국토계획
pISSN: 1226-7147, eISSN: 2383-9171
https://doi.org/10.17208/jkpa.2026.10.61.5.5
Check for updates
Journal of Korea Planning Association Vol.61, No.5 (2026)
대한국토·도시계획학회지 「국토계획」 제61권 제5호 pp.5-18

자전거 교통사고 발생지역 예측 및 지능형 CCTV 입지 평가*

Prediction Bicycle Traffic Crash Risk Areas and Evaluating of Intelligent CCTV Locations

: A Case Study of Intelligent CCTV Location Evaluation in South Korea

김혜림**
Kim, Hye-Lim

Abstract

In recent years, bicycle-related traffic collisions have occurred more frequently with the increasing use of bicycles, which highlights an urgent need for systematic monitoring and safety measures. In contrast to vehicle traffic monitoring systems, relatively little data has been collected on bicycle traffic. To that end, the application of intelligent closed-circuit television (CCTV) to support crash prevention and response has attracted attention as a topic of considerable interest. In this study, the suitability of intelligent CCTV locations for monitoring the risk of bicycles being involved in traffic collisions was evaluated in Gimhae, South Korea. The analysis incorporated 17 variables across six categories, including population, traffic volume and speed, land use, road structure and environment, bicycle infrastructure, and data on collisions. A negative binomial regression model was applied to predict the frequency of bicycle traffic collisions. A total of 79 high-risk grids were identified based on the analysis. These were primarily concentrated in central districts such as Hoehyeon-dong with additional areas in Jangyu-dong, which indicates a need for enhanced bicycle traffic monitoring. The results of a comparison with existing intelligent CCTV locations revealed that many of the identified high-risk areas are not covered sufficiently by the field of view of currently installed CCTV systems, which highlights some notable limitations of the existing monitoring system. This study provides a set of spatial adjustments to the placement of CCTV cameras to enhance real-time collision detection and response while contributing to the development of region-specific safety measures based on accumulating additional CCTV data.

주제어 지능형 CCTV, CCTV 입지, 자전거 사고, 음이항 회귀모형
Keywords Intelligent CCTV, CCTV Locations, Bicycle Crash, Negative binomial Regression Model

Ⅰ. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

최근 세계적으로 지속가능한 도시를 실현하기 위한 다양한 정책과 노력이 추진되고 있으며, 그 일환으로 자전거가 대표적인 친환경 교통수단으로 주목받고 있다. 한국의 경우 자전거 이용을 활성화하기 위해 자전거도로를 포함한 관련 인프라를 확충하고 있으며, 그 결과 자전거도로 연장은 2019년 기준 2.38만km에서 2023년 2.68만km로 최근 5년간 약 3천km(12.7%) 증가하였다. 또한 공공자전거 대여 건수가 동일 기간 약 3천만 건에서 5.7천만 건으로 약 2.7천만 건(90%) 증가하였다(노상훈, 2024). 그러나 최

* 이 논문은 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다. (재단 과제관리번호: 2021RIS-003)
** Doctorate Candidate, Department of Urban Engineering, Gyeongsang National University (hyelim@gnu.ac.kr)

근 5년간 자전거 교통사고 건수가 총 2만 6,973건으로, 매년 5,000명 이상의 부상자가 발생하고 있어 안전한 자전거 이용을 위해 체계적인 대책 마련이 요구되고 있다(김성민, 2023).

하지만 자전거 교통사고를 예방 및 대응하기 위해 필요한 데이터 수집 및 모니터링 체계는 여전히 부족한 상황이다. 차량의 경우 차량 검지기 등을 활용하여 통행량, 속도, 대기행렬 길이 등 다양한 데이터를 수집하여 체계적으로 대처하려고 노력하고 있으나 자전거의 경우 이와 같은 체계 구축이 아직 미흡한 상황이다.

이에 행정안전부에서는 2023년 「자전거 이용 활성화 계획 수립 지침」을 마련하고, 자전거 이용의 안전을 제고하기 위한 방안으로 '자전거 통행 위험지역 조사' 지침을 신설하였다. 자전거 통행에 위험이 큰 지역에 대해 조사를 의무화하였으며, 자전거 교통사고 사망사고 발생지점과 기존의 사고다발지역을 포함한 자동차 등 다른 교통수단과 보행자의 통행량이 많고, 자전거도로 구조상 사고 위험이 높은 지점 등을 조사 대상으로 선정하도록 하였다. 즉 기존의 사고다발지역뿐만 아니라 잠재적인 사고 발생지역도 함께 조사 대상으로 선정할 것을 강조하고 있어, 자전거 사고 발생위험 요인을 체계적으로 분석하고, 사고 발생 가능성이 높은 지역을 선제적으로 파악하는 것이 필수적이다.

이때 현장 조사방식은 인력식, 기계식, 영상식 세 가지가 있으며, 지역 여건 및 조사 목적에 맞는 방법을 선정하도록 권장하고 있으나, 대개 인력식 조사 방법을 채택하고 있다. 하지만 인력식 조사는 인력, 시간, 비용 등의 제약으로 인해 조사 기간 및 위치, 항목이 제한적일 수밖에 없다(〈Table 1〉 참조). 먼저 조사 기간 및 위치 면에서 매우 한정적이기 때문에 장기적인 통행량 모니터링이 어려우며, 조사항목 면에서도 통행속도, 자전거도로 노면상태 등 다양한 항목의 데이터 수집이 요구되나 현재는 통행량 정보만 수집하고 있는 실정이다.

특히 예방 중심의 교통안전 관리를 위해서는 선제적으로 자전거 사고 발생위험을 예측하고, 위험 구간에 대해 실시간으로 자전거 안전이 관리되어야 하지만 현재로는 불가능하여 새로운 접근 방식이 요구된다. 이에 지능형 CCTV의 활용이 새로운 대안으로 주목받고 있으며, 일부 지자체에서는 지능형 CCTV를 활용한 자전거 통행 조사 가능성을 검토하고 있다. 지능형 CCTV의 딥러닝 기반 객체 인식 기능이 주목을 받고 있으며, 주간과 야간, 객체의 움직임과 관계없이 99.9%의 인식 정확도를 달성하고 있어 기존 방식의 한계를 극복할 수 있을 것으로 기대된다(원병철 2021; 변지희, 2024). 최근에는 사람, 차량, 이륜차를 구분하는 기술에서 더욱 발전하여, 이륜차를 오토바이와 자전거, 킥보드로 세분화하여 인식하는 기술까지 개발되는 등 지속적으로 고도화되고 있다.

Table 1. Field survey methods for bicycle traffic risk areas

Category	Descriptions
Period	The third Thursday of October every year
Location	Existing and newly established survey locations
Indicator	Number of bicycles

한편 한국은 2027년까지 모든 공공 CCTV를 지능형 CCTV로 전환할 계획으로 2023년 기준 이미 약 24%(13만 대)의 교체가 이루어졌으며, 단계적으로 빠르게 추진되고 있는 상황이다(김선식·손지민, 2023). 이와 같이 지능형 CCTV의 확산 속도와 기술 발전 수준 등을 고려할 때 향후 지능형 CCTV를 활용한 자전거 통행 조사 및 모니터링은 충분히 발전 가능성을 가지고 있다. 지능형 CCTV를 활용하여 조사를 진행할 경우 촬영 영상을 기반으로 실시간으로 자동차와 자전거의 통행량 및 속도, 이상 상황 등을 파악하여 분석할 수 있다. 또한 도로교통 안내 전광판 등 관련 인프라와 실시간으로 연계하여 사고 위험이 높아질 경우 운전자에게 실시간으로 사고 위험성을 알리는 등 선제적 조치가 가능하다.

다만 CCTV는 지역별로 관련 예산 및 대수가 제한되어 있어 전 지역에 촘촘한 설치가 현실적으로 불가능하다. 따라서 제한된 예산 내에서 활용성을 최대화하기 위해 도시의 사회적, 공간적 환경을 고려한 합리적인 입지 검토가 필요하다. 한편 CCTV는 설치 위치에 따라 효과가 크게 좌우되나 입지와 관련한 가이드라인이 부재한 상황으로, 일부 공무원이나 경찰서 관련자 등에 의해 자의적으로 입지가 결정되고 있어 과학적이고 논리적인 프로세스를 기반으로 CCTV 입지의 적합성을 평가할 필요가 있다.

이러한 배경하에 본 연구는 안전한 자전거 도시 조성을 목표로, 사례지역 한국 김해시를 대상으로 지능형 CCTV를 활용한 자전거 교통사고다발지역 및 위험 구간의 모니터링 방안을 제안하고자 한다. 이를 위해 도시 공간 데이터를 활용하여 자전거 교통사고 발생위험지역을 예측하고, 해당 지역을 중심으로 지능형 CCTV 입지를 평가하는 방안을 제시하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 내용

본 연구는 김해시를 대상으로 자전거 교통사고다발지역 및 위험 구간의 효과적인 모니터링을 위해 현재 지능형 CCTV 입지의 적합성을 평가하고자 한다. 김해시는 인구 51.5만 명, 면적 463.6km²의 중소도시로, 스마트도시 건설을 촉진하기 위해 객체 및 이벤트 인식이 가능한 지능형 CCTV의 설치 및 운영에 적극적인 도시이다. 2024년 7월 기준 김해시에 설치되어 있는 지능형 CCTV는 총 2,081대로, 인구 1천 명당 4.04대, 면적 1km²당 4.49대에 해당하며, 전국 평균(3.35대/천 명, 1.74대/km²)보다 높은 보급 수준을 보인다.

한편 김해시는 자전거 이용 활성화를 위한 다양한 정책과 사업을 지속적으로 추진하고 있으며, 자전거도로 확충, 자전거 이용 활성화 계획 수립 등 자전거 중심 교통 환경 조성에 적극적인 지역이다. 그러나 최근 3년간 총 530건의 자전거 교통사고가 발생

하는 등 자전거 이용 증가에 따른 안전 문제도 함께 나타나고 있어 사고 예방을 위한 체계적인 모니터링의 필요성도 제기되고 있다(박준언, 2024). 또한 김해시는 자전거 및 개인형 이동수단 관련 지능형 CCTV 학습용 데이터 구축 사업을 추진하는 등 관련 기술 적용 기반도 갖추고 있다.

이러한 점을 종합적으로 고려하여 본 연구는 김해시의 도시지역을 연구 대상지로 선정하였으며, 자전거가 통행 가능한 도로망을 기준으로 총 7,814개 격자(100×100m)를 분석의 공간적 범위로 설정하였다(〈Figure 1〉 참조). 지능형 CCTV는 방범, 교통관리, 재난 대응, 쓰레기 불법투기 방지 등 다양한 목적으로 설치되며, 목적에 따라 설치 위치, 높이, 각도, 성능 등이 달라진다. 본 연구는 자전거 교통사고 예방 및 대응을 위한 데이터 수집과 모니터링을 주요 목적으로 하고 있으므로 이에 적합한 지능형 CCTV에 한하여 입지의 적합성을 평가하고자 한다.

이를 위해 기존의 교통사고 발생지점을 확인하고, 해당 지점의 공간적 특성을 분석하여 잠재적으로 사고 위험이 높은 지역을 예측하였다. 예측 결과를 바탕으로 자전거 사고 예방과 실시간 모니터링 측면에서 기존 지능형 CCTV 입지의 적합성을 평가하였으며, 기존 지능형 CCTV 설치 위치 및 인력식 조사지점의 위치를 비교하여 현재 조건에서 조사와 모니터링이 원활히 이루어질 수 있는지, 혹은 위치 조정이 필요한지 파악하고자 하였다.

연구의 전체적인 흐름은 다음과 같다. 1장에서 연구의 배경 및 목적, 연구 범위 및 방법을 결정하고, 2장에서 선행연구를 통해 자전거 교통사고 발생 영향 요인을 검토하였다. 3장에서는 데이터 구축 및 입지 분석 방법을 확정하였으며, 4장에서는 자전거 교통사고 발생위험 예측 모형의 구축 결과와 이를 기반으로 한 지능형 CCTV 입지 적합성 평가 결과를 제시하였다. 마지막으로 5장에서는 연구의 주요 결과를 요약하고, 향후 연구 방향을 논의하였다.

II. 자전거 교통사고 영향 요인

자전거 교통사고 예방 및 대응을 위한 연구는 다양한 요인들을 고려하여 진행되고 있다. 본 연구에서는 선행연구를 검토하여 자전거 사고 발생 영향 요인을 분석하고, 이를 고려하여 자전거 교통사고 예측 모형을 구축하고자 하였다. 관련 연구들은 대개 자전거 교통사고 발생 빈도 또는 사고의 위험성 및 피해 정도에 영향을 미치는 요인을 분석하였으며, 이를 정리해 보면 〈Table 2〉와 같이 통행량 및 속도, 인구 및 사회적 지표, 토지이용 및 건축물 용도, 도로 구조 및 환경, 자전거도로 구조, 기타 요인으로 분류할 수 있다(〈Table 2〉 참조).

1. 통행량 및 속도

자전거 사고 발생에는 차량, 자전거, 보행자 등의 통행량 및 속도가 중요한 역할을 한다. 먼저 차량 통행량 및 속도는 대부분의 연구에서 자전거 사고 영향 요인으로 고려하고 있으나 연구 결과는 일관되지 않은 것으로 파악되었다. Hadayeghi et al.(2003)과 Cai et al.(2016)의 연구에서는 차량주행거리가 증가할수록 교통사고 발생 건수가 증가하는 것으로 나타났으나 Ding and Sze (2022)의 연구에서는 차량 교통량이 자전거-차량 충돌과 음의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 한편 사고의 심각도 측면에서는 통행량이 적은 도로에서 발생한 자전거 사고가 더 심각한 부상으로 이어질 가능성이 높은 것으로 분석되었다(Myhrmann et

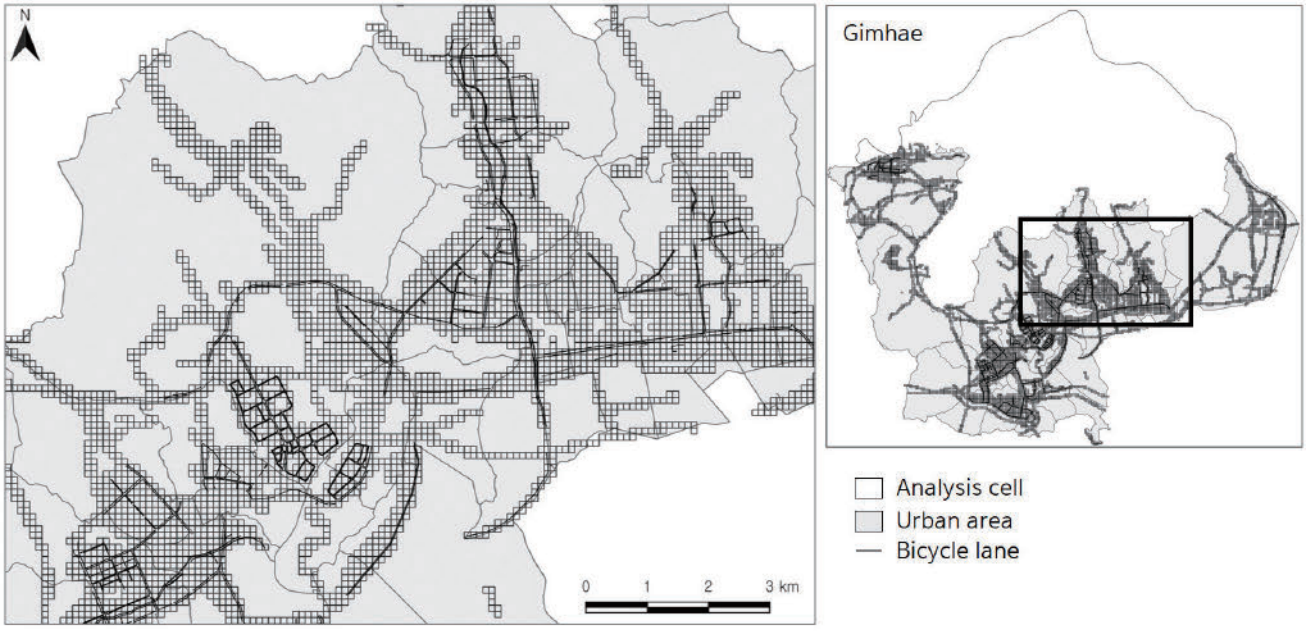


Figure 1. Study area

Table 2. Review of factors influencing bicycle crash

Researcher	Traffic volume and Speed	Demographic and Social indicators	Land use and building	Road structure and environment	Bicycle lane and infrastructure
Hadayeghi et al. (2003)	•	•		•	
Carter et al. (2007)	•			•	•
Vandenbulcke-Plasschaert (2011)	•		•	•	•
Van Cauwenberg et al. (2012)	•	•	•	•	•
Wei and Lovegrove (2013)			•	•	•
Kwon et al. (2015)				•	
Shariat-Mohaymany et al.(2015)	•	•		•	
Ferrer and Ruiz (2018)		•	•	•	•
Cai et al. (2016)		•	•	•	•
Kim and Park (2017)	•	•	•		•
Oh (2018)		•	•	•	
Wang and Akar (2018)	•	•	•	•	
Raihan et al. (2019)	•		•	•	•
Morrison et al. (2019)	•			•	•
Ding et al. (2020)	•	•	•	•	•
Russell et al. (2021)	•	•	•		•
Myhrmann et al. (2021)	•	•		•	•
Yang et al. (2021)	•	•	•	•	
Hwang and Lee (2021)	•	•	•	•	•
Ding and Sze (2022)	•	•	•	•	
Abbasi and Ko (2024)		•	•	•	•

al., 2021). 교통량이 적을수록 자전거 이용자가 더 빠른 속도로 주행하는 경향이 있으며, 이에 따라 사고 시 충격이 커지는 것으로 확인되었다.

또한 자전거 통행량 측면에서 Cai et al.(2016)의 연구에 따르면 자전거 이용자가 많을수록 사고 발생 가능성이 높아지는 것으로 나타났으며, Raihan et al.(2019)의 연구 결과에 따르면 자전거 이용률이 높은 수준인 교차로에서의 사고 발생 확률이 자전거 이용량이 낮은 교차로에 비해 약 3배로 증가하는 것으로 나타났다. 또한 Ding and Sze(2022)은 자전거 사고의 유형을 자전거-차량 충돌, 자전거-자전거 충돌로 나누어 분석하였는데, 자전거 이용량은 두 가지 사고 유형 모두와 양의 상관관계를 보이는 것으로 분석되었다. 보행량 측면에서는 Cai et al.(2016)의 연구 결과 보행자가 많을수록 사고 발생 가능성이 높아지는 것으로 나타났다.

2. 인구 및 사회적 지표

Hadayeghi et al.(2003)과 Cai et al.(2016), Ding et al.(2020)의 연구 결과에 의하면 인구밀도, 가구 인구, 고용 인구가 많을수록 교통사고 발생 건수 및 가능성이 증가하는 것으로 나타났다. Cai et al.(2016)은 고용 인구를 산업유형에 따라 나누어 사고 발생과 상관관계를 분석하였는데, 연구 결과 특히 서비스업 종사자 비율이 높을수록 사고 발생 가능성이 증가하는 것으로 분석되었다.

한편 연령대 측면에서는 김태양·박병호(2017)의 연구 결과, 고령인구 비율과 고령자 자전거 이용률이 높을수록 사고 건수가 증가하는 것으로 나타났다. Ding et al.(2020) 또한 고령인구 비율이 증가할수록 자전거 사고 발생 빈도가 증가하며, Myhrmann et al.(2021) 연구 결과, 고령 남성의 경우 사고 발생 시 부상의 심각도도 높은 경향이 있는 것으로 나타났다.

사회경제적 요인 측면에서는 Ding and Sze(2022)의 연구 결과, 가구소득이 자전거-차량 충돌, 자전거-자전거 충돌과 양의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 가구소득이 중~고 수준인 지역에서 자전거 이용률이 높아지면서 사고 발생 가능성이 증가하는 것으로 분석되었다. Ding et al.(2020)의 연구에서도 중간소득 가구가 100% 증가할 때, 자전거 사고 발생 빈도가 19% 증가하는 것으로 나타났다.

3. 토지이용 및 건축물 용도

토지이용의 경우 Cai et al.(2016)은 도시지역까지의 거리가 사고 발생에 미치는 영향을 분석하였는데, 연구 결과 도시지역까지의 거리가 먼 지역일수록 사고 발생 가능성이 감소하는 것으로 나타났다. 보다 세부적으로 용도지역의 영향을 분석한 연구도 있었다. 용도지역의 경우 대개 주거지역(Ferrer and Ruiz, 2018; Wang and Akar, 2018; Ding et al., 2020; Ding and Sze, 2022)과 상업지역(Ferrer and Ruiz 2018; Wang and Akar, 2018; Raihan et al., 2019; Ding et al., 2020; Russell et al., 2021; Abbasi and Ko, 2024) 면적을 가장 많이 활용하고 있으며, 일부 업무지역(Ding and Sze, 2022; Abbasi and Ko, 2024) 또는 녹지지역(Ding et al., 2020; Ding and Sze, 2022), 농업지역(김태양·박병호, 2017) 면적을 고려한 연구도 있었다.

용도지역별 영향 요인 분석 결과를 요약하면 먼저 Ding and Sze(2022)의 연구 결과, 다른 지역에 비해 주거지역에서 자전거-차량 충돌 발생 빈도가 낮은 것으로 나타났다. 반면 Ding et al.(2020)의 연구 결과, 상업지역과 녹지지역의 비율이 증가할수록 자전거 사고 발생 빈도도 증가하는 것으로 나타났다. 상업지역의 경우 도로변 승하차 활동이 잦고, 녹지지역의 경우 해당 지역에 여가 목적의 비숙련 자전거 이용자의 방문이 많아 사고 발생 가능성이 높아지는 것으로 분석되었다.

건축물 용도와 관련해서는 Vandenbulcke-Plasschaert (2011)의 연구 결과, 행정시설, 쇼핑센터, 문화시설, 병원 근처에서는 차량 속도가 제한되기 때문에 자전거 사고의 심각도가 낮아지는 경향이 있는 것으로 나타났다. 다만 사고로 인한 부상의 정도가 경미하기 때문에 경찰에 신고되지 않는 비율이 높아 사고 발생 빈도와의 상관관계를 정확하게 판단하기 어려운 것으로 나타났다.

Cai et al.(2016)은 호텔, 모텔 등 숙박업소 밀도가 교통사고 발생 빈도에 미치는 영향을 분석하였으며, 해당 시설의 밀도는 보행자 사고 발생 빈도에는 영향을 미치나 자전거 사고 발생 빈도에는 유의미한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 Raihan et al.(2019)은 주류 판매시설이 많을 경우 음주 운전과 관련하여 사고 발생이 증가할 것으로 판단하여 상관관계를 분석하였으나 분석 결과 통계적으로 유의미한 상관관계를 가지지 않는 것으로 나타났다. Abbasi and Ko(2024)는 아파트 밀도와 자전거 사고와 상관관계를 분석하였으며, 분석 결과 지역에 따라 상관관계가 달라지는 이질적인 특징을 가지는 것으로 나타났다. 이는 지역별 주행속도, 신호등 및 횡단보도, 보호구역 등 도로 안전시설의 밀도 등의 차이로 인한 결과로 분석되었다.

4. 도로 구조 및 환경

도로 구조는 대개의 연구자들이 교통사고 영향 요인으로 고려하고 있다. 먼저 도로밀도 및 길이 측면에서 Cai et al.(2016)과 Ding et al.(2020)의 연구 결과, 도로밀도가 높을수록 사고 발생 가능성이 높아지는 것으로 나타났다. 특히 Ding et al.(2020)의 연구 결과에 따르면 도로밀도가 100% 증가할 때, 자전거 사고 발생 건수가 28% 증가하는 것으로 나타났다. 도로밀도가 증가할 경우 자전거와 차량 간의 잠재적인 상호작용이 증가하기 때문에 사고 발생 확률의 증가로 이어지는 것으로 분석하였다.

또한 도로 폭 및 길이 측면에서 Hadayeghi et al.(2003)의 연구 결과, 도로의 길이가 길수록 교통사고 발생 건수가 증가하는 것으로 나타났으며, Cai et al.(2016)의 연구 결과에 따르면 보행자도로 또한 길이가 길수록 사고 발생 가능성이 높아지는 것으로 나타났다. 차선폭은 Raihan et al.(2019)의 연구 결과, 차선폭이 12피트(약 3.66m) 미만인 좁은 차선에서 자전거 사고 발생 확률이 72% 증가하는 것으로 나타났다.

교차로도 많은 연구에서 사고 영향 요인으로 분석되고 있으며, Hadayeghi et al.(2003)과 Cai et al.(2016)의 연구 결과, 교차로 밀도가 증가할수록 교통사고 발생 건수가 증가하는 것으로 나타났다. 다만 Ding and Sze(2022)의 연구 결과, 교차로 밀도의 경우 자전거-차량 충돌과는 양의 상관관계를 보이나, 자전거-자전거 충돌과는 음의 상관관계를 보이는 것으로 확인되었다. 즉 교차로가 많을수록 차량과 자전거 간의 충돌 가능성은 증가하지만, 자전거 간 충돌은 오히려 줄어들 가능성이 있음을 의미한다.

차량 제한 속도 측면에서는 Hadayeghi et al.(2003)과 Raihan et al.(2019)의 연구 결과, 제한 속도가 높을수록 사고 발생 건수가 감소하는 것으로 나타났다. 특히 Raihan et al.(2019)의 연구 결과, 제한 속도가 높은 도로 구간에서 자전거 사고 발생 확률이 6% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 traffic signal과 street light 등의 설치 여부 등도 고려하고 있다. Raihan et al.(2019)의 연구 결과, 신호체계를 갖춘 교차로에서 자전거 사고 발생 확률이 31% 감소하는 것으로 나타났다.

도로 환경은 포트홀 등 도로 표면 손상과 결함, 파손 등 노면 상태와 노면의 미끄러운 정도, 도로 유지보수 수준 등이 추가적으로 분석되었다(Raihan et al., 2019; Myhrmann et al., 2021; Yang et al., 2021). Myhrmann et al.(2021)의 연구 결과, 유지 관리가 제대로 이루어지지 않은 자전거도로가 있는 도로 구간에서 사고가 발생할 경우, 사고 심각도가 증가할 가능성이 있는 것으로 나타났다. 적절하게 설계되고 유지 관리된 자전거 인프라는 자전거 사고 위험을 줄이는 역할을 하나 도로 폭 및 시설의 연속성 등의 면에서 부적절하게 설계되거나 유지보수가 부족한 인프라는 자전거 사고 위험을 증가시킬 가능성이 있는 것으로 나타났다(McClintock and Cleary, 1996).

5. 자전거도로 구조

자전거도로의 구조와 관련해서는 자전거도로 차선 수(Carter et al., 2007; Vandenbulcke-Plasschaert, 2011; Russell et al., 2021; Myhrmann et al., 2021) 또는 연장(Vandenbulcke-Plasschaert, 2011; Wei and Lovegrove, 2013; Cai et al., 2016; Raihan et al., 2019; Ding et al., 2020), 자전거도로 유형(Van Cauwenberg et al., 2012; Morrison, et al., 2019; Abbasi and Ko, 2024) 등을 사고 발생 영향 요인으로 고려하고 있다.

주요 연구 결과를 살펴보면 McClintock and Cleary(1996)과 Pucher et al.(1999) 등 많은 연구에서 차량과 자전거가 혼재하는 일반도로보다 자전거도로에서 자전거를 타는 경우 오히려 사고 위험이 높을 수 있는 것으로 나타났다. Vandenbulcke-Plasschaert(2011)은 분리형 자전거도로가 자전거 이용자의 가시성을 감소시키고, 잘못된 안전감을 제공할 위험이 있으며, 특히 교차로에서 운전자들이 자전거를 예상하지 못하는 경우 사고 위험이 높아질 수 있다고 주장하였다.

하지만 부상의 심각도 측면에서는 자전거도로보다 자동차도로에서 발생한 자전거 단독 사고의 심각도가 증가할 가능성이 있는 것으로 나타났다(Myhrmann et al., 2021). 혼합교통 환경에서는 차량과의 상호작용과 자전거 속도가 사고의 부상 심각도에 영향을 미치기 때문이다. 이에 Myhrmann et al.(2021)는 자전거도로 네트워크의 확장이 전체적인 자전거 사고 발생률과 사고의 심각도를 낮추는 효과가 있다고 주장하였다.

6. 기타 요인

기타 요인으로는 대개 버스나 트램, 지하철, 철도 등 대중교통 정류장의 밀도(Vandenbulcke-Plasschaert, 2011; Wei and Lovegrove, 2013; Raihan et al., 2019; Ding and Sze, 2022), 노선(Vandenbulcke-Plasschaert, 2011; Morrison, et al., 2019) 등을 고려하고 있다. Vandenbulcke-Plasschaert(2011)의 연구 결과, 대중교통 정류장의 존재가 사고다발지점 형성에 기여할 가능성이 높은 것으로 나타났으며, Raihan et al.(2019)의 연구 결과, 교차로 영향권 내 버스 정류장이 3개 이상 존재할 경우 자전거 사고 발생 확률이 61% 증가하는 것으로 나타났다. Ding and Sze(2022)의 연구 결과도 이와 유사하였으며, 철도역 밀도가 높을수록 자전거-자전거 충돌이 많은 것으로 나타났다.

Ⅲ. 변수 및 분석모형 선정

1. 변수 선정

1) 데이터 구축

본 연구에서는 선행연구 검토 결과를 바탕으로 자전거 교통사고 발생위험지역의 예측을 위한 변수를 선정하고, 관련 데이터를 구축하였다. 본 연구에서는 분석 단위를 100×100m 격자로 설정하였으며, 이는 도시 내 자전거 교통사고 발생위험의 공간적 분포를 체계적으로 파악하고, 다양한 형태의 공간 데이터를 통합적으로 분석하기 위함이다. 기존 연구에서 사고의 공간적 분포를 정확히 파악하기 위해서는 일관된 구조와 균일한 형태를 갖는 공간 분할 방식이 필요함이 지적된 바 있다(Li et al., 2026). 이에 따라 본 연구에서는 격자 기반 분석 단위를 적용하였다.

종속변수는 자전거 교통사고 건수, 독립변수는 인구, 통행량 및 속도, 토지이용, 도로 구조 및 가로환경, 자전거도로 및 인프라, 자전거 교통사고 등 총 6개 항목 17개 변수로 구성하였다(〈Table 3〉 참조). 자전거 교통사고 건수는 2021~2023년 김해시 시민 자전거 보험금 지급 현황 데이터로부터 발생지점을 지오코딩하여 활용하였다. 김해시 자전거 사고 발생지역은 〈Figure 2〉와 같으며, 김해시의 중심 시가지(내외동 및 회현동) 및 외곽 일부 지역(진영, 장유, 대동)의 특정 구역에서 주요 도로를 중심으로 집중적, 반복적으로 나타나는 특성을 보였다.

자전거 사고 위험지역 선정 시 자전거 외 보행자, 차량 통행량 및 속도도 주요 고려 사항이기 때문에 이를 반영하고자 하였다. 유동인구는 통신사의 2024년 1월(평상시), 5월(축제기간) 데이터를 활용하였으며, 이 데이터는 50×50m 격자 단위 데이터로, 100×100m 격자로 재구성하여 합산하였다.

통행량 및 속도는 자동차와 자전거를 대상으로 정리하였으며, 자동차는 도로별 일평균 통행량과 운영속도 데이터를 활용하였다. 해당 데이터는 조사지점 단위의 포인트 자료로, 조사지점별 최근접 도로에 할당한 후 도로 단윗값을 산출하고, 이를 다시 격자 내 포함된 도로들의 평균값으로 집계하였다.

자전거 통행량은 전수 조사가 부재한 상황에서 본 연구에서는 김해시의 공공자전거 이용 실태 데이터를 활용하여 자전거 통행량을 추정하였다. Chung et al.(2024)의 연구에 따르면, 개인 자전거는 주로 여가 목적으로 공원이나 강변 등에서 사용되며, 공공자전거는 주로 통근 및 통학을 위해 주거지, 상업 및 비즈니스 지역을 중심으로 사용되는 경향이 있다. 김해시의 경우 자전거 교통사고가 주거, 상업, 업무 지역에서 주로 발생하는 경향이 있기 때문에 공공자전거 이용 데이터는 사고다발지역의 교통 패턴을 효과적으로 반영할 수 있는 유용한 자료로 판단된다. 해당 데이터는 자전거 이용 건수별 일시, 출발 및 도착 대여소 정보가 포함되어 있으며, 정확한 이동 경로를 파악할 수는 없다. 이에 본 연

Table 3. Variables and data sources

Category	Variables		Description	Original unit	Data source
Bicycle crash			Annual average number of bicycle crashes	Counts (point-based)	Gimhae
Population	Floating population		Daily average floating population	Persons per 50×50 m grid	SKT telecom
Traffic volume and speed	Car traffic volume		Daily average vehicle traffic volume	Vehicles/day (point-based)	Molit statistics system
	Car speed		Maximum vehicle speed	km/h(point-based)	National Transport Information Center
	Bicycle traffic volume		Public bicycle usage records (3-month)	Trip counts (OD-based)	Gimhae
Land use	Residential, commercial buildings		Area of residential, commercial buildings	m^2 (polygon-based)	Public data portal
Road structure and environment	Traffic control devices		Number of traffic lights, crosswalks, speed bumps	Counts (point-based)	
	Intersection		Number of intersections	Counts (polygon-based)	National Geographic Information Institute
	Lanes	Single	Number of single-lanes	Counts of road segments (line-based)	
		Two	Number of two-lanes		
		Three, four	Number of three or more lanes		
	Width	Minor	Number of roads less than 12 m wide		V-WORLD
		Medium	Number of roads less than 12 & 25 m wide		
		Major, wide	Number of roads 25 or more		
	Sidewalk		Number of sidewalks		National Geographic Information Institute
Bicycle road and infrastructure	Bicycle road		Number of bicycle roads		
	Amenity		Number of public bicycle rental stations, bicycle parking lots and bicycle air pump stations	Counts (point-based)	Gimhae

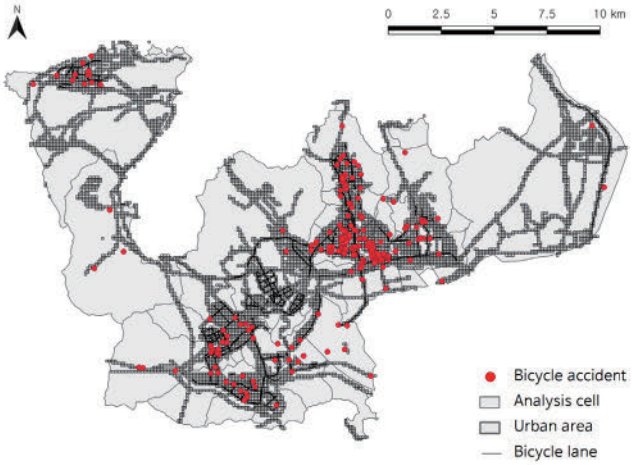


Figure 2. Bicycle crash in Gimhae City

구에서는 출발지-도착지 데이터를 기반으로 최단 경로를 가정한 네트워크 분석을 통해 이동 경로를 추정한 후, 해당 경로와 중첩되는 격자에 이용 건수를 누적하는 방식으로 자전거 통행량 데이터를 구축하였다.

다음으로 토지이용 및 가로환경 데이터를 구축하였다. 먼저 토지이용은 대개의 연구에서 활용된 주거, 상업용 토지이용을 고려하고자 하며, 수치지도 상 건물 폴리곤 데이터와 공공데이터포털의 김해시 건축물 현황 자료상의 건축물 용도 데이터를 활용하여 격자별 주거용, 상업용 건물의 면적을 산출하여 정리하였다.

도로 구조 및 가로환경은 자전거 교통사고 발생에 직접적인 영향을 미치는 요인이다. 이에 교통제어장치(신호등, 횡단보도, 과속 방지턱), 교차로, 차로 수, 도로 폭, 인도 폭 데이터를 구축하였다. 먼저 교통제어장치는 격자별 설치된 장치 수를 카운팅하였다. 교차로는 수치지도의 교차로 레이어 폴리곤 자료를 활용하였으며, 격자별 중첩되는 교차로 수를 카운팅하였다. 차로 수와 도로 폭은 수치지도의 도로 중심선 레이어를 기반으로 각각 차로 수, 도로 폭을 기준으로 레이어를 구분한 후 격자와 중첩되는 도로의 개수를 카운팅하였다. 보행자도로 수는 수치지도의 인도 레이어를 활용하여, 격자별 중첩되는 보행자도로 구간 수를 카운팅하였다.

마지막으로 자전거 인프라에 관련되는 자전거도로는 수치지도의 인도 레이어를 기반으로 자전거도로 유무를 기준으로 레이어를 추출하고, 격자별로 중첩되는 자전거도로 구간 수를 산출하였

다. 자전거 편의시설 공공자전거 대여소, 자전거 주차장, 자전거 공기주입기를 대상으로 하였으며, 격자별 세 가지 시설의 합계를 카운팅하였다.

2) 기초통계 분석

독립변수 검토 결과, 자전거 통행량, 교차로 수, 자전거 인프라 세 가지 변수는 0 값의 비율이 90% 이상으로 나타났다. 이와 같이 0 값이 많은 변수는 연속변수로 활용할 경우 회귀모형에서 변수의 효과를 안정적으로 추정하기 어렵기 때문에 세 변수는 더미변수로 변환하였다. 또한 그 외 대부분의 변수는 우측 왜도를 나타내어 로그 변환을 통해 분포를 안정화하였다(식 (1) 참조).

$$x' = \log(x+1) \quad (1)$$

변수 17종의 기초통계 분석 결과는 〈Table 4〉와 같다. 먼저 종속변수는 평균이 0.0394, 분산이 0.3586으로 과분산이 존재함을 확인하였다. 독립변수의 값의 범위는 유동인구(0~3.4951)와 차량 통행량(0~5.0899), 토지이용(0~4.4573) 변수를 제외하고 대부분이 0~2 수준으로 로그 변환으로 분포가 안정화된 것으로 판단된다. 또한 더미변수의 경우 특정 범주의 빈도가 과도하게 낮을 경우 계수 추정의 안정성이 저하될 수 있으나 본 연구에서 더미변수로 변환한 자전거 통행량, 교차로 수, 자전거 인프라 변수는 값이 1인 비율이 각각 6.1684%, 4.2104%, 2.0092%로 나타나 통계적 분석에 문제가 없는 것으로 판단하였다.

3) 다중공선성 검토

독립변수 16종의 다중공선성 문제를 검토하기 위해 분산팽창지수(Variance Inflation Factor, VIF)를 분석하였다(〈Table 5〉 참조). 대부분 변수의 분산팽창지수(Variance Inflation Factor, VIF)가 2 이하로 나타났으나 차량 통행량과 차량 통행속도는 VIF가 각각 9.5212, 10.0638로 다중공선성 문제가 있었다.

상관성 분석 결과, 두 변수의 상관계수는 0.9393으로 높아 두 변수 중 1개 변수만 분석에 포함하고자 하였다. 이에 두 변수를 제외한 14개 변수는 공통으로 포함하고 두 변수 각각을 포함한 모델을 추정하여 AIC(Akaike Information Criterion)를 비교하였다. 그 결과, 차량 통행량 변수를 포함한 모형의 AIC는 1681.495, 차량 속도 변수를 포함한 모형의 AIC는 1681.437로 값이 거의 동일하여 두 모형의 설명력이 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다.

Table 5. Multicollinearity test results using VIF

Variables	VIF	Variables	VIF
Floating population	2.0850	Two-lane	1.5212
Car volume	9.5212	Three, four-lane	1.9535
Car speed	10.0638	Width-minor	1.7934
Bicycle volume	1.1179	Width-medium	1.5041
Land use	1.9209	Width-major, wide	1.5054
Control device	1.5984	Sidewalk	2.5166
Intersection	1.1370	Bicycle roads	1.5479
Single-lane	1.2009	Bicycle amenity	1.0637

Table 4. Descriptive statistics

Variables	Mean	Std. Dev	Min	Max
Floating population	1.2269	0.7703	0.0000	3.4951
Car volume	3.9713	1.5175	0.0000	5.0899
Car speed	1.5255	0.5909	0.0000	2.0453
Bicycle volume	0.0617	0.2406	0.0000	1.0000
Land use	1.5354	1.5512	0.0000	4.4573
Control device	0.1158	0.2133	0.0000	1.1139
Intersection	0.0421	0.2008	0.0000	1.0000
Single-lane	0.4924	0.4422	0.0000	1.7853
Two-lane	0.3212	0.3750	0.0000	1.5051
Three, four-lane	0.2396	0.3114	0.0000	1.2788
Width-minor	0.2026	0.2589	0.0000	1.0414
Width-medium	0.1530	0.1844	0.0000	0.8451
Width-major, wide	0.1086	0.1535	0.0000	0.6990
Sidewalk	0.3381	0.3705	0.0000	1.6902
Bicycle roads	0.1141	0.2158	0.0000	1.0792
Bicycle amenity	0.0201	0.1403	0.0000	1.0000
Bicycle crash	0.0394	0.3586	0.0000	46.0000

이에 본 연구는 차량 속도는 사고 발생 가능성 자체보다는 사고 심각도 분석에 적절한 변수라 판단하여 해당 변수를 제외한 총 15종의 변수를 최종 독립변수로 선정하였다(권철우·장현호, 2021).

2. 분석모형 선정

본 연구에서는 안전한 자전거 도시 조성을 목표로, 격자 단위의 자전거 교통사고 발생 건수를 예측하고, 사고 발생위험이 높은 지점에 대한 자전거 교통사고 예방 및 모니터링 관점에서 지능형 CCTV 입지의 적합성을 평가하고자 한다. 이를 위해 자전거 교통사고 발생위험 예측 모형을 구축하였으며, 독립변수로 인구, 통행량 및 속도, 토지이용, 가로환경, 자전거 인프라 등 도시공간 요인, 종속변수로 연평균 자전거 교통사고 발생 건수를 설정하였다. 예측 모형 개발에는 회귀분석을 활용하고자 하였으며, 이때 종속변수 데이터의 특성을 고려하여 분석에 적합한 회귀모형을 결정하였다.

자전거 교통사고 건수와 같은 계수 자료(count data)를 분석하기 위한 대표적인 모형으로는 포아송 회귀모형(Poisson regression model)과 음이항 회귀모형(negative binomial regression model)이 있다. 포아송 회귀모형은 종속변수가 포아송 분포를 따른다고 가정하며, 그 기댓값이 독립변수의 선형결합으로 설명된다고 가정하는 모형이다(de Jong and Heller, 2008). 포아송 회귀모형은 평균과 분산이 같아야 한다는 가정을 전제로 하며, 실제 교통사고 데이터는 분산이 평균보다 큰 과대산포가 빈번하게 나타난다. 이러한 경우 회귀계수의 표준오차가 과소추정되는 문제가 발생할 수 있다(정재풍·최종후, 2014). 이는 종속변수가 포아송분포와 감마분포의 혼합에 의해 생성된 음이항분포를 따른다고 가정하는 음이항 회귀모형을 활용함으로써 해결할 수 있다.

한편 사고 미발생 격자가 다수 존재한다는 점을 고려할 때 영과잉 음이항 회귀모형(zero-inflated negative binomial regression model)을 분석모형으로 고려할 수 있다. 그러나 본 연구의 분석 대상은 자전거 통행이 가능한 도로망을 중심으로 구축된 격자로, 자전거 통행 자체가 구조적으로 불가능한 영역(structural zero)에 해당하는 경우는 제한적인 것으로 판단하였다. 즉 사고가 발생하지 않은 대부분의 격자는 사고 발생 가능성이 원천적으로 배제된 구조적 0이라기보다는 관측 기간 동안 우연히 사고가 발생하지 않은 표본적 0(sampling zero)에 해당하는 것으로 해석하였다. 이에 해당 모형은 본 연구에서는 영 과잉 음이항 회귀모형보다 과대산포 특성을 반영할 수 있는 음이항 회귀모형이 보다 적합하다고 판단하였다.

본 연구에서는 포아송 회귀모형과 음이항 회귀모형 각각 구축 후 AIC, 로그 우도(log-likelihood), 과대산포 여부를 비교하여 적합한 분석모형을 선정하였다. AIC는 포아송 회귀모형(2037)보다 음이항 회귀모형이(1681)이 더 낮았으며, 로그우도는 포아송 회귀모형(-1002.567)보다 음이항 회귀모형(-823.748)이 더 높은 값을 보여 두 지표 모두에서 음이항 회귀모형이 상대적으로 우수한 적합도를 보였다. 또한 포아송 회귀모형의 경우 과대산포 지표가 2.079로 나타나 분산이 평균보다 큰 과대산포가 존재함을 확인하였으며, 이는 모형 적용에 한계가 있음을 의미한다. 반면 음이항 회귀모형은 과대산포를 설명하는 분산 모수인 theta 값이 0.1432로 추정되어 자료의 분산 구조를 보다 적절히 반영하는 것으로 나타났다.

한편 자전거 교통사고 발생지는 공간자기상관성이 존재할 가능성이 있어 이를 설명할 수 있는 모형도 고려가 필요하다. 이에 본 연구는 Moran's I를 활용하여 공간자기상관성을 검증하였다. 먼저 종속변수의 공간자기상관성을 확인한 결과 Moran's I는 0.059($p = 2.2e-16$)로 나타나 약한 양의 공간자기상관이 존재하는 것으로 확인되었다. 다음으로 음이항 회귀모형이 이러한 공간적 패턴을 충분히 설명하는지 검토하기 위해 모형의 잔차의 Moran's I를 산출하였다. 그 결과 Moran's I는 0.016($p = 0.008$)로 통계적으로 유의한 양의 공간자기상관이 나타났으나, 그 크기가 작아 실질적인 공간의존성은 제한적인 것으로 판단하였다. 이에 본 연구에서는 공간적 자기상관을 추가적으로 고려한 모형을 적용하기보다는 음이항 회귀모형을 자전거 교통사고 발생위험 예측 모형으로 최종 선정하였다. 다만 잔차의 공간자기상관이 완전히 제거되지 않았다는 점에서 계수의 표준오차 및 통계적 유의성 해석에 일부 한계가 있을 수 있다.

Ⅳ. 분석결과

1. 자전거 교통사고 영향 요인 분석결과

자전거 교통사고 영향 요인을 분석한 결과는 〈Table 6〉과 같다. 차량 통행량($p = 0.799$)과 2차로 수($p = 0.235$), 소로 수($p = 0.863$) 세 가지 변수는 p값이 0.05 이상으로 자전거 교통사고 발생에 통계적으로 유의한 영향을 미치지 않는 요인으로 확인되었다. 그 외 12개 요인은 통계적 유의성을 확보하였으며, 유동인구(Estimate = 1.539), 자전거 통행량(Estimate = 1.026), 토지이용(Estimate = 0.326), 교통제어장치(Estimate = 1.535), 교차로(Estimate = 0.758), 자전거도로(Estimate = 1.087), 자전거 편의시설(Estimate = 1.265)은 자전거 교통사고 발생에 유의미한 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면 3, 4차로 수(Estimate = -0.755), 중로 수(Estimate = -1.223), 대로 및 광로 수(Estimate = -1.762), 보행자도로 수(Estimate = -0.729)는 음(-)의 영향을 미치는 것으로 나타났다.

따라서 자전거 교통사고는 유동인구와 자전거 교통량이 많고, 교통시설 및 도시활동이 집중된 지역에서 발생 가능성이 높은 것

Table 6. Negative binomial regression for frequency of bicycle crash

Variables	Estimate	Std.Error	z	p
(Intercept)	-6.625	0.415	15.947	<2e-16***
Floating population	1.539	0.179	8.615	<2e-16***
Car volume	0.018	0.072	0.255	0.799
Bicycle volume	1.026	0.226	4.530	5.89e-06***
Land use	0.326	0.086	3.816	0.000***
Control device	1.535	0.392	3.919	8.90e-05***
Intersection	0.758	0.297	2.551	0.011*
Single-lane	-0.405	0.217	-1.868	0.062'
Two-lane	-0.307	0.259	-1.187	0.235
Three, four-lane	-0.755	0.364	-2.071	0.038*
Width-minor	0.072	0.417	0.173	0.863
Width-medium	-1.223	0.584	-2.095	0.036*
Width-major, wide	-1.762	0.735	-2.398	0.016*
Sidewalk	-0.729	0.340	-2.143	0.032*
Bicycle roads	1.087	0.408	2.667	0.008**
Bicycle amenity	1.265	0.2907	4.352	1.35e-05***

Significance: *** 0, ** 0.001, * 0.01, ' 0.05

으로 해석된다. 즉 보행자, 자전거, 차량 간 상호작용이 활발하게 이루어지는 도시 활동 중심지에서 자전거 교통사고 발생위험이 증가하는 것으로 해석된다. 한편 차선 수, 도로 폭 등 도로 규모 관련 변수는 모두 음의 계수를 보였으며, 차로 수와 도로 폭이 증가할수록 계수의 절댓값이 커지는 경향이 나타났다. 이는 도로 규모가 클수록 차량 중심의 통과 교통 기능이 강화되고 자전거 이용이 상대적으로 제한되는 반면, 소규모 도로에서는 보행자, 자전거, 차량이 혼재된 생활 교통 환경이 형성되어 상호작용이 증가하여 자전거 교통사고 발생 빈도가 높아지는 것으로 해석된다.

2. 자전거 교통사고 발생위험지역 예측 결과

음이항 회귀모형을 이용한 연평균 자전거 교통사고 발생위험 예측 모형의 Pseudo R^2값은 0.1972로 분석되었다. Pseudo R^2값이 0.2~0.4 수준일 경우 모형 적합도가 양호한 것으로 평가되며, 본 연구의 모형은 이에 근접한 수준으로, 자전거 교통사고 발생의 공간적 분포를 설명하는 데 유의미한 수준으로 판단된다(McFadden, 1979). 예측 결과는 〈Figure 3〉과 같다. 본 연구의 예측 결과는 전체 7,814개 분석 격자에 대해 구축된 음이항 회귀모형의 적합값(fitted value)을 기반으로 산출한 격자별 기대 사고건수를 의미한다.

본 연구에서는 예측 결과를 효과적으로 시각화하기 위해 사고발생위험 수준을 6개의 구간으로 분류하여 나타내었다. 구간화는 같은 그룹 내 편차를 최소화하고, 그룹 간 차이는 극대화하여 데이터를 자연스럽게 분류할 수 있는 방법인 내추럴브레이크(Jenks natural breaks) 방법을 적용하였다. 이에 1구간은 0~0.05건(6,555개 격자), 2구간은 0.05~0.19건(982개 격자), 3구간은 0.19~0.50건(198개 격자), 4구간은 0.50~1.22건(60개 격자), 5구간은 1.22~2.48건(16개 격자), 6구간은 2.48건 이상(3개 격자)으로 분류하였다. 예측 결과, 김해시의 회현동, 장유동, 율하동 등 유동인구, 주거 및 상업지역, 교통 인프라 등이 집중되어 있는 일부 지역에서 자전거 교통사고 발생위험이 높은 것으로 나타났다.

3. 지능형 CCTV 입지 적합성 평가 결과

본 연구에서는 사고 발생위험도 제4~6구간(79개 격자)에 지능형 CCTV를 설치하는 것이 자전거 교통사고 예방 및 모니터링을 측면에서 타당하다고 판단하였다. 입지 우선순위가 높은 79개 격자는 주로 회현동 등 중부권 동 지역을 중심으로 분포하고 있으며, 장유동 일부에서도 모니터링이 필요한 지역으로 분석되었다.

한편 지능형 CCTV가 자전거 교통사고 발생위험지역을 적절히 모니터링하고 있는지 평가하기 위해 앞서 도출한 자전거 교통사고 발생위험지역 79개 격자와 기존 지능형 CCTV 위치를 비교분석하였다(〈Figure 4〉 참조).

전체 지능형 CCTV 1,410대를 중심으로 CCTV의 일반적인 가시 반경 50m로 버퍼를 설정하여 사고 발생위험지역과 중첩되는 CCTV를 선별하였으며, 총 145대의 CCTV를 분석 대상으로 도출하였다(김성미, 2019). 해당 CCTV를 대상으로 지형 및 건

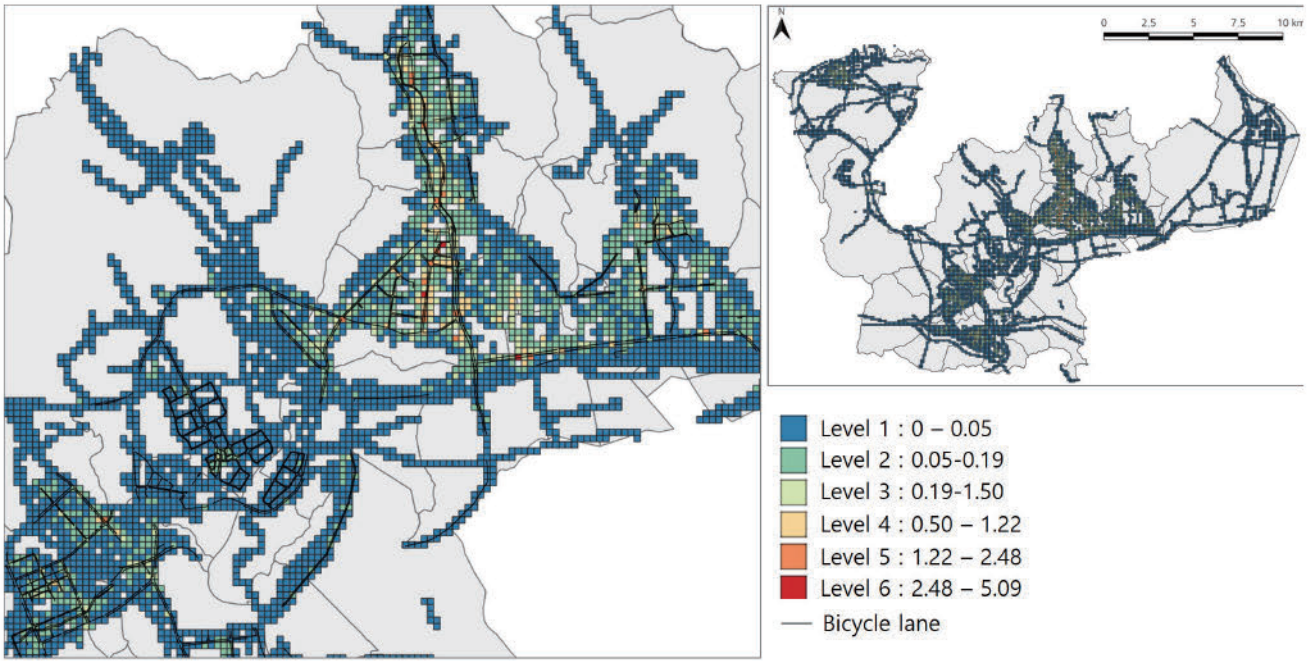


Figure 3. Prediction results of bicycle crash

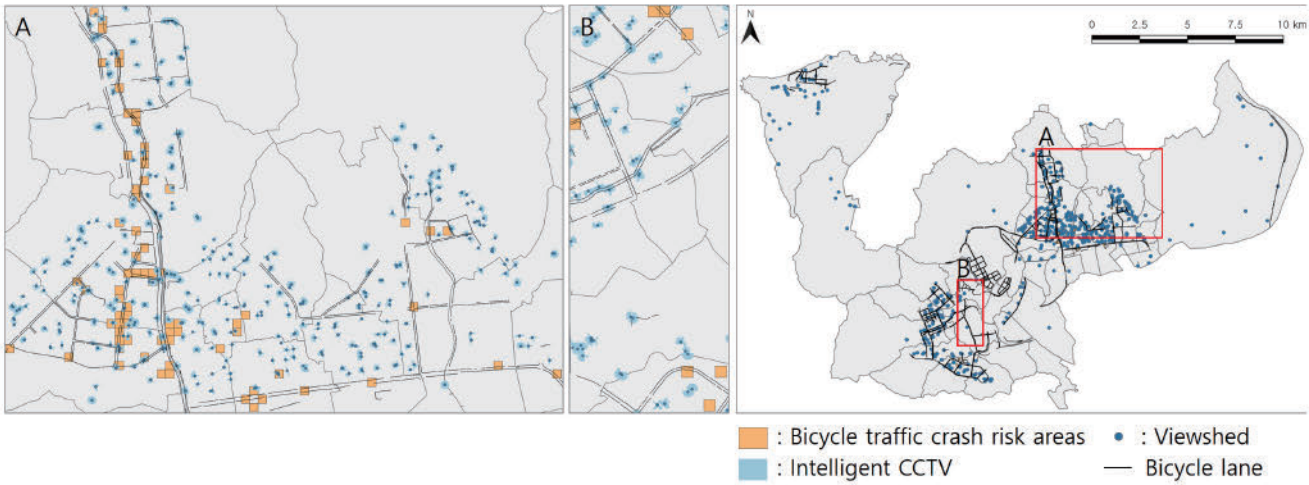


Figure 4. Viewshed analysis of intelligent CCTV in bicycle traffic crash risk areas

물을 고려한 실질적 가시권을 분석한 결과, 사고 발생위험지역 79개 격자 중 46개(58.23%)가 기존 CCTV 가시권과 중첩되는 것으로 나타났다. 그러나 이 중 CCTV 가시권 면적이 격자 면적의 50% 이상을 차지하는 격자는 7개(8.86%)에 불과하였다. 즉 사고 발생위험지역 대부분이 기존 CCTV로 충분히 모니터링되지 못하고 있음을 의미하며, 효과적인 감시 범위 확보를 위한 CCTV 입지 조정의 필요성을 시사한다.

V. 결 론

최근 자전거 이용 증가에 따라 자전거 교통사고 또한 지속적으로 증가하고 있으며, 사고 예방을 위한 효과적인 대책 마련이 필요하다. 현재의 대응 방식은 주로 사후 처리에 초점이 맞춰져 있어, 사고 발생 이전 위험지역을 체계적으로 관리하는 방안이 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 자전거 교통사고 발생 가능성이 높은 지역을 사전에 식별하고, 이를 기반으로 자전거 교통사고다발지역 및 위험 구간을 효과적으로 모니터링하기 위한 지능형 CCTV 입지의 적합성을 평가함으로써 예방적 교통안전 관리 체계 구축에 기여하고자 하였다. 이를 위해 한국의 김해시를 대상으로 도시 공간 데이터를 활용하여 자전거 교통사고 발생위험지역을 예측하고, 해당 지역을 중심으로 지능형 CCTV 입지 적합성을 평가하였다.

본 연구에서는 선행연구를 검토하여 자전거 교통사고의 주요 영향 요인을 도출하고, 이를 기반으로 예측 데이터를 구축하였다. 인구, 통행량 및 속도, 토지이용, 도로 구조 및 가로환경, 자전거도로 및 인프라 등 6개 항목 17개 데이터를 100×100m 격자

단위로 가공하고, 음이항 회귀분석을 통해 자전거 교통사고 발생 건수를 예측하였다. 예측을 통해 도출된 사고 발생위험지역을 대상으로 기존 지능형 CCTV의 감시 수준을 평가하기 위해 가시권 분석을 수행하였다.

본 연구의 주요 결과는 다음과 같다. 첫째, 선행연구 검토 및 회귀분석을 통해 자전거 교통사고 발생에 영향을 미치는 주요 요인을 분석하였다. 분석 결과, 유동인구 수, 자전거 통행량, 주거 및 상업용 토지이용 면적, 교통제어장치, 교차로, 자전거도로, 자전거 편의시설은 자전거 교통사고 발생에 유의한 양의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면 3·4차로 수, 중로 수, 대로 및 광로 수, 보행자도로 수는 음의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 자전거 교통사고가 다양한 교통 주체 간 상호작용이 활발한 환경에서 증가하며, 도로 규모가 큰 구간에서는 상대적으로 감소하는 경향이 있음을 시사한다.

둘째, 예측 결과를 바탕으로 자전거 교통사고 위험 구간에 대한 지능형 CCTV 입지의 적합성을 평가하였다. 분석을 통해 사고 발생위험이 높은 79개 격자를 도출하였으며, 해당 지역은 주로 중부권 동 지역을 중심으로 분포하고 일부는 장유동에서도 나타났다. 지능형 CCTV 가시권 분석 결과, 전체 위험 격자 중 CCTV 가시권이 격자 면적의 50% 이상을 차지하는 경우는 7개(8.86%)에 불과한 것으로 나타났다. 이는 자전거 교통사고 위험 지역의 상당 부분이 기존 CCTV로 충분히 모니터링되지 못하고 있음을 시사한다.

지능형 CCTV 입지 선정은 프라이버시 침해와 재정적 비용을 고려하여 단순한 설치 확대보다는 공간적 특성과 활용 목적을 고려한 효율적 운영과 입지 검토가 중요하다. 또한 CCTV는 범죄 예방을 넘어 교통안전 및 도시 안전 관리 전반으로 확장되고 있어 CCTV 입지 선정 역시 다목적 활용을 고려한 통합적 기준이 필요하며, 이는 향후 스마트도시 기반의 도시 안전 관리체계 구축에 있어 중요한 정책적 방향성을 제공할 수 있다.

이러한 측면에서 본 연구 결과는 지능형 CCTV 입지 선정이 도시 및 교통계획적 관점에서 사전 예방적 교통안전 관리체계 구축의 기반으로 활용될 수 있음을 시사한다. 특히 자전거 교통사고 발생위험지역을 공간적으로 식별하고 이를 중심으로 모니터링 체계를 구축하는 접근은 대응 중심의 관리 방식에서 벗어나 사전 관리 중심의 스마트시티형 교통안전 관리 전략으로 확장될 수 있다.

다만 본 연구는 자전거 교통사고 예방을 중심으로 지능형 CCTV의 활용 가능성을 모색하였다는 한계가 있다. 향후 연구에서는 자전거 교통사고 예방뿐만 아니라, 도시 범죄 예방, 유동인구 및 교통량 모니터링 등 다목적 활용이 가능한 CCTV 입지 선정 기준을 마련하여, 보다 종합적인 도시 안전관리 체계를 구축하는 방안이 모색될 필요가 있다. 또한 본 연구는 분석 단위를 격자로 설정하여 다양한 공간 데이터를 통합적으로 분석하였으나, 교차로나 도로 구간과 같은 실제 교통 흐름 단위를 직접적으로 반영하기에 제약이 있다. 더불어 도로 관련 변수는 격자 단위 변환 과정에서 도로의 연장이나 물리적 규모를 충분히 반영하지 못한 한계가 존재한다. 향후 연구에서는 격자 기반 분석과 네트워크 기반 분석을 결합한 보다 정교한 접근을 통해 자전거 사고 예방을 위한 정책 수립의 정밀도를 높일 필요가 있다.

● 이 논문에서 저자(들)는 문장 다듬기와 가독성 향상을 위해서만 ChatGPT 5.5(Open AI, 2026)를 2025년 10월 20일부터 2026년 4월 16일까지 사용하였습니다. AI가 생성한 모든 내용은 저자가 검토·수정·검증하였고, 최종 내용에 대해 전적인 책임을 집니다.

인용문헌
References

1. 권성대·김윤미·김재곤·하태준, 2015. "자전거 사고예측모형 개발 및 개선방안 제시에 관한 연구", 「대한토목학회논문집」, 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. 권철우·장현호, 2021. "XGBoost를 활용한 이륜자동차 교통사고 심각도 비교분석", 「한국ITS학회 논문지」, 20(4): 1-12.
   Kwon, C.W. and Jang, H.H., 2021. "Comparative Analysis of Traffic Accident Severity of Two-Wheeled Vehicles Using XGBoost", *Journal of Korean Society of Intelligent Transport Systems*, 20(4): 1-12.
3. 김선식·손지민. 2023.1.27. "이태원 참사 석달 만에 나온 대책 'ICT 활용'…"중요한 건 사람 역량"", 한겨레.
   Kim, S.S. and Son, J.M., 2023, January 27. "Three Months After the Itaewon Crowd Crush, Response Focuses on ICT: "What Matters Most Is Human Capability"", *Hankyoreh*.
4. 김성미, 2019.4.14. "여주시청 사례로 본 새로운 CCTV 통합관제센터 설계", 보안뉴스.
   Kim, S.M.., 2019, April 14. "Designing a New Integrated CCTV Control Center: The Case of Yeoju City Hall", *Boannews*.
5. 김성민, 2023.10.4. "최근 5년 자전거 교통사고 2만6,973건·사망자 414명에 달해", 안전저널.
   Kim, S.M., 2023, October 4. "26,973 Bicycle Traffic Accidents and 414 Deaths Reported Over the Past Five Years", *The Safety Journal*.
6. 김태양·박병호, 2017. "지역 특성을 고려한 자전거 사고 분석", 「대한교통학회지」, 35(5): 447-457.
   Kim, T.Y. and Park, B.H., 2017. "Analysis of Bicycle Accidents in Korea Based on Regional Characteristics", *Korean Society of Transportation*, 35(5): 447-457.
7. 박준언, 2024.6.25. "김해시, 자전거 인식하는 '지능형 CCTV 기술' 개발", 경남일보.

Park, J.E., 2024, June 25. "Gimhae City Develops Intelligent CCTV Technology for Bicycle Detection", *Gyeongnam Ilbo*.

8. 변지희, 2024.2.26. "[진화하는 물리보안] 영상 데이터 100만장 학습해 주야간 인식 정확도 '99.9%'… 에스원 "지능형 CCTV, 생성형 AI로 고도화", 조선비즈.
Byun, J.H., 2024, February 26. "[Advancing Physical Security] Trained on One Million Video Images, Achieving 99.9% Day-and-Night Recognition Accuracy...S-1 Says Intelligent CCTV Will Be Enhanced with Generative AI", *Chosun Biz*.

9. 오주택, 2018. "PLS 구조방정식을 이용한 자전거사고 요인 분석", 「한국ITS학회 논문지」, 17(4): 26-40.
Oh, J.T., 2018. "A Factor Analysis for Bicycle Accidents Using the PLS Structural Equation", *Journal of Korean Society of Intelligent Transport Systems*, 17(4): 26-40.

10. 원병철, 2021.1.19. "[테크칼럼] 지능형 선별관제의 핵심 기술, 객체 인식", 보안뉴스.
Won, B.C., 2021, January 19. "[Tech Column] Object Recognition: The Core Technology Behind Intelligent Video Analytics", *Boannews*.

11. 정재풍·최종후, 2014. "교통사고건수에 대한 포아송 회귀와 음이항 회귀모형 적합", 「한국자료분석학회논문집」, 16(1): 165-172.
Jeong, J.P. and Choi, J.H., 2014. "Poisson Regression and Negative Binomial Regression Model Fit for Traffic Accidents", *Journal of The Korean Data Analysis Society*, 16(1): 165-172.

12. 황선근·이수기, 2021. "서울시 자전거 교통사고의 물리적 환경요인 분석", 「국토계획」, 56(5): 83-96.
Hwang, S.G. and Lee, S., 2021. "Analysis of Physical Environment Factors of Bicycle Accidents in Seoul, Korea", *Journal of Korea Planning Association*, 56(5): 83-96.

13. Abbasi, S. and Ko, J., 2024. "Cycling Safely: Examining the Factors Associated with Bicycle Accidents in Seoul", *Accident Analysis and Prevention*, 206: 1-11.

14. Cai, Q., Lee, J., Eluru, N., and Abdel-Aty, M., 2016. "Macro-level Pedestrian and Bicycle Crash Analysis: Incorporating Spatial Spillover Effects in Dual State Count Models", *Accident Analysis and Prevention*, 93: 14-22.

15. Carter, D.L., Hunter, W.W., Zegeer, C.V., Stewart, J.R., and Huang, H., 2007. "Bicyclist Intersection Safety Index", *Transportation Research Record*, 2031: 18-24.

16. Chung, J., Namkung, O.S., Ko, J., and Yao, E., 2024. "Cycling Distance and Detour Extent: Comparative Analysis of Private and Public Bikes Using City-level Bicycle Trajectory Data", *Cities*, 151: 1-15.

17. de Jong, P. and Heller, G.Z., 2008. *Generalized Linear Models for Insurance Data*, Cambridge University Press.

18. Ding, H. and Sze, N.N., 2022. "Effects of Road Network Characteristics on Bicycle Safety: A Multivariate Poisson-lognormal Model", *Multimodal Transportation*, 1(2): 1-9.

19. Ding, H., Sze, N.N., Li, H., and Guo, Y., 2020. "Roles of Infrastructure and Land Use in Bicycle Crash Exposure and Frequency: A Case Study Using Greater London Bike Sharing Data", *Accident Analysis and Prevention*, 144: 1-10.

20. Ferrer, S. and Ruiz, T., 2018. "The Impact of the Built Environment on the Decision to Walk for Short Trips: Evidence from Two Spanish Cities", *Transport Policy*, 67: 111-120.

21. Hadayeghi, A., Shalaby, A.S., and Persaud, B., 2003. "Macrolevel Accident Prediction Models for Evaluating Safety of Urban Transportation Systems", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1840(1): 1-20.

22. Li, X., Mei, G., Liu, S., Khan, S., and Pan, L., 2026. "Hexagonal Grid-based Representation and Generative Prediction Method for Citywide Traffic Accident Situations in Urban Area", *Expert System with Applications*, 307: 1-13.

23. McClintock, H. and Cleary, J., 1996. "Cycle Facilities and Cyclists' Safety Experience from Greater Nottingham and Lessons for Future Cycling Provision", *Transport Policy*, 3(1-2): 67-77.

24. McFadden, D., 1979. "Quantitative Methods for Analysing Travel Behavior of Individuals: Some Recent Developments", *Behavioural Travel Modeling*, edited by Hensher, D.A. and Stopher, P.R., 279-318, London: Routledge.

25. 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 and Prevention*, 123: 123-131.

26. Myhrmann, M.S., Janstrup, K.H., Møller, M., and Mabit, S.E., 2021. "Factors Influencing the Injury Severity of Single-bicycle Crashes", *Accident Analysis and Prevention*, 149: 1-8.

27. Pucher, J., Komano, C., and Schimek, P., 1999. "Bicycling Renaissance in North America? Recent trends and Alternative Policies to Promote Bicycling", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33(7-8): 625-654.

28. Raihan, A., Alluri, P., Wu, W., and Gan, A., 2019. "Estimation of Bicycle Crash Modification Factors (CMFs) on Urban Facilities Using Zero Inflated Negative Binomial Models", *Accident Analysis and Prevention*, 123: 303-313.

29. Russell, M., Davies, C., Wild, K., and Shaw, C., 2021. "Pedalling towards Equity: Exploring Women's Cycling in a New Zealand City", *Journal of Transport Geography*, 91: 1-9.

30. Shariat-Mohaymany, A., Shahri, M., Mirbagheri, B., and Matkan, A.A., 2015. "Exploring Spatial Non-stationarity and Varying Relationships between Crash Data and Related Factors Using Geographically Weighted Poisson Regression", *Transactions in GIS*, 19(2): 321-337.

31. Van Cauwenberg, J., Van Holle, V., Simons, D., Deridder, R., Clarys, P., Goubert, L., Nasar, J., Salmon, J., de Bourdeaudhuij, I., and Deforche, B., 2012. "Environmental Factors Influencing Older Adults' Walking for Transportation: A Study Using Walk-along Interviews", *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 9: 1-11.

32. Vandenbulcke-Plasschaert, G., 2011. "Spatial Analysis of Bicycle Use and Accident Risks for Cyclists", Ph.D. Dissertation, University of Louvain.

33. Wang, K. and Akar, G., 2018. "Street Intersection Characteristics and Their Impacts on Perceived Bicycling Safety", *Trans-*

portation Research Record, 2672(46): 41-54.

34. Wei, F. and Lovegrove, G., 2013. "An Empirical Tool to Evaluate the Safety of Cyclists: Community Based, Macro-level Collision Prediction Models Using Negative Binomial Regression", *Accident Analysis and Prevention*, 61: 129-137.

35. Yang, Z., Yang, Z., Smith, J., and Robert, B.A.P., 2021. "Risk Analysis of Bicycle Accidents: A Bayesian Approach", *Reliability Engineering and System Safety*, 209: 1-21.

36. 노상훈, 2024.9.30. "자전거 이용 현황(2023년 기준)", 행정안전부, https://www.mois.go.kr/frt/bbs/type001/commonSelectBoardArticle.do;jsessionid=BDN4yV15+p0Rd5-vdMQWDHN5.node30?bbsId=BBSMSTR_000000000014&nttId=112803.
Noh, S.H., 2024, September 30. "Bicycle Usage Statistics (as of 2023)", Ministry of the Interior and Safety, https://www.mois.go.kr/frt/bbs/type001/commonSelectBoardArticle.do;jsessionid=BDN4yV15+p0Rd5-vdMQWDHN5.node30?bbsId=BBSMSTR_000000000014&nttId=112803.

Date Received	2025-10-21
Reviewed(1st)	2026-02-02
Date Revised	2026-04-16
Reviewed(2nd)	2026-05-01
Date Accepted	2026-05-01
Final Received	2026-07-16