

# 이동형 IoT 센서 장비 운용을 위한 자전거도로 위험 감지요소 선정 연구

## A Study on Selection of Bicycle Road Hazard Detection Elements For Mobile IoT Sensor Device Operation

최 우 철\* · 장 봉 주\*\* · 김 선 겸\*\* · 정 인 택\*\*\*

\* 주저자 : 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 전임연구원  
\*\* 공저자 : 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 수석연구원  
\*\*\* 교신저자 : 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 수석연구원

Woochul Choi\* · Bong-Joo Jang\* · Sun-Kyum Kim\* · Intaek Jung\*

\* Dept. of Future & Smart Construction Research, KICT

† Corresponding author : Intaek Jung, jungintaek@kict.re.kr

Vol. 23 No.4(2024)  
August, 2024  
pp.37~53

pISSN 1738-0774  
eISSN 2384-1729  
<https://doi.org/10.12815/kits.2024.23.4.37>

Received 11 July 2024  
Revised 23 July 2024  
Accepted 13 August 2024

© 2024. The Korean Society of  
Intelligent Transport Systems. All  
rights reserved.

### 요 약

본 연구는 자전거도로에서의 사고 예방 및 위험요소 관리를 위해 이동형 IoT 센서 장비 운용을 위한 자전거도로 위험 감지요소 선정 서비스 적용방안을 제시하였다. 전문가 심층조사를 통해 12개의 자전거도로 위험 감지요소를 도출하였고, 도로·교통 전문가 30명을 대상으로 Fuzzy AHP 기반의 중요도 분석을 수행하였다. 그 결과, 시인성이 낮으나 사고 위험성이 높은 포장상태 손상(전체 1순위), 환경적 장애요소(2순위)가 최상위권에 선정되었다. 중상위권으로는 단절노선 발생(4순위), 인공적 장애요소(5순위), 유효 폭(6순위), 배수 불량(7순위) 등 시설관리 요소들이 선정되었다. 노면표시 손실(11순위), 여유공간 폭(12순위)과 같이 직접적인 사고 유발 요인이 아닌 요소들은 최하위권에 선정되었다. 이를 토대로 자전거도로 위험 감지 서비스 적용방안 및 실시간성에 따른 서비스 운영전략을 함께 제시하였다. 향후 자전거도로 유형별 분석, 서비스 실증 및 시범운영 등 후속연구가 활발히 진행되어, 국민들이 안전하게 이용할 수 있는 자전거도로 운영 및 관리가 이루어지길 기대한다.

핵심어 : 자전거도로, 위험 감지요소, 이동형 IoT 센서, 전문가심층조사, 퍼지 계층화분석

### ABSTRACT

This study selected bicycle road hazard detection factors for mobile IoT sensor device operation and developed service application plans. Twelve bicycle road hazard detection factors were derived through a focused group interview, and a fuzzy AHP-based importance analysis was conducted on 30 road and transportation experts. As a result, 'damage to pavement' (1st overall) and 'environmental obstacle' (2nd) with low visibility but a high risk of accidents were selected the most. The factors in terms of facility management, such as 'disconnected route occurrence' (4th), 'artificial obstacle' (5th), 'effective width' (6th), and 'poor drainage' (7th), were selected as the upper and middle areas. Factors that are not direct accident-inducing factors, such as 'loss of road markings' (11th) and 'free space width' (12th), were selected the least. Based on this, a plan was presented to apply the bicycle road hazard detection service and a service operation strategy according to real-time performance. Nevertheless, follow-up studies, such as human behavioral analysis based on bicycle operators, analysis according to the bicycle road type, service demonstration, and pilot operation, will be needed to develop safe bicycle road management is expected.

Key words : Bicycle road, Hazard detection elements, Mobile convergence sensor, FGI, Fuzzy AHP

## I. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

삶의 질을 추구하는 사회 전반의 분위기에 따라, 건강과 레저 활동을 위한 월 1회 이상 자전거 이용인구는 1,340만 명에 이를 만큼 증가하고 있다(KOTI, 2024). 자전거 사고 발생빈도 역시 높은 상황으로, 사망자 수는 연 170명 이상, 부상자 수는 연 10,000명 이상으로 발생하고 있다(KOSIS, 2024). 또한 「자전거이용 활성화에 관한 법률」 제5조의2에 따르면 지자체는 관할구역 내 자전거 통행 위험지역에 대한 조사를 해야 하며, 동법 시행령 제5조의2에 의거 자전거도로가 가지는 지형적, 구조적, 물리적 특성을 고려해야 한다. 이를 기반으로 지자체는 자전거 통행 위험지역의 정비 및 개선작업을 수행해야 한다. 하지만 현재 자전거도로 위험 요소에 대한 데이터 수집은 정기 현장조사 및 자전거도로 이용자의 민원 제보에만 의존하고 있으며, 자전거도로의 위험요소 관리를 위한 최소한의 모니터링 시스템 역시 부재한 상황이다.

본 연구진은 IoT 센싱 및 AI 기술을 활용하여 노면파손, 장애물 등 자전거도로의 위험요소를 자동으로 탐지할 수 있는 기술을 개발 중에 있다(KICT, 2023). 본 기술의 실질적인 서비스 및 실용화를 위해서는 관련 법·제도 및 선행연구를 토대로 해당기술의 감지 가능한 서비스 영역을 고려하여 보다 명확한 자전거도로 위험 감지요소 도출 및 선정이 필요하다. 이에 본 연구는 자전거도로 안전관리 관련 법·제도와 자전거도로 위험요소 관련 선행연구를 조사하고, 모빌리티 탑재형 자전거도로 위험 자동감지 기술 적용이 가능한 자전거도로 위험 감지요소를 도출한다. 이를 기반으로 도로·교통 전문가를 대상으로 자전거도로 위험 감지요소별 중요도 평가를 수행하여, 이동형 IoT 센서 장비 운용을 위한 자전거도로 위험 감지요소의 우선순위를 선정한다. 이를 통해 최종적으로 자전거 통행 위험지역의 정비 및 개선을 위한 서비스 적용방안을 제시하고자 한다.

### 2. 연구의 범위 및 방법

#### 1) 연구의 범위

본 연구의 대상, 즉 IoT 센서가 탑재된 모빌리티를 사용하여 노면의 위험요소가 감지되는 연구 영역은 자전거도로이다. 자전거도로는 「자전거이용 활성화에 관한 법률」 제3조에 따라 자전거 전용도로, 자전거·보행자 겸용도로, 자전거 전용차로, 자전거 우선도로 등으로 유형이 구분된다. 본 논문의 경우 연구진이 개발한 모빌리티 탑재형 IoT 센서 단말을 기반으로 자전거도로 위험요소를 감지하기 위한 시범 서비스 운영을 전제한다. 이에 시범 적용에 용이한 자전거 전용도로를 주 대상으로 설정하였다. 자전거 전용도로는 자전거(개인형 이동장치 포함)만 통행하도록 설계되어 초기 현장 테스트 및 시범 적용이 수월하며, 시범서비스를 토대로 전체 유형으로 단계적 확장을 도모한다. 관리적 측면에서의 연구의 범위는 기초지자체를 대상으로 한다. 「자전거이용 활성화에 관한 법률」 제4조제4호에 따라 실질적인 자전거 이용 여건의 개선은 지방자치단체 조례로 정함에 따라 지방자치단체를 주요 수요처로 설정하여 본 자전거도로 위험 감지요소를 선정하고자 한다.

#### 2) 연구의 방법

자전거도로 위험 감지요소를 선정하기 위해 자전거도로 안전관리 관련 법·제도, 자전거도로 위험요소 관련 선행연구를 조사한다. 자전거 운행 경험이 풍부한 도로·교통 분야의 박사급 연구원, 교수, 관련 공무원 등으로 구성된 전문가그룹을 구성한 뒤, 앞서 조사한 법·제도, 관련 선행연구를 토대로 집단심층토의(Focus Group Interview, 이하 FGI)를 진행한다. FGI 진행 시 모빌리티 탑재형 자전거도로 위험 자동감지 기술에 대

해 충분한 설명과 이해를 바탕으로 자전거도로 위험 감지요소를 1차적으로 선정하도록 한다. FGI에서 도출된 자전거도로 위험 감지요소를 대상으로 30명의 전문가그룹 기반의 계층화분석(Analytic Hierarchy Process, 이하 AHP)을 통해 감지요소별 우선순위를 선정한다. AHP 분석 시 보다 진보된 방법론인 Fuzzy 이론이 접목된 Fuzzy AHP를 사용하여 분석의 신뢰도를 높이도록 한다. 최종 우선순위와 주요 수요처인 지자체 운영관리 특성을 고려하여 이동형 IoT 센서 장비 운용을 위한 자전거도로 위험 감지요소 서비스방안을 최종 제시하고자 한다.

## II. 선행연구 고찰

### 1. 자전거도로 안전관리 관련 법·제도

자전거도로는 「도로교통법」상 정의(제2조), 통행방법(제9조, 제13조의2), 자전거횡단도 설치(제15조의2), 운전자 준수사항(제50조) 등의 법률적 지위 및 관련 내용이 지정되어 있다. 보다 구체적으로는 「자전거이용 활성화에 관한 법률」 제3조에서 자전거 전용도로, 자전거·보행자 겸용도로, 자전거 전용차로, 자전거 우선도로 등 자전거도로의 유형을 설정하고 있고, 제4조제4호에 의거 실질적인 자전거 이용 여건의 개선은 지방자치단체의 조례로 정하도록 하였다. '23년 1월 신설된 제5조의2에 따라 지자체는 관할 내 자전거 통행 위험지역에 대한 조사를 의무화하였고, 제11조의2에 따라 지자체는 자전거 통행에 방해가 되지 않도록 자전거도로의 안전 확보를 유도하였다. 즉, 실질적으로 지자체에서 자전거도로의 통행 위험지역 조사 및 현장 관리가 이루어지므로, 본 연구 역시 지자체 자전거 관련 부서에서 활용할 수 있는 자전거도로 위험 감지요소 선정 및 활용방안을 모색하고자 한다.

구체적으로 자전거도로 안전 확보를 위한 법·제도를 살펴보면 다음과 같다. 「자전거이용 활성화에 관한 법률 시행령」 제5조의2에서는 자전거 통행 위험지역 조사 시 자전거 교통사고의 발생 빈도, 다른 교통수단 및 보행자의 통행량 규모, 자전거도로가 가지는 지형적·구조적·물리적 특성을 고려해야 된다고 제시되었다. 「자전거 이용시설의 구조·시설 기준에 관한 규칙」에서는 자전거도로의 통행용량, 설계속도, 폭, 포장 및 배수 등의 기준을 설정하고 있다. 제3조 자전거도로의 통행용량의 경우 자전거의 주행속도 및 자전거 통행 장애 요소 등을 고려하여 산정하도록 하며, 제5조 자전거도로의 폭은 하나의 차로를 기준으로 1.5m 이상으로 한다. 다만 지역 상황 등에 따라 부득이하다고 인정되는 경우 1.2m 이상으로 설정 가능하다. 제15조 포장 및 배수를 통해 자전거도로의 포장 및 배수 상태, 색상 등의 기준이 설정되어 있다.

'23년 발표된 행정안전부의 「자전거 이용 활성화 계획 수립 지침」을 살펴보면, 자전거도로 노선 현황 파악과 자전거 도로대장 갱신을 위해 자전거도로 노선조사가 필요하다고 제시되어 있다. 특히 유효폭, 보도폭, 측방여유 폭, 분리공간 폭 등의 자전거도로 시설기준 항목과 단절노선, 위험시설, 노후시설, 시설 과부족 등 자전거 이용시설에 대한 현황조사의 필요성을 강조하였다. 자전거 이용 안전 제고 방안으로 자전거 교통사고 자료 분석, 자전거 통행 위험지역 조사, 자전거 이용 안전 제고 방안, 자전거 통행 위험지역 시설 정비방안을 마련하도록 권장하고 있다. 행정안전부, 국토교통부에서 공동으로 '22년 발표된 「자전거 이용시설 설치 및 관리 지침」의 경우 자전거도로의 설계 원칙 및 일반 설계 기준, 횡단구성, 포장 및 배수, 자전거도로 안전 시설, 유지관리 등이 세부적으로 제시되어 있다. 대부분 「자전거 이용시설의 구조·시설 기준에 관한 규칙」의 세부사항을 구체적으로 제시하였으며, 이 중 자전거 이용시설 유지관리 목차에서는 표장면의 균열·파열, 재포장에 따른 표장면 높이 변화 등 표장상태 점검내용을 설명한다. 이를 기반으로 표장상태 서비스 수준을 A

부터 E까지 5단계로 분류하고 관리자는 최소한 C수준 이상으로 유지해야 된다고 설명한다. 이 밖에 흐트러진 모래나 파편, 배수 불량, 불법 주정차, 오토바이나 자동차의 통행, 불법 노점상의 자전거도로 점유, 자연퇴적물 등의 점검항목을 제시하고 있다.

전국 지자체는 「자전거이용 활성화에 관한 법률」에 따라 관련 조례를 제정·시행하고 있으며, 이를 기반으로 실질적인 자전거도로 현장관리 업무를 수행한다. 서울시 조례의 경우 자전거도로의 설치, 정비, 자전거주차장의 설치 및 운영, 자전거이용의 활성화 시책 등으로 구성되며, 이 중 자전거도로 정비에 관한 내용은 제 6조 자전거이용시설의 정비지침 수립·시행에 포함되어 있다. 주요 내용으로는 자전거도로의 유형별, 지역 특성별(예. 하천, 공원 등) 정비기준의 세분화, 자전거도로의 포장, 차선, 안내표지판 등 이용과 관련된 시설의 교체시기 및 유지관리 기준, 육교, 지하도 등 자전거경사로에 대한 설치 및 관리 기준 등이 있다. 서울특별시 강남구의 조례를 살펴보면, 「자전거이용 활성화에 관한 법률」에서 의무화한 자전거 통행 위험지역에 대한 조사 및 정비·개선계획 등을 포함하여 자전거 이용 활성화계획을 수립하게 되어 있다. 이러한 자전거도로 안전관리 법·제도 등을 고려하여 자전거도로 위험 감지요소를 도출하고자 한다.

## 2. 자전거도로 위험요소 관련 연구

### 1) 자전거도로 위험요소 관련 연구

자전거도로의 위험요소를 연구한 논문은 크게 자전거도로 포장 상태 분석 연구, 자전거도로 디자인 관점에서의 위험요소 연구 및 자전거도로 최적 입지 선정 연구로 구분 가능하다. 먼저 자전거도로 포장 상태 분석 연구를 살펴보겠다. Joo and Oh(2013), Joo et al.(2015)의 연구에서는 GPS 수신기, 가속도계, 자이로센서를 포함한 계측식 프로브 자전거를 사용하여 운전자의 안전 및 이동성에 대한 모니터링 지수와, 이러한 자전거 운행 환경을 분류하는 알고리즘을 개발하였다. 위 연구들의 센서 구성 및 데이터 구성, 분석대상을 참조하고 확장하는 방안을 고려할 필요가 있다. Kim et al.(2016)은 자전거도로 조사장비를 이용하여 측정된 충격가속도 값을 기준으로 분석 후 자전거도로의 포장상태를 5등급으로 평가하였다. 자전거도로 포장상태 분석을 위해 3륜 전기 자전거를 사용하여 속도·브레이크 레버 센서의 주행 시스템, GPS 센서 데이터를 수집하였고, 이를 기반으로 주행 중 측정되는 충격량을 5, 10, 13, 20, 28mm의 포장 단차 예측식을 통해 추정하였다. 이용자 만족도조사 결과와의 상관성 분석 결과 A 등급 91%, E 등급 95%의 높은 상관성을 보였다. Lee and Kim (2023)은 딥러닝 기반 클러스터링을 통해 스마트폰 영상 기반으로 맨홀, 빗물받이, 포트홀 등의 위험요소를 분석하였다. 공산물인 맨홀, 빗물받이는 오탐이 없었으나 포트홀의 경우 파손 패턴들이 다양하여 단순한 라벨링을 통한 학습데이터로는 오류 발생이 빈번하였고, 이를 비지도 학습 클러스터링을 통해 정확도를 93%로 향상시켰다. 위 연구들은 자전거도로를 위험요소를 자전거에 센서를 설치하여 직접 운행하며 포장 단차, 맨홀, 포트홀 등의 포장상태를 분석하였으나, 포장상태 외 다른 위험요소는 고려되지 않은 한계가 있다. Schepers and Wolt(2012)는 자전거 단독사고 유형의 특징을 연구하였다. 해당연구는 자전거 도로 내 장애요소, 노면 상태, 자전거 결함 등의 위험요소가 도출되었으나, 자전거 단독사고만을 대상으로 하였기에 보행자, 차량 등 간섭에 의한 사고는 고려되지 않았다.

자전거도로 디자인 관점에서의 위험요소 연구는 다음과 같다. Lee(2022)는 서울시 자전거 전용도로를 중심으로 공공디자인의 관점에서 연속성의 부재, 안전성의 미비, 영역성의 침해 등 자전거도로의 실태분석 연구를 수행하였다. 이를 통해 보도와 차도, 녹지대, 교통시설물 등의 인접 가로구성요소의 주행 단절구간이 발생하고, 도심 내 유출입부와 횡단보도, 교차로 구간을 중심으로 보도턱 낮춤 등의 시급한 이용환경개선이 요구됨을 알 수 있었다. Kim and Morita(2017)는 자전거도로 안전사고 예방을 위한 도로 노면 디자인 방안 연

구를 수행하다. 해당연구는 자전거도로 안전사고 예방을 위해 인적요인에 초점을 맞춰 전방주시 태만 방지를 위한 포장 색상, 컬러레인, ICT 접목 디자인 등을 제시하였다. 위 두 연구는 주행 단절구간 방재, 보도턱 낮춤, 노면 표시 등 공공디자인 측면에서의 자전거도로 사고 예방요인을 조사 분석한 의의를 가진다. 다만, 디자인 측면 위주임에 따라 도로 노면 상태, 장애물 등은 고려되지 않은 한계를 갖는다. Kim et al.(2023)은 보다 종합적인 측면에서의 자전거도로 최적 입지 선정 연구를 수행하였다. 교통사고분석시스템(TAAS)에서 제공하는 서울시 자전거 사고 다발지역 정보 데이터를 사용하여 다중회귀분석 기반 최적의 자전거도로 입지를 선정하였다. 종속변수는 사고 데이터이며, 독립변수는 자전거 인프라, 도로 환경, 자연환경, 교통량, 인구요인으로 설정하였다. 독립변수 중 위험요소를 살펴보면 자전거 통행 안전성, 도로 및 차로 폭, 토양 경사도, 교통량 등을 변수화하였으며, 이러한 위험요인들이 유의미한 결과로 분석되었다.

## 2) 자동차도로 위험요소 관련 연구

자전거도로에서 일반 자동차도로로 범위를 넓혀보면 더 다양한 연구가 수행됨을 알 수 있었다. Shim and Jeong(2021)은 주행안전을 위하여 joint deep learning 기반의 도로 노면 파손 및 장애물 탐지 알고리즘을 제시하였다. joint deep learning은 앞서 자전거도로 위험요소 선행연구에서 주로 다뤘던 도로 노면의 불량 상태 뿐 아니라 차량, 자전거, 사람 등 동적 장애물을 동시에 탐지할 수 있는 알고리즘 기법이다. Lee et al.(2019)은 시공간 특성을 활용하여 랜덤 포레스트 기반으로 도로 노면 상태를 예측하였다. 해당 논문의 차별성은 결빙, 강수, 습윤, 건습 등 기상환경에 따른 노면상태 데이터를 사용하였고, 이를 기반으로 도로 노면의 위험정보를 운전자에게 제공할 수 있다는 점이다. Chae et al.(2018)은 프로브 수집 위치 기반으로 도로위험정보 통합 및 판단 알고리즘을 제시하였다. 이는 기존 소통정보 외 프로브 차량에서 수집되는 포트홀, 낙하물, 노면결빙 등 도로위험정보 데이터를 시공간적으로 통합하여 신속하고 효율적으로 처리할 수 있는 알고리즘이다. Hwang et al.(2023)은 도로 상태 관리를 위한 정밀도로지도 기반의 도로노면지도 개발에 관한 연구를 수행하였다. 이는 국토지리정보원의 정밀도로지도를 활용하여 도로 표면 상태지수, 교통사고 유발 위험요인, 불법주정차 차량의 존재 여부 등 도로 상태 관리에 활용할 수 있는 도로노면지도를 개발하는 방법을 제시한 의의가 있다. 해당 논문들은 각 개별요소의 조사·분석, 기술 개발 및 실험 위주로 연구되었으나, 자전거도로의 전반적인 위험요소를 포함하고 있지 않다. 본 연구는 도로 노면을 포함하여 이동형 IoT 센서에서 감지 가능한 종합적인 자전거도로의 위험요소를 포함하여 지자체의 의사결정 지원을 도모할 수 있는 차별성을 가진다. 앞서 조사한 선행연구를 바탕으로 자전거도로 또는 일반 도로에서 발생 가능한 위험요소 역시 함께 고려하여 자전거도로에서의 위험 감지요소 선정에 참고하도록 한다.

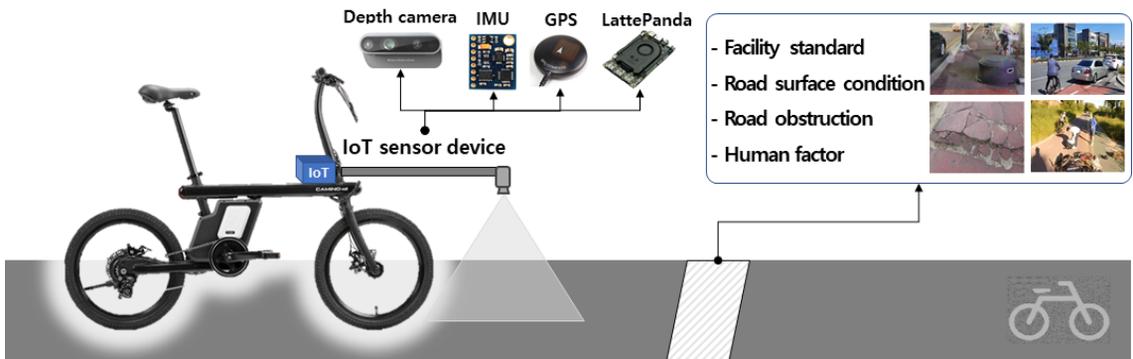
## III. 자전거도로 위험 감지요소 도출

### 1. 이동형 IoT 관측센서 장비

본 연구에서의 이동형 IoT 관측센서 장비는 <Fig. 1>과 같이 깊이카메라(depth camera), 관성측정장치(Inertial Measurement Unit, IMU), GPS, 임베디드 보드(LattePanda) 등으로 구성되어 있다. 즉, 해당 장비는 임베디드 보드에 각각의 센서들을 설치 및 연결한 이동형 IoT 센서 단말(IoT sensor device) 형태로 개발하였다. 개발된 IoT 센서 단말을 (전기)자전거에 탑재 및 설치한 후, 조사자가 자전거를 직접 운행하면서 자전거도로의 다양한 위험요소들을 탐지할 수가 있다. 먼저, 자전거가 이동하면서 설치된 깊이카메라로부터 수집되는 RGB영상 데이

터를 이용하여 AI 모델링 기반의 자전거도로 공간 분할, 차선 탐지, 관심영역(Region Of Interest, ROI) 설정, 객체 탐지(보행자, 차량 등) 등을 수행할 수가 있다. 다음으로 깊이 영상 데이터를 이용하여 장애물(지주, 낙하물, 방해물 등), 노면파손(포트홀, 균열, 파열 등), 포장상태, 유효폭 등 자전거도로의 주행 환경 및 노면 상태를 탐지할 수가 있다. 즉, 깊이카메라는 자전거에 설치된 카메라로부터 자전거도로 바닥면 또는 탐지된 객체까지의 거리(깊이 값)를 측정할 수 있는 센서로서, 주어진 해상도에 따라 깊이 영상의 픽셀별로 측정되는 깊이 값에서 설치 기준 높이(평균 바닥면에서 설치된 카메라까지의 거리)와의 차이가 발생하는 픽셀 영역을 추출하는 방법으로 다양한 위험요소들을 탐지할 수 있다. 여기서, 앞서 설명한 두 깊이 값의 차이에 대한 임계치를 설정하여 주어진 임계치를 벗어나는 픽셀 영역을 자전거도로의 위험요소로 탐지하도록 하였다. 적용된 임계치는 다양한 환경에서의 현장 실험을 통해 위험요소별 최적화가 필요하다. 또한 수집된 깊이 및 RGB 영상을 기반으로 한 다양한 운행 빈도, 시나리오 분석 등도 가능하다.

하지만, 본 이동형 IoT 관측센서 장비를 통해 자전거도로 상에서 발생하는 모든 위험요소를 탐지할 수는 없다. IoT 센서 데이터의 처리용량, 속도 등을 고려한 최적화가 필요하며, 이를 기반으로 법·제도 및 실제 관리자 관점에서의 필수요소를 반영할 필요가 있기 때문이다. 이에 탑재된 센서들의 성능 및 특성을 고려하고 전문가 의견을 반영하여, 해당 장비를 통해 탐지할 수 있는 자전거도로 위험요소들에 대한 우선순위를 도출하고자 한다. 도출된 우선순위에 따라 중요도가 높은 위험요소에 특화된 탐지 알고리즘으로 개발 및 고도화할 필요가 있으며, 이로 인해 실제 현장에서 활용 가능한 서비스 모델 개발도 가능할 것으로 판단된다.



<Fig. 1> Operation concept diagram of mobile observation sensor equipment

## 2. 자전거도로 위험 감지요소 도출

「자전거이용 활성화에 관한 법률」에 따라 실질적인 자전거도로의 통행 위험지역 조사 및 현장관리는 지방자치단체, 그 중에서도 기초 지방자치단체에서 현장업무를 수행하도록 지정되어 있다. 이에 기초지자체에서 관리 가능한 이동형 IoT 센서 장비 운용 기반 자전거도로 위험 감지요소를 선정하고자 한다. 이를 위해 앞서 자전거도로 안전 관련 법·제도와 자전거도로 위험요소 관련 선행연구를 토대로 도로·교통 전문가 및 자전거도로 담당 공무원 등 관련 전문가 7인으로 구성된 FGI를 통해 자전거도로 위험 감지요소를 도출하였다. FGI는 본 연구와 같이 고려해야 할 다양한 요인들로부터 종합적인 관점 및 통찰력을 통해 해결방안을 발굴할 때 활용된다(Park and Lee, 2019). FGI 초반에는 앞서 조사한 자전거도로 안전관리 관련 법·제도와 자전거도로 위험요소 관련 선행연구, 기타 관련 사례들을 검토하였다. 실용성을 고려했을 때 자전거도로 안전관리 관련 법·제도에서 제시되는 위험요소 및 시설기준이 충분히 반영되어야 한다는 의견이 주를 이루었다.

이후 지자체 담당 공무원을 중심으로 지자체에서 관리하는 자전거도로 관리대상 및 위험요소를 고려하여 자전거도로 위험 감지요소 분류작업을 수행하였다. 대항목으로 자전거도로 시설기준, 자전거도로 노면상태, 자전거도로 장애요소, 자전거사고 인적요소 등 4개의 분류작업이 이루어졌다. FGI 후반에는 4개의 대항목에서 세분류되는 세부유형을 도출하였고, 이를 기반으로 <Table 1>과 같이 소항목별 감지요소 및 기준을 선정하였다.

FGI를 통해 최종 도출된 이동형 IoT 센서 장비 운용을 위한 자전거도로 위험 감지요소는 다음과 같다. 첫 번째 대분류 항목인 자전거도로 시설기준의 경우 유효 폭, 여유공간 폭, 단절노선 발생 등의 세부 유형이 도출되었다. 유효폭은 자전거도로의 최소 폭으로, 하나의 차로를 기준으로 1.5m 이상의 폭원이 확보되는지를 감지하는 것으로 지역상황에 따라 기준이 1.2m 이상으로 설정이 가능하다. 여유공간 폭은 자전거도로 양 측면에서의 여유 폭인 측방여유 폭이며, 그 기준은 0.5m이다. 단절노선 발생은 보행로, 완충녹지, 가로시설물, 차로 단절 등 타 고정된 기존 시설과의 상충으로 인한 단절노선 발생상황을 감지하는 것이다.

두 번째 대분류 항목인 자전거도로 노면상태는 포장상태 손상, 노면표시 손실, 배수 불량 등의 세부 유형이 도출되었다. 포장상태 손상은 포장면의 균열 및 파열, 재포장에 따른 높이 변화 등 자전거도로 포장이 손상된 상태를 감지하는 것으로, 행정안전부 지침 상 서비스수준 D, E 등급 수준을 판단하고자 한다. 노면표시 손실은 기본구간 회색, 상층구간 암적색 등 포장재의 고유색과, 중앙분리선 노란색, 양측면 흰색 등 차선의 색, 노면표시의 훼손 및 변질 정도를 감지하는 요소이다. 배수 불량은 우천 또는 우천 후 물고임 상태, 배수구 덮개의 유실 및 벌어진 등을 감지하는 요소이다.

세 번째 대분류 항목인 자전거도로 장애요소의 경우 인공적, 자연적, 환경적 장애요소로 구성된다. 인공적 장애요소는 조명시설, 난간, 신호기, 도로표지, 가로수, 전주 등 인공시설물의 장애요소를 감지하는 것이다. 자연적 장애요소는 토사, 낙엽, 돌, 나뭇가지 등의 자연적으로 발생하는 장애요소이며, 환경적 장애요소는 도로시설 파손물, 낙하물, 쓰레기 등 자전거도로 노상 장애물이다.

마지막 대분류 항목인 자전거사고 인적요소의 경우 보행자, 전동킥보드, 주행금지차량으로 분류된다. 보행자의 경우 자전거도로 내 안전사고 위험이 될 수 있는 보행자의 출현 빈도를 추정한다. 전동킥보드의 경우 개인형 이동장치로서 자전거도로 내 진입이 가능하나, 통행량이 많을 시 자전거 운행에 위험이 될 수 있으

<Table 1> Bicycle road hazard detection elements

Category	Detailed type	Sensing elements and criteria
Facility standard	Effective width	At least 1.5m
	Free space width	At least 0.5m
	Disconnected route occurrence	Conflict with other facilities
Road surface condition	Damage to pavement	Pavement condition level D, E
	Loss of road markings	Loss of pavement, lanes and road markings
	Poor drainage	Standing pools of rainwater
Road obstruction	Artificial obstacle	Bicycle road obstacles (tree, lighting, handrail etc.)
	Natural obstacle	Natural obstacle (stone, fallen leaves etc.)
	Environmental obstacle	Other obstacles on the road (ex. fallen object, waste etc.)
Human factor	Pedestrian	Frequency of pedestrian appearance
	E-scooter	Frequency of electric kickboard operation
	Prohibited vehicle	Automobile/motorcycle detection

로 전동킥보드의 운행 빈도를 추정하는 유형이다. 주행금지 차량은 자동차, 오토바이 등 자전거도로로 주행이 금지된 차량을 감지하는 요소이다.

## IV. 실증분석

### 1. 분석 방법론

본 연구는 이동형 IoT 센서 장비 운용을 위한 자전거도로 위험 감지요소 선정을 통해 자전거 통행 위험지역의 정비 및 개선을 위한 의사결정 지원 목적을 갖고 있다. 이에 과학적 근거 및 논리가 뒷받침되는 연구방법론 선택이 중요하다. 관련하여 학계에서는 연구목적에 근간한 판단기준에 대한 객관적 우선순위 대안을 제시하기 위해 다기준 의사결정법(MCDM)을 주로 활용하고 있다. 이 중 AHP는 복잡한 의사결정 상황에서 대안 선택의 구조화가 가능하고, 전문가의 경험, 지식을 기반으로 정량/정성적 요소, 주관/객관적 요소의 통합이 용이한 장점을 갖는다. 이에 정부 예비타당성조사의 종합평가에 사용되는 검증된 의사결정기법이다. AHP는 Saaty(1986)에 의해 개발되었으며, 계층의 요소 간 쌍대비교(Pairwise Comparison)를 통해 의사결정을 지원한다. Saaty(1986) 이후 수많은 연구자들에 의해 다양한 파생기법이 제시되었다. 대표적으로 Zadeh(1965)가 제안한 퍼지이론(Fuzzy Theory)을 AHP에 접목한 Fuzzy AHP가 있다. 퍼지이론은 평가 시 주관적 판단이 갖는 부정확함 및 애매성(Imprecision)을 극복하기 위해 퍼지논리(Fuzzy Logic), 퍼지집합(Fuzzy Set) 등을 도입한 개념이다. Fuzzy AHP는 불분명한 수량정보, 주관적이며 불확실한 판단 등의 애매한 현상을 수학적으로 표현 가능하여 합리적인 의사결정 대안 도출이 가능하다. 이러한 Fuzzy AHP의 장점을 고려하여, 본 연구는 자전거도로 위험 감지요소 선정 평가의 방법론으로 Fuzzy AHP를 활용하고자 한다. Fuzzy AHP는 Laarhoven and Pedrycz(1983)이 기존 AHP 함수를 토대로 삼각퍼지수(Triangular Fuzzy Number, 이하 TFN)를 사용한 보완된 계산식이다. 여기서의 TFN은 (l, m, u)은 세 개의 점의 삼각형 형태로 표현되며(l=하한, m=중간, u=상한), 이들의 면적은 TFN의 크기이다(Lee et al., 2009). 본 연구에서 사용한 Fuzzy Scale은 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Fuzzy Scale

Linguistic Scale	F-No.	Fuzzy Triangular Scale	Reciprocal F-T-Scale
equal importance	1	(1,1,1)	(1,1,1)
moderate importance	3	(2/3,1,3/2)	(2/3, 1, 3/2)
strong importance	5	(3/2,2,5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
very strong importance	7	(5/2,3,7/2)	(2/7,1/3,2/5)
extreme importance	9	(7/2,4,9/2)	(2/9,1/4,2/7)

계층별 평가기준(Criteria)을 도출하기 위해 <Table 1>의 퍼지스케일을 활용하여 쌍대비교에 따른 가중치의 평균값을 산정하였다. 식1~4를 활용하여 i번째 속성의 TFN  $S_i = (l_i, m_i, u_i)$  값을 도출한 뒤, 평가기준별 TFN  $S_i$ 의 비퍼지화(Defuzzification)를 위해 최소값의 고유벡터 정규화 값을 최종 산정하였다. 여기서  $S_i$ 는 i번째 TFN 값이며,  $l_i$ 는 하한값,  $m_i$ 는 중간값,  $u_i$ 는 상한값을 의미한다. 식1은 각 항목별 퍼지화 전 상대평가된 i부터 j 속성별 점수의 합이다. 식2는 퍼지 스케일에 따라 i부터 j 속성별 l, m, u 값에 따라 삼각퍼지화한 합계이다. 식3은 앞서 산출된 l, m, u 삼각퍼지화된 값마다 i 속성의 n개, j 속성의 m개가 계산된 각 평가기준

상대평가 항목에서의 합계이며, 식4는 l, m, u의 합계에 역수를 취한 최종 TFN 값이다(Lee et al., 2009).

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{ij} \times \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ij} \right]^{-1} \dots\dots\dots (1)$$

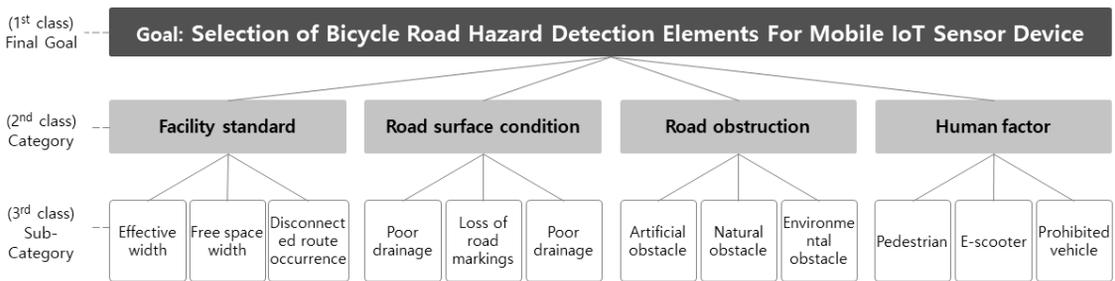
$$s.t \sum_{j=1}^m M_{ij} = \left( \sum_{j=1}^m l_{ij}, \sum_{j=1}^m m_{ij}, \sum_{j=1}^m u_{ij} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ij} = \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m l_{ij}, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m m_{ij}, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m u_{ij} \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \right]^{-1} = \left[ \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m u_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m m_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m l_{ij}} \right] \dots\dots\dots (4)$$

## 2. 분석 설계

uzzy AHP 기반의 자전거도로 위험 감지요소 선정 평가를 위해 도로·교통 박사급 연구원 및 교수 총 30명을 대상으로 전문가 설문을 실시하였다. 평가자 구성 시 자전거를 실제 이용하는 전문가 위주로 선별하였으며, 지자체 자전거도로 관리 담당 공무원을 포함하는 등 분석결과에 신뢰도 향상을 도모하고자 하였다. 설문 설계 시 설문 목적, 배경기술 및 관련 법·제도를 충분히 설명하고, 자전거도로 위험 감지요소에 대해 예시 그림을 활용하는 등 평가자들의 이해도를 높이고자 하였다. 실질적인 분석항목인 위험감지요소 간 쌍대비교 역시 상위항목 평가, 하위항목 평가를 수행할 때 세부항목별 설명 및 예시를 포함하여 문항별 직관성을 높였다. 쌍대비교의 경우 분석방법론인 Fuzzy AHP의 퍼지화를 고려하여 9점척도를 활용하였다. 설문은 대면 또는 이메일 방식을 통해 조사하였으며, 분석도구로는 윈도우 10 기반으로 Microsoft Office Excel 2019를 활용하였다. AHP 연구에서는 응답자 수가 적더라도 전문성 및 논리 일관성이 전제될 경우 표본의 크기는 문제되지 않는다(Kim et al., 2013). AHP 분석의 중요 작업 중 하나인 계층화 작업은 최종 목표 달성을 위해 평가기준과 대안 간 계층구조, 즉 의사결정 사항을 유기적으로 설계해야 한다. 1계층인 본 연구의 목표는 이동형 IoT 센서 장비 운용을 위한 자전거도로 위험 감지요소 선정이며, 실질적으로 평가되는 항목인 2계층은 상위 항목인 자전거도로 시설기준, 자전거도로 노면상태, 자전거도로 장애요소, 자전거도로 인적요소이다. 마지막 3계층은 2계층에서 세분류된 하위항목으로 자전거도로 시설기준의 경우 유효 폭, 여유공간 폭, 단절노선 발



<Fig. 2> Hierarchy structure

생이며, 자전거도로 노면상태의 경우 포장상태 손상, 노면표시 손실, 배수 불량으로 구성된다. 이어서 자전거도로 장애요소의 경우 인공적 장애요소, 자연적 장애요소, 환경적 장애요소이며, 자전거도로 인적요소의 경우 보행자, 전동 키포드, 주행금지 차량으로 구성되었다. 최종적으로 구성된 계층구조는 <Fig. 2>와 같다.

### 3. 자전거도로 위험 감지요소 중요도평가

#### 1) 계층별 중요도 분석결과

평가기준 분석에 앞서 설문 일관성 검증작업을 수행하였다. 일관성 비율(Consistency Ratio, 이하 CR)은 비교행렬 CI와 n크기에 따라 산정되며, 다수의 비교행렬 CI의 평균 무작위지수(Random Index)를 이용하여 산출된다. 일반적으로 CR이 0.1보다 작으면 일관성이 양호하며, 0.1~0.2 수준도 큰 문제가 없다고 판단한다(Kim et al., 2013). 본 분석에 활용된 26개 표본의 CR는 0.058로 매우 양호한 일관성을 나타냈다.

평가계층인 2계층, 3계층에 대한 쌍대비교 분석을 위해 앞서 제시한 퍼지스케일을 기반으로 행렬을 구성한 뒤, 퍼지 선호도의 기하평균값을 산출하였다. 이를 기반으로 평가기준별 TFN 값과 비폐지화를 위한 최소값의 고유벡터값인 최종 가중치를 산정하였으며, 그 결과는 <Table 3>과 같다. 2계층의 TFN값은 자전거도로 시설기준 (0.15, 0.22, 0.31), 자전거도로 노면상태 (0.20, 0.28, 0.41), 자전거도로 장애요소 (0.18, 0.27, 0.39), 자전거도로 인적요소 (0.16, 0.23, 0.33)로 산출되었다. 이를 토대로 최종 산정된 정규화된 가중치는 자전거도로 노면상태가 0.282로 가장 높았으며, 이어서 자전거도로 장애요소 0.264, 자전거도로 인적요소 0.234, 자전거도로 시설기준 0.220 순으로 산정되었다. 자전거도로 노면상태가 1순위로 평가된 것은 포장면의 균열 및 파열, 재포장에 따른 높이 변화 등 자전거도로 노면의 작은 손상된 상태에서도 큰 사고로 이어질 수 있는 자전거도로 운행 및 사고패턴에 대한 특성이 반영된 결과로 판단된다. 같은 맥락으로 도로시설 파손물, 낙하물, 돌, 기타 시설물 등 자전거도로의 다양한 장애요소 역시 자전거 도로 운전자에 불가항적으로 대응할 수 없는 요소로서 상대적으로 높은 가중치가 산출되었다. 반면 보행자 출현 빈도, 전동키포드 운행 빈도, 주행금지차량 감지 등 자전거도로 사고의 인적요소는 상대적으로 낮은 가중치가 산출되었다. 자전거도로 사고 인적요소는 실시간 분석 및 정보 제공이 필요한 편이나, 자전거도로 정비 및 관리 특성 상 이를 대응하기는 쉽지 않다. 실시간성 확보 및 자전거 도로 운행자 정보 제공을 위해서는 자전거도로에 감지센서 및 표출 전광판 등이 필요하나, 연장이 긴 자전거도로에 설치하기에는 무리이다. 마지막으로 자전거도로 시설기준은 가장 낮게 평가되었다. 자전거도로 시설기준은 자전거도로 설계 시 지켜져야 할 항목이고, 상대적으로 직접적인 사고를 유발하는 요소가 아니라는 전문가들의 내재된 평가 가치가 반영된 것으로 해석된다.

<Table 3> 2st Class TFN & Weight Calculation Result

2st class	Facility standard	Road surface condition	Road obstruction	Human factor
Facility standard	(1, 1, 1)	(0.63, 0.81, 1.04)	(0.64, 0.82, 1.05)	(0.71, 0.89, 1.11)
Road surface condition	(0.96, 1.24, 1.59)	(1, 1, 1)	(0.85, 1.08, 1.37)	(1.01, 1.26, 1.57)
Road obstruction	(0.94, 1.22, 1.56)	(0.73, 0.92, 1.18)	(1, 1, 1)	(0.90, 1.20, 1.58)
Human factor	(0.90, 1.12, 1.40)	(0.64, 0.79, 0.99)	(0.63, 0.84, 1.11)	(1, 1, 1)
TFN ( $S_1, S_2, S_3$ )	(0.15, 0.22, 0.31)	(0.20, 0.28, 0.41)	(0.18, 0.27, 0.39)	(0.16, 0.23, 0.33)
Weight (normalization)	0.220	0.282	0.264	0.234

같은 방법으로 3계층 평가기준별 TFN과 가중치를 산정하였으며, 그 결과는 <Table 4>와 같다. 자전거도로

시설기준의 TFN을 살펴보면, 유효 폭 (0.26, 0.36, 0.49), 여유공간 폭 (0.18, 0.24, 0.32), 단절노선 발생 (0.29, 0.40, 0.56)이며, 이에 따른 가중치는 단절노선 발생이 0.397로 가장 높고 이어서 유효 폭 0.357, 여유공간 폭 0.246 순으로 나타났다. 1순위인 단절노선 발생의 경우 단순히 자전거도로 노선이 중단되는 상황 뿐 아니라 보행로, 완충녹지, 차로 단절 등 인접 가로구성요소와 상충되어 직접적인 사고 유발이 염려되는 위험한 교통 환경이 반영된 결과로 해석된다. 유효폭은 자전거도로 시설기준의 기본적인 설계요소로서 안전한 자전거 운행에 필수적인 요소이다. 가장 낮은 평가를 받은 시설기준 요소는 여유공간 폭은 직접적인 자전거 운행에 영향을 미치지 보다는 횡단구성 시 필요한 설계요소임에 따라 상대적으로 중요도가 낮게 평가된 것으로 판단 된다.

자전거도로 노면상태의 TFN을 살펴보면, 포장상태 손상 (0.42, 0.59, 0.81), 노면표시 손실 (0.16, 0.22, 0.30), 배수불량 (0.22, 0.31, 0.44)이며, 이에 따른 가중치는 포장상태 손상이 0.519로 매우 높았으며, 이어서 배수 불량 0.276, 노면표시 손실 0.205 순으로 산출되었다. 1순위인 포장상태 손상은 다른 유형에 비해서도 가중치가 압도적으로 높게 나타났는데, 이는 포장면의 균열 및 파열, 재포장에 따른 높이 변화 등 자전거 운행자에게 눈에 띄지 않아 시인성이 낮은 편이나 자전거도로 사고에 가장 직접적인 영향을 미치는 요소이기 때문으로 판단된다. 특히 포장상태 손상 여부는 「자전거 이용시설 설치 및 관리 지침」에서 A부터 E까지 5등급으로 구분되는 판단기준이며, 관리자는 최소한 C 수준 이상을 유지해야 되는 중요요소이다. 2순위는 배수 불량이다. 우천 시 자전거 통행량은 현저히 저하되나 사고 위험성은 높아짐은 물론, 배수 불량이 곧 자전거도로 포장을 손상시키는 주요인임이 어느 정도 반영된 결과로 해석된다. 노면표시 손실은 포장재 고유색, 차선 색, 노면 표시의 훼손 및 변질 정도를 감지하는 시각적인 요인임에 가장 낮은 평가를 받은 것으로 판단된다.

자전거도로 장애요소의 TFN은 인공적 장애요소 (0.23, 0.33, 0.49), 자연적 장애요소 (0.18, 0.24, 0.34), 환경적 장애요소 (0.30, 0.42, 0.60)이며, 이에 따른 가중치는 환경적 장애요소가 0.418로 가장 높고 이어서 인공적 장애요소 0.328, 자연적 장애요소 0.254 순으로 나타났다. 앞서 자전거도로 노면상태 항목에서 가장 높은 평가를 받았던 포장상태 손상과 같이 자전거 운행자에게 시인성이 낮은 환경적 장애요소, 즉 노상 기타 장애물 등이 사고를 유발할 수 있는 가장 큰 요인으로 평가되었다. 크고 작은 도로시설 파손물 및 낙하물, 쓰레기 등이 주요 노상의 기타 장애물로서 사고 위험요인으로 간주할 수 있다. 차순위인 인공적 장애요소는 자전거 도로 차로 내 자리잡고 있는 조명시설, 난간, 신호기, 가로수 등으로서 자전거 운행자에게 환경적 장애요소 보다는 시인성이 높은 특징을 가진다. 하지만 인공적 장애요소 역시 자전거 운행에 방해되는 요소로서 장기적으로 해당 장애물들을 제거하는 조치가 필요한 요소이다. 가장 낮은 평가를 받은 항목은 토사, 낙엽, 나뭇 가지 등의 자연적 장애요소로서 자전거 운행에 방해가 되긴 하지만 사고 위험은 다소 낮다는 평가자들의 내재된 선호가치가 반영된 것으로 판단된다.

자전거도로 인적요소의 TFN을 살펴보면, 보행자 (0.21, 0.29, 0.39), 전동 킥보드 (0.22, 0.30, 0.41), 주행금지 차량 (0.28, 0.38, 0.53)이며, 이에 따른 가중치는 주행금지 차량 0.391, 전동 킥보드 0.307, 보행자 0.301 순으로 산출되었다. 가장 높게 평가된 항목은 불법주정차를 포함한 자동차, 오토바이 등 주행금지 차량을 감지하는 것으로, 자전거사고의 인적요소 중 자전거도로에 나타나지 말아야 할 동적 객체 탐지가 최우선적인 관제 필요요소로 평가된 결과이다. 전동 킥보드와 보행자의 가중치는 큰 차이가 없는 편으로, 이들 요소들은 보행자의 출현 빈도, 전동킥보드의 운행 빈도 등 2차분석이 필요하고 실시간적으로 정보 제공이 어려운 점들로 인해 차순위로 선정된 것으로 판단된다.

<Table 4> 3rd Class TFN & Weight Calculation Result

3rd class		Effective width	Free space width	Disconnected route occurrence
Facility standard	Effective width	(1, 1, 1)	(1.26, 1.62, 2.03)	(0.63, 0.78, 0.98)
	Free space width	(0.49, 0.62, 0.79)	(1, 1, 1)	(0.50, 0.64, 0.83)
	Disconnected route occurrence	(1.02, 1.28, 1.59)	(1.20, 1.55, 1.98)	(1, 1, 1)
	TFN ( $S_1, S_2, S_3$ )	(0.26, 0.36, 0.49)	(0.18, 0.24, 0.32)	(0.29, 0.40, 0.56)
	Weight (normalization)	0.357	0.246	0.397
3rd class		Damage to pavement	Loss of road markings	Poor drainage
Road surface condition	Damage to pavement	(1, 1, 1)	(2.31, 2.83, 3.37)	(1.36, 1.74, 2.16)
	Loss of road markings	(0.30, 0.35, 0.43)	(1, 1, 1)	(0.55, 0.73, 0.98)
	Poor drainage	(0.46, 0.58, 0.74)	(1.02, 1.37, 1.82)	(1, 1, 1)
	TFN ( $S_1, S_2, S_3$ )	(0.42, 0.59, 0.81)	(0.16, 0.22, 0.30)	(0.22, 0.31, 0.44)
	Weight (normalization)	0.519	0.205	0.276
3rd class		Artificial obstacle	Natural obstacle	Environmental obstacle
Road obstruction	Artificial obstacle	(1, 1, 1)	(1.05, 1.39, 1.82)	(0.57, 0.74, 0.98)
	Natural obstacle	(0.55, 0.72, 0.96)	(1, 1, 1)	(0.47, 0.59, 0.77)
	Environmental obstacle	(1.02, 1.35, 1.76)	(1.31, 1.68, 2.11)	(1, 1, 1)
	TFN ( $S_1, S_2, S_3$ )	(0.23, 0.33, 0.49)	(0.18, 0.24, 0.34)	(0.30, 0.42, 0.60)
	Weight (normalization)	0.328	0.254	0.418
3rd class		Pedestrian	E-scooter	Prohibited vehicle
Human factor	Pedestrian	(1, 1, 1)	(0.75, 0.95, 1.22)	(0.62, 0.77, 0.95)
	E-scooter	(0.82, 1.05, 1.33)	(1, 1, 1)	(0.59, 0.75, 0.97)
	Prohibited vehicle	(1.05, 1.30, 1.60)	(1.03, 1.32, 1.68)	(1, 1, 1)
	TFN ( $S_1, S_2, S_3$ )	(0.21, 0.29, 0.39)	(0.22, 0.30, 0.41)	(0.28, 0.38, 0.53)
	Weight (normalization)	0.301	0.307	0.391

2) 최종 중요도 분석결과

<Table 5>는 2계층과 3계층의 평가기준 가중치를 곱하여 최종 산정된 중요도 순위이다. 이를 기반으로 노면 위험요소 감지, 미흡한 자전거이용시설의 개선, 동적 객체요인 감지·분석, 간접적 방해요소 탐지로 재분류하여 해석 가능하다. 첫째, 노면 위험 감지요소는 포장상태 손상(0.146, 1순위), 환경적 장애요소(0.110, 2순위)로서 최상위권에 선정되었다. 같은 노면색상에서의 파손 및 깊이 변화, 눈에 띄지 않는 작은 장애물과 같이 자전거 운전자에게 시인성이 낮아 직접적인 자전거사고 위험이 되는 노면 위험요소의 감지 필요성이 강조되는 부분이다. 둘째, 미흡한 자전거이용시설의 개선요소는 단절노선 발생(0.087, 4순위), 인공적 장애요소(0.087, 5순위), 유효 폭(0.079, 6순위), 배수 불량(0.078, 7순위) 등 자전거도로 및 자전거이용시설과 직접적으로 관련된 요소로서 전체 위험요소 중 중상위권으로 선정되었다. 이 중에서는 자전거도로가 중단되거나 보행로, 도로, 완충녹지 등과 접합하여 단절노선이 발생하는 위험요소와 조명시설, 난간, 가로수 등 자전거도로 차로에 위치하여 자전거 운행에 방해가 되는 요소가 상대적으로 높게 평가된 것을 알 수 있다. 셋째, 동적

객체요인 감지·분석 요소의 경우 자전거도로에 나타나면 안 되는 주행금지 차량은 3순위(0.092)로 높은 평가를 받았지만, 보행자(0.071, 9순위), 전동 킥보드(0.072, 8순위)는 상대적으로 낮은 순위로 선정되었다. 앞서 설명한대로 2차분석이 필요하고 실시간성을 확보하기가 어려운 점들이 반영된 것으로 판단된다. 넷째, 간접적 방해요소 탐지는 여유공간 폭(0.054, 12순위), 노면표시 손실(0.058, 11순위) 요소로서 최하위권에 위치하였다. 자전거 운행에 직접적인 사고유발 요인이 아닌 점이 반영된 것으로 해석된다.

<Table 5> Analysis Result

Class A		Class B		
Category	Weight (rank)	Sub-category	Weight (rank)	Final importance (rank)
Facility standard	0.220 (4)	Effective width	0.357 (2)	0.079 (6)
		Free space width	0.246 (3)	0.054 (12)
		Disconnected route occurrence	0.397 (1)	0.087 (4)
Road surface condition	0.282 (1)	Damage to pavement	0.519 (1)	0.146 (1)
		Loss of road markings	0.205 (3)	0.058 (11)
		Poor drainage	0.276 (2)	0.078 (7)
Road obstruction	0.264 (2)	Artificial obstacle	0.328 (2)	0.087 (5)
		Natural obstacle	0.254 (3)	0.067 (10)
		Environmental obstacle	0.418 (1)	0.110 (2)
Human factor	0.234 (3)	Pedestrian	0.301 (3)	0.071 (9)
		E-scooter	0.307 (2)	0.072 (8)
		Prohibited vehicle	0.391 (1)	0.092 (3)

### 3) 분석결과 검증

본 연구에서 도출된 자전거도로 위험요인과 선행연구 분석결과와의 비교 검증을 수행하고자 한다. Joo et al.(2015)의 연구에서는 자전거 운행 속도가 낮고 가속도 변화가 큰 오르막길, 고르지 못한 표면, 장애물 등에서 자전거 운전자의 만족도가 낮게 나타났는데, 이는 본 연구의 큰 맥락과 함께한다. 세부적으로 본연구의 위험요소 대분류별 선행연구 분석결과와의 비교 검증을 수행하였다. 첫째, 자전거도로 시설기준이다. Lee 2022)의 연구에서는 서울시 자전거도로를 대상으로 실태조사를 수행했었는데 자전거도로 설계요소에서 연속성의 부재, 즉 단절노선 발생에 대한 개선이 요구되었다. 이는 본 연구의 자전거도로 시설기준에서 단절노선 발생(0.397, 2계층 1순위)이 유효 폭(0.357, 2계층 2순위), 여유공간 폭(0.246, 2계층 3순위)보다 높게 평가된 결과와 일치한다. 둘째, 자전거도로 노면상태이다. Kim et al.(2016)의 연구에서는 포장 단차 예측을 통해 자전거도로 상태 등급을 결정하고 보수 필요구간을 선정하였다. 즉, 자전거도로 노면 중 포장상태 손상을 감지하는 것이 핵심인 연구이다. 이는 본 연구에서 포장상태 손상(최중 중요도 0.146) 위험요인이 전체 1순위로 선정된 것과 그 맥락을 함께한다. 셋째, 자전거도로 장애요소이다. Schepers and Wolt(2012)는 자전거 단독사고 유형 및 특징을 연구하였는데, 자전거 단독사고의 경우 약 절반이 도로 인프라와 관련이 있는 것으로 분석되었다. 이 중 장애물과 충돌이 중요한 요소로 나타났고, 이는 본 연구 결과 중 환경적 장애요소(0.418, 2계층 1순위), 인공적 장애요소(0.328, 2계층 2순위)의 감지 중요성이 높게 나타난 것과 유사한 결과이다. 넷째, 자전거사고 인적요소이다. Joo and Oh(2013)의 연구는 자전거·자동차 공유도로에서의 안전지수가 자전거·보행자 공유도로보다 낮게 나타나는 경향을 보였고, Kim et al.(2023) 연구 역시 자전거 전용도로가 타유형보다

교통사고 발생위험도가 낮게 분석되었다. 이는 본 연구에서 자전거사고 인적요소 중 ‘주행금지 차량(0.391, 2계층 1순위)’ 요소가 전동 킥보드(0.307, 2계층 2순위), 보행자(0.301, 2계층 3순위)보다 위험도가 높게 평가된 결과와 동일하다. 각 논문마다의 연구 목적이 상이하기 때문에 동일 기준에서의 항목별 검증은 어려우나, 전반적으로 본 연구결과와의 유사한 경향을 보인다는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 본 연구에서 설정한 자전거도로 위험요소 선정의 타당성과 중요도 분석결과의 신뢰도를 검증할 수 있었다.

#### 4. 자전거도로 위험 감지 서비스 적용방안

앞서 이동형 IoT 센서 장비 운용을 위한 자전거도로 위험 감지요소를 도출하고 중요도평가를 통해 우선순위를 선정하였다. 이를 기반으로 실제 지자체에서 자전거도로 관제 및 관리를 위한 서비스 적용방안을 제시하고자 한다. 지자체마다의 서비스 요구조건이 상이할 수 있으니, 기술의 적용범위 및 중요도 우선순위를 함께 고려하여 서비스를 패키지화하였다. 첫째, 자전거도로의 노면 위험요소 감지 서비스이다. 포장면의 균열 및 파열, 재포장에 따른 높이 변화 등 포장상태 손상과 도로시설 파손물, 낙하물 등 노상 장애물과 같은 자전거도로 노면 위험요소를 감지하는 기본적인 요소이다. 해당 서비스는 전체 요소 중 1, 2순위로 평가된 요소로서 특히, 포장상태 손상은 원상복구를 위한 작업시간이 소요하기 때문에 신속한 감지가 필요하다. 둘째, 자전거도로 시설기준 개선 서비스이다. 4순위로 선정된 단절노선 발생의 경우 서비스 범위가 너무 넓기 때문에 실질적으로 시설관리 측면에서 실효성 있는 감지 범위를 선정해야 한다. 보행자, 차량 등과의 충돌사고 위험성이 높은 주유소, 버스정류장, 보행로, 차로 등과의 상충으로 인한 단절노선을 감지하는게 사고예방에 효과적일 것으로 판단된다. 자전거도로 시설기준의 기본적인 설계요소인 유효 폭(6순위)은 전반적인 자전거도로의 운행 안전성 확보 차원으로 감지가 필요한 요소로 판단된다. 셋째, 자전거도로 내 동적 객체요인 감지·분석 서비스이다. 특히, 자전거도로 주행금지 차량(3순위)에 대한 감지 및 대응이 필요할 것으로 판단된다. 넷째, 자전거도로의 노면상태 서비스수준 등급 판정 및 정보 제공이다. 이는 1순위로 선정된 포장상태 손상 정도를 행정안전부 지침 상 서비스수준에 맞춰 A부터 E까지 5등급으로 판정하는 알고리즘 개발이 필요하다. 관련 규칙에서 관리자는 최소한 C수준 이상으로 유지해야 되는 의무성이 있는 서비스 요소이며, 지자체의 자전거도로 통행 위험지역 조사, 시설개선 우선순위 선정 등에 활용될 수 있는 정책적 의사결정 기초자료로 활용 가능하다. 마지막으로 본 개발 장비를 이용하여 지자체별 자전거도로의 안전 진단이 가능할 것으로 판단된다. 이를 위해 개발 장비의 성능 수준 및 앞서 분석한 위험요소 우선순위를 고려하여 자전거도로의 안전 진단을 위한 평가지표 개발이 필요할 것으로 판단된다.

위에서 제시한 자전거도로 위험 감지요소 및 서비스 적용방안에서의 실시간성에 대해 분류할 필요가 있다. 실시간성에 따라 서비스 범위 및 대응체계가 확연히 달라지기 때문이다. 여기서 실시간성을 판단하는 기준은 사고 예방을 위한 신속한 대응 및 실시간 대시민 서비스 필요 여부이다. 첫째, 실시간성을 필요로 하는 요소들을 살펴보면, 자전거도로 장애요소 중 자연적 장애요소 및 환경적 장애요소, 자전거사고 인적요소가 있다. 자연적, 환경적 장애요소는 토사, 낙엽, 돌, 도로시설 파손물, 낙하물, 쓰레기 등 자전거도로 관리자가 신속히 처리 가능한 노면 위의 장애 위험요소이다. 인적요소인 보행자, 전동킥보드, 주행금지차량 등 동적 객체의 감지는 실시간적으로 자전거도로 이용자들에게 제공해야 사고를 미연에 방지할 수 있다. 하지만 정보제공 수단으로 전광판, 경광등 등 별도의 시설물을 설치해야 되는 부담이 될 수 있으므로, 보행자 출현 빈도, 기타 모빌리티 운행 빈도 등을 분석하여 사고 위험지역을 선별한 뒤 해당지점에 안전표지를 설치하는 것도 하나의 방안이 될 수 있다. 둘째, 비실시간성 요소는 자전거도로 시설기준, 자전거도로 노면상태, 인공적 장애요소 등이 있다. 1순위인 포장상태 손상, 4순위인 단절노선 발생 등 상위권에 위치한 요소들이 포함되었

듯, 비실시간성 요소가 사고예방 및 대응에 차선책인 것은 아니다. 다만, 자전거도로 시설 개선 및 조치에 있어 어느 정도 계획 및 작업시간이 소요됨이 반영되었다. 셋째, 비실시간성 서비스 중 12개의 감지요소 뿐 아니라, 이를 기반으로 2차적으로 분석된 시스템 운영단의 서비스이다. 예를 들어, 자전거도로 노면상태 서비스수준 등급 판정 및 정보 제공, 인적요소에 따른 자전거사고 발생 위험지역 선정, 이를 기반으로 한 자전거도로 구간별 안전지수 기반 안전지도 구축 등이 2차분석 자료로 제공 가능하다. 이는 대시민서비스로도 활용 가능할 것으로 판단된다.

## V. 결 론

본 논문은 자전거도로에서의 사고 예방 및 위험요소 관리를 위해 이동형 IoT 센서 장비 운용을 위한 자전거도로 위험 감지요소를 선정하고 서비스 적용방안을 제시하였다. 이를 위해 자전거도로 관리 법·제도 및 관련 선행연구와 모빌리티 탑재형 자전거도로 위험 자동감지 기술을 토대로 FGI를 수행하여 자전거도로 위험 감지요소를 1차적으로 선정하였다. 해당 위험 감지요소를 대상으로 도로·교통 분야 30명의 전문가 설문 기반의 Fuzzy AHP 분석을 수행하여 우선순위 선정 및 서비스 적용방안을 도출하였다. 대분류 항목 분석 결과, 자전거도로 노면상태 및 장애요소가 높게 평가되었는데, 이는 자전거도로 노면의 작은 손상된 상태 및 장애물에서도 큰 사고로 이어질 수 있는 자전거 운행 특성이 반영된 것으로 판단된다. 소분류 항목 분석 결과 역시 자전거 이용자 눈에 잘 띄지 않는 포장상태 손상(전체 1순위), 환경적 장애요소(2순위)가 최상위권에 선정된 것을 알 수 있었다. 중상위권으로는 단절노선 발생(4순위), 인공적 장애요소(5순위), 유효 폭(6순위), 배수 불량(7순위) 등 자전거도로 및 자전거이용시설의 미흡할 수 있는 시설관리 측면의 요소들이 선정되었다. 동적객체 요소 중 자전거도로에 나타나면 안 되는 주행금지 차량(3순위)은 상위권에 선정되었으나, 운행 가능한 전동 킥보드(8순위) 및 보행자(9순위)는 상대적으로 낮게 평가되어 하위권으로 분류되었다. 여유공간 폭(12순위), 노면표시 손실(11순위)과 같이 직접적인 사고유발 요인이 아닌 요소들은 최하위권에 선정되었다.

본 논문이 가지는 시사점은 다음과 같다. 첫째, 본 연구는 이동형 IoT 센서 장비 운용을 위한 자전거도로 위험 감지요소를 도출하고, 이를 기반으로 우선순위를 선정하여 향후 해당기술의 감지 서비스 영역을 제시하였다. 둘째, 핵심 서비스인 자전거도로 노면 위험요소와 더불어 시설기준 개선, 동적 객체요인 감지·분석, 노면상태 서비스수준 등급 판정 및 정보 제공 등 자전거도로 위험 감지 서비스 적용방안을 제시하였다. 셋째, 실질적인 자전거도로 위험 감지 서비스를 위해 실시간성에 따른 분류 및 서비스 운영전략을 제시하였다. 이를 토대로 단계별 서비스 구축계획을 수립한다면, 1단계는 자전거도로 노면 위험요소, 시설기준 개선요소 등을 대상으로 지자체 테스트베드 기반의 실증이 필요하다. 실증 시 본 연구에서 제시한 자전거도로 전용도로를 주 공간적 범위로 설정하여 기술의 신뢰도를 높이고 이후 확장하는 형태가 되어야 한다. 2단계는 서비스 운영단계이다. 실질적인 자전거도로의 정비 및 관리를 지자체에서 담당하고 있으므로, 지자체 담당부서의 자전거도로 관리대장, 관련 시스템 기반의 서비스 운영 및 연계작업을 수행해야 한다. 3단계는 서비스 확장 및 사업화 단계이다. 3단계에서는 자전거도로 전용도로 뿐 아니라 타 유형도 운영 가능해야 하며, 지자체마다의 요구가 상이할 수 있으니 위험 감지요소별 패키지 구성이 필요하다.

본 연구의 한계는 다음과 같다. 첫째, 본 연구진이 개발한 모빌리티 탑재형 IoT 센서 단말을 통해 감지 가능한 영역 내에서 자전거도로 위험 감지요소를 선정하였기에 사고발생 빈도가 높은 자전거 운전자의 과실은 고려되지 못하였다. 또한 현행법 상 개인형 이동장치의 자전거도로 운행이 가능함에 따라 상호 간섭에 따른 자전거사고 발생률이 높은 도심지역의 특수성은 고려되지 못하였다. 향후 과속, 전방주시 태만, 자전거 추월

등 인간행동학적 요소의 발굴과 개인형 이동장치와의 간섭 관련 연구가 필요할 것으로 판단된다. 둘째, 본 연구는 자전거도로 위험 감지요소의 기초연구임에 따라 공간적 범위를 자전거 전용도로로 설정하였고, 이에 따라 타 유형이 고려되지 못하였다. 자전거도로 유형에 따라 위험요소가 다를 수 있다. 특히, 자전거·보행자 겸용도로에서는 보행자와의 상충, 자전거우선도로에서는 자동차, 이륜차와의 상충 등이 핵심 위험요소일 수 있다. 향후 연구에서는 자전거도로 유형에 따른 위험요인 분석 역시 필요할 것으로 판단된다. 셋째, 자전거도로 위험 감지 서비스 실증 및 시범 운영이 필요하다. 이는 기술의 검증 뿐 아니라 분석결과의 표출 방식, 관련 데이터베이스와의 연계, 관련 법·제도 개선 방향을 제시할 수 있는 실용화 단계에서의 핵심 연구가 될 것으로 판단된다. 이러한 후속 연구가 활발히 진행되어 국민들이 안전하게 이용할 수 있는 자전거도로 운영 및 관리가 이루어지길 기대한다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다 (20240143-001, 미래 건설산업 견인 및 신시장 창출을 위한 스마트 건설기술 연구).

## REFERENCES

- Chae, C., Sim, H. and Lee, J.(2018), “Integration and decision algorithm for location-based road hazardous data collected by probe vehicles”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 6, pp.173-184.
- Hwang, J. S., Lee, J. S. and Lee, J. H.(2023), “A study on the development of road surface map based on high definition maps for managing road conditions”, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, vol. 41, no. 6, pp.661-667.
- Joo, S. and Oh, C.(2013), “A novel method to monitor bicycling environments”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 54, pp.1-13.
- Joo, S., Oh, C., Jeong, E. and Lee, G.(2015), “Categorizing bicycling environments using GPS-based public bicycle speed data”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 56, pp.239-250.
- KICT(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)(2023), *Research on smart construction technology for leading the future construction industry and creating new market*, pp.127-131.
- Kim, C. B., Hong, W. H., Jo, Y. B. and Kim, J. D.(2013), “Extraction of evaluation criteria on technology and service related to smart grid and analysis of relative importance among evaluation criteria by AHP method”, *Korea Environmental Policy And Administration Society*, vol. 21, no. 3, pp.127-144.
- Kim, J. E., Nam, S. and Lee, Z. K.(2023), “Selecting optimal locations for bicycle lanes to prevent accidents in Seoul”, *The Korea Journal of BigData*, vol. 8, no. 2, pp.45-54.
- Kim, K., Jo, S. H., An, J. H. and Kim, N.(2016), “A study on the evaluation criteria of pavement

- condition using investigation equipment of bicycle road”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 36, no. 6, pp.1125-1131.
- Kim, S. S. and Morita, Y.(2017), “A study for a lane surface design to prevent negligent accident on the bicycle lane”, *Journal of the Korea Entertainment Industry Association*, vol. 11, no. 3, pp.313-325.
- KOSIS(Korean Statistical Information Service), <https://kosis.kr>, 2024.05.03.
- KOTI(Korea Transport Institute), <https://www.koti.re.kr>, 2024.05.03.
- Laarhoven, P. and Pedrycz, W.(1983), “A fuzzy extension of Saaty’s priority theory, Fuzzy Sets and Systems”, *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 11, no. 3, pp.229-241.
- Lee, H. N.(2022), “Analyzing the present situation of bike lanes from a public design perspective: Focused on Seoul, Korea”, *Journal of The Urban Design Institute of Korea*, vol. 23, no. 6, pp.53-66.
- Lee, J. M. and Kim, S. J.(2023), “Bicycle road analysis using clustering based on deep learning”, *Journal of Korean Institute of Information Technology*, vol. 21, no. 1, pp.131-138.
- Lee, M., Kim, Y., Jun, Y. and Shin, Y.(2019), “Random forest based prediction of road surface condition using Spatio-temporal feature”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 37, no. 4, pp.338-349.
- Lee, S., Mogi, G. and Kim, J.(2009), “Decision support for prioritizing energy technologies against high oil prices: A fuzzy analytic hierarchy process approach”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 22, no. 6, pp.915-920.
- Park, S. W. and Lee, W. J.(2019), “Improvement of management of long-term care facilities through FGI”, *The Journal of the Korea Contents Association*, vol. 19, no. 1, pp.587-597.
- Saaty, T.(1986), “Absolute and relative measurement with the AHP. The most livable cities in the United States”, *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 20, no. 6, pp.327-331.
- Schepers, P. and Wolt, K. K.(2012), “Single-bicycle crash types and characteristics”, *Cycling Research International*, vol. 2, pp.119-135.
- Shim, S. and Jeong, J. J.(2021), “Detection algorithm of road damage and obstacle based on joint deep learning for driving safety”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, no. 2, pp.95-111.
- Zadeh, L.(1965), “Fuzzy sets”, *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp.338-353.