

# 기상 및 대기환경에 의한 대중교통 이용변화: Panel-SUR 모형을 활용하여

## Influence of Weather and Atmospheric Conditions on Public Transportation Ridership: Using Panel Seemingly Unrelated Regression Model

구 자 현\* · 김 수 재\*\* · 김 형 규\*\*\* · 추 상 호\*\*\*\*

\* 주저자 : 홍익대학교 도시계획과 박사과정

\*\* 공저자 : 홍익대학교 도시공학과 연구교수

\*\*\* 공저자 : 홍익대학교 도시공학과 교수

\*\*\*\* 교신저자 : 홍익대학교 도시공학과 교수

Jahun Koo\* · Sujae Kim\*\* · Hyungkyoo Kim\*\*\* · Sangho Choo\*\*

\* Dept. of Urban Planning, Hongik University

\*\* Dept. of Urban Design & Planning, Hongik University

† Corresponding author : Sangho Choo, shchoo@hongik.ac.kr

Vol. 23 No.5(2024)  
October, 2024  
pp.47~61

pISSN 1738-0774  
eISSN 2384-1729  
<https://doi.org/10.12815/kits.2024.23.5.47>

Received 24 September 2024  
Revised 14 October 2024  
Accepted 15 October 2024

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

### 요 약

대중교통은 정류장까지의 접근 통행이 필수적이며, 이러한 접근 통행은 외부환경에 많은 영향을 받는다. 본 연구에서는 이러한 특성을 고려하여 외부환경에 따른 대중교통 이용변화를 분석하고자 한다. 서울특별시의 25개 행정구를 분석 대상으로 설정하였으며, 2023년 대중교통 이용실적과 기상 및 대기환경 관련 데이터를 바탕으로 분석을 수행하였다. Panel-SUR 모형을 활용하여 분석을 진행하였으며, 기상 및 대기환경 악화는 대중교통 이용을 감소시키는 것으로 도출되었다. 변수의 영향력은 주중에 비해 주말에 더 크게 나타났는데, 이는 주말에 주로 발생하는 비필수 목적통행은 외부환경에 의해 통행 발생 여부를 선택할 수 있기 때문으로 판단된다. 대기환경 관련 변수는 버스에 비해 지하철에서 영향력이 작은 것으로 도출되었는데, 이는 버스 정류장이 외부환경에 더욱 노출되어있기 때문으로 판단된다.

핵심어 : 기상 상황, 대기환경, 패널 겹보기 무관 회귀모형, 대중교통 이용량

### ABSTRACT

Public transportation require access trips to the stops, which are significantly affected by external environmental factors. This study examined the changes in public transportation usage based on these characteristics in relation to external environments. The analysis focuses on the 25 administrative districts of Seoul, using data on public transportation usage, weather, and air quality from 2023. The analysis used a Panel-SUR model, showing that deteriorating weather and air quality reduce public transportation usage. The impact of the variables was greater on weekends than on weekdays, likely because non-essential trips, which mainly occur on weekends, can be influenced by external environmental conditions when choosing whether to travel. The air quality-related variables have a smaller impact on subways than buses, likely because bus stops are more exposed to external environments.

Key words : Weather conditions, Atmospheric conditions, Panel seemingly unrelated regression, Public transportation ridership

## I. 서론

### 1. 개요

대중교통은 개인 교통수단과 다르게 정해진 경로를 따라 운행한다. 이러한 특성에 의해 승·하차는 정해진 정류장에서만 가능하다. 따라서, 대중교통 이용자는 본인의 최초 출발지에서 승차 정류장까지, 하차 정류장에서 최종 도착지까지의 추가적인 통행이 필수적이다. 이러한 접근 통행은 주로 외부에서 발생함에 따라 대중교통 이용에는 다양한 야외환경 여건에 많은 영향을 받는다. 실제로 다양한 연구에서 강수량 증가에 따라 대중교통 이용량이 감소하는 것을 규명하였다(Shin and Choi, 2014; Wei et al., 2018; Wei et al., 2019). 강수량 뿐만 아니라, 기온, 습도 등 다양한 기상 상황은 대중교통 이용에 영향을 미친다(Wei et al., 2018; Wei et al., 2019). 특히, 기온 상승은 대중교통 이용 감소에 주요한 원인 중 하나이다(Nao, 2019; Miao et al., 2019). 야외 환경은 기상뿐만 아니라 대기환경과도 연관이 있다. 특히, 최근 환경오염에 관한 관심이 증가하고 있으며, 이와 더불어 대기환경 관련 연구도 증가하고 있다. 대기환경에 따른 대중교통 이용행태 변화를 살펴본 연구에서는 오존, 초미세먼지 등의 증가는 대중교통 이용을 감소시키는 것으로 분석되었다(Ki and Lee, 2019; Mendoza et al., 2020).

우리나라 「대기환경보전법 시행규칙」에서는 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 황화수소(SO) 등 64개의 물질에 대해 대기오염물질로 지정하고 있으며, 과거에서부터 관련 물질에 대한 대기 중 농도를 측정해왔다. 하지만, 대기환경에 대한 관심 부족으로 인해 관련 연구는 수행되지 않고 있었다. 2013년 처음 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 농도를 측정하기 시작하면서 대기환경 관련 관심이 증가하였다. 초미세먼지란 직경이 1000분의 2.5mm보다 작은 아주 작은 먼지를 의미한다. 이러한 초미세먼지는 폐포까지 침투 가능하여 건강에 치명적인 문제를 발생시킬 수 있다. 이러한 미세먼지는 폐, 심장과 더불어 다양한 장기에 악영향을 미치며, 초미세먼지에 장기간 노출될 경우, 심장이나 호흡기 사망률이 1.6배 증가한다(Kloog et al., 2013; Jang, 2014). 이처럼 초미세먼지의 위험성이 알려지며, 초미세먼지에 대한 사회적 관심이 증가하였다. 초미세먼지 측정이 시작된 2013년부터 한국환경공단에서는 초미세먼지, 미세먼지, 오존, 황사에 대해 주의보 및 경보를 발령하고 있다. 이러한 노력으로 Korea Gallup에서 조사한 자료에 따르면, 미세먼지 나쁨 예보일 때 마스크를 착용하는 비율이 2014년 29%에서 2019년 53%로 대폭 증가하였다(Korea Gallup, 2024). 초미세먼지에 대한 관심은 지속적으로 증가하였으나, 2020년 COVID-19 발생으로 인해 마스크 착용이 의무화됨에 따라 그 관심이 다소 감소하였다.

COVID-19 영향이 점차 감소하며, 2023년 마스크 의무화가 전국적으로 해제되었으며, 이에 따라 마스크를 착용한 대중교통 이용자는 점차 감소하였다. 그렇다면 초미세먼지 농도 역시 감소하였는가? 국립환경과학원에서 발표한 자료를 살펴보면, 2016년 이후 초미세먼지 농도는 지속적인 감소추세를 보였으나, 2023년 처음으로 증가추세를 나타냈다(KBS News, 2024). 특히, 2020년~2022년 초미세먼지 농도 감소의 주요 원인으로 공장 가동의 감소 및 교통수단 이용 감소가 유력하여, COVID-19 영향이 감소할수록 초미세먼지 농도는 더욱 증가할 수 있음을 시사한다.

대중교통 이용은 기상 및 대기질과 같은 야외환경 여건에 영향을 받는다. 대기질 감소의 주요 요소 대부분은 교통 분야에서 발생한다. 따라서, 대중교통 이용 활성화를 통한 개인 교통수단 이용의 감소는 대기질 향상에 기여할 수 있으며, 이는 다시 대중교통 이용량 증가를 통해 대중교통 서비스 향상을 위한 기회를 제공할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 선순환 구조 구축을 위한 초기 연구로써, 다양한 야외환경에 의한 대중교통 이용행태 변화를 분석해보고자 한다.

우리나라의 대중교통은 크게 버스와 지하철로 구분할 수 있다. 버스는 일반 도로를 통해 운행됨에 따라 정류장이 도로변에 위치한다. 따라서, 버스 탑승을 위해 대기할 때, 외부환경에 노출되어있다. 반면, 지하철 대기 공간은 대부분 지하에 위치하여 외부환경과 격리되어 있다. 이러한 특성에 의해 야외환경이 버스 이용과 지하철 이용에 다른 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이를 반영하기 위해 본 연구에서는 대중교통을 버스와 지하철로 구분하여 분석하고자 한다.

우리나라 수도권 대중교통 요금체계를 살펴보면, 수도권 환승 할인제도 시행에 따라, 버스와 지하철 간 환승요금은 무료이다. 이러한 요금체계는 대중교통 수단 간 환승 통행을 증가시켜 지하철 이용과 대중교통 이용 간 상관성을 증가시킨다. 이를 고려하기 위해 본 연구에서는 종속변수 간 상관성을 고려할 수 있는 모형을 활용하고자 한다. 추가로, 동일 지역에 대해 일자별 야외환경 및 대중교통 이용 데이터를 활용함에 따라, 패널 속성이 반영된 Panel Seemingly Unrelated Regression 모형을 분석 모형으로 설정하고자 한다.

## II. 선행연구 검토

대중교통 관련 연구는 과거에서부터 폭넓게 꾸준히 진행되고 있다. 본 연구에서는 다양한 연구에서, 기후 및 대기환경에 따른 대중교통 이용행태를 분석한 연구를 주로 검토하고자 한다.

### 1. 기후 관련 대중교통 연구

기후에 따른 대중교통 이용행태를 분석한 연구에서는 주로 강수량에 따른 효과를 검토하고 있는 것으로 나타났다. Choi et al.(2013)은 2011년 서울특별시를 대상으로 강우, 강설, 불쾌지수, 체감온도 등 4가지 기상 조건에 따른 대중교통 이용변화를 분석하였다. 상관분석 및 회귀분석을 활용하여 분석을 진행하였으며, 불쾌지수 및 체감온도는 대중교통 이용수요를 약 2~7% 감소시키는 것으로 도출하였다. 또한, 기상조건은 야외에 노출되어있는 버스에서 더 큰 상관성을 나타내는 것으로 분석되었다. 특히 강우가 발생하거나 체감온도가 낮아지면 버스 이용은 기존 50%에서 약 30%대로 감소하는 반면, 승용차와 지하철 이용은 약 10% 증가하는 것으로 도출되었다. Sin and Choi(2014)는 Seemingly Unrelated Regression Model(SUR)을 활용하여 강수량이 대중교통 수단에 미치는 영향을 분석하였다. 2011년~2012년의 부산광역시 교통카드 승차자료를 활용하였으며, 대중교통을 버스, 도시철도, 마을버스로 구분하여 분석을 수행하였다. 강수량은 10mm를 기준으로 나누었으며, 10mm 이하는 유의하지 않은 것으로 분석되었다. 강수량 10mm 이상에서는 강수가 많을수록 대중교통 이용량이 감소하는 것으로 나타났으며, 도시철도 승객수가 버스 및 마을버스에 비해 강수에 따른 승객 수 변화가 상대적으로 둔감한 것으로 분석되었다. Tao et al.(2018)은 2013년 오스트리아를 대상으로 날씨에 따른 버스 이용량 변화를 분석하였다. ARIMAX와 SARIMAX를 활용하여 분석을 수행하였으며, 지역 전체 및 목적별로 구분하여 분석을 진행하였다. 날씨의 영향은 주말이 주중에 비해 더 큰 것으로 나타났으며, 목적지 특성에 따라 그 영향이 다른 것으로 도출되었다. 중심지(CBD) 또는 정류장 인근에 위치한 대형 쇼핑몰의 경우 날씨의 영향을 적게 받으며, 버스의 대체 수단이 존재하는 목적지의 경우 날씨 영향이 비교적 적은 것으로 분석되었다. Wei et al.(2018)은 2012년~2013년 오스트리아를 대상으로 날씨에 따른 대중교통 이용변화를 음이항 회귀분석을 활용하여 분석하였다. 날씨 영향은 주중과 주말에 다르게 나타났으며, 주중에 온도 및 강수량에 따라 대중교통 이용량이 보다 민감하게 변하는 것으로 분석되었다. 또한, 날씨의 요소 중 강수량이 대중교통 이용에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. Wei et al.(2019)은 2015년~2016년 호주 데이터를

활용하여 날씨가 성인 대중교통 이용자에게 미치는 영향을 분석하였다. 음이항 회귀모형을 활용하여 분석을 진행하였으며, 대중교통은 버스, 철도, 페리(Ferry)로 구분하였다. 분석결과, 페리가 날씨에 영향을 가장 많이 받는 것으로 나타났으며, 침두시에 비해 비침두시에서 날씨의 영향이 큰 것으로 나타났다. Won et al.(2019)은 기초통계분석 및 CART 분석을 통해 서울특별시 폭설에 따른 대중교통 이용변화를 분석하였다. 2016년~2017년의 서울특별시 대중교통 카드자료 및 모바일폰 통신자료를 활용하였다. 폭염 및 폭설에 따라 서울특별시 전체 통행량은 감소하는 것으로 나타났으나, 대중교통 이용은 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, 폭설 시 대중교통 이용량은 출발지의 도보접근 통행시간, 정류장 근처의 주차 가능성 등이 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

## 2. 대기환경 관련 대중교통 연구

대기환경과 관련된 대중교통 연구는 기후 관련 연구에 비해 다소 부족한 것으로 조사되었다. Welch et al.(2005)은 대기 중 오존 농도가 대중교통 이용에 미치는 영향을 분석하였다. 2001년에 시카고에서 수행된 대중교통 조사자료를 활용하여 분석을 수행하였으며, Fixed Effects Regression Model을 활용하였다. 분석결과, 오존이 대중교통 이용에 미치는 영향은 시간대별로 다르게 나타나는 것으로 분석되었다. 또한, 오존 증가에 따라 지하철 이용량이 증가하는 것으로 분석되었다. Ki and Lee(2019)는 초미세먼지 농도에 따른 지하철 이용량 변화를 분석하였다. 서울특별시를 분석 범위로 설정하였으며, 초미세먼지 농도 데이터는 에어코리아에서 제공하는 2015년부터 2019년까지의 자료를, 수단별 통행량 자료는 2016년 가구통행 실태조사 자료를 활용하였다. 분석결과, 초미세먼지 농도가 증가할수록 지하철 이용량은 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 지하철 이용량 감소는 초미세먼지 농도가 “나쁨” 이상의 단계에서 관측되는 것으로 분석되었다. 초미세먼지 농도 증가에 의한 지하철 이용량 감소 효과는 과거에 비해 점차 커지는 것으로 분석되었다. Mendoza et al.(2020)은 2014년~2016년 미국을 대상으로 미디어와 대기오염이 대중교통 이용에 미치는 영향을 분석하였다. 대기오염은 미디어에서 제공하는 “대기질”을 기준으로 측정하였으며, 상관분석을 활용하였다. 임의 통행의 경우, 대기질이 나쁠수록 감소하는 것으로 나타났으며, 일반적으로 대중교통 선호에 따라 수단을 선택하지만, 대기질이 하락할수록 대기 노출을 감소시키는 방향으로 수단 전환이 이루어지는 것으로 분석되었다. Jo and Kim(2021)은 오존과 미세먼지 농도가 도보, 승용차, 버스, 전철 수단의 통행시간에 미치는 영향을 분석하였다. SUR 모형을 활용하여 분석을 수행하였으며, 국가교통DB에서 제공하는 2016년 가구통행실태조사 자료를 활용하였다. 도서 지역을 제외한 전국 17개 광역시도를 분석 대상으로 설정하였으며, 총 523,989명에 대해 분석을 수행하였다. 대기오염물질의 농도 및 주의보·경보 발령 내역은 한국환경공단에서 운영하는 에어코리아(Air Korea) 자료를 활용하였다. 모형에서는 통행수단을 도보, 자가용, 버스, 전철로 구분하였으며, 통행 목적에 따라 필수적 통행과 선택적 통행으로 구분하였다. 분석결과, 대기오염농도와 경보는 통행시간에 대체적으로 유의미한 영향이 있는 것으로 도출되었다. 대기오염 농도가 높아질수록 자가용 통행시간은 증가하고, 버스 통행시간은 감소하는 것으로 분석되었다. 필수적 통행과 선택적 통행에서는 각 변수의 계수의 부호가 동일하게 도출되었으며, 선택적 통행에서 변화의 폭이 더 큰 것으로 나타났다. 이는 필수통행에 비해 선택적 통행에서 오존 및 미세먼지 농도가 더 큰 영향을 미치는 것을 의미한다.

## 3. 연구의 차별성

대중교통 이용과 기후 및 대기환경에 관한 다양한 선행연구를 검토한 결과는 다음과 같다. 먼저, 기상과

관련된 연구를 살펴보면, 대부분은 강수량에 대한 연구가 진행 중에 있었다. 강수량의 증가는 전체적인 통행을 감소시키기도 하며, 특히 대중교통 이용을 감소시키는 것으로 분석되었다. 대중교통 중에서도 지하철보다 버스 이용량을 더 많이 감소시키는 것으로 분석되었다. 일부 연구에서 온도에 따른 영향도 분석하였으며, 온도 증가는 대중교통 이용을 감소시키는 것으로 분석되었다. 또한 기상에 의한 대중교통 이용 감소효과는 주중에 비해 주말에서 더 크게 나타는 것으로 도출되었다. 대기환경 관련 연구를 살펴보면, 기상 관련 연구에 비해 비교적 적은 양의 연구가 진행된 것으로 조사되었다. 특히, 다양한 대기환경 요인 중, 오존과 미세먼지에 관한 연구가 주를 이루는 것으로 나타났다. 대기환경이 열악할수록 대중교통 이용은 감소하는 것으로 도출되었으며, 대기질 감소에 따라 대기 환경에 노출이 많은 대중교통 이용이 감소하는 것으로 분석되었다.

대부분 연구에서 기상과 대기환경은 각각 구분되어 분석이 진행되고 있는 것으로 검토되었다. 그러나, 두 지표는 모두 외부환경을 구성하는 요소로써, 동시에 고려하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 이를 반영하여 하나의 모형에서 기상요소와 대기환경 요소를 모두 포함하여 분석을 수행하고자 한다. 특히, 기존 연구에서는 대기환경 측정 요소로 오존과 초미세먼지에 대한 분석만 수행되고 있다. 한국환경공단에서는 다양한 대기오염물질 중, 미세먼지(PM<sub>10.0</sub>), 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>), 오존(O<sub>3</sub>), 이산화질소(NO<sub>2</sub>), 일산화탄소(CO), 아황산가스(SO<sub>2</sub>)에 대한 농도를 측정하여 정보를 제공하고 있다. 본 연구에서는 다양한 대기오염물질에 의한 영향을 검토하기 위해 구득 가능한 대기환경 관련 지표를 분석에 모두 포함하고자 한다. 이를 통해 대중교통 이용자들이 어떤 물질에 더욱 민감하게 반응하는지 세밀하게 살펴보고자 한다. 추가로, 기존 연구에서는 개별 수단에 대해 분석이 진행된 것과 달리, 본 연구에서는 대중교통을 버스와 지하철로 구분하여 두 수단의 영향을 고려한 분석을 진행하고자 한다. 특히, 우리나라는 통합 환승할인제도를 시행 중임에 따라, 지하철과 버스의 환승이 무료이다. 이는 지하철 이용량과 버스 이용량 간 상관성을 발생시킬 수 있으므로, 이를 고려한 모형을 분석에 적용하고자 한다. 대중교통 관련 연구에서 주로 활용되는 교통카드 데이터 등 대중교통 이용량 관련 데이터는 비교적 긴 시간에 대해 넓은 범위에서 집계된 데이터를 활용하게 된다. 대부분 연구에서 1년 이상의 기간을 시간적 범위로, 1개 도시 또는 나라를 지역적 범위로 설정하고 있다(Choi et al., 2013; Sin and Choi, 2014; Wei et al., 2018; Wei et al., 2019). 이러한 자료는 시계열 자료와 횡단면 자료의 특성을 모두 포함하고 있다. 기존 연구에서는 이와 같은 데이터 특성을 고려하지 못하고 있으나, 본 연구에서는 패널분석을 활용하여 데이터 특성을 고려한 분석을 진행하고자 한다.

### Ⅲ. 분석자료 및 분석방법론

#### 1. 분석자료

본 연구에서는 다양한 외부환경요인이 대중교통 이용에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위해 기상 관련 데이터, 대기 정보 데이터, 대중교통 이용 데이터의 세 가지 항목에 대한 데이터를 구축하였다.

##### 1) 기상 관련 데이터

우리나라에서는 일기예보를 위해 기상청에서 기상 관련 데이터를 수집하고 있다. 기상청의 기상자료개방포털에서는 다양한 관측기기를 활용하여 수집되는 정보를 제공하고 있다. 본 연구에서는 방재기상관측장비(Automatic Weather System: AWS)에서 수집되는 자료를 활용하였다. 해당 장비에서는 기온, 풍향 및 풍속, 강수량, 습도, 기압에 대한 정보를 시간대별로 측정하여 정보를 제공하고 있다. AWS는 서울특별시내 총 29개

가 설치되어 있으며, 각 행정구에 1개소씩, 강서구, 관악구, 동작구, 영등포구에 2개소가 설치되어 있다.

## 2) 대기 정보 데이터

한국환경공단에서는 대기 상황에 따른 대기오염 주의보·경보 발령을 위해 6가지 물질( $PM_{10.0}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $CO$ ,  $SO_2$ )에 대한 대기 중 농도를 측정하고 있다. 해당 정보는 행정구 단위로 집계되어 시간대별 자료로 제공되고 있다. 본 연구에서는 해당 자료에서 제공하는 물질별 농도를 분석에 활용하였다.

서울특별시에서는 S-DoT(Smart Seoul Data of Things)를 활용하여 서울특별시 전역의 미세먼지, 생활인구, 소음 등 다양한 도시현상 데이터를 수집하고 있다. 2024년 기준 S-DoT는 총 1,159개가 설치되어 있으며, 각 행정구 평균 46개소가 위치한다. 본 연구에서는 온도, 습도, 대기 오염물질( $PM_{10.0}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $CO$ ,  $SO_2$ )별 농도를 분석에 활용하였다.

## 3) 대중교통 이용 데이터

우리나라 대중교통 이용 데이터는 기본적으로 교통카드 데이터를 기반으로 제공하고 있다. 본 연구에서는 한국교통안전공단에서 운영하는 교통카드 빅데이터 통합정보시스템에서 제공하는 수단 통행량 자료를 활용하였다. 해당 사이트에서는 일별로 집계된 대중교통 이용실적을 제공하며, 공항버스, 광역버스, 도시철도, 마을버스, 시내버스의 5개 수단으로 구분하여 정보를 제공하고 있다. 최소 행정동 단위로 집계하여 정보를 제공하고 있으나, 본 연구에서는 다른 자료의 공간적 단위와 통일하기 위해 행정구 단위의 자료를 활용하였다.

## 2. 분석 범위설정 및 데이터 클리닝

### 1) 분석 범위설정

우리나라는 비교적 사계절이 뚜렷한 날씨 특성을 보인다. 2023년 기준 서울특별시 평균 기온은 1월 영하  $1.5^{\circ}C$ 에서 8월 영상  $27.2^{\circ}C$ 로 기온변화가 크다고 할 수 있다. 이러한 온도변화를 반영하기 위해 분석 기간은 1년으로 설정하였으며, 구득 가능한 최신 자료를 활용하기 위해 분석 기준연도는 2023년으로 설정하였다.

우리나라 인구 분포를 살펴보면, 2023년 기준 전 국민의 약 939만 명이 서울특별시에 거주하고 있는 것으로 조사되어, 전 국민의 약 20%가 서울에서 거주하는 것으로 조사되었다(Kosis, 2024). 서울특별시는 대한민국의 수도이며, 단일 시도 기준으로 가장 많은 인구가 거주하기 때문에, 데이터 구득의 장점이 있어 본 연구의 지역적 범위를 서울특별시로 설정하였다. 기상 관련 데이터는 가장 작은 지역적 범위로 행정구를 활용하고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 행정구 단위로 집계된 데이터에 대한 분석을 수행하고자 한다.

### 2) 데이터 클리닝

분석을 진행하기 위해 데이터 오류에 대한 검증 및 누락 데이터에 대한 처리 등 데이터 클리닝을 수행하였다. 첫 번째로, 데이터의 시간적 분석 단위의 일치화를 수행하였다. 기상 및 대기 정보 관련 데이터의 경우, 시간 단위로 집계된 데이터를 제공하고 있지만, 대중교통 이용데이터는 일 단위로 집계된 데이터를 제공하고 있다. 이에 따라, 시간 단위의 데이터는 평균값을 활용하여 일 단위 데이터로 보정하였다. 두 번째로, 데이터의 공간적 분석 단위의 일치화를 수행하였다. 대부분 자료의 경우, 행정구 단위로 집계된 데이터를 제공하고 있으나, 서울특별시에서 제공하는 S-DoT 자료는 각 측정 기기 단위의 정보를 제공하고 있다. 따라서, S-DoT에서 수집된 데이터는 행정구 단위로 집계하는 작업이 필요하다. 서울특별시에서는 S-DoT 위치정보에

대한 자료를 제공하고 있음에 따라, 해당 자료를 바탕으로 행정구 단위로 재집계하였다. 데이터 재집계 시, 평균값을 활용하였다. 마지막으로 누락 데이터에 대한 보정작업을 수행하였다. 분석에 활용된 데이터는 기상 관련 변수에서는 기상청에서 제공하는 자료를 기본으로, 대기환경 관련 변수에서는 한국환경공단에서 제공하는 대기오염 정보를 기본으로 설정하였으며, 해당 정보에서 측정되지 않은 지역에 대해서는 서울특별시 S-DoT에서 측정된 데이터를 활용하였다. 이에 따라 총 9,125건의 데이터에서 443건에 대해 S-DoT 자료를 활용하였다.

### 3. 분석방법론

분석에 활용되는 자료는 2023년 서울특별시의 행정구 단위의 대중교통 수단(버스, 지하철)별 이용량으로, 패널데이터로 간주할 수 있다. 패널데이터란 동일 대상(본 연구에서는 25개 행정구)에 대해 복수의 시간(본 연구에서는 일일 단위의 365일)에 걸쳐 관측하여 얻은 데이터를 의미한다(Jang, 2023). 이러한 패널데이터는 시계열 자료와 횡단면 자료의 특성을 모두 포함하고 있어, 해당 특성을 반영할 수 있는 모형을 활용해야 한다. 본 연구에서는 패널데이터의 특성과, 버스 이용량과 지하철 이용량 간 상관성을 고려하기 위해 Panel Seemingly Unrelated Regression (Panel-SUR) 모형을 활용하고자 한다. Panel-SUR 모형은 Seemingly Unrelated Regression (SUR) 모형에서 패널 특성이 반영된 모형을 의미한다. SUR 모형은 둘 이상의 회귀모형으로 구성되며, 각 회귀모형 종속변수의 오차항 간 상관성이 존재할 때 적합한 모형이다. SUR 모형은 Arnold Zeller에 의해 처음 개발되었으며, 모형의 구조는 <Equ. 1>과 같다.

$$y_k = \beta_k x_k + \epsilon_k \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $k=1, 2, \dots, n$ 을 의미하며,  $y_k$ 는 종속변수,  $x_k$ 는 독립변수,  $\beta_k$ 각 독립변수에 대한 계수,  $\epsilon_k$ 는 오차항을 의미한다. 이를 방정식 형태로 표현하면 <Equ. 2>와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & x_2 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & x_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

SUR 모형에서는 각 오차항 간의 상관성을 가정하고 있으며, 오차항 간 상관성이 존재하지 않으면 개별 회귀모형으로 추정된 결과와 동일 결과를 도출한다. 또한, SUR 모형에서는 GLS(General Least Square) 방법을 활용하여 회귀계수를 추정하게 된다. Panel-SUR 모형은 위에서 서술한 SUR 모형의 구조에서 시간에 대한 개념이 추가되어, <Equ. 3>과 같이 표현할 수 있다.

$$y_{kt} = \beta_k x_{kt} + \epsilon_{kt} \dots\dots\dots (3)$$

패널데이터에서는 자료의 특성에 의해 고정효과모형(Fix effect)과, 임의효과모형(Random effect)로 구분할 수 있다(Xu et al., 2018; Pratama et al., 2023). 고정효과모형에서는 개체의 특성과 각 변수에 대한 예측 변수 사이에 관계가 있음을 가정하며, 임의효과모형에서는 개체의 특성과 각 변수에 대한 예측 변수 사이에 관계가 없음을 가정하여 분석한다(Pratama et al., 2023). 기본적인 SUR 모형을 <Equ. 4>로 표현할 때, 고정효과모형과 임의효과모형은 각각 <Equ. 5>와 <Equ. 6>으로 표현될 수 있다(Pratama et al., 2023).

$$y_{mi} = \beta_{10}(0) + \beta_{11}(0) + \dots + \beta_{1p}(0) + \dots + \beta_{(m-1)p}(0) + \beta_{m0}(0) + \beta_{m1}X_{1i} + \beta_{m2}X_{2i} + \dots + \beta_{mp}X_{pi} + \epsilon_{mi} \dots\dots\dots (4)$$

$$y = \beta_{0mi} + \beta_{m1}X_1 + \beta_{m2}X_2 + \dots + \beta_{mp}X_{pit} + \epsilon \dots\dots\dots (5)$$

$$y_{mit} = \beta_{m1}X_{1it} + \beta_{m2}X_{2it} + \dots + \beta_{mp}X_{pit} + v_{mit} \dots\dots\dots (6)$$

#### IV. 대중교통 이용량 영향요인 분석

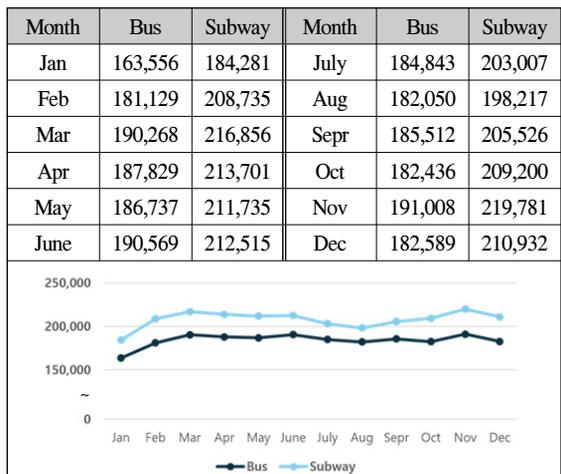
##### 1. 기초통계분석

분석을 진행하기에 앞서, 대중교통 이용행태 및 기상 및 대기환경 조건을 검토하였다. 먼저, 서울특별시의 대중교통 이용행태를 살펴보면 <Table 1>과 <Table 2>와 같다. 주중 일 평균 대중교통 이용량은 버스 21만 통행, 지하철 24만 통행 수준으로 조사되었으나, 주말 및 공휴일의 일 평균 대중교통 이용량은 버스 11~13만 통행, 지하철 12~15만 통행으로 주중에 비해 적은 것으로 나타났다. 이는 주중과 주말 및 공휴일의 생활패턴이 다르며(Lee et al., 2017; Koo and Choo, 2021), 비교적 주말에 많이 발생하는 여가 통행의 통행수단으로 승용차가 이용되기 때문으로 판단된다(Choo, 2012). 월별 대중교통 이용량을 살펴보면, 1월에 35만 통행/일로 가장 적은 것으로, 11월에 41만 통행/일로 가장 많은 것으로 나타났다. 이처럼 이용량에 소폭의 차이는 존재하지만 비교적 유사한 수준으로 분석되었다. 따라서, 본 연구에서는 요일별 생활패턴 차이를 반영하기 위해 주중과 주말을 구분하여 분석을 수행하였다. 2023년 공휴일은 총 14일(1월 1일, 1월 21일~23일, 3월 1일, 5월 1일, 5월 27일, 6월 6일, 8월 15일, 9월 28일~29일, 10월 3일, 10월 9일, 12월 25일)로 조사되었으며, 공휴일은 주말과 대중교통 이용패턴이 동일함에 따라 주말로 구분하여 분석을 수행하였다.

<Table 1> Average Daily Public Transportation Usage: Weekday vs. Weekends

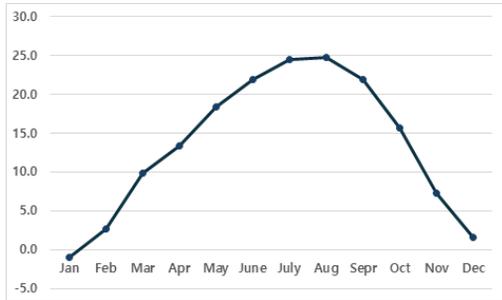


<Table 2> Average Daily Public Transportation Usage by Month

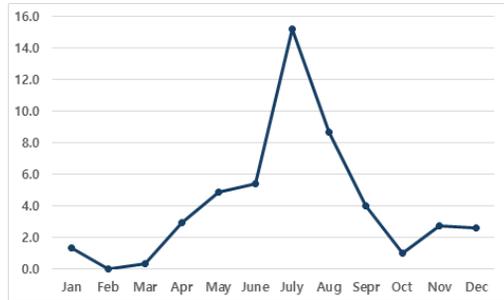


기상 조건을 검토하기 위해 월별 기온, 강수량 추이를 <Fig. 1>과 <Fig. 2>와 같이 검토하였다. 월별 기온

은 여름철인 8월에 평균 24.8℃로 최고치를, 겨울철인 1월에 평균 영하 1.0℃로 최저치를 기록하였다. 월별 강수량 추이를 살펴보면, 장마철인 7월에 평균 15.2mm로 가장 많은 것으로 조사되었다.

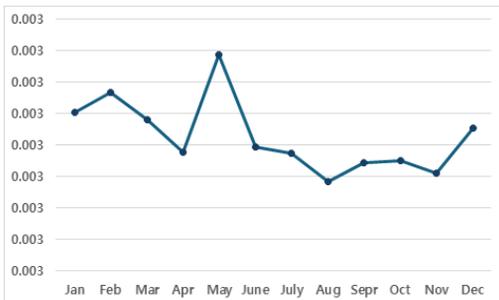


<Fig. 1> Average Monthly Temperature

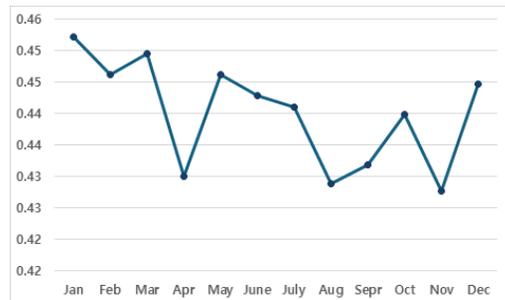


<Fig. 2> Average Monthly Precipitation

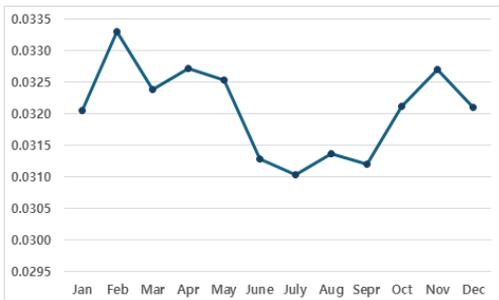
대기환경 검토를 위해 측정된 6가지 물질에 대한 월별 변화를 <Fig. 3>에서 <Fig. 8>과 같이 검토하였다. 각 물질의 평균 농도는 월별 뚜렷한 패턴은 존재하지 않는 것으로 나타났으며, 물질별 최대 및 최소 농도는 다른 기간에 발생하였다. 종합적으로 살펴보면, 5월에 SO<sub>2</sub>, PM<sub>10.0</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 농도가 최대로 도출되었으며, 11월에 CO, O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 농도가 최소로 도출되었다. 한국환경공단에서는 6가지 물질의 농도를 바탕으로 통합대기환경지수(Comprehensive Air-quality Index, CAI)를 제시하고 있다. CAI란 국민이 쉽게 이해할 수 있도록 6가지 오염물질을 바탕으로 산출하는 대기오염도이다(Airkorea, 2024). CAI 점수가 높을수록 대기오염은 심각하며, CAI 50점 이하일 때 대기환경은 “ 좋음 ”을, 101점 이상일 때 “ 나쁨 ”을 의미한다. 에어코리아에서 제공하는 CAI 계산기를 활용하여 월별 CAI 산출 결과, 5월 및 9월에 64점으로 가장 높게, 11월에 57점으로 가장 낮게 도출되었다. 이는 대기환경이 상대적으로 5월 및 9월에 가장 안 좋은 것으로, 11월에 가장 좋은 것으로 해석할 수 있다.



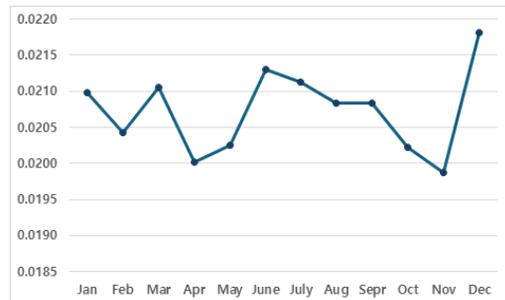
<Fig. 3> Average Monthly SO<sub>2</sub> Concentration



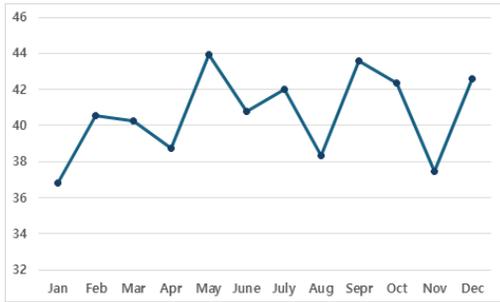
<Fig. 4> Average Monthly CO Concentration



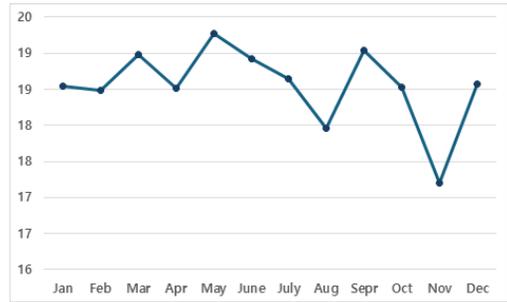
<Fig. 5> Average Monthly O<sub>3</sub> Concentration



<Fig. 6> Average Monthly NO<sub>2</sub> Concentration



<Fig. 7> Average Monthly PM<sub>10.0</sub> Concentration



<Fig. 8> Average Monthly PM<sub>2.5</sub> Concentration

## 2. 분석 결과

### 1) 변수 구축 및 모형 타당성 검토

본 연구에서는 외부환경에 따른 대중교통 이용량 변화를 살펴보고자 한다. 이를 위해 종속변수로는 대중교통 이용량을 설정하였다. 주중과 주말의 통행패턴 차이를 검토하기 위해 주중과 주말의 모형을 각각 구축하였으며, 종속변수는 버스 이용량과 지하철 이용량으로 구분하였다. 독립변수는 기상 관련 변수와 대기환경 관련 변수를 활용하였다. 기상 관련 변수로는 온도, 강수량, 습도를 반영하였으며, 대기환경 관련 변수로는 6개 대기 오염물질(PM<sub>10.0</sub>, PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>)별 농도를 반영하였다. 온도의 경우, 기온이 너무 높거나, 너무 낮으면 사람들은 불편함을 느낀다. 지하철과 버스 이용자를 대상으로 적정 온도를 분석한 결과, 버스 내부 온도는 26.2°C, 버스 정류장 온도는 22.4~28.9°C, 지하철 내부 온도는 27.4°C, 지하철 역사 온도는 22.4~30.1°C가 적절한 것으로 분석되었다(Lin et al., 2010; Almeida et al., 2020). 또한, 서울특별시의 지하철 역사를 대상으로 분석한 연구에서도 중앙 홀은 16.1~31.2°C, 대기공간은 15.9~31.5°C가 적절한 것으로 분석되었다(Han et al., 2016). 본 연구에서는 기존 선행연구에서 제시하는 적정 온도의 평균값(25.21°C)을 기준으로 설정하여, 기준 온도와의 차이를 온도 변수로 반영하였다. 강수량 및 습도의 경우, 일반적으로 강수량과 습도가 증가할수록 불편감이 증가한다. 따라서, 추가적인 변형을 수행하지 않았다. 마지막으로, 대중교통 특성을 반영하기 위해 각 행정구 내부의 버스 정류장 개수 및 지하철 정류장 개수를 지역변수로 반영하였다.

패널데이터를 분석하기 위한 적절 모형을 하기 위해 하우스만(Hausman) 검정을 수행하였다. 분석은 통계 패키지 프로그램인 STATA 16.0을 활용하였다. 하우스만 검정 결과, <Table 3>와 같이 모든 모형에서 p-value는 0.05 이하로 도출되어, 고정효과모형이 적절한 것으로 검토되었다. 이에 따라 Panel-SUR 모형 분석에서는 고정효과모형을 활용하여 분석을 진행하였다.

<Table 3> Hausman Test Results

Type	Weekday		Weekend	
	Bus	Subway	Bus	Subway
Hausman test	11.79 (0.033)	21.51 (0.000)	8.15 (0.043)	10.07 (0.034)

Note: ( ) means p-value

## 2) 분석 결과해석

주중/주말의 대중교통(버스, 지하철) 이용량에 관한 Panel-SUR 분석을 수행하였으며, 분석 결과는 <Table 4>와 같다. 먼저, 모형의 설명력을 살펴보면, 설명계수인  $R^2$ 은 최소 0.22에서 최대 0.55 수준으로 도출되었다. 본 모형에서는 기상과 대기환경에 대한 변수만 반영하였으며, 일반적으로 대중교통 이용량에 많은 영향을 미칠 것으로 판단되는 인구, 소득 등과 같은 사회경제지표가 포함되어 있지 않다. 이를 고려하였을 때, 0.2~0.5 수준의 설명계수는 비교적 높은 것으로 판단된다. 만일 모형에서 활용된 각 종속변수의 오차항 간 상관성이 존재하지 않으면, Panel-SUR 모형이 아닌 개별 패널분석을 수행하는 것이 바람직하다. 이를 확인하기 위해 브루쉬 파간 검정(Breusch-Pagan test, BP test)을 수행하였다. BP 검정 수행 결과, 주중 모형에서는 0.635, 주말 모형에서는 0.713으로 도출되었으며, 모두 유의한 것으로 나타나 종속변수의 오차항 간 상관성이 존재하는 것으로 분석되었다. 이는 개별 회귀모형이 아닌 Panel-SUR 모형의 활용이 적합함을 의미한다.

주중 모형은 25개 행정구에 대해 총 249일 데이터가 활용되어 6,225개의 자료를 바탕으로 분석을 진행하였으며, 주말 모형에서는 총 116일에 대한 2,900개의 자료를 바탕으로 분석을 진행하였다. 주중 및 주말 모형에서, 변수의 계수는 대부분 음의 부호로 도출되었다. 본 연구에서 활용된 독립변수는 변수의 크기가 증가할수록 기상 또는 대기 상황이 부정적으로 변화한다고 해석할 수 있다. 이는 대중교통 이용에 외부환경이 영향을 미치며, 외부환경이 쾌적할수록 대중교통 이용량이 증가함을 의미한다. 변수의 계수는 주중 모형에 비해 주말 모형에서 대부분 더 큰 것으로 나타났다. 이는 주중에는 필수통행이 주로 발생하고, 주말에는 여가통행이 주로 발생하기 때문으로 판단된다(Lee et al., 2017; Koo and Choo, 2021). 필수통행과 달리, 비필수통행은 외부여건 변화에 따라 통행을 포기할 수 있다. 실제로 기상 및 대기환경 악화는 등산, 공원 방문 등과 같은 외부 여가활동을 억제한다(Cho et al., 2015; Eom and Oh, 2019; Lee, 2023; Kang et al., 2024).

기상 관련 변수는 모든 변수가 유의한 것으로 도출되었다. 대중교통을 이용하기 위해서는 정류장까지의 이동이 필수적이며, 이는 일종의 외부활동으로 간주할 수 있다. 기상 상황은 외부활동 발생에 강한 영향을 미치기 때문에(Cho et al., 2015; Kang et al., 2024), 대중교통 이용량에도 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 대부분 기상 관련 변수와 달리, 습도는 버스 이용량에 양의 영향으로 분석되었다. 습도는 불쾌 지수를 증가시키는 주요 원인 중 하나이며(Kim and Kim, 2001; Kim et al., 2019), 불쾌 지수 증가는 대중교통 이용량을 감소시킨다. 개별 대중교통 이용량 관련 연구에서 불쾌 지수 증가는 지하철 이용에 음의 영향을 나타냈으나, 버스 이용에는 유의하지 않은 것으로 나타났다(Choi et al., 2013). 기존 연구에서는 각 대중교통 간 상관성을 고려하지 않고 분석하였으나, 본 연구에서는 버스와 지하철 이용의 상관성을 고려하였다. 이는 습도 증가에 따른 지하철 이용량 감소가 상대적으로 버스 이용량을 증가시키는 효과를 발생시킨 것으로 판단된다.

대기환경 관련 변수에서도 대부분 유의한 것으로 나타났으며, 대기오염물질 농도의 증가는 대중교통 이용 감소를 유발하는 것으로 도출되었다. 대기오염물질 농도 증가는 지하철에 비해 버스 이용량 감소에서 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났는데, 이는 버스 정류장이 외부환경에 직접적으로 노출되기 때문으로 판단된다. 특히 「실내공기질 관리법 시행령」 제2조에서는 실내 공기 질 관리 대상으로 모든 지하철 역사를 포함하고 있다. 버스 정류장은 연면적 2천제곱미터 이상의 대합실만을 관리 대상으로 규정하고 있어, 일반적인 버스 정류장에 대한 대기질 관리는 이루어지지 않고 있다. 대부분 대기오염물질은 버스 및 지하철 이용량을 모두 감소시키는 것으로 나타났으나,  $PM_{10.0}$  농도는 지하철 이용량을 증가시키는 것으로 나타났다. 이는 대기오염 물질별 관심의 차이에 의한 효과로 판단된다. 우리나라에서는 초미세먼지와 미세먼지, 오존, 황사에 대하여 대기오염 주의보·경보를 발령하고 있다. 이에 따라 자연스럽게 대부분 시민들은 해당 물질에 대한 관심이 높을 수밖에 없다. 특히, 미세먼지는 초미세먼지와 미세먼지로 구분하여 주의보·경보를 발령함에 따라, 다른 물질에 비해 관심도가 높다. 이러한 관심의 차이는 이용량에도 다르게 적용된 것으로 판단된다. 즉, 대부분

대기오염물질은 개별 농도보다는 전체적인 대기질로써 인식되어, 대기질 감소에 따라서 대중교통 이용자가 승용차를 이용하도록 유도한다. 미세먼지와 초미세먼지 역시 이러한 효과를 발생시킨다. 다만, 해당 물질에 대한 높은 관심은 승용차로 수단 전환하지 못한 대중교통 이용자들에게 추가적인 영향을 미친다. 즉, 기존 버스 이용자들이 상대적으로 대기환경의 영향을 적게 받는 지하철을 이용하도록 촉진하는 것으로 판단된다.

<Table 4> Panel-SUR Analysis Results

Type		Weekday		Weekend	
		Bus	Subway	Bus	Subway
Climate related variables	Temperature(°C)	-436.422***	-338.894**	-628.170***	-529.249***
	Precipitation(mm)	-214.938***	-179.039***	-428.067***	-369.152***
	Humidity(%)	138.466***	-669.680***	112.674**	-160.304*
Air pollution related variables	SO <sub>2</sub> (1,000ppm)	-1,086.937	-8,593.991***	-2,172.244	3,535.929
	CO(1,000ppm)	-38.400***	-34.011***	-48.588***	-45.824***
	O <sub>3</sub> (1,000ppm)	-178.296***	-75.720***	35.994	-193.931 *
	NO <sub>2</sub> (1,000ppm)	-74.358	-356.230	-339.567***	-333.445***
	PM <sub>10.0</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	36.743	240.577***	7.637	171.560***
	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	-675.471***	176.284	-120.797	67.987
Region related variables	number of bus station	254.004***	-	122.973***	-
	number of subway station	-	13,820.810***	-	8,587.984***
(Constant)		74,730.590***	61,719.500***	70,687.250***	38,173.660***
R <sup>2</sup>		0.355	0.557	0.215	0.524
N		6,225 (249 days)		2,900 (116 days)	
Breusch-Pagan test		0.635***		0.713***	

Note: \*\*\* means p-value ≤ 0.01, \*\* means p-value ≤ 0.05 and \* means p-value ≤ 0.1

## V. 결론 및 시사점

### 1. 결론 및 시사점

본 연구에서는 기상 상황과 대기환경에 따른 대중교통 이용량 변화를 검토하였다. 분석은 서울특별시의 25개 행정구를 대상으로 수행되었으며, 2023년 대중교통 이용실적, 기상 및 대기환경 데이터를 활용하였다. 분석자료의 특성 및 교통수단별 상관성을 고려하기 위해 Penal-SUR 모형을 활용하였다. 본 연구의 주요 시사점은 다음과 같다.

첫째, 기상 및 대기환경 정보를 제공할 수 있는 ITS 시설의 설치에 대중교통 이용에 큰 도움을 줄 것으로 기대된다. 기상 및 대기환경은 대중교통 이용에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 대중교통 이용자가 평소 대중교통을 이용할 때, 해당 정보를 확인한다는 것을 의미한다. 기상 및 대기환경 정보는 출발지에서 출발 전에 검색을 통해 해당 정보를 인지할 수 있으며, 이에 따라 대중교통 이용자가 승용차로 수단을 전환할 수 있다. 출발지에서 관련 정보를 검색하지 않고 출발한 이용자들의 경우, 관련 정보를 제공하는 ITS 시설이 존재한다면 정보에 따라 외부환경으로의 노출이 적은 수단을 선택할 기회를 얻을 수 있다. 이는 다양한 정보

제공을 통해 대중교통 이용 서비스 향상 효과를 기대할 수 있으며, 대기오염물질에 의한 건강 문제를 사전에 방지할 수 있다. 추가로, ITS 시설 설치를 통한 기상 및 대기환경 정보제공은 핸드폰 등 IT 기기에 익숙하지 않은 고령자에게 관련 정보를 쉽게 제공할 수 있다. 고령자는 상대적으로 질병에 취약하므로, 대기환경 정보 제공은 고령자 건강증진에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

둘째, 버스 정류장에 대한 환경개선이 필요하다. 지하철 역사는 관련 법에 의거하여 공기질 관리를 진행 중에 있으나, 버스 정류장은 관리가 미흡한 실정이다. 버스 정류장은 도로변에 위치하고 있어, 외부환경과의 접촉이 많다. 이에 따라 밀폐형 버스 정류장 설치를 통해 정류장 내 대기질 관리가 필요하다. 이는 대중교통 이용자의 건강증진과 더불어, 버스 이용량 증가에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

셋째, 대기 공간 환경개선을 통한 선순환 구조 구축이 시급하다. 대중교통 이용 활성화는 승용차와 같은 개인 교통수단 이용을 감소시켜, 교통량 감소 및 혼잡 완화를 통해 탄소 배출량 감소 등 환경오염물질 감소에 기여할 수 있다. 정류장 환경개선은 대중교통 이용 활성화를 통해 승용차 이용량 감소를 기대할 수 있다. 이는 대기오염물질 감소를 발생시키며, 대기질 개선 효과로 대중교통 이용량이 더욱 증가할 수 있다. 이와 같은 구조는 선순환 고리를 구축하여 지속적인 발전의 원동력이 될 수 있다. 하지만, 이러한 선순환 구조가 반대로 작동될 경우, 악순환 고리를 형성한다. 대기오염 증가로 대중교통 이용을 회피하고, 승용차 이용이 증가한다면, 대기오염은 가중되고, 이에 따라 대중교통 이용은 더욱 감소하게 된다. 이러한 악순환 고리가 형성되기 이전에 정류장 환경개선을 통해 선순환 구조를 구축해야 한다.

## 2. 향후 연구방안

서울특별시에서는 교통카드 자료를 바탕으로 정류장 단위의 기·중점 통행량을 제공하고 있다. 이에 따라 대중교통 기·중점 관련 분석 수행 시, 정류장 단위의 미세한 공간 단위를 설정할 수 있다. 이에 반해, 기상 및 대기환경 관련 수집 장치는 비교적 적은 상황이다. 특히, 기상 관련 수집 장치는 서울특별시 내부에 총 29개로 행정구 단위 이하로 집계하기에 현실적인 한계가 존재한다. 향후 수집 장치의 추가 보급 또는 결측된 지역에 대한 보정 방법의 수립은 공간적 단위 세밀화를 통해 정밀한 분석을 가능하도록 할 것으로 기대된다. 또한, 본 연구에서는 대중교통 이용량만을 분석 대상으로 설정하였으나 대중교통의 경쟁수단인 승용차 관련 이용실적이 존재한다면, 해당 수단을 포함한 연구가 진행될 수 있을 것으로 기대된다. 승용차는 출발지에서 승차하여 도착지에서 하차할 수 있어, 대중교통과 달리 접근 통행이 필요하지 않다. 이는 승용차와 대중교통 이용에 있어 외부환경이 미치는 영향이 극명하게 다를 수 있음을 시사한다. 따라서, 승용차를 포함한 이용행태를 분석한다면 보다 다양한 분석 결과 및 시사점을 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

본 논문은 한국ITS학회 2022년도 국제학술대회(2022.06)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성하였습니다.

## REFERENCES

Airkorea, <https://www.airkorea.or.kr/>, 2024.09.16.

- Almeida, M. N., Xavier, A. A. P. and Michaloski, A. O.(2020), “A review of thermal comfort applied in bus cabin environments”, *Applied Sciences*, vol. 10, no. 23, 8648.
- Cho, J. H., Kim, Y. J. and Cha, E. J.(2015), “Relations among sport-for-ALL and climate: Focusing on the mountaineering”, *Journal of Leisure Studies*, vol. 13, no. 4, pp.25-38.
- Choi, S. G., Rhee, J. H. and Oh, S. H.(2013), “The effect of weather conditions on transit ridership”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 33, no. 6, pp.2447-2453.
- Choo, S. H.(2012), “Analysis weekend travel characteristics in Seoul”, *Journal of Korean Society of Intelligent Transport System*, vol. 11, no. 3, pp.92-101.
- Eom, Y. S. and Oh, H. N.(2019), “Health risks from Particulate Matters (PM10) and averting behavior: Evidence from the reduction of outdoor leisure activities”, *The Korean Journal of Economic Studies*, vol. 67, no. 2, pp.39-70.
- Han, J. E., Kwon, S. B. and Chun, C. Y.(2016), “Indoor environment and passengers’ comfort in subway stations in Seoul”, *Building and Environment*, vol. 104, pp.221-231.
- ITS Korea, <https://itskorea.kr/boardDetail.do?type=8&idx=2693&searchType=&searchText=>, 2024.09.16.
- Jang, A. S.(2014), “Impact of particulate matter on health”, *Journal of the Korean Medical Association*, vol. 57, no. 9, pp.763-768.
- Jang, H. G.(2023), “Causal inference for (financing) policy evaluation on small and medium enterprises: understanding potential outcome approach and do-calculus approach”, *Journal of Management & Economics*, vol. 45, no. 3, pp.25-53.
- Jo, E. J. and Kim, H. C.(2021), “The impact of air quality on traveling time by transportation mode”, *Environmental and Resource Economics Review*, vol. 30, no. 2, pp.207-235.
- Kang, H. J., Kwon, H. W. and Han, S. Y.(2024), “Analysis on the effect of meteorological factors on national park exploration demand”, *The Journal of Korean Institute of Forest Recreation*, vol. 28, no. 1, pp.43-57.
- KBS News, <https://news.kbs.co.kr/news/pc/view/view.do?ncd=7899164>, 2024.09.16.
- Ki, D. H. and Lee, S. G.(2019), “Analysis on the relationship between the fine dust concentration and subway ridership for the evaluation of fine dust response”, *Journal of Korea Planning Association*, vol. 54, no. 4, pp.79-93.
- Kim, H. D. and Kim, S. B.(2001), “On the property of climatological environment with discomfort index in Korea”, *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*, vol. 10, no. 2, pp.129-133.
- Kim, H. H., Kim, D. B., Kazuharu, M. and Kong, W. S.(2019), “Temporal-spatial characteristics of summer discomfort index in Seoul”, *Journal of Climate Change Research*, vol. 10, no. 3, pp.173-184.
- Kloog, I., Ridgway, B., Koutrakis, P., Coull, B. A. and Schwartz, J. D.(2013), “Long-and short-term exposure to PM2.5 and mortality using novel exposure models”, *Epidemiology*, vol. 24, no. 4, pp.555-561.
- Koo, J. H. and Choo, S. H.(2021), “Analysis of factors affecting travel time considering travel purpose”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 39, no. 5, pp.697-709.
- Korea Gallup, <https://www.gallup.co.kr/gallupdb/reportContent.asp?seqNo=982>, 2024.09.16.
- Kosis, <https://kosis.kr/>, 2024.09.16.

- Lee, D. G.(2023), “The impact of particulate matter on the demand for outside recreation activity: Focusing on the visitation of national parks”, *Journal of the Korean Data Analysis Society*, vol. 25, no. 2, pp.615-627.
- Lee, K. S., Kim, H. S. and Park, J. S.(2017), “Time-space variability analysis for the weekly passenger flow of the seoul subway system: Based on dynamic visualization methods”, *Journal of the Economic Geographical Society of Korea*, vol. 20, no. 2, pp.158-172.
- Lin, T. P., Hwang, R. L., Huang, K. T., Sun, C. Y. and Huang, Y. C.(2010), “Passenger thermal perceptions, thermal comfort requirements, and adaptations in short-and long-haul vehicles”, *International Journal of Biometeorology*, vol. 54, pp.221-230.
- Mendoza, D., Buchert, M. P., Benney, T. M. and Lin, J. C.(2020), “The association of media and environmental variables with transit ridership”, *Vehicles*, vol. 2, no. 3, pp.507-522.
- Miao, Q., Welch, E. W. and Sriraj, P. S.(2019), “Extreme weather, public transport ridership and moderating effect of bus stop shelters”, *Journal of Transport Geography*, vol. 74, pp.125-133.
- Nao, N. S.(2019), “Urban bus ridership, income, and extreme weather events”, *Transportation Research Part D*, vol. 77, pp.464-475.
- Pratama, M. L., Fitriani, R. and Astutik, S.(2023), “Panel seemingly unrelated regression with dummy variables for economic modeling of developed and developing country”, *Wseas Transactions on Environment and Development*, vol. 19, pp.692-704.
- Shin, G. W. and Choi, G. J.(2014), “Analyzing the relationship between precipitation and transit ridership through a seemingly unrelated regression model”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 32, no. 2, pp.83-92.
- Tao, S., Corcoran, J., Rowe, F. and Hickman, M.(2018), “To travel or not to travel: ‘weather’ is the question. Modelling the effect of local weather conditions on bus ridership”, *Transportation Research Part C*, Vol. 86, pp.147-167.
- Wei, M., Corcoran, J., Sigler, T. and Liu, Y.(2018), “Modeling the influence of weather on transit ridership: A case study from Brisbane, Australia”, *Transportation Research Record*, vol. 2672, no. 8, pp.505-510.
- Wei, M., Liu, Y., Sigler, T., Liu, X. and Corcoran, J.(2019), “The influence ow weather conditions on adult transit ridership in the sub-tropics”, *Transportation Research Part A*, vol. 125, pp.106-118.
- Welch, E., Gu, X. and Kramer, L.(2005), “The effect of ozone action day public advisories on train ridership in Chicago”, *Transportation Research Part D*, vol. 10, no. 6, pp.445-458.
- Won, M. S., Cheon, S. H., Shin, S. L. and Lee, S. Y.(2019), “Analysis of public transport ridership during a heavy snowfall in Seoul”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 39, no. 6, pp.859-867.
- Xu, X., Saric, Z., Zhu, F. and Babic, D.(2018), “Accident severity levels and traffic signs interactions in state roads: a seemingly unrelated regression model in unbalanced panel data approach”, *Accident Analysis and Prevention*, vol. 120, pp.122-129.