Kaplan, S. and Giacomo Prato, C., 2015. "A Spatial Analysis of Land Use and Network Effects on Frequency and Severity of Cyclist-motorist Crashes in the Copenhagen Region", *Traffic Injury Prevention*, 16(7): 724-731.

18. Kim, D. and Kim, K., 2015. "The Influence of Bicycle Oriented Facilities on Bicycle Crashes within Crash Concentrated Areas", *Traffic Injury Prevention*, 16(1): 70-75.

19. Lee, S., Yoon, J., and Woo, A., 2020. Does Elderly Safety Matter? Associations between Built Environments and Pedestrian Crashes in Seoul, Korea. *Accident Analysis & Prevention*, 144, 105621: 1-11.

20. Lusk, A.C., Furth, P.G., Morency, P., Moreno, L.F.M., Willett, W.C., and Dennerlein, J.T., 2011. "Risk of Injury for Bicycling on Cycle Tracks versus in the Street", *Injury Prevention*, 17(2): 131-135.

21. Marqués, R. and Herrador, V.H., 2017. "On the Effect of Networks of Cycle-tracks on the Risk of Cycling. The Case of Seville", *Accident Analysis & Prevention*, 102: 181-190.

22. Moore, D.N., Schneider, W.H., Sacolainen, P.T., and Farzaneh, M., 2011. "Mixed Logit Analysis of Bicyclist Injury Severity Resulting from Motor Vehicle Crashes at Intersection and Non-intersection Locations", *Accident Analysis & Prevention*, 43(3): 621-630.

23. Morrison, C.N., Thompson, J., Kondo, M.C., and Beck, B., 2019. "On-road Bicycle Lane Types, Roadway Characteristics, and Risks for Bicycle Crashes", *Accident Analysis & Prevention*, 123: 123-131.

24. Mulvaney, C.A., Smith, S., Watson, M., Parkin, J., Coupland, C., Miller, P., Kendrick, D., and Mcclintock, H., 2015. "Cycling Infrastructure for Reducing Cycling Injuries in Cyclists", *Cochrane Database of Systematic Reviews*.

25. Openshaw, S., 1984. "The Modifiable Areal Unit Problem", *Norwick: Geo Books*.

26. Roders, G.B., 1997. "Factors Associated with the Crash of Adult Bicyclists", *Journal of Safety Research*, 28(4): 233-241.

27. Saha, D., Alliuri, P., Gan, A., and Wu, W., 2018. "Spatial Analysis of Macro-level Bicycle Crashes Using the Class of Conditional Autoregressive Models", *Accident Analysis & Prevention*, 118: 166-177.

28. Teschke, K., Dennis, J., Reynolds, C.C.O., Winters, M., and Harris, M.A., 2016. "Bicycling Crashes on Streetcar(tram) or Train Tracks: Mixed Methods to Identify Prevention Measures", *BMC Public Health*, 16(1): 617.

29. Wang, Y. and Nihan, N.L., 2004. "Estimating the Risk of Collisions between Bicycles and Motor Vehicles at Signalized Intersections", *Accident Analysis & Prevention*, 36(3): 313-321.

30. TAAS(교통사고분석시스템), 2021. 부문별 교통사고: 자전거 교통사고, 2020.10.21읽음. http://taas.koroad.or.kr/sta/acs/gus/selectBcyclTfcacd.do?menuId=WEB_KMP_OVT_MVT_TAS_BTT
Traffic Accident Analyses System, 2021. Traffic Accidents by Sector: Bicycle Traffic Accidents, Accessed October 21, 2020. http://taas.koroad.or.kr/sta/acs/gus/selectBcyclTfcacd.do?menuId=WEB_KMP_OVT_MVT_TAS_BTT

Date Received	2021-01-08
Reviewed(1st)	2021-02-25
Date Revised	2021-07-05
Reviewed(2nd)	2021-07-05
Date Accepted	2021-07-05
Final Received	2021-08-19