2019

서울시 도시철도 통합모빌리티 상시분석체계 구축방안

Proposing Seoul Metro Mobility Analysis System

서울연구원 | 서울교통공사

SeTTA Seoul Think Tank Alliance

서울연구원
The Seoul Institute

서울시 도시철도 통합모빌리티 상시분석체계 구축방안

연구책임

신성일 서울연구원 교통시스템연구실 연구위원
이창훈 서울교통공사 전문위원

연구진

박세현 서울연구원 교통시스템연구실 연구원

서울연구원
The Seoul Institute

이 보고서의 내용은 연구진의 견해로서
서울특별시의 정책과는 다를 수도 있습니다.

상시분석체계 구축을 통해 서울시 도시철도 운영체계 및 서비스 수준 제고해야

도시철도 모빌리티 파악 어려워 운영 및 서비스 개선 정체

서울시 대중교통 교통카드 결제율은 99%로써, 교통카드 데이터는 전수에 가까워 승객 이동행태를 파악하는 데 유용하게 활용된다. 그러나 교통카드 데이터의 활용도는 수단에 따라 차이를 보이고 있다. 버스의 경우, 차량 승차, 환승, 하차 시 태그하기 때문에 모든 이동이 파악 가능하고, 버스 차량의 규모 특성상 태그 자료를 통한 혼잡도 수준도 추정이 가능하다. 서울시는 교통카드 데이터를 활용하여 버스 혼잡도 정보 제공, 심야버스 노선 발굴 등 버스 서비스 개선에 힘써왔다. 반면, 도시철도 데이터는 역사 내 개찰구의 태그 데이터만으로 승객의 모든 이동정보를 파악할 수 없다. 도시철도의 승차 역사 태그와 하차 역사 태그 간 승객의 다양한 이동이 발생한다. 규모상으로 서울시 도시철도 역사의 평균 면적(8,672m^2)은 버스 승강장 규격(11m^2) 대비 800배 이상에 달한다. 이처럼 도시철도 모빌리티는 대규모 도시철도 인프라에서의 이동, 승강장 대기, 환승 이동 등 다양한 행태에 대한 파악이 필요하다. 도시철도 모빌리티를 보다 정밀하게 파악할 수 있는 상시분석체계를 구축하여 도시철도 운영 및 서비스 개선에 큰 전환점이 될 수 있는 계기를 마련해야 한다.

기존 연구 다수 있으나 적용 범위와 기능이 협소

런던교통공사(TfL, Transport for London)는 와이파이 접속 데이터를 통해 도시철도 승객 모빌리티를 추정하는 시범사업을 추진하였다. 이를 통해 승객의 역사 내 이동과 역간 이동을 파악하였으며 시간 단위의 역사, 승강장, 대기공간, 열차 내의 혼잡도를 추정하였다. 런던시가 와이파이 접속 데이터를 적극적으로 활용할 수 있었던 이유는 Tube 역사 및 열차에서 통신 연결이 원활하지 않기 때문에 대부분의 승객이 와이파이를 이용

했기 때문이다. 서울시도 와이파이가 설치되어 있으나 이용률이 런던에 비해 현저히 낮아 활용성에 한계가 있다. 따라서 서울시는 카드 데이터에 의존하여 환승행태와 역사 내 이동행태를 추정해야 하며, 런던의 활용사례를 벤치마킹하여 향후 데이터 수집 및 분석체계 고도화 전략을 수립해야 한다.

기존 다수의 연구들이 국내 교통카드 데이터를 활용하여 도시철도 모빌리티를 추정하고자 노력했다. 특히, 승강장 혼잡도와 환승 통행 추정을 주제로 하여 연구가 수행되었으나, 일부 노선에 한정되거나 특정 기능에 치중되었다. 상시분석체계 구축을 위해서는 네트워크 전체의 범위에서 적용될 수 있는 모형을 개발해야 한다.

역사 및 노선 모빌리티 추정 모형 개발 및 시스템 고도화 계획 필요

도시철도 모빌리티는 출발 역사 내 통행, 출발 역사와 환승 역사 간 열차 통행, 환승 역사 내 통행, 환승 역사와 도착 역사 간 열차 통행, 도착 역사 내 통행으로 구성된다. 이는 크게 역사 모빌리티와 네트워크 모빌리티로 구분할 수 있다. 역사 내 모빌리티는 동적 통행배정모형을 통해 역사 내 승강장 혼잡도를 추정할 수 있다. 노선 모빌리티는 교통카드 데이터와 열차스케줄 데이터를 결합하여 경로선택모형을 구축하여 추정할 수 있다. 이를 통해 도시철도 네트워크의 Selected Station/Line Analysis 시스템을 도입하여 특정 역사 및 노선에서의 승객 모빌리티를 포착할 수 있다.

보다 정밀하고 정확한 분석체계를 위해 열차 및 역사 공간들에 각종 혼잡도 측정 시스템을 구축할 수 있다. 또한, 과거 통행패턴 및 실시간 통행패턴을 분석할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 통해 운영체계 및 서비스 개선에 활용할 수 있다. 우선, 현재 활용할 수 있는 데이터를 기반으로 상시분석체계를 구축하고, 분석의 공백이 발생하는 부분에 대한 데이터 수집·분석 체계를 설계하면 보다 효율적이고 효과적인 계획을 수립할 수 있다.

모빌리티 분석 및 예측을 통해 운영체계 및 서비스 개선 기대

상시분석체계를 통해 도시철도 모빌리티에 대한 정보의 공백이 채워지면, 대중교통 통합 모빌리티 데이터를 축적하여 다양한 활용성이 기대된다. 첫 번째, 외부요인에 따른 모빌리티 변화의 패턴 발굴 및 대응책 마련이 가능하다. 대표적으로 기상조건에 따른 대중교통 통행패턴의 변화를 과거 데이터를 기반으로 분석하여 향후 같은 조건하에서의 패턴을 예측하고 대응을 마련할 수 있다. 두 번째, 이벤트 발생에 따른 시뮬레이션 및 상시대

응책 마련이 가능하다. 대중교통에서 발생할 수 있는 다양한 이벤트 상황을 시뮬레이션 상에 가정하여 대중교통 네트워크의 취약점을 찾아낼 수 있다. 세 번째, 제도적·정책적 변화에 따른 도시철도 운영환경을 진단할 수 있다. 수도권 통합환승요금제 및 이에 따른 정산체계는 관련 기관 간 민감한 문제이다. 현 제도의 문제점 인식에 따른 개선안을 제시하고자 할 때, 상시분석체계를 활용하여 객관적이고 정량적인 근거 제시가 가능하다. 네 번째, 새로운 서비스 도입에 따른 모빌리티 변화를 예측하고 최적의 대안을 도출할 수 있다. 도시철도 서비스 개선을 위해 급행화와 같이 획기적인 계획이 제안되고 있으나, 시행에 따른 파급효과를 정밀하고 정확하게 진단할 필요가 있다. 상시분석체계를 통해 새로운 서비스의 파급효과를 세부적으로 분석하고 그에 따른 대안을 마련할 수 있다.

서울연구원 The Seoul Institute

목차

01 연구개요 **2**

1_연구배경 및 목적 2

2_연구내용 및 방법 4

02 관련 사례 및 연구 검토 **6**

1_도시철도 이용행태 분석 및 적용 사례 6

2_국내 도시철도 모빌리티 분석 연구 18

03 상시분석체계 구축 및 활용 방안 **26**

1_도시철도 모빌리티 특성 26

2_상시분석체계 구축 방안 28

3_상시분석체계 활용 방안 40

4_결론 46

참고문헌 **47**

Abstract **48**

서울연구원 The Seoul Institute

표 목차

[표 1-1] 서울시 수단분담률(2017년) 2
[표 1-2] 서울시 대중교통 수단분담률(2016년) 3
[표 2-1] 승강장 내 승객 통행 구분 18
[표 2-2] 고속터미널역 승강장 면적 및 혼잡도 19
[표 3-1] 소유기관별 교통카드데이터 장점 26
[표 3-2] 교통카드 데이터 구조 예시 27
[표 3-3] 승강장에서 통행 속성 28
[표 3-4] 동적 통행배정모형(노선 통행량) 30
[표 3-5] 특정 승강장 통과 수요 산출 모형(승강장 통행량) 31
[표 3-6] 열차스케줄을 반영한 동적 통행배정모형 개념도 32
[표 3-7] 운행 중인 급행서비스 43

서울연구원 The Seoul Institute

그림 목차

[그림 2-1] 시범사업 대상 역사 7
[그림 2-2] 와이파이 접속 데이터 구성 8
[그림 2-3] Oxford Circus역의 시간대별 혼잡도 9
[그림 2-4] 기존에 제공되는 도시철도 정보 10
[그림 2-5] 추가 제공되는 도시철도 정보 11
[그림 2-6] 첨두 시간대 열차 혼잡도 정보 12
[그림 2-7] 환승 이동 행태 정보 13
[그림 2-8] 열차 지연으로 인한 승객 이동 행태 14
[그림 2-9] 역사 내 혼잡 정보 15
[그림 2-10] 동일 출발역-도착역 간 이동의 다양한 환승 노선 16
[그림 2-11] 고속터미널역 통행 세부 현황 18
[그림 2-12] 고속터미널역 9호선 승강장별 통행량 시계열 19
[그림 2-13] 최대 통행량과 실용대기 면적에 따른 승강장 혼잡도 19
[그림 2-14] 역삼역 승강장 대기인원 추정 결과 20
[그림 2-15] 강남역 플랫폼-게이트 이동시간 분포 21
[그림 2-16] 신림역-강남역 이동 승객 분포 21
[그림 2-17] 신림역-가락시장역 통행 추적 22
[그림 2-18] 가양역-여의도역 급행·완행 통행 조합 23
[그림 2-19] 역사환승량 산정 절차 23
[그림 2-20] 교대역 역사 내 보행 유형별 구분 24
[그림 3-1] 도시철도 모빌리티 구성 27
[그림 3-2] 상대식 승강장에서 통행 흐름 29

서울연구원 The Seoul Institute

[그림 3-3] 섬식 승강장에서 통행 흐름 29
[그림 3-4] Rolling Horizon 방법론의 개념 33
[그림 3-5] Selected Station/Line Analysis의 개념 33
[그림 3-6] 2호선 신정네거리역 승강장 혼잡도 측정 장치 설치 위치 및 감지선 34
[그림 3-7] 객실 혼잡도 시스템 검증을 위한 승객 수 측정 34
[그림 3-8] 혼잡도 모니터링 레이더 시스템 35
[그림 3-9] IR-UWB 혼잡도 측정 알고리즘 순서도 35
[그림 3-10] 강남역 환승통로에 설치된 혼잡도 측정 센서 35
[그림 3-11] 2호선 신정네거리역 혼잡도 측정 센서 36
[그림 3-12] 승강장 행선안내게시기 열차 및 객실 혼잡도 표출 36
[그림 3-13] 대합실 행선안내게시기 승강장 혼잡도 표출 36
[그림 3-14] 게이트 제어시스템 알고리즘 37
[그림 3-15] 혼잡도 측정·제어·정보 제공 시스템 38
[그림 3-16] 열차운행 스케줄 시뮬레이션 프로그램 38
[그림 3-17] 도시철도 상시 모니터링 체계 39
[그림 3-18] 상시분석체계 활용 방안 40
[그림 3-19] 기상조건에 따른 도시철도 혼잡도 영향 분석 41
[그림 3-20] 스페인 마드리드 도시철도 링크 단절에 따른 파급효과 분석 42
[그림 3-21] 수도권통합요금제 운영현황 42
[그림 3-22] 수도권 급행열차 서비스 확대 계획 44
[그림 3-23] 6호선 급행화 추진에 따른 분석(안) 45
[그림 3-24] 디지털 트윈에서 상시분석체계의 역할 46

서울연구원 The Seoul Institute

01

연구개요

서울연구원
The Seoul Institute

1_연구배경 및 목적
2_연구내용 및 방법

01. 연구개요

1_연구배경 및 목적

서울시 대중교통 수단분담률은 2017년 기준 65.0%로써, 많은 서울시민들이 대중교통에 의존하고 있다. 이러한 대규모 이동에 대응하여 보다 효율적으로 대응하기 위해 대중교통 승객의 이동행태를 파악하는 것은 매우 중요하다.

[표 1-1] 서울시 수단분담률(2017년)

구분	총합	승용차	버스	지하철/철도	택시	기타
통행량 (천통행/일)	32,287	7,865	8,101	12,886	2,107	1,328
분담율 (%)	100	24.4	25.1	39.9	6.5	4.1

주) 단일수단 기준
출처: 서울특별시 교통정책과

서울연구원 The Seoul Institute

서울시 신교통카드시스템 구축사업을 통해 2014년 대중교통 교통카드 결제율 99%를 달성하였다. 대중교통 승객의 전수에 가까운 교통카드 데이터는 이후 승객 이동행태를 파악하는 데 유용하게 활용되기 시작하였다. 하지만 교통카드 데이터는 승객 이동의 모든 과정을 파악할 수 없다는 한계가 존재한다. 교통카드 데이터는 태그(교통카드를 단말기에 접촉시키는 행위)에 의한 시·공간 데이터로 구성된다. 버스의 경우, 차량 승차, 환승, 하차 시 태그하기 때문에 모든 이동이 파악 가능하다. 또한, 버스 차량 및 정류장의 규모 특성상 태그 자료를 통한 차량과 정류장 서비스 수준도 추정이 가능하다. 서울시는 교통카드 데이터를 활용하여 버스 혼잡도 정보 제공, 심야버스 노선 발굴 등 서비스 개

선에 힘써왔다. 하지만 도시철도의 경우, 역사 내 개찰구에 태그하기 때문에 승차역, 하차역을 제외한 정보를 파악할 수 없다. 승차 행위와 하차 행위 간 승객의 다양한 행위가 발생한다. 서울시 도시철도 역사의 평균 면적은 8,672m2으로, 버스 승강장 규격인 11m2 대비 800배 이상에 달한다. 이처럼 도시철도 모빌리티는 규모가 큰 도시철도 역사 내에서 이동, 승강장 대기, 환승 이동 등 다양한 이동행태가 발생하며, 이러한 모든 행태를 교통카드 데이터로 파악할 수 없다.

이렇듯 교통카드 데이터만으로 파악할 수 있는 이동행태는 버스만을 이용한 승객에 한정된다. 버스와 도시철도로 구성되어 있는 서울시 대중교통 체계 내에서 버스만을 이용한 통행은 대중교통 전체 통행 중 41.6%(2016년 기준)에 불과하다. 이는 나머지 60%에 가까운 승객의 통행은 완전히 파악되지 않고 있다는 뜻이다.

[표 1-2] 서울시 대중교통 수단분담률(2016년)

구분	합계	버스	지하철/철도	버스+지하철
통행량 (천통행/일)	11,965	4,979	4,667	2,318
분담률 (%)	100.0%	41.6%	39.0%	19.4%

주) 주수단 기준
출처: 국토교통부(2017), 전국 여객O/D 전수화 및 장래수요예측 공동사업(수도권)

서울연구원 The Seoul Institute

본 연구에서는 서울시 대중교통체계 내 승객의 이동과 관련된 모든 행태(승차, 대기, 환승, 하차 등)와 그와 관련된 이동성, 접근성, 안전성, 쾌적성 등을 '모빌리티'로 정의한다. 또한, 버스, 열차, 역사 등으로 이루어진 대규모 대중교통체계에서 나타나는 수단 간 연결성, 보행활동, 환승 등의 활동까지 포괄한 개념을 '통합모빌리티'로 정의한다. 본 연구는 도시철도 모빌리티 정보의 공백에 대한 추정과 통합모빌리티 분석을 위한 상시분석체계 구축 방안을 제안한다. 또한, 상시분석체계의 활용 방안과 시스템 고도화 방안을 제시한다.

2_연구내용 및 방법

본 연구의 2장은 기존 도시철도 모빌리티 분석의 대표적인 사례로 런던 TfL의 와이파이 데이터를 활용한 사례를 살펴보고, 상시분석체계의 필요성과 활용성을 검토한다. 또한, 서울시 도시철도 모빌리티 분석은 교통카드 데이터를 기반으로 이루어지므로, 교통카드 데이터 기반 도시철도 승객 모빌리티 관련 기존 연구를 검토한다. 3장은 서울시 도시철도 모빌리티의 특성과 활용 가능한 데이터를 검토를 시작으로, 상시분석체계 구축 및 고도화 방안을 제시한다. 마지막으로 상시분석체계를 활용하여 통합모빌리티를 개선시킬 수 있는 분야를 검토한다.

서울연구원 The Seoul Institute

02

관련 사례 및 연구 검토

서울연구원
The Seoul Institute

1_도시철도 이용행태 분석 및 적용 사례
2_국내 도시철도 모빌리티 분석 연구

02. 관련 사례 및 연구 검토

1_도시철도 이용행태 분석 및 적용 사례

1) 런던, 영국

(1) 사업 개요

런던교통공사(이하 TfL, Transport for London)는 런던의 도시철도인 Tube를 운영하는 기관이다. TfL은 서비스 및 운영 개선을 위해 티켓 데이터를 기반으로 승객 이동행태 분석을 시도해왔다. 이를 통해 노선 경로 추정은 가능하였으나 역사 내 경로 추정에 한계가 있었다. 이로 인해 역사 내 경로 추정을 위한 목측 조사를 수행하였으나, 이는 비용 대비 결과의 정확도가 떨어졌다.

2016년, TfL은 와이파이 접속 데이터를 활용하여 54개 역사를 대상으로 승객 이동행태 추정을 위한 시범사업을 추진하였다. 45%의 Tube 노선은 지하 깊은 터널에 건설되어 통신 연결이 원활하지 않다. 이에 따라 2012년 TfL은 와이파이를 설치하기 시작했으며, 그 결과 현재 97%의 역사에서 와이파이를 사용할 수 있게 되었다. 대부분의 Tube 승객이 와이파이 서비스를 사용하게 되었으며 데이터를 활용하여 전수에 가까운 승객 이동행태 분석이 가능하게 되었다. 시범사업 기간 4주 동안 총 500만 건의 와이파이 연결 데이터를 수집할 수 있었다. 와이파이 데이터를 통해 역사 내 승객 이동 패턴을 파악할 수 있었으며, 역사의 혼잡 공간 파악 또한 가능하였다.

[그림 2-1] 시범사업 대상 역사

출처: TfL(2017)

TfL은 본 시범사업을 통해 4가지의 활용성을 검토하였다. 첫 번째, 와이파이 연결 정보를 통해 승객의 이동 계획과 혼잡정보 제공이 가능한지 검토하였다. 두 번째, 승객 이동 행태를 파악함으로써 운영을 효율화하고 긴급 상황에 대응할 수 있는지 검토하였다. 세 번째, 승객 이동행태 파악을 통해 배차시간 및 역사 설계 등을 보다 효과적으로 계획할 수 있는지 검토하였다. 네 번째, 승객 이동행태 결과를 통해 서비스 평가가 가능한지 검토하였다.

(2) 수집 데이터 및 가공 과정

모바일 기기가 Tube에 설치된 와이파이 네트워크에 접속을 요청하면서 매체접근제어(이하 MAC, Media Access Control) 주소가 검지된다. 와이파이 접속 지점을 기반으로 해당 MAC 주소에 대한 공간정보가 생성된다.

Hashed MAC address	Date	Time	Access point
xIJx7F893lL4jO	01/12/2016	07:12:22	London Bridge 01
xIJx7F893lL4jO	01/12/2016	07:13:22	London Bridge 15
xIJx7F893lL4jO	01/12/2016	07:14:06	London Bridge 10
xIJx7F893lL4jO	01/12/2016	07:17:04	Bank 10
xIJx7F893lL4jO	01/12/2016	07:17:26	Bank 30
xIJx7F893lL4jO	01/12/2016	07:20:26	Old Street 06
xIJx7F893lL4jO	01/12/2016	07:20:50	Old Street 02
xIJx7F893lL4jO	01/12/2016	07:22:52	Angel 06
xIJx7F893lL4jO	01/12/2016	07:25:18	King's Cross St. Pancras 22
xIJx7F893lL4jO	01/12/2016	07:26:01	King's Cross St. Pancras 18
xIJx7F893lL4jO	01/12/2016	07:27:43	Euston 14
xIJx7F893lL4jO	01/12/2016	07:30:19	Camden 06
xIJx7F893lL4jO	01/12/2016	07:32:48	Chalk Farm 02
xIJx7F893lL4jO	01/12/2016	07:33:08	Chalk Farm 04
xIJx7F893lL4jO	01/12/2016	07:34:47	Belsize Park 04

[그림 2-2] 와이파이 접속 데이터 구성

출처: TfL(2017)

TfL은 수집된 와이파이 데이터를 빅데이터 기술을 통해 통행 형태로 구축하였다. 시범사업에서 생성된 500만대의 모바일 기기 데이터를 통해 4,200만 통행 데이터를 구축하였다. 구축된 통행 데이터를 출입, 통과, 환승, 탑승 총 4가지 행태로 구분하였다.

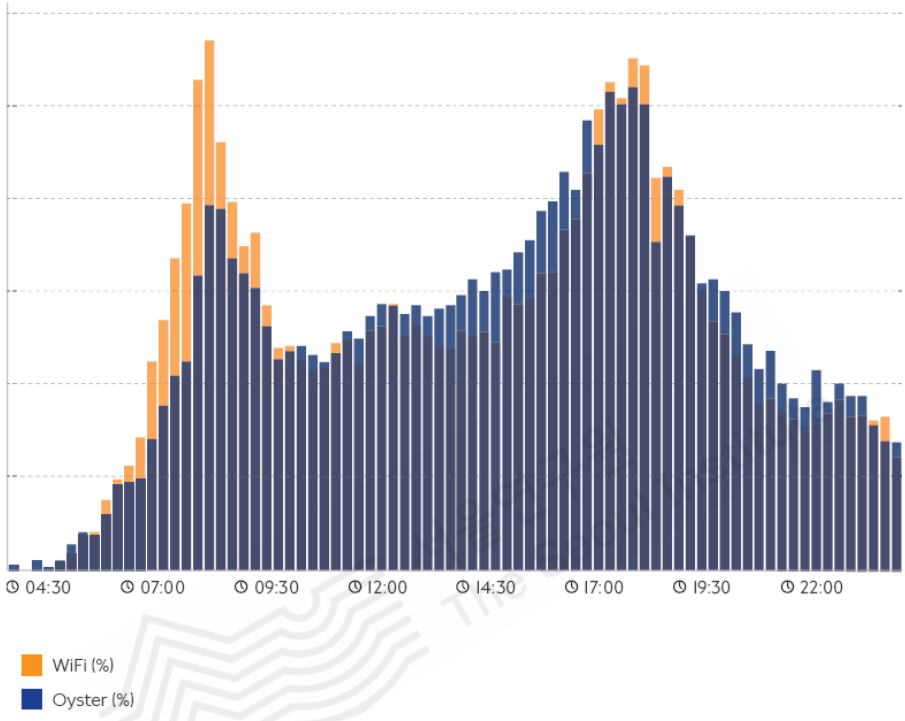
(3) 데이터 활용

와이파이 데이터를 통해 승객 통행에 대한 보다 정밀한 이해가 가능해졌다. 승객의 역사 내 이동과 역간 이동을 파악할 수 있으며 이를 통해 시간 단위의 역사, 승강장, 대기공간, 열차 내의 혼잡도를 추정하였다. 이를 기반으로 도시철도 내 모든 공간에 대한 시간 단위 정보를 승객에게 제공해줄 수 있다. 개별 도시철도역, 승강장, 열차의 가장 혼잡한 시간대를 파악할 수 있고 서로 다른 경로의 혼잡도 비교가 가능하며 문제가 발생했을 경우 개인의 이동에 어떠한 영향을 주는지 파악할 수 있다. TfL은 시범사업을 통해 ① 승객 정보 제공, ② 운영 및 안전성 강화, ③ 도시철도 개선 계획 지원, ④ 투자 우선순위 결정에 활용하였다.

① 승객 정보 제공

티켓 데이터는 역사 출입 여부만을 파악할 수 있지만 와이파이 데이터는 환승 여부 또한

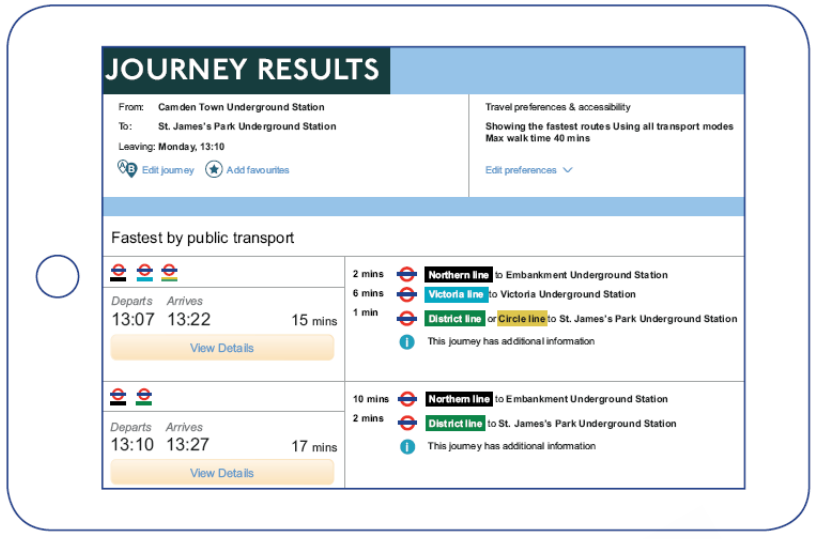
파악할 수 있다. 환승 여부는 큰 규모의 역사의 혼잡도를 파악하는 데 중요하다. [그림 2-8]은 Oxford Circus 역의 주중 수요를 티켓 데이터와 와이파이 데이터를 통해 나타낸 것이다. 주요 환승역인 Oxford Circus 역의 환승 수요를 반영한 데이터가 와이파이 데이터에 나타나는 것을 확인할 수 있다.



[그림 2-3] Oxford Circus역의 시간대별 혼잡도

출처: TfL(2017)

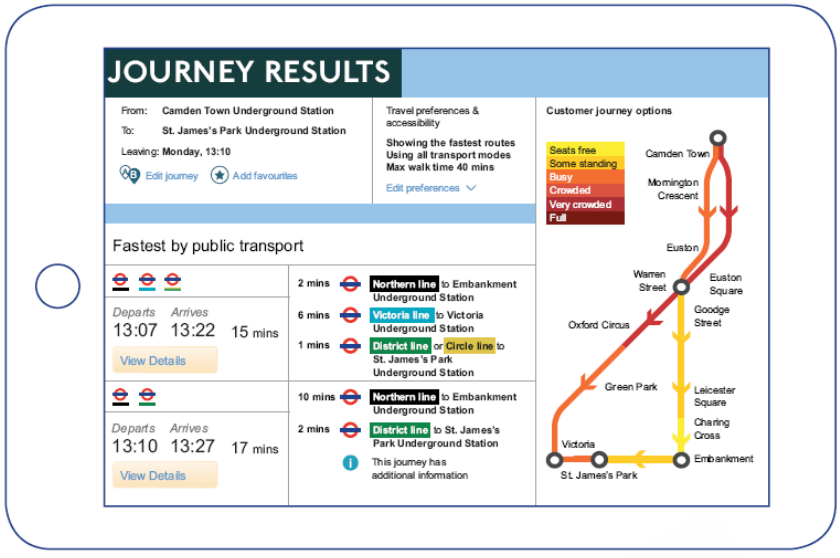
와이파이 데이터를 통해 같은 출발역-도착역에 대한 대안의 혼잡도 정보를 승객에게 제공할 수 있다. 와이파이 데이터와 열차 위치 데이터를 결합하여 혼잡도 정보를 생성한다. 기존에는 승객에게 [그림 2-4]와 같이 대안에 대한 예상 시간과 환승 횟수에 대한 정보를 제공하였다.



[그림 2-4] 기존에 제공되는 도시철도 정보

출처: TfL(2017)

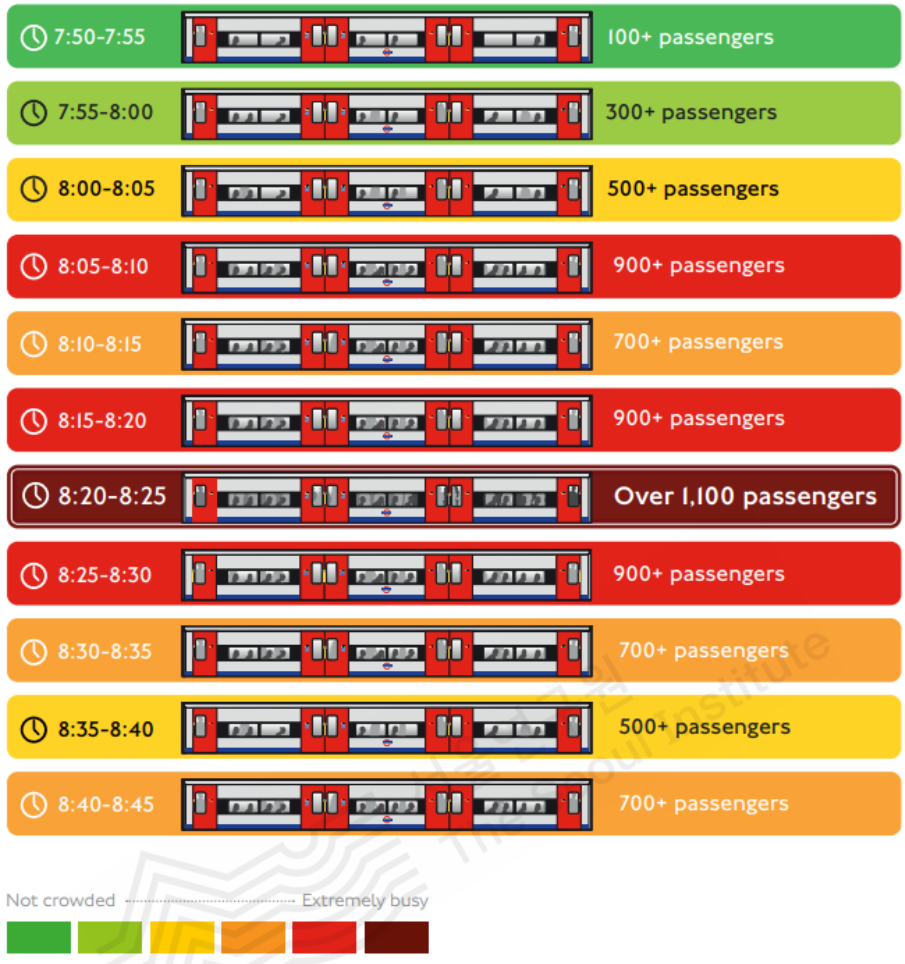
하지만 많은 승객들이 열차 및 환승역 혼잡 정보를 통해 환승 시 첫 번째 도착 열차의 탑승 가능 여부를 판단하고자 한다. 와이파이 데이터를 통해 분석된 데이터를 기반으로 승객에게 기존보다 상세한 정보 제공이 가능하다. [그림 2-5]과 같이 기존에는 최소 시간 정보만을 고려한 선택을 했다면, 혼잡 정보를 추가로 고려한 노선 선택이 가능하다.



[그림 2-5] 추가 제공되는 도시철도 정보

출처: TfL(2017)

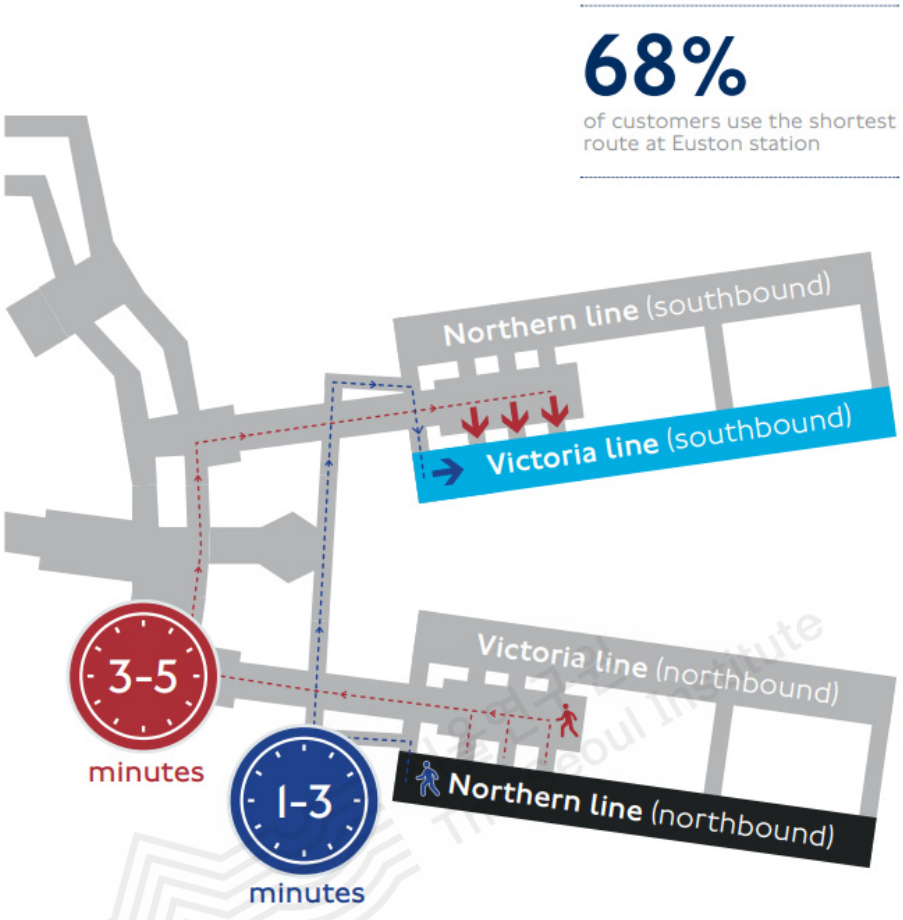
와이파이 데이터를 기반으로 노선 혼잡 정보뿐 아니라 각 열차에 대한 혼잡도 또한 추정할 수 있다. 첨두 시간대의 인접 열차는 하차 승객과 대기 승객에 의해 혼잡도 편차가 존재한다. [그림 2-6]에서와 같이 가장 혼잡한 열차는 8:20-8:25 열차로서 1,000명 이상의 승객이 탑승하였다. 반면, 인접한 열차인 8:15-8:20 열차와 8:25-8:30 열차는 약 10% 적은 승객이 탑승하였다. 열차 혼잡도 정보를 제공함에 따라 승객은 혼잡하지 않은 다음 열차 탑승을 선택할 수 있다. 이에 따라 자연스러운 수요 분산 효과를 기대할 수 있다.



[그림 2-6] 첨두 시간대 열차 혼잡도 정보

출처: TfL(2017)

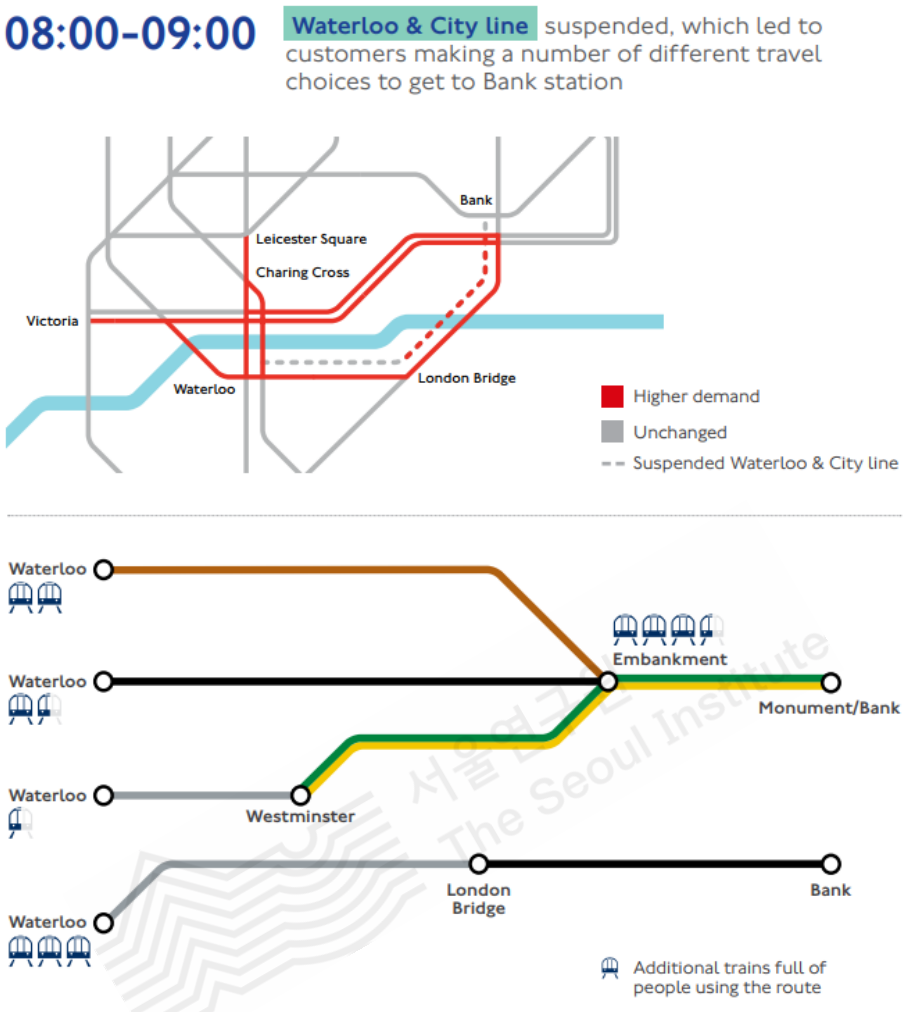
승객의 역사 이동 정보는 기존 카드 데이터로 추정이 어려웠다. TfL은 시범사업에서 와이파이 데이터를 활용하여 승객의 역사 이동 경로를 추정하였다. 이를 통해 환승 이동 행태를 파악할 수 있었다. Euston 역에서 Victoria 노선으로 환승 시, 3-5분이 소요되는 경로가 아닌 1-3분이 소요되는 가장 짧은 환승 경로를 이용하는 승객이 전체의 68%에 해당하였다. 이러한 환승 경로 정보를 통해 비주기적 통행자들은 시간과 혼잡도를 고려하여 환승 경로를 선택할 수 있다.



[그림 2-7] 환승 이동 행태 정보

출처: TfL(2017)

TfL은 열차 지연이 Tube 네트워크에 미치는 영향을 분석하였다. 지연 노선에 따라 승객들이 대체 노선을 이용하여 일부 노선들이 평소 대비 수요가 증가하였다. 열차 지연 및 대체 노선 정보를 제공함으로써 승객 편의를 증진시킬 수 있으며 운영 측면에서도 신속한 대처가 가능하다.

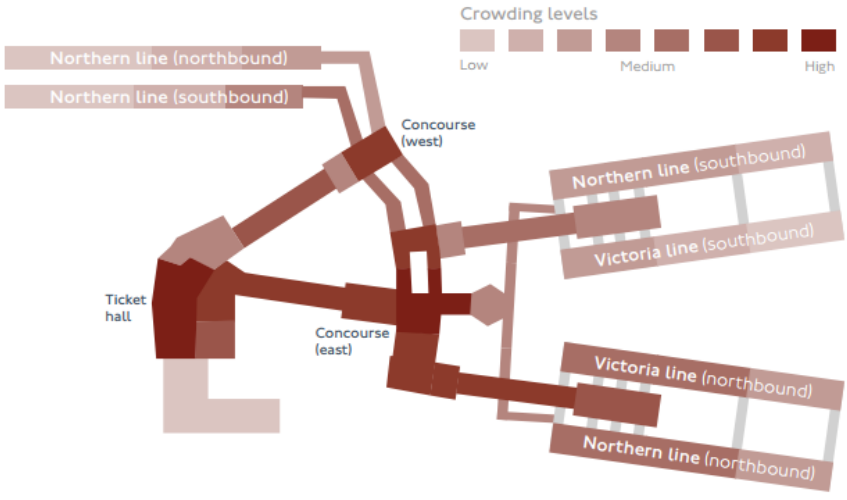


[그림 2-8] 열차 지연으로 인한 승객 이동 행태

출처: TfL(2017)

② 운영 및 안전성 강화

TfL은 와이파이 데이터를 통해 역사 내 혼잡도 분포를 파악하였다. [그림 2-9]와 같이 매표 지점과 중앙 지점에서 극심한 혼잡을 보였다. 이로 인해 매표 지점에서 승강장까지 평소 3분이 소요되는 이동이 10분 이상으로 증가하였다. 극심한 혼잡으로 인한 TfL은 해당 역사 출입을 통제하였다. 정밀한 혼잡 정보를 통해 구체적인 원인 파악과 대응 마련을 통해 피해를 최소화하였다.

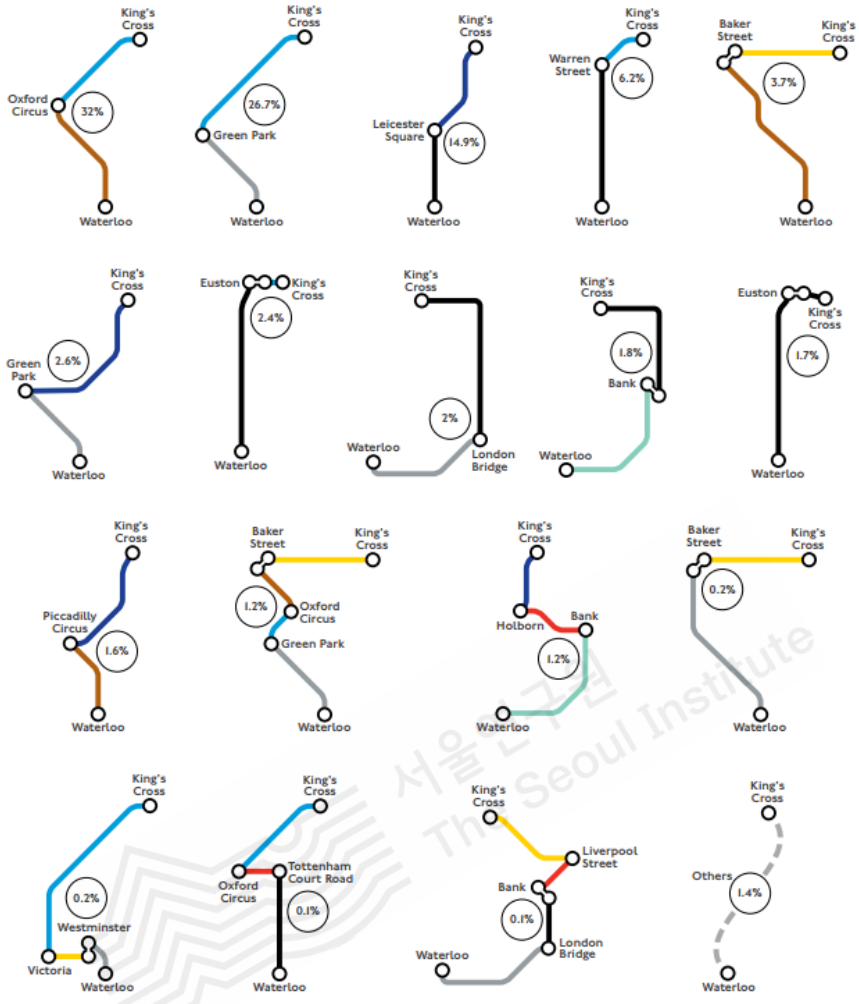


[그림 2-9] 역사 내 혼잡 정보

출처: TfL(2017)

③ 도시철도 개선 계획 지원

TfL은 와이파이 데이터 기반 승객 행태 정보를 통해 도시철도 개선 계획에 필요한 기존에 알 수 없었던 많은 정보를 확보할 수 있었다. 대표적으로 환승 정보는 기존 카드 데이터로 확보할 수 없었다. [그림 2-10]과 같이 동일한 출발역과 도착역 사이에 환승을 할 수 있는 노선이 다양할 경우, 설문조사에 의지할 수밖에 없었다. 와이파이 데이터는 승객 개개인의 이동 경로를 파악할 수 있기 때문에 환승 정보를 획득할 수 있다. 이렇듯 정밀한 승객 행태 정보를 기반으로 미래 수요 예측, 열차 시간 조정 등 다양한 개선 계획이 가능하게 되었다.



[그림 2-10] 동일 출발역-도착역 간 이동의 다양한 환승 노선

출처: TfL(2017)

④ 투자 우선순위 결정

정밀한 혼잡도 정보를 통해 주기적으로 혼잡이 발생하는 지점에 집중적으로 투자를 할 수 있다. 또한, 역사 내 유동인구 분석을 통해 상점 입지 선정, 광고 입지 선정 등에 대한 정보로 활용 가능하다.

(4) 시사점

TfL이 와이파이 접속 데이터를 적극적으로 활용할 수 있었던 이유는 Tube 역사 및 열차에서 통신 연결이 원활하지 않아 대부분의 승객이 와이파이를 이용했기 때문이다. 서울시도 와이파이가 설치되어 있으나 이용률이 런던에 비해 현저히 낮아 활용성에 한계가 있다. 따라서 서울시는 카드 데이터에 의존하여 환승행태와 역사 내 이동행태를 추정해야 하며 정밀도에서도 TfL의 사례보다 낮을 수밖에 없다. 하지만 정확도가 일정 수준 이상이 될 경우, 노선과 역사 혼잡도의 상대적인 비교값을 통해 활용성 높은 정보를 생성할 수 있다.

서울연구원 The Seoul Institute

2_국내 도시철도 모빌리티 분석 연구

1) 승강장 이용행태 추정

(1) 서울연구원(2017)

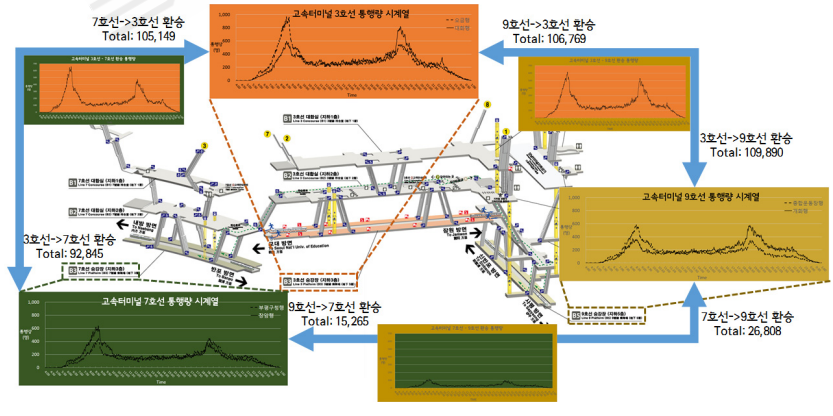
서울연구원(2017)은 교통카드 데이터를 기반으로 도시철도 승강장에서 발생하는 승객 통행을 자체 노선 승하차, 노선 환승, 자체 노선 환승 세 가지로 구분하여 승강장 혼잡도를 추정하였다.

[표 2-1] 승강장 내 승객 통행 구분

통행 종류	특성
자체 노선 승하차	승하차 노선과 이동 노선이 동일
자체 노선 환승	승하차 노선과 이동 노선이 다름
노선 간 환승	일반적인 환승

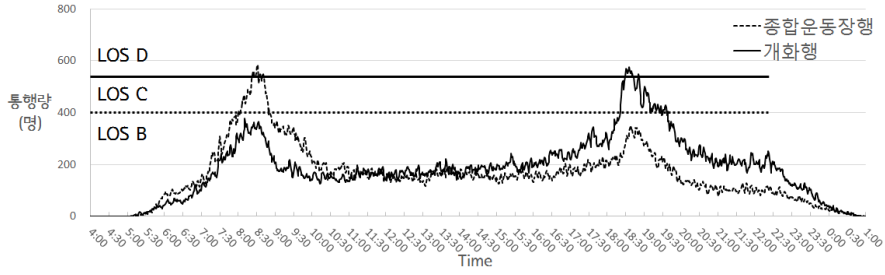
출처: 서울연구원(2017)

교통카드 데이터를 기반으로 동적 통행배정모형을 구축하였다. 이를 통해 주요 도시철도역의 유형별 통행량을 산출하였다. 산출된 통행량과 실용대기면적을 기반으로 역사별 승강장 혼잡도를 도출하였다. [그림 2-11], [그림 2-12], [표 2-2]와 같이 고속터미널역의 승강장 혼잡도 분석 및 서비스 수준을 파악하였다.



[그림 2-11] 고속터미널역 통행 세부 현황

출처: 서울연구원(2017)



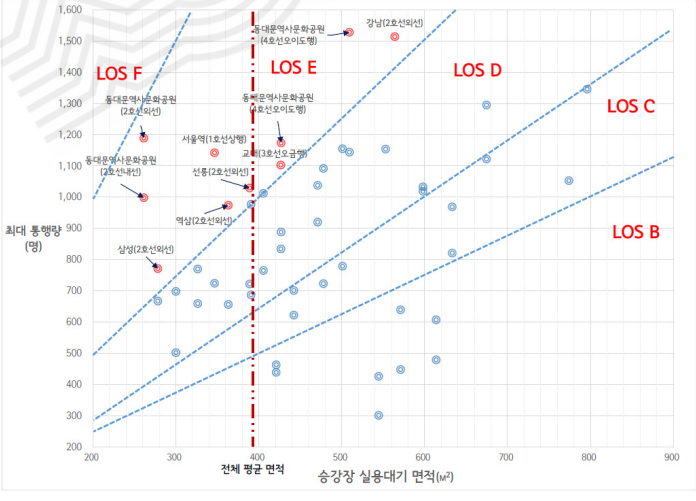
[그림 2-12] 고속터미널역 9호선 승강장별 통행량 시계열

출처: 서울연구원(2017)

[표 2-2] 고속터미널역 승강장 면적 및 혼잡도

호선	방향	실용대기 면적 (m^2)	최대 통행량 (명)	LOS
3호선	오금행	633	969	C
	대화행	633	821	C
7호선	부평구청행	571	448	A
	장암행	571	639	B
9호선	개화행	486 (324	577	D
	종합운동장행	486 (324)	584	D

주: 괄호 안은 9호선 4량 기준 실용대기면적
출처: 서울연구원(2017)

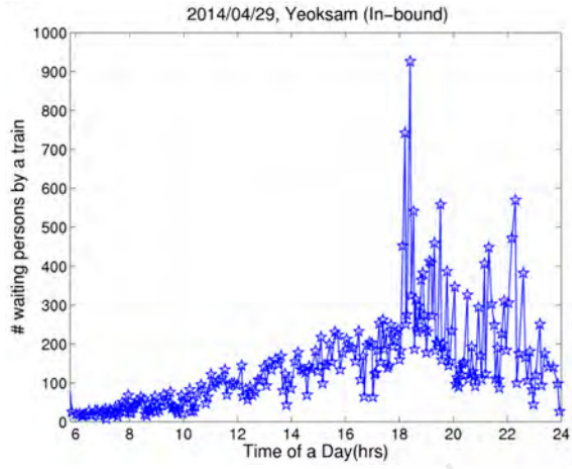


[그림 2-13] 최대 통행량과 실용대기 면적에 따른 승강장 혼잡도

출처: 서울연구원(2017)

(2) 이호, 최진경(2015)

이호, 최진경(2015)은 열차 스케줄 정보와 교통카드 데이터를 활용하여 승강장 대기인원을 산출하였다. 승강장 대기인원과 대기공간을 이용하여 역별 혼잡도를 산출하였다.



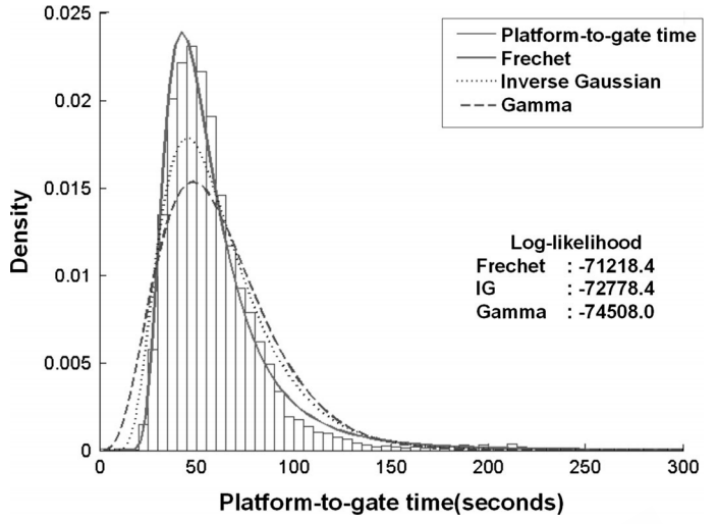
[그림 2-14] 역삼역 승강장 대기인원 추정 결과

출처: 이호, 최진경(2015)

대기인원 추정치와 실측치는 -18%~-9%의 오차를 보였으나, 혼잡도는 -1.7%~1.3%의 적은 오차를 보였다.

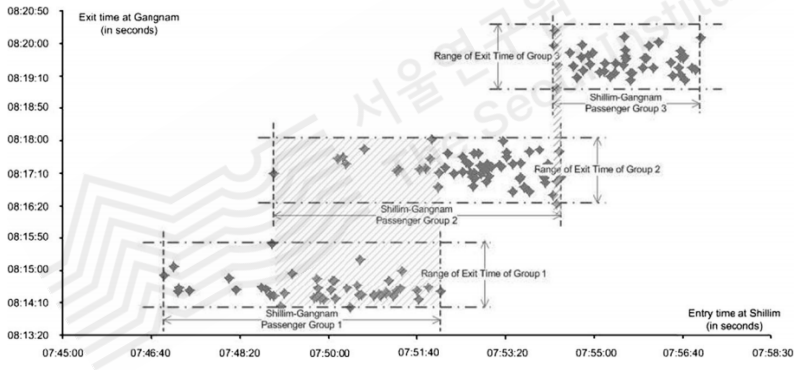
(3) Hong et al.(2015)

Hong et al.(2015)은 열차 운행 정보와 교통카드 데이터를 활용하여 개인의 통행 노선을 추적하는 연구를 수행하였다. 서울시 도시철도 출발역-도착역 중 한 가지 이상의 합리적 노선 대안이 존재할 경우, 교통카드 데이터만을 이용하면 노선을 파악할 수 없다. 이에 따라 교통카드의 태그 지점인 게이트에서 실제 열차에 탑승할 수 있는 게이트까지 소요되는 통행 시간을 가정하고 노선 대안 중 운행 정보를 고려하여 탑승 가능한 열차를 역추적하는 방법론을 제시하였다.



[그림 2-15] 강남역 플랫폼-게이트 이동시간 분포

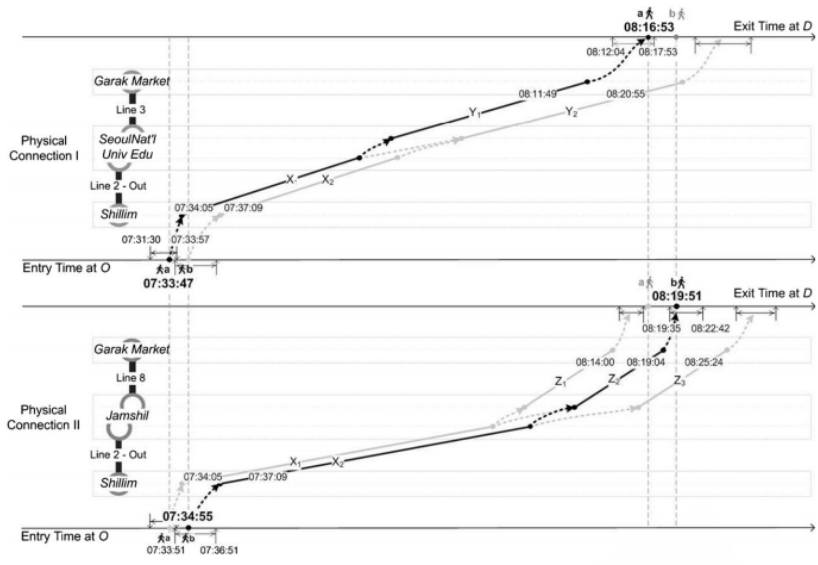
출처: Hong et al.(2015)



[그림 2-16] 신림역-강남역 이동 승객 분포

출처: Hong et al.(2015)

이를 통해 유사한 시간대에 동일 '신림역-가락시장역'을 이동하는 두 승객의 통행 노선을 추적하였다. 합리적 노선 대안인 '신림역-교대역-가락시장역'과 '신림역-잠실역-가락시장역' 중 출발역과 도착역의 열차 운행 정보를 활용하여 탑승 가능한 열차를 추적하였다. 신림역과 가락시장역에서의 교통카드 태그 시간을 기반으로 두 승객이 탑승 가능한 열차를 추적한 결과, 서로 다른 노선을 이용한 것으로 나타났다.



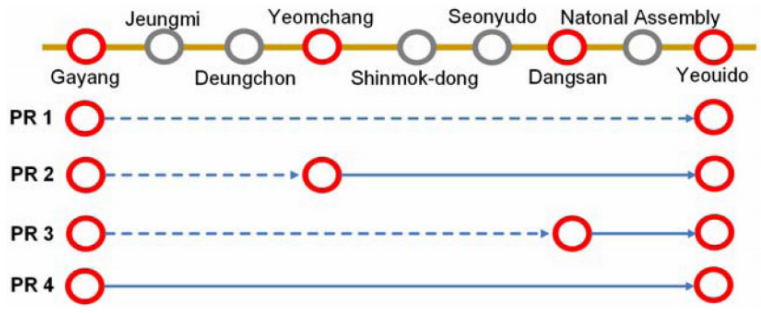
[그림 2-17] 신림역-가락시장역 통행 추적

출처: Hong et al.(2015)

이러한 방법론을 통해 추적한 승객의 통행 노선을 환승 횟수에 따라 구분하였다. 환승 횟수 0회와 1회에 해당하는 단일 노선 대안의 경우, 상당히 높은 노선 추적 성공률을 보였다. 반면, 노선 대안이 두 가지 이상일 경우, 추적 성공률이 비교적 떨어지는 것으로 나타났다. 특히, 환승 횟수 2회를 노선 대안으로 포함한 경우, 추적 성공률이 급격히 떨어지는 것으로 나타났다.

(4) 김경민 외(2015)

김경민 외(2015)는 도시철도 9호선 승객의 실제 이용 경로와 열차를 추적하는 연구를 수행하였다. 일반열차와 급행열차를 모두 운행하는 9호선의 특징을 고려하여 통행 가능한 조합을 구성하였다.



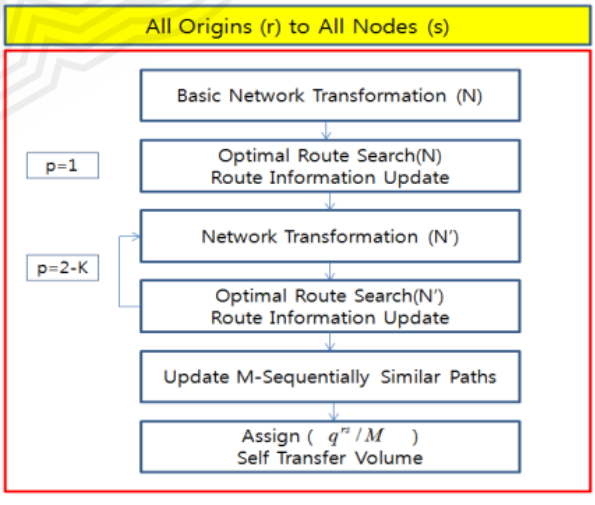
[그림 2-18] 가양역-여의도역 급행·완행 통행 조합

출처: 김경민 외(2015)

앞서 Hong et al.(2015)에서 활용된 방법론을 통해 각 통행 조합에 대한 승객 집단을 구성하였다. 그 결과, 약 91%의 승객 통행을 추적할 수 있었다.

(5) 이미영(2018)

이미영(2018)은 도시철도 환승통행을 노선 간 환승과 역사환승으로 구분하여 수도권 도시철도역사별 환승량을 추정하였다. 기존 연구들에서 제안된 승객의 경로선택모형에 역사환승량 산정에 적합한 변형된 Big-Node 기반 네트워크 구축기법과 자료구조 방법론을 활용하였다.



[그림 2-19] 역사환승량 산정 절차

(5) 이미영 외(2018)

이미영 외(2018)는 도시철도 내 보행이동을 파악하기 위해 직승직하, 노선환승, 역사환승으로 구분하였다. 단일 노선으로 운영되는 도시철도역사는 게이트와 승강장 사이 수직 보행이동인 직승직하 유형이 주를 이룬다. 반면, 다수 노선이 운영되는 도시철도역사는 직승직하 뿐 아니라 노선환승 유형과 역사환승 유형의 이동이 추가로 발생한다. 노선환승 유형은 서로 다른 노선 간 환승을 위한 보행이동이다. 역사환승 유형은 진입한 역사의 노선과 승차한 열차의 노선이 다른 경우의 이동이다. 개인 승객의 교통카드 데이터를 기반으로 최소통행시간경로선택모형을 통해 수도권 역사 588개에 대한 보행이동 정보를 추출하였다.

Trip Type			Number of Trip (%)
Train Passing Trip	Line 2 - Line 2	417295 (63.7%)	655311 (71.8%)
	Line 3 - Line 3	238016 (36.3%)	
Walking Trip	Line Transfer	137437 (53.4%)	257192 (28.2%)
	Station Transfer	36181 (14.1%)	
	Straight R/A	83574 (32.5%)	
Total			912503 (100.0%)

R/A : Ride & Alight

[그림 2-20] 교대역 역사 내 보행 유형별 구분

서울연구원 The Seoul Institute

03

상시분석체계 구축 및 활용 방안

서울연구원
The Seoul Institute

1_도시철도 모빌리티 특성
2_상시분석체계 구축 방안
3_상시분석체계 활용 방안
4_결론

03. 상시분석체계 구축 및 활용 방안

1_도시철도 모빌리티 특성

1) 도시철도 모빌리티 데이터 현황

도시철도 모빌리티와 관련되어 수집되는 데이터에는 교통카드 데이터와 열차 스케줄 데이터가 있다. 교통카드 데이터는 한국스마트카드의 데이터와 서울교통공사의 데이터로 구분할 수 있다. 한국스마트카드는 버스 이용 내역과 한국철도공사의 도시철도 이용 내역을 모두 파악할 수 있는 장점이 있다. 반면, 서울교통공사는 도시철도 게이트 태그 데이터를 확보할 수 있는 장점이 있다.

[표 3-1] 소유기관별 교통카드데이터 장점

교통카드 데이터	장점
한국스마트카드	버스, 한국철도공사 이용 승객 파악 가능
서울교통공사	역사별 게이트 이용 세부 정보 파악 가능

도시철도 모빌리티에 한정하여 살펴보면, 서울교통공사의 교통카드 데이터가 출입 게이트 위치정보를 파악할 수 있어 보다 세밀한 데이터라고 볼 수 있다. 하지만, 확보할 수 있는 데이터가 게이트 태그에 대한 시·공간적 정보가 유일하여 단독으로의 활용성에 한계가 있다. 서울교통공사 교통카드 데이터는 출입역명, 게이트 출입시간, 게이트 ID를 수집한다.

[표 3-2] 교통카드 데이터 구조 예시

교통카드 ID	출입역명	게이트 출입시간	게이트 ID
1235236256	교대역(2호선)	17:00	A25647
1235234325	교대역(3호선)	14:00	A35647

자료: 서울교통공사

서울교통공사가 관리하는 열차 스케줄 데이터는 열차운행제어컴퓨터(TTC, Total Traffic Control) 데이터를 기반으로 역사 내 열차 도착, 대기, 출발 시간을 수집한다.

2) 도시철도 모빌리티 특성

도시철도 모빌리티는 출발 역사 내 통행, 출발 역사와 환승 역사 간 열차 통행, 환승 역사 내 통행, 환승 역사와 도착 역사 간 열차 통행, 도착 역사 내 통행으로 구성된다. 이는 크게 역사 모빌리티와 네트워크 모빌리티로 구분할 수 있다.

역사 모빌리티는 주로 보행과 대기 활동으로 구성된다. 출발 역사의 출입구에서부터 열차 대기 승강장까지 보행으로 이동하고 열차가 도착하기까지 대기한다. 열차가 도착하여 탑승하면 해당 역사를 떠나게 된다. 환승 역사에 도착하면 출발역 노선의 열차 하차, 환승 통로 보행, 도착역 노선의 열차 탑승을 위해 대기 및 승차를 거친다. 도착 역사에서는 열차에서 하차하여 출입구까지의 보행으로 이어진다.

도시철도 네트워크의 측면에서 보면, 모빌리티는 출발역, 환승역, 도착역으로 구성된다. 개별 승객의 모빌리티는 최소 시간, 최소 환승 등 개인 선호에 따른 최적 경로 탐색의 결과이다.

[그림 3-1] 도시철도 모빌리티 구성

2_상시분석체계 구축 방안

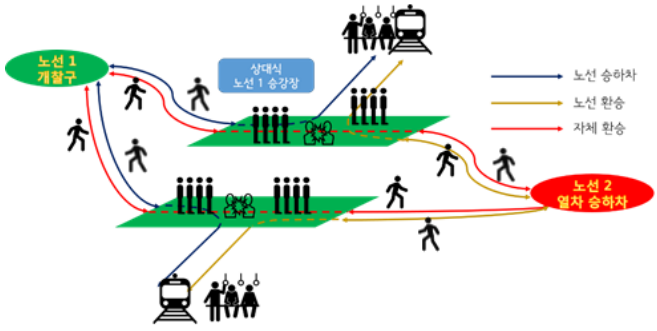
1) 역사 모빌리티 분석체계 구축 방안

역사 모빌리티를 분석하기 위해 역사 내에서 발생하는 승객 통행을 분류해야 한다. 기존 연구에서는 역사에서 발생하는 승객 통행 종류를 자체 노선 승하차와 노선 환승, 자체 노선 환승 이상 3가지로 분류하였다(서울연구원, 2017). 첫 번째, 자체 노선 승하차 승객은 도시철도 출입 역사의 노선과 실제 승하차 이동 노선이 동일한 경우로써, 통행 종류 중 빈도수가 가장 많다. 두 번째, 노선 환승은 환승 역사에서 목적지로 이동하기 위한 역사 내 통행이다. 환승 통행이 발생할 경우, 환승 역사 내 첫 번째 노선의 승강장에서는 하차 통행이 발생하며, 환승 통로 이동 후 환승 노선 승강장에서는 승차 통행이 발생한다. 따라서 보행 통행량은 환승 역사 내 두 노선의 승강장 모두에서 집계된다. 세 번째, 자체 노선 환승은 환승 역사에서 발생하는 것은 동일하나, 출입 역사의 노선과 실제 승하차 노선이 다른 경우이다. 대부분의 환승 역사에서는 모든 경유 노선 역사를 이동할 수 있다. 일례로 도시철도 2호선과 신분당선이 교차하는 강남역의 경우, 2호선 태그 후 신분당선 이동 승객은 2호선 도시철도 승강장과 신분당선 승강장을 모두 경유한다.

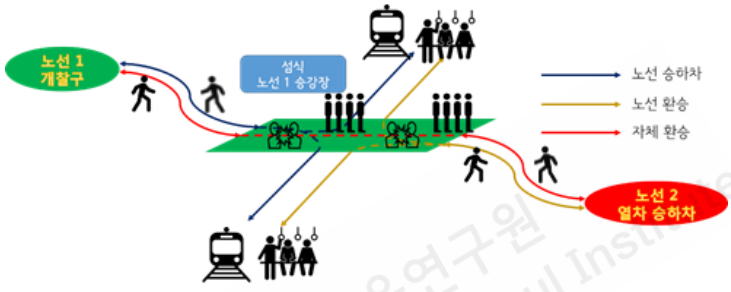
[표 3-3] 승강장에서 통행 속성

통행 종류	특성
자체 노선 승하차	승하차 노선과 이동 노선이 동일 ex) 2호선 강남역 태그 후 2호선 이동
노선 간 환승	일반적인 환승 ex) 2호선에서 신분당선으로 환승
자체 노선 환승	승하차 노선과 이동 노선이 다름 ex) 신분당선 태그 후 2호선 이동

서울연구원 The Seoul Institute



[그림 3-2] 상대식 승강장에서 통행 흐름



[그림 3-3] 섬식 승강장에서 통행 흐름

교통카드 데이터는 승차와 하차 태그 데이터만 존재하여 환승역을 알 수 없기 때문에 통행 종류를 구분할 수 없다. 교통카드의 승차와 하차 태그 데이터만을 이용하여 승객의 노선을 추정하기 위해 기존 연구에서는 교통카드기반 동적 통행배정모형을 구축하였다(손지언, 2016). 모형은 통행자의 일반화 비용을 최소화하는 통행경로를 선택하도록 구축되었다.

[표 3-4] 동적 통행배정모형(노선 통행량)

목적함수	$$\min \int_0^T \left\{ \sum_r \sum_s \sum_p \xi_p^{rs}(t) \cdot f_p^{rs}(t) \right\} dt$$ s.t $q^{rs}(t) = \sum_p f_p^{rs}(t) \quad \forall p, r, s, t$ $f_p^{rs}(t) \geq 0 \quad \forall p, r, s, t$ 여기에서, r, s, p: r(출발지), s(도착지), p(선택경로) $\xi_p^{rs}(t)$: r에서 s까지 t 시점에서 경로p 일반화 비용(통행시간) $f_p^{rs}(t)$: r에서 s까지 t 시점에서 경로p를 선택 승객 $q^{rs}(t)$: r에서 s까지 t 시점에 승객 수
노선(b) 특정시간(tt) 승객	$$x_b(tt) = \int_0^T \left\{ \sum_r \sum_s \sum_p f_p^{rs}(t) \cdot \delta_{p,b}^{rs}(tt) \right\} dt$$ $\delta_{p,b}^{rs}(tt)$: r-s간 경로 p에서 tt 시점에 b링크 경유 판단 변수 (통과할 경우 1, 아닌 경우 0)

역사 내 통행 종류를 시간에 따라 추정하기 위해 기존 연구는 보다 발전된 모형을 제시하였다(서울연구원, 2017) 먼저 승객이 이용하고 있는 승강장이 출발 역사나 도착 역사가 아닐 경우 환승 통행으로 구분하고, 맞을 경우 승하차 통행으로 구분하여 집계하였다.

[표 3-5] 특정 승강장 통과 수요 산출 모형(승강장 통행량)

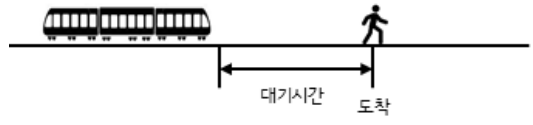
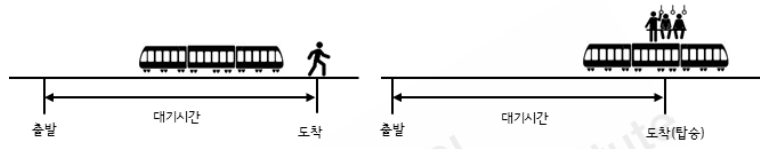
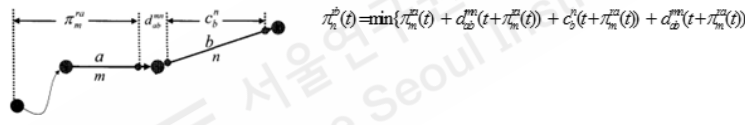
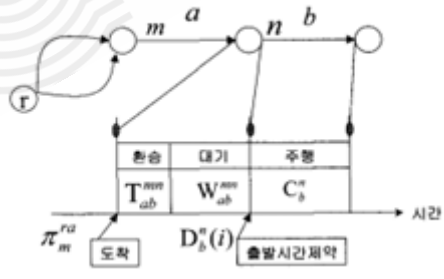
목적함수	$\min \int_0^T \left\{ \sum_r \sum_s \sum_p \xi_p^{rs}(t) \cdot f_p^{rs}(t) \right\} dt$ s.t $q^{rs}(t) = \sum_p f_p^{rs}(t) \qquad \forall p, r, s, t$ $f_p^{rs}(t) \geq 0 \qquad \forall p, r, s, t$ 여기에서, r, s, p: r(출발지), s(도착지), p(선택경로) $\xi_p^{rs}(t)$: r에서 s까지 t 시점에서 경로p 일반화 비용(통행시간) $f_p^{rs}(t)$: r에서 s까지 t 시점에서 경로p를 선택할 확률 $q^{rs}(t)$: r에서 s까지 t 시점에 승객 수	
승강장(j) 특정시간(tt) 승객	$V_j(tt) = \int_0^T \left\{ \sum_r \sum_s \sum_p f_p^{rs}(t) \cdot \delta_{p,j}^{rs}(tt) \right\} dt +$	노선 간 환승
	$\int_0^T \left\{ \sum_r \sum_s \sum_p f_p^{rs}(t) \cdot \delta_{p,j}^{js}(tt) \right\} dt +$	목적지
	$\int_0^T \left\{ \sum_r \sum_s \sum_p f_p^{rs}(t) \cdot \delta_{p,j}^{rj}(tt) \right\} dt$ 여기에서, $V_j(tt)$: tt 시점에 j 승강장 대기승객 $\delta_{p,j}^{rs}(tt)$: 경로 p에서 tt 시점에 j 승강장 환승 판단 변수 (통과할 경우 1, 아닌 경우 0) $\delta_{p,j}^{js}(tt)$: 경로 p에서 tt 시점에 j 승강장 도착 판단 변수 (통과할 경우 1, 아닌 경우 0) $\delta_{p,j}^{rj}(tt)$: 경로 p에서 tt 시점에 j 승강장 출발 판단 변수 (통과할 경우 1, 아닌 경우 0)	출발지

서울연구원 The Seoul Institute

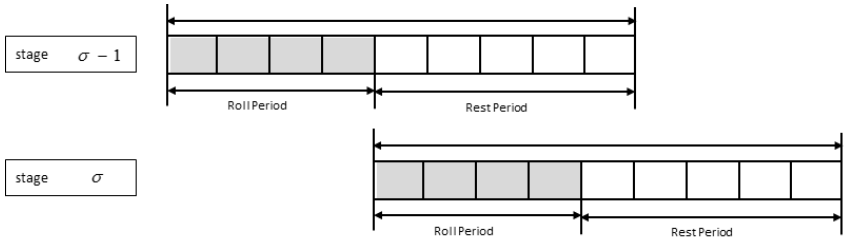
2) 노선 모빌리티 분석체계 구축 방안

도시철도 승객의 보다 정확한 경로는 교통카드 데이터와 열차스케줄 데이터를 결합하여 파악할 수 있다. 기존 승객 경로선택 모형에서는 열차 대기시간을 차두간격의 ½로 가정하였다. 보다 현실적으로 탑승 열차를 선별하기 위해 출발시간 제약과 시간창 제약을 반영하여 동적 경로선택모형을 구축할 수 있다.

[표 3-6] 열차스케줄을 반영한 동적 통행배정모형 개념도

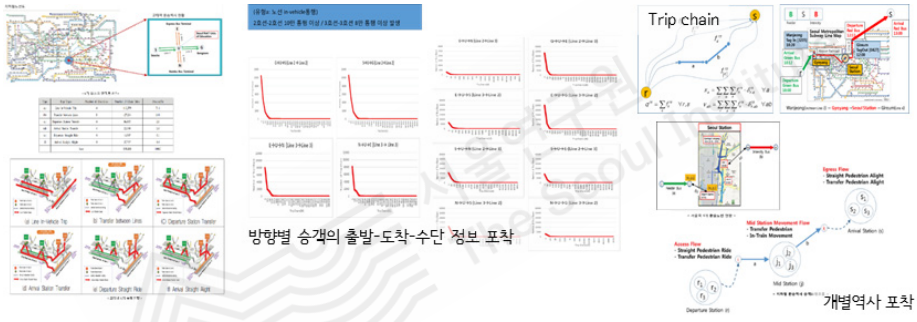
기존 대기시간 개념	
출발시간과 시간창 제약을 고려	
출발시간제약을 반영한 동적경로선택 모형	
환승 반영 모형	

또한 승객의 실시간 승객 이동상황을 반영하여 수요를 예측하기 위해 Rolling Horizon 방법론을 적용할 수 있다. 시간의 흐름을 Roll과 Rest period로 구분하여 과거 및 현재 O-D쌍을 기반으로 Roll O-D쌍을 추정한다. 특수 상황 발생시, 수요를 Roll-back하여 재배분 절차를 수행한다.



[그림 3-4] Rolling Horizon 방법론의 개념

열차스케줄을 반영한 동적 통행배정모형과 Rolling Horizon 방법론을 통한 실시간 수요 예측을 통해 특정 역사 및 노선에서의 승객 이동을 포착할 수 있다. 이는 교통망이론의 Selected Link Analysis의 개념에서 착안하여 특정지점에서의 Trip-Chain을 기반으로 승객을 분류할 수 있다.



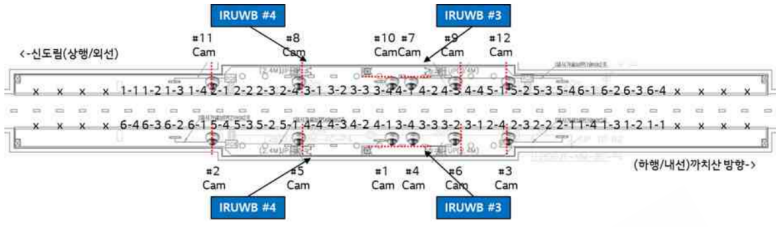
[그림 3-5] Selected Station/Line Analysis의 개념

3) 모빌리티 분석체계 고도화 방안

(1) 세부 공간에 대한 혼잡도 분석체계 구축 방안

역사 혼잡도에 따라 보행 이동시간의 지체, 승강장 대기인원 포화로 인한 불쾌감 증가 등 도시철도 모빌리티에 다양한 영향을 미친다. 역사 혼잡도를 파악하기 위해서는 교통카드 데이터와 열차 스케줄 데이터를 활용하여 해당 역사 승객 규모를 파악해야 한다. 개별 승객 모빌리티를 시계열적으로 분석하여 각 역사별 혼잡도를 추정할 수 있다. 그러나 역사라는 거대한 규모의 시설 내 일부 공간에 대한 혼잡도만을 추정할 수 있다는 한계가 존재한다. 교통카드 데이터의 경우, 게이트라는 거점을 중심으로 수집되기 때문에 세부적인 역사 공간에 따른 혼잡도 추정이 어렵다.

이에 따라 한국철도기술연구원과 서울교통공사는 새로운 기술을 연구하고 시범 적용하고 있다. 이들은 혼잡정보관리 시스템을 시범 구축하여 2호선 신정지선 및 본선 5개역에 운영하고 있다. 시스템은 열차 및 객차 혼잡도 측정, 승강장 혼잡도 측정, 행선안내게시기/모바일 정보단말 앱 혼잡정보 제공, 혼잡도 게이트 제어, 승강장/열차 혼잡도 예측, 열차 혼잡도 시뮬레이션으로 구성된다. 열차 혼잡도는 응하중 제어장치 데이터를 기반으로 측정하고, 승강장 혼잡도는 IP카메라 및 IR-UWB 레이더를 기반으로 측정할 수 있다.



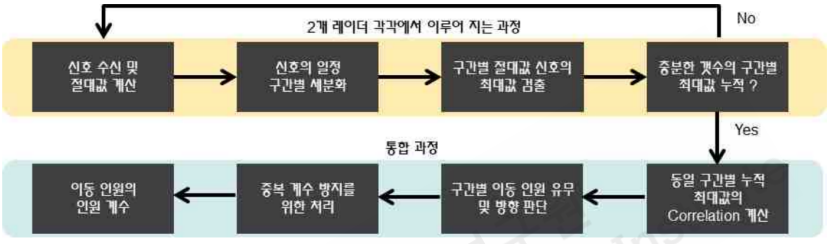
[그림 3-6] 2호선 신정네거리역 승강장 혼잡도 측정 장치 설치 위치 및 감지선

역사 혼잡도와 더불어, 열차 혼잡도 또한 승객의 편의성에 지대한 영향을 미친다. 서울시 지하철은 극심한 혼잡으로 인해 "지옥철"이라는 수식어로 불린다. 이처럼 열차의 혼잡도는 서울시가 개선해야 할 주요 서비스 지표이다. 이를 위해 응하중 측정장치 기반 객실 혼잡도 시스템이 시범 적용되고 있다. 현재 2호선 신정지선 및 본선 전동차 7개에 편성되었으며, 범용성과 객관성 확보를 위해 다양한 차종 적용되고 있다. 혼잡도를 4단계(한산, 조금 혼잡, 혼잡, 매우 혼잡)으로 구분하여 측정하였으며, 오차율은 구형전동차의 경우, 평균 3.38%, 신형전동차의 경우, 1.38%로써 성공적으로 구축되었다.

[그림 3-7] 객실 혼잡도 시스템 검증을 위한 승객 수 측정

승강장 혼잡도 측정을 위한 장치 및 알고리즘의 경우, IR-UWB 레이더를 기반으로 하며 강남역과 신정네거리역에 시범 설치되었다. 설치된 2개의 레이더의 일정 거리 구간에서 신호의 세기와 각 레이더 신호의 최대값 간 Correlation을 이용하여 이동 방향을 판단하는 알고리즘을 적용하였다.

[그림 3-8] 혼잡도 모니터링 레이더 시스템

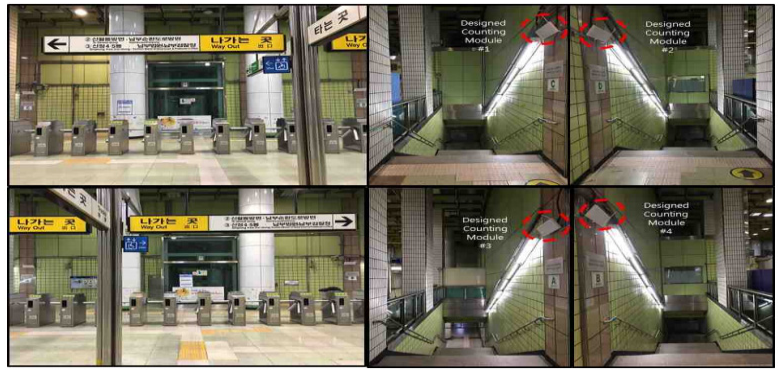


[그림 3-9] IR-UWB 혼잡도 측정 알고리즘 순서도

강남역에 시범 설치된 혼잡도 측정 센서는 환승통로에 설치되었다. 혼잡도 측정센서는 총 12m 통로에 2세트가 설치되었으며 센서당 6m 범위를 측정하도록 설계되었다. 혼잡도 검증 결과, 하루 누적 정확도가 목표치 85% 이상인 것으로 나타났다.

[그림 3-10] 강남역 환승통로에 설치된 혼잡도 측정 센서

신정네거리역에 시범 설치된 측정 센서는 계단에 설치되었다. 설치환경은 6m 범위로 충분히 측정 가능하였다. 교통카드 데이터와 비교한 결과, 정확도는 85% 이상으로 나타났다.



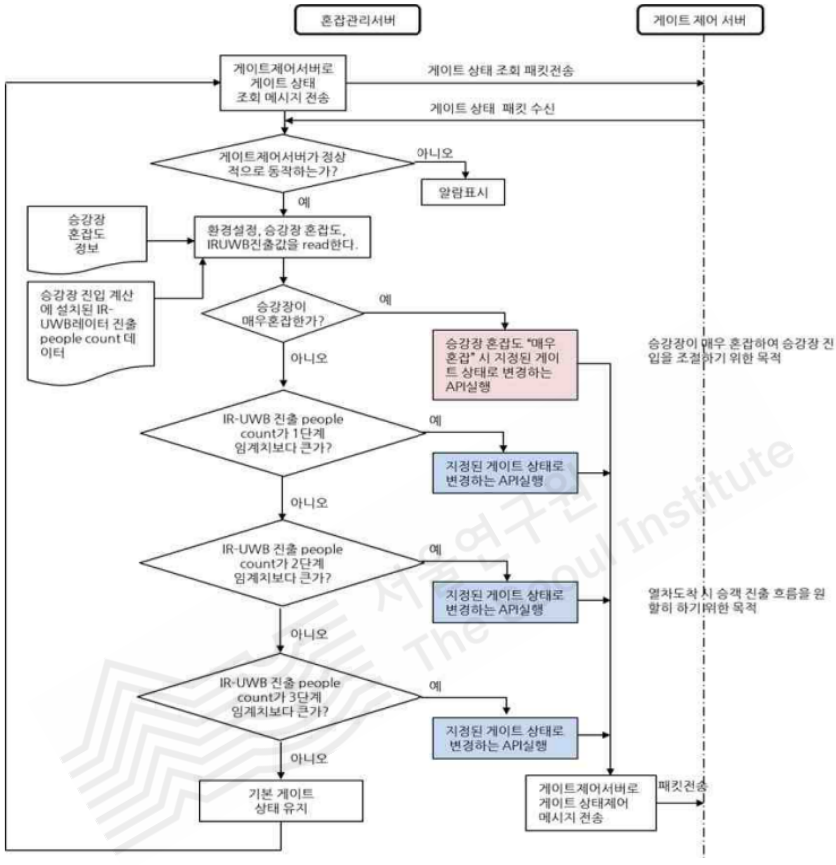
[그림 3-11] 2호선 신정네거리역 혼잡도 측정 센서

앞서 측정한 열차 및 승강장 혼잡도 정보를 승객에게 제공함으로써 승객이 혼잡도가 낮은 객실로 탑승하도록 유도하여 혼잡 완화에 기여할 수 있다. [그림 3-12]의 6량 열차에서 객실 3은 가장 혼잡한 것으로 나타난다. 이에 따라 승객들이 혼잡한 객실을 피하기 위해 한산한 객실 1, 2, 5에 탑승하도록 유도할 수 있다. [그림 3-13]은 승강장 혼잡도를 표출함에 따라 승객이 혼잡이 덜한 공간에서 대기할 수 있도록 유도한다.

[그림 3-12] 승강장 행선안내게시기 열차 및 객실 혼잡도 표출

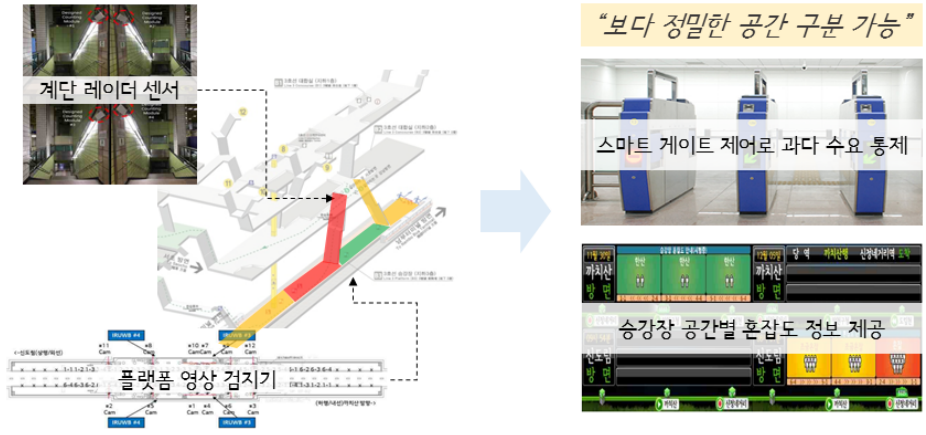
[그림 3-13] 대합실 행선안내게시기 승강장 혼잡도 표출

승강장 혼잡 제어를 위해 게이트 제어시스템 도입이 가능하다. [그림 3-14]과 같이 승강장 혼잡도 임계치를 단계별로 설정하고, 혼잡도 단계에 따라 지정된 게이트 상태로 변경하는 시스템을 통해 승강장 혼잡도를 완화시킬 수 있다.



[그림 3-14] 게이트 제어시스템 알고리즘

이와 같이 역사 공간 및 열차 혼잡도 측정 시스템, 게이트 제어 시스템, 혼잡도 정보 제공을 개별적으로 개발하는 동시에, 연계성을 고려하여 통합 시스템을 구축하면 도시철도 혼잡도를 보다 종합적으로 판단하고 제어할 수 있다.



[그림 3-15] 혼잡도 측정·제어·정보 제공 시스템

열차 서비스 향상 및 이벤트 발생에 대한 신속한 대처를 위해 열차운행 스케줄 시뮬레이션 도입이 필요하다. 열차운행 스케줄에 따른 역별 혼잡도를 산출하여 최적의 대안을 도출할 수 있다. [그림 3-16]은 이벤트 발생으로 인한 역사 승객 유입량이 증가했을 경우를 시뮬레이션하고 있다. 7시 48분에 운행되는 열차에 양천구청역 승차인원을 기존 대비 5배 증가시켰을 경우, 혼잡도가 급증하는 것을 볼 수 있다.

[그림 3-16] 열차운행 스케줄 시뮬레이션 프로그램

(2) 도시철도 모빌리티 상시 모니터링 구축 필요

개별 승객에 대한 시계열 모빌리티 데이터가 쌓이면 반복·비반복 상황의 구분을 통한

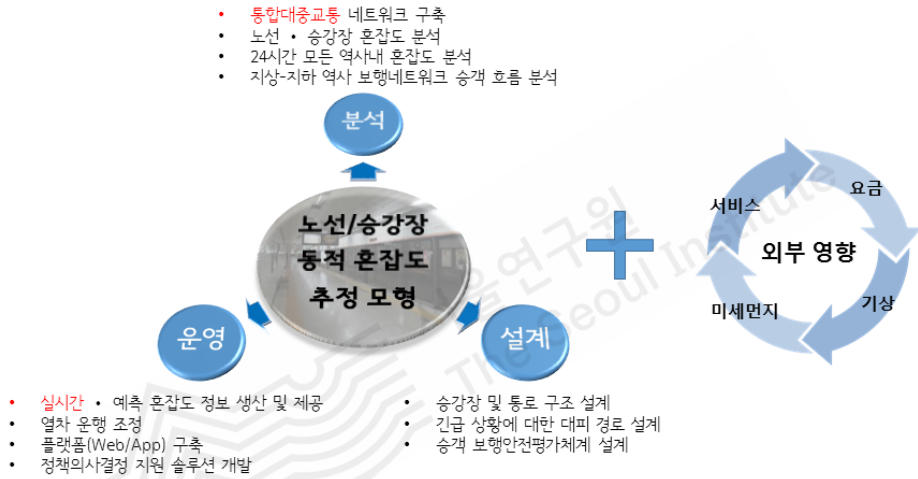
패턴화가 가능하다. 예를 들어, 평일 출근시간대의 통행 유형과 혼잡도 패턴은 큰 편차가 없이 유지된다. 그러나 공휴일, 기상, 이벤트 등의 비반복 상황에 따라 반복 패턴에 변화가 생길 경우, 이를 감지하여 대책을 마련할 수 있다. 상시 모니터링을 통한 모빌리티 패턴화를 위해서는 쌓여 있는 모빌리티 데이터를 딥러닝 기술을 기반으로 학습하여 반복 상황을 추출해야 한다.

또한, 패턴화된 모빌리티 및 혼잡도 현황 정보를 기반으로 상시 모니터링을 통해 다양한 경우의 수를 통해 도시철도 네트워크 취약도를 시뮬레이션해야 한다. 이를 기반으로 도시철도 네트워크 붕괴를 사전 예방하고, 이벤트 상황별/공간별 우회경로 및 대피경로 확보 및 취약지점을 발굴할 수 있다.

[그림 3-17] 도시철도 상시 모니터링 체계

3_상시분석체계 활용 방안

상시분석체계는 대중교통 통합모빌리티 데이터를 축적하여 노선 및 승강장 동적 혼잡도 추정 모형을 기반으로 다양한 활용이 가능하다. 본 연구에서는 대중교통 시스템에서의 활용도를 크게 분석, 운영, 설계로 구분하였다. 상시분석체계를 통해 노선, 승강장의 혼잡도 및 역사 보행네트워크의 승객 흐름을 24시간 분석할 수 있다. 이를 기반으로 혼잡도 완화를 위한 운영전략 및 구조설계를 지원할 수 있다. 또한, 대중교통에 영향을 미치는 다양한 외부 영향을 고려하여 분석을 수행할 수 있다.

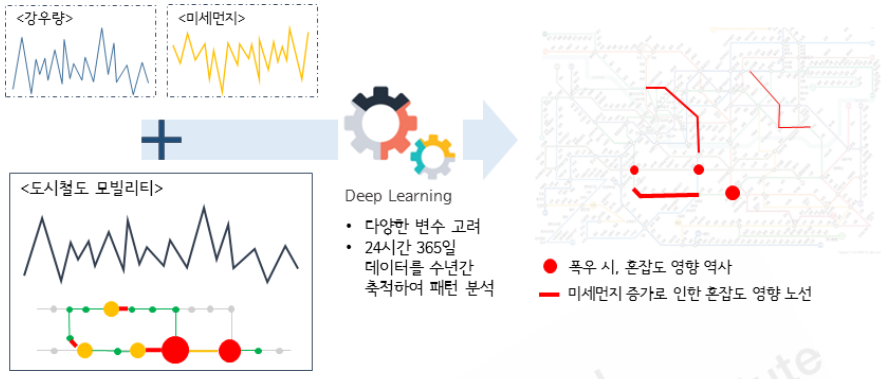


[그림 3-18] 상시분석체계 활용 방안

1) 외부요인에 따른 모빌리티 변화의 패턴 발굴 및 대응책 마련

도시철도 모빌리티에 영향을 미치는 대표적인 외부요인으로 기상조건이 있다. 강우와 폭설과 같은 기상조건에 따른 도시철도 모빌리티는 비교적 반복적인 상황으로써 패턴화가 가능할 것으로 예상된다. 이미 카드 데이터를 활용한 기상조건과 대중교통 이용에 대한 연구가 일부 수행된 바 있다. 이광섭 외(2014)가 일주일 데이터를 기반으로 분석한 결과, 강우로 인해 승차인원은 약 10% 감소한 반면, 버스는 약 15% 감소한 것으로 나타났다. 특히 도시철도는 오전 첨두 시간, 버스는 오후 첨두 시간에 영향을 많이 받은 것으로 나타났다. 이정훈·정헌영(2018)은 4년간 부산도시철도 카드 데이터를 기반으로 평일과

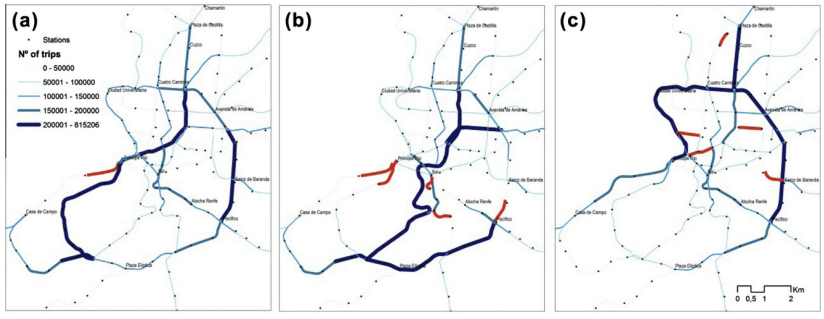
휴일의 기상조건에 따른 통행량을 분석하였다. 이처럼 일부 연구가 수행되었으나, 데이터 부족이나 다양한 요인을 함께 고려하지 못하여 적용성에 한계가 있다. 상시분석체계를 통해 데이터 축적 및 다양한 요인을 고려하면, 기상조건에 따른 모빌리티를 패턴화시킬 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 딥러닝 기술을 통해 혼잡도 영향 역사 및 노선 발굴이 가능할 것으로 기대된다.



[그림 3-19] 기상조건에 따른 도시철도 혼잡도 영향 분석

2) 이벤트 발생에 따른 시뮬레이션 및 상시대응책 마련

자연재해, 테러, 행사 등 과거 발생하지 않았던 이벤트로 인해 대중교통 네트워크의 단절, 용량초과 등의 문제가 발생할 수 있다. 대규모 수송을 담당하는 대중교통 네트워크의 문제 발생은 일상생활에 심각한 피해를 발생시킨다. 이러한 교통 네트워크의 신뢰성 및 취약성 분석에 대한 연구는 대다수가 도로 중심으로 이루어졌다. 최근 도시철도에 대한 연구도 수행되고 있으나, 위상학적 측면의 공급 위주의 평가가 주를 이룬다. 교통 네트워크 신뢰성은 일부 시설 단절 시 수요 처리 성능에 대한 평가, 파급효과를 기준으로 중요한 링크 발굴, 재난 대응 우회경로 파악 등이 존재한다. [그림 3-20]과 같이 도시철도 네트워크의 링크 단절로 인한 시나리오 분석이 가능하다. 상시분석체계를 통해 다양한 시간대에 발생 가능한 이벤트에 대한 시나리오를 설정하고, 서울시 대중교통 네트워크에 대한 파급효과와 중요한 링크 발굴, 우회경로 확보 여부를 통해 상시대응책을 마련하여 이벤트 발생 시 보다 신속하게 대응할 수 있다.



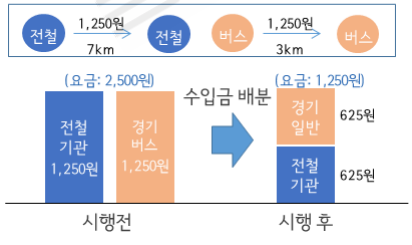
[그림 3-20] 스페인 마드리드 도시철도 링크 단절에 따른 파급효과 분석

3) 제도적·정책적 변화에 따른 도시철도 운영환경 진단

2004년 서울시 대중교통체계개편 이후 2007년 경기도, 2009년 인천시가 참여하면서 수도권 통합환승요금제가 시행되었다. 이용자 입장에서 수도권의 다양한 수단을 저렴한 요금으로 이용할 수 있어 편익이 증가하였다. 하지만, 운영기관 입장에서는 환승할인분 담금으로 인한 손실 규모가 증가하게 되었다. 손실 규모가 증가함에 따라 지자체 및 운영기관의 갈등이 심화되고 있다. 현 제도는 기관별 분담금을 기본요금 비율로 배분하고, 경기도와 인천시가 수도권통합요금제에 진입하면서 발생한 철도운영기관 요금수입 감소금액을 부담하고 있다.

<수입금 정산>

✓ 전체 이용거리에 따라 부과된 통합운임은 이용 교통수단별 기본운임비율로 정산함



<환승손실분담금>

✓ 인천 및 경기버스가 수도권통합요금제에 진입하면서 발생한 철도운영기관 요금수입 감소금액의 46%를 인천시와 경기도가 부담 (2015.11개정)

지급기관 \ 수급기관	서울교통공사	인천교통공사	한국철도공사
경기도	○	○	○
인천시	○	○	○

[그림 3-21] 수도권통합요금제 운영현황

최근 2019년 9월 경기도가 버스 요금을 인상할 계획을 발표하면서, 경기도 요금 인상으로 인한 수익 일부가 서울시에 귀속될 것으로 예상되어 논란이 되었다. 이에 따라 서울시도 버스 요금을 인상해야 한다는 일부 주장도 있었다. 이처럼 현재 정산체계의 문제점

들이 불합리한 의사결정을 유도하게 될 수 있다.
이러한 문제는 이용거리에 따른 운영비용의 비율에 따라 분담하면 해결되지만, 도시철도의 통행거리는 정확히 파악할 수 없기 때문에 현재 사용하지 않고 있다. 상시분석체계를 도입하여 승객 모빌리티 데이터 축적에 따른 추정치 향상 및 데이터 수집체계 고도화에 따라 도시철도 이용거리를 보다 정확히 파악할 수 있다. 보다 객관적인 데이터를 기반으로 다양한 시뮬레이션을 통해 수도권통합요금체계의 합리적 대안을 제시한다면, 운영기관들이 합의점에 보다 원활하게 도달할 수 있을 것이다.

4) 새로운 서비스 도입에 따른 모빌리티 변화 예측

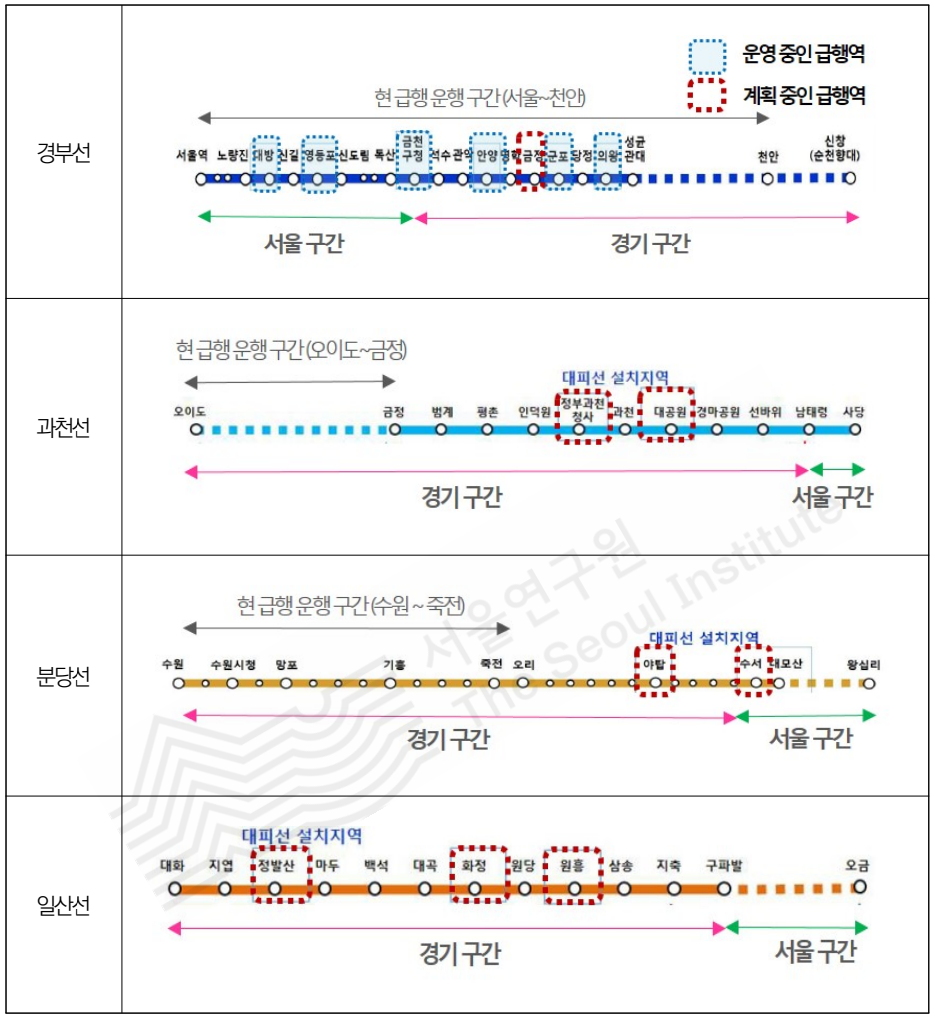
대중교통은 고정된 스케줄 기반 서비스 공급의 특성 때문에, 서비스의 변화 빈도가 높으면 정기이용 승객의 피로도와 불만이 높다. 또한, 서비스 변화에 따른 서비스 품질 향상의 보장이 없기 때문에, 운영기관 입장에서도 보수적인 입장을 취할 수밖에 없다.
도시철도 급행화는 도시철도 이동성을 향상시킬 수 있는 대표적인 방법이다. 9호선은 우리나라에서 가장 효율적으로 운영하고 있는 노선은 서울시 9호선이다. 김포공항에서 고속터미널까지 27분이 소요되어 완행 44분 대비 약 40%의 시간단축 효과가 있다.

[표 3-7] 운행 중인 급행서비스

노선	구간	운행(양방향 기준)
경인선	용산~동인천	상시운행
경의선	서울역~일산	26/일
안산선	오이도~금정	8회/일
경부선	서울역~천안	34회/일
경원선	광운대~동두천	5회/일
중앙선	용산~용문	4회/일
경춘선	용산~춘천	41회/일
분당선	죽전~수원	12회/일
수인선	오이도~인천	8회/일
공항철도	서울~인천공항	58회/일

자료: 한국철도공사(info.korail.com)

국토교통부는 경부선, 분당선, 과천선, 일산선 급행화 계획을 발표하였는데, 이는 경기도에서 서울시 경계까지에 해당된 구간이다.

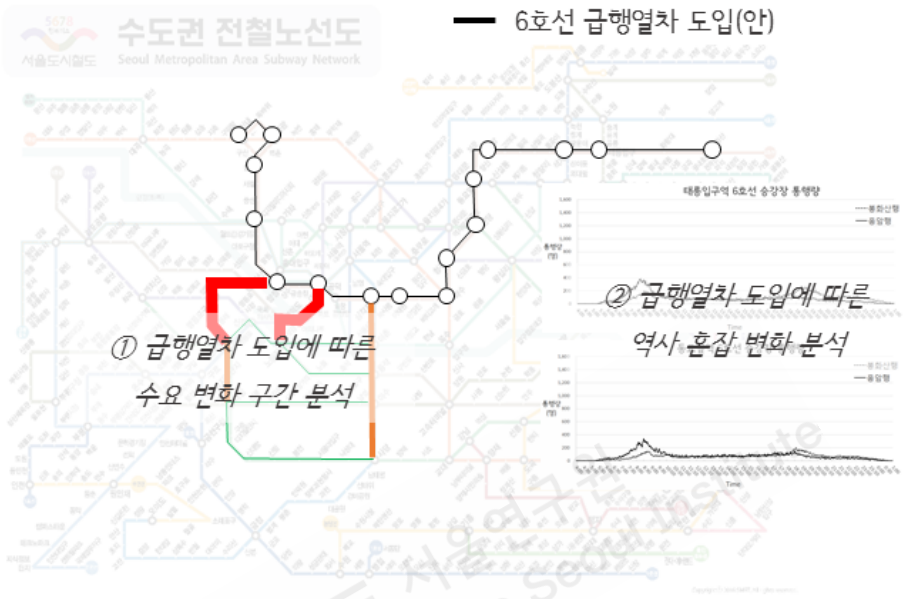


[그림 3-22] 수도권 급행열차 서비스 확대 계획

출처: 국토교통부 보도자료

서울시 6호선은 급행열차가 논의된 바 있으나, 안전상 문제로 공덕역·새절역에 대피선을 추가 설치해야 하는 비용 부담이 있기 때문이다. 급행열차 도입으로 인해 서울 내부 통행시간이 감소하면, 승객 이동성 및 만족도 향상, 더 나아가 승용차 수요 전환도 기대할 수 있다. 하지만 급행화에 대한 보다 정밀한 수요 예측이 필요하며, 급행화에 따른

피해를 보는 승객은 없는지, 혼잡도가 증가하는 구간이나 역사가 없는지 검토해야 한다. 상시분석체계를 통해 축적된 모빌리티 패턴을 통해 이를 분석하면, 급행화에 따른 수도권 통합모빌리티의 변화를 보다 정확하게 예측할 수 있다.

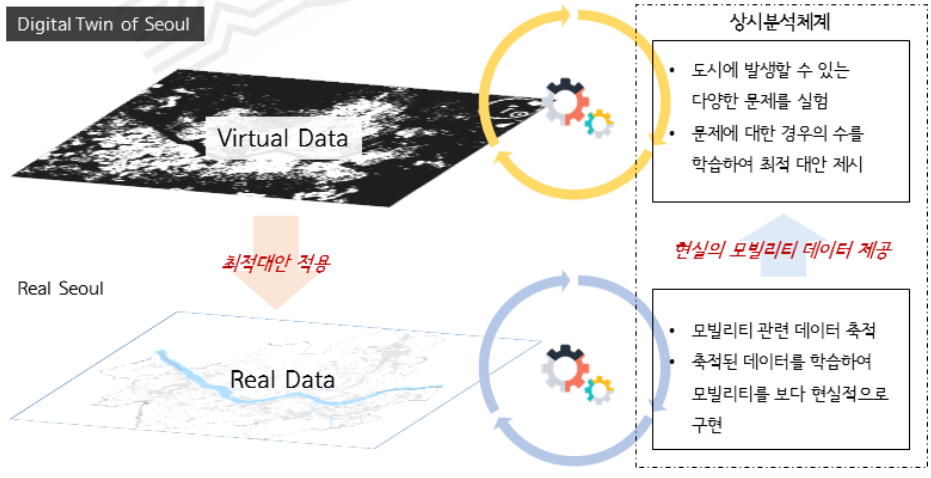


[그림 3-23] 6호선 급행화 추진에 따른 분석(안)

4_결론

도시철도가 수도권 대중교통의 간선 대규모 수송을 담당하고 있는 만큼, 이용 승객의 모빌리티를 파악하는 것은 매우 중요하다. 상대적으로 수송 규모가 적고 지선 역할을 담당하는 시내버스의 경우, TOPIS, BIS, BMS 등 버스분석체계를 통해 모빌리티 파악이 용이하다. 하지만, 역사 및 열차 규모가 버스에 비해 월등히 큰 도시철도는 승객 모빌리티의 파악이 쉽지 않다. 도시철도 모빌리티 파악을 위해서는 365일 24시간 축적된 다년간의 데이터를 활용한 노선 및 승강장의 동적 혼잡도 추정 모형을 구축해야 한다. 이 모형을 기반으로 상시분석체계를 구축할 수 있으며, 본 연구에서는 이를 이용한 다양한 활용 방안을 제시하였다.

서울시 및 서울교통공사는 상시분석체계의 성공적인 도입을 위해 상시분석체계의 일부 성능 구현을 통해 시범 사업을 진행하여 효과분석을 수행할 필요가 있다. 이를 통해 상시분석체계의 필요성에 대한 공감대 형성과 적극적인 투자를 통한 고도화 전략이 필요하다. 더 나아가, 향후 서울시 스마트 시티 지원을 위한 디지털 트윈의 대중교통 모듈로 작동할 수 있도록 상시분석체계의 발전 방향성을 설정해야 한다. 서울시민의 중요한 이동 수단으로 역할하고 있는 만큼, 상시분석체계를 통해 도시철도 네트워크에서 발생할 수 있는 다양한 문제와 경우의 수를 학습하여 최적의 대안을 제시하여 대중교통의 모빌리티 향상에 기여해야 한다.



[그림 3-24] 디지털 트윈에서 상시분석체계의 역할

참고문헌

국토교통과학기술진흥원, 2018,「도시철도 역사 이용객 편의성 향상 기술 개발」.

김경민·오석문·노학래, 2016, “서울지하철 9호선 2단계 개통에 따른 급행열차 선택 및 혼잡도 변화분석”, 한국철도학회 논문집, 19(5), pp.663-671.

서울연구원, 2017,「교통카드자료 기반 도시철도 승강장의 동적 혼잡도 분석」

이광섭·엄진기·유소영·민재홍·양근율, 2014, “강우와 서울시 대중교통 승차인원과의 관계 분석”, 한국철도학회 학술발표대회논문집, pp.252-257.

이정훈·정헌영, 2018, “분위 회귀를 활용한 기상조건이 대중교통 수단별 통행량에 미치는 영향에 대한 연구”, 국토계획, 53(4), pp.95-106.

이호·최진경, 2015, “대중교통카드 자료를 활용한 도시철도 승강장 혼잡도 추정 알고리즘 개발”, 한국철도학회 논문집, 18(3), pp.270-277.

Hong, Sung-Pil, et al., 2016, "Precise estimation of connections of metro passengers from Smart Card data", Transportation, 43(5), pp.749-769.

Rodríguez-Núñez, E., & García-Palomares, J. C., 2014, “Measuring the vulnerability of public transport networks”, Journal of transport geography, 35, pp.50-63.

TfL, 2017, “Review of the TfL WiFi pilot”.

서울연구원 The Seoul Institute

Abstract

Proposing Seoul Metro Mobility Analysis System

Seoung-il Shin · Changhoon Lee · Sehyun Park

Seoul Metro plays a critical role in public transportation system in Seoul Metropolitan area. Due to the wide usage of the Smart Card, individuals' mobility are captured. According to the attribute of the Smart Card data, it is hard to analyze the mobility of the Seoul Metro. It is necessary to understand mobilities of the Metro users in order to improve the operating system and the services related to public transportation system. Our study suggests to build Seoul Metro Network Analysis System. It has been proven by the earlier studies that it is possible to predict mobilities of Metro users by Smart Card data. We suggest a dynamic assignment model to estimate user mobility in the station. Using Metro schedule data and rolling horizon method, user mobilities are estimated network-wide. It is possible to catch a mobility in a selected station or line in the system. Many benefits are expected such as solutions for mobility patterns, simulating events, impact analysis and so on.

Contents

01 Introduction

1. Background and Purpose of the Study
2. Main Contents and Research Methods

02 Related Cases and Studies

1. Case of London Tube Mobility Analysis
2. Related Studies

03 Seoul Metro Mobility Analysis System

1. Metro Mobility Characteristics
2. System Improvement strategies
3. Benefits of the System
4. Conclusion

서울연구원 The Seoul Institute

서울시 도시철도 통합모빌리티 상시분석체계 구축방안

SeTTA 2019-CR-05

발행일 2019년 11월 15일
발행처 서울싱크탱크협의체
ISBN 979-11-5700-479-9 93300 비매품

06756 서울특별시 서초구 남부순환로 340길 57
04806 서울특별시 성동구 천호대로 346

이 출판물의 판권은 서울연구원, 서울교통공사에 속합니다.