KIEAE Journal, Vol. 26, No. 5, Oct. 2026, pp.161-167.

KIEAE Journal

Korea Institute of Ecological Architecture and Environment

141

전국 일반철도역 접근수단 간 상호작용과 철도 이용수요 관계성 분석
- 자동차·자전거 접근성의 상호작용을 중심으로 -

Analysis of the Relationship between Access-Mode Interactions and Rail Ridership at Conventional Railway Stations Across Korea

- Focused on the Interaction between Automobile and Bicycle Accessibility -

김지영* · 김영철**

Jiyoung Kim* · Youngchul Kim**

** Post-Doctoral Researcher, KAIST Transformative Railway with AX center (InnoCORE), Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST, South Korea (kimiji@kaist.ac.kr)*

*** Corresponding author, Associate Professor, KAIST Urban Design Lab, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST, South Korea (youngchulkim@kaist.ac.kr)*

ABSTRACT

Purpose: This study examines the main and interaction effects of automobile, bus, and bicycle accessibility on rail ridership at railway stations across Korea and tests whether the automobile–bicycle relationship is consistently observed across 2023–2025 and differs significantly between years. **Method:** Station level boardings and alightings were linked with access infrastructure, train service, and station-area characteristics, yielding 566 station-year observations. Year-specific ordinary least squares (OLS) models with heteroskedasticity-consistent (HC1) robust standard errors and a pooled year-fixed-effects model with station-clustered standard errors were estimated, together with additional spatial and sample robustness checks. **Result:** Parking accessibility was strongly and positively associated with rail ridership in all three years, whereas the average main effects of bus-stop accessibility and bicycle-lane length were not statistically significant. The automobile–bicycle interaction was consistently negative in 2023 (-0.225), 2024 (-0.226), and 2025 (-0.194), while the year-difference terms in the pooled model were not statistically significant. Conclusion: Bicycle accessibility shows a weaker additional association with rail ridership where automobile accessibility is already strong, suggesting the need for differentiated station-access strategies rather than uniform facility packages.

KEYWORD

철도역
역 접근성
퍼스트/라스트마일

Railway Station
Station Access
First-Last Mile

ACCEPTANCE INFO

Received Oct. 12, 2026
Final revision received Oct. 15, 2026
Accepted Oct. 20, 2026

ⓒ 2026. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경

일반철도역의 이용수요는 열차가 얼마나 자주 정차하는가만으로 결정되지 않는다. 이용자가 출발지에서 역까지 도달하고, 열차에서 내린 뒤 최종 목적지로 이동할 수 있어야 철도서비스가 실제 선택 가능한 대안이 된다. 특히 일반철도는 도시철도보다 역 간 거리가 길고 배후권역이 넓으며 역세권의 도시규모와 대중교통 공급이 크게 다르다. 따라서 역 접근은 단순한 보행권 문제가 아니라 자동차 주차, 버스 환승, 자전거 연결, 보행 네트워크가 함께 작동하는 다수단 체계의 문제이다. 그러나 역의 시설계획은 주차면 확충, 버스정류장 정비, 자전거도로 조성처럼 수단별 사업으로 분절되는 경우가 많으며, 이때 각 시설이 독립적으로 수요를 늘린다는 가정이 암묵적으로 적용된다. 실제로는 한 수단의 접근성이 충분히 높은 역에서 다른 수단에 대한 추가 투자의 한계효과가 작아질 수 있다. 반대로 자전거와 철도의 결합처럼 서로 다른 네트워크가 연결되면서 이용가능 권역이 확대되는 보완 효과도 가능하다. 어느 관계가 우세한지는 역의 공간적·서비스적 조건에 따라 달라지므로 주효과만으로는 판단하기 어렵다.

한편 2023년~2025년은 코로나19 충격 이후 대중교통 및 철도 수요가 회복 및 재편된 시기라는 점에서 분석 시점으로서 의미가 있다[1,2]. 이에 본 연구는 동일한 설명변수 체계를 이용하여 세 연도의 승·하차 실적을 각각 분석하고, 통합모형에서는 핵심 상호작용 계수의 연도 간 차이를 직접 검정하였다.

1.2. 연구목적과 연구질문

본 연구의 목적은 전국 일반철도역을 대상으로 자동차·버스·자전거 접근성의 독립적 연관성과 수단 간 상호작용을 확인하고, 그 관계가 2023년, 2024년, 2025년에 걸쳐 유지되는지를 검정하는 데 있다. 구체적인 연구 질문은 다음과 같다. 첫째, 다른 역 특성과 운행 조건을 통제했을 때 주차대수, 버스정류장 수, 자전거도로 길이는 역 이용객과 어떠한 관계를 갖는가? 둘째, 자동차×버스, 버스×자전거, 자동차×자전거 상호작용은 보완관계와 대체관계 중 어느 방향을 나타내는가? 셋째, 핵심 상호작용은 3개년에서 반복적으로 관찰되며, 연도 간 기울기에 유의한 차이가 있는가? 넷째, 접근수단 구조에 따른 역 유형은 어떤 차별화된 투자 방향과 연결되는가?

pISSN 2288-968X, eISSN 2288-9698
http://dx.doi.org/10.12813/kieae.2026.26.5.161

본 연구는 세 측면에서 기존 논의를 확장한다. 첫째, 일반철도역 접근성을 단일 수단의 시설량이 아니라 수단 간 결합구조로 파악한다. 둘째, 동일한 설명변수 체계에 3개년 공식 여객 실적을 결합하여 결과의 연도 간 반복성과 시간적 안정성을 동시에 검토한다. 셋째, 평균적 회귀계수를 역별 접근구조와 연결하여 '무엇을 더 공급할 것인가'뿐 아니라 '어느 역에서 어떤 순서로 투자할 것인가'라는 정책적 진단으로 확장한다.

2. 선행연구 및 분석가설

2.1. 일반철도역의 철도 수요와 다수단 접근

일반철도역의 이용수요는 역세권 밀도뿐 아니라 접근수단의 연결구조를 함께 고려할 때 더 충실하게 설명된다. 국내 연구에서도 역세권의 인구·고용·토지이용과 열차 서비스가 승하차 규모와 밀접하게 관련된다는 결과가 축적되었다[3,4]. 이 접근은 역 주변의 활동기회가 많고 서비스 수준이 높을수록 철도 이용이 증가한다는 점을 잘 설명한다. 다만 도시철도 중심 연구의 보행권 반경을 배후 권역이 넓은 일반철도역에 그대로 적용하기에는 제약이 있다. 일반철도역의 실질적 서비스권역은 자동차·버스·자전거가 역까지 얼마나 연결되는지에 의해 확장된다. 역 선택모형이 집수권역의 대표성을 개선하여 철도 수요모형의 설명력을 높인다는 연구[5]와 자전거-철도 결합을 별개의 수단이 아니라 하나의 다중 네트워크로 보아야 한다는 연구[6]에서 보듯이, 주차장, 버스 연결, 자전거 네트워크는 단순한 부대 시설이 아니라 철도의 실질적 서비스권역을 형성하는 구성요소로 정리된다. 이러한 다수단 연결 관점은 철도역을 결절과 장소가 결합된 체계로 보는 논의 및 대중교통지향개발(Transit-Oriented Development, TOD)의 다수단 확장과도 일치한다[7~10]. 더하여 최근 연구는 자전거가 철도의 첫·마지막 구간을 보완하려면 네트워크 연결성과 역 시설을 함께 평가해야 한다고 강조한다[11,12].

2.2. 접근수단 간 보완 및 대체 관계

접근수단 간 관계는 한 수단의 한계효과가 다른 수단의 수준에 따라 커지는 보완관계와 작아지는 대체관계로 구분된다. 예를 들어 안전한 자전거도로가 역의 자전거 보관시설과 결합하면 장거리 보행이 어려운 이용자도 철도에 접근할 수 있으며, 버스 노선이 충분하고 배차가 촘촘하다면 철도의 집수권역도 확대된다. 반면 대체관계는 두 수단이 동일한 접근 수요를 놓고 경쟁하거나, 한 수단이 이미 충분한 접근권을 제공하여 다른 수단의 한계편익이 감소할 때 나타난다. 주차공급이 많은 외곽역에서는 자전거 도로 추가 조성이 평균적으로 수요 증가와 연결되더라도 그 추가 연관성은 주차가 적은 역보다 작을 수 있다. 역세권 유형, 철도 수요 결정요인, 조절 효과를 다룬 연구 역시 역의 맥락에 따라 동일 인프라의 효과가 달라질 수 있음을 보여준다[13~16].

중요한 점은 "자전거 도로가 유익한가"와 "주차가 많은 역에서 자전거도로의 추가 효과가 같은가"가 서로 다른 질문이라는 것이다. 전자는 주 효과, 후자는 상호작용 효과로 검정해야 한다. 라스트마일에서도 버스와 자전거 공유가 경쟁하는 조건이 존재하며[17], 자전거-철도 연계를 위해서는 네트워크와 역 시설을 함께 평가해야 한다는 점 역시 기존 연구에서 확인되었다[11]. 자전거와 다른 교통수단 간에도 이러한 보완과 대체 가능성이 보고되었다[18]. 또한 자전거 접근은 역 선택과 동시에 결정되므로 접근수단 선택과 역 선택을 함께 모형화할 필요성도 제기되었다[19].

2.3. 접근성 지표의 정의와 한계

자동차 주차대수는 자동차 접근을 수용할 수 있는 물리적 용량을 나타내지만, 실제 점유율이나 요금, 환승할인을 직접 측정하지는 않는다. 500m 내 버스정류장 수는 연결 지점의 공간적 밀도를 포착하지만 노선 수, 배차간격, 첫차·막차, 환승저항을 완전히 반영하지 않으며, 750m 내 자전거도로 길이는 자전거 네트워크 공급을 나타내지만 연결성, 보호시설 수준, 경사, 보관시설을 포함하지 않는다. 자전거도로와 보행로 등 네트워크 자료는 오픈스트리트맵(OpenStreetMap, OSM)을 활용하였다[20]. 따라서 본 연구에서 사용하는 접근성은 실제 통행시간이나 일반화 비용으로 측정된 포괄적 접근성을 의미하기보다, 철도역 접근을 지원하는 관찰 가능한 물리적 인프라 공급수준을 의미한다.

2.4. 연구의 차별성과 분석가설

철도역의 이용수요는 인접 도시의 규모, 노선 축, 관광권역, 운행체계처럼 공간적으로 연속된 요인의 영향을 받는다. 회귀 잔차가 공간적으로 군집하면 독립성 가정이 약화되고 표준오차와 모형선택에 영향을 줄 수 있다[21]. 이에 본 연구는 연도별 최소 제곱법(Ordinary Least Squares, OLS) 잔차에 대해 최근접 8개 역 기반 Moran's I[22]를 계산한다. 또한 동일 역이 세 연도에 반복 관찰되므로 통합모형에서는 역 단위 군집 표준오차를 사용한다. 연도별 핵심 계수와 기준연도 대비 차이 항을 함께 검토함으로써 단순히 부호가 반복되는지를 넘어 통계적으로 관계가 달라졌는지를 판단한다.

이상의 논의를 바탕으로 본 연구는 다음 네 가지 분석가설을 설정하였다. 첫째, 주차 접근성은 일반철도역 이용객과 양(+)의 관계를 갖는다. 넓은 배후권역과 낮은 대중교통 밀도를 가진 역에서 자동차는 철도 접근가능성을 높일 수 있다[23]. 둘째, 버스 및 자전거 접근성 역시 철도역 이용수요와 양(+)의 관계를 가질 것으로 예상한다. 다만 정류장 수와 자전거도로 길이는 각각 배차·환승 및 네트워크 연속성 등 서비스 품질을 완전히 반영하지 못하므로, 추정된 관계의 통계적 유의성과 크기는 실증적으로 검증한다. 셋째, 자동차-자전거 상호작용은 음(-)의 값을 갖는다. 자동차 접근이 강한 역에서는 자전거 인프라의 추가적 수요 연관성이 감소한다. 넷째, 자동차×자전거의 음(-)의 상호작용은 2023년~2025년에 걸쳐 유사한 방향과 크기로 반복될 것이다. 연도 간 기울기의 차이는 통합모형의 상호작용×연도 항을 통해 별도로 검정한다.

3. 연구방법

3.1. 연구 프레임워크

본 연구는 자료 구축, 변수 전처리, 분석 및 검증, 정책 해석의 네 단

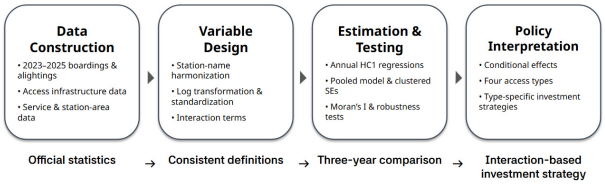


Fig. 1. Analytical Framework of the Study

계로 수행한다. 먼저 2023년~2025년 공식 역별 승·하차와 접근 인프라, 운행 및 역세권 자료를 결합한다. 다음으로 역명과 좌표를 정합하고 로그 변환·표준화 및 상호작용항을 구성한다. 세 번째 단계에서는 연도별 OLS 회귀와 이분산 일치형(Heteroskedasticity-Consistent Type 1, HC1) 강건 표준오차[24], 통합 연도 고정효과 모형, 공간 자기상관 및 유형 민감도 분석을 수행한다. 마지막으로 조건부 효과와 접근유형을 연결하여 차등화된 투자 방향의 정책적 시사점을 제시한다(Fig. 1.).

3.2. 자료 수집 및 변수처리

분석의 공간 단위는 도시철도역(지하철)을 제외한 철도 여객수송 실적이 집계되는 전국 철도 여객역이며, 고속철도(Korea Train eXpress, KTX) 정차역을 포함한다. 철도산업정보센터(Railway Industry Information Center, KRIC)의 월별 역별 승·하차 실적[25]을 연간 합산하고, 한국철도공사 공개자료로 집계구조를 교차 확인하였다. 자동차 접근성은 역내 주차대수, 버스는 500m 내 정류장 수, 자전거 접근성은 OSM[20]에 기록된 자전거 도로의 750m 반경 내 총연장으로 측정하였고, 보행 네트워크도 동일 자료를 활용하였다. 역세권 인구·고용, 운행 빈도·방향, 출입구 수, 간선도로 접근성, 토지이용 혼합도·지가, 보행로 길이, KTX 정차 여부를 통제변수로 사용하였다.

자료 결합 과정에서 역명 변경과 괄호형 부역명을 동일 역으로 정규화하고 좌표·노선정보를 함께 확인하였다. 주요 변수는 0값을 포함하고 우측 편향된 분포를 보이므로 극단값의 영향을 완화하고 분포의 비대칭성을 줄이기 위해 ln(1+x) 변환을 적용하고, 자동차·버스·자전거 접근 지표는 공통 기준으로 표준화하였으며, 설명변수와 좌표가 모두 존재하는 완전 사례만 추정에 사용하였다. 주요 변수의 정의와 처리 방법은 Table 1.과 같다.

연도별 공식 통계에서 결합 가능한 역 수는 2023년 194개, 2024년 190개, 2025년 185개이며, 모든 통제 변수를 사용할 수 있는 회귀표본은 각각 193개, 189개, 184개(통합 566개 관측치)이다. 연도별 표본 차이는 역 운영·명칭·집계 여부의 변화에 따른 것으로, 동일 역만으로 구성된 균형패널의 성장률을 의미하지 않는다. 따라서 본 연구의 연도 간 반복성 판단은 단순 총수요 증감보다 동일한 함수형태에서 추정된 연도별 계수와 통합모형의 연도 차이 항에 근거하였다. 연도별 분석 표본과 이용 수요는 Table 2.에 제시하였다.

3.3. 분석모형 및 검증

종속변수는 ln(1+연간 승·하차)이며, 세 접근 변수의 표준화 주효과와 자동차×버스, 버스×자전거, 자동차×자전거 상호작용을 포함하였다. 연도별 모형은 이분산을 고려한 HC1 강건 표준오차를 사용하였다. 통합모형은 2023년을 기준으로 연도 고정효과를 포함하고, 동일 역의 반복 관측을 고려해 역 단위 군집 표준오차를 적용하였다. 자동차×자전거×연도 항으로 2024년 및 2025년의 기울기가 2023년과 다른지를 직접 검정하였다.

상호작용항은 표준화된 접근 지표의 곱으로 구성하였다. 이에 따라 각 주효과 계수는 다른 접근수단이 평균 수준일 때의 조건부 관계를 나타내고, 상호작용 계수는 한 접근수단이 1 표준편차 변할 때 다른 접근수단의 기울기가 얼마나 달라지는지를 의미한다. 접근 인프라는 연도별 변동이 작거나 동일 시점 자료가 반복 사용되는 특성이 있어 역 고정효과를 적용하면 핵심 주효과가 대부분 제거된다. 따라서 본 연구는 연도 고정효과와 역 단위 군집 표준오차를 이용해 공통적인 연도 변화를 통제하면서, 결과를 인과 효과가 아닌 역 간 조건부 연관성으로 해석하였다.

잔차 공간 의존성은 최근접 8개 역의 대칭·행 표준화 이웃 행렬을 이용한 Moran's I[22]와 999회 순열 검정으로 확인하였다. 핵심 결과는 공간오차모형(Spatial Error Model, SEM)[21], 상위 5개 대형역 제외, 비 KTX 역 한정 등으로 강건성을 점검하였다. 역 유형화는 2023년 결합 표본 194개 역을 기준으로 수행하였다. 표준화된 자동차·버스·자전거 접근 지표의 ±0.5 표준편차를 고·저 수준의 기준으로 삼아 단일 수단의 상대적 우세와 둘 이상의 수단이 동시에 높은지를 바탕으로 네 유형을 해석하고, 0.25·0.75 기준 및 k-평균 군집과의 일치율(조정 Rand 지수[26])로 비교하였다. 다만, 본 연구에서 해당 유형은 인과적 분류가 아니라 정책 해석을 위한 진단 도구로 활용된다.

Table 1. Operational definitions of major variables

Variable	Measurement	Transformation
Annual ridership	Annual total of monthly boardings and alightings	ln(1+y)
Car	Number of parking (station)	ln(1+x), standardized
Bus	Number of bus stop (500m)	ln(1+x), standardized
Bicycle	Length of bicycle lane (750m)	ln(1+x), standardized
Pedestrian	Pedestrian network (750m)	ln(1+x)
Control variables	Train service frequency, station facilities (entrances), population, employment, land value, road accessibility, and KTX service	ln(1+x), where applicable

Table 2. Annual analysis sample and ridership

Year	Matched n	Regression n	Total boarding/ alighting (million)	Mean per station (million)
2023	194	193	251.5	1.296
2024	190	189	267.1	1.406
2025	185	184	269.5	1.457

Note. Total and mean ridership are calculated based on the matched sample before requiring complete observations for all control variables. The regression sample refers to the final observations used in the regression analysis.

ⓒ 2026. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.

Table 3. Annual main and interaction effects

Variable	2023	2024	2025
Car parking (access)	0.695***	0.712***	0.694***
Bus stop (access)	0.025	0.143	0.034
Bicycle road (access)	0.079	0.095	0.061
Car×Bus	-0.048	-0.100	-0.028
Bus×Bicycle	-0.025	-0.068	-0.009
Car×Bicycle	-0.225**	-0.226**	-0.194**
R^2	0.769	0.742	0.755

Note. HC1 robust standard errors were used.
***p<0.001, **p<0.01. All control variables were included.

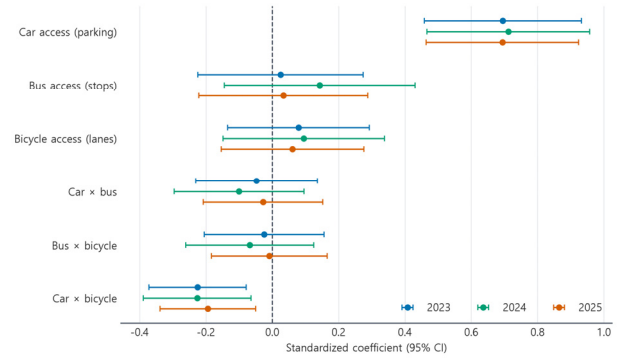


Fig. 2. Annual estimates of main and interaction effects

4. 분석결과

4.1. 접근수단의 주효과와 상호작용

주차 접근성은 세 연도 모두 가장 크고 안정적인 양(+)의 관계를 보였다. 계수는 2023년 0.695, 2024년 0.712, 2025년 0.694로 모두 p〈0.001이었다. 반면 버스정류장과 자전거도로의 주효과는 양(+) 방향이지만 통계적으로 유의하지 않았다. 세 상호작용 가운데 유의한 관계는 자동차×자전거였다. 계수는 2023년 −0.225(p=0.003), 2024년 −0.226(p=0.006), 2025년 −0.194(p=0.008)로 매년 음(−)이었다. 즉 자동차 접근성이 높아질수록 자전거 접근성의 조건부 기울기가 낮아진다. 자동차×버스와 버스×자전거의 값은 유의하지 않았다. 연도별 추정결과는 Table 3.과 Fig. 2.에 제시하였다.

4.2. 연도 간 반복성 및 강건성

통합모형에서 자동차 주효과는 0.701(p〈0.001), 자동차×자전거의 2023년 기준효과는 −0.218(p=0.003)이었다. 자동차×자전거 기울기의 2024년 차이항은 −0.006(p=0.560), 2025년 차이항은 0.013(p=0.338)으로 모두 유의하지 않았다. 따라서 본 표본에서는 자동차×자전거의 조건부 관계가 2023년에 비해 2024년 또는 2025년에 통계적으로 달라졌다는 증거가 확인되지 않았다. 연도별 모형에서 자동차 접근성이 −1 표준편차(Standard Deviation, SD)일 때 자전거 접근성의 조건부 기울기는 0.255~0.321이었으나, +1 SD에서는 −0.146~−0.131로 낮아졌다(Table 4., Fig. 3.).

연도별 잔차 Moran's I는 0.064 − 0.084로 작지만 모두 유의하여 약한 공간군집이 남았다. 다만 2024년 공간 오차 모형에서도 자동차×자전거 계수는 −0.206으로 유지되었고, 상위 5개 대형역 제외

Table 4. Pooled model and temporal stability

Variable	Coefficient	p
Car parking (access)	0.701	<0.001
Bus station (access)	0.076	0.552
Bicycle road (access)	0.081	0.458
Car×Bicycle (2023 baseline)	-0.218	0.003
Car×Bicycle×2024 year	-0.006	0.560
2024 year	0.012	0.721
Car×Bicycle×2025 year	0.013	0.338
2025 year	0.112	0.002

Note. n=566, R^2=0.753. The model includes year fixed effects and all control variables. Only key coefficients are reported; all lower-order terms (main effects and two-way interactions) were included in the estimation.

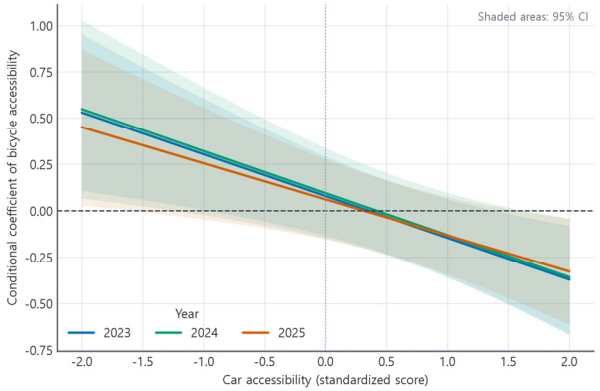


Fig. 3. Conditional effect of bicycle access by car accessibility

Table 5. Robustness and validity checks

Test	Result	Interpretation
Residual Moran's I	0.064/0.084/0.079 (p=.030/.013/.013)	Weak spatial clustering
Bus stop buffer (250/500/750m)	0.166/0.146/0.221	All statistically non-significant
Zero share of bicycle-lane length	72.7%	Potential zero-inflation issue
SEM Car×Bicycle	-0.206	Sign remained unchanged
Excluding the five largest stations	-0.307***	Conclusion remained unchanged
Non-KTX stations only	-0.354***	Conclusion remained unchanged

Note. ***p<0.001. Moran's I values are reported for 2023, 2024, and 2025, respectively. The spatial error model (SEM) was estimated for 2024, when residual spatial autocorrelation was the highest.

(−0.307, p〈0.001)와 비KTX 역 한정(−0.354, p〈0.001)에서도 결론이 동일했다. 버스정류장 집계 반경을 250m·500m·750m로 변경한 경우에도 버스 주효과는 모두 유의하지 않아 결과가 반경 설정에 민감하지 않았다. 자전거도로 길이의 72.7%가 0인 점은 OSM 기록과 영과잉의 한계를 보여주지만, 핵심 상호작용의 반복성과 강건성은 특정 대형역이나 단일 공간모형에 의존하지 않았다(Table 5.).

통합모형의 2025년 연도효과는 0.112(p=0.002)로 유의하였다. 이는 전체적인 철도 이용수준의 연도별 변화와 접근수단 간 조건부 관계를 구분하여 해석할 필요가 있음을 보여준다. 즉 2025년의 평균

적인 이용수준은 기준연도와 차이를 보였지만, 자동차 접근 수준에 따른 자전거 접근성의 조건부 기울기가 기준연도와 유의하게 달라졌다는 증거는 확인되지 않았다. 또한 연도별 분석표본이 완전히 동일하지 않으므로 단순한 총수요 증감보다는 연도별 계수의 반복성과 통합모형의 계수 차이 검정을 중심으로 결과를 해석하였다. 자동차×자전거 상호작용은 2023년 −0.225, 2024년 −0.226, 2025년 −0.194로 세 연도에서 동일한 음(−)의 방향으로 반복되었다. 통합모형에서도 2024년과 2025년의 기준연도 대비 차이항은 통계적으로 유의하지 않았다. 전체 철도 이용수준이 연도별로 변화하는 동안에도 자동차 접근 수준에 따른 자전거 접근성의 조건부 관계가 반복적으로 관찰되었으며, 그 기울기가 기준연도와 유의하게 달라졌다고 볼 증거는 확인되지 않았다. 다만 이러한 결과는 세 연도 간 효과가 통계적으로 동일함을 의미하는 것은 아니며, 관찰기간 내 계수 변화가 통계적으로 식별되지 않았다는 의미로 한정하여 해석할 필요가 있다.

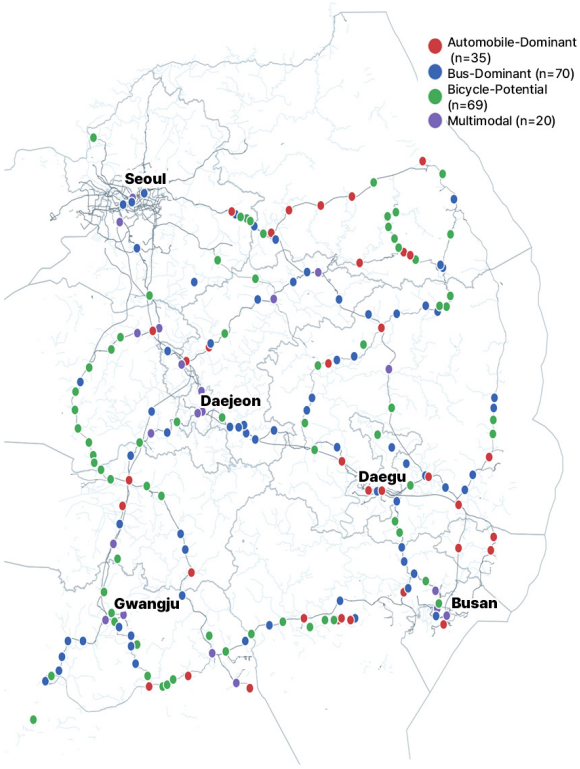


Fig. 4. Spatial distribution of station-access types

Table 6. Policy directions by station-access type

Type	Key diagnosis and priority actions
Automobile-dominant	Strong parking-based catchment function → prioritize turnover, reservation systems, transfer circulation, and pedestrian safety rather than simply expanding parking capacity
Bus-dominant	Heterogeneous service quality despite high stop density → improve route configuration, service frequency, and coordination with train schedules
Bicycle-potential	Low automobile accessibility with potential for bicycle connectivity → address network discontinuities and improve protected bicycle lanes, parking, and rental facilities
Multimodal	Multiple access modes are simultaneously strong → improve spatial allocation, integrated information, and conflict management

4.3. 접근유형과 투자방향

0.5 표준편차 기준 유형화 결과 자동차 우세 35개, 버스 우세 70개, 자전거 잠재 69개, 다수단형 20개로 구분되었다. 임계값을 0.25와 0.75로 변경했을 때 기준분류와의 일치율은 각각 99.5%와 98.5%였고, k-평균 군집과의 일치율은 75.8%(조정 Rand 지수 0.530)였다. 따라서 유형은 절대적 서열보다 역별 병목과 투자 검토 순서를 정하는 진단 틀로 활용하는 것이 적절하다(Fig. 4., Table 6.).

5. 토론 및 정책적 함의

5.1. 조건부 대체 관계의 해석

자동차는 철도와 단순한 경쟁 수단으로 보기 어렵다. 넓은 배후권역에서는 주차가 철도 접근을 가능하게 하는 보완적 집산 수단으로 작동할 수 있다[5,23]. 그러나 자동차 접근이 이미 강한 역에서는 자전거 인프라의 추가적 수요 연관성이 작아진다. 따라서 음의 상호작용은 자전거 투자를 줄이라는 의미가 아니라, 자동차 접근이 취약하면서 자전거 네트워크 연결 잠재력이 높은 역에서 자전거 투자를 우선 검토할 필요가 있음을 시사한다[18].

자동차×자전거의 음(−)의 관계는 두 시설이 직접 이용자를 두고 경쟁한다는 의미로만 해석하기는 어렵다. 자동차 접근이 강한 역은 상대적으로 배후권역이 넓거나 저밀한 경우가 많아 자전거 접근거리가 길고 도로 환경 역시 불리할 가능성이 있다. 반대로 자동차 접근이 상대적으로 약한 도시형·생활권형 역에서는 비교적 짧은 자전거 이동을 통해 역에 도달할 수 있어 동일한 자전거 인프라 공급이 더 큰 접근기회와 연결될 수 있다. 따라서 본 결과는 자동차 또는 자전거 가운데 하나의 투자를 선택해야 한다는 근거라기보다, 기존 접근구조에 따라 추가적인 자전거 인프라와 철도 이용수요 간의 관계가 달라질 수 있음을 보여주는 진단적 결과로 해석하는 것이 적절하다.

5.2. 접근 지표와 유형별 투자전략

버스와 자전거의 비유의한 주효과는 해당 수단의 중요성이 낮다는 뜻이 아니다. 정류장 수는 노선·배차·환승 대기를, 자전거도로 길이는 연속성·보호 수준·경사·보관시설을 충분히 반영하지 못한다[10]. 따라서 성과지표도 시설량에서 서비스 질로 전환할 필요가 있다[27]. 버스는 유효 연결 편수와 열차시간표 연계, 자전거는 출입구까지의 연속 네트워크와 안전한 보관[11,12,28], 자동차는 점유율·회전율·가격을 함께 평가하는 방식이 적절하다. 역 접근 정책은 모든 역에 동일한 복합환승 패키지를 공급하기보다 공통 안전기준과 유형별 전략투자를 구분해야 한다[29]. 보행 안전·장애인 접근·기본 안내는 공통적으로 확보하되, 증분 예산은 자동차 우세 역의 운영 효율, 버스 우세역의 시간표·정보 통합, 자전거 잠재역의 네트워크 단절 해소, 다수단형의 공간충돌 관리에 배분할 수 있다.

ⓒ 2026. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.

이러한 접근은 개별 시설의 편익을 단순 합산할 때 발생할 수 있는 중복투자를 줄이는 데도 유용하다. 실제 사업평가에서는 이러한 유형을 시설 부족량의 단순 비교가 아니라 서비스 결손을 찾는 출발점으로 활용할 필요가 있다. 먼저 역의 자동차·버스·자전거 접근구조를 진단하고, 다음으로 버스의 배차 연계 부족이나 자전거 최종 연결구간의 단절처럼 실제 이용을 제약하는 병목을 확인한다. 이후 후보사업의 단독 편익과 다른 접근수단과의 상호작용을 구분하여 투자 우선순위를 정하고, 사업 후에는 승·하차뿐 아니라 환승 시간, 주차회전, 자전거 보관 이용 등 운영 지표를 함께 확인하는 방식이 바람직하다.

자동차 접근성의 양(+)의 관계는 실제 접근권역 확대뿐 아니라 역위계와 수요대응형 공급을 함께 반영할 수 있다[30]. 대형·거점역에 주차장이 더 많이 설치되었거나 과거 수요가 높아 주차시설이 확충되었을 가능성도 있다. 본 연구는 운행 빈도·방향, KTX 정차, 출입구와 역세권 특성을 통제변수로 사용했지만 이러한 경로를 완전히 분리하지는 못한다.

버스정류장과 자전거도로의 평균적 비유의성도 정책적으로는 중요한 결과이다. 정류장 수가 많더라도 동일 노선의 상·하행 정류장이 중복되거나 배차가 드물고, 열차 출발·도착 시각과 맞지 않으면 실제 접근 기회는 제한된다[10]. 자전거도로 역시 반경 내 총연장이 길어도 주거지·학교·관광지에서 역 출입구까지 연속되지 않거나 교차로 안전, 경사, 보관시설이 부족하면 이용가능성이 낮다[12,28]. 따라서 후속 평가는 버스의 유효 연결편수·환승 대기시간과 자전거의 연속성·보호 수준·최종 연결 구간을 포함하는 방향으로 고도화할 필요가 있다.

5.3. 공간효과와 연구의 한계

연도별 Moran's I는 0.064, 0.084, 0.079로 절대적인 크기는 작지만 모두 통계적으로 유의하였다(Table 5.). 이는 핵심 회귀관계를 무효화한다기보다 진단 모형이 포착하지 못한 노선 축·생활권 차원의 구조가 일부 남아 있음을 뜻한다. 이는 개별 역의 시설 사업이 주변 역과 독립적이지 않을 수 있음을 시사하며, 역별 이용수요 변화가 노선망 전체의 네트워크 효과와 연계된다는 선행연구[31]와도 부합한다. 특히 한 역의 주차확충이나 열차 서비스 개선은 신규 수요를 만들 수도 있지만 인접 역의 이용자를 전환시킬 수도 있으므로, 향후 사업평가에서는 개별 역의 수요 증가와 함께 인접역 및 노선축 수준의 순 변화를 확인하는 것이 필요하다.

다만 본 연구의 계수는 시설투자의 인과 효과가 아니라 통제된 조건부 연관성이다. 수요가 높은 역에 접근시설이 더 공급되는 역인과성[30], 관광성·환승 거점성·노선 위계와 같은 특성이 남아 있을 수 있으며, 접근 인프라가 매년 갱신되는 자료도 아니다. 따라서 절대적인 수요 증가 효과보다 세 연도에서 반복된 관계와 투자 우선순위의 상대적 진단에 초점을 두어 해석해야 한다.

6. 결론

전국 철도 여객역의 2023년~2025년 반복 횡단면 분석에서 주차접근성은 세 연도 모두 철도 이용수요와 유의한 양(+)의 관계를 보였으며, 자동차×자전거 상호작용은 세 연도에서 일관된 음(−)의 값을 나타냈다. 통합모형에서도 2024년과 2025년의 자동차×자전거 기울기가 2023년과 통계적으로 다르다는 증거는 확인되지 않았다. 이는 전체 철도 이용수준이 연도별로 변화하는 상황에서도 자동차 접근 수준에 따른 자전거 접근성의 조건부 관계가 반복적으로 관찰되었음을 의미한다.

이러한 결과는 주차장과 자전거도로 가운데 하나만을 선택해야 한다는 의미가 아니다. 동일한 접근 인프라의 추가적인 이용수요 연관성이 역의 기존 접근구조에 따라 달라질 수 있으므로, 모든 역에 동일한 시설 패키지를 적용하기보다 역별 접근구조와 서비스 결손을 함께 진단할 필요가 있다. 자동차 접근이 상대적으로 낮으면서 자전거 연결 가능성이 높은 역에서는 네트워크 단절 해소와 안전한 보관시설 등을 우선적으로 검토할 수 있고, 자동차 집산기능이 강한 역에서는 단순한 주차면 확대뿐 아니라 회전율, 환승동선, 보행안전과 같은 운영 개선을 함께 검토할 수 있다.

다만 본 연구의 결과는 시설투자의 인과효과가 아니라 관찰 가능한 접근 인프라와 철도 이용수요 간의 조건부 연관성을 나타낸다. 이를 보완하기 위해 향후 연구에서는 버스 운행빈도와 환승대기시간, 자전거 네트워크의 연속성과 보호 수준, 주차 점유율과 회전율 등 서비스 품질 자료와 연도별 접근 인프라 자료를 추가 구축하고, 동일 역을 지속적으로 관찰하는 패널자료를 활용하여 역인과성과 시점불일치 가능성을 보다 엄밀히 검토할 필요가 있다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술정보통신부에서 지원하는 과학기술원 InnoCORE 사업에 의해 수행되었습니다(N10260092).

References

[1] S. Lee, J. Kim, K. Cho, Temporal dynamics of public transportation ridership in Seoul before, during, and after COVID-19 from urban resilience perspective, Scientific Reports, 14, 8981, 2024.

[2] M.J. Jun, M.Y. Yun, Station-level effects of the COVID-19 pandemic on subway ridership in the Seoul metropolitan area, Transportation Research Record, 2677(4), 2023, pp.802-812.

[3] 성현곤, 천상현, 수도권 역세권 토지이용패턴과 철도이용 수요와의 연관성, 국토연구, 제81권, 2014, pp.121-131. // (H.G. Sung, S.H. Cheon, Relationship between land use pattern of railway station areas and transit ridership in the Seoul metropolitan region, The Korea Spatial Planning Review, 81, 2014, pp.121-131.)

[4] 이은아 외 3인, 역세권 기반 도시철도의 역별 수요추정, 국토연구, 제77권, 2013, pp.189-203. // (E.A. Lee et al., Estimating urban railway demand based on catchment area, The Korea Spatial Planning Review, 77, 2013, pp.189-203.)

[5] M.A. Young, S.P. Blainey, Development of railway station choice models to improve the representation of station catchments in rail demand models, Transportation Planning and Technology, 41(1), 2018, pp.80-103.

[6] R. Kager, L. Bertolini, M. Te Brömmelstroet, Characterisation of and reflections on the synergy of bicycles and public transport, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 85, 2016, pp.208-219.

[7] L. Bertolini, Nodes and places: Complexities of railway station redevelopment, European Planning Studies, 4(3), 1996, pp.331-345.

[8] A. Ibraeva et al., Transit-oriented development: A review of research achievements and challenges, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 132, 2020, pp.110-130.
[9] P. Mees, TOD and multi-modal public transport, Planning Practice & Research, 29(5), 2014, pp.461-470.
[10] S. Mishra, T.F. Welch, M.K. Jha, Performance indicators for public transit connectivity in multi-modal transportation networks, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 46(7), 2012, pp.1066-1085.
[11] M. Pazzini et al., Evaluation of railway station infrastructure to facilitate bike-train intermodality, Sustainability, 15(4), 3525, 2023.
[12] T. Zuo et al., First-and-last mile solution via bicycling to improving transit accessibility and advancing transportation equity, Cities, 99, 102614, 2020.
[13] 이정우 외 3인, 대중교통 승하차 수요분석을 통한 서울시 역세권 유형화 및 토지이용 특성 연구, 국토연구, 제84권, 2015, pp.35-53. // (J.W. Lee et al., A study of land use characteristics by types of subway station areas in Seoul analyzing patterns of transit ridership, The Korea Spatial Planning Review, 84, 2015, pp.35-53.)
[14] H. Pan et al., What determines rail transit passenger volume? Implications for transit oriented development planning, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 57, 2017, pp.52-63.
[15] D.A. Rodríguez, C.-D. Kang, A typology of the built environment around rail stops in the global transit-oriented city of Seoul, Korea, Cities, 100, 102663, 2020.
[16] Q. Shao et al., Threshold and moderating effects of land use on metro ridership in Shenzhen: Implications for TOD planning, Journal of Transport Geography, 89, 102878, 2020.
[17] L. Liu et al., Mode choice between bus and bike-sharing for the last-mile connection to urban rail transit, Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 148(5), 04022017, 2022.
[18] Z. Wang et al., Substitution effect or complementation effect for bicycle travel choice preference and other transportation availability: Evidence from US large-scale shared bicycle travel behaviour data, Journal of Cleaner Production, 194, 2018, pp.406-415.
[19] D. Ton et al., Understanding the role of cycling to urban transit stations through a simultaneous access mode and station choice model, Transportation Research Record, 2674(8), 2020, pp.823-835.
[20] OpenStreetMap contributors, OpenStreetMap data (Open Database License v1.0), https://www.openstreetmap.org, 2026.07.29.
[21] L. Anselin, Spatial econometrics: Methods and models, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.
[22] P.A.P. Moran, Notes on continuous stochastic phenomena, Biometrika, 37(1-2), 1950, pp.17-23.
[23] M. Duncan, D. Cook, Is the provision of park-and-ride facilities at light rail stations an effective approach to reducing vehicle kilometers traveled in a US context?, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 66, 2014, pp.65-74.
[24] H. White, A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity, Econometrica, 48(4), 1980, pp.817-838.
[25] 철도산업정보센터(KRIC), 철도통계연보(2023-2025), https://www.kric.go.kr. // (Railway Industry Information Center (KRIC), Railway Statistics Yearbook (2023–2025), https://www.kric.go.kr.)
[26] L. Hubert, P. Arabie, Comparing partitions, Journal of Classification, 2(1), 1985, pp.193-218.
[27] S. Chakrabarti, The demand for reliable transit service: New evidence using stop level data from the Los Angeles metro bus system, Journal of Transport Geography, 48, 2015, pp.154-164.
[28] G.P. Griffin, I.N. Sener, Planning for bike share connectivity to rail transit, Journal of Public Transportation, 19(2), 2016, pp.1-22.
[29] Y. Sun, B. Han, F. Lu, An overview of TOD level assessment around rail transit stations, Urban Rail Transit, 10, 2024, pp.1-12.
[30] H. Rayaprolu, D. Levinson, Co-evolution of public transport access and ridership, Journal of Transport Geography, 116, 103844, 2024.
[31] F. Ding et al., Unraveling the network effects in station ridership growth patterns under metro network expansion, Journal of Transport Geography, 125, 104205, 2025.

ⓒ 2026. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.