

교통카드 자료를 활용한 지하철 혼잡도 개선 연구 : Early Bird 정책대안을 중심으로*

이상준** · 신성일***

A Study on Improving Subway Crowding Based on Smart Card Data : a Focus on Early Bird Policy Alternative*

Sang Jun Lee** · Sung Il Shin***

■ Abstract ■

Currently, subway crowding is estimated by observing a specific point at specific hours once or twice every 1 or 2 years. Given the extensive subway network in Seoul Metropolitan Area covering 588 stations, 11 lines and 80 transfer stations as of 2017, implementing crowding mitigation policy may have its limitations due to data uncertainty. A proposal has recently been made to effectively use smart card data, which generates big data on the overall subway traffic related to an estimated 8 million passengers per day. To mitigate subway crowding, this study proposes two viable options based on data related to smart card used in Seoul Metropolitan Area. One is to create a subway passenger pattern model to accurately estimate subway crowding, while the other is to prove effectiveness of early bird policy to distribute subway demand that is concentrated at certain stations and certain time. A subway passenger pattern model was created to estimate the passenger routes based on subway terminal ID at the entrance and exit and data by hours. To that end, we propose assigning passengers at the routes similar to the shortest routes based on an assumption that passengers choose the fastest routes. In the model, passenger flow is simulated every minute, and subway crowding level by station and line at every hour is analyzed while station usage pattern is identified by depending on passenger paths. For early bird policy, highly crowded stations will be categorized based on congestion level extracted from subway passenger pattern model and viability of a policy which transfers certain traveling demands to early commuting hours in those stations will be reviewed. In particular, review will be conducted on the impact of policy implemented at certain stations on other stations and lines from subway network as a whole. Lastly, we proposed that smart card based subway passenger pattern model established through this study used in decision making process to ensure effective implementation of public transport policy.

Keyword : Smart Card(SC), Subway Crowding, Railway Crowding, Subway Network, Passenger Behavior Model, Early Bird Fare Policy

Submitted : September 18, 2019

1st Revision : December 2, 2019

Accepted : March 5, 2020

* 본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업(TLRP)의 연구비지원(19TLRP-B148684-02-000000)에 의해 수행되었음.

** 서울연구원 교통시스템연구실 연구원

*** 서울연구원 교통시스템연구실 연구위원, 교신저자

1. 서 론

서울시 지하철은 전체 600여 개 역사에서 하루 평균 약 800만 명이 이용하는 대중교통 수단이다. 이 중 출퇴근 첨두시간에 이용객이 집중됨에 따라 열차가 지연되어 혼잡은 가중된다. 지하철 혼잡에 따른 사회적 비용은 연간 약 7,247억 원 발생하고 있다. 이는 차내 혼잡비용 2,317억 원과 열차지연 혼잡비용 4,960억 원으로 추정된 수치이다(김승준, 2016). 지하철 운영기관 및 관련 지자체는 지하철 혼잡을 완화하기 위해 역사 내 통로, 계단, 에스컬레이터와 같은 물리적인 시설을 보완하고, 특정 시간대 역사에 집중되는 수요를 억제하여 승강장 혼잡을 관리한다.

그러나 물리적인 시설 확충이 예산 대비 효과가 크지 않아 첨두시 집중되는 수요를 효율적으로 분산하는 방안이 요구되는 실정이다. 수요분산 정책의 대표적 사례로서 수도권 대중교통 조조할인제가 있다. 조조할인은 교통카드로 결제할 경우 매일 첫차부터 새벽 6시 30분까지 버스나 지하철 승차시 기본운임의 20% 할인을 받는다. 최근 기업문화 변화에 따른 기업체 유연근무제(Early Bird, 자율출퇴근, 재택근무 등)가 정착되고 있다. 유연근무제는 첨두시 수요분산 정책 중 하나이며, 첨두시에 집중되던 지하철 이용객을 비첨두시로 유인할 수 있는 제도이다. 현재 수도권 대중교통 실정을 감안하면 조조할인제와 유연근무제 중 Early Bird 조합이 적절한 교통정책의 예로 들 수 있다. 다시 말해 현재 시행하고 있는 조조할인제와 Early Bird가 통합되어 보편적으로 제도가 시행된다면 지하철 혼잡 완화에 긍정적인 효과를 나타낼 것이다.

따라서 본 연구에서는 Early Bird 정책에 따른 혼잡 완화 기대효과를 분석하기로 한다. 정책이 실행된다는 가정하에 2호선 강남 도심권역에 혼잡도가 가장 높은 구간을 선정하고, 첨두시 통행량이 감소될 경우를 대비한 지하철 승강장 혼잡도의 개선 효과를 분석한다. 분석 결과를 토대로 Early Bird 정책이 수요분산에 미치는 과급효과를 검토하고, 이 정책을 적극적으로 도입할 경우 지하철 승강장

혼잡도 완화에 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

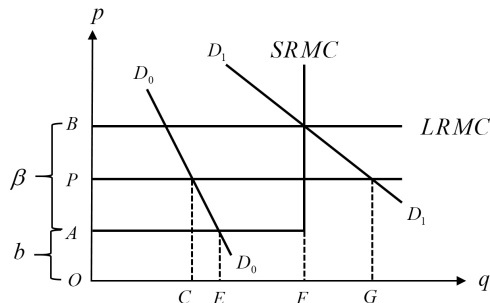
본 연구는 다음과 같은 과정으로 수행되었다. 제 2장에서는 관련 이론 및 선행연구를 검토하고 본 연구의 차별성을 제시한다. 제 3장에서는 국내·외 지하철 혼잡 완화 정책 사례를 검토하고 시사점을 도출한다. 제 4장에서는 지하철 혼잡도 모형을 구체화하고 분석방법론을 제시한다. 수도권 대중교통 카드 자료를 이용하여 혼잡도 분석 모형에 적용시켜 승강장 혼잡도를 도출한다. 제 5장은 지하철 혼잡 완화정책인 Early Bird 방안을 사례분석으로 수행한다. 마지막으로 제 6장은 연구 결론과 분석 모형의 향후 활용방안에 대해 논의한다.

2. 이론 및 선행연구

2.1 부하가격 요금제

차등요금제는 이부요금제, 가격차별, 부하가격 요금제 등이 있다. 이 중 부하가격 요금제는 대중교통요금, 전력, 전화 등과 같이 평균비용이 체감하고 수요변화에 따라 생산시설을 자유롭게 증감할 수 없는 산업에 있어 수요관리 차원에서 많이 이용되고 있다. 즉, 생산시설 용량을 초과하는 첨두시에 높은 가격을 설정하고 유휴시설이 존재하는 비첨두시에 낮은 가격을 설정함으로써 첨두시 수요를 비첨두시로 이동시켜 생산시설의 효율적 운영을 기하기 위한 제도이다.

[그림 1]을 통해 부하가격 결정이론을 살펴보면 D_p 와 D_o 는 각각 첨두시와 비첨두시의 수요곡선을 나타낸다. 비첨두시 요금 p_o 는 단기한계비용곡선(AE)에 일치하며, 첨두시 요금 p_p 는 장기한계비용곡선(AE+EF)에 일치한다. OA는 한계가변비용이고 AB는 한계고정비용이다. 이때 첨두시 요금은 장기한계비용 OB보다 크게 되고 비첨두요금은 A에 의해 결정된다. 즉, 비첨두시에는 유휴시설이 존재하므로 한계가변비용에서 가격이 결정되고 첨두시에는 수요증대로 초과시설이 필요하게 되므로 한계비용(=한계가변비용+한계고정비용)뿐 아니라 비첨두시의 고정비용도 충당된다.



[그림 1] 부가격 결정 이론

다시 말해 대중교통요금의 첨두시 가격탄력성과 비첨두시 가격탄력성이 다르다. 일반적으로 첨두시의 가격탄력성은 비첨두시의 가격탄력성보다 낮으므로 요금 및 가격에 대한 탄력성이 낮은 첨두시에 더 높은 가격을 설정하는 근거가 된다. Cervero (1981) 연구에서는 첨두시 대중교통 서비스가 비첨두시일 때 보다 100% 높은 비용을 발생시킨다. 이는 비첨두시 이용객의 요금수입으로 첨두시 이용객의 서비스를 확충 주는 교차보조의 의미를 가진다.

2.2 선행연구

지하철 혼잡 개선을 위한 다양한 연구가 지속되어 왔다. 주요 연구 내용은 공급과 수요측면으로 양분된다. 공급측면은 신호시스템 개발, 차량기술 향상, 효율적인 열차운행계획 개선 등이 있다(조성근, 정일봉, 2015; 김진수, 2016). 수요측면은 대체수단 도입, 탄력요금제 도입 등 정책 및 제도로 수요를 관리하여 혼잡도를 개선하는 연구로 분류된다. 특히 최근 들어 빅 데이터를 이용하여 지하철 혼잡도를 분석하고 정책의 효과와 개선방안을 제시 및 시행되고 있는 추세이다. 신성일과 안기정(2012)는 시간대를 고려한 변동요금제 시행을 위한 선결조건으로 사회적 수용성을 향상시키기 위한 정책과 병행할 수 있는 대안을 제시하였다. 서울시 대중교통수단에 변동요금제를 도입한다면 어떤 정책적 요소와 결합이 가능한지를 검토하였다.

엄진기 외(2014)는 승객 OD분석 통해 서울시 지하철 최대 혼잡구간인 2호선 외선구간(사당~삼성)

의 혼잡도 추정하고 통행 수요관리정책을 제시하였다. 삼성역 이전 목적지 승객과 삼성역 이후 목적지를 가진 승객의 수요를 분리 유도하기 위해 기존 순환선과 삼성역까지 운행하는 단절운행 열차를 혼합으로 운행하는 대안을 제안하였다. 이 연구는 2호선 일부구간의 혼잡도를 분석 연구로서 분석사례가 제한적이며, 단절운행열차의 도입으로 인해 순환선 승객의 대기시간 증대 및 통행시간 증가에 따른 불편함이 예상된다.

김근원 외(2016)는 서울시 공공데이터에서 제시한 1~4호선 혼잡도 자료와 승하인원, 사업체수, 유동인구와 군집분석을 통해 연관분석을 수행하였다. 분석 결과에서 혼잡도가 높은 구간에 급행버스 신설하는 방안을 제시하였다. 그러나 공공데이터에서 제공하는 혼잡도 자료는 서울교통공사가 홀수연도에 시행하는 계수 방법에 의존하고 있어 정확성이 결여되었다. 또한 공공데이터 외의 다양한 변수와 자료를 반영하지 못한 한계를 가지고 있다.

수요측면의 지하철 혼잡도 개선 연구는 교통수단 내 혼잡도만 국한되어 교통시설의 대기공간 혼잡도를 반영하지 못하였다. 즉, 정류장 및 승강장의 혼잡도를 반영한 연구가 필요한 것이다. 이호와 최진경(2015)는 지하철 승강장의 시간대별 혼잡도를 추정하는 알고리즘을 개발하였다. 알고리즘은 환승역 여부와 승강장 구조 등의 역사정보, 개별 승하차 자료, 이력 OD자료, 이력 환승자료를 바탕으로 방향별 누적승강장유입인원을 계산하고 역별 열차출발시간정보를 토대로 승강장 대기인원을 산정하였다. 그러나 혼잡도 분석에서 단일역사에 한정하였고 승하차 승객만 고려하고 환승 역사 내 환승 대기인원을 고려하지 못한 한계가 있다.

지금까지 지하철 혼잡도 분석 선행연구는 수도권 교통카드자료 전체를 분 단위별로 지하철 노선과 승강장 혼잡도를 추정한 연구는 없었다. 지하철의 경우 첨두시 배차간격이 2~3분임을 감안하면 배차간격보다 작은 분석단위로 지하철 승강장의 혼잡도를 분석할 필요성이 있다. 또한 환승역에서 환승승객 경로선택 알고리즘을 적용하여 열차와 승강장

혼잡도를 동시에 추정하는 연구가 필요하다.

따라서 본 연구는 선행연구와 다음과 같은 차별성이 있다. 첫째, 지하철 전체 승객의 시간대별 통행패적을 파악하여 집중 및 분산되는 수요를 1분 단위로 산정한다. 둘째, 지하철 승강장 수요를 역사환승통행 및 직승직하통행, 노선간 환승통행으로 구분하여 개별 역사의 승강장 혼잡도를 산정한다. 마지막으로 현재 침두시 지하철 이용객 분산 전략으로 Early Bird 정책이 정착되었을 경우를 가정하여 혼잡 완화 효과를 분석한다.

3. 지하철 혼잡 완화 정책

3.1 국내사례

본 연구에서는 지하철 혼잡도 개선방안을 도출하기 위해 국내·외 관련 정책을 검토하고 국내 실정에 적합한 지하철 혼잡도 개선방안을 도출하고자 한다. 개선방안으로는 승강장 관련 시설 개선, 열차운행 확대 및 계획변경, 대체수단 공급, 차등요금제 적용, 혼잡정보 제공 등이 있다.

지하철 승강장 관련 시설 개선 전략은 관련 시설을 물리적으로 개선하는 것이다. 강남역·시청역·서울역·교대역·신도림역 등의 경우 혼잡역사 중심으로 승강장 및 환승통로 폭을 확대하거나 출입구를 신설하였다. 회룡역·도봉산역·이문역·회기역 등 오래된 역사는 증개축하여 혼잡도를 완화시켰다. 부차적으로 승객의 접근성과 편리성을 향상시키는 이동시설을 확충하는 방안이 있다. 엘리베이터 설치가 곤란한 역 위주로 휠체어 리프트와 에스컬레이터 등 승강설비시설을 설치하여 승객의 접근성을 향상시키고 승객 분산에 기여하였다.

열차운행 확대 및 계획 변경 전략은 열차운행계획을 혼잡도에 맞춰 변경하는 것이다. 오이도역은 섬식 승강장으로서 승객의 환승 편의를 위해 열차운행 횟수가 적은 오전 10시부터 오후 5시까지 열차 운행계획과 도착선을 조정해 수인선과 4호선 열차를 동일 승강장에 정차하도록 한다. 그러나

그 외 시간대에는 수인선과 4호선 열차가 배정된 다른 승강장에 열차를 정차시킨다. 이는 승객이 육교를 통해 승강장을 이동해야하는 불편함이 있지만 승객의 혼잡을 미연에 방지할 수 있다. 또 다른 개선방안으로는 혼잡도 조사 및 모니터링을 통해 전동열차 객차와 운행횟수를 증편시키는 방안이 있다. 그러나 열차운행 횟수만 증편시키는 것이 능사는 아니다. 항상 제한된 예산 범위 안에서 정책을 수립해야하는 현실 상황에 비추어 봤을 때 보다 효율적인 정책이 필요한 것으로 판단된다.

대체수단 도입 전략은 지하철 혼잡을 분산시킬 수 있는 대체수단을 도입하는 것을 말한다. 9호선은 수도권 지하철 노선 중에서 혼잡도가 가장 높은 노선이다. 급행구간 출근시간대 혼잡도는 최고 215%에 달한다(신성일, 안기정, 2012). 서울시는 무료 급행순환버스 및 직행버스를 도입하여 지하철9호선 승객 수요를 분산시키고, 주요 혼잡 역사 중심으로 안전요원을 배치하는 등 승객의 불편과 혼잡도를 감소시키려는 정책을 추진하였다. 일례로 시내버스 노선 기초조사 결과를 바탕으로 혼잡도가 높은 버스노선과 지하철역 기반으로 노선을 매칭시켜 수요대응형버스를 도입하였다. 차내 혼잡이 극심한 출근시간대에 운행하는 출퇴근 맞춤형버스, 일명 ‘다람쥐버스’를 운행하였다. 그러나 이 같은 대체수단 투입에 따른 지하철 혼잡 완화 효과는 미미한 것으로 밝혀져 현재는 운행하지 않고 있다.

차등요금제는 침두시 수요와 비침두시 수요의 차이가 크게 발생할 때 침두시 수요를 비침두시로 유인하는 가격정책이다. 부과 방식은 침두시간대와 비침두시간대로 나누고 비침두시간대 승객에게는 할인 혜택을 주고 침두시간대 승객에게는 할증요금을 부과한다. 대중교통인 지하철 요금제는 침두시간대를 기준으로 기본요금을 책정하고 아침 비침두시간대에 요금을 할인해주는 정책을 시행하고 있다. 현재 지하철 요금은 승객에게 조조할인 혜택을 주는 방식을 채택하고 있다. 첫차부터 오전 6시 30분까지 대중교통 기본요금의 20%를 할인해주고 있다. 교통카드로 결제할 경우 지하철 기본요금은 1,250원인데, 250원을

할인받게 된다. 이 같은 할인제도가 교통수요관리 측면에서 수요분산 효과가 있는지에 대한 객관적인 연구 결과는 아직 없어 현행 차등요금정책의 유용성을 판단할 연구가 요구된다.

3.2 국외사례

국외 지하철 혼잡도 완화정책은 크게 세 가지 유형으로 분류된다. 첫째, 혼잡을 관리하는 요원을 배치하거나 관련 법률에 의거해 의무 배치하는 방안이 있다. 둘째, 승객 혼잡을 분산시키기 위해 역에 출입한 승객만 체크하거나 물리적으로 바리케이드를 설치하고 발권장소를 임시로 변경하여 승객을 인위적으로 분류하는 방안이 있다. 셋째, 지하철 요금제는 차등요금제를 적용한다. 첨두시 수요를 비첨두시로 유인하는 정책으로, 차등요금제는 주로 선진국 대도시들이 시행하고 있는 것이 특징이다.

〈표 1〉 국외 지하철 혼잡도 완화 정책

국가/도시	정책	내용
영국/런던	혼잡관리 요원배치	• 도크랜드 경전철은 혼잡 관리 및 승객 안전을 책임지는 요원을 배치
미국/ 버지니아	혼잡 관리요원 관련 법률 제정	• 혼잡한 역사뿐만 아니라 군중이 1,000명 이상 모인 곳이면 어디든 관리요원을 배치 • 관리요원들은 긴급상황 발생시 시민의 대피를 신속히 도와주는 것이 주요 임무
싱가포르 런던 밴쿠버 뉴욕	차등 요금제	• 해외 대도시 지하철 요금체계는 첨두와 비첨두 시간대를 구분하여 차등 요금을 적용시켜 혼잡수요를 분산 • 첨두시간대에는 기본요금을 유지하고 비첨두시간에는 할인 혜택을 부여

영국과 미국은 혼잡수요를 관리요원이 직접 관리한다. 과거에 우리나라에서도 시행했던 정책이었는데 현재는 일부 혼잡 역사에만 관리요원을 배치하고 있다. 싱가포르, 뉴욕, 런던 등 대도시의 첨두와 비첨두시간대로 구분하여 지하철 요금을 차

등 부과한다. 비첨두시 대중교통요금은 10~50% 할인해주거나 무료로 이용할 수 있게 한다. 이는 대중교통 이용이 적은 시간대를 대상으로 수요창출을 유도하며, 첨두시 대중교통의 혼잡을 완화시킬 수 있다.

첨두 및 비첨두시간대 적용시간은 각 도시마다 다르다. 우리나라 지하철 요금제는 새벽시간대 조조할인 혜택만 부여하고 있기 때문에 할인 적용시간대가 매우 짧아 첨두시 수요가 비첨두시 수요로 전환되는 효과가 미미하다. 엄밀히 말해 현재 조조할인은 차등요금제를 시행한다고 볼 수 없다. 따라서 수도권 혼잡수요의 특성을 파악하고 효율적으로 첨두시 수요를 비첨두시 수요로 전환할 수 있는 차등요금제 도입이 시급한 것으로 판단된다.

3.3 시사점

국내 및 국외 승강장 혼잡도 관리 정책을 비교 검토한 결과 세 가지 시사점을 도출하였다. 첫째, 승강장 내부 구조 변경을 통해 지하철 승강장 혼잡도를 경감시키는 물리적인 구조개선 정책이다. 승강장 물리적 면적은 혼잡도에 가장 직접적으로 영향을 미치는 변수로서 승강장 구조 개선은 지속적진행해야한다. 둘째, 첨두 수요분산 정책을 통해 승강장 혼잡도를 개선하는 정책이다. 수요분산 정책에서 가장 직접적인 방법으로는 차등요금제와 같은 요금 할인 정책이 있다. 조조할인제와 유연근무제(Early Bird, 자율출퇴근, 책임근무제 등)는 적극 확대한다면 출퇴근 첨두시간대 통행량을 경감시킬 수 있는 간접적인 수요분산 정책이다. 실제 국내외 다수의 기업에서 유연근무제가 시행 중인데, 기업체에서 보편적으로 시행된다면 지하철 혼잡 완화에 긍정적인 영향을 미칠 것이다. 또한 현재 이슈화되고 있는 무임승차 제도 개선을 통해 첨두시간 수요를 비첨두시간으로 분산시키거나 수요를 제거하는 전략을 추진해 지하철 혼잡도를 완화시킨다. 셋째, 수요 자체를 다른 수단으로 전가하여 혼잡을 완화시키는 대표적인 전략으로 수요대응형

버스 도입이 있다. 주요 정류장에 대한 교통 및 환경 여건을 상세한 검토 후 수요대응형 버스를 도입한다면 지하철 혼잡도 완화에 효과가 있을 것이다.

이 세 가지 혼잡도 개선 전략 중 현재 국내 여건을 고려하고 장래에 반영이 가능한 정책은 단언 침두시간 수요 분산정책이다. 그 이유는 물리적인 구조 개선의 경우 장시간 및 고비용이 소요되는 한계점이 존재한다. 수요를 타수단으로 전가시키는 정책이 유용할 수 있으나 수단 자체 내재된 장단점이 존재하고 이를 상호보완 시키는 정책은 현실적으로 어려움이 많이 따른다. 현실적으로 실행 가능성이 제일 높은 침두시간 수요 분산정책이 혼잡도 개선 전략으로 적절할 것으로 판단된다. 그러므로 본 연구에서는 침두시에 발생하는 통행량을 비침두시로 분산시키거나 침두시간 수요를 제거하여 침두 통행량을 감소시키는 방안으로 Early Bird(조조할 인제도)에 대한 효과를 분석하고자 한다.

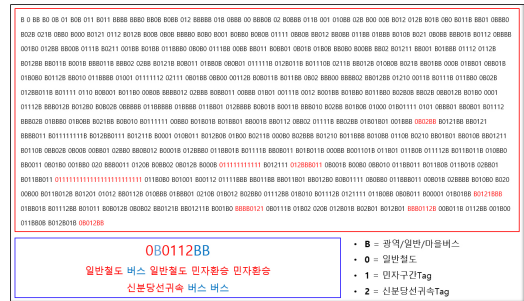
4. 지하철 혼잡도 분석 방법론

4.1 교통카드 자료 및 네트워크

2016년 서울 시내버스 기준 교통카드 이용객 비율은 98%이며, 지하철의 경우 이용객 100%가 교통카드를 이용했다. 수도권 통행 자료가 대부분 빅데이터로 저장되기 때문에 교통카드 자료는 전수 자료로서 가치가 있다. 그러므로 교통카드 자료를 활용한 대중교통 관련 분석 결과의 신뢰도는 높게 평가된다.

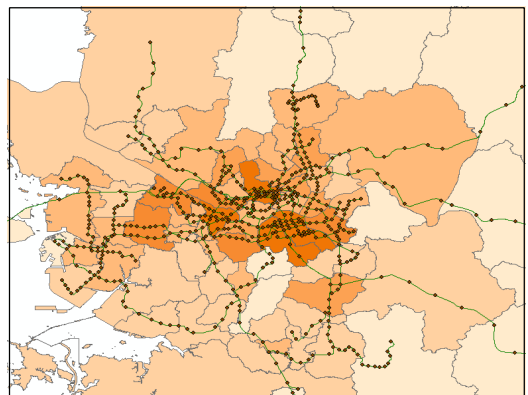
수도권 대중교통 이용객 통행은 하루 평균 약 2,000만 건이 발생하며, 이는 교통카드에 Trip-Chain 형식의 자료로 약 1,500만 건이 생성된다. 이는 선·후불 교통카드 자료가 92.9%로 대부분을 차지하고, 나머지 정기권과 일회권, 민자 환승자료가 각각 1.3%, 0.9%, 4.9%를 차지하고 있다. 실제 통행 OD가 기록되는 자료는 선·후불카드, 일회권, 정기권으로 3가지이며, 민자 환승자료는 환승태그 기록만 저장된다.

본 연구에서는 2016년 10월 17일 수도권 승객 1일 교통카드 자료를 활용하였다. 통행사슬은 9,089,620건이고 승하차 시간이 존재하지 않는 1회권은 제외시켜 8,947,636건(98.44%)에 대해 통행경로를 추정하였다.



[그림 2] 교통카드 자료 항목 및 구조

수도권 지하철 통행 분석을 위해 서울, 경기, 인천을 포함하는 2016년 10월 기준 수도권 물리적 네트워크를 구축하였다. 먼저 지하철 역사는 노드로 표지되고 교통카드단말기 번호와 역명 정보 등이 포함된 총 674개로 구성된다. 링크는 지하철 노선과 동일하게 연결시켰으며, 9호선 급행의 가상링크를 포함하여 총 1,332개로 구성하였다. 환승은 역사 내에서 발생하는 방향별 환승비용자료를 구축하였으며, 9호선 급행 포함 93개 역에서 환승이 나타나도록 구축하였다. 노선별 배차간격은 최근 건설된 경강선, 경전철 등의 자료도 적용하였다.



[그림 3] 수도권 지하철 네트워크

4.2 지하철 승객 통행모형

승객 통행배정모형은 승차역에서 하차역까지 최소 통행시간 경로를 선택하는 가정으로 구축하였다. 개별 승객들은 최소통행시간 경로를 선택하며, 지하철 혼잡도를 고려하면 목적함수를 식 (1)과 같이 구축할 수 있다. 여기서, r (출발지), s (도착지), p (선택경로)이며, t 시점에서 $\xi_p^{rs}(t)$ 는 일반화비용(통행시간), $f_p^{rs}(t)$ 는 경로를 선택할 확률, $q^s(t)$ 는 승객수이다.

$$\begin{aligned} \min \int_0^T \left\{ \sum_r \sum_s \sum_p \xi_p^{rs}(t) \cdot f_p^{rs}(t) \right\} dt \quad (1) \\ s.t. \\ q^s(t) = \sum_p f_p^{rs}(t) \quad \forall p, r, s, t \\ f_p^{rs}(t) \geq 0 \quad \forall p, r, s, t \end{aligned}$$

지하철 승강장 승객 산출모형을 구축할 때 승강장 통행속성은 승하차 및 환승 통행으로 구분되기 때문에 모형의 함수는 출발지, 노선 간 환승, 도착지로 3가지로 구분한다. 각 통행 속성 수식은 산출된 경로(p)에 특정 승강장(j)이 경로에 포함되는 모든 승객의 총합이 승강장 통행량을 의미하며, 분석단위는 분석단위는 1분이다. 지하철 승강장 동적 통행배정모형은 식 (2)와 같으며, $V_j(tt)$ 은 특정시점(tt) 승강장 대기승객, $\delta_{p,j}^{rs}(tt)$ 는 승강장 환승통행, $\delta_{p,j}^{js}(tt)$ 는 도착통행, $\delta_{p,j}^{rj}(tt)$ 는 승강장 출발통행이다. 여기서, t 시점이 tt 에 포함되면 1, 아니면 0이다.

$$\begin{aligned} V_j(tt) = \int_0^T \left\{ \sum_r \sum_s \sum_p f_p^{rs}(t) \cdot \delta_{p,j}^{rs}(tt) \right\} dt \quad (2) \\ + \int_0^T \left\{ \sum_r \sum_s \sum_p f_p^{rs}(t) \cdot \delta_{p,j}^{js}(tt) \right\} dt \\ + \int_0^T \left\{ \sum_r \sum_s \sum_p f_p^{rs}(t) \cdot \delta_{p,j}^{rj}(tt) \right\} dt \end{aligned}$$

4.3 지하철 승강장 혼잡도 분석모형

지하철 승강장 동적 혼잡도 추정 단계는 다음과 같은 3단계를 거친다. 첫째, 교통카드 자료를 기반으로 1분 단위 승객 통행량을 산출한다. 둘째, 승객 통행유형을 고려하여 승강장 통행량을 산정한다. 셋째,

승강장별 실용대기면적을 나누어 혼잡도를 추정한다.

교통카드 자료는 승하차시간이 저장되기 때문에 승객들의 이동 패턴을 고려하여 승강장 이동 및 대기 시간을 추정할 수 있다. 예를 들어 노선 승차 승객의 승차시간이 12시 정각이고, 이동 노선의 배차 간격이 2분이면 승객은 12시 정각에서 12시 2분까지 2분간 승강장에서 대기한다고 가정한다. 하차 통행도 비슷한 방식으로 승강장에서 대기 및 이동한다고 가정하였다. 환승통행의 경우 경로선택모형을 적용하여 분석 역사에서 노선 환승하는 시간을 유추하여 승강장 이동 및 대기 시간을 추정한다. 이러한 방식으로 1분 단위 통행량을 기반으로 하고, 승객 통행 종류를 고려한 승강장에서의 이동 및 대기 인원을 추정하였다. 마지막으로, 승강장에서의 승객 이동 패턴을 반영한 실용대기면적을 고려하여 실제 승강장의 동적 혼잡도는 식 (3)과 같이 추정한다.

$$\delta_j^s(t) = \frac{\sum_m \chi_{jm}^s(t)}{A_j^s} \cdot \alpha_j^s(t) \quad (3)$$

여기서, m : 통행유형별 승객수(인)

α_j^s : 조절변수(역사 및 승강장별 영향변수)

A_j^s : s역사 j승강장에서 실용대기면적(m^2)

χ_{jm}^s : s역사 j승강장에서 승객m(인)

δ_j^s : s역사 j승강장에서 승객혼잡도(인/ m^2)

이호 외(2016)는 승강장 공간을 다음과 같이 구분하였다. 첫째, 승강장 내의 구조물로 인해 승객이 활용하지 못하는 공간을 ‘활용 불가 공간’으로 설정하였다. 둘째, 승하차 문과 이격거리가 멀거나 승객의 활용도가 떨어지는 공간을 ‘승차 비선호 공간’으로 설정하였다. 셋째, 승객이 승차를 위해 대기하는 공간을 ‘실용대기 공간’으로 정의하였다. 본 연구에서는 이와 같이 세 가지 유형으로 승강장 공간을 분류하기로 한다.

지하철 승강장은 승하차 및 환승을 위해 승객이 대기하는 공간으로, 정확한 혼잡도 산정을 위해서는 대기공간에 대한 상세한 조사나 연구가 필요하다. 현장 분석 결과 승객의 혼잡시 비선호 면적을 침범하여

대기하거나, 승객이 이동하는 것으로 나타났다. 기존 연구에서는 이러한 부분을 이용 빈도가 균등분포를 따른다고 가정하여 비선호 면적의 50%를 혼잡상황에서의 승강장 실용대기면적으로 제시하고 있다. 승객 비선호 공간은 침두시간 혼잡 상황에서 변동이 있을 수 있는 여지는 있지만, 본 연구에서는 최대한 보수적으로 접근하여 승객의 비선호 공간에 대한 활용은 혼잡 상황에도 없다고 가정하였다. 즉, 승객의 비선호 공간은 활용 불가 공간처럼 고정된 영역으로 판단하여 승객의 대기나 소통에 영향을 미치지 않는다고 판단하였다. 결과적으로 본 연구에서는 전체 면적에

서 활용 불가 공간과 비선호 공간을 제외시키고 실제 승객이 활용하는 공간을 실용대기면적으로 설정하였다. 국내 승강장 서비스 수준은 도로용량편람(2013)와 지하철 정거장 환승·편의시설 설계 지침(2015)에 제시된 기준을 모두 준용하기로 한다.

4.4 분석모형 정확도 검증

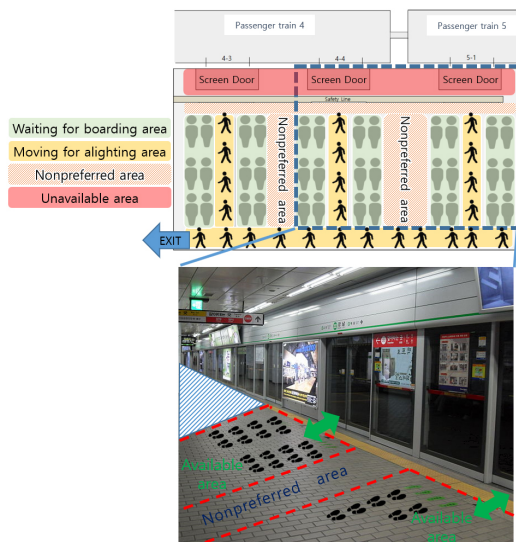
본 연구의 최적경로선택 모형을 검증하기 위해 민자환승 교통카드 자료를 활용하였다. 민자 환승 자료는 승객의 이동 집계 및 요금 정산을 위해 기록되며, 민자노선을 경유할 때 추가로 환승 태그 정보가 저장되기 때문에 승객의 통행 경로를 추정하는 데 검증 데이터로 활용 가능하다.

민자 환승자료에는 사용자 ID(카드 고유 ID), 트랜잭션, 환승게이트 역사 ID, 직전승차 역사 ID, 직전승차 역사 승차시간, 환승게이트 통과시간 순으로 나열되어 있다. 기존 승하차 승객의 통행 정보가 담긴 교통카드 자료를 활용하여 승객 최적 경로 선택 알고리즘(K-path)이 적용된 결과와 민자 환승자료상 승객 경로를 비교 검토하면 모형의 정확도를 추정할 수 있다.

검증 결과 민자 환승자료상 승객 경로가 첫 번째 최적 경로에서 탐지된 비율이 79.82%, 나머지 유사한 경로까지 탐지된 비율이 19.48%로 대부분(99.3%)이 탐지되었다. 최적 경로 선택 알고리즘의 경로 탐색 결과와 실제 사용자의 통행 경로가 대부분 일치하고 있어 모형이 현실을 충분히 묘사하고 있다고 판단된다. 다만 민자 환승자료는 일부 샘플자료이므로 보다 정확한 모형 검증을 위해 전수자료 검증이 필요할 것으로 사료된다.

〈표 3〉 민자 환승정보를 활용한 분석모형 검증 결과

구분	탐색경로	건수	비율(%)
탐색	최적경로(K[0])	162,689	79.82
	비최적경로(K[1]-K[9])	39,698	19.48
비탐색	-	1,434	0.7
총계	-	203,821	100



〔그림 4〕 지하철 승강장 실용면적 개념

〈표 2〉 국내 승강장 서비스 수준 설계 기준

서비스 수준 (LOS)	도로용량편람		지하철 정거장 환승편의시설 설계지침	
	점유공간 (㎡/인)	밀도 (인/㎡)	점유공간 (㎡/인)	밀도 (인/㎡)
A	≥ 1.0	≤ 1.1	≥ 1.3	≤ 0.8
B	≥ 0.8	≤ 1.6	≥ 1.0	≤ 1.0
C	≥ 0.6	≤ 2.0	≥ 0.7	≤ 1.4
D	≥ 0.4	≤ 2.5	≥ 0.3	≤ 3.3
E	≥ 0.2	≤ 5.0	≥ 0.2	≤ 5.0
F	< 0.2	> 5.0	< 0.2	> 5.0

4.5 지하철 승강장 혼잡도 분석 결과

수도권 지하철 역사 577개 중 신도림역은 통행량이 가장 많은 역사로서 1호선, 2호선 및 2호선 지선이 교차하는 역사이다. 동대문역사문화공원역은 2호선, 4호선, 5호선 등 3개 노선이 지나가는 역사이다. 신도림역의 경우 노선환승 목적 통행 비율이 61%이며, 노선승하차는 27%, 자체환승은 12%이다. 동대문역사문화공원역은 노선환승 통행 비율이 74%로, 전체 지하철 역사 통행량 상위 10개소 중 가장 높은 비율이다.

〈표 4〉 지하철 통행량 상위 10개 역사

역사명	전체 통행	노선 환승	자체 환승	노선 승하차
신도림	361,252	221,934	42,545	96,773
동대문역사문화공원	348,524	256,539	30,950	61,035
서울역	330,816	164,428	59,533	106,856
고속터미널	308,269	152,615	61,064	94,590
강남	305,794	74,370	8,332	223,093
잠실	294,733	116,668	7,604	170,461
사당	294,165	140,308	46,446	107,412
종로3가	245,154	126,982	53,122	65,050
교대	242,384	117,891	37,882	86,611
왕십리	221,199	135,868	53,744	31,587

지하철 역사 구조나 승객들의 통행 특성이 각기 다르기 때문에 사례 역사별로 승강장 혼잡도를 위한 전략이 필요하다. 승강장 혼잡도에 영향을 미치는 주요 변수는 통행량, 승강장 실용대기면적이며, 기타 노선 간 환승 거리 등도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 지하철 역사별 통행 특성을 고려하고, 구조 특성을 조사하여 승강장 혼잡도를 산정하였다. 혼잡도가 가장 높은 역사는 동대문역사문화공원(4호선 오이도행), 강남역(외선) 순으로 선정되었다. 강남 도심에 위치한 4개 역사 모두 출근 첨두시간에 승강장 혼잡도가 LOS E로서 개선이 필요하며, 잠실역의 경우 LOS D로 분석되었다.

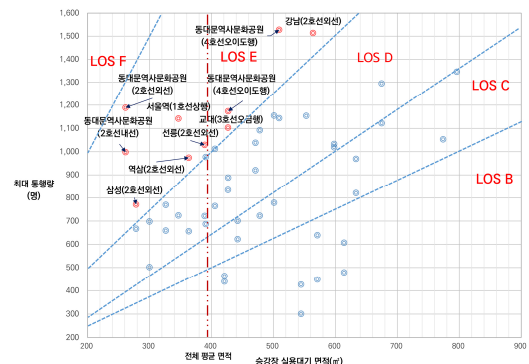
〈표 5〉 주요 환승역사의 강장 혼잡도 분석 결과

역사	호선	방향	실용면적 (m ²)	승객수	LOS
사당	2	내선	740	1,053	C
		외선	740	1,346	D
	4	당고개	471	1,038	D
		오이도	471	920	D
고속터미널	3	오금	633	969	C
		대화	633	821	C
	7	부평구청	571	448	A
		장암	571	639	B
	9	개화	486	577	D
		종합운동장	486	584	D
동대문역사문화공원	2	내선	261	998	E
		외선	261	1,189	E
	4	당고개	509	1,144	D
		오이도	509	1,528	E
	5	상일동	427	888	D
		방화	427	1,174	E

주 : 도로용량편람 기준으로 승강장 혼잡도 산정함.

〈표 6〉 2호선 주변 역사 승강장 혼잡도 분석 결과

역사	실용면적(m ²)	승객수	LOS
강남	564(외선)	1,514	E
역삼	363(외선)	974	E
선릉	390(외선)	1,029	E
삼성	278(외선)	771	E
잠실	675(내선)	1,295	D



[그림 5] 지하철 최대통행량과 승강장 혼잡도

5. 지하철 혼잡 완화 사례 분석

5.1 대안 설정

다양한 수요분산 정책이 원활하게 시행된다면, 첨두시간 승객이 비첨두시간으로 이동하여 승강장 혼잡도 완화를 기대할 수 있다. 실제로 수요분산 효과가 승강장 혼잡도에 어떻게 영향을 미치는지 검토하기 위해 혼잡 권역을 대상으로 사례분석을 시행한다.

분석대상 공간은 강남 도심권 내에 위치한 2호선 사당역에서 삼성역 구간으로 설정한다. 해당 구간은 통행량이 가장 많고, <표 6>의 분석결과에서 제시하는 바와 같이 혼잡도가 높은 구간으로 오래전부터 개선이 요구되었던 구간이다. 분석의 시간적 범위는 지하철 승객 통행량이 가장 많은 출근 첨두시간(08:00~09:00)으로 설정하여 해당 시간에 2호선 통행량 감소 효과를 추정한다.

대안 1의 경우 2호선 외선 구간 중 사당역~강남역 내 5개 역사의 출근 첨두시간 통행 수요 중 20%가 1시간 이전으로 이동할 경우의 변화 양상을 추적했다. 대안 2의 경우 대안 1과 유사하나 역사 범위를 사당역~삼성역으로 해 대상 역사를 8개로 확장하였다. 대안 3은 역사 범위는 대안 1과 동일하나 통행수요 변화를 20%에서 50%로 증가시킨다.

<표 7> 대안 설정 내용

구분	대안 1	대안 2	대안 3
공간 설정	사당-강남 외선 (5개 역사)	사당-삼성 외선 (8개 역사)	사당-강남 외선 (5개 역사)
시간 설정	08:00~09:00		
통행량 변화 (비율)	-20%	-20%	-50%

5.2 대안 분석 결과

강남역 외선 승강장에서 가장 혼잡한 시간은 8시 32분으로 파악되었다. 대안별 분석 결과 최대통행

량이 대안 1에서는 9.8%, 대안 2에서는 12.3%, 대안 3에서는 27.7%가 감소하였다. 승강장 서비스 수준도 기존 LOS E에서, 대안 2, 대안 3을 적용한 결과 LOS D로 낮아져 혼잡도가 완화되었다. 사당역 외선 승강장에서 가장 혼잡한 시간은 8시 19분으로 분석되었다. 대안별 분석 결과 최대통행량이 대안 1에서 4.7%, 대안 2에서 9.7%가 감소하였다.

<표 8> 강남역 대안별 분석 결과

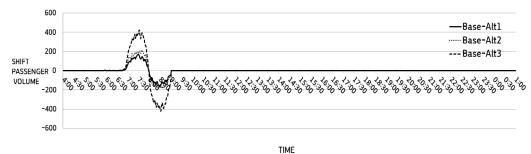
구분	대안 1	대안 2	대안 3
시간 (최대혼잡)	08:32		
통행량 감소(인)	1,521 → 1,372 (-149)	1,521 → 1,334 (-187)	1,521 → 1,099 (-422)
통행량 감소율	-9.8%	-12.3%	-27.7%

<표 9> 사당역 대안별 분석 결과

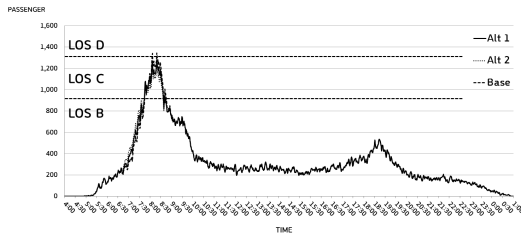
구분	대안 1	대안 2	대안 3
시간 (최대혼잡)	08:19		
통행량 감소(인)	1,343 → 1,280 (-63)	1,343 → 1,213 (-130)	1,521 → 1,099 (-422)
통행량 감소율	-4.7%	-9.7%	-27.7%



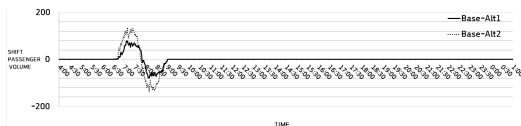
[그림 6] 강남역 승강장 대안별 혼잡도 분석 결과



[그림 7] 강남역 승강장 대안별 통행량 편차



[그림 8] 사당역 승강장 대안별 혼잡도 분석 결과



[그림 9] 사당역 승강장 대안별 통행량 편차

강남 도심 지역에 위치한 역사에 수요분산 정책을 실시할 경우, 영향권 내에 위치한 역사(신도림역, 잠실역)에도 간접적인 혼잡도 완화 효과가 있는지를 검토해 보았다. 신도림역은 지하철 역사 중 통행량이 가장 많은 역사로, 강서 지역과 부천, 인천 지역에서 강남 도심 방향으로 이동하기 위한 주요 환승역이다. 따라서 강남 도심에서 수요분산 정책을 실시할 경우 신도림 역사 통행량도 변화할 것으로 추정되며, 완화 효과를 검증하기 위해 신도림역 통행량 변화를 추적 하였다. 신도림역 외선방향은 8시 3분 비교적 이른 시간에 최대 혼잡도를 보이며, 대안 2에서 통행량이 최대 6% 감소하였다. 강남 도심 지역에 위치한 역사의 수요분산 정책이 12개 역사 떨어진 신도림역에도 영향을 미쳐 혼잡도가 감소하는 효과를 보였다.

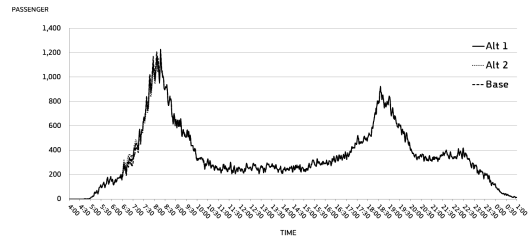
잠실역은 지하철 2호선과 8호선이 교차하는 환승역이다. 강동 지역 및 성남시, 광주시 등 서울 외곽 지역에서 강남 방향으로 이동하기 위한 주요 역사이다. 가장 혼잡한 시간은 8시 42분이며, 대안 2에서 통행량이 10% 감소하였다.

〈표 10〉 신도림역 대안별 분석 결과

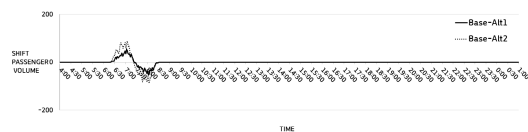
구분	대안 1	대안 2
시간(최대혼잡)	08:03	
통행량 감소 (인)	1,234 → 1,179 (-55)	1,343 → 1,160 (-74)
통행량 감소율	-4.4%	-6.0%

〈표 11〉 잠실역 대안별 분석 결과

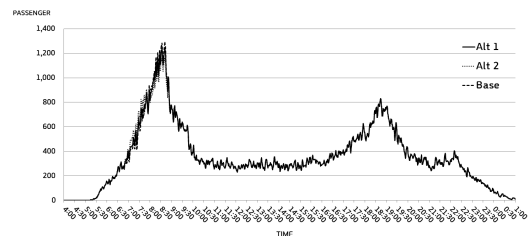
구분	대안 1	대안 2
시간(최대혼잡)	08:42	
통행량 감소 (인)	1,294 → 1,143 (-51)	1,294 → 1,164 (-130)
통행량 감소율	-3.9%	-10.0%



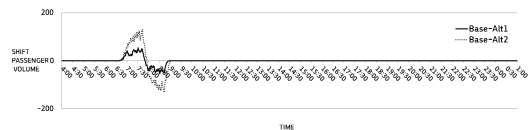
[그림 10] 신도림역 승강장 대안별 혼잡도 분석 결과



[그림 11] 신도림역 승강장 대안별 통행량 편차



[그림 12] 잠실역 승강장 대안별 혼잡도 분석 결과



[그림 13] 잠실역 승강장 대안별 통행량 편차

2호선 주요 혼잡구간에 대해 수요분산 효과를 대안별로 분석하였다. 결과적으로 수요분산 정책을 실행한 내부 권역에서는 노선 승하차 통행이 많이 발생하기 때문에 승강장 혼잡 개선 효과가 가장 높은 것으로 분석되었다. 여기서 더욱 주목할 점은 강남 도심 지역의 출근 수요가 분산될 경우 신도림역, 잠실역

같은 주요 거점 환승 역사에서도 승강장 혼잡도가 연쇄적으로 감소한다는 점이다. 이는 혼잡구간인 강남 도심으로 이동하는 승객의 수요분산 효과가 신도림역, 잠실역 등 주변 역사까지 영향을 미친다는 결론을 얻을 수 있었다.

6. 결론 및 향후 연구

본 연구는 AFC기반의 ICT와 관련된 빅데이터인 교통카드 자료를 토대로 수도권 지하철 승강장의 혼잡도를 산정하였다. 분석 모형은 승객의 흐름 파악하고 승강장에서 승객 통행행태에 따라 노선 승하차, 노선 환승, 자체 환승 통행으로 구분한 최적 유사경로 선택모형을 구축하였다. 승강장 혼잡도를 파악하기 위하여 기존에 제안된 실용대기면적 개념을 적용하여 역사별 승강장 승객 혼잡도를 산정하였다.

승강장 혼잡도 분석 결과, 강남역, 역삼역, 삼성역, 선릉역과 주요 환승 역사인 동대문역사문화공원역, 서울역 등에서 서비스 수준 E로 나타나 개선이 필요한 것으로 진단되었다. 혼잡도 개선효과 분석을 위해 도심권에서 가장 혼잡한 구간 중 하나인 2호선 사당역~삼성역 구간을 사례분석 구간으로 설정하였다. 사례분석 결과, 강남역의 경우 외선 승강장에서 혼잡도 서비스 수준이 LOS E에서 D로 개선되었으며, 통행량은 최대혼잡시간 기준 11.2%가 감소되었다. 사당역은 LOS D에서 C로 개선되었으며, 통행량은 최대혼잡시간 기준 9.7%가 감소되었다. 또한 주변 혼잡역사(신도림역, 잠실역)에서도 간접적인 혼잡도 완화 효과가 나타났다. 신도림역 승객 통행량은 최대혼잡시간 기준 6.0% 감소하였고, 잠실역의 경우 10% 감소하였다. 그러므로 Early Bird 정책을 포함한 수요분산정책을 적극적으로 도입할 경우 승강장 혼잡도 완화에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구의 분석 결과를 종합해보면 하차 통행이 우세한 역사에서는 승객의 이동 경로가 명확하기 때문에 수요 분산이나 대체수단 도입을 통해 승객

을 분산시켜 승강장 혼잡도를 완화시키는 방안이 효과적이다. 반면 환승 통행 비율이 높은 역사에서는 해당 역사의 기종점이 결정되지 않고 이동 방향성이 불확실한 통행이 지배적이기 때문에 수요 분산 정책이나 대체수단 도입 등을 통한 혼잡 완화 방안은 효율성이 떨어질 수밖에 없다. 이 같은 역사는 승강장 구조개선 전략을 통해 시설 구조용량을 확장하는 방안이 타당할 것으로 판단된다. 환승 통행의 비율이 높은 동대문역사문화공원역사의 경우 2호선 승강장은 수도권 지하철 역사 전체와 비교했을 때 승강장 면적이 매우 협소한 역 중 하나이다. 동시에 고속터미널역, 사당역은 통행량에 비해 승강장 면적이 매우 협소하다. 또한 서울역, 동대문역사문화공원역, 종로3가역은 노선 간 환승 거리가 길어 역사의 승강장 혼잡을 가중시키는 것으로 나타났다. 따라서 환승통행비율이 높은 역사의 혼잡도를 개선하기 위해서는 승강장 구조면적을 확장하고, 동시에 기타 환승시설에 대한 개선사업이 병행되어야 한다. 향후 연구에서는 지하철 혼잡도를 보다 정확히 산정하기 위해 열차운행스케줄, 날씨, 가변수요 등 다양한 변수를 반영한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 국토교통부, “지하철 정거장 및 환승편의시설설계지침”, 2015.
- 국토교통부, “도로용량편람”, 2013.
- 김근원, 김동우, 노규성, 이주연, “지하철 혼잡도 개선방안에 관한 빅데이터융합 기반의 탐색적 연구”, *디지털융복합연구*, 제13권, 제2호, 2015, 35-42.
- 김승준, “서울시 지하철의 혼잡비용 산정과 정책적 활용방안”, 서울연구원 정책리포트 208, 2016.
- 김진수, “빅데이터 분석을 이용한 지하철 혼잡도 예측 및 추천시스템”, *디지털융복합연구*, 제14권, 제11호, 2016, 289-295.
- 엄진기, 송지영, 이광섭, “2호선 혼잡구간 OD수요 분리

- 유도를 통한 혼잡도 개선 방안(교통카드 빅데이터 분석을 중심으로)”, *한국철도학회지*, 제17권, 제6호, 2014, 457-465.
- 이 호, 최진경, “대중교통카드 자료를 활용한 지하철 승강장 혼잡도 추정 알고리즘 개발”, *한국철도학회지*, 제18권, 제3호, 2015, 270-277.
- 이 호, 장기백, 유봉석, “지하철 역사 승강장 실용대 기공간면적 산정 연구”, *교통연구*, 제23권, 제4호, 2016, 61-71.
- 신성일, 안기정, “서울시 교통부문 변동요금제 도입 방안 연구”, 서울연구원, 2012.
- 조성근, 정일봉, “서울지하철 2호선 열차 지연 및 혼잡 해소방안 연구”, *서울도시연구*, 제16권, 제1호, 2015, 123-135.
- Cervero, R., “Flat Versus Differentiated Transit Pricing : What’s a Fair Fare?”, *Transportation*, Vol.10, 1981, 211-232.
- <http://www.lta.gov.sg>(Land Transport Authority of Singapore).
- <http://www.mta.info>(Metropolitan Transportation Authority).
- <http://www.tfl.gov.uk>(Transport for London).
- <http://www.traffiq.de>(RMV Frankfurt).
- <http://www.translink.ca>(Metro Vancouver).
- <http://www.wmata.com>(Washington Metropolitan Area Transit Authority).

◆ About the Authors ◆



이 상 준 (sangjun115@gmail.com)

현재 서울대 환경대학원 환경계획학과 박사과정에 재학 중이며, 서울연구원 교통시스템연구실에서 연구원으로 재직하고 있다. 주요 관심분야는 Big Data 및 Business Analytic, 교통계획 및 정책, ITS(Intelligent Transportation System), Smart Card 이용행태 등 이다.



신 성 일 (si@si.re.kr)

현재 서울연구원 교통시스템연구실 연구위원으로 재직하고 있다. 미국 University of Wisconsin at Madison에서 교통공학 박사학위를 취득하였다(2001). 주요 관심분야는 첨단교통체계(Intelligent Transportation System), ICT기반의 Big Data 분석 및 활용 등 이다. 최근 수도권 통합대중교통체계의 Smart Card 이용행태와 관련하여 중점적으로 연구하고 있다.