

# Level 3 자율주행버스 실주행 데이터를 활용한 제어권 전환 영향 요인 분석

## Analysis of Factors Affecting Disengagement Using Actual Driving Data in Level 3 Autonomous Bus

이 은 선\* · 신 치 현\*\*

\* 주저자 : 경기대학교 도시·교통공학과 석사과정

\*\* 교신저자 : 경기대학교 도시·교통공학과 교수

EunSeon Lee\* · ChiHyun Shin\*

\* Dept. of Urban & Transportation Eng., Kyonggi University

† Corresponding author : ChiHyun Shin, chshin@kyonggi.ac.kr

Vol. 23 No.5(2024)  
October, 2024  
pp.308~321

pISSN 1738-0774  
eISSN 2384-1729  
<https://doi.org/10.12815/kits.2024.23.5.308>

Received 16 August 2024  
Revised 5 September 2024  
Accepted 24 September 2024

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

### 요 약

정부는 2025년까지 Level 4 자율주행 버스·셔틀 상용화를 목표로 현재 도심부 도로에서 Level 3 자율주행버스의 실증을 확대하고 있으나 도심 환경의 다양한 주행 영향 요인으로 인해 안전 문제가 지속적으로 제기되고 있다. 본 연구는 판교에서 운행 중인 자율주행버스의 실주행 데이터를 활용하여 제어권 전환 다발 지점을 식별하고 정적 및 동적 도로환경요인 분석을 통해 영향 요인을 도출하였다. 분석 결과, 제어권 전환은 교차로와 버스정류장 부근에서 자주 발생하며 정류장의 존재가 전환 발생 확률을 증가시키는 것으로 나타났다. 그러나 이는 운전자의 잦은 자의적 개입 때문인 것으로 추정되어 이 변수를 제외하고 분석한 결과, 횡단보도 수 및 진출입로의 존재와 동적 요인인 안개와 비가 제어권 전환 발생 확률을 높이는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 자율주행버스의 운행 안전성 향상과 서비스의 신뢰도 제고를 위해 제어권 전환 최소화를 위한 개선 방향을 제안하였다.

핵심어 : 자율주행버스, 도로환경요인, 제어권 전환, 실주행 데이터

### ABSTRACT

The government aims to commercialize Level 4 autonomous buses and shuttles by 2025, expanding the demonstration of Level 3 autonomous buses on urban streets, where various factors affecting the driving conditions raise safety concerns. This study used actual driving data from autonomous buses in Pangyo to identify the disengagement locations and analyzed the static and dynamic road environment factors. The results showed that the disengagement of autonomous buses frequently occurs near intersections and bus stops, with those at the bus stops due primarily to operational procedures requiring driver intervention. Excluding these, the analysis identified crosswalks and driveways as static factors, whereas fog and rain are dynamic factors affecting disengagements. Based on these findings, recommendations were proposed to minimize disengagements, aiming to improve the operational safety of autonomous buses in Korea and address upcoming challenges.

Key words : Autonomous Bus, Road Environment Factors, Disengagement, Actual Bus Driving Data

## I. 서론

### 1. 연구 배경 및 목적

자율주행자동차 시범운행지구는 자율주행을 활용한 각종 서비스를 실증할 수 있도록 규제 특례가 부여되는 구역으로, 현재까지 전국 17개 시·도의 총 36개 지구가 지정되어 있으며 지속적으로 확대되고 있다 (Ministry of Land, Infrastructure and Transport Press Release, 2024). 이에 따라 국내의 각 자율주행자동차 시범운행지구에서는 Level 3 자율주행기술 실증이 활발히 진행되고 있으며, 특히 2025년 완전자율주행(Level 4) 버스·셔틀 출시를 목표로 대형 버스 형태의 Level 3 자율주행차량 도입이 확대되어 대중교통체계에서 자율주행차량의 상용화를 위한 실증이 적극적으로 진행되고 있다.

자율주행 운행설계영역(ODD, Operational Design Domain)은 자율주행시스템이 작동 가능한 도로 유형, 속도범위, 기상 및 기타 제약 조건을 포함한 범위를 정의하고 있으며, 자율주행차량은 이러한 ODD 내에서 동적 운전 태스크(DDT, Dynamic Driving Task)를 통해 출발지부터 목적지까지의 경로를 결정하고 운행 중 발생하는 내외부 이벤트를 인지하고 적절하게 대응하는 OEDR(Object and Event Detection and Response) 기능을 수행한다(Kim, 2022). Level 3 자율주행기술은 미국자동차공학회(SAE)에서 정의하는 ‘조건부 자동화’ 단계로 ODD 내에서 기본적으로 자율주행시스템이 OEDR을 수행하지만 예기치 못한 상황이 발생할 경우 운행의 주체를 자율주행시스템에서 운전자로 제어권을 전환하는 특징이 있다. 제어권 전환은 운전자가 스스로 수동운전을 선택하거나 자율주행 ODD를 이탈하는 경우에 발생할 수 있으며 이 외에도 교통, 기상 또는 다른 요인으로 인해 자동화를 위한 조건이 더 이상 충족되지 않는 경우와 시스템에 이상이 생겼거나 피치 못할 고장이 발생한 경우에도 제어권 전환이 요구된다(Electronics and Telecommunications Research Institute, 2021).

현재 Level 3 기술의 실증은 주로 도심부 도로에서 진행되고 있으며, 복잡한 도심 환경은 자율주행에 영향을 미치는 다양한 주행 요인으로 인해 제어권 전환의 주된 원인이 되고 있다(Hyun et al., 2022). 이로 인해, 자율주행차량의 실증이 증가함에 따라 자율주행차량의 안전성에 대한 문제가 지속적으로 제기되고 있으며 자율주행차량의 안전한 운행을 위해 제어권 전환에 영향을 미치는 요인을 파악할 필요가 있다. 본 연구는 제어권 전환이 요구되는 다양한 상황에 있어 교통, 기상을 포함한 도로환경요인으로 인한 제어권 전환을 중점으로 분석을 수행하고자 한다.

기존의 연구들은 안전상의 문제로 인하여 주로 시뮬레이션을 기반으로 진행되어 왔으나, 최근 자율주행차량의 실주행 데이터 수집이 증가하면서 이를 활용한 연구도 증가하고 있다. 그러나 대부분의 연구는 승용차나 미니 셔틀 형태의 자율주행차량을 대상으로 하고 정적인 요인 분석에 집중되어 있어 적용 범위가 제한적이다. 자율주행기술의 도입은 대중교통 부문에서 우선되므로 승용차 형태의 자율주행차량뿐만 아니라 대형 버스 형태의 자율주행차량을 포함한 연구가 필요하며 정적 요인뿐만 아니라 기상상황이나 교통상황 등의 동적 요인도 함께 고려한 종합적인 분석이 필요한 실정이다.

이에 본 연구는 국내 최초 자율주행 대중교통 수단인 판교 자율주행버스의 실주행 데이터를 활용하여 제어권 전환이 빈번하게 발생하는 지점을 식별하고 해당 지점의 정적 및 동적 도로환경요인을 조사하여 제어권 전환에 영향을 미치는 요인을 분석하고자 한다. 분석 결과를 바탕으로 제어권 전환을 최소화하기 위한 개선 방향을 제시함으로써 자율주행버스의 주행 안전성과 신뢰도 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 연구 절차

본 연구의 절차는 다음과 같다. 2장에서는 자율주행차량의 제어권 전환에 관한 선행연구를 고찰하였으며 제어권 전환 원인 및 영향 요인 분석 관련 연구를 중점으로 고찰하였다. 3장에서는 판교 자율주행자동차 시범운행지구에서 운행 중인 자율주행버스의 실주행 데이터를 활용하여 제어권 전환 다발 지점을 식별하였다. 모든 제어권 전환 발생 지점을 분석 대상으로 하는 것은 유의미한 결과를 도출하는 데 한계가 있으므로, 제어권 전환이 빈번하게 발생하는 지점을 선별하여 그 영향 요인을 분석하고자 하였다. 4장에서는 이러한 다발 지점에서 정적 및 동적 도로환경요인을 조사하고 이를 바탕으로 다중회귀분석을 통해 제어권 전환에 통계적으로 유의미한 영향을 미치는 요인들을 도출하였다. 마지막으로 5장에서는 분석 결과를 바탕으로 제어권 전환을 최소화하기 위한 개선 방향을 제안하고, 연구의 시사점 및 한계를 기술하였다.

## II. 선행연구 고찰

### 1. 제어권 전환 관련 선행연구

제어권 전환 관련 선행연구는 주로 자율주행차량의 제어권 전환(자율주행모드 해제) 상황 및 원인을 분석하거나 자율주행의 안전성에 영향을 미치는 도로환경요인을 분석하는 내용으로서 다음과 같다.

Yun et al.(2018)은 도로교통의 3요소인 운전자, 차량, 환경 관점에서 미국 캘리포니아 자동차관리국의 자율주행해제 보고서를 분석하였으며, 자율주행 지원 시스템의 기술적 한계, 주변 환경 인식 센서와 측위 모듈 및 판단 모듈 등의 결함, 돌발 상황, 자율주행자동차의 감속 또는 차선유지기능의 오작동이 자율주행모드 해제의 주요 원인으로 나타났다.

Park et al.(2020)은 주행 시뮬레이터를 활용하여 교통상황(LOS D, E, F)과 기하구조(직선 및 곡선부) 및 기상 상황(주야 및 강우)이 자율주행자동차의 제어권 전환 시간과 안정화 시간에 미치는 영향을 분석하였으며, 오직 곡선 반경만이 안정화 시간에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Hyun et al.(2022)은 대구 자율주행자동차 시범운행지구에서 수집된 실제 운행 데이터를 기반으로 자율주행모드 해제 원인을 분석하였다. 주요 원인으로는 다른 차량의 급격한 차선변경(Cut in), 주변 차량에 의한 운전자 개입, 공사 현장, 불법주정차, 보행자의 갑작스런 등장 등으로 나타났으며 특히 교차로에서 운전자 개입이 빈번하게 발생한 것으로 나타났다.

Kim(2024)은 상암 자율주행자동차 시범운행지구에서의 실도로 주행 데이터를 활용하여 DBSCAN 군집분석을 통해 제어권 전환 다발 구간을 도출하고, 제어권 전환 다발 구간과 비다발 구간의 환경요인을 비교 분석하였다. 분석 결과, 교차로가 있는 구간, 왕복 차로 수가 많은 구간, 횡단보도가 3개인 구간, 횡단보도가 4개인 구간에서 제어권 전환이 빈번하게 발생하는 것으로 나타났다.

Kim et al.(2023)은 상암 자율주행자동차 시범운행지구에서 수집된 자율주행차 운행 데이터를 바탕으로 공간정보분석 기법을 활용하여 제어권 전환 다발 지점을 도출하고, 자율주행의 안전성에 영향을 미치는 정적인 공간적 요인을 분석하였다. 분석 결과, 횡단보도, 신호등, 교차로, 자전거도로, 포켓차로, 주의 표지판, 중앙분리대가 자율주행 안전성에 영향을 미치는 공간적 요인으로 나타났다.

Lee et al.(2023)은 자율주행차 도시부 운행으로 발생할 수 있는 위험상황들을 모니터링하는 5가지 지표를 개발하고, 판교 제로시티 내 자율주행차 운행 위험 도로구간 특성과 위험요인을 분석하였다. 교차로 부근과

차로변경구간에서 자율주행모드 해제가 자주 발생하였으며 센서의 객체 인식, 도로 차단, 기하구조적 문제가 주요 원인으로 나타났다.

Woo et al.(2023)은 캘리포니아 DMV 자율주행 사고 보고서에서 추출된 사고 심각도와 교통사고 지점의 도로 환경적 운행설계영역을 통해 사고 심각도에 영향을 미치는 도로 환경적 요소를 도출하였다. 랜덤포레스트 분석을 통해 차선도색상태, 점선과 실선의 혼재 구간, 신호등이 있는 4지 교차로가 사고 심각도에 영향을 미치는 변수로 나타났다.

## 2. 연구의 관점 및 차별성

기존 연구들은 최근 자율주행차량의 실주행 데이터 수집 사례가 증가함에 따라, 이를 활용하여 자율주행차량의 제어권 전환(자율주행모드 해제) 원인 및 요인을 분석하는 연구를 주로 수행하였다. 그러나 이러한 연구는 승용차 및 미니 셔틀 형태의 자율주행차량을 대상으로 하여 다양한 차종의 특성을 반영하지 못하는 한계를 가지며, 주로 기하구조나 도로 및 교통안전시설물 등의 정적인 도로환경요인에 중점을 둔 분석을 수행하여 기상상황이나 교통상황과 같은 동적인 도로환경요인에 대한 분석은 부족한 실정이다. 자율주행버스의 실증이 증가함에 따라 도심 환경에서 자율주행버스의 안전하고 효율적인 운영을 위해 다양한 차종을 고려하고, 기상상황과 교통상황과 같은 동적 도로환경요인을 포함한 종합적인 분석이 필요하다. 또한, 자율주행차량의 제어권 전환 다발 지점을 시각화하고 분석하는 연구가 상대적으로 부족하여, 공간정보를 활용하여 자율주행차량 제어권 전환의 발생 패턴을 이해하고 이에 대한 개선안을 제안할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 판교에서 운행 중인 대형 버스 형태의 자율주행차량인 ‘판타G버스’의 실주행 데이터를 활용하여 제어권 전환 다발 지점을 식별하고 해당 지점의 정적 및 동적 도로환경요인을 분석함으로써 제어권 전환에 영향을 미치는 도로환경요인을 도출하고 이를 최소화하기 위한 개선 방향을 제안하고자 한다.

## Ⅲ. 자율주행 제어권 전환 다발 지점 분석

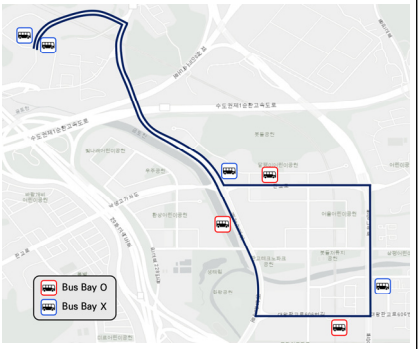
### 1. 데이터 수집 및 분석 데이터셋 생성

#### 1) 데이터 수집

본 연구에서는 판교 자율주행자동차 시범운행지구에서 운행 중인 ‘판타G버스(PanTA-G)’라 명명된 Level 3 자율주행버스에 대한 실주행 데이터를 수집하였다. 이 자율주행버스는 레이더(Radar), 라이다(Lidar), 카메라(Camera) 등 다양한 센서를 이용해 주변 환경을 인식하며 V2X 기술을 통해 신호현시정보를 받아 운행하고 있다. 자율주행버스 노선의 총연장은 5.9km로 국지도인 대왕판교로를 비롯해 창업로, 대왕판교로606번길, 판교로, 분당내곡로 등 시내도로를 포함하고 있으며, 노선의 차로수는 본선 2~4차로로 구성되어 있다. 대왕판교로의 일부 구간에는 가로변 버스전용차로가 설치되어 있으며, 자율주행버스는 주행 경로상 좌회전 4회와 우회전 2회를 포함한 총 6회의 회전을 수행하며, 회전이 필요하지 않은 경우에는 주로 최우측 차로를 이용한다.

자율주행버스의 실주행 데이터는 공간융합 빅데이터 플랫폼(<https://www.bigdata-geo.kr>)을 통해 2023년 7월부터 10월까지 약 4개월간의 데이터를 수집하였다. 수집한 데이터는 5.9km의 자율주행 노선을 약 1,450회 주행한 데이터이며, 이는 1초 단위로 기록된 판타G버스의 기본안전메세지 데이터로 차량정보, 위치정보, 자율주행플래그 등을 포함하고 있다. 판타G버스의 노선과 운영 정보는 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Operation Information of PanTA-G

| Classification           | Information                 | Autonomous Driving Route   |
|--------------------------|-----------------------------|--|
| Operation Time           | 7:30~19:30                  |  |
| No. of Station           | 7 Station                   |  |
| Route Length             | 5.9km                       |  |
| Autonomous Driving Level | Level 3                     |  |
| Sensor                   | 2 Radar, 5 Lidar, 5 Camera  |  |
| Frequency / day          | 24 Times (30-min intervals) |  |

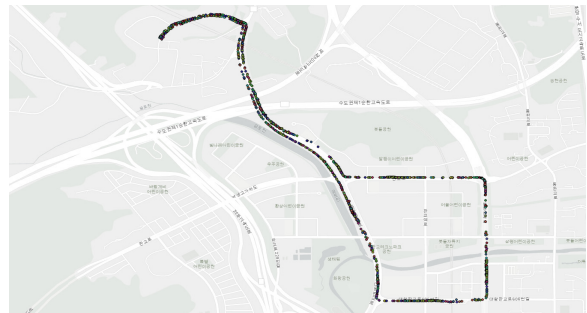
2) 분석 데이터셋 생성

본 연구에서는 자율주행버스의 제어권 전환 영향 요인 분석을 위해 자율주행버스 실주행 데이터를 바탕으로 제어권 전환 다발 지점을 도출하고자 하였다. 이를 위해 주요 변수로 날짜 및 시간, 속도, 위도, 경도, 자율주행플래그를 포함하는 새로운 데이터셋을 구성하였다. 위도와 경도는 제어권 전환 발생 위치를 식별하는 데 사용하였으며, 자율주행플래그는 제어권 전환 상태를 나타내는 지표로 활용하였다. 이 플래그에서 “1”은 수동주행, “2”는 자율주행을 의미하며, 자율주행에서 수동주행으로 전환된 시점(2→1)을 제어권 전환 발생 시점으로 정의하고 해당 시점의 데이터만을 추출하였다.

또한, 동적 요인인 기상상황 및 교통상황을 고려하기 위해 데이터를 기상상황과 시간대별로 구분하였다. 기상 정보는 기상청 날씨누리 및 웨더아이(www.weatheri.co.kr)를 통해 수집하였으며, 판교 인근 지역인 서울, 수원, 양평의 기상관측소 데이터를 활용하여 판교의 기상상황을 추정하였다. 웨더아이에서 제공하는 기상상황 분류를 맑음과 구름 조금은 ‘맑음’으로, 구름 많음과 흐림은 ‘흐림’으로 간소화하여 전체 기상상황을 맑음, 흐림, 비, 안개의 네 가지로 정의하였다. 비는 기상청 날씨누리에서 제공하는 성남 및 분당구 무인 기상관측소의 1시간 단위의 강수량을 바탕으로 시간대별로 구분하였고, 안개는 주로 새벽에 발생하여 오전 10시 이전에 대부분 소산되므로(Cho, 2003), 해당 날짜의 오전 07시부터 오전 10시까지의 데이터를 안개 데이터로 정의하였다. 생성된 분석 데이터셋과 전체 기상상황 및 시간대별 제어권 전환 발생 포인트 데이터는 <Fig. 1>, <Fig. 2>에 나타내었다.

| latitude | longitude | speed   | autonomy_level | et_yml   | occot      | hour | Weather |
|----------|-----------|---------|----------------|----------|------------|------|---------|
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:17 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:18 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:19 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:20 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:21 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:22 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:23 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:24 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:25 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:26 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:27 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:28 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:29 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:31 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:32 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:33 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:34 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:35 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:36 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:37 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0       | 1              | 20230717 | 7:07:38 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40088 | 127.0862  | 0.01005 | 1              | 20230717 | 7:07:39 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40089 | 127.0862  | 0.08004 | 1              | 20230717 | 7:07:40 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40089 | 127.0862  | 0.32116 | 1              | 20230717 | 7:07:41 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40089 | 127.0862  | 0.61305 | 1              | 20230717 | 7:07:42 AM | 7    | Rainy   |
| 37.4009  | 127.0862  | 0.89445 | 1              | 20230717 | 7:07:43 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40091 | 127.0862  | 1.01505 | 1              | 20230717 | 7:07:44 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40092 | 127.0862  | 1.2261  | 1              | 20230717 | 7:07:45 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40093 | 127.0862  | 1.29645 | 1              | 20230717 | 7:07:46 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40094 | 127.0862  | 1.2864  | 1              | 20230717 | 7:07:47 AM | 7    | Rainy   |
| 37.40095 | 127.0862  | 1.25625 | 1              | 20230717 | 7:07:48 AM | 7    | Rainy   |

<Fig. 1> Dataset segmented by hourly basis weather conditions



<Fig. 2> Data for KDE & Hot Spot Analysis Using ArcGIS Pro

## 2. 자율주행 제어권 전환 다발 지점 분석

### 1) 분석 방법

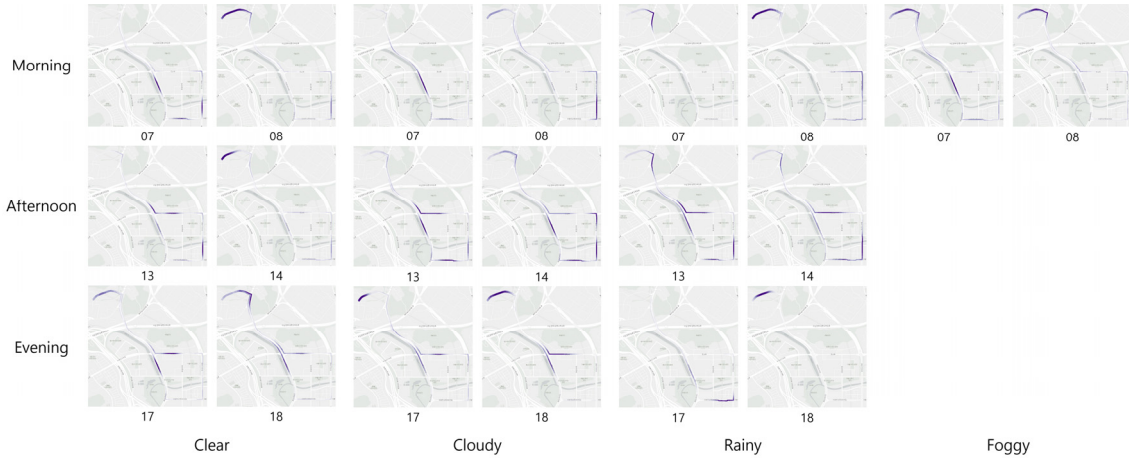
본 연구에서는 판교에서 운행 중인 자율주행버스의 제어권 전환 다발 지점을 식별하기 위해 ArcGIS Pro를 사용하여 커널밀도추정(KDE, Kernel Density Estimation) 및 핫스팟 분석(Hot Spot Analysis; Getis-Ord  $G_i^*$ )을 수행하였다. 기존 연구에서는 주로 격자 그리드를 활용하여 핫스팟 분석을 진행하였으나, 자율주행차량의 제어권 전환은 도로 위에서 발생하기 때문에 보다 정확한 분석을 위해서는 도로 링크를 따라 데이터를 할당하여 분석하는 것이 필요하다(Cho et al., 2018). 또한, 그리드를 활용하는 경우 판교의 자율주행 노선은 그리드 내 상행과 하행 노선이 모두 포함되어 구체적인 제어권 전환 다발 지점을 도출하는데 한계가 있다. 따라서, 본 연구는 ITS 국가교통정보센터에서 제공하는 전국표준노드링크 데이터(2024-03-25)를 활용하여 도로 링크 기반의 핫스팟 분석을 수행하였다.

분석을 위해, 기상상황 및 시간대별 제어권 전환 발생 포인트 데이터와 전국표준노드링크 데이터를 ArcGIS Pro에 불러와 Project 기능을 사용하여 좌표계를 일치시켰다. 사용된 좌표계는 대한민국의 공식 좌표계 중 하나인 EPSG:5179-Korea 2000/Unified CS이다. KDE에서는 Collect Events 기능을 활용하여 제어권 전환 포인트 데이터에 가중치를 부여하고 Kernel Density 기능을 통해 제어권 전환 다발 지점을 시각화하였다. 이 과정에서 Create Buffers 기능을 통해 도로 링크에 Buffer를 설정하고 이를 KDE에 활용하여 제어권 전환 발생 포인트가 실제 도로 경로에만 시각화되도록 하였다.

핫스팟 분석 과정에서는 도로 링크에 제어권 전환 포인트 데이터를 할당하기 위해 도로 링크를 분할하였다. 자율주행버스 데이터의 수집 주기는 1초 단위로, 1초 내 주행행태는 동일하다고 볼 수 있으므로 속도 데이터를 활용하여 자율주행버스의 초당 평균 주행거리를 계산하고 이를 기준으로 도로 링크를 분할하였다(Kim et al., 2023). 판교의 자율주행버스는 1초당 평균 주행거리가 6.67m이므로, 7m를 기준으로 도로 링크를 분할하였으며 자율주행버스가 주행하는 5.9km의 노선을 약 850개의 링크로 분할하였다. 분할된 링크에 Snap 기능을 활용하여 제어권 전환 발생 포인트 데이터를 할당하고 Spatial Join 기능을 통해 각 도로 링크에 할당된 제어권 전환 발생 포인트 데이터를 집계한 후 핫스팟 분석을 통해 제어권 전환 다발 지점을 도출하였다. 핫스팟 분석 시 공간관계 개념화 매개변수로는 일반적으로 고정거리대역, 역거리, 역거리 제곱이 많이 사용되고 있으며 본 연구에서는 거리에 따른 연속적인 영향력 변화를 반영할 수 있는 역거리를 사용하여 분석하였다.

### 2) 분석 결과

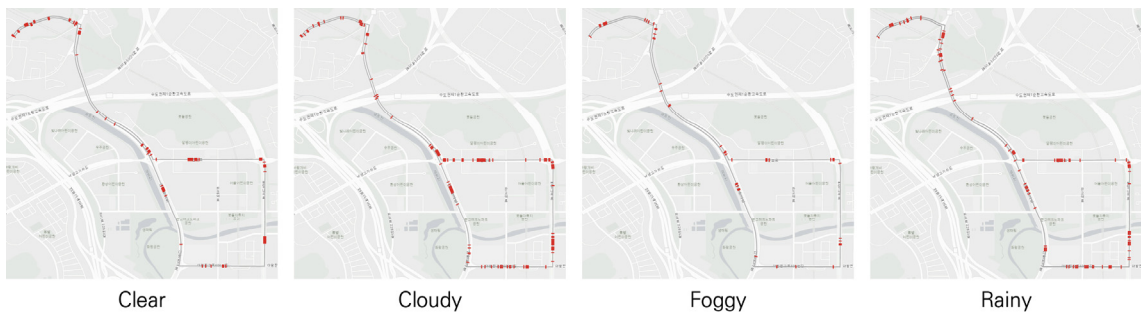
본 연구에서는 KDE를 활용하여 기상상황 및 시간대별로 제어권 전환 다발 지점을 시각화하였다. 아침(07~09시), 낮(13~15시), 저녁(17~19시) 시간대별로 요약하여 <Fig. 3>에 제시하였으며, 보라색 선이 진할수록 제어권 전환 발생 빈도가 높음을 나타낸다. 동일한 기상 조건 내에서 시간대별로 분석한 결과, 아침과 저녁 시간대인 출퇴근 시간대에는 대왕판교로와 인접한 도로에서, 낮 시간대에는 시내도로에서 제어권 전환이 자주 발생하였다. 모든 기상 조건에서 제어권 전환이 교차로나 버스정류장 부근에서 빈번하게 발생하는 유사한 패턴을 확인하였으며, 특히 흐린 날이나 비 오는 날에는 제어권 전환 다발 지점이 맑은 날에 비해 더 넓은 범위에 걸쳐 분포하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 자율주행버스의 구체적인 제어권 전환 다발 지점을 파악하기 위해 핫스팟 분석을 수행하였다.



<Fig. 3> KDE Results by Weather Condition

핫스팟 분석을 통해 기상상황 및 시간대별로 신뢰도 90%, 95%, 99%의 핫스팟을 도출하였다. 그러나 일부 기상상황이나 시간대에서는 데이터 포인트의 수가 적어, 제어권 전환 발생 건수가 1회인 지점도 신뢰도 99% 핫스팟으로 도출되는 경우가 나타났다. 이는 도출된 핫스팟의 신뢰성을 저하시킬 수 있으므로, 본 연구에서는 신뢰도 99% 핫스팟 중에서도 Z-score 값이 3 이상인, 통계적으로 높은 수준의 유의성을 가진 지점들만을 제어권 전환 다발 지점으로 정의하여 분석에 활용하였다.

이러한 방식으로 선정된 기상상황별 제어권 전환 다발 지점은 <Fig. 4>에 나타내었다. 기상상황별로 모든 시간대의 제어권 전환 다발 지점을 통합하여 나타내었으며 맑은 날 168곳, 흐린 날 142곳, 안개 낀 날 31곳, 비 오는 날 145곳 총 486곳의 제어권 전환 다발 지점이 도출되었다. 안개는 오전 07시부터 10시 이전의 시간대에 한정되어 있어 다른 기상 조건에 비해 제어권 전환 다발 지점의 수가 상대적으로 적게 도출되었다. 기상상황별 제어권 전환 다발 지점은 공통으로 버스정류장과 교차로 부근으로 나타나 해당 지점에서 제어권 전환이 빈번하게 발생하는 것을 알 수 있었으며, 맑은 날보다 흐리거나 비 오는 날에 제어권 전환 다발 지점이 더 넓게 분포하는 것으로 나타났다. 또한, 제어권 전환 다발 지점 간의 평균 거리를 조사한 결과 맑은 날 598.8m, 흐린 날 484.2m, 안개 낀 날 570.7m, 비 오는 날 450.6m로 나타나 기상상황이 나빠질수록 제어권 전환 발생 간의 평균 거리가 짧아져 더 자주 제어권 전환이 발생하는 것으로 나타났다.



<Fig. 4> Hot Spot Analysis Results by Weather Condition

## IV. 정적 및 동적 도로환경요인이 제어권 전환에 미치는 영향

### 1. 정적 및 동적 도로환경요인 조사

#### 1) 정적 및 동적 도로환경요인 구성

본 연구는 도출된 제어권 전환 다발 지점에서 정적 및 동적 도로환경요인들을 조사하고 제어권 전환 영향 요인을 분석하기 위해 선행연구에서 활용된 도로환경요인을 참고하여 본 연구의 정적 및 동적 도로환경요인을 정의하였다. 정적 도로환경요인으로는 도로 기하구조와 도로 및 교통안전시설물 등을 포함하였으며, 동적 도로환경요인으로는 앞서 고려한 기상상황과 교통상황을 포함하였다.

본 연구에서 활용한 정적 및 동적 도로환경요인은 <Table 2>에 상세히 나타내었다. 정적 도로환경요인에 서 본선 차로수, 포켓차로, 주의표지, 규제표지, 지시표지, 신호등, 횡단보도는 개수를 나타내는 연속형 변수로 설정하였으며 교차로, 진출입로, 노면표시(진행방향), 노면표시(차로변경), 중앙분리대, 버스정류장은 유무를 나타내는 범주형(이산형) 변수로 설정하였다. 동적 도로환경요인의 기상상황과 교통상황도 범주형 변수로 설정하여 분석에 활용하였다.

<Table 2> Static and Dynamic Road Environment Factors

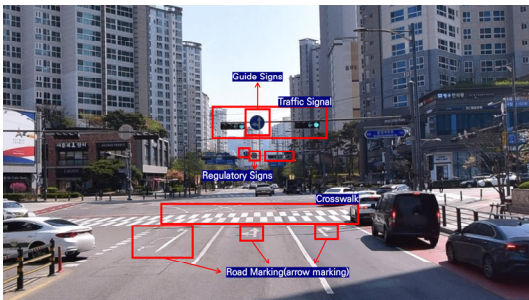
| Classification                   | Road Environment Factors |                              | Set of Variables |             |
|----------------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------|-------------|
| Static Road Environment Factors  | Road Geometry            | Mainline Lanes               | numerical        |             |
|                                  |                          | Intersection                 | categorical      |             |
|                                  |                          | Turn Pocket                  | numerical        |             |
|                                  |                          | Driveway                     | categorical      |             |
|                                  | Traffic Control Devices  | Road Markings(arrow marking) |                  | categorical |
|                                  |                          | Road Markings(lane drop)     |                  | categorical |
|                                  |                          | Traffic Signs                | Warning Signs    | numerical   |
|                                  |                          |                              | Regulatory Signs | numerical   |
|                                  |                          |                              | Guide Signs      | numerical   |
|                                  |                          | Traffic Signal               |                  | numerical   |
|                                  |                          | Crosswalk                    |                  | numerical   |
| Median                           |                          | categorical                  |                  |             |
| Other                            | Bus Stop                 | categorical                  |                  |             |
| Dynamic Road Environment Factors | Traffic Condition        | Smooth                       | categorical      |             |
|                                  |                          | Delayed                      | categorical      |             |
|                                  |                          | Congested                    | categorical      |             |
|                                  | Weather Condition        | Clear                        | categorical      |             |
|                                  |                          | Cloudy                       | categorical      |             |
|                                  |                          | Foggy                        | categorical      |             |
|                                  |                          | Rainy                        | categorical      |             |

#### 2) 조사 방법

본 연구에서는 핫스팟 분석을 통해 도출된 제어권 전환 다발 지점을 대상으로 각 지점의 제어권 전환 발생



건수와 정적 및 동적 도로환경요인을 조사하였다. 정적 요인은 네이버 지도의 로드뷰 기능을 활용하여 각 지점 전방의 요인들을 파악하였다. 동적 요인 중 기상상황은 이미 핫스팟 분석 단계에서 구분하여 분석을 완료하였으므로 추가적인 조사는 진행하지 않았다. 그러나 교통상황에 대해서는 핫스팟 분석에서 시간대별로만 구분하였기 때문에, 자율주행버스의 속도 데이터와 도시교통정보센터(UTIC)에서 제공하는 교통소통정보 개방데이터를 활용하여 시간대별 교통상황을 조사하였다. 도시교통정보센터(UTIC)의 교통소통정보는 각 링크별 교통상황을 원활(국도 50km/h 이상, 시내도로 25km/h 이상), 서행(국도 30~50km/h, 시내도로 15~25km/h), 정체(국도 30km/h 미만, 시내도로 15km/h 미만)로 구분하여 제공하고 있으며, 이 기준을 참고하여 각 제어권 전환 다발 지점의 시간대별 및 링크별 속도를 통해 교통상황을 조사하였다. 로드뷰를 통한 정적 도로환경요인 조사 방법과 조사 결과는 <Fig. 5>, <Fig. 6>에 제시하였으며 기술통계는 <Table 3>과 같다.



<Fig. 5> Investigation of Static Road Environment Factors Using Road View

<Fig. 6> Investigation Results of Road Environment Factors

<Table 3> Descriptive statistics of Static and Dynamic Road Environment Factors

| Classification       | Variable                                    | Unit    | Min  | Max   | Mean  | S.D.  |
|----------------------|---|---------|------|-------|-------|-------|
| Dependent Variable   | Probability of Autonomous Bus Disengagement | %       | 1.92 | 23.33 | 6.59  | 3.703 |
| Independent Variable | Mainline lanes                              | integer | 2    | 4     | 3.05  | 0.754 |
|                      | Intersection                                | 0,1     | 0    | 1     | 0.46  | 0.499 |
|                      | Turn Pocket                                 | integer | 0    | 3     | 0.61  | 0.577 |
|                      | Driveway                                    | 0,1     | 0    | 1     | 0.09  | 0.293 |
|                      | Road Markings(arrow marking)                | 0,1     | 0    | 1     | 0.59  | 0.493 |
|                      | Road Markings(lane drop)                    | 0,1     | 0    | 1     | 0.01  | 0.078 |
|                      | Warning Signs                               | integer | 0    | 1     | 0.14  | 0.347 |
|                      | Regulatory Signs                            | integer | 0    | 5     | 1.06  | 0.923 |
|                      | Guide Signs                                 | integer | 0    | 5     | 0.90  | 0.901 |
|                      | Traffic Signal                              | integer | 0    | 2     | 1.10  | 0.853 |
|                      | Crosswalk                                   | integer | 0    | 2     | 0.82  | 0.869 |
|                      | Median                                      | 0,1     | 0    | 1     | 0.62  | 0.485 |
| Bus Stop             | 0,1   | 0       | 1    | 0.58  | 0.494 |       |

| Classification    | Variable  | Unit | Min | Max | Mean | S.D.  |
|-------------------|-----------|------|-----|-----|------|-------|
| Traffic Condition | Smooth    | 0,1  | 0   | 1   | 0.35 | 0.476 |
|                   | Delayed   | 0,1  | 0   | 1   | 0.35 | 0.477 |
|                   | Congested | 0,1  | 0   | 1   | 0.27 | 0.443 |
| Weather Condition | Clear     | 0,1  | 0   | 1   | 0.38 | 0.487 |
|                   | Cloudy    | 0,1  | 0   | 1   | 0.29 | 0.455 |
|                   | Foggy     | 0,1  | 0   | 1   | 0.06 | 0.245 |
|                   | Rainy     | 0,1  | 0   | 1   | 0.30 | 0.458 |

## 2. 통계적 분석을 활용한 제어권 전환 영향요인 분석

### 1) 분석 방법

본 연구에서는 앞서 도출된 486곳의 제어권 전환 다발 지점에서 조사된 정적 및 동적 도로환경요인을 기반으로 자율주행버스의 제어권 전환에 미치는 영향을 분석하기 위해 IBM SPSS Statistic 25를 사용하여 다중회귀분석을 수행하였다. 다중회귀분석은 두 개 이상의 독립변수가 종속변수에 미치는 영향을 평가하는 통계적 기법으로, 분석 전제조건으로는 정규성, 등분산성, 독립성을 충족하고, 독립변수 간에는 다중공선성이 없어야 한다. 본 연구에서는 이러한 전제조건을 충족하였으며, 자율주행버스의 운행 횟수가 기상상황 및 시간대별로 달라 동일한 기준으로 분석하기 위해 제어권 전환 발생 건수를 운행 횟수를 기준으로 나눈 후 100을 곱하여 1회 운행 당 제어권 전환 발생 확률을 종속변수로 설정하였다. 독립변수로는 조사된 정적 및 동적 도로환경요인들을 포함하였으며 기상상황과 교통상황은 더미변수로 변환 후 기상상황(맑음)과 교통상황(원활)을 준거 집단으로 설정하여 회귀분석을 수행하였다.

### 2) 분석 결과

다중회귀분석 결과는 <Table 4>에 제시하였으며, 모형의 설명력( $R^2$ )은 17.1%로 나타났다. 분석에서 횡단보도 개수는 VIF(Variance Inflation Factor) 값이 6.9로 다중공선성에 영향을 미칠 수 있어 해당 변수를 제외하고 분석을 진행하였다. 분석 결과, 정적 도로환경요인 중에서는 버스정류장의 존재가 제어권 전환 발생 확률을 증가시키는 주요 요인으로 나타났으며 해당 지점에서의 평균 제어권 전환 발생 확률은 7%로 나타났다. 동적 도로환경요인에서는 교통이 정체된 상황이 원활한 상황에 비해 제어권 전환 발생 확률이 높은 것으로 나타났으며, 비가 오는 날 또한 맑은 날에 비해 제어권 전환 발생 확률이 높은 것으로 나타났다. 이는 교통 정체 상황에서 차량들이 빈번하게 멈추고 다시 출발하므로 이러한 불규칙적인 차량의 움직임이 자율주행시스템의 예측 및 적절한 대응을 어렵게 만들어 교통이 원활한 상황보다 정체되었을 때 제어권 전환이 발생 확률이 높은 것으로 판단하였다. 또한, 비는 시야를 제한하여 자율주행시스템이 주변 환경을 제대로 인식하기 어렵게 만들고, 비로 인한 미끄러운 도로 상태는 차량의 제동거리를 길게 만들어 제어권 전환 발생 확률을 증가시키는 것으로 판단하였다. 판타G버스 운영자와의 인터뷰를 통해, 본 연구 결과에서 나타난 버스정류장 부근의 제어권 전환은 정류장에서 승객의 안전한 승하차를 위해 운전자가 자율주행을 중지하고 수동 제어로 전환하는 과정에서 발생한 것으로 나타났다. 이는 해당 지점 주변의 도로환경요인이나 자율주행시스템의 한계보다는 운전자의 개입으로 인해 발생한 것이므로, 다른 정적 및 동적 도로환경요인의 영향을 왜곡할 수 있어 버스정류장에서의 제어권 전환 사례를 제외하고 추가 분석을 진행하였다.

<Table 4> Multiple Regression Analysis Results(Variable for Bus Stop Included)

|   | Unstandardized Coefficients |        | Standardized Coefficients | t      | p-value | VIF     |       |
|---|-----------------------------|--------|---------------------------|--------|---------|---------|-------|
|   | B                           | S.E.   | B                         |        |         |         |       |
| Constant  | 1.501                       | 0.155  |                           | 9.658  | 0.000** |         |       |
| Mainline lanes  | -0.032                      | 0.040  | -0.048                    | -0.815 | 0.415   | 1.966   |       |
| Intersection  | 0.016                       | 0.079  | 0.015                     | 0.196  | 0.845   | 3.437   |       |
| Turn Pocket   | -0.072                      | 0.049  | -0.082                    | -1.473 | 0.142   | 1.739   |       |
| Driveway  | 0.035                       | 0.083  | 0.020                     | 0.421  | 0.674   | 1.305   |       |
| Road Markings(arrow marking)  | -0.006                      | 0.056  | -0.006                    | -0.110 | 0.912   | 1.669   |       |
| Road Markings(lane drop)  | -0.110                      | 0.281  | -0.017                    | -0.390 | 0.697   | 1.072   |       |
| Warning Signs   | -0.018                      | 0.111  | -0.012                    | -0.158 | 0.874   | 3.271   |       |
| Regulatory Signs  | 0.028                       | 0.036  | 0.051                     | 0.782  | 0.435   | 2.380   |       |
| Guide Signs   | 0.013                       | 0.033  | 0.023                     | 0.399  | 0.690   | 1.903   |       |
| Traffic Signal  | 0.034                       | 0.052  | 0.057                     | 0.659  | 0.510   | 4.290   |       |
| Median  | 0.031                       | 0.058  | 0.029                     | 0.527  | 0.598   | 1.756   |       |
| Bus Stop  | 0.210                       | 0.050  | 0.206                     | 4.226  | 0.000** | 1.335   |       |
| Traffic Condition   | Delayed                     | 0.066  | 0.059                     | 0.063  | 1.131   | 0.259   | 1.733 |
|   | Congested                   | 0.144  | 0.076                     | 0.126  | 1.896   | 0.059*  | 2.493 |
| Weather Condition   | Cloudy                      | -0.013 | 0.055                     | -0.012 | -0.245  | 0.807   | 1.361 |
|   | Foggy                       | -0.064 | 0.093                     | -0.031 | -0.680  | 0.497   | 1.152 |
|   | Rainy                       | 0.400  | 0.056                     | 0.362  | 7.161   | 0.000** | 1.440 |
| R <sup>2</sup> =0.171, Adj-R <sup>2</sup> =0.141 F=5.669, p<0.001, DW=1.856 |                             |        |                           |        |         |         |       |

\* p<0.1, \*\* p<0.05

Reference group: 1) Weather Condition - Clear 2) Traffic Condition - Smooth

전체 기상상황별 제어권 전환 발생 지점 486곳의 데이터 중 버스정류장이 위치한 281곳을 제외한 205곳의 데이터를 활용해 추가 분석을 진행한 결과, 모형의 설명력(R<sup>2</sup>)은 42.3%로 초기 분석 결과보다 설명력이 높게 나타났으며 정적 도로환경요인 중에서는 횡단보도의 수와 진출입로의 존재가 제어권 전환 발생 확률을 증가시키는 주요 요인으로 나타났다. 횡단보도가 있는 지점과 진출입로가 있는 지점에서의 평균 제어권 전환 발생 확률은 모두 6.6%로 나타났고, 횡단보도는 주로 차량의 충돌이 잦은 교차로 인근에 위치하며 자율주행버스는 주로 진출입로와 가까운 우측 차로를 사용함에 따라 이러한 요인들이 제어권 전환 발생 확률에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 동적 도로환경요인 중 기상상황은 비 오는 날과 안개 낀 날이 제어권 전환 발생 확률에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면, 교통상황은 초기 분석 결과와는 달리 제어권 전환 발생 확률에 통계적으로 유의한 영향을 미치지 않았으며 이는 버스정류장 사례 제외로 인해 영향력이 감소한 것으로 파악되었다.

<Table 5> Multiple Regression Analysis Results(Variable for Bus Stop Excluded)

|   |           | Unstandardized Coefficients |       | Standardized Coefficients | t      | p-value            | VIF   |
|---|-----------|-----------------------------|-------|---------------------------|--------|--------------------|-------|
|   |           | B                           | S.E.  | B                         |        |                    |       |
| Constant  |           | 1.280                       | 0.173 |                           | 7.410  | 0.000**            |       |
| Mainline lanes  |           | 0.003                       | 0.042 | 0.005                     | 0.070  | 0.944              | 1.736 |
| Intersection  |           | 0.054                       | 0.090 | 0.054                     | 0.604  | 0.547              | 2.622 |
| Turn Pocket   |           | -0.024                      | 0.050 | -0.031                    | -0.470 | 0.639              | 1.403 |
| Driveway  |           | 0.147                       | 0.088 | 0.110                     | 1.668  | 0.097*             | 1.408 |
| Road Markings(arrow marking)  |           | -0.112                      | 0.075 | -0.112                    | -1.500 | 0.135              | 1.797 |
| Road Markings(lane drop)  |           | -0.220                      | 0.235 | -0.055                    | -0.935 | 0.351              | 1.128 |
| Warning Signs   |           | 0.003                       | 0.116 | 0.002                     | 0.027  | 0.978              | 2.044 |
| Regulatory Signs  |           | 0.045                       | 0.039 | 0.097                     | 1.156  | 0.249              | 2.288 |
| Guide Signs   |           | -0.021                      | 0.031 | -0.047                    | -0.654 | 0.514              | 1.698 |
| Traffic Signal  |           | -0.002                      | 0.068 | -0.003                    | -0.027 | 0.978              | 3.831 |
| Crosswalk   |           | 0.127                       | 0.071 | 0.213                     | 1.791  | 0.075 <sup>△</sup> | 4.570 |
| Median(raised)  |           | 0.080                       | 0.077 | 0.083                     | 1.034  | 0.302              | 2.073 |
| Traffic Condition   | Delayed   | 0.024                       | 0.075 | 0.025                     | 0.322  | 0.748              | 1.961 |
|   | Congested | 0.040                       | 0.089 | 0.038                     | 0.452  | 0.652              | 2.284 |
| Weather Condition   | Cloudy    | -0.062                      | 0.075 | -0.058                    | -0.821 | 0.413              | 1.600 |
|   | Foggy     | 0.353                       | 0.130 | 0.166                     | 2.707  | 0.007**            | 1.221 |
|   | Rainy     | 0.568                       | 0.070 | 0.576                     | 8.080  | 0.000**            | 1.647 |
| R <sup>2</sup> =0.423, Adj-R <sup>2</sup> =0.371 F=8.080, p<0.001, DW=1.867 |           |                             |       |                           |        |                    |       |

\*p<0.1, \*\*p<0.05

Reference group: 1) Weather Condition - Clear 2) Traffic Condition - Smooth

## V. 결 론

본 연구는 판교 자율주행자동차 시범운행지구에서 운행 중인 자율주행버스의 실주행 데이터를 바탕으로 제어권 전환 다발 지점을 식별하고, 해당 지점에서의 정적 및 동적 도로환경요인을 분석함으로써 제어권 전환에 영향을 미치는 요인들을 도출하고자 하였다. 이를 위해 기존의 제어권 전환 관련 연구들을 고찰하고, 실주행 데이터를 기상상황과 시간대별로 구분하여 KDE와 핫스팟 분석을 통해 제어권 전환 다발 지점을 도출하였으며, 특히 버스정류장 및 교차로 부근에서 제어권 전환이 자주 발생하는 것을 확인하였다. 도출된 제어권 전환 다발 지점에서 정적 및 동적 도로환경요인을 조사하고 다중회귀분석을 통해 제어권 전환에 영향을 미치는 요인을 도출하였다. 분석 결과, 정적 요인 중에서는 버스정류장의 존재가 제어권 전환 발생 확률에 유의미한 영향을 미쳤으나 이는 승객의 안전한 승하차를 위한 운전자의 개입으로 인한 결과로 추정되었다. 이에 따라 버스정류장의 데이터를 제외하고 추가 분석을 진행하여 횡단보도의 개수와 진출입로의 존재가 제어권 전환 발생 확률에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 동적 요인으로는 기상상황이 제어권 전환 발생 확률에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 안개나 비와 같이 시야를 제한하는 기상 조건에서 제어권 전환이 빈번하게 발생한 것이 드러났다. 반면, 교통상황은 초기 분석 결과에서는 교통이 정체된 상황이 원활한

상황에 비해 제어권 전환 발생 확률을 증가시키는 것으로 나타났으나, 버스정류장 데이터의 제외로 인해 그 영향력이 감소한 것으로 나타났다.

이러한 결과를 바탕으로, 자율주행버스의 제어권 전환을 최소화하기 위해 다음과 같은 개선 방향을 제안하였다. 먼저, 안개나 비와 같이 시야 확보가 어려운 상황에서도 주변 환경을 정확히 인식할 수 있도록 자율주행 센서 중 기상 변화에 민감한 Lidar, Camera 센서의 성능을 개선하여 자율주행의 신뢰성을 향상시킬 필요가 있으며 안개와 비는 도로의 노면 상태를 변화시키므로 기상상황에 따라 자율주행시스템 내 차량의 제동거리 등을 조절하는 등의 조치가 필요하다. 또한, 판교의 자율주행버스는 안전거리가 7m로 설정되어 있으며 현재 시범운행 중인 자율주행차량들은 보수적인 주행행태를 보이고 있어(Choi et al., 2023), 이러한 차량들은 정체 상황에서 안전거리 확보, 차로 변경 등에 어려움을 겪을 수 있으므로 교통상황에 따라 차량의 운행 경로 내 주행 차로를 동적으로 조정하여 안전 운행을 지원할 필요가 있다. 다수의 자율주행 안전성 관련 연구들은 자율주행기술의 발전을 위해 C-ITS 기술 활용의 필요성을 강조하고 있다. 본 연구 또한 그 필요성에 공감하며, C-ITS 기술을 활용하여 자율주행버스의 제어권 전환이 빈번하게 발생하는 구간을 사전에 인식하고 경고할 수 있도록 하는 시스템 구축을 제안한다. 이러한 개선은 국내 자율주행버스 실증 안전성을 향상시키고 서비스의 신뢰도를 제고하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 두 가지 주요 차별점을 가진다. 첫 번째는 대형 자율주행버스의 실주행 데이터를 활용하여 제어권 전환 영향 요인을 분석한 점이다. 특히 버스는 주로 우측 차로를 사용하는 특성상 승용차 데이터를 기반으로 한 기존 연구와는 달리 진출입로의 존재가 추가로 제어권 전환에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 두 번째는 정적 요인뿐만 아니라 기상상황 및 교통상황과 같은 동적 요인이 제어권 전환에 미치는 영향을 포괄적으로 분석하였다는 점이다. 이는 자율주행차량의 안전성 향상을 위해 다양한 차종 및 도로환경요인을 종합적으로 고려하는 분석이 필요함을 시사한다.

그러나 본 연구에서 활용한 실주행 데이터는 판교 자율주행자동차 시범운행지구에 한정되어 있어 결과의 일반화에는 한계가 있으며, 사용된 데이터 항목이 날짜 및 시간, 위도, 경도, 속도, 자율주행플래그 등 기본적인 차량 요소에 국한되어 있어 제어권 전환의 구체적인 발생 원인을 파악하고 개선 방향을 제안하는 데 제한적이다. 따라서, 향후 연구에서는 다른 시범운행지구의 데이터를 추가 수집하여 연구 결과를 확장하고 자율주행차량의 센서 데이터를 포함하여 타 차량과의 충돌 위험이나 접근으로 인한 제어권 전환과 같이 센서 기반으로 세밀한 주변 환경 영향을 분석할 필요가 있다. 또한, 본 연구에서는 버스정류장에서의 제어권 전환을 제외하였으나, 자율주행승용차와 달리 자율주행버스는 운행 시 버스정류장에서의 정차가 필수적이므로 승객의 승하차 시 안전을 위해 향후 이에 대한 보다 면밀한 분석과 개선 방향을 제시할 필요가 있다. 이는 자율주행을 고려한 미래 도로 설계 및 자율주행기술 개선을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 자율주행기술개발혁신사업 연구개발과제의 지원으로 수행되었습니다(RS-2023-KA160881, 자율협력주행을 위한 미래도로 설계 및 실증 기술 개발).

## REFERENCES

- Cho, H. J.(2003), “Analysis of hazardous fog and index development in Korea”, *Journal of the Korean Geographical Society*, vol. 38, no. 4, pp.478-489.
- Cho, N. H., Jun, C. M. and Kang, Y. O.(2018), “A visualization of traffic accidents hotspot along the road network”, *Journal of Cadastre & Land InformatiX*, vol. 48, no. 1, pp.201-213.
- Choi, S. K. and Shin, C. H.(2023), “Analysis of driving behavior and capacity estimation using actual traffic data of autonomous vehicles at signalized intersections”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 41, no. 5, pp.624-637.
- Electronics and Telecommunications Research Institute(2021), *Guidelines for human factors in take-over for the safe introduction of autonomous vehicles*, pp.8-35.
- Hyun, S. H., Son, J. W., Oh, Y. C., Han, J. H. and You, B. Y.(2022), “Analysis of autonomous vehicle disengagement under urban environment”, *The Korean Society of Automotive Engineers Spring Conference*, pp.1270-1271.
- Kim, S. H.(2022), “Autonomous vehicles: Current and future perspective”, *The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 71, no. 4, pp.29-32.
- Kim, S. H.(2024), *Improving autonomous driving operation based on frequent takeover zones and factor analysis using autonomous driving data*, University of Seoul.
- Kim, T. Y., Maeng, J. Y., Kang, K. P. and Bae, S. H.(2023), “Spatial factors' analysis of affecting on automated driving safety using spatial information analysis based on level 4 ODD elements”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 22, no. 5, pp.182-199.
- Korea Meteorological Administration Weather, <https://www.weather.go.kr/w/observation/land/aws-obs.do>, 2024.05.20.
- Lee, E. J., Kim, H. J., Lim, D. H. and Seo, Y. H.(2023), “Development of monitoring indicators for safe autonomous vehicle operation: Case study of Pangyo Zero City”, *Traffic Safety Research*, vol. 42, no. 2, pp.49-76.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2024), *Freeways are also being designated as autonomous vehicle demonstration areas, and autonomous truck/freight transportation is around the corner*.
- Naver Map, <https://map.naver.com>, 2024.07.20.
- Park, S. H., Yun, Y. W., Ko, H. G., Jeong, H. R. and Yun, I. S.(2020), “Analysis of the influence of road traffic conditions and weather on the take-over of a conditional autonomous vehicle”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 19, no. 6, pp.235-249.
- Urban Traffic Information Center, <http://www.utic.go.kr/>, 2024.07.01.
- Weather i, <https://www.weatheri.co.kr/>, 2024. 05. 20.
- Woo, B. R., Lee, J. W. and Tak, S. H.(2023), “The effect of road environmental factors on the severity of autonomous vehicle accidents”, *Journal of Transport Research*, vol. 30, no. 4, pp.15-24.
- Yun, H. N., Kim, S. L., Lee, J. W. and Yang, J. H.(2018), “Analysis of cause of disengagement based on US California DMV autonomous driving disengagement report”, *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, vol. 26, no. 4, pp.464-475.