

수원-서울 광역버스 첨두시간대 차내 혼잡 영향요인 분석

: 스마트카드 데이터를 활용하여*

Analysis of Factors Affecting In-Vehicle Crowding on Suwon-Seoul Regional Buses during Peak Hours

: Using Smart Card Data

이다겸** · 이예성*** · 김로미**** · 이수기*****

Lee, Dakyum · Lee, Yesung · Kim, Romi · Lee, Sugie

Abstract

This study analyzes factors affecting in-vehicle crowding for commuters on regional buses between Suwon and Seoul using smart card data in July 2023. Despite increasing public transit ridership in the Seoul Metropolitan Area, the regional bus system faces significant challenges during peak commuting hours, including boarding denials, in-vehicle crowding, and extended waiting times. While previous studies have focused on measuring passenger satisfaction, estimating congestion costs, or analyzing commuting patterns within single municipalities, empirical analyses of intercity transportation have been limited. This research conducts multiple regression analysis on 1,031 route-specific bus stop observations, examining the relationship between in-vehicle crowding and factors related to regional bus service characteristics, demographic patterns, and land use features. The results reveal that the population aged 20-39 years has a significant positive effect on crowding, while the population aged 40-59 years shows a strong negative relationship. Additionally, average road speed, service frequency, and residential area size positively correlate with crowding in both peak periods, while operation time per distance and residential floor area demonstrate negative relationships. Notably, standing restrictions exhibit a significant negative association with crowding during evening peak hours. These findings provide quantitative evidence for developing targeted transportation policies to improve service quality and efficiency in metropolitan public transit systems.

주제어 차내혼잡, 광역버스, 스마트카드, 첨두시간

Keywords In-vehicle Crowding, Regional Bus, Smart Card Data, Peak Hours

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

통근 통행은 도시민의 일상에서 중요한 부분을 차지하며, 이는

도시의 경제적 활력과 지속 가능한 발전을 결정짓는 핵심 요소이다(구동균 외, 2023). 현재 수도권권을 비롯한 지방 대도시권은 생활권이 확장됨에 따라 만성적인 교통혼잡과 높은 차량 의존도 등의 문제가 가중되고 있으며, 급격히 증가한 인구수에 따른 대중교통 편의에 대한 대책이 시급한 상황이다(지민경·김응철, 2017;

* 이 논문은 한국연구재단의 지원(RS-2024-00415360)을 받아 수행되었으며, 2024년 11월 대한국토·도시계획학회 추계학술대회에서 발표한 논문을 수정·보완한 것임.

** Master's Student, Department of Urban Planning & Engineering, Hanyang University (First Author: sy1via@hanyang.ac.kr)

*** Master's Student, Department of Urban Planning & Engineering, Hanyang University (leey11@hanyang.ac.kr)

**** Bachelor's Student, Department of Urban Planning & Engineering, Hanyang University (rlafhalquf@hanyang.ac.kr)

***** Professor, Department of Urban Planning & Engineering, Hanyang University (Corresponding Author: sugielee@hanyang.ac.kr)

최성택 외, 2022).

2021년까지 최근 5년간 해외 주요국과 비교했을 때 GDP 대비 교통혼잡비용은 미국(텍사스) 0.9%, 영국 0.4%, 독일 0.2%, 한국 3.6%로 우리나라의 GDP 대비 교통혼잡비용이 주요국 대비 높은 수준으로 나타났다(조채원, 2021). 2022년 대도시권 광역교통 조사에 따르면, 코로나19 팬데믹으로 인해 감소했던 대중교통 이용량이 회복세를 보이며, 2021년 대비 7.0% 증가했으며, 수도권의 경우 8.5% 증가하며 전국 평균보다 더 빠른 회복세를 기록했다(국토교통부, 2023).

대중교통 문제는 특히 수도권 간 통근 통행에서 심각하게 나타난다. 경기도에서 서울로의 통근 통행은 하루 약 200만 건으로 경기도 전체 통근 통행의 약 18%를 차지한다. 통행 수단별로는 승용차가 55%, 대중교통이 약 45%를 차지하며, 대중교통 이용 시 편도 평균 78.3분이 소요된다. 특히 1시간 이상 출퇴근하는 통행이 약 50만 건에 달해, 경기도에서 서울로 통근하는 사람들 4명 중 1명은 하루 최소 2시간을 출퇴근에 소비하고 있다(구동균 외, 2023). 2022년 잡코리아에서 실시한 직장인의 출퇴근 소요 시간 조사 결과 평균 왕복 시간은 84분이었으며, 서울은 79분, 경기도는 102분, 지방은 61분이 소요되었다(김현아, 2023).

수도권의 경우 시가지의 확산, 서울 중심으로 통근권의 40km까지 확대되는 등 경제활동 및 생활권의 광역화로 인해 일체화된 공간을 형성하면서 광역교통문제가 발생하고 있다(이주일 외, 2017). 수도권의 교통 혼잡과 긴 통행 시간 문제를 해결하기 위한 대안으로 광역버스가 도입되었다. 광역버스는 서울과 수도권의 주요 도시를 연결하는 대중교통 수단으로, 장거리 통근자들의 핵심 이동 수단으로 자리 잡았다. 그러나 최근 수요가 수용 능력을 초과하면서 새로운 문제들이 발생하고 있다. 코로나19로 감소했던 광역버스 공급이 2022년 입석 대책으로 점차 회복되고 있으나, 여전히 이용 수요에 미치지 못한다(윤상원 외, 2023). 특히 수도권 광역버스 입석금지 제도 시행 이후, 만차로 인한 무정차 통과가 빈번해지면서 출퇴근 이용객의 불편이 가중되고 있다(안정훈, 2024).

광역버스 운영의 주요 문제점은 크게 두 가지로 구분된다. 첫째, 교통혼잡으로 인한 운행 지체다. 출퇴근 시간대 운행 지체와 정체가 빈번하게 발생하며 버스의 평균 운행 시간을 증가시켜 전반적인 통근 시간을 늘리고 있다. 서울 주요 정류소의 경우 적정 운영용량을 크게 초과하여 운영되고 있어, 명동입구 정류소는 적정 용량의 214.6%, 남대문세무서 정류소는 194.4%, 신분당선강남역 정류소는 194.1%의 부하량을 감당하고 있다(이규희·김주영, 2024). 이러한 과부하는 정류장 혼잡 및 버스 운행 시간 증가와 같은 부정적인 영향을 미치고 있다. 이와 같은 영향으로 버스 내부와 환승 지점의 혼잡도는 이용객의 스트레스에 가장 큰 영향을 미치는 환경적 요인 중 하나로 평가되고 있다(Loo and Tsoi, 2024). 둘째, 버스 승차 불가 문제다. 특정 시간대 만석 운행으로

인해 승객들이 무기한 대기해야 하는 상황이 발생한다. 승차가 거부된 승객은 통근 과정에서의 시간을 불필요하게 버려야 하며, 실시간 버스 도착 정보의 부정확성 또한 통근 스트레스를 증가시키는 요인이 된다(Loo and Tsoi, 2024).

광역버스의 차내 혼잡은 수도권 대중교통의 서비스 품질을 저해할 뿐만 아니라, 이용객 개개인의 일상생활에도 부정적 영향을 미친다. 지금까지 수도권 광역교통 문제를 해결하기 위해 광역교통축 지정(윤상원, 2024), 중간배차, 급행화 노선 등의 운행 다양화 방안(윤상원 외, 2023) 등이 제시되었으나, 실증적 데이터를 바탕으로 한 혼잡 영향요인 분석은 부족한 실정이다.

이에 본 연구의 목적은 다음과 같다. 첫째, 수원-서울 간 광역버스를 대상으로 행정구역 간 통근 통행의 차내 혼잡 영향요인을 정량적으로 분석한다. 둘째, 스마트카드 데이터를 활용하여 교통 혼잡, 환승 시간, 노선 중복도 등 다양한 지표를 통해 광역교통 이용객들이 경험하는 불편함을 정량적으로 분석한다. 셋째, 승객 재차 인원을 활용한 도로 및 교통 네트워크의 거시적 분석을 통해 실제 통행이 집중되는 구간의 혼잡 특성을 종합적으로 파악한다. 이를 통해 광역버스 서비스의 운영 효율화와 이용자 만족도 향상을 위한 실질적인 정책 방안을 도출하여, 수도권 광역교통 문제 해결을 위한 보다 효과적인 정책 수립에 기여하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 선행 연구를 검토하고 연구의 차별성을 제시한다. 제3장에서는 연구의 범위와 연구 방법론을 상세히 기술한다. 제4장에서는 수원-서울 간 광역버스의 혼잡 현황을 분석하고 영향요인을 도출한다. 제5장에서는 분석 결과를 바탕으로 결론 및 정책적 시사점을 논의하고, 한계점과 향후 연구 방향을 제시한다.

II. 선행 연구 고찰

1. 교통카드데이터를 활용한 대중교통 연구

교통카드데이터는 지역 간 대중교통 이용수요, 통행시간, 환승 시간, 환승횟수 등 다양한 정보를 분석할 수 있다. 이는 지역별 대중교통 이용 편의성에 대한 형평성을 분석할 수 있는 중요한 도구이다(김주영, 2024; Bagchi and White, 2005). 교통카드데이터의 활용 가능성에 주목하여, 많은 연구자가 다양한 관점에서 대중교통 시스템을 분석하고 개선하기 위한 연구를 수행해왔다. 이들 연구는 크게 대중교통 이용자의 특성과 패턴을 분석하는 연구와 이를 바탕으로 대중교통 서비스를 개선하기 위한 연구로 나눌 수 있다.

대중교통 이용자의 특성과 패턴을 분석하는 연구들을 살펴보면, Briand et al.(2017)은 가우시안 혼합 모델을 적용하여 대중교통 이용 시 시간적 습관에 따라 승객을 재그룹화하는 2단계 생성 모델을 제시하여 요금 유형과 연결된 축소된 승객 클러스터 집

합을 식별하는 방법을 제시했다. Liu et al. (2021)은 노인의 대중교통 이용의 계절적 변동을 분석하기 위해 대중교통 카드데이터를 활용했으며, 이동 패턴 변동성에서 연령과 생활 환경의 영향요인을 분석했다. Ortega-Tong(2013)은 스마트카드 데이터를 사용하여 런던 대중교통 이용자들의 이동 패턴을 분류, 식별하여 이용객 집단을 8가지 클러스터로 분류하고, 각 집단의 특성을 도출하였다.

대중교통 서비스를 개선하기 위한 연구는 다음과 같다. 유영근 외(2014)은 교통카드 자료를 이용해 버스 계획노선의 이용수요를 예측하는 모형을 개발하여 노선길이 및 배차간격, 표정속도비 등 운용지표가 수요에 미치는 영향이 큼을 도출했다. 이용주(2016)는 교통카드데이터를 이용하여 사회적 총비용을 최소화할 수 있는 급행버스노선 정차 정류장 선정모형 및 급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론을 제시했다. 전용현(2024)은 교통카드데이터, BMS, TIMS를 활용하여 대중교통 서비스 현황을 파악하고 운영 효율성을 진단하였고, 택시 승차량 및 이동 분포를 종합하여 택시 이용 승객의 이동축을 따라 새로운 심야버스 노선을 제안했다. 하혜중(2023)은 교통카드데이터를 통한 시내버스 이용수요를 분석하고 시내버스 최적 운행 계획 선정 모형을 정립했다.

이와 같이 교통카드데이터는 대중교통 이용자의 특성 파악과 서비스 개선에 중요한 역할을 하고 있으며, 이를 기반으로 한 연구들은 더욱 효율적이고 사용자 중심적인 대중교통 시스템 구축에 기여하고 있다.

2. 대중교통 통근 통행 연구

통근 통행은 거주지와 직장을 연결하는 교통 형태를 의미하며, 도시민들의 경제활동에 필수적인 활동이다(장동익 외, 2023; 하재현·이수기, 2017). 특히 수도권의 물리적 범위가 넓어지고, 1기, 2기, 3기 신도시가 계획 및 건설됨에 따라 주거지가 도심권 외곽으로 점차 확산되는 추세를 보이고 있다. 이에 따라 장거리 통근이 증가하면서, 광역교통을 이용한 통근 통행 패턴이 나타나고 있다(김현우·김호연, 2011).

광역교통이란 2개 이상의 시·도를 걸쳐 광역도로를 통해 이루어지는 교통을 의미한다(박상조 외, 2020). 특히 출근 및 퇴근 시간대에 통근 통행이 집중되면서, 수도권 광역버스는 도심과 외곽 지역을 연결하는 핵심 교통수단으로 기능하고 있다. 현재 수도권 광역버스는 광역급행형 시내버스(이하 M버스)와 직행좌석형 시내버스(이하 일반광역버스)로 구성되어 있으며, 각기 다른 수송 특성을 통해 다양한 통근 수요를 충족시키고 있다(윤상원 외, 2023).

이와 같은 광역 통근의 중요성은 교통수단 선택에 영향을 미치는 요인 분석에서도 확인된다. 현준용·김재익(2014)은 직주근접성과 대중교통 이용 간의 상대적 중요성을 다양한 공간계량모형을 통해 비교하였으며, 통근 거리에는 직주 균형 변수가 큰 영향

력을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 통근 시간에는 대중교통 이용 변수가 직주 균형 변수보다 큰 영향력을 보이며, 이는 출퇴근 시간대 대중교통의 중요성을 보여준다. 한상욱 외(2015)의 연구에서 대중교통 통근 통행 패턴을 통해 서울시의 중심지별 주거지 구조를 제시했으며, 구체적으로 강남중심업무지구(GBD)로 통근통행을 하는 주거지가 서남권과 동남권으로 집중되어 있으며, 중심업무지구(CBD)는 동북권과 서남권 지역에, 여의도업무지구(YBD)와 가산디지털단지는 서남권 지역에 집중되어 있음을 보였다. 성현곤(2013)은 대중교통 접근성의 유형에 따라 통행발생량의 차이에 관한 연구를 제시했으며, 서울에서 외곽 지역으로 출퇴근하는 직장인이나 상대적으로 버스의 접근성이 좋은 경우 대중교통 이용에 효과적인 것이라는 시사점을 제시했다.

광역 대중교통 연구는 국내외에서 다양한 관점으로 진행되어 왔다. 초기 국내 광역버스를 다룬 연구들은 대부분 광역·대도시권에 대한 광역교통수단의 운영 및 이용 실태에 집중하여 교통정책 및 계획 수립에 대한 시사점을 제시하였다(강주란·고승영, 2005; 이상민 외, 2005; 이영근·김용석, 2005). 이상민 외(2005)는 서울 중심 통근권의 확대에 의한 광역교통 수요 증가에 효과적으로 대응하기 위해 행정구역 간 협력체계 구축 및 통합적 교통정책 수립의 필요성을 강조하였다. 이영근·김용석(2005)은 지방 5대 광역권의 대중교통 이용 실태조사를 통해 노선 운영, 환승 시설, 정류장 위치 등 물리적 서비스 환경을 평가하고, 설문조사를 통해 이용자 만족도를 분석하였다.

이후 연구들은 보다 구체적인 지역과 문제에 초점을 맞추어 진행되었다. 박준석 외(2019)의 연구에서는 수도권 6개 권역별 승용차 대비 대중교통 통행량 혼잡도를 비교 분석하였다. 분석 결과, 버스 혼잡도 측면에서는 북부권을 제외한 모든 권역에서 혼잡도가 높은 것으로 나타났으며 통행시간 측면에서 대중교통 경쟁력이 낮은 권역은 남부권(성남축), 동북(구리축)인 것으로 나타났다. 광역교통 문제 해결을 위한 구체적 대안으로 박준석 외(2014)의 연구에서는 수도권의 광역대중교통 문제에 있어서 출퇴근 통행에 초점을 두어 광역환승센터의 입지 선정 문제를 연구하였으며, 디지털미디어시티역, 합정역, 당산역 등 7개 축과 10개 방향을 고려하여 8개 환승역을 선정하여 광역버스의 적정 회차 지점을 제시하였다.

한편 국외 연구 사례로, Farda et al.(2018)은 인도네시아 자카르타의 대도시권의 버스 급행 시스템, KRL 통근 열차, 자카르타 지하철 운영에 대한 종합 교통 시스템에 대해 검토하고, 교통 시스템을 최적화하기 위한 고려 사항을 제시하였다. 이용자 관점에서의 의사결정 요인을 분석한 Scott et al.(2016)의 연구에서는 대도시권 대학으로 통학하는 직장인을 대상으로 광역 대중교통 의사결정 설문을 진행하였고, 대중교통 보안성, 지식, 가격, 그리고 편리성 변수와 부분 최소제곱 구조방정식(PLS-SEM)을 사용하여 대도시 지역의 대중교통 의사결정 과정을 모델링하여 잠재적 대중

교통 이용자의 주요 의사결정 요인을 규명하였다.

3. 교통 혼잡 연구

교통 혼잡은 주로 두 가지 측면에서 연구되어 왔다. 첫째는 차량의 과도한 집중과 과다한 교통수요를 중심으로 한 차량의 지·정체 및 대기행렬 현상이다(권현중, 2019). 권현중(2019)의 연구에서는 충청북도 및 충청남도의 인구 50만 이하 중·소도시에서 도로 교통 혼잡실태 분석과 통행속도, 서비스 수준에 따른 분석을 통해 교통혼잡관리 기준을 설정하고자 하였다. 박준석·오주택(2022)의 연구에서는 서울시, 인천시, 경기도를 포함한 수도권을 중심으로 도로유형별 도로축을 기준으로 교통량, 통행속도 분석을 통해 광역도로교통의 혼잡도를 분석하였다.

둘째는 대중교통 차량 내부의 승객 밀집도와 관련된 재차 인원 혼잡을 중심으로 이루어졌다. 김원길 외(2012)는 이용자 접근시간, 대기시간, 차내 혼잡수준, 교통법규 위반 등을 비용 함수로 정량화하여 노선별 서비스 수준을 평가하였다. 백광호·정진혁(2019)의 연구에서는 카드데이터를 이용하여 구간별 실시간 재차 인원을 통한 버스 차내 혼잡도를 추정하고 이를 통해 BIS 시스템 상에 표출되는 정보를 재현하는 방법론을 제시하였다. 허은진(2020)은 차내 혼잡수준 증가에 따라 개별 통행자가 체감하는 시간가지도 증가하며, 동일 혼잡수준이라도 통행시간 길이에 따라 차이가 발생함을 보고하였다.

4. 연구의 차별성

선행 연구 고찰 결과, 교통카드데이터는 대중교통 이용자의 수요를 예측할 수 있다는 점에서 폭넓게 활용되고 있음을 확인하였다. 또한 도시 특성, 토지이용 특성, 대중교통 접근성, 대중교통 서비스 특성 등 다양한 요인들이 차내 혼잡도에 영향을 미침을 확인하였다. 그러나 이러한 선행 연구들은 몇 가지 한계점을 가진다.

첫째, 선행 연구들은 대부분 단일 도시 또는 제한된 권역 내의 통행만을 다루고 있어, 수도권과 같이 복수의 행정구역을 가로지르는 광역교통에 대한 연구는 상대적으로 미비했다. 특히 서울과 경기도처럼 서로 다른 도시 특성과 교통체계를 가진 행정구역을 연결하는 광역통행의 특수성을 반영한 실증 연구가 부족하였다. 둘째, 기존 연구는 도시 특성과 인구 특성에 중점을 둔 경향이 있으며, 광역버스의 실제 운영 특성(노선 체계, 차내 혼잡도 등)에 대한 통합적 실증 분석은 제한적이었다. 셋째, 연구 범위가 특정 노선이나 행정구역 내에 집중되어 있어 연구 결과를 포괄적으로 적용하는 데 어려움이 있으며, 광역버스 차내 혼잡에 영향을 미치는 다양한 요인들의 복합적 영향을 분석한 연구는 드물었다.

본 연구는 이러한 한계점을 극복하고 다음과 같은 차별성을 갖는다. 첫째, 수원-서울 간 광역버스를 중심으로 행정구역 간 통근

통행의 차내 혼잡 영향요인을 정량적으로 분석한다. 이를 통해 2개 이상의 행정구역을 연결하는 광역 통근 통행 실증 연구를 수행한다. 둘째, 교통 혼잡, 환승 시간, 노선 중복도 등 다양한 지표를 활용하여 광역교통 이용객들이 경험하는 불편함을 정량적으로 분석한다. 특히 스마트카드 데이터를 활용하여 실제 통행 패턴을 분석함으로써 광역버스 운영의 실질적인 개선점을 도출한다. 셋째, 도로 및 교통 네트워크에 대한 거시적 분석과 승객 재차 인원을 활용해 실제 통행이 집중되는 구간의 혼잡 특성을 종합적으로 분석한다. 이를 통해 광역버스 서비스의 질적 향상을 위한 정책적 시사점을 제공한다.

III. 연구 방법론

1. 연구의 범위

본 연구의 공간적 범위는 경기도 수원시이다. 수원시는 경기도-서울 간 통근 통행에서 대중교통 이용 비율이 55.13%로 상위권에 속한다(구동균 외, 2023). 경기도교통정보센터에 따르면, 경기도 수원시의 출근목적통행량은 2021년 기준 521,829건으로 경기도 행정구역에서 가장 많은 통행량을 가지고 있다.

공간적 단위는 수원시 내 광역버스 노선의 정류장으로 설정하였다. 수원시를 지나는 광역버스는 총 62개 노선이며, 이들 노선이 점유하는 정류장은 총 243개소이다. 다만, 동일한 정류장이라도 노선에 따라 서로 다른 통행 특성과 혼잡도를 나타내므로, 본 연구에서는 '노선-정류장' 조합을 기본 분석 단위로 설정하였다. 즉, 하나의 정류장이 여러 노선에서 점유될 경우 각각을 독립적인 분석 단위로 구분하였으며, 이에 따라 총 1,031개의 '노선별 정류장'을 본 연구의 분석 단위로 지정하였다. 예를 들어, A 정류장을 5개 노선이 점유한다면, 이는 5개의 독립적인 분석 단위로 처리된다. 연구 범위 및 공간적 분석 단위는 <그림 1>과 같다.

시간적 범위는 2023년 7월 1일부터 7월 14일까지의 평일로 설정하였다. 이는 2023년 5월 11일 COVID-19 엔데믹 선언(이지혜, 2023) 이후로, 감염병의 영향이 감소한 시점이며, 해당 기간에는 공휴일이 없어 일반 시민의 일상적인 생활 수준에서의 통근 패턴을 보다 명확히 반영할 수 있다고 판단하였다.

첨두시간은 통근시간대인 출근 시간 6시부터 9시, 퇴근 시간 17시부터 21시로 설정하였다. 오전 통근시간대가 경험적으로 6시부터 9시이고, 오전 7시부터 9시까지의 오전 첨두시간을 선택한 선행 연구를 참고하여 본 연구에서는 오전 6시부터 9시까지 3시간을 오전 첨두시간으로 정의하였다(오동희 외, 2023). 퇴근 시간대의 경우 서울에서 수원으로의 대중교통 평균 시간인 84분을 기준으로 퇴근하는 시공간적 특성을 고려하여 기존 퇴근 첨두시간인 17시부터 19시를 기준으로(김태현 외, 2016) 시간대의 간격을 두 시간 늘려, 17시부터 21시까지로 설정하였다.

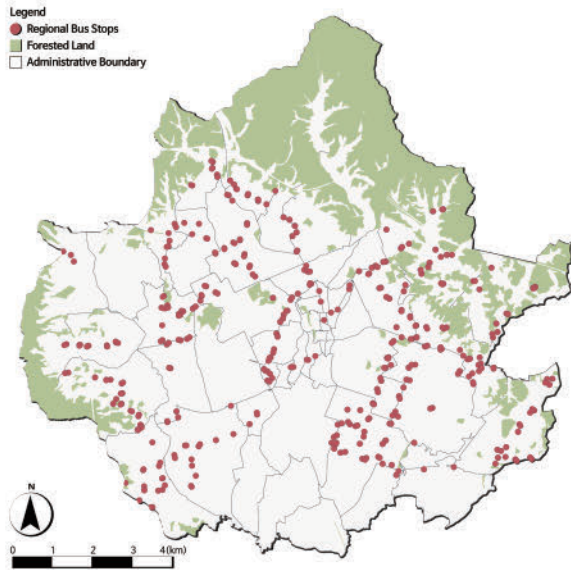


그림 1. 연구의 공간적 범위 및 분석 단위

Figure 1. Spatial scope and analysis units of the study

2. 코사인 유사도 기반 분석 데이터 선정

본 연구는 평일 간의 차내 혼잡도 패턴이 유사할 것이라는 가정을 입증하고, 분석 날짜를 지정하기 위해 차내 혼잡도의 코사인 유사도를 분석하였다. Duan et al. (2019)는 요일별 수요 패턴의 유사성 분석을 통해 평일 간 패턴은 안정적이며 유사함을 강조했다. Foell et al. (2016)는 요일별 버스 승객 행동 코사인 유사도를 계산하여 주중은 높은 유사성을, 주말은 낮은 유사성을 보임을 정량적으로 검증하였다. 이를 통해 본 연구에서는 유사성을 정량적으로 검증하기 위해 코사인 유사도(Cosine Similarity)를 활용하였다. 코사인 유사도는 벡터 간의 방향 유사성을 측정하는 방법으로, 벡터의 크기(norm)에는 영향을 받지 않는다(Foell et al., 2016). 두 시계열 데이터의 크기보다는 패턴 자체의 유사성에 초점을 맞출 수 있다는 점에서 차내 혼잡도와 같은 시간대별 변화 양상을 비교하는 데 적합하다.

분석 대상은 수원시를 경유하는 광역버스 노선별 차내 혼잡도이며, 각 노선의 평일 혼잡도 시계열 데이터를 벡터 형태로 정규화하여 사용하였다. 혼잡도 데이터는 시간 단위로 측정된 값을 기반으로 구성되며, 이를 통해 각 노선의 혼잡도 변화를 하나의 벡터로 표현하였다. 이후, 사이킷런(scikit-learn) 라이브러리의 cosine_similarity 함수를 이용하여 노선 간 혼잡도 벡터 쌍의 유사도를 계산하였다. 이를 통해 연구 기간 동안의 평일 혼잡도 패턴이 시간대별로 얼마나 일관되게 나타나는지를 파악하고, 특정 날짜의 데이터가 전체 기간을 대표할 수 있는지를 판단하였다.

3. 변수 설정

본 연구에서 사용된 종속변수와 독립변수 및 데이터 출처는

〈표 1〉과 같다. 사용 데이터는 교통카드 빅데이터 플랫폼에서 제공되는 수원-서울 통행의 주중 출퇴근 시간대 교통카드데이터를 활용하였다. 종속변수는 광역버스 차내 혼잡도로, 정류장별 버스 재차인원을 최대 탑승가능 인구수로 나눈 백분율(%)로 정의하였다. 독립변수는 크게 광역버스 서비스 특성, 인구 특성, 토지이용 특성으로 구분하였다. 광역버스 서비스 특성 변수로는 입석 승객 밀도, 입석금지 여부, 노선 중복도, 환승 시간, 운행시간비, 도로 평균 속도, 배차 빈도, 지하철역 개수의 8개 변수가 사용되었다.

입석 승객 밀도는 정류장별 입석 인원수를 버스 바닥면적으로 나눈 값(명/㎡)으로 광역버스의 표준 좌석 수 45석과 일반적인 바닥면적 28.884㎡를 기준으로 계산하였다. 입석금지 여부는 더미변수로 입석금지 제도가 적용되는 광역버스 노선을 1, 적용되지 않는 노선을 0으로 지정하였다. 본 연구의 분석 대상 광역버스 노선 중 입석 금지 정책이 시행 중인 노선은 총 25개 노선으로, 2022년 11월 18일 경기도교통정보센터 공지를 기준으로 KD운송그룹 14개 업체 소속 광역버스 및 대원고속, 경기고속이 운영하는 광역버스이다(노선번호: 1009, 3000, 8401, 8409, 3000(예약), 1007, 1007-1, 3002, 110, M5342, P9110(출근), 8200, 3002(예약), M5422, M5121, 5006, 5007, M5115, 1550, 1570, 1560A, M5107, 1112, P9110(퇴근), 1550-1). 이는 전체 분석 대상 노선의 약 40%에 해당한다. 노선 중복도는 각 정류장을 지나는 광역버스 노선 수로 측정하였으며, 환승 시간은 각 정류장에서 버스-버스 간 환승 시 소요되는 평균 시간(분)으로 정의하였다. 운행시간비는 행정동별 버스 평균 운행 시간을 평균 운행 거리로 나눈 값(min/km)으로 정의하였고, 도로 평균 속도는 행정동별 도로 등급별 평균 속도(km/h)를 활용하였다. 배차 빈도는 각 노선별 시간당 배차 횟수(대/h)를, 지하철역 개수는 각 정류장 400m 버퍼 내 지하철역 개수를 변수로 활용하였다.

인구 특성 변수로는 20-30대 인구수와 40-50대 인구수가, 토지이용 특성 변수로는 업무시설 개수, 주거지역 면적, 주거지역 연면적, 상업지역 면적, 상업지역 연면적, 공업지역 면적, 공업지역 연면적, 녹지지역 면적이 포함되었다. 특히 20-30대 인구수와 40-50대 인구수를 구분하여 연령대별 대중교통 이용 패턴의 차이를 파악하고자 하였다. 이는 40-50대의 경우 20-30대에 비해 자가용 보유율이 상대적으로 높아 광역버스 이용 특성에 차이가 있을 것으로 예상되기 때문이다. 지하철역 개수, 인구 특성, 토지이용 특성 변수들은 모두 각 정류장 400m 버퍼 내의 면적 합(km²) 또는 연면적 합(km²)으로 측정하였다. 버퍼는 선행 연구를 참고하여 설정하였다(El-Geneidy et al., 2014; Gutiérrez and García-Palomares, 2008).

버퍼 내 인구수는 면적 가중 보간법을 이용해 행정동 단위의 주민등록인구를 식 (1), 〈그림 2〉와 같이 각 버퍼 내 인구수로 계산하였다. 행정동 내 버퍼 면적을 행정동 전체 시가지면적으로 나누고 인구수를 곱해서 구했다.

표 1. 변수 및 데이터 출처

Table 1. Discription of variables and data sources

Division		Definition	Source
종속변수 Dependent variables	차내 혼잡도 In-vehicle crowding	정류장별 버스 재차인원(%) (각 정류장별 광역버스 재차인원/최대 탑승가능 인원수×100) Passengers on board (%) (Number of passengers on board per regional bus stop / Maximum passenger capacity×100)	
	입석 승객 밀도 Standing passenger density	각 정류장별 입석 인원수/버스 바닥면적(명/m ²) Standing passenger density at each stop (passengers/m ²) (Number of standing passengers divided by floor area)	
광역버스 서비스 특성 Regional bus service characteristics	입석금지 여부 Standing restrictions applied	입석금지 제도가 적용되지 않는 광역버스 노선(0), 입석금지 제도가 적용되는 광역버스 노선(1) 0: No standing restrictions 1: Standing restrictions applied	교통카드 빅데이터 통합정보시스템 Smart Transit Card Information System (2023)
	노선 중복도 Route overlap intensity	각 정류장별 지나는 광역버스 노선 수(개) Number of regional bus routes serving each stop (count)	
	환승 시간 Transfer time	각 정류장별 버스-버스 간 환승 시 걸리는 시간(분) Bus-to-bus transfer time at each stop (minutes)	
	운행시간비 Operation time per distance	각 행정동별 버스 평균 운행 시간/평균 운행 거리(min/km) Average bus operation time per average operation distance for each administrative district (min/km)	
	도로 평균 속도 Average road speed	각 행정동별 도로 등급별 평균 속도(km/h) Average speed by road classification for each administrative district (km/h)	View-T (2023)
	배차 빈도 Service frequency	각 노선별 1시간당 배차 빈도(대/h) Hourly dispatch frequency per route (vehicles/h)	경기버스정보 Gyeonggi Bus Information
	지하철역 개수 Subway stations	각 정류장별 400m 버퍼 내 지하철역 개수(개) Number of subway stations within 400 m buffer zone of each bus stop (count)	국토교통부 레일포털 KRIC Rail Portal (2024)
독립변수 Independent variables	인구 특성 Demographic characteristics	20-30대 인구수 Population aged 20-39 years	행정안전부 Ministry of the Interior and Safety (2023)
		40-50대 인구수 Population aged 40-59 years	
	토지이용 특성 Land use characteristics	업무시설 개수 Business facilities	V-World (2023)
		주거지역 면적 Residential area	
		주거지역 연면적 Residential floor area	
		상업지역 면적 Commercial area	
		상업지역 연면적 Commercial floor area	
		공업지역 면적 Industrial area	
		공업지역 연면적 Industrial floor area	
		녹지지역 면적 Green area	

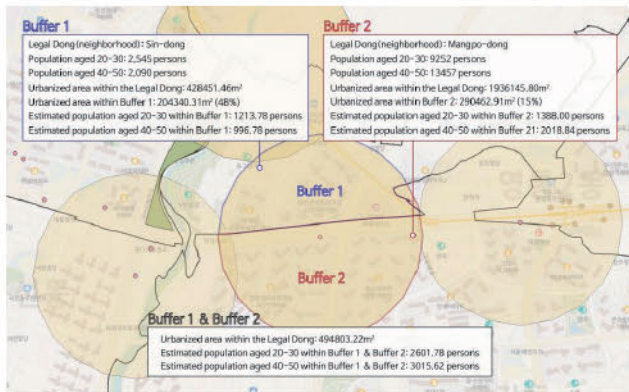


그림 2. 버퍼 내 인구 추정 방법

Figure 2. Areal weighting interpolation

$$P_b = \sum_i \left(\frac{A_{inb}}{A_i} \cdot P_i \right) \quad (1)$$

P_b : Population within buffer b

A_{inb} : Area of the intersection between administrative unit i and buffer b

A_i : Urbanized area of administrative unit i

P_i : Population of administrative unit i

차내 혼잡도는 교통카드 빅데이터 시스템에서 제공되는 ‘노선별 혼잡도’ 데이터를 사용하였다. ‘노선별 혼잡도’는 광역버스만 제공되며, 정류장별 최대 차내 승객 수를 차량 승차정원 수로 나눈 비율이다. 이는 식 (2)로 정의된다.

$$C = \left(\frac{P_{on}}{VC} \right) \times 100 \quad (2)$$

C : Congestion level (as a percentage)

P_{on} : Number of on-board passengers

VC : Vehicle Capacity (maximum allowed passenger load)

4. 분석 방법

본 연구는 차내 혼잡 영향요인을 분석하기 위해 차내 혼잡도를 종속변수로 하여 광역버스 서비스 특성, 인구 특성, 토지이용 특성 세 가지 범주의 독립변수에 대해 다중회귀분석을 실시하였다. 다중회귀분석은 여러 개의 독립변수를 사용하여 하나의 종속변수를 예측하는 방법으로, 선형 회귀를 확장한 분석 방법이다.

본 연구에서는 출근 시간대와 퇴근 시간대의 특성이 뚜렷하게 다를 것으로 예상하여 두 개의 별도 모형으로 구분하여 다중회귀분석을 수행하였다. 출근 시간대는 주거지에서 목적지로의 이동이 주를 이루는 반면, 퇴근 시간대는 목적지에서 주거지로의 이동이 주를 이루어 통행 방향과 통행 특성에 차이가 있다. 이러한

시간대별 특성 차이를 반영하기 위해 각각의 모형을 구축하여 수원-서울 간 광역버스 통근 통행의 차내 혼잡 특성을 파악하고, 이를 개선하기 위한 방안을 제시하고자 하였다.

IV. 분석 결과

1. 코사인 유사도 분석 결과

〈그림 3〉은 ‘2023년 7월 서울시 행정동 단위 대중교통 출발지/도착지 승객수 정보’ 데이터를 이용해 각각 서울을 종점으로 한 출근 시간과 퇴근 시간대 기종점을 시각화한 것이다. 오전침투시간에는 수원에서 서울, 오후침투시간에는 서울에서 수원으로 통행하는 경향을 볼 수 있다.

연구 기간 중 평일 평균 차내 혼잡도 경향 그래프는 〈그림 4〉와 같다. 광역버스 노선 및 날짜별 코사인 유사도 평가 결과는 〈그림 5〉와 같다. 분석 결과, 코사인 유사도가 높은 노선들은 비슷한 시간대에 혼잡도가 발생하는 경향을 보였으며, 가장 낮은 코사인 유사도 값이 0.9762(약 98%)로 나타나 평일 간 혼잡도 패턴이 매우 유사함을 확인했다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 대표성 있는 7월 3일 데이터를 선정하여 분석을 진행했다.

2. 기초통계분석

분석에 사용된 변수들의 기술통계는 〈표 2〉와 같다. 출근 시간대와 퇴근 시간대 모두 1,031개의 관측치를 가지고 있으며, 출근 시간대의 평균 차내 혼잡도는 16.25%, 퇴근 시간대는 12.07%로 출근 시간대의 혼잡도가 더 높게 나타났다. 출근 시간대의 차내 혼잡도 최댓값은 68.85%, 퇴근 시간대는 90.90%로 퇴근 시간대의 최대 혼잡도가 더 높게 나타났다.

입석 승객 밀도는 출근 시간대 평균 0.00명/m², 퇴근 시간대 평균 0.01명/m²로 매우 낮게 나타났으며, 이는 대부분의 정류장에서 광역버스 입석 승객이 거의 없음을 의미하며, 광역버스 입석금지 제도의 영향이 있던 것으로 해석된다. 광역버스 노선 중복도는 평균 4.68개 노선으로 나타났으며, 최대 11개 노선이 동일 정류장을 지나는 것으로 확인되었다.

환승 시간은 출근 시간대 평균 8.22분, 퇴근 시간대 평균 10.29분으로 퇴근 시간대 환승 소요 시간이 더 긴 것으로 나타났다. 이는 퇴근 시간대에 이용자들이 출근 시간대보다 시간적 여유를 가지고 있어 환승 시간에 덜 민감하게 반응하거나, 출근 시간대에 비해 통행 시간대가 넓게 분산되어 일부 시간대 배차 간격이 상대적으로 길어질 수 있으며, 또한 퇴근 시간 만차로 인한 대기 시간이 길어지는 등 여러 요인이 복합적으로 작용한 결과로 볼 수 있다. 운행시간비는 출근 시간대 평균 2.44min/km, 퇴근 시간대 평균 3.09min/km으로 퇴근 시간대의 운행시간비가 더 높게 나타났다.

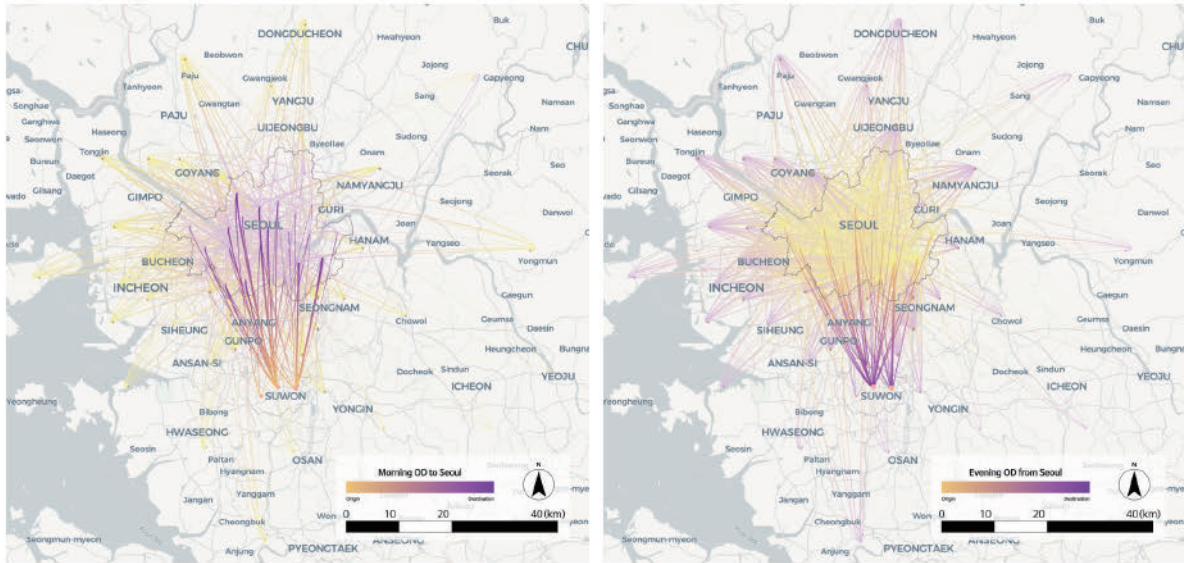


그림 3. 서울을 종점으로 한 대중교통 출근 시간 OD(왼쪽); 서울을 기점으로 한 대중교통 퇴근 시간 OD(오른쪽)
Figure 3. Morning OD to Seoul (left); Evening OD from Seoul (right)

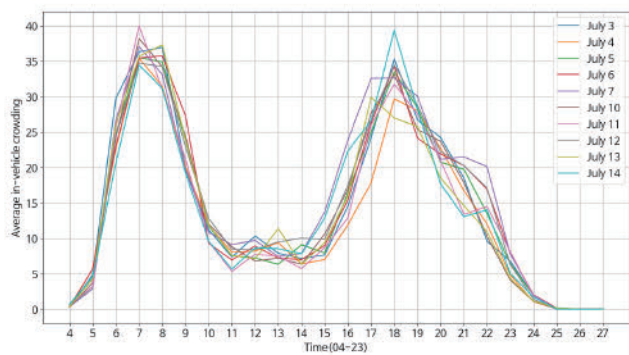


그림 4. 평일 평균 차내 혼잡도
Figure 4. Daily average crowding on weekdays

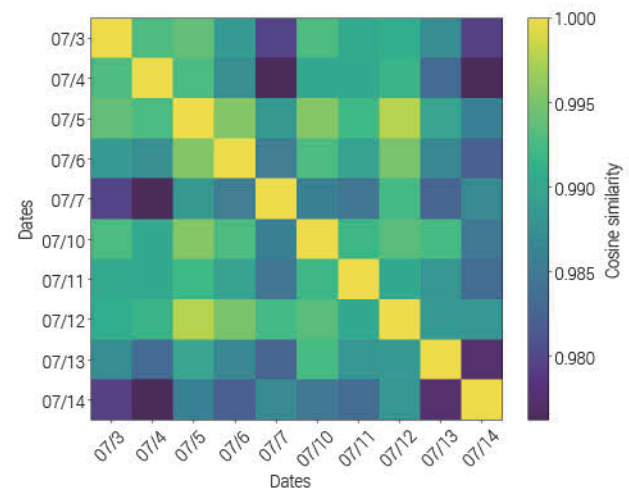


그림 5. 평일 평균 차내 혼잡도의 코사인 유사도
Figure 5. Cosine similarity of daily average crowding on weekdays

다. 도로 평균 속도는 출근 시간대 평균 26.48km/h, 퇴근 시간대 평균 22.99km/h로 출근 시간대 도로 속도가 더 빠른 것으로 나타났다. 배차 빈도는 출퇴근 시간대 모두 평균 3.79대/h로 동

일하게 나타났다.

정류장 400m 버퍼 내 인구수 변수를 살펴보면, 20-30대 인구수는 평균 1,301.54명, 40-50대 인구수는 평균 1,270.50명으로 20-30대 인구수가 평균적으로 더 많은 것을 알 수 있다. 다중공선성 검증을 위해 분산팽창계수(VIF)를 산출한 결과, 토지이용 특성 변수를 제외한 모든 변수들의 VIF 값은 모두 10 이하로 다중공선성 문제는 없는 것으로 판단되었다. 토지이용 특성 변수는 공업지역 면적과 공업지역 연면적의 VIF 값이 출퇴근모형 모두 기준치인 10을 초과하여 높은 다중공선성이 있는 것으로 확인되었다. 따라서 최종 분석모형에서는 이 두 변수를 제외하였다.

3. 다중회귀분석 결과

출퇴근 시간대의 다중회귀분석 결과는 <표 3>과 같다. 먼저, 출근 시간대 다중회귀분석 결과, R-squared 값은 0.21로, 모형이 종속변수 분산의 21%를 설명하는 것으로 나타났다. F-statistic 값은 16.48로, 모형이 통계적으로 유의미함을 보여준다($p < 0.01$). 통계적으로 유의미한 영향을 미치는 변수는 입석 승객 밀도, 노선 중복도, 환승 시간, 운행시간비, 도로 평균 속도, 배차 빈도, 지하철역 개수, 20-30대 인구수, 40-50대 인구수, 주거지역 면적, 주거지역 연면적으로 나타났다.

이 중에서 차내 혼잡도와 가장 큰 연관 변수는 20-30대 인구수와 40-50대 인구수로 나타났다. 20-30대 인구수가 많을수록 차내 혼잡도가 증가하는 반면, 40-50대 인구수가 많을수록 차내 혼잡도가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 여러 요인이 복합적으로 작용할 수 있으며, 20-30대가 주로 대중교통을 이용하는 반면, 40-50대는 상대적으로 자가용을 이용하는 비율이 높기 때문일 수 있다. 단, 본 연구에서는 이러한 요인들을 직접 측정하지 못했

표 2. 출근·퇴근 시간대 모형의 기술통계분석 결과

Table 2. Descriptive analysis in the morning and evening peak hours

Category	Variables	Obs.	Morning peak					Evening peak				
			VIF	Mean	Std.	Min.	Max.	VIF	Mean	Std.	Min.	Max.
Dependent variables	In-vehicle crowding	1,031	-	16.25	15.30	0.00	68.85	-	12.07	12.90	0.00	90.90
Regional bus service	Standing passenger density	1,031	1.02	0.00	0.03	0.00	0.83	1.06	0.01	0.08	0.00	1.59
	Standing restrictions applied	1,031	1.19	0.28	0.45	0.00	1.00	1.18	0.28	0.45	0.00	1.00
	Route overlap intensity	1,031	1.25	4.68	2.54	1.00	11.00	1.16	4.68	2.54	1.00	11.00
	Transfer time	1,031	1.12	8.22	4.47	0.00	28.80	1.15	10.29	5.26	0.00	27.40
	Operation time per distance	1,031	1.45	2.44	0.37	1.77	3.44	1.52	3.09	0.40	2.34	4.47
	Average road speed	1,031	1.41	26.48	5.64	0.00	47.37	1.47	22.99	5.70	0.00	43.11
	Service frequency	1,031	1.11	3.79	3.31	0.32	20.00	1.09	3.79	3.31	0.32	20.00
	Subway stations	1,031	1.47	0.14	0.39	0.00	2.00	1.56	0.14	0.39	0.00	2.00
Demographic characteristics	Population aged 20-39 years	1,031	7.04	1,301.54	578.0	0.00	3,049.04	6.99	1,301.54	578.0	0.00	3,049.04
	Population aged 40-59 years	1,031	6.15	1,270.50	560.82	0.00	2,643.35	6.21	1,270.50	560.82	0.00	2,643.35
Land use characteristics	Business facilities	1,031	2.70	1.67	4.03	0.00	29.00	2.71	1.67	4.03	0.00	29.00
	Residential area	1,031	5.16	0.24	0.11	0.00	0.46	5.10	0.24	0.11	0.00	0.46
	Residential floor area	1,031	2.95	6.24	4.64	0.00	24.01	2.88	6.24	4.64	0.00	24.01
	Commercial area	1,031	5.11	0.04	0.07	0.00	0.43	5.10	0.04	0.07	0.00	0.43
	Commercial floor area	1,031	5.21	1.12	2.73	0.00	17.04	5.23	1.12	2.73	0.00	17.04
	Industrial area	1,031	13.41	0.01	0.04	0.00	0.43	13.68	0.01	0.04	0.00	0.43
	Industrial floor area	1,031	13.28	0.20	1.16	0.00	12.91	13.72	0.20	1.16	0.00	12.91
	Green area	1,031	4.78	0.11	0.10	0.00	0.45	4.80	0.11	0.10	0.00	0.45

으므로 인과관계를 단정할 수 없다.

토지이용 특성 관련 변수 중에서는 주거지역 면적이 넓을수록 차내 혼잡도가 증가하고, 주거지역 연면적이 클수록 차내 혼잡도가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 저층·저밀 주거지의 경우(넓은 면적, 낮은 연면적) 개발 밀도가 낮아 대중교통 접근성이 상대적으로 낮아 광역버스에 대한 의존도가 높아지는 반면, 고층·고밀 주거단지(높은 연면적)의 경우 대중교통 접근성이 상대적으로 높은 경향이 있어 광역버스 외에도 선택 가능한 교통수단이 많기 때문으로 해석할 수 있다. 실제로 주거지역 연면적 상위 25% 지역의 평균 지하철역 수(0.21개)가 하위 25% 지역(0.10개)보다 유의하게 높다($t=2.875$, $p<0.01$).

또한, 노선 중복도가 높을 때, 도로 평균 속도가 높을 때, 배차 빈도가 높을 때, 환승 시간이 길 때 차내 혼잡도가 증가하는 것으로 나타났다. 노선 중복도가 높을수록 차내 혼잡도가 증가하는 것은 동일한 정류장을 지나는 노선이 많을수록 해당 정류장에 이용객이 집중되는 현상으로 해석할 수 있다. 선행 연구에서도 버

스 노선이 집중된 수도권 대부분 권역에서 버스 혼잡도가 높게 나타나 연구 결과와 맥락상 일치한다(박준석 외, 2019).

도로 평균 속도가 높을수록 차내 혼잡도가 증가하는 것은 주요 간선도로를 운행하는 광역버스의 특성상 고속화된 도로일수록 수요가 집중되는 현상을 반영한 것으로 볼 수 있다. 배차 빈도가 높을수록 차내 혼잡도가 증가하는 것은 수요가 많은 노선일수록 배차 빈도를 높이기 때문으로 해석할 수 있다. 유영근 외(2014)의 연구에서도 배차간격의 역수에 비례하여 버스 이용수요가 증가하는 것으로 나타나 선행 연구와 궤를 같이한다. 환승 시간이 길수록 차내 혼잡도가 증가하는 것은 대체 수단이 부족하여 환승 시간이 긴 노선의 경우 특정 노선에 대한 의존도가 높아지기 때문으로 해석할 수 있다.

한편, 운행시간비가 높을수록 차내 혼잡도가 감소하는 것으로 나타났다. 같은 거리를 이동할 때 시간이 더 오래 걸리는 노선, 즉 운행시간비 상위 25% 노선의 평균 노선 중복도는 출근 시간대 3.29, 퇴근 시간대 3.86으로 나타났다. 이는 운행시간비 하위

표 3. 차내 혼잡도에 대한 출근·퇴근 시간대 다중 회귀분석 결과

Table 3. Multiple linear regression results for in-vehicle crowding during morning and evening peak hours

Variables		Morning peak			Evening peak		
		Coef.	t	β	Coef.	t	β
Regional bus service characteristics	Standing passenger density	86.25 ***	8.56	0.24	114.93 ***	13.79	0.36
	Standing restrictions applied	-0.95	-0.92	-0.02	-3.32 ***	-4.15	-0.12
	Route overlap intensity	0.85 ***	4.50	0.14	0.11	0.79	0.02
	Transfer time	0.24 **	2.35	0.07	0.07	1.03	0.03
	Operation time per distance	-4.97 ***	-3.54	-0.12	-6.24 ***	-6.20	-0.19
	Average road speed	0.27 ***	3.04	0.10	0.15 **	2.11	0.07
	Service frequency	0.45 ***	3.27	0.10	0.34 ***	3.28	0.09
	Subway stations	-3.92 ***	-2.97	-0.10	-1.66	-1.58	-0.05
Demographic characteristics	Population aged 20-39 years	26.86 ***	4.54	0.33	28.16 ***	6.17	0.41
	Population aged 40-59 years	-27.88 ***	-5.62	-0.39	-29.23 ***	-7.54	-0.48
Land use characteristics	Business facilities	0.56	0.61	0.03	0.54	0.76	0.03
	Residential area	35.23 ***	4.34	0.26	23.97 ***	3.84	0.21
	Residential floor area	-0.50 ***	-3.19	-0.15	-0.53 ***	-4.41	-0.19
	Commercial area	-4.11	-0.27	-0.02	-5.16	-0.44	-0.03
	Commercial floor area	2.03	1.45	0.09	-0.86	-0.78	-0.05
	Green area	-3.23	-0.39	-0.02	-2.72	-0.42	-0.02
Constant		9.94 ***	1.95		26.16 ***	5.87	
R-squared		0.21			0.32		
Adj. R-squared		0.19			0.31		
F-statistics		16.48 ***			30.38 ***		

*p<0.1, **p<0.05, ***p<0.01

25% 노선의 평균 노선 중복도(출근 5.95, 퇴근 5.47)보다 낮은 수치이다. 이는 상대적으로 느린 노선이 버스 노선 집중도가 낮은 지역을 운행하며, 이러한 지역은 전반적인 대중교통 수요가 상대적으로 낮아 혼잡도가 낮은 것으로 해석할 수 있다.

또한, 지하철역이 많을수록 차내 혼잡도가 감소하는 것은 성현곤(2013)의 연구에서 지적한 바와 같이, 대체 교통수단의 접근성이 좋을수록 교통수단 선택의 다양성이 증가하여 광역버스에 대한 의존도가 낮아지기 때문으로 해석할 수 있다. 이는 수원-서울 통근 통행에서 지하철이 광역버스의 대체 교통수단으로 작용함을 보여준다.

다음으로 퇴근 시간대 다중회귀분석 결과, R-squared 값은 0.32로, 모형이 종속변수 분산의 32%를 설명하는 것으로 나타났다. F-statistic 값은 30.38로, 모형이 통계적으로 유의미함을 보여준다(p<0.01). 통계적으로 유의미한 영향을 미치는 변수는 입석 승객 밀도, 입석금지 여부, 운행시간비, 도로 평균 속도, 배차 빈도, 20-30대 인구수, 40-50대 인구수, 주거지역 면적, 주거지역 연면적으로 나타났다.

이 중에서 차내 혼잡도에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 출근 시간대와 마찬가지로 20-30대 인구수와 40-50대 인구수로 나타

났다. 20-30대 인구수가 많을수록 차내 혼잡도가 증가하고, 40-50대 인구수가 많을수록 차내 혼잡도가 감소하는 경향은 출근 시간대와 동일하게 나타났으나, 퇴근 시간대에 그 영향력이 더 크게 나타났다.

출근 시간 모형과 동일하게, 퇴근 시간 모형에서도 토지이용 특성 관련 변수 중에서는 주거지역 면적이 넓을수록 차내 혼잡도가 증가하고, 주거지역 연면적이 클수록 차내 혼잡도가 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 도로 평균 속도가 빠를수록, 배차 빈도가 높을수록 차내 혼잡도가 증가하며, 운행시간비가 높을수록 차내 혼잡도가 감소하는 것으로 나타났다.

흥미롭게도, 입석금지 여부는 퇴근 시간대에만 차내 혼잡도와 유의미한 음의 관계를 보였는데, 이는 입석금지 정책이 퇴근 시간대 차내 혼잡도 감소에 효과가 있음을 보여준다. 입석금지 정책은 버스 탑승 인원을 좌석 수로 제한함으로써 차내 혼잡도를 강제적으로 감소시키는 효과가 있으며, 이러한 정책적 요인이 퇴근 시간대 차내 혼잡도 결정에 중요한 역할을 하는 것으로 해석할 수 있다. 출근 시간대 차내 혼잡도의 평균값은 16.25%인데 반해, 퇴근 시간대 차내 혼잡도의 평균값은 12.07%로 더 낮게 나타났다. 그러나 퇴근 시간대의 최댓값(90.90%)이 출근 시간대(68.85%)보

다 높아 혼잡도의 변동폭이 더 큰 것으로 나타났다. 이는 퇴근 시간대에 특정 노선이나 시간대에서 극심한 혼잡이 발생하는 경우가 있음을 의미한다. 입석금지 정책이 퇴근 시간대에만 유의미한 효과를 보인 것은, 이러한 높은 변동성 속에서 입석 제한을 통한 혼잡도 관리가 더 효과적으로 작용했을 가능성을 시사한다. 반면 출근 시간대는 평균적으로 혼잡도가 높으나 변동폭이 상대적으로 작아, 입석금지 정책의 효과가 통계적으로 유의미하게 나타나지 않은 것으로 판단된다.

퇴근 시간 모형에서 노선 중복도와 환승 시간은 차내 혼잡도와 유의미한 관계를 나타내지 않았다. 이는 출근 시간대와 퇴근 시간대의 통행 특성 차이에서 기인한 것으로 볼 수 있다. 출근 시간대에는 정해진 시간 내에 직장/학교 등에 도착해야 하는 시간적 제약이 강하여 특정 시간대에 통행이 집중되고, 이로 인해 노선 중복도와 환승 시간의 영향이 두드러진다. 반면, 퇴근 시간대는 상대적으로 시간적 여유가 있고 통행 시간이 분산되어 있어 노선 중복도의 영향이 약화된다. 또한 퇴근 시간대에는 다양한 경로와 교통수단 선택이 가능하여 승객들이 혼잡한 노선이나 불편한 환승을 회피하거나 다양한 경유지를 포함한 통행 패턴을 보이는 경향이 있어, 이러한 통행 행태의 유연성으로 인해 노선 중복도와 환승 시간 변수의 영향력이 상대적으로 감소하는 것으로 판단된다.

업무시설 개수가 출퇴근 시간대 광역버스 차내 혼잡도에 통계적으로 유의미한 영향을 미치지 않는 것으로 나타난 것은 수원지역 광역버스 이용자들의 주요 통행 목적지가 지역 내 업무시설이 아닌 서울 방면임을 시사한다. 또한 상업시설 면적, 상업시설 연면적, 녹지지역 면적 등의 변수가 출퇴근 모형 모두에서 유의미한 영향을 나타내지 않은 것은 광역버스를 이용한 수원-서울 간 통근 통행 패턴이 이들 토지이용 특성과 관련성이 낮음을 의미하

며, 이는 광역버스가 주로 주거지와 업무지 간의 직접적인 통근 수요를 담당하는 교통수단으로 기능하고 있음을 시사한다.

4. 공간적 분석 결과

1) 노선별 혼잡도

수원시 행정동 단위의 출퇴근 시간대 버스 노선별 혼잡도를 내추럴 브레이크(Natural Breaks) 방법을 적용하여 시각화한 결과는 <그림 6>과 같다. 내추럴 브레이크는 클래스 내 분산을 최소화하고 클래스 간 분산을 극대화하는 방식으로 최적화된 분류 방법이다(Brewer and Pickle, 2002). 분석 결과, 출근 시간대와 퇴근 시간대 모두 수원시 동부 지역과 북서부 지역에서 상대적으로 높은 차내 혼잡도가 나타났으며, 이는 특정 지역에 통근 수요가 집중되고 있음을 시사한다. 다만, 두 시간대 간의 세부적인 혼잡도 분포에는 차이가 존재한다.

출근 시간대의 경우, 영통구 이의동과 팔달구 우만동 지역이 가장 높은 혼잡도를 나타내며, 다음으로 영통구 원천동, 영통구 영통동 지역이 높은 혼잡도를 보인다. 팔달구 인계동, 영통구 매탄동, 장안구 파장동, 장안구 정자동도 상대적으로 높은 혼잡도를 나타내고 있다. 한편, 퇴근 시간대의 경우 영통구 이의동 지역이 가장 높은 혼잡도를 유지하고 있으며, 다음으로 팔달구 우만동, 영통구 원천동, 영통구 영통동이 두드러지게 나타난다. 혼잡도 분포에 있어 출근 시간대와 퇴근 시간대 간에 일부 차이가 있으나, 전반적으로 유사한 패턴을 보이고 있다.

정류장별 차내 혼잡도의 공간적 분포는 <그림 7>과 같다. 출근 및 퇴근 시간대 모두, 정류장별 혼잡도는 전반적으로 유사한 공간 분포를 나타내며, 일부 특정 정류장에서 집중적으로 높은 혼

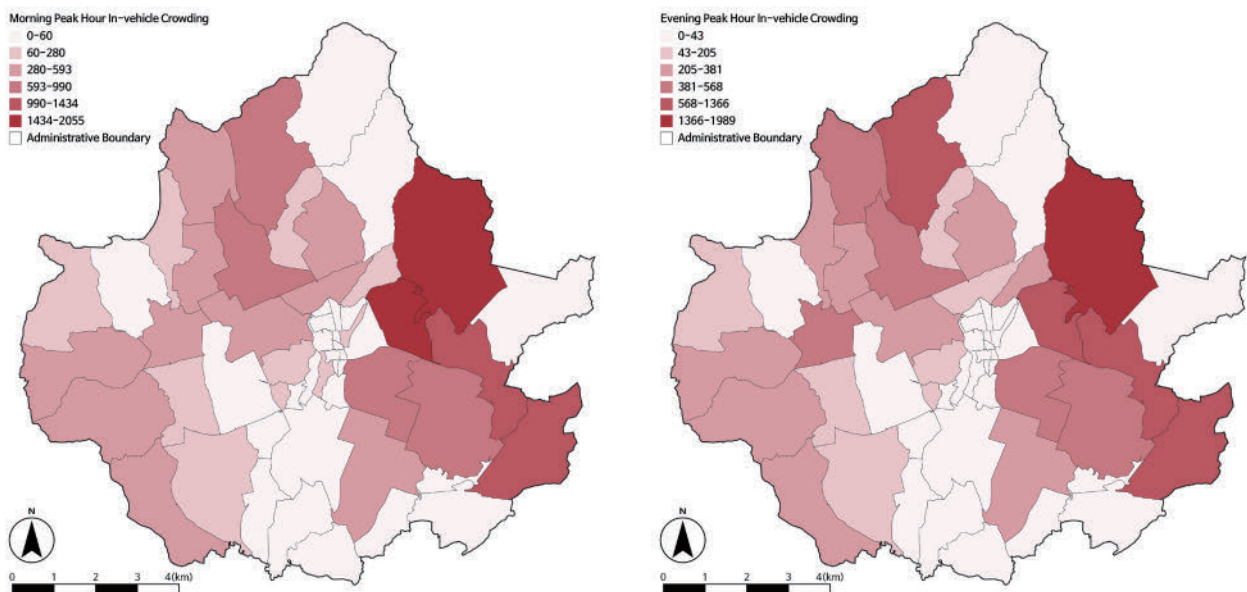


그림 6. 행정동별 차내 혼잡도(좌: 출근 시간, 우: 퇴근 시간)

Figure 6. In-vehicle crowding by administrative dong (left: morning peak hours, right: evening peak hours)

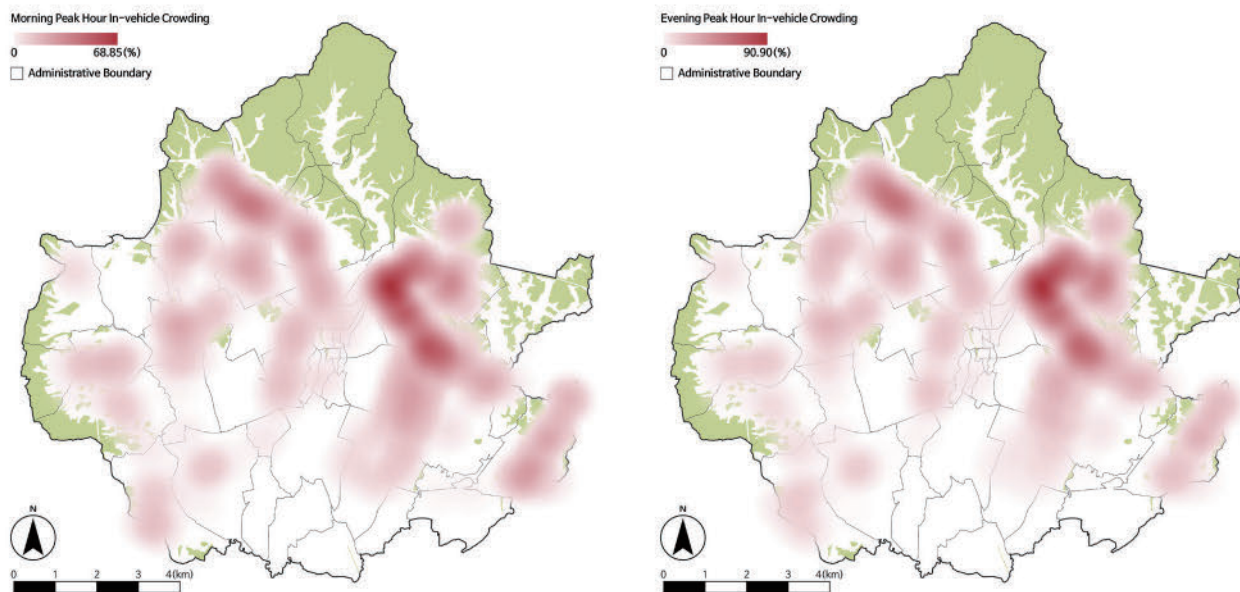


그림 7. 정류장별 차내 혼잡도(좌: 출근 시간, 우: 퇴근 시간)

Figure 7. In-vehicle crowding by bus stop (left: morning peak hours, right: evening peak hours)

잡도를 보인다. 특히, ‘우만동4단지’ 정류장과 ‘경기대수원캠퍼스 후문·수원박물관’ 정류장은 두 시간대 모두 매우 높은 혼잡도를 기록하고 있다. 이는 해당 정류장이 대형 주거단지와 주요 교육 시설에 인접해 있으며, 광역버스 노선의 핵심 승하차 지점으로 기능하고 있기 때문이다. 특히 서울로 연결되는 주요 광역노선의 집중 배차가 이뤄지는 만큼, 이 지역 정류장들은 수요·공급 양측에서 교통 밀집도가 높은 것으로 판단된다.

수원시 중심부 및 서남부 지역(예: 권선구 권선동, 세류동 등)은 상대적으로 낮은 혼잡도를 보이고 있다. 이는 해당 지역들이 도시철도(지하철 1호선, 신분당선 연장 등)와 같은 대체 교통수단에 대한 접근성이 우수하거나, 서울 중심부로의 직접적인 통근 수요가 적은 지역적 특성 때문으로 해석할 수 있다. 또한 상업지나 자족기능이 강한 일부 지역에서는 내생적인 통근·통학이 이뤄지므로 광역적 이동 수요가 상대적으로 적은 것도 원인 중 하나다.

종합적으로, 수원시 내 차내 혼잡도는 출퇴근 시간대 모두 특정 지역과 정류장에 집중되는 공간적 편중 현상이 나타나며, 이는 거주지 및 통학·통근 목적지의 공간적 배치, 광역교통망의 구조, 대체 교통수단의 유무 등에 의해 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

2) 노선 중복도

수원시의 노선 중복도를 각각 행정동 단위와 정류장 단위로 시각화한 결과는 각각 <그림 8>과 같다. <그림 8>에서 볼 수 있듯이, 영통구 의의동 지역이 가장 높은 노선 중복도를 보이고 있으며, 다음으로 권선구 권선동, 영통구 원천동과 그 인근의 수원 동부 지역과 서남부의 권선구 호매실동도 상대적으로 높은 노선 중복도가 나타났다. 이는 이 지역들에 대규모 아파트단지가 위치해

있고, 수원시청과 같은 공공기관과, 경기대학교 수원캠퍼스, 아주대학교, 인근 경희대학교 국제캠퍼스 등 주요 대학 시설이 위치하고 있기 때문으로 해석된다.

<그림 8>의 정류장별 노선 중복도 분석 결과에서는 ‘원천레이크파크아파트’ 정류장과 수원월드컵경기장 인근 정류장, ‘우만동4단지’와 ‘경기대수원캠퍼스후문·수원박물관’ 정류장에서 높은 노선 중복도가 관찰되었다. 특히, ‘우만동4단지’와 ‘경기대수원캠퍼스후문·수원박물관’ 정류장은 출퇴근 시간대 모두 높은 차내 혼잡도를 보이는 지역으로, 노선 중복도와 차내 혼잡도 간의 양의 상관관계가 공간적으로도 확인되었다. 이외에도 주요 간선도로인 경수대로를 따라 노선 중복도가 높게 나타나고 있으며, 이는 광역버스 노선들이 특정 주요 도로와 정류장에 집중되어 있음을 보여준다. 주목할 점은 수원 중남부의 수원버스터미널 근처 정류장의 노선 중복도는 높지만 차내 혼잡도는 높지 않았다는 것이다. 이는 인근의 지하철 수원역이 통근 수요를 분산해주거나, 주변의 용도가 상업지역으로 되어 있어 서울 방향 통근 수요가 상대적으로 적기 때문인 것으로 해석된다. 이러한 결과는 다중회귀분석에서 지하철역 개수가 차내 혼잡도와 음의 상관관계를 보인 분석 결과와도 일치한다.

종합적으로, 광역버스 정류장은 지하철 노선이 상대적으로 부족한 영통구와 팔달구 동부 지역에 광역버스 노선이 집중되어 있으며, 대학교와 대규모 주거단지가 위치한 지역을 중심으로 공급되고 있음을 의미한다. 이러한 공간적 분포는 본 연구의 다중회귀분석에서 노선 중복도가 출근 시간대 차내 혼잡도와 유의미한 양의 상관관계를 보인 통계적 결과를 지리적 맥락에서 뒷받침하는 것으로 볼 수 있다.

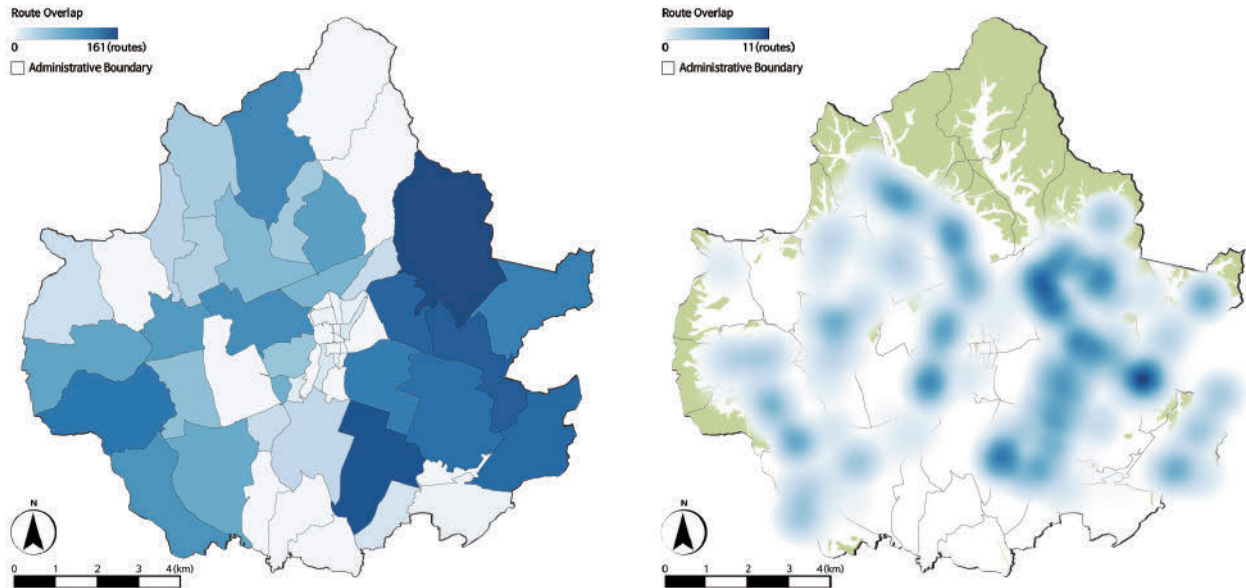


그림 8. 행정동별 노선 중복도 합(왼쪽); 정류장별 노선 중복도(오른쪽)

Figure 8. Total route overlap intensity by administrative dong (left); total route overlap intensity by bus stop (right)

3) 환승 시간

출근 시간대와 퇴근 시간대 수원시 정류장별 환승 시간의 공간적 분포는 <그림 9>와 같다. 전체적으로 수원시 동부 지역을 중심으로 환승 시간이 긴 정류장이 밀집되어 있으며, 이는 해당 지역의 교통 혼잡도 및 노선 구조와 밀접한 관련이 있음을 시사한다.

출근 시간대에는 대체로 환승 시간이 길게 나타났다. 특히 영통구 원천동의 '광교호수공원입구, 원천교사거리' 인근 정류장, 권선구 권선동의 '수원버스터미널' 인근, 권선구 호매실동 '호매실동차고지' 인근 정류장의 환승 시간이 길게 나타났다. 원천동 정류장 근처에는 삼성 전기 및 삼성 전자 본사가 위치해있어 이리

한 지역들은 공통적으로 높은 통행 수요가 집중되는 곳으로, 교통량 과부하가 환승 시간 증가의 주요 원인으로 작용하는 것으로 보인다.

한편 퇴근 시간대에는 팔달구 우만동의 '여권민원실·풍림아파트' 정류장과 '우만동4단지' 및 그 인근 정류장에서 환승 시간이 가장 길게 나타났다. 해당 정류장들은 차내 혼잡도가 높고, 여러 노선이 중복 운행되는 지점임에도 불구하고 환승 소요 시간이 길게 나타났다. 이는 노선 간 연결성 부족과 비효율적인 환승 동선이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 즉, 노선의 단순 중복은 곧바로 환승 효율성으로 이어지지 않으며, 체계적인 노선 설계

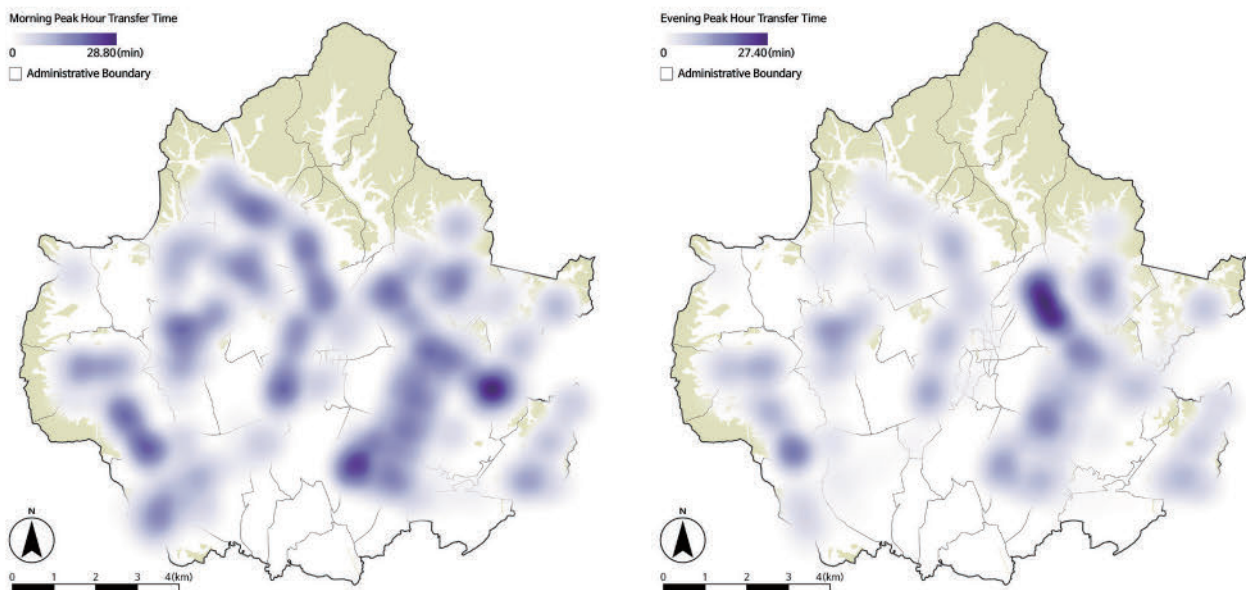


그림 9. 정류장별 환승 시간(좌: 출근 시간, 우: 퇴근 시간)

Figure 9. Transfer time by bus stop (left: morning peak hours, right: evening peak hours)

및 배치가 중요함을 보여준다. 특히 영통구 이의동 지역은 수원 시 전체에서 노선 중복도가 가장 높은 지역 중 하나임에도 불구하고 환승 시간이 긴 대표적인 지역으로 나타났다. 이는 지역 내 버스 노선 간의 연계성이 부족하거나, 물리적 환승 인프라의 미비 등 구조적 문제가 병존하고 있음을 암시한다.

V. 결론

본 연구는 스마트카드 자료를 활용하여 수원-서울 간 광역버스 통근 통행의 차내 혼잡 영향요인을 분석하였다. 주요 연구 결과 및 정책적 시사점은 다음과 같다.

출퇴근 시간대 모두에서 40-50대 인구수와 차내 혼잡도는 통계적으로 유의미한 음(-)의 관계를 가지는 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 자가용 보유율이 높은 40-50대 인구가 많은 지역일수록 광역버스 이용률이 낮아질 수 있음을 시사한다. 이는 광역버스의 서비스 품질(접근성, 정시성, 쾌적성 등)을 개선하여 자가용 이용자들의 대중교통 전환을 유도할 경우, 수도권 교통 혼잡 완화에 크게 기여할 수 있는 잠재력이 있음을 시사한다. 또한 두 모형 모두 토지이용 특성 측면에서 주거지역 면적이 넓을수록 차내 혼잡도가 증가하고, 주거지역 연면적이 클수록 차내 혼잡도가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 주거 밀도와 교통 인프라의 통합적 계획이 혼잡도 관리에 중요함을 시사한다.

노선 중복도가 출근 시간대 차내 혼잡도에 유의미한 양(+)의 관계를 가지는 것으로 나타났다. 이는 광역버스 노선이 특정 정류장에 집중될수록 혼잡도가 증가함을 의미한다. 한편 운행시간비는 차내 혼잡도와 음(-)의 관계를 보이는데, 이는 운행이 빠른 노선일수록 노선 중복도가 높은 지역에 분포하고, 느린 노선일수록 중복도가 낮은 지역을 운행하는 경향을 반영한다. 즉 운행시간비와 노선 중복도는 서로 비례 관계에 있으며, 이러한 공간적 분포는 광역버스 혼잡이 특정 고밀도·고수요 지역에 구조적으로 집중되어 있음을 시사한다. 따라서 광역버스 노선 재구조화 시 이러한 지역을 우선적으로 개선하는 것이 필요하다.

공간적 분석 결과 노선 중복도가 높은 지역은 대규모 아파트 단지, 공공기관, 주요 대학 시설 인근이었다. 선행 연구에서도 정류장을 고르게 분산시킬 때 혼잡도 완화에 효과적일 수 있음을 언급했으며(Ibeas et al., 2010), 광역버스 노선을 하나의 허브에 집중시키기보다는 정류장을 지역적으로 분산시키는 전략이 혼잡도 완화에 효과적일 수 있다. 분산된 정류장 배치는 이용자 접근성을 향상시키면서 특정 정류장의 혼잡을 방지하여 대중교통 이용의 쾌적성을 증가시킨다. 특히, '우만동4단지'와 그 인근 정류장은 차내 혼잡도도 높으면서 노선 중복도도 높고, 환승 소요 시간도 긴 복합적 문제를 가진 지역으로 나타났다. 이는 많은 노선이 중복되어 운행되는데 불구하고 노선 간 환승의 효율성이 낮을 수 있음을 의미한다. 이러한 지역에서는 단순히 노선 수를 늘리는 것

보다 노선 체계의 효율적 재구성 과 환승 시스템 개선이 더 효과적일 수 있다.

지하철역 개수가 출근 시간대 차내 혼잡도에 유의미한 음(-)의 관계를 가지는 것으로 나타났다. 이는 공간적 분석에서도 수원 중남부의 수원버스터미널 근처 정류장은 노선 중복도가 높음에도 불구하고 차내 혼잡도가 상대적으로 낮게 나타나 지하철역의 대체 교통수단 역할이 확인되었다. 두 교통수단의 통합적 운영이 각 수단의 혼잡도 완화에 기여할 수 있으므로 환승 체계 개선, 통합 요금제, 연계 스케줄 조정 등을 통해 두 교통수단 간의 연계성을 강화할 필요가 있다.

입석금지 여부는 퇴근 시간대에만 차내 혼잡도와 유의미한 음(-)의 관계를 보였다. 이는 입석금지 정책이 퇴근 시간대 차내 혼잡도 감소에 효과가 있음을 보여준다. 그러나 이러한 정책은 차내 혼잡을 제한하는 대신 기점 만차 등으로 인한 일부 승객의 승차 기회를 제한할 수 있으므로 적절한 배차 간격 조정 및 증차가 병행되어야 한다. 특히 퇴근 시간대 혼잡이 심한 노선에 대해서는 탄력적인 배차 운영이 필요하다. 환승 시간이 길게 소요되는 지역(팔달구 우만동 등)에 대해서는 환승 체계 개선이 시급하다. 출퇴근 시간대의 환승 시간 패턴은 대체로 유사하나, 퇴근 시간대에 '호매실동차고지', '서부공영차고지' 등 차고지 인근 정류장에서 환승 시간이 더 길게 나타나는 경향이 있어, 시간대별 맞춤형 환승 체계 구축이 필요하다.

종합하면, 수원-서울 간 광역버스 통근 통행의 효율성을 높이기 위해서는 노선의 적절한 분산, 지하철과의 연계성 강화, 환승 시스템 개선이 필요함을 시사한다. 특히 차내 혼잡도, 노선 중복도, 환승 소요 시간 간의 복합적 관계를 고려한 통합적 접근이 효과적일 것으로 판단된다.

본 연구에는 다음과 같은 한계가 있다. 첫째, 입석금지 정책과 관련된 변수의 한계가 존재한다. 본 연구에서는 차내 혼잡도에 영향을 미칠 수 있는 요인을 최대한 고려하기 위하여 '입석금지 여부'(더미변수)와 '입석 승객 밀도'(연속변수)를 동시에 독립변수로 포함하였다. 그러나 이론적으로 입석 금지 노선의 경우 입석 승객 밀도가 0이어야 하므로 두 변수는 구조적으로 연관되어 있어 각 변수의 독립적 효과를 명확히 분리하기 어렵다. '입석 승객 밀도'의 효과는 주로 입석 허용 노선의 데이터에서 추정되며, '입석 금지 여부'의 계수는 입석 밀도 감소를 통한 간접효과와 정책 시행에 따른 기타 효과가 혼재된 값으로 해석해야 한다. 또한 분석 결과 입석금지 정책이 퇴근 시간대 차내 혼잡도 감소에 효과가 있는 것으로 나타났으나, 안정훈(2024)의 연구에서 지적인 바와 같이 기점 만차로 인한 승차 불가 문제 등 부정적 영향에 대한 분석은 본 연구의 범위를 벗어난다. 향후 연구에서는 매개효과 분석(Mediation Analysis) 또는 구조방정식 모델(SEM) 등을 활용하여 인과관계를 명확히 분리하고, 입석금지 정책의 긍정적 효과와 부정적 영향을 종합적으로 평가할 필요가 있다.

둘째, 모형의 설명력과 변수 선정에 한계가 존재한다. 출근 시간대 모형의 R-squared 값이 0.21, 퇴근 시간대 모형의 R-squared 값이 0.32로 나타나 모형이 설명하지 못하는 부분이 존재한다. 이는 정류장의 노선 내 위치를 변수로 포함하지 못한 점 때문일 수 있다. 일반적으로 광역버스는 기점에서 출발하여 승객이 누적되면서 혼잡도가 증가하고, 종점에 가까워질수록 하차가 시작되는 패턴을 보인다. 이러한 노선 내 위치 효과는 차내 혼잡도의 주요 결정요인임에도 불구하고 본 연구에서 제외되어, 모형 설명력이 제한적으로 나타난 주요 원인으로 판단된다. 또한 일부 변수의 회귀분석 결과 해석에도 제약이 있다. 주거지역 연면적과 차내 혼잡도 간의 관계에 대한 해석 과정에서 대중교통 접근성을 주요 메커니즘으로 제시하였으나, 퇴근 시간대 모형에서 지하철역 수가 통계적으로 유의하지 않아 직접적인 실증 근거가 부족하였다. 고층·고밀 지역의 지하철 접근성이 실제로 높음을 확인하였으나, 회귀모형에서 포착되지 않은 이유는 퇴근 통행의 시간적·경로적 유연성 등의 복합적 요인으로 추측된다. 향후 연구에서는 각 정류장의 기점으로부터의 순서, 누적 승차거리, 주요 환승지점 통과 여부 등 노선 내 위치 변수를 포함하고, 주거지역 특성과 대중교통 이용 간의 관계를 더욱 정밀하게 분석하여 모형의 설명력을 높일 필요가 있다.

셋째, 본 연구는 공간적·시간적 범위의 한계를 가진다. 분석 대상이 수원-서울 간 통행으로 한정되어 있으며, 데이터 역시 2023년 7월의 특정 기간만을 대상으로 하여 계절적 변동성을 고려하지 못하였다. 또한 출퇴근 시간대를 시간대별로 세분화하지 않고 통합적으로 분석함에 따라 시간의 흐름에 따른 혼잡도 변화와 영향요인의 동적 변화를 포착하지 못하였다. 향후 연구에서는 보다 광범위한 공간적 범위와 장기간의 시계열 데이터를 활용하여 계절적 요인 및 시간대별 특성을 심층적으로 분석할 필요가 있다.

인용문헌

References

1. 강주란·고승영, 2005. “승하차수요 분포를 고려한 버스 총비용 산정 모형식 개발”, 대한교통학회 제49회 학술발표회, 521-530, 인천.
2. Gang, J. and Kho, S., 2005. “Development of Bus System Total-Cost Estimation Model Concerning Boarding and Alighting Demand Distributions”, Paper presented at the 49th KOR-KST Conference, 521-530, Incheon.
3. 구동균·김현주·한아름·김재만, 2023. “포스트코로나 시대의 통근통행 행태변화”, 대한교통학회 & 대한국토·도시계획학회 공동 학술대회, 185-186, 부산.
4. Gu, D., Kim, H., Han, A., and Kim, C., 2023. “Changes in Commuting Behavior in the Post COVID-19 era”, Paper presented at the Joint Conference of Korean Society of Transportation & Korea Planning Association, 185-186, Busan.
5. 구동균·한아름·김현주, 2023. 「포스트코로나 시대의 통근행태 변화 분석」, 경기: 경기연구원.
6. Gu, D., Han, A., and Kim, H., 2023. *Analysis of Changes in Commuting Behaviors in the Post-COVID Era*, Gyeonggi: Gyeonggi Research Institute.
7. 국토교통부, 2023. “대도시권 광역 통행량 전년대비 7.0% 증가”, 세종.
8. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2023. “Increase of 7.0% in Metropolitan Area Traffic Volume Compared to the Previous Year”, Sejong.
9. 권현중, 2019. “교통혼잡도로 적용범위 타당성 연구: 충청도 중소도시를 중심으로”, 한국교통대학교 석사학위논문.
10. Kwon, H., 2019. “A Study on the Feasibility of the Improvement of Traffic Congestion: Focusing on Small and Medium-Sized Cities in Chungcheong Province”, Master's Thesis, Korea National University of Transportation.
11. 김원길·노창균·손봉수, 2012. “대중교통 이용자 관점의 서비스 평가 모형 개발”, 「대한교통학회지」, 30(1): 149-159.
12. Kim, W., Roh, C., and Son, B., 2012. “Service Evaluation Models from Transit Users' Perspectives”, *Korean Society of Transportation*, 30(1): 149-159.
13. 김주영, 2024. “모빌리티 빅데이터의 활용과 거버넌스 구축방안”, 「위치정보 산업 동향 보고서」, 6: 3-15.
14. Kim, J., 2024. “Utilization of Mobility Big Data and Governance Establishment Plan”, *KISA Report*, 6: 3-15.
15. 김태현·오주택·이규훈, 2016. “구조방정식(S.E.M.)을 이용한 보행량 영향요인분석”, 「한국ITS학회 논문지」, 15(3): 12-22.
16. Kim, T., Oh, J., and Lee, K., 2016. “Factor Analysis Influencing Pedestrian Volumes Based on Structural Equation Models”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, 15(3): 12-22.
17. 김현아, 2023.11.19. “‘평균102분’ 서울·수도권 출·퇴근, 왜 고달파졌을까[김현아의 시티라이브]”, 이코노미스트.
18. Kim, H., 2023, November 19. “‘Average 102 Minutes’ Seoul-Capital Area Commuting: Why Has It Become Harder? [City Live by Kim Hyun-A]”, *Economist*.
19. 김현우·김호연, 2011. “수도권 신도시 건설과 올 거주자의 통근통행패턴 변화”, 「한국경제지리학회지」, 14(3): 437-451.
20. Kim, H.W. and Kim, H.Y., 2011. “Emergence of New Towns and Changes in Commuting patterns of Seoul Residents”, *Journal of the Economic Geographical Society of Korea*, 14(3): 437-451.
21. 박상조·유형목·김거중·박준식, 2020. 「광역교통 서비스 지표 개발」, 세종: 한국교통연구원.
22. Park, S., Yoo, H., Kim, G., and Park, J., 2020. *Metropolitan Transportation Service Indicators Development*, Sejong: The Korea Transport Institute.
23. 박준석·오주택, 2022. “도로교통 혼잡도 분석을 통한 수도권 광역도로교통 개선방안 연구”, 「대한교통학회지」, 40(1): 69-80.
24. Park, J. and Oh, J., 2022. “A Study of Strategies to Improve the Metropolitan Road Transportation in the Capital Area Through the Analysis of Road Traffic Congestion”, *Korean*

- Society of Transportation*, 40(1): 69-80.
13. 박준식·박준식·김거중·이상규, 2019. 「광역교통난 해소를 위한 수도권 교통개선대책」, 세종: 한국교통연구원.
Park, J., Park, J., Kim, G., and Lee, S., 2019. *Improvement Plan for Resolving Capital Area Metropolitan Transportation Issues*, Sejong: The Korea Transport Institute.
14. 박준식·박상우·김영국·정동우·문지혜, 2014. 「출퇴근 수급불균형 해소를 위한 대중교통 서비스 정책」, 세종: 한국교통연구원.
Park, J., Park, S., Kim, Y., Jeong, D., and Moon, J., 2014. *Public Transportation Policies on Commuter Balance and Efficiency*, Sejong: Korea Transport Institute.
15. 백광호·정진혁, 2019. 「서울특별시 교통카드 데이터를 이용한 구간별 버스 차내 혼잡도 분석 및 승객 대기 시간 산정 방법론 개발」, 대한교통학회 제81회 학술발표회, 381-382, 여수.
Baek, K. and Jung, J., 2019. "Developing a Methodology for Estimating Link-Based Bus In-Vehicle Crowdedness and Passenger Waiting Time Using Smart Card Data of Seoul", Paper presented at the 81st KOR-KST Conference, 381-382, Yeosu.
16. 성현곤, 2013. "주거와 직장의 대중교통 접근성 유형화와 대중교통 통행발생량과의 연관성에 관한 연구", 「대한교통학회지」, 31(2): 20-32.
Sung, H., 2013. "A Study on Categorizing the Types of Transit Accessibility by Residence and Working Place and Identifying its Association to Personal Transit Travel Frequency", *Journal Korean Society of Transportation*, 31(2): 20-32.
17. 안정훈, 2024.4.26. "「입석금지」에 버스 오픈런...수도권 '통근러' 분통", 한국경제.
Ahn, J., 2024, April 26. "'Standing Ban' Causes Bus Rush... Commuters in the Seoul Metropolitan Area Express Frustration", *The Korea Economic Daily*.
18. 오동희·박준영·박재홍·노창균, 2023. "대중교통 수요응답형 교통수단 (DRT) 운영체계의 시뮬레이션 기반 효율성 평가", 대한교통학회 & 대한국토도시계획학회 공동 학술발표회, 101-102, 부산.
Oh, D., Park, J., Park, J., and Roh, C., 2023. "Evaluation of the Efficiency of the Demand-Response Transportation (DRT) Operating System Using Simulation" Paper Presented at the Joint Conference of Korea Society of Transportation & Korea Planning Association, 101-102, Busan.
19. 유영근·박용진·전상영, 2014. "교통카드 자료를 이용한 버스 계획노선의 이용수요 예측방법에 관한 연구", 제40회 대한토목학회 정기 학술대회, 7-8, 대구.
Ryu, Y., Park, Y., and Jeon, S., 2014. "A Study on Demanding Trip Estimation Method of Planned Bus Route Using Transit Card Data", Paper presented at The 40th Conference of the Korean Society of Civil Engineers, 7-8, Daegu.
20. 윤상원·박준식·김거중·고승렬·문지혜·정동우, 2023. 「수도권 광역버스 운행 다양화 방안」, 세종: 한국교통연구원.
Yoon, S., Park, J., Kim, G., Ko, S., Moon, J., and Jeong, D., 2023. *Diversification Plan for Operating Metropolitan Buses*, Sejong: Korea Transport Institute.
21. 윤상원, 2024. "신도시 교통문제 해결을 위한 광역교통축 제도", 「월간교통」, 314: 14-19.
Yoon, S., 2024. "Metropolitan Transport Corridor System for Solving New Town Traffic Issues", *Monthly KOTI Magazine on Transport*, 314: 14-19.
22. 이규희·김주영, 2024.2.24. "퇴근길 도심 정류소는 여전히 도떼기시장... '광역버스의 역설' [이슈 속으로]", 세계일보.
Lee, G. and Kim, J., 2024, February 24. "Downtown Bus Stops Still Crowded at Rush Hour... The Paradox of Metropolitan Buses [Inside the Issue]", *The Segye Times*.
23. 이상민·이현주·박정하, 2005. "지방5개 광역권의 대중교통실태 조사 결과분석 및 활용방안", 대한교통학회 제48회 학술발표회, 547-552.
Lee, S., Lee, H., and Park, J., 2005. "Survey of Public Transportation User Behavior for Metropolitan Areas", Paper presented at the 48th KOR-KST Conference, 547-552.
24. 이영근·김용식, 2005. "광역교통행정체계 진단 및 개선에 관한 연구", 「교통기술과정책」, 2(1): 61-73.
Lee, Y. and Kim, Y., 2005. "A Study on Diagnosis and Improvement of Metropolitan Transport Administration System", *Transportation Technology and Policy*, 2(1): 61-73.
25. 이용주, 2016. "교통카드 자료를 이용한 급행버스 노선 및 운영 계획 최적화 방안", 아주대학교 박사학위논문.
Lee, Y., 2016. "Optimizing Express Bus Route and Operation Scheme with Smart Card Travel Data", Ph.D. Dissertation, Ajou University.
26. 이주일·윤혜림·이종현·최민아·정진원·이상대·이혜령, 2017. 「수도권광역도시계획 기초분석과 의제발굴」, 서울: 서울연구원.
Lee, J., Yoon, H., Lee, J., Choi, M., Jung, J., Lee, S., and Lee, H., 2017. *Analysis and Development of the Planning Agendas for the Seoul Metropolitan Regional Plan*, Seoul: Seoul Institute.
27. 이지혜, 2023.5.11. "코로나19 종식 선언...윤 대통령 '3년4개월 만에 일상 회복'", 코리아넷뉴스.
Lee, J., 2023, May 11. "President Yoon Declares End to COVID-19, Return to Daily Life", *Korea.net*.
28. 장동익·원민수·홍성표·신유선, 2023. 「모빌리티 빅데이터 기반 국민 통근통학 통행실태 분석」, 세종: 한국교통연구원.
Jang, D., Won, M., Hong, S., and Shin, Y., 2023. *Mobility Bigdata-based Nationwide Commute Behavior Analysis*, Sejong: Korea Transport Institute.
29. 전용현, 2024. "교통빅데이터를 활용한 심야버스 노선계획 방법론 연구", 「교통기술과정책」, 21(2): 35-41.
Jeon, Y., 2024. "Study on Late-night Bus Route Planning Methodology using Transportation Big Data", *Transportation Technology and Policy*, 21(2): 35-41.
30. 조채원, 2021.6.17. "2018년 교통혼잡비용, 명목GDP의 3.6에 달해", 이뉴스투데이.
Cho, C., 2021, June 17. "2018 Traffic Congestion Cost Reaches 3.6% of Nominal GDP", *enewstoday*.
31. 지민경·김응철, 2017. "대중교통 소외지역 수요응답형 교통수단 (DRT) 도입에 따른 효과분석: 여주지역을 대상으로", 대한교통학회 제76회 학술발표회, 548-552, 성남.
Ji, M. and Kim, E., 2017. "Effects of Demand Response Transit for Public Transportation Service Weak Areas -Focusing on Yeosu Area", Paper presented at the 76th KOR-KST Conference, 548-552, Seongnam.

32. 최성택·김거중·박준식·윤상원·고승렬·문지혜·정동우, 2022. 「수요응답형 대중교통 서비스 도입 및 효과분석」, 세종: 한국교통연구원.
Choi, S., Kim, G., Park, J., Yoon, S., Ko, S., Moon, J., and Jeong, D., 2022. *Impact Analysis of Implementing the Demand Responsive Transit System in Metropolitan Areas*, Sejong: Korea Transport Institute.
33. 하재현·이수기, 2017. “개인의 생애주기 단계에 따른 통근시간 영향요인 분석-2010년 수도권 가구통행실태조사자료를 중심으로”, 「국토계획」, 52(4): 135-152.
Ha, J. and Lee, S., 2017. “Analysis on the Determinant Factors of Commuting Time by Individuals’ Life Cycle Stage -Based on the 2010 Household Travel Survey Data of the Seoul Metropolitan Area”, *Journal of Korea Planning Association*, 52(4): 135-152.
34. 하혜중, 2023. “교통카드 데이터를 활용한 광역버스 최적 운행계획에 관한 연구”, 명지대학교 박사학위논문.
Ha, H., 2023. “A Study on the Optimal Scheduling of Red Bus Using Smart Card Data”, Ph.D. Dissertation, Myongji University.
35. 한상욱·강희웅·이명훈, 2015. “교통카드 데이터를 활용한 주요 역세권별 대중교통 이용 통근통행자의 주거지 분포 - 수도권을 대상으로”, 「국토계획」, 50(4): 103-117.
Han, S., Kang, H., and Lee, M., 2015. “Residential Distribution of Public Transport Commuter by Smart Card through the Use of the Major Subway Influence Area - Focus on Metropolitan”, *Journal of Korea Planning Association*, 50(4): 103-117.
36. 허은진, 2020. “스마트카드 자료를 이용한 광역버스의 차내 혼잡에 따른 시간가치 추정”, 서울대학교 박사학위논문.
Heo, E., 2020. “Crowding Valuation in Regional Bus Using Smart Card Data”, Ph.D. Dissertation, Seoul National University.
37. 현준용·김재익, 2014. “대중교통이용률과 직주균형 수준이 통근통행에 미치는 영향”, 「교통연구」, 21(4): 17-32.
Hyun, J. and Kim, J., 2014. “The Effects of Transit-Share and Job-Housing Balance on Commuting Travel”, *Journal of Transport Research*, 21(4): 17-32.
38. Bagchi, M. and White, P.R., 2005. “The Potential of Public Transport Smart Card Data”, *Transport Policy*, 12(5): 464-474.
39. Brewer, C.A. and Pickle, L., 2002. “Evaluation of Methods for Classifying Epidemiological Data on Choropleth Maps in Series”, *Annals of the Association of American Geographers*, 92(4): 662-681.
40. Briand, A.S., Côme, E., Trépanier, M., and Oukhellou, L., 2017. “Analyzing Year-to-year Changes in Public Transport Passenger Behaviour Using Smart Card Data”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 79: 274-289.
41. Duan, Z., Lei, Z., Zhang, M., Li, H., and Yang, D., 2019. “Understanding Multiple Days’ Metro Travel Demand at Aggregate Level”, *IET Intelligent Transport Systems*, 13(5): 756-763.
42. Farda, M. and Lubis, H.A.R., 2018. “Transportation System Development and Challenge in Jakarta Metropolitan Area, Indonesia”, *International Journal of Sustainable Transportation Technology*, 1(2): 42-50.
43. El-Geneidy, A., Grimsrud, M., Wasfi, R., Tétreault, P., and Surprenant-Legault, J., 2014. “New Evidence on Walking Distances to Transit Stops: Identifying Redundancies and Gaps Using Variable Service Areas”, *Transportation*, 41(1): 193-210.
44. Foell, S., Phithakkitnukoon, S., Veloso, M., Kortuem, G., and Bento, C., 2016. “Regularity of Public Transport Usage: A Case Study of Bus Rides in Lisbon, Portugal”, *Journal of Public Transportation*, 19(4): 161-177.
45. Gutiérrez, J. and García-Palomares, J.C., 2008. “Distance-measure Impacts on the Calculation of Transport Service Areas Using GIS”, *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 35(3): 480-503.
46. Ibeas, Á., dell’Olio, L., Alonso, B., and Sainz, O., 2010. “Optimizing Bus Stop Spacing in Urban Areas”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(3): 446-458.
47. Liu, S., Yamamoto, T., Yao, E., and Nakamura, T., 2021. “Examining Public Transport Usage by Older Adults with Smart Card Data: A Longitudinal Study in Japan”, *Journal of Transport Geography*, 93: 103046.
48. Loo, B.P. and Tsoi, K.H., 2024. “Stressors for Bus Commuters and Ways of Improving Bus Journeys”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 187: 104164.
49. Ortega-Tong, M.A., 2013. “Classification of London’s Public Transport Users Using Smart Card Data”, Master’s Dissertation, Massachusetts Institute of Technology.
50. Scott, R.A., George, B.T., and Prybutok, V.R., 2016. “A Public Transportation Decision-making Model within a Metropolitan Area”, *Decision Sciences*, 47(6): 1048-1072.

Date Received	2025-05-27
Date Reviewed	2025-09-11
Date Accepted	2025-09-11
Date Revised	2025-11-14
Final Received	2025-11-14