

교통카드자료 기반 도시철도 승강장의 동적 혼잡도 분석

신성일 이민호

Analysis of Time Dependent Degree of Crowding of Urban Railway Platforms Using Smart Card Data



서울연구원
The Seoul Institute

교통카드자료 기반
도시철도 승강장의
동적 혼잡도 분석

연구책임

신성일

교통시스템연구실 연구위원

연구진

이민호

교통시스템연구실 연구원

이 보고서의 내용은 연구진의 견해로서
서울특별시의 정책과는 다를 수도 있습니다.

요약

환승우세 역사에 시설구조면적 확장 포함 승강장 통행특성별 혼잡도 개선방안 필요

도시철도 하루 800만명 이용...승강장 혼잡은 열차지연·사고초래 우려

수도권 도시철도는 전체 600여 개 역사에서 하루 평균 약 800만 명이 이용하는 대중교통 수단이다. 이용 승객이 출퇴근 첨두시간에 집중됨에 따라 열차가 지연되어 각종 안전사고와 범죄에 노출되어 있다. 서울시는 역사 내 승강장, 통로, 계단, 에스컬레이터와 같은 물리적인 시설 개선을 통해 승강장 혼잡도를 관리하는 방안을 시행하고 있다. 하지만 물리적 시설 확충이 예산 대비 효과가 크지 않아 첨두시 집중되는 수요를 분산하는 방안의 실행이 보다 요구된다.

특히 다수의 도시철도 승객의 열차 대기 및 역사이동행태가 집중되는 승강장은 역사 내부 시설 중 가장 혼잡한 공간 중 하나이다. 승강장 혼잡은 열차지연을 초래할 뿐만 아니라 화재와 같은 긴급 상황에서 혼란을 더욱 가중시킬 수 있다. 따라서 도시철도 승강장의 적절한 혼잡도 관리는 효율적인 열차운행관리와 더불어 승객안전사고위험 방지를 위해 중요성이 점차 부각되고 있다.

승강장 동적 혼잡도 추정에 AFC·ICT 접목한 교통카드자료 활용 필요

승강장의 적정 혼잡도 관리를 위해서는 승객통행의 집중행태 파악이 선행되어야 한다. 수도권 모든 역사의 승객이동이 유기적으로 연관되어 있기 때문에 수도권 네트워크 차원에서 분석할 필요가 있다. 하지만 기존 승강장 혼잡도는 1~2년 주기로 특정 장소와 선별된 시간에 추정된다. 시공간으로 제한된 이러한 방식은 혼잡도 개선정책 도입을 위해 활용하기에는 한계가 있다. 최근 자동요금징수체계(AFC)와 정보통신기술(ICT)이 접목된 교통카드자료 기반의 혼잡도 추정방안이 대안으로 논의되고 있다. 수도권 카드자료는 매일 실시간 생성되는 전수데이터로서 시간대, 요일, 월, 연 단위의 승강장 혼잡에 대한 저렴한 기초자료의 생성대안으로 활용될 수 있다.

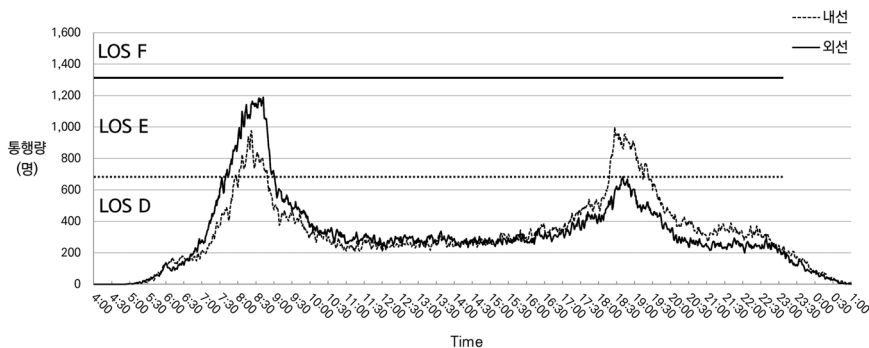
본 연구는 교통카드자료를 활용하여 수도권 도시철도 승강장의 혼잡도를 동적으로 추정하는 방안을 제안하였다. 여기에서 ‘동적’이란 용어는 교통카드자료를 활용하여 모든 도시철도 이용자가 움직이는 시간대별 궤적을 파악하여, 집중 및 분산되는 수요를 1분 단위로 추정하는 동적 통행이동모형으로 시간대별 통행량과 혼잡도 변화 양상을 추정하는 것을 의미한다. 즉, 1분 단위로 도시철도 역사 승강장 수요를 자체역사 환승통행, 자체역사이용통행, 노선 간 환승통행으로 구분하여 개별 역사의 승강장 혼잡도를 추정하였다. 마지막으로, 개별 역사별 특성에 맞는 개선전략을 제안하고, 정책 사례 분석으로 수요관리 정책의 일종인 Early Bird 정책 도입 효과를 평가하였다.

승강장 혼잡도, 2호선 동대문역사문화공원역이 도시철도 역사 중 최고

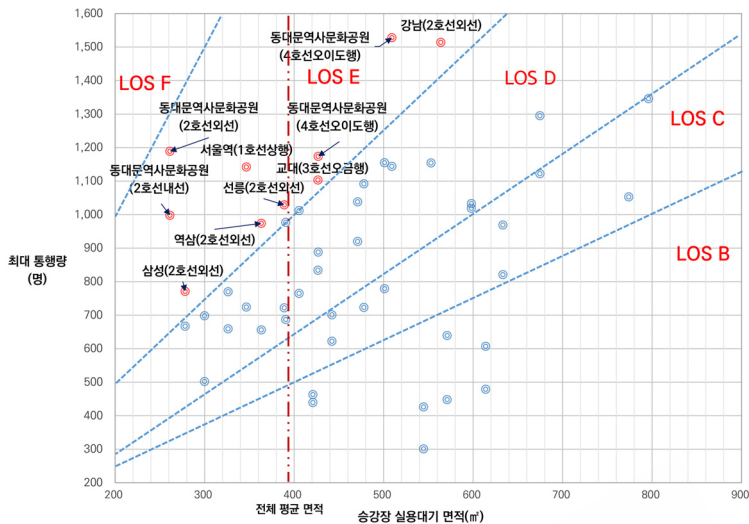
도시철도 정거장 및 환승편의시설 설계 지침에 따르면 역사 승강장은 서비스 수준 D로 설계하도록 제안하고 있다. 이를 기준으로 도시철도 역사 승강장에 대한 서비스 수준을 평가하였다.

도시철도 역사 중 가장 혼잡도가 높은 역사는 2호선 동대문역사문화공원역으로 나타났다. 특히 외선 방향 승강장의 경우 면적이 매우 협소한 반면 출근 첨두시간에 승객이 매우 집중하여 가장 혼잡한 시간의 승객 1인당 대기면적은 $0.22\text{m}^2/\text{인}$ 으로 서비스 수준 F에 육박하고 있다. 내선 방향의 승강장에서도 퇴근 첨두시간에 $0.26\text{m}^2/\text{인}$ (서비스 수준 E)으로 혼잡도가 매우 높다.

기타 강남 도심에 위치한 강남역, 역삼역, 삼성역, 선릉역과 주요 환승 역사인 동대문역사문화공원역, 서울역 등에서 서비스 수준 E로 나타나 개선이 필요한 것으로 진단된다.



[그림 1] 동대문역사문화공원역 통행량 시계열 및 서비스 수준



[그림 2] 철도 통행량과 실용대기면적에 따른 승강장 혼잡도

승하차통행·환승통행 우세 등으로 나눠 승강장 혼잡도 완화정책 마련

승하차 통행이 우세한 역사에서는 승객의 이동 경로가 명확하기 때문에 수요 분산이나 대체수단 도입을 통해 승객을 분산시켜 승강장 혼잡도를 완화시키는 방안이 효과적이다. 시간 차등 요금제 및 기업체 유연근무제 등을 통해 출·퇴근 목적 통행 분산을 위한 다양한 수요 분산 정책 도입과, 수요대응형 버스 도입을 검토해야 할 것이다. 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.

따라서 승강장 구조 개선 전략을 통해 시설 구조 용량을 확장하는 방안이 타당하다. 환승 통행의 비율이 높은 동대문역사문화공원역사의 경우 2호선 승강장은 수도권 도시철도 역사 전체와 비교했을 때 승강장 면적이 매우 협소한 역 중 하나이다. 동시에 고속터미널역, 사당역, 교대역, 서울역은 통행량에 비해 승강장 면적이 매우 협소하다. 또한 서울역, 동대문역사문화공원역, 종로3가역은 노선 간 환승거리가 길어 역사의 승강장 혼잡을 가중시키는 것으로 나타났다. 따라서 환승통행비율이 높은 역사의 혼잡도를 개선하기 위해서는 승강장구조면적을 확장하고, 동시에 기타 환승시설에 대한 개선사업을 병행하여 실시할 필요가 있다.

[표 1] 혼잡도 개선 주요 전략

정책	전략	세부 내용	현재 반영	장래 반영
구조 개선 정책	승강장을 비롯한 도시철도 내부 구조 개선	• 승강장 면적 확장을 통한 혼잡 완화 • 승강장과 환승통로의 연결성 개선	△	○
첨두 수요 분산 정책	첨두시간 수요 분산 전략	• 차등 요금제 적용 • 기업체 유연근무제 권장	△	○
	도시철도 무임승차 개선	• 무임승차 승객 출퇴근 혼잡시간 요금 부과 • 무임승차 승객 조건 강화(연령 상향 조정)	×	○
수단 간 분산 정책	DeRoute 전략	• 혼잡 역사 간 수요대응 버스 도입	×	○

주: ○(반영), △(일부반영), ×(미반영)

유연근무제 등 수요분산정책 적극 도입때 승강장 혼잡도 완화에 기여

승강장 혼잡을 완화하기 위해 국내외 관련 정책을 검토하고 국내 실정에 적합한 승강장 혼잡도 개선전략을 구축한다. 현재 국내 실정을 감안한 적절한 승객분산전략은 차등요금제와 같은 요금할인정책의 시행이다. 정책사례로서 현재 서울시는 첨두시간에 집중되던 통행량을 비첨두 시간으로 유인하는 조조할인제도를 시행하고 있다. 조조할인제도는 기업체 유연근무제(Early Bird, 자율출퇴근, 책임근무제 등)와 같은 조직문화의 정착을 지원하는 방안으로 활용되는 첨두시 수요분산정책이다. 실제 국내외 다수의 기업에서 유연근무제를 시행하고 있다. 통행수요에 영향을 미치는 기업체에서 보편적으로 시행되면 승강장 혼잡 완화에 긍정적인 효과를 나타낼 것으로 예상된다.

본 연구에서는 Early Bird 정책에 따른 혼잡 완화 기대효과를 추정하기 위해 사례분석을 하였다. 정책이 시행된다는 가정하에 첨두시 통행량이 감소될 경우를 대비한 승강장 혼잡도의 민감도를 분석하였다. 사례분석지역으로 2호선 강남 도심권역에 위치한 역사를 선정하였다. 특히 사당-삼성역 구간은 통행량이 가장 많고, 혼잡도도 가장 높은 구간으로 개선이 필요하여 사례 분석 지역으로 적합하다. 시간대의 경우 승객이 집중되는 오전 8~9시에서 오전 7~8시로 통행 시간을 이전하는 가정을 도입하였다.

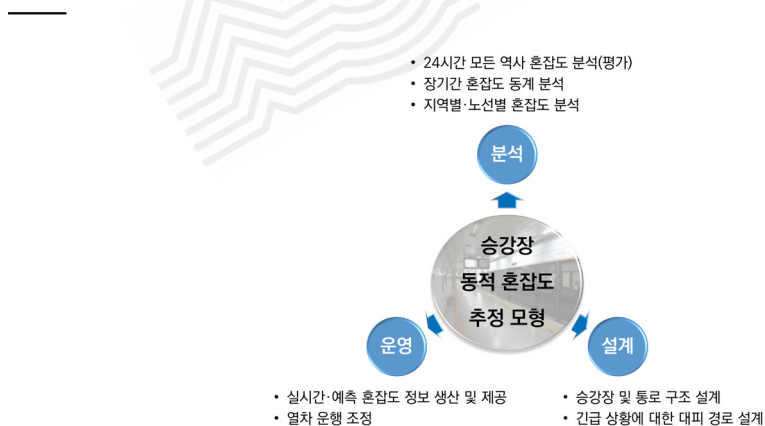
[표 2] 대안별 세부 내용

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

분석 결과, 강남역의 경우 대안 2의 외선 승강장에서 혼잡도 서비스 수준이 LOS E에서 D로 개선되었으며, 통행량은 최대혼잡시간 기준 11.2%가 감소되었다. 사당역도 대안 2에서 LOS D에서 C로 개선되었으며, 통행량은 최대혼잡시간 기준 9.7%가 감소되었다. 또한 주변 혼잡역사(신도림역, 잠실역)에서도 간접적인 혼잡도 완화 효과가 증명되었다. 신도림 역사의 경우 대안 2에서 통행량이 최대혼잡시간 기준 6.0%가 감소하였고, 잠실역의 경우 10% 감소하였다.

Early Bird 정책을 포함한 수요분산정책을 적극적으로 도입할 경우 승강장 혼잡도 완화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

‘동적 혼잡도 추정모형’은 승강장 혼잡도 분석·운영·설계에 활용 가능



[그림 3] 승강장 동적 혼잡도 추정 모형 활용방안

본 연구는 승강장 혼잡도 분석, 운영, 설계 등 3가지 측면에서 승강장 동적 혼잡도 추정 모형의 향후 활용방안에 대해 제시하였다.

첫째, 분석 측면에서는 혼잡도 추정의 시공간적인 제약이 없기 때문에 혼잡도 변화에 대한 장기 기간 분석이 가능하고, 지역별·노선별 도시철도 혼잡도 평가에 활용 가능하다.

둘째, 운영 측면에서는 승객에게 실시간 및 예측 혼잡도 정보를 제공함으로써, 승객 스스로가 혼잡 시간을 피하거나, 경로를 변경하도록 해 초기 단계의 혼잡도를 개선하기 위한 대응책으로 활용할 수 있을 것이다. 또한 혼잡 완화에 대응하기 위한 열차 스케줄 조정 및 추가 투입 등의 근거자료로 활용할 수 있다.

셋째, 설계 측면에서는 실시간 통행량 정보를 토대로 승객수를 산출하기 때문에 승강장 구조 설계 및 변경에 적극 활용할 수 있다. 또한 긴급 상황에 대비하여 대피 공간 및 대피 경로 설계 등에 활용할 수 있다.



목차

01 연구개요	2
1_연구배경 및 목적	2
2_연구방법	3
02 도시철도 승강장 동적 혼잡도 추정	6
1_기초데이터 구축	6
2_승강장 동적 혼잡도 추정 모형	11
3_승강장 동적 혼잡도 추정 방법	13
03 도시철도 승강장 통행량 분석	34
1_수도권 도시철도 일반 통행량 분석	34
2_수도권 도시철도 노선별 통행량 분석	38
04 도시철도 승강장 동적 혼잡도 사례분석	50
1_노선승하차 통행 비율이 높은 역사 사례	51
2_환승통행 비율이 높은 역사 사례	56
05 도시철도 승강장 동적 혼잡도 개선방안	68
1_도시철도 혼잡 완화 정책 사례	68
2_승강장 혼잡도 개선을 위한 전략	74
3_교통카드 기반 수요분석 모형의 활용방안	84
참고문헌	89
부록	91
Abstract	132

표

[표 2-1] 교통카드자료 세부 특성	6
[표 2-2] 철도네트워크 노드자료 예시	9
[표 2-3] 도시철도 네트워크(링크자료) 예시	10
[표 2-4] 도시철도 환승자료 예시	10
[표 2-5] 도시철도 노선별 배차간격 예시	10
[표 2-6] 승강장 동적 혼잡도 모형	13
[표 2-7] 승강장에서의 통행 속성	14
[표 2-8] 경로기반 변동부등식 모형	17
[표 2-9] 혼잡을 고려하지 않은 변동부등식 모형	18
[표 2-10] 일반화 비용 모형	18
[표 2-11] 동적 통행배정모형(노선 통행량)	19
[표 2-12] 특정 승강장 통과 수요 산출 모형(승강장 통행량)	21
[표 2-13] 민자 환승 정보를 활용한 검증 결과	22
[표 2-14] 2호선 주요 역사별 면적 현황	27
[표 2-15] 국내 승강장 서비스 수준 설계 기준	28
[표 2-16] 국내 승강장 혼잡도 기준 조항	29
[표 2-17] 미국의 승차계수에 따른 서비스 수준	31
[표 2-18] 국외 혼잡도 서비스 수준 기준	31
[표 3-1] 주요 역사의 승하차 통행량	35
[표 3-2] 전체 통행량 상위 10개 역사	36
[표 3-3] 통행 종류별 통행량 상위 5개 역사 현황	37

[표 3-4] 환승 및 비환승 역사 비교 분석	37
[표 3-5] 도시철도 혼잡도 상위 10개 구간 현황	46
[표 4-1] 강남 도심 및 인근 역사별 승강장 면적 및 혼잡도	54
[표 4-2] 동대문역사문화공원역 승강장별 면적 및 혼잡도	60
[표 4-3] 고속터미널역 승강장 면적 및 혼잡도	62
[표 4-4] 사당역 및 교대역 승강장 면적 및 혼잡도	64
[표 5-1] 국내의 도시철도 혼잡도 완화정책 현황	70
[표 5-2] 국외의 도시철도 혼잡도 완화정책 현황	71
[표 5-3] 도시별 도시철도 차등요금제 현황	73
[표 5-4] 혼잡도 개선 주요 전략	75
[표 5-5] 주요 역사별 승강장 구조 변경 내용	75
[표 5-6] 대안별 세부 내용	77
[표 5-7] 강남역 대안별 분석 결과	77
[표 5-8] 사당역 대안별 분석 결과	78
[표 5-9] 신도림역 대안별 분석	80
[표 5-10] 잠실역 대안별 분석	81
[표 5-11] 무임승차 통행량 비율	82
[표 5-12] 2호선 주요 혼잡 역사 간 OD 통행량	83

그림

[그림 1-1] 도시철도 정거장 및 환승·편의시설 설계 지침의 승강장 계획 설계 과정	3
[그림 1-2] 연구 절차	4
[그림 2-1] '16년 10월 17일 수도권 도시철도 교통카드 종류별 비율	7
[그림 2-2] 도시철도 9호선 환승 태그	8
[그림 2-3] 수도권 도시철도 네트워크	9
[그림 2-4] 수도권 버스 정류장 분포 현황	11
[그림 2-5] 상대식 승강장의 통행 흐름	15
[그림 2-6] 섬식 승강장의 통행 흐름	15
[그림 2-7] 대중교통 연계 통행 예시(Trip-Chain)	16
[그림 2-8] 교통카드자료를 활용한 최적 경로 예시	17
[그림 2-9] 노선 이동 개념도	20
[그림 2-10] 부평시장역-부평역 15분 동적통행량	20
[그림 2-11] 부평시장역-부평역 5분 동적통행량	20
[그림 2-12] 노선 환승 개념도	20
[그림 2-13] 노선 하차 개념도	20
[그림 2-14] 노선 승차 개념도	20
[그림 2-15] 승강장 구조 종류(좌: 섬식, 우: 상대식)	23
[그림 2-16] 실용대기면적	25
[그림 2-17] 도시철도 승강장 평균 면적	26
[그림 3-1] '16년 10월 17일 기준 일일 통행 현황	34
[그림 3-2] 환승 역사에서의 보행 종류별 통행 비율	38

[그림 3-3] 도시철도 1호선 노선 통행량	39
[그림 3-4] 2호선 내선방향 승강장 최대혼잡도 서비스 수준	40
[그림 3-5] 2호선 외선방향 승강장 최대혼잡도 서비스 수준	40
[그림 3-6] 도시철도 3호선 노선 통행량	41
[그림 3-7] 도시철도 4호선 노선 통행량	42
[그림 3-8] 도시철도 5호선 노선 통행량	43
[그림 3-9] 도시철도 6호선 노선 통행량	44
[그림 3-10] 도시철도 7호선 노선 통행량	45
[그림 3-11] 도시철도 8호선 노선 통행량	46
[그림 3-12] 도시철도 9호선 노선 통행량	47
[그림 4-1] 최대 통행량과 실용대기면적에 따른 승강장 혼잡도	50
[그림 4-2] 주요 환승 역사의 환승 이동거리 및 최대 통행량 양상	50
[그림 4-3] 강남역 내부 구조	51
[그림 4-4] 강남역 통행 종류별 비율	51
[그림 4-5] 잠실역 내부 구조	52
[그림 4-6] 잠실역 통행 종류별 비율	52
[그림 4-7] 강남역 내·외선 승강장에서의 시간별 혼잡도	53
[그림 4-8] 구별 사업체 분포 현황	55
[그림 4-9] 신도림역 및 동대문역사문화공원역 내부 구조	56
[그림 4-10] 신도림역 및 동대문역사문화공원역 통행 종류별 비율	56
[그림 4-11] 사당역 및 교대역 내부 구조	57
[그림 4-12] 사당역 및 교대역 통행 종류별 비율	57
[그림 4-13] 고속터미널역 및 서울역 내부 구조	57
[그림 4-14] 고속터미널역 및 서울역 통행 종류별 비율	58
[그림 4-15] 종로3가역 및 왕십리역 내부 구조	58

[그림 4-16] 종로3가역 및 왕십리역 통행 종류별 비율	58
[그림 4-17] 신도림역 2호선 승강장별 통행량 시계열	59
[그림 4-18] 동대문역사문화공원역 2호선 승강장별 통행량 시계열	61
[그림 4-19] 고속터미널역 통행 세부 현황	62
[그림 4-20] 고속터미널역 9호선 승강장별 통행량 시계열	62
[그림 4-21] 서울역 4호선 승강장별 통행량 시계열	63
[그림 4-22] 교대역 3호선 승강장별 통행량 시계열	64
[그림 4-23] 종로3가역 3호선 승강장별 통행량 시계열	65
[그림 4-24] 왕십리역 2호선 승강장별 통행량 시계열	65
[그림 5-1] 강남역 승강장 대안별 혼잡도 분석 결과	78
[그림 5-2] 강남역 승강장 대안별 통행량 편차	78
[그림 5-3] 사당역 승강장 대안별 혼잡도 분석 결과	79
[그림 5-4] 사당역 승강장 대안별 통행량 편차	79
[그림 5-5] 신도림역 승강장 대안별 혼잡도 분석 결과	80
[그림 5-6] 신도림역 승강장 대안별 통행량 편차	80
[그림 5-7] 잠실역 승강장 대안별 혼잡도 분석 결과	81
[그림 5-8] 잠실역 승강장 대안별 통행량 편차	81
[그림 5-9] 9호선 가양·여의도 급행순환버스 경로	83
[그림 5-10] 승강장 동적 혼잡도 추정 모형 활용방안	84
[그림 5-11] Urban Engines에서 제공하는 사용자 지원 정보	85
[그림 5-12] Urban Engines에서 제공하는 대중교통 혼잡 정보	85

01

연구개요

1_연구배경 및 목적

2_연구방법

01 | 연구개요

1_연구배경 및 목적

도시철도 역사 승강장은 역사에서 승객의 열차대기 및 역사이동행태가 집중되어 나타나는 장소이다. 따라서 도시철도 역사 승강장의 적절한 혼잡도 유지는 열차운행관리의 기준이 될 뿐만 아니라 승객안전사고위험에 대비하기 위하여 중요성이 강조되는 부분이다. 서울시는 역사 내 통로, 계단, 에스컬레이터와 같은 물리적인 시설과 함께 특정 시간대 역사에 집중되는 수요억제를 통하여 승강장 혼잡도를 관리하는 방안을 시행하고 있다. 그러나 물리적인 시설 확충이 예산 대비 효과가 크지 않아 첨두시 집중되는 수요를 분산하는 방안의 실행이 보다 요구되는 실정이다. 최근 서울시에서 시행 중인 ‘대중교통조조할인’은 대표사례로 향후 더욱 다양한 수요관리정책 도입의 필요성이 제기되고 있다.

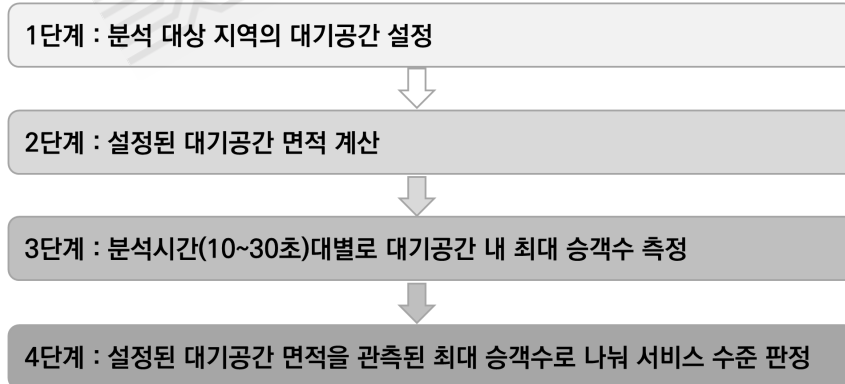
서울시 도시철도 승강장 혼잡도 관리를 위해서는 역사, 승강장, 시간대별 통행 집중행태 파악이 선행되어야 하며, 이는 수도권 도시철도 네트워크 차원에서 분석할 필요성이 있다. 서울시내 특정 도시철도의 정 역사 승강장 혼잡은 이전 시간대 수도권 전체 역사에서 파생된 승객의 통행 결과로서 로 유기적인 연관성을 갖기 때문이다. 그러나 기존 승강장 혼잡도 추정은 1-2년 주기의 특정 장소 및 선별된 시간에 수행되는 계수 방법에 의존하고 있어, 정확성이 결여된다. 이와 같은 부정확한 추정결과가 정책 도입을 위한 판단 근거로 적용하기에는 문제가 있다. 따라서 최근 AFC(Automated Card Collection)와 ICT(Information Communication Technology) 기술이 접목된 대중교통카드자료를 활용하여 승강장 혼잡도를 시간대별로 추정하는 대안이 검토되고 있다. 수도권의 대중교통 카드는 일일 약 800만 명의 승객 통행 자료를 포함하며, 이는 10개 노선 약 600개 이상의 수도권 도시철도역사에서 나타나는 진출입역사, 단말기, 시간대 정보를 망라한다. 무엇보다도 이들 자료는 매일 생성되는 자료로서 시간대, 요일, 월, 연도 단위의 승강장 혼잡에 대한 저렴한 기초자료 생성대안으로 활용될 수 있는 장점이 있다.

본 연구는 수도권 도시철도 승강장의 혼잡도를 동적으로 추정하기 위해 교통카드자료를

활용하였다. 여기에서 ‘동적’이란 용어는 교통카드자료를 활용하여 모든 도시철도 이용자가 움직이는 시간대별 궤적을 파악하여, 집중 및 분산되는 수요를 1분 단위로 추정하는 동적 통행이동모형으로 시간대별 통행량과 혼잡도 변화 양상을 추정하는 것을 의미한다. 또한 도시철도 역사 승강장 수요를 자체 역사환승통행, 자체역사이용통행, 노선 간 환승 통행으로 구분하여 개별 역사의 승강장 혼잡도를 추정하였다. 마지막으로 개별 역사별 특성에 맞는 개선전략을 제안하고, 정책 사례 분석으로 수요관리 정책의 일종인 Early Bird 정책 도입 효과를 평가하였다.

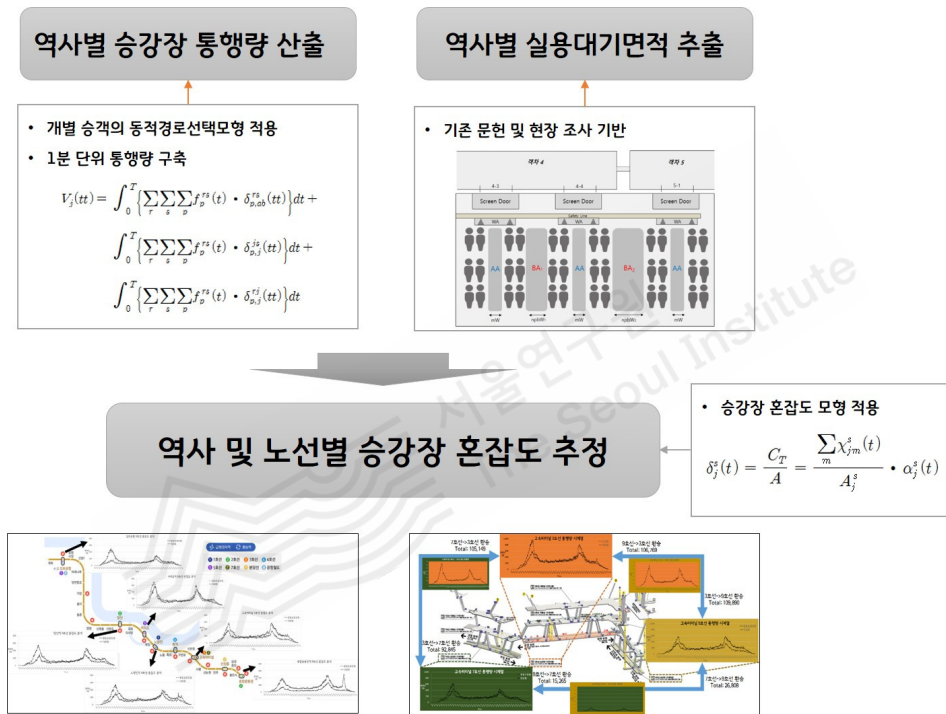
2_연구방법

국내 도로용량편람에서는 보행자시설 설계에 관한 지침 내용과 함께 승객 대기공간의 서비스 수준을 4단계 절차로 분석하는 방법을 제시하고 있다. 또한 도시철도 정거장 및 환승·편의시설 설계 지침은 투자재원의 효율성과 사회적·경제적인 측면을 고려하여 적절한 수준에서 보행시설을 설계하도록 제안하고 있다. 따라서 본 연구는 이 두 개 지침의 적정 보행시설 설계기준 도출 절차를 준용하여 도시철도 승강장 혼잡도와 서비스 수준을 분석한다.



[그림 1-1] 도시철도 정거장 및 환승·편의시설 설계 지침의 승강장 계획 설계 과정

이를 위해 먼저 교통카드자료를 활용하여 승하차 통행은 물론 환승 수요까지 고려한 승강장 혼잡도를 추정한다. 교통카드자료가 활용된 최적 경로 선택 모형을 통해 수도권 도시철도 역사 통행량을 추정하여, 개별 역사 승강장을 경유하는 승객의 통행량을 산출한다. 동시에 승강장 구조를 분석하여 실용대기면적을 도출한다. 승강장 통행량과 실용대기면적이 구축되면 역사·노선별 승강장 혼잡도를 추정한다. 마지막으로 혼잡도가 높은 역사를 중심으로 개별 역사 특성에 적합한 혼잡도 완화 전략을 제시한다.



현황 진단 및 개선 전략 수립

[그림 1-2] 연구 절차

02

도시철도 승강장 동적 혼잡도 추정

- 1_기초데이터 구축
- 2_승강장 동적 혼잡도 추정 모형
- 3_승강장 동적 혼잡도 추정 방법

02 | 도시철도 승강장 동적 혼잡도 추정

1_기초데이터 구축

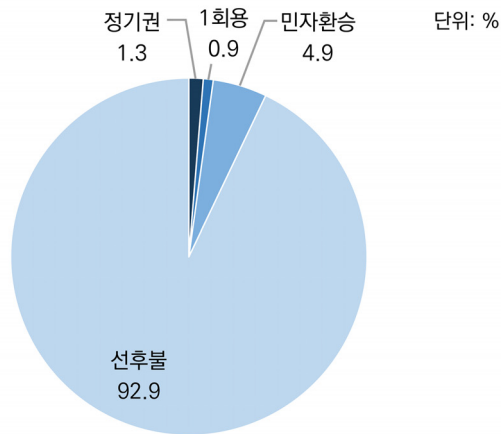
대중교통체계 개편과 동시에 도입된 교통카드는 전자 태그로 통행 자료가 자동으로 저장됨에 따라 활용성이 뛰어나다. 서울시 내부 자료에 의하면 2016년 서울 시내버스 기준 교통카드 이용객 비율은 98%이며, 도시철도의 경우 이용객 100%가 교통카드를 이용했다. 수도권 통행 자료가 대부분 빅데이터로 저장되기 때문에 교통카드 데이터는 전수 자료로서 가치가 생겼다. 따라서 교통카드자료를 활용하여 수도권 도시철도 역사별 통행 수요를 분석할 경우 신뢰도 높은 결과를 기대할 수 있다.

1) 교통카드자료

수도권 승객 통행은 하루 평균 약 2,000만 건이 발생하며, 이는 교통카드에 Trip-Chain 형식의 자료로 약 1,500만 건이 생성된다. 이는 선·후불 교통카드자료가 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.

[표 2-1] 교통카드자료 세부 특성

특성	내용
공간적 범위	서울·인천·경기
시간적 범위	2016년 10월 17일
내용적 범위	교통카드자료로 집계된 하루 통행
데이터 종류	- 도시철도 전체 통행 전수자료 - 선후불 교통카드, 일회용, 정기권 자료(통행 분석) - 민자 환승자료(검증)



[그림 2-1] '16년 10월 17일 수도권 도시철도 교통카드 종류별 비율

(1) 선·후불 교통카드자료

수도권에서 현재 95% 이상 사용되는 교통카드는 선·후불카드이며, 저장 데이터에 버스와 도시철도 복합교통수단 통행을 최대 5회(환승은 최대 4회) 포함한다.

(2) 정기권

수도권 도시철도 정기권은 크게 서울전용과 거리비례용 두 가지로 나뉜다. 서울 전용의 경우 신분당선을 제외한 서울시에서 운영하는 구간에 있는 도시철도 역사를 이동할 때 사용이 가능하다. 거리비례용 정기권은 수도권 도시철도 전 구간에서 사용할 수 있으며, 이동거리별로 구입가격이 달리 책정되어 있다. 사용 횟수는 30일 이내 60회를 탑승할 수 있도록 설계되어 있고, 일평균 약 20만 건이 기록된다.

(3) 일회용 교통카드

일회용 교통카드는 수도권 도시철도를 1회만 이용할 수 있는 교통카드로서 역사에 설치되어 있는 일회용 발매·교통카드 충전기에서 보증금 500원과 운임을 투입하여 발급받을 수 있다. 수도권 도시철도에서만 사용할 수 있으며, 일평균 약 8만 5천 건이 기록되고 있다. 2016년 일회용 교통카드자료는 승하차 정보가 저장되지 않아 본 연구에서는 승하차 시간 정보가 저장되어 있는 2012년 자료를 분석에 활용하였다.

(4) 환승태그 자료

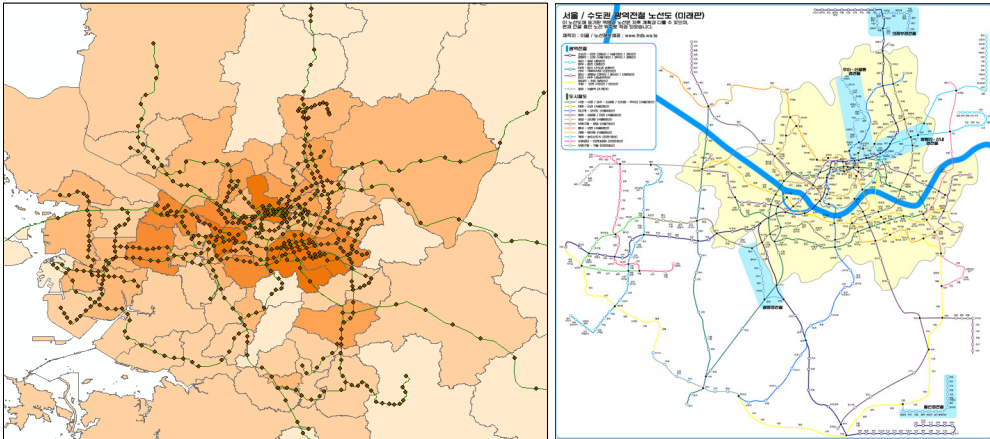
민간 자본(이하 민자)으로 건설된 노선은 수도권 도시철도 노선 중 9호선, 신분당선 등이 존재하고 앞으로 계속해서 증설될 예정이다. 국비로 건설된 일반 노선과 민자 노선 간 환승 승객은 환승 태그를 통과해야 환승이 가능하며, 민자 노선 운영자는 환승 통로에 개찰구를 설치하여 승객을 집계한다. 환승태그 자료는 추후 요금 정산에 활용되며, 9호선, 인천국제공항철도, 경강선 등은 추가 운임이 발생하지 않지만 신분당선과 기타 경전철의 경우 추가 운임이 발생할 수 있다.



[그림 2-2] 도시철도 9호선 환승 태그

2) 수도권 대중교통 물리적 네트워크 구축

수도권 도시철도 통행 분석을 위해 서울, 경기, 인천을 포함하는 전체 물리적 네트워크를 구축하였다(2016년 10월 기준). 먼저 도시철도 역사는 노드로 표지되고 교통카드단말기 번호와 역명 정보 등이 포함된 총 674개로 구성된다. 링크는 도시철도 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 2-3] 수도권 도시철도 네트워크

[표 2-2] 철도네트워크 노드자료 예시

역번호	역명	교통운영기관명	교통수단코드	호선코드	호선명
1001	서울역	한국철도공사	202	101	경부선
1002	남영	한국철도공사	202	101	경부선
1003	용산	한국철도공사	202	101	경부선
1004	노량진	한국철도공사	202	101	경부선
1005	대방	한국철도공사	202	101	경부선
1006	영등포	한국철도공사	202	101	경부선

[표 2-3] 도시철도 네트워크(링크자료) 예시

출발역	도착역	역간거리 (km)	차내시간 (분)	소요시간 (분)	운영기관	호선
서울역	남영	1.7	2.5	3.0	한국철도공사	경부선
남영	용산	1.5	2.0	2.5	한국철도공사	경부선
용산	노량진	2.6	3.0	3.5	한국철도공사	경부선
노량진	대방	1.5	2.0	2.5	한국철도공사	경부선
대방	신길	0.8	1.0	1.5	한국철도공사	경부선
신길	영등포	1.0	2.0	2.5	한국철도공사	경부선
영등포	신도림	1.5	2.0	2.5	한국철도공사	경부선

[표 2-4] 도시철도 환승자료 예시

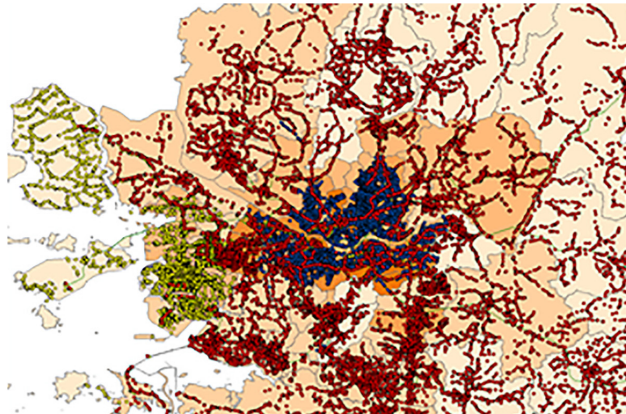
출발역	환승역	도착역	통행시간 (분)	출발노선	도착노선	환승거리 (m)
경찰병원	가락시장	문정	2.3	3호선	8호선	152
경찰병원	가락시장	송파	1.8	3호선	8호선	119
문정	가락시장	경찰병원	2.3	8호선	3호선	152
문정	가락시장	수서	2.3	8호선	3호선	152
송파	가락시장	경찰병원	1.8	8호선	3호선	119
송파	가락시장	수서	1.8	8호선	3호선	119

[표 2-5] 도시철도 노선별 배차간격 예시

노선	배차간격(분)	노선	배차간격(분)
1호선	3.70	경원선	4.72
2호선	4.89	공항철도	6.00
4호선	4.95	용인경전철	5.50

수도권 버스는 서울, 인천, 경기도 3개의 지자체에서 각각 자체 시스템을 관리하고 있다. 2016년 10월 기준 서울시 버스의 경우 14,316개소의 정류장에서 정차하며, 인천시는 5,227개소, 경기도는 30,312개소에서 버스가 정차한다. 각 정류장은 개별 정류장 코드로 관리되고 있으나, 정류장의 물리적인 위치는 관리 기관과 관계없다. 즉, 서울시 버스가

경기·인천 구역까지 진출할 수 있고, 다른 기관의 버스도 마찬가지로 서로 간 진출입이 가능하다.



● 서울버스 정류장 ● 경기버스 정류장 ● 인천버스 정류장

[그림 2-4] 수도권 버스 정류장 현황

2_승강장 동적 혼잡도 추정 모형

1) 승강장 동적 혼잡도 추정 모형 배경

도시철도 정거장 및 환승편의시설 설계 지침에서는 다음과 같은 과정을 거쳐 승강장 승객 수를 산출하고 있다.

- ① 첨두시간 1시간 이용객의 수에서 15분 이용객 수를 산출한다. 이 과정에서 보정 계수 1.2를 곱하여 과소 추정을 보완한다.
- ② 15분 이용객 수에서 1분 이용객 수를 산출한다.
- ③ 1분 이용객 수에 열차 배차 시간을 곱해서 승강장에서 가장 혼잡할 때 승객 수를 최종적으로 산출한다.

①, ②의 과정은 한 시간 집계 데이터에서 1분간 통행량을 산출하기 위한 단계로, 도로용량편람에서는 이동 승객 수를 현장에서 집계하도록 제시하고 있다. 하지만 첨두시간에 대기공간을 이용하는 보행자를 1시간 단위로 집계하여 혼잡도를 추정할 경우 혼잡도 과

소 추정 가능성이 높다. 따라서 승강장 혼잡도에 대한 과소 추정을 보완하기 위해 15분 및 1분 통행량을 추정할 때 할증률을 적용하여 보완한다. ③에서는 열차 배차 시간을 고려하여, 열차 도착시간에 승강장에서 발생하는 혼잡도를 최종적으로 추정하여 설계에 적용하고 있다.

선행 연구에서는 도로용량편람에서 제시하고 있는 계획적인 접근 방식이 아닌 실제 승객의 보행 행태를 현실적으로 구현하고자 시도하고 있다. 윤태관(2010)은 환승 보행시설의 서비스 추정을 할 때 15분 이용객 수를 대기행렬이론에 적용하여 혼잡도 추정 방법의 정확도를 높였다. 장성용(2010)은 보행자의 특성을 세부적으로 분류하여 현실적인 평가 방법을 제안하였다. 하지만 이러한 선행 연구는 기존 관측 값을 보완하거나 실시간 현장 집계를 기반으로 분석하였기 때문에 대기공간에 대한 서비스 수준 평가가 부정확하고 제한적이라는 한계가 있다. 현장 조사는 조사원 및 촬영기구 등이 필요하기 때문에 수도권 도시철도의 모든 역사를 시공간적인 공백 없이 직접 조사하기에는 한계가 있다. 최근 교통카드자료를 기반으로 승강장 혼잡도 분석에 대한 시도가 있지만 승하차 수요만을 고려하고 있기 때문에 역사 내 환승 수요를 고려하지 못한 한계가 있다(Ho, L., 2015). 실제 도로용량편람에서도 환승역의 경우 승강장 설계 시 노선 승하차 승객과 환승 승하차 승객을 동시에 고려해야 한다고 제시하고 있기 때문에, 승강장 서비스 수준 평가를 할 때 노선 승하차 승객과 환승 승하차 승객을 동시에 고려하여 평가를 실시해야 한다.

2) 승강장 동적 혼잡도 추정 모형 개발

본 연구에서 승강장 동적 혼잡도 추정 모형 설계는 다음과 같은 3단계를 거친다.

- ① 교통카드자료를 기반으로 1분 단위 통행량을 산출하고, 배차간격을 고려하여 승객 통행량을 산출한다.
- ② 승객 통행의 종류를 고려한, 승강장에서의 통행량을 추정한다.
- ③ 승강장별 실용대기면적을 나누어 혼잡도를 추정한다.

교통카드자료에는 승하차 시간이 저장되기 때문에 승객들의 이동 패턴과 배차간격을 고려하여 승강장에서의 이동 및 대기 시간을 추정할 수 있다. 예를 들어 노선 승차 승객의

승차 시간이 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. 환승 통행의 경우 경로 선택 모형을 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 실용 대기면적을 고려하여 실제 승강장의 동적 혼잡도를 추정하며, 세부 모형은 다음과 같다.

[표 2-6] 승강장 동적 혼잡도 모형

수식	$\delta_j^s(t) = \frac{C_T}{A} = \frac{\sum_m \chi_{jm}^s(t)}{A_j^s} \cdot \alpha_j^s(t)$
변수	여기에서, 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)

3_승강장 동적 혼잡도 추정 방법

1) 통행유형 구분

본 연구에서는 승강장에서 발생하는 승객 통행 종류를 자체 노선 승하차와 노선 환승, 자체 노선 환승 등 3가지로 분류하였다.

자체 노선 승하차 승객은 도시철도 출입 역사의 노선과 실제 승하차 이동 노선의 ID가 동일한 경우로서, 빈도수가 가장 많은 종류의 통행이다. 특히 자체 노선 승하차 승객은 단일 노선 역사에서는 100%를 차지한다.

노선 환승 이동은 환승 역사에서 발생하는 통행으로 목적지로 이동하기 위한 역사 내 통

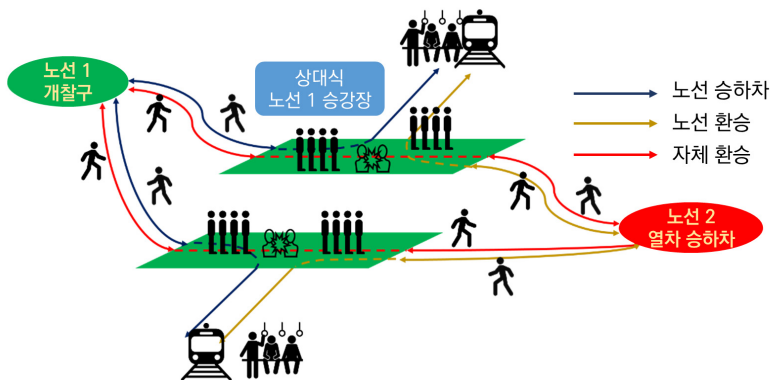
행이다. 환승 통행이 발생할 경우 첫 번째 노선의 승강장에서는 하차 통행이 발생하며, 환승 통로 이동 후 환승 노선 승강장에서는 승차 통행이 발생한다. 따라서 보행 통행량은 두 노선의 승강장 모두에서 집계된다.

자체 노선 환승은 환승 역사에서 발생하는 것은 동일하나 도시철도 출입 역사의 노선 ID와 실제 승하차 이동 노선 ID가 다른 경우이다. 승강장 구조에 따라 차이가 있지만, 자체 노선 환승은 승하차 이동 노선 승강장과 실제 이동 노선의 승강장을 모두 경유할 수 있다. 일례로 도시철도 2호선과 신분당선이 교차하는 강남역의 경우 2호선 태그 후 신분당선 이동 승객은 2호선 도시철도 승강장과 신분당선 승강장을 모두 경유한다. 이는 2호선 강남역을 태그했다라도 자체 노선 환승 통행의 경우, 2호선 승강장과 신분당선 승강장 모두 집계가 필요하며 승강장 혼잡도에도 이를 고려할 필요가 있다.

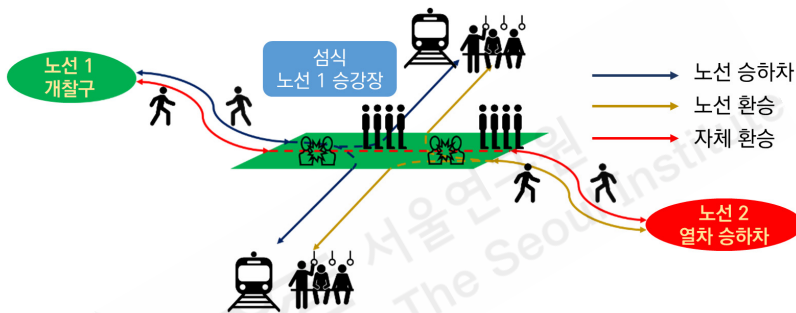
보행 통행을 3가지로 구분하는 이유는 승객의 통행 목적에 따라 보행 패턴이 달라지며 이에 따라 승강장 혼잡도 개선을 위한 전략도 달라질 수 있기 때문이다. 자체 노선 승하차 승객이 많은 경우, 환승 승객을 고려할 필요가 없이 승하차 통행량을 감소시키는 전략이 효율적이다. 즉, 승하차 통행의 경우 목적통행이 고정되어 있기 때문에 다양한 전략을 통해 통행량을 조율하기가 환승 통행보다 상대적으로 유리하다. 반면 노선 환승 통행이나 자체 노선 환승이 많은 경우 환승 승객이 많기 때문에 통행량 감소 전략보다는 승강장이나 환승 통로 개선을 통한 전략이 유효하다. 따라서 본 연구에서는 승객 통행 목적을 구분하고 개선 전략을 수립한다.

[표 2-7] 승강장에서 통행 속성

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



[그림 2-5] 상대식 승강장에서 통행 흐름



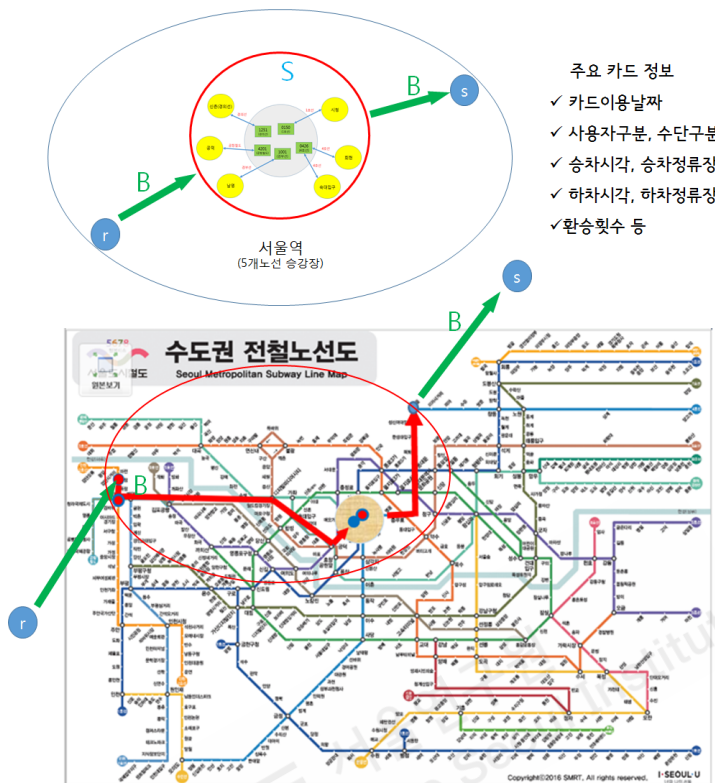
[그림 2-6] 섬식 승강장에서 통행 흐름

2) 최적경로선택 모형을 활용한 통행 패턴 분석

(1) 최적경로선택 모형 구성

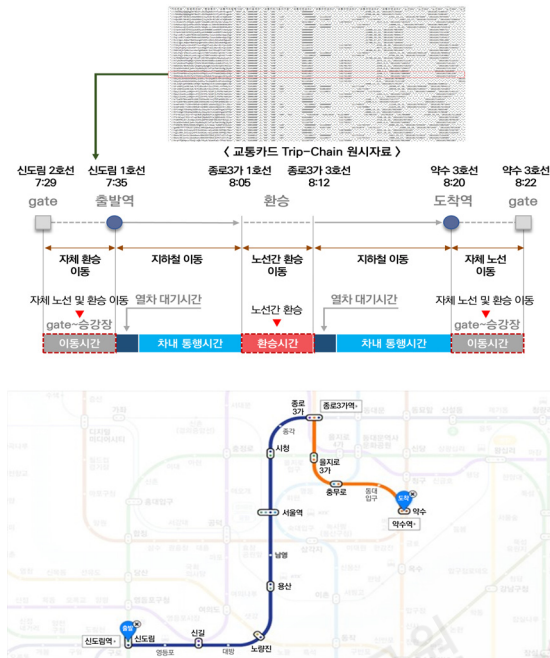
Trip-Chain¹⁾ 형식으로 저장된 교통카드자료에는 수도권에서 발생하는 버스와 도시철도의 통행 기록 대부분이 저장되어 있다. 수도권 대중교통 네트워크망에 있는 교통카드자료의 승객별 승하차 정류장 ID 및 시간 정보를 통해 통행 경로를 유추하여 역사별, 노선별, 수단별 시간대 통행 특성을 분석할 수 있다.

¹⁾ Trip-Chain이란 집 또는 특정장소에서 출발하여 다시 그 장소로 되돌아오는 동안 발생한 일련의 목적 통행. 여기에서는 한 목적 통행의 기종점 및 환승 자료 집합.



[그림 2-7] 대중교통 연계 통행 예시(Trip-Chain)

버스의 경우 한 번의 Trip마다 승하차 정보가 각각 저장되기 때문에 환승 없는 단일 OD로 판단하여 분석이 가능하다. 하지만 도시철도는 단일 OD 내에서도 도시철도 노선 간 환승이 발생하기 때문에 교통카드자료에서 환승을 포함한 승객의 전체 Trip을 경로 선택 모형을 적용해서 구현해야 하는 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 개별 승객은 통행 비용이 최소화되는 경로를 탐색하여 목적지로 이동한다는 기본 가정을 설정하여 동적 통행배정모형을 구축한다.



[그림 2-8] 교통카드자료를 활용한 최적 경로 예시

동적 통행배정모형은 초기에는 승용차를 대상으로 시간별로 변화하는 수요를 구하는 데 활용되었다. 최초 연속형 동적 통행배정에 관한 연구는 Ran and Boyce(1996)에 의해 제안되었으며, 이는 실제 경험한 통행시간에 기반을 두고 있다. 경로기반의 변동부등식의 세부 수식은 [표 2-8]과 같이 표현된다. 이 식은 도로망의 동적 통행배정에 적용되게 되며, 차량 간의 대기 및 혼잡에 의한 상황을 표현한다.

[표 2-8] 경로기반 변동부등식 모형

Ran and Boyce (1996)	$\int_0^T \left\{ \sum_r \sum_s \sum_p \pi_p^{rs}(t) [f_p^{rs}(t) - f_p^{rs}(t)^*] \right\} dt \geq 0$ 여기에서, r, s: r(출발지), s(도착지) $\pi_p^{rs}(t)$: r에서 s까지 t시점에서 출발한 차량이 경로 p를 통해 이동한 실제 통행시간 $f_p^{rs}(t)$: r에서 s까지 t시점에서 경로 p를 이용한 교통량 $f_p^{rs}(t)^*$: $f_p^{rs}(t)$의 최적해
----------------------	--

도시철도 차량의 스케줄에 의해 이동하며, 혼잡을 고려하지 않는 모형은 다음과 같은 선형계획법(Linear programming)으로 표현된다.

[표 2-9] 혼잡을 고려하지 않는 선형계획법 모형

$$\min \int_0^T \left\{ \sum_r \sum_s \sum_p \pi_p^{rs}(t) \cdot f_p^{rs}(t) \right\} dt$$

여기에서,

r, s : r (출발지), s (도착지)

$\pi_p^{rs}(t)$: r 에서 s 까지 t 시점에서 출발한 차량이 경로 p 를 통해 이동한 실제 통행시간

$f_p^{rs}(t)$: r 에서 s 까지 t 시점에서 경로 p 를 이용한 교통량

수도권 교통카드자료는 출발역-도착역 개찰구 태그 정보가 기록되어 실시간으로 저장되기 때문에 두 태그 정보의 시간 차이는 실제 이동시간으로 파악할 수 있다. 이러한 교통카드 정보를 기반으로 동적 통행배정모형을 구축하였다. 모형의 목적함수는 통행자의 일반화 비용으로 상세 모형은 [표 2-10]과 같다.

[표 2-10] 일반화 비용 모형

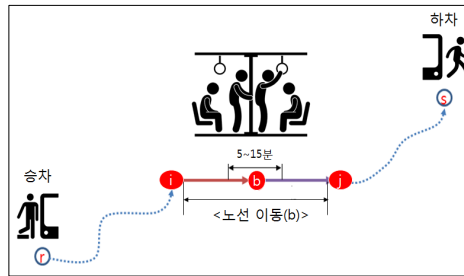
교통카드 정보	
일반화 비용 모형	$\xi_p^{rs}(t) = Iwtt_p^{rs}(t) + \sum_{n=0}^N \alpha_p^n (M_p^{rs}(t) + W_p^{rs}(t)) + \beta_1 + \beta_2$ 여기에서, r, s: r(출발지), s(도착지) $\xi_p^{rs}(t)$: r에서 s까지 t시점에서 경로 p를 통해 통행할 때의 일반화 비용(통행시간) $Iwtt_p^{rs}(t)$: r에서 s까지 t시점에서 경로 p의 차내시간 $M_p^{rs}(t)$: r에서 s까지 t시점에서 경로 p의 환승이동시간 $W_p^{rs}(t)$: r에서 s까지 t시점에서 경로 p의 열차대기시간 α_p^n: 환승횟수(n)에 따른 파라메타 β_1, β_2: 승하차 이동시간(1분)

손지연(2016)은 [표 2-11]과 같이 교통카드기반 동적 통행배정모형을 제안하였다. 모형의 목적함수는 통행자의 일반화 비용을 최소화하는 통행경로를 선택하도록 설계되었다. 이때 수도권 도시철도망의 기종점 간에 파악되는 경로는 승객이 인지하기에는 통행비용 측면에서 유사하게 나타나는 경로일 수 있다. 기존의 단일경로모형은 유사 경로에서 단일의 선택대안만을 선정하는 한계를 지니고 있어, 본 연구에서는 경로를 3개까지 파악하여 선정된 경로에 동일하게 확률적으로 배정하는 균등 확률 개념을 적용하였다.

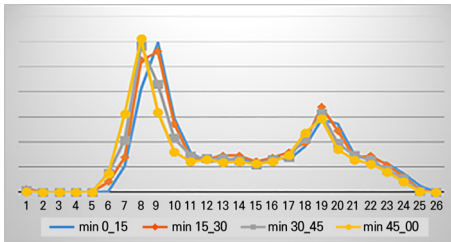
[표 2-11] 동적 통행배정모형(노선 통행량)

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 t시점에서 경로 p를 통해 통행할 때의 일반화 비용(통행시간) $f_p^{rs}(t)$: r에서 s까지 t시점에서 경로 p를 선택한 승객 $q^{rs}(t)$: r에서 s까지 t시점에서의 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-s 간 경로 p에서 tt시점에 b 링크 경유 판단 변수 (통과할 경우 1, 아닌 경우 0)

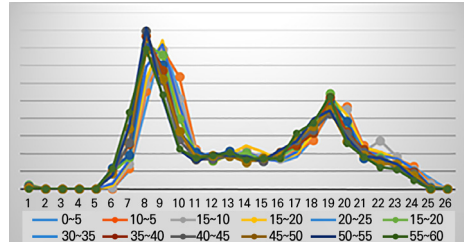
사례 분석으로 인천도시철도1호선의 부평시장역에서 부평역 간 노선 통행량을 5분, 15분 간격으로 추정하였는데, 오전 및 오후 첨두시간에 통행량이 집중하는 형태를 보였다.



[그림 2-9] 노선 이동 개념도

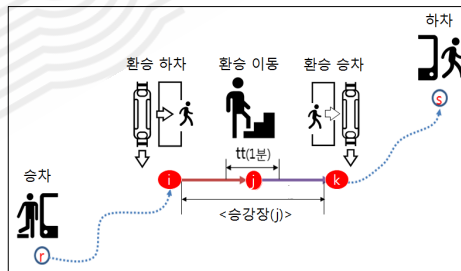


[그림 2-10] 부평시장역-부평역 15분 동적통행량

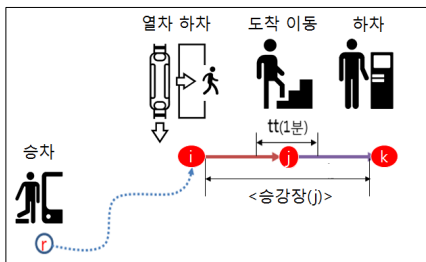


[그림 2-11] 부평시장역-부평역 5분 동적통행량

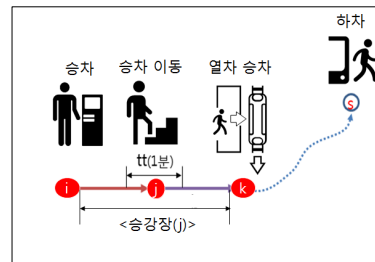
본 연구에서는 특정 시간에 승객이 승강장을 통과하는 수요 모형을 구축하였다. 이 모형에서는 먼저 승강장 통행 속성을 구분하고 승강장이 위치한 역사가 기종점이 아닌 경우 환승 통행, 기종점 중 하나인 경우 승하차 통행이 발생하는 것으로 정의한다.



[그림 2-12] 노선 환승 개념도



[그림 2-13] 노선 하차 개념도



[그림 2-14] 노선 승차 개념도

승강장 통행 속성은 승하차 및 환승 통행으로 구분되기 때문에 모형에 삽입되는 승강장 통행량 함수도 3가지로 구분하여 정의했다. 각각의 통행 속성 수식에서는 동적 통행배정 모형에 따라 산출된 경로(p)에 특정 승강장(k)이 경로에 포함되는 모든 승객의 총합이 승강장 통행량이다. 열차가 운행하기 시작할 때부터 운행을 종료할 때까지 실제 통행이 발생하는 모든 시간대 분석이 가능하며, 분석 단위는 1분이다.

[표 2-12] 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. $q^{rs}(t) = \sum_p f_p^{rs}(t) \quad \forall p, r, s, t$ $f_p^{rs}(t) \geq 0 \quad \forall p, r, s, t$ 여기에서, r, s, p: r(출발지), s(도착지), p(선택경로) $\xi_p^{rs}(t)$: r에서 s까지 t시점에서 경로 p를 통해 통행할 때의 일반화 비용(통행시간) $f_p^{rs}(t)$: r에서 s까지 t시점에서 경로 p를 선택할 확률 $q^{rs}(t)$: r에서 s까지 t시점에서의 승객 수	
승강장(i) 특정시간 (tt) 승객	$V_j(tt) = \int_0^T \left\{ \sum_r \sum_s \sum_p f_p^{rs}(t) \cdot \delta_{p,j}^{rs}(tt) \right\} dt +$ $\int_0^T \left\{ \sum_r \sum_s \sum_p f_p^{rs}(t) \cdot \delta_{p,j}^{js}(tt) \right\} dt +$ $\int_0^T \left\{ \sum_r \sum_s \sum_p f_p^{rs}(t) \cdot \delta_{p,j}^{rj}(tt) \right\} dt$ 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)	노선 간 환승 목적지 출발지

(2) 경로선택 모형 검증

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

민자 환승 자료에는 사용자 ID(카드 고유 ID), 트랜잭션, 환승게이트 역사 ID, 직전승차 역사 ID, 직전승차 역사 승차 시간, 환승게이트 통과시간 순으로 나열되어 있다. 기존 승하차 승객의 통행 정보가 담긴 교통카드자료를 활용하여 승객 최적 경로 선택 알고리즘(K-path)이 적용된 결과와 민자 환승 자료상 승객 경로를 비교 검토하면 모형의 정확도를 추정할 수 있다.

검증 결과 민자 환승 자료상 승객 경로가 첫 번째 최적 경로에서 탐지된 비율이 79.82%, 나머지 열 번째 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.

[표 2-13] 민자 환승 정보를 활용한 검증 결과

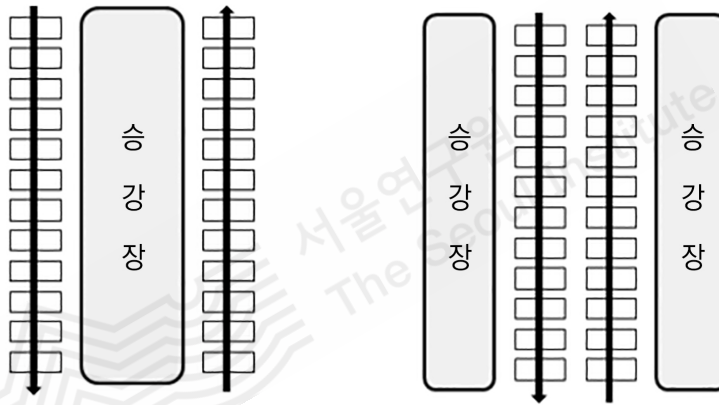
구분	탐색경로	건수	비율(%)
탐색	최적 경로(K[0])	162,689	79.82
	비최적 경로(K[1]-K[9])	39,698	19.48
비탐색	-	1,434	0.7
총계	-	203,821	100

3) 승강장 혼잡 공간 설정

(1) 도시철도 승강장 구조

현재 도시철도 승강장의 구조는 섬식 승강장과 상대식 승강장이 대부분을 차지하며, 기타

일부 변형된 혼합식 승강장이 있다. 먼저 섬식 승강장은 2개의 노선 사이에 승강장이 존재하여 양방향 노선이 하나의 승강장을 이용하도록 설계되어 있다. 상대식 승강장의 경우 각 방향별로 승강장이 구분되어 있어, 승객은 방향별로 다른 승강장을 이용하도록 설계되어 있다. 혼합식 승강장에는 쌍섬식, 쌍상대식 등이 존재하나, 일부 역사에 한정되어 있다. 2014년 기준 수도권 도시철도의 섬식 승강장은 30.2%, 상대식 승강장은 68.1%, 혼합식 승강장은 1.6%를 차지하고 있다. 섬식 승강장은 모든 이용 승객이 하나의 승강장을 사용하기 때문에 혼잡도 추정 시 양방향 통행량을 동시에 고려해야 한다. 반면 상대식 승강장은 이용 승객이 구분되어 있기 때문에 승강장 혼잡도 추정 시 방향별 통행량을 고려하여 분석하였다.



[그림 2-15] 승강장 구조 종류(좌: 섬식, 우: 상대식)

(2) 실용대기면적 산정

도시철도 승강장은 승하차 및 환승을 위해 승객이 대기하는 공간으로, 정확한 혼잡도 산정을 위해서는 대기공간에 대한 상세한 조사나 연구가 필요하다. Ho, L.(2016)은 승강장 공간 구분을 다음과 같은 카테고리로 구분하였다.

- ① 승강장 내의 구조물로 인해 승객이 활용하지 못하는 공간(활용 불가 공간)
- ② 승하차 문과의 이격거리가 멀거나 승객의 활용도가 떨어지는 공간(승차 비선호 공간)
- ③ 승객이 승차를 위해 대기하는 공간(실용대기 공간)

카테고리별로 세부내용을 살펴보면 다음과 같다.

① 활용 불가 공간

승강장 내에는 다양한 설계 구조물과 승객의 편의 및 안전을 위한 설치 구조물이 존재한다. 대표적인 설계 구조물로 기둥, 엘리베이터 등이 있고 설치 구조물에는 의자, 자판기, 매표 등이 있다. 이러한 구조물은 승객의 편의를 돕는 필수적인 시설이지만, 승하차 시 대기하거나 이동할 때 절대적으로 방해되는 공간이다.

② 승차 비선호 공간

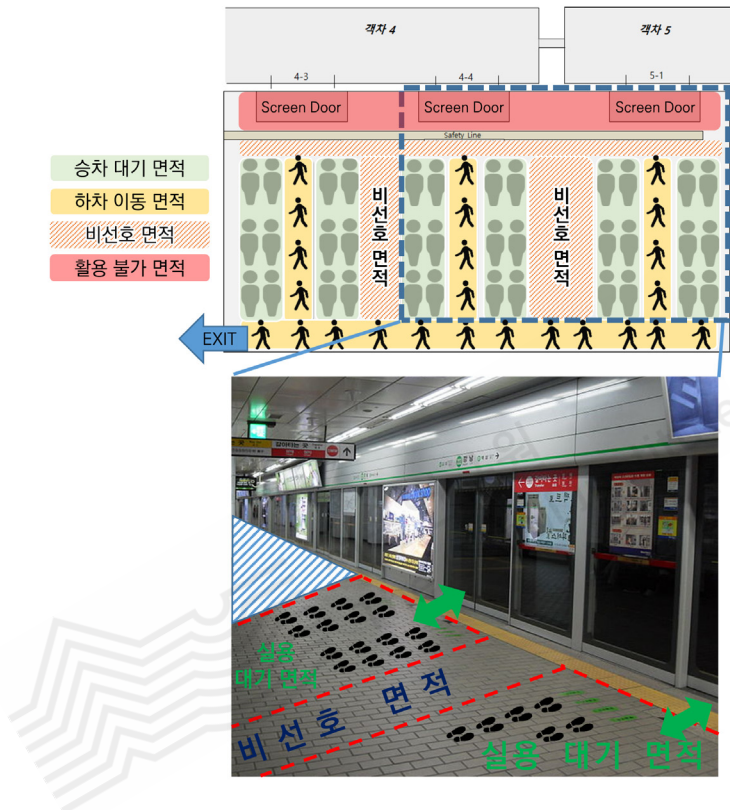
승차 비선호 공간은 통상 객차의 출입문과 출입문 사이의 공간으로 승객이 대기하지 않는 공간이다. 실제 조사 결과 승차 비선호 공간폭(출입문 사이 길이)은 2.0~2.8m로 나타났다. 또한 승객이 열차에서 내려 이동하기 위한 공간은 실제 열차 출입문 앞에서 시작되며, 평균 0.7m 수준으로 나타난다.

③ 실용대기 공간

승차 대기 면적과 승하차 시, 이용 시 점유하는 공간을 실용대기면적으로 정의하였다. 우리나라는 2004년 이후 도시철도에서의 승하차 질서 유지와 대기 공간의 효율적인 활용, 비상시 대피 이동통로 확보를 위해 네 줄 서기 문화를 권장하고 있음에 따라, 승객들은 열차 입구 양쪽 끝에서 두 줄씩 대기한다. 이를 고려하여 실질적으로 승객의 대기 공간을 정의하였고, 해당 공간에서 혼잡이 발생한다고 가정하였다.

실용대기면적 개념을 도입한 이유는 승강장에서는 다양한 시설과 승객의 이동 목적(승하차)에 따라 공간의 활용 특성이 구분되어 있고, 승강장에서 발생하는 혼잡은 승강장 내부 공간의 활용에 따라 달리 나타날 수 있기 때문이다. 실용대기면적을 산정하기 위해서는 승강장의 실제 계획 면적에서 사용 불가 면적과 승객 비선호 면적을 제외해야 한다. 따라서 정확한 분석을 위해서는 역사별 현장 조사가 필요하지만, 본 연구에서는 기초 설계 자료를 활용하였다. 기존 연구에서는 승강장 이용 빈도가 균등분포를 따른다고 가정하여 비선호 면적의 50%를 혼잡 상황에서의 승강장 실용대기면적으로 제시하고 있다. 승객 비선호 공간은 첨두시간 혼잡 상황에서 변동이 있을 수 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. 즉, 전체 면적에서 활용 불가 공간과 비선호 공간을 제외시키고 실제 승객이 활용하는 공간을 실용대기면적으로 설정하였다.



[그림 2-16] 실용대기면적

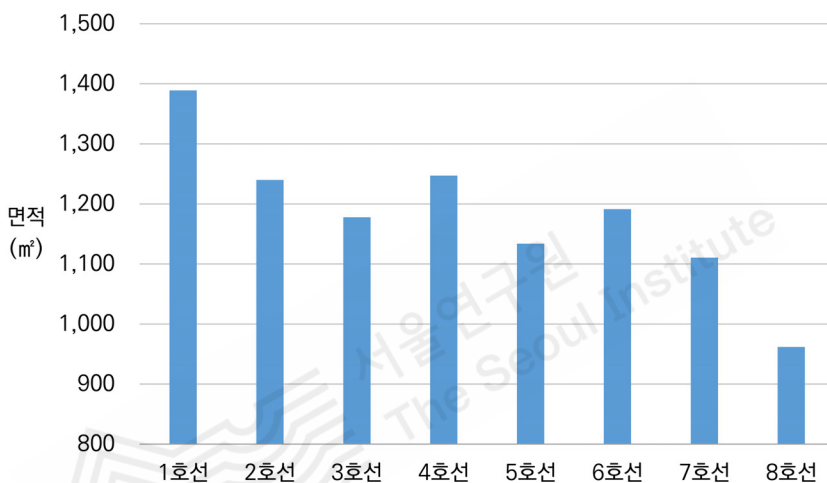
(3) 수도권 도시철도 역사 면적 현황

도시철도 승강장 혼잡도는 이용객이 많은 경우에도 서비스 수준을 감소시키지만, 승강장 자체 구조가 좁을 경우에도 서비스 수준을 감소시킨다. 혼잡도는 통행량과 구조 면적 간의 상호 관계로 판단되기 때문에, 실제 사례 분석을 위해서는 승강장 면적의 기초 자료 구축이 반드시 필요하다.

서울교통공사에서 운영하는 도시철도 1호선부터 8호선까지 승강장별 평균 면적을 분석한 결과 1호선이 가장 넓은 1,389㎡이며 8호선이 가장 좁은 962㎡이다. 현재 1호선~4호선

은 10량으로 운영 중이며, 5호선~7호선은 8량, 8호선은 6량으로 운영하고 있다. 이러한 구조적 차이로 인해 1호선~4호선이 5호선~8호선에 비해 상대적으로 승강장 면적이 넓다.

9호선의 경우 설계는 6량 열차 기준으로 설계되었지만 현재 대부분 4량 열차가 운영되고 있다. 따라서 전체 승강장이 고루 활용되지 못하고 4량 열차가 운행하는 승강장에서만 승객 통행이 이루어지고 있다. 약 1/3 정도의 승강장은 유휴공간이기 때문에 실용대기면적 산정 시 이를 추가 고려해야 한다. 역사별 승강장 상세 현황은 부록에 첨부하였다.



자료: 서울메트로 및 메트로9호선 내부자료

[그림 2-17] 도시철도 승강장 평균 면적

기존 구조 면적과 승객이 실제 이용하는 실용대기면적의 관계를 해석하기 위해 기존 연구에서 조사된 2호선 주요 역사 실용대기면적 조사 결과를 인용하였다. 먼저 강남역, 사당역의 경우 상대식 승강장 구조이며 시청역, 신림역은 섬식 구조로, 실용대기면적은 전체 면적 대비 31.1%~36.0% 분포를 보인다. 이는 도시철도 역사의 설계 면적에 비해 실용대기면적은 약 1/3에 불과함을 의미한다. 설계 면적에 비해 승객이 실제 활용하는 면적이 좁기 때문에 승강장 혼잡도를 분석할 때 면적에 대한 분석이 필요하며, 여기에서는 전체 구조 면적 대비 1/3 비율을 적용하였다.

[표 2-14] 2호선 주요 역사별 면적 현황

(단위: m², %)

역명		전체 면적	활용 불가면적	비선호 면적	하차 이동면적	실용 대기면적
강남역	내선	1,778	546 (30.7)	512 (28.8)	168 (9.4)	553 (31.1)
	외선	1,789	529 (29.6)	524 (29.3)	172 (9.6)	564 (31.5)
사당역	내선	2,220	492 (32.3)	718 (32.3)	236 (10.6)	774 (34.9)
	외선	2,211	435 (33.4)	738 (33.4)	243 (11.0)	796 (36.0)
시청역		1,917	447 (31.8)	610 (31.8)	200 (10.4)	659 (34.4)
신림역		1,873	474 (29.7)	556 (29.7)	182 (9.7)	660 (35.2)

자료: 이호(2015) 조사 결과 참조

4) 승강장 혼잡도 기준

(1) 국내 기준

국내 도로용량편람(국토해양부, 2013)에서는 한국인에 맞는 체형을 적용하여 대기 공간에서의 서비스 기준을 제시하고 있고, 도시철도 정거장 및 환승·편의시설 설계 지침에서도 유사한 서비스 수준을 제시하고 있다. 승강장에서의 서비스 수준은 점유 공간과 승객 밀도와 관련성이 높다.

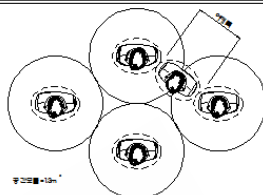
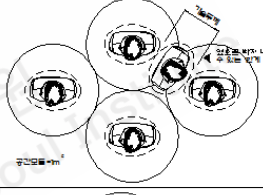
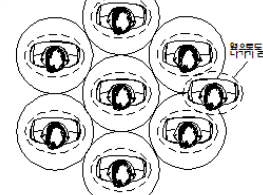
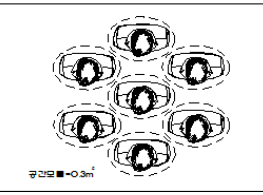
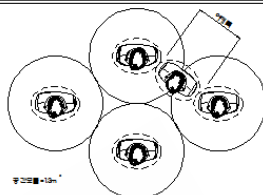
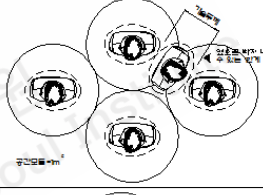
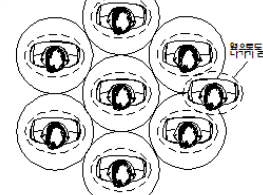
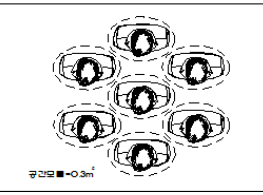
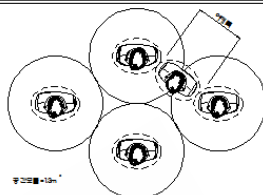
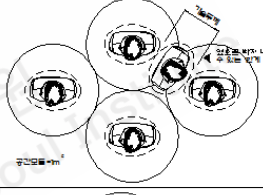
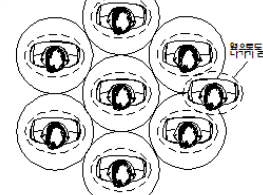
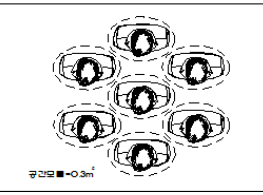
도시철도 정거장 및 환승·편의시설 설계 지침에서는 승강장 설계 시 필요공간을 0.8m²/인으로 설계하고 있다. 또한 첨두시간대 승강장 서비스 수준을 D로 설계하도록 제시하고 있으며, 이는 점유공간 0.3m²/인 이상 0.7m²/인 이하로 평균 대기공간 0.5m²/인이다.

[표 2-15] 국내 승강장 서비스 수준 설계 기준

서비스 수준 (LOS)	국내 도로용량편람		도시철도 정거장 환승·편의시설 설계 지침	
	점유공간 ($\text{m}^2/\text{인}$)	밀도 ($\text{인}/\text{m}^2$)	점유공간 ($\text{m}^2/\text{인}$)	밀도 ($\text{인}/\text{m}^2$)
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

승강장 서비스 수준 D는 설계기준으로 실제 역사에서 발생하는 혼잡도 추정의 기준이다. 예를 들어 역삼역 내선의 승강장 가용면적은 기존 조사 결과 783.5m^2 이며 승객이 활용하는 혼잡 공간을 235m^2 로 가정한다면, 계획상의 승강장 이용 권장 승객수는 평균 대기공간 $0.5\text{m}^2/\text{인}$ 을 적용하여 약 470명으로 산출된다. 만약 첨두시간에 승강장에 470명 이상 통행량이 발생할 경우 계획 용량을 초과하기 때문에 개선이 필요한 역사로 분류할 수 있다.

[표 2-16] 국내 승강장 혼잡도 기준 조항

조항	내용															
2장 설계일반 : 2.2 일반사항 2.2.1 서비스 수준	..(중략).. 본 지침에서는 투자재원의 효율성과 사회적·경제적인 측면을 고려하여 이용객의 수가 가장 많은 첨두시간대를 기준으로 하여 승강장 및 내·외부 계단의 서비스 수준을 D 이상, 환승통로에서의 서비스 수준을 E 이상으로 한다. 표 2.1 일반적인 서비스 수준 (대기공간 중심) <table><tr><th>서비스 수준</th><th colspan="2">상 태</th></tr><tr><td>A ~ B</td><td>통과영역의 한계 (직경 120cm)</td><td></td></tr><tr><td>C</td><td>쾌적영역의 한계 (직경 105cm)</td><td></td></tr><tr><td>D</td><td>비접촉영역의 한계 (직경 90cm)</td><td></td></tr><tr><td>E ~ F</td><td>접촉영역의 한계 (직경 60cm)</td><td></td></tr></table>	서비스 수준	상 태		A ~ B	통과영역의 한계 (직경 120cm)		C	쾌적영역의 한계 (직경 105cm)		D	비접촉영역의 한계 (직경 90cm)		E ~ F	접촉영역의 한계 (직경 60cm)	
서비스 수준	상 태															
A ~ B	통과영역의 한계 (직경 120cm)															
C	쾌적영역의 한계 (직경 105cm)															
D	비접촉영역의 한계 (직경 90cm)															
E ~ F	접촉영역의 한계 (직경 60cm)															
3장 정거장내 시설 : 3.2 적용	정거장내 시설이란 여객시설(승강장, 대합실)과 승강편의시설(계단, 에스컬레이터, 엘리베이터 등), 통로(일반통로, 연결통로, 환승통로) 및 기타 부대시설(화장실, 집·개표구, 역무기능실 등)을 총칭한다.															
3.3 여객시설 3.3.1 승강장 : 3.3.1.2 기준사항	승강장의 형식과 무관하게 첨두시간에 해당 승강장을 이용하는 승하차 및 환승객을 모두 합산 하여 이용객 수를 구한다. ..(중략).. 환승정거장의 승객수는 일반 승객수와 환승 승객수의 합으로 적용한다.															

자료: 도시철도 정거장 및 환승·편의 시설 설계 지침(국토교통부, 2013)

(2) 국외 기준

국외의 철도 혼잡도 서비스수준 지표는 다양하다. Highway Capacity Manual 2010(TRB, 2010)에서 보행자 관련 서비스 평가 지수를 침두시 보행자 통행을 기준으로 1인당 점유 공간, 보행속도 등을 통해 제시하고 있다. 영국은 PiXC(Passenger in Excess of Capacity, 용량초과인원 비율, %)를 혼잡도 지표로 사용한다. 즉, 계획된 승객인원수 대비 실제 승객수 비율로 혼잡도를 측정한다. 실제 승객수가 용량을 넘지 않을 경우 PiXC는 0이다. 영국의 DfT는 매년 PiXC를 측정하고 있으며, 경험적으로 PiXC가 4.5%(오전, 오후 중 침두시), 3.0%(오전, 오후 침두시) 수준이면 허용가능한 것으로 판단한다(Office of Rail Regulation 2011). PiXC는 입석 인/m² 지표로 환산가능하며, 주로 통근열차에 적용되고 있다.

미국은 승객수를 좌석수로 나눈 승차계수(Load Factor) 값으로 혼잡도를 측정한다. 혼잡도 기준은 철도서비스 특성에 따라 1.0 또는 2.0을 적용하고 있으며, 승차계수를 이용하여 혼잡도 서비스 수준을 측정하고 있다. 또한 열차의 입석공간으로도 혼잡도를 측정하기도 한다. 입석공간 지표는 단위면적당 승객수(입석공간의 역수)의 역수로 측정한다. 철도 차량을 설계할 때는 서비스수준 D 이상을 고려하고 혼잡기준은 서비스수준 E를 기준으로 한다.

호주는 대도시권별로 철도시스템(시드니, 멜버른, Perth, Adelaide, Brisbane)에 따라 다양한 혼잡도를 측정하는 방식이 적용되고 있다. 단위면적당 입석승객수, Load factor(승차계수), 단위시간당 차량당 승객수, 입석시간 등 다양한 혼잡도 지표를 사용하고 있다.

[표 2-17] 미국의 승차계수에 따른 서비스 수준

LOS	측정지표	혼잡도 기준		비고
	승객수/좌석	ft ² /승객수	m ² /승객수	
A	0.0~0.5	>10.8	>1.0	승객이 적음
B	0.51~0.75	10.8~8.2	1.0~0.76	승객이 좌석 선택이 가능
C	0.76~1.0	8.1~5.5	0.75~0.51	모든 승객이 착석 가능
D	1.01~1.25	5.4~3.9	0.5~0.36	편안한 입석 가능
E	1.26~1.5	3.8~2.2	0.35~0.2	최대 용량
F	>1.50	<2.2	<0.2	매우 혼잡

주: LOS E가 혼잡기준임.

자료: TCQSM, TRB, 2013

[표 2-18] 국외 혼잡도 서비스 수준 기준

국가	측정지표	혼잡도 기준	비고
영국	PiXC(용량초과인원 비율)	오전, 오후 피크 중 최고가 4.0%이거나 오전, 오후 합쳐서 3.0%	입석승객수/m ² 로 환산가능 통근열차에 주로 활용함
	입석승객의 밀도 (입석승객수/m ²)	2~3 입석승객수/m ²	Transport of London 기준
	좌석 대비 입석승객수 비율	-	장거리, 지역 간 철도에 주로 활용
미국	Load Factor(승차계수) =승객수/좌석수	장거리 통근통행 및 고속철도: 1.0 도시철도: 2.0 LOS E 혼잡기준	철도서비스특성에 따라 다른 값 적용
	standing passenger area(입석공간) =면적/입석승객수	LOS E 혼잡기준	
호주	단위면적당 입석승객수(입석승객수/m ²)	1.9 입석승객수/m ²	시드니(CityRail)
	Load Factor(승차계수) =승객수/좌석수	140% 이상	
	단위시간당 차량당 평균 승객수	798명 이상	멜버른 (Metro Trains)
	입석 시간	20분 이상	Brisbane (Queensland Rail)

03

도시철도 승강장 통행량 분석

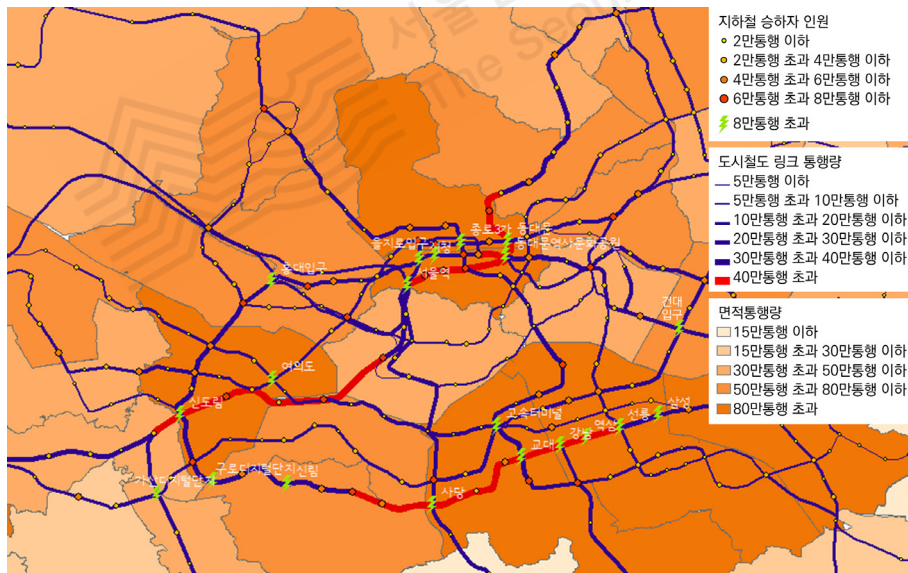
- 1_수도권 도시철도 일반 통행량 분석
- 2_수도권 도시철도 노선별 통행량 분석

03 도시철도 승강장 통행량 분석

1_수도권 도시철도 일반 통행량 분석

1) 도시철도 통행량 일반현황

수도권에서 버스와 도시철도 전체 이용자 분포를 지역별로 분석한 결과 서울시 3대 도심 지역과 경기도 부천시, 성남시 분당구, 인천시 부평구 등에서 승하차 통행량이 많았다. 강남구에서 가장 많은 200만 건 이상이 발생했으며, 종로구, 영등포구, 서초구, 송파구, 부천시에서 80만 건 이상의 승하차 통행량이 발생했다. 또한 마포구, 강서구, 관악구 등 서울시의 주요 인구 밀집지역과, 성남시 분당구, 인천시 부평구 등에서 50만 건 이상이 발생했다. 구간별 통행량은 도시철도 2호선 서울대입구역-역삼역, 1호선 구로역-용산역, 4호선 서울역-혜화역 구간에서 하루 왕복 40만 통행 이상이 발생하고 있다.



[그림 3-1] '16년 10월 17일 기준 일일 통행 현황

[표 3-1]은 도시철도 승하차 승객이 많은 15개 역사 통행량이다. 강남 도심에 위치하여 사업체와 여가시설이 혼재된 강남역, 선릉역, 삼성역과 사업체가 집중되어 있는 사당역,

구로디지털단지역, 가산디지털단지역, 교대역 및 종로3가역에서 통행량이 많다. 또한 여가시설이 집중된 홍대입구역, 신림역, 건대입구역 및 연계 환승이 많은 고속터미널역, 서울역과 주거 지역과 버스환승통행이 많은 신도림역 및 잠실역에서도 통행량이 많다.

[표 3-1] 주요 역사의 승하차 통행량

(단위: 명)

특성	역사명	승차 통행량	하차 통행량	전체 통행량
강남 도심	강남	114,058	117,366	231,424
	선릉	76,279	78,415	154,694
	삼성	56,365	59,127	115,492
사업체 밀집	사당	75,536	78,321	153,857
	구로디지털단지	72,077	72,772	144,849
	가산디지털단지	68,708	72,283	140,991
	교대	61,539	62,954	124,493
	종로3가	59,059	59,113	118,172
여가시설 밀집	홍대입구	73,748	75,510	149,258
	신림	75,063	72,385	147,448
	건대입구	57,499	62,480	119,979
연계 환승	고속터미널	77,545	78,109	155,654
	서울역	82,295	84,093	166,388
주거 및 버스환승	신도림	69,223	70,095	139,318
	잠실	90,739	87,326	178,065

2) 통행 유형별 통행량 분석

(1) 도시철도 주요 역사별 통행량 분석

수도권 도시철도 통행량이 많은 10개 역사를 살펴보면, 가장 많은 통행량을 보이는 역사는 1호선과 2호선 및 지선의 환승역인 신도림역으로 약 36만 1천 통행이 발생하고 있다.

도시철도 2호선 역사가 가장 많은 8개가 포함되어 있으며, 1호선 및 3호선, 4호선, 5호선은 각각 3개 역사가 포함되어 있다.

[표 3-2] 전체 통행량 상위 10개 역사

(단위: 명)

역사명 (상위 10개)	전체 통행	노선환승	자체환승	노선승하차	전체승하차 (자체환승+ 노선승하차)
신도림	361,252	221,934	42,545	96,773	139,318
동대문역사 문화공원	348,524	256,539	30,950	61,035	91,985
서울역	330,816	164,428	59,533	106,856	166,388
고속터미널	308,269	152,615	61,064	94,590	155,654
강남	305,794	74,370	8,332	223,093	231,424
잠실	294,733	116,668	7,604	170,461	178,065
사당	294,165	140,308	46,446	107,412	153,857
종로3가	245,154	126,982	53,122	65,050	118,172
교대	242,384	117,891	37,882	86,611	124,493
왕십리	221,199	135,868	53,744	31,587	85,331

통행량이 많은 역사 중 노선환승이 가장 많은 역사는 2, 4, 5호선이 교차하는 동대문역사 문화공원역으로 약 25만 6천 통행이 발생하고 있고, 다음으로 전체 통행량이 가장 많은 신도림 역사로 약 22만 2천 통행이 발생하고 있다. 자체환승이 가장 많은 역사는 고속터미널 역과 서울역으로 각각 6만여 건이 발생하고 있다.

[표 3-3] 통행 종류별 통행량 상위 5개 역사 현황

(단위: 명)

순위	노선환승		자체환승	
	역사명	통행량	역사명	통행량
1	동대문역사문화공원	256,539	고속터미널	61,064
2	신도림	221,934	서울역	59,533
3	서울역	164,428	왕십리	53,744
4	고속터미널	152,615	종로3가	53,122
5	충무로	141,638	사당	46,446

(2) 환승 여부에 따른 통행량 비교

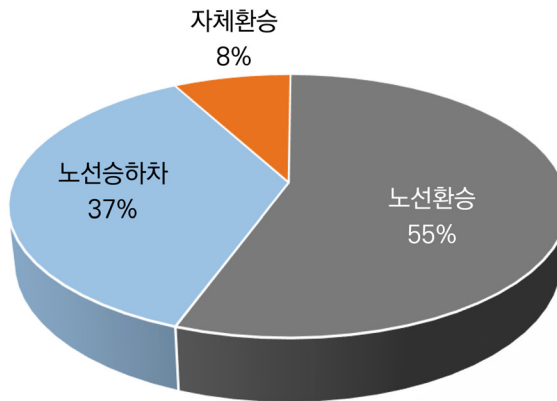
서울교통공사 1호선~8호선 구간의 279개 역사를 대상으로 환승 여부에 따른 승강장별 통행량 분석을 실시하였다. 환승역사는 비환승역사보다 평균 면적은 1.26배 넓은 반면, 평균통행량은 1.84배 많다. 결과적으로 승객 1인당 점유 공간은 환승역사가 비환승역사보다 작기 때문에 환승역사에서 승강장 혼잡도가 높다.

[표 3-4] 환승 및 비환승 역사 비교 분석

종류	환승역사				비환승역사	전체
	승하차	노선환승	자체환승	전체	전체	
평균면적 (㎡)	1,388				1,061	1,180
평균 유효면적 (㎡)	463				354	393
평균통행량 (명)	59,891	90,869	13,159	163,960	89,260	99,772

환승역사에서 보행 종류별 비율을 살펴보면 노선환승 통행량이 전체 통행에서 55%를 차지하고, 다음으로 노선승하차 통행이 37%, 자체환승이 8%를 차지한다. 환승역사에서 노

선 간 환승 통행이 다수이기 때문에, 정확도 높은 승강장 동적 혼잡도 분석을 위해서는 이 부분을 반영해야 한다는 결론을 도출할 수 있다.



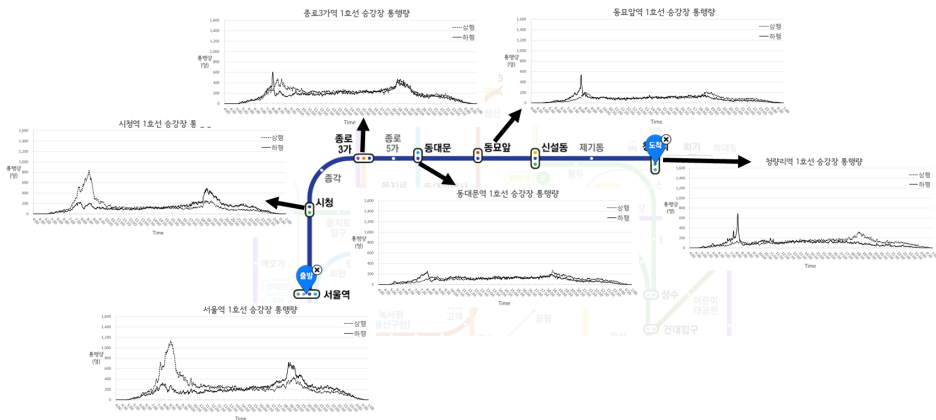
[그림 3-2] 환승역사에서 보행 종류별 통행 비율

2_수도권 도시철도 노선별 통행량 분석

1) 도시철도 1호선

도시철도 1호선은 1974년에 우리나라 최초로 개통되었다. 개통 초기 지하 구간인 청량리역-서울역 구간을 비공식적으로 종로선으로 명명하였고, 이후 노선명을 1호선으로 확정하였다. 현재 인천/신창역부터 소요산까지 약 200.6km 구간으로 가장 긴 노선이며, 계속해서 연장되고 있다. 최초 개통 구간인 청량리역부터 서울역까지의 경우 서울교통공사에서 운영하고 있으며, 나머지는 코레일에서 운영 중이다. 서울교통공사가 운영 중인 청량리역부터 서울역 구간은 한양 도심을 통과하기 때문에 많은 통행량이 발생되고 있어 혼잡도가 높다. 하지만 개통된 지 50년 이상 지나 역사 구조 및 시설이 매우 낙후되어 있기 때문에 개선 필요성이 있다. 세부 내용을 살펴보면 1호선 주요 환승역인 서울역에서 상행 방향으로 오전 첨두시간에 최대 통행량이 1,142명 발생하고 있고, 시청역 역시 상행 방향으로 오전 첨두시간에 최대 통행량이 838명 발생하고 있다. 특히 서울역은 상행 방향 승강장

LOS E를 보이고 있다. 기타 종로3가역, 동묘앞역, 청량리역 등은 혼잡도가 비교적 낮으나 오전 첨두시간에 일시적으로 통행량이 급증하는 특성을 보인다.



[그림 3-3] 도시철도 1호선 노선 통행량

2) 도시철도 2호선

도시철도 2호선은 도시철도 노선 중 가장 이용객이 많은 구간임에도 불구하고, 승강장 면적은 1호선, 4호선에 비해 오히려 좁아 다른 노선에 비해 도시철도 혼잡도가 높다. 실제 2호선 사당에서 강남까지 이르는 구간은 9호선을 제외하면 가장 높은 혼잡도를 기록하고 있다. 사당~강남 구간 중 강남역의 승하차 승객은 23만 명으로 도시철도 역사 중에 가장 많고, 사당, 교대 역사도 10만 명이 넘는 승하차 통행이 발생하고 있다. 승하차 통행뿐만 아니라 환승 통행도 많은데, 이들 구간의 사당, 교대, 강남역의 전체 환승 통행은 총 33만 통행에 이를 정도로 승하차 통행과 환승 통행이 집중되고 있다. 더욱이 해당 2호선 구간을 지나는 노선 통행량도 가장 많은 구간으로, 노선 및 역사 혼잡으로 인해 열차 지연이 빈번하게 발생하고, 각종 경범죄와 화재 및 긴급사태에 취약한 구간이다.

실제 2호선 본선에 위치한 승강장에 대해 가장 혼잡한 시간에 서비스 수준을 분석한 결과 내·외선 방향 구분 없이 동대문역사문화공원역에서 LOS E로 서비스 수준이 가장 나빴다. 또한 사업체와 여가 시설이 집중되어 있는 강남에서 역삼까지는 외선 구간에서 LOS E로 서비스 수준이 나빴다. 그 밖에 환승 통행이 빈번한 잠실역과, 통행량이 가장 많은

신도림역, 사업시설이 집중되어 있는 구로디지털단지에서 LOS E로 혼잡하였다. 전체적으로 외선 방향이 내선 방향보다 상대적으로 혼잡도가 높았는데, 이는 강남 방향, 외선 방향으로 출근 첨두시간에 승객이 집중되었기 때문으로 판단된다.



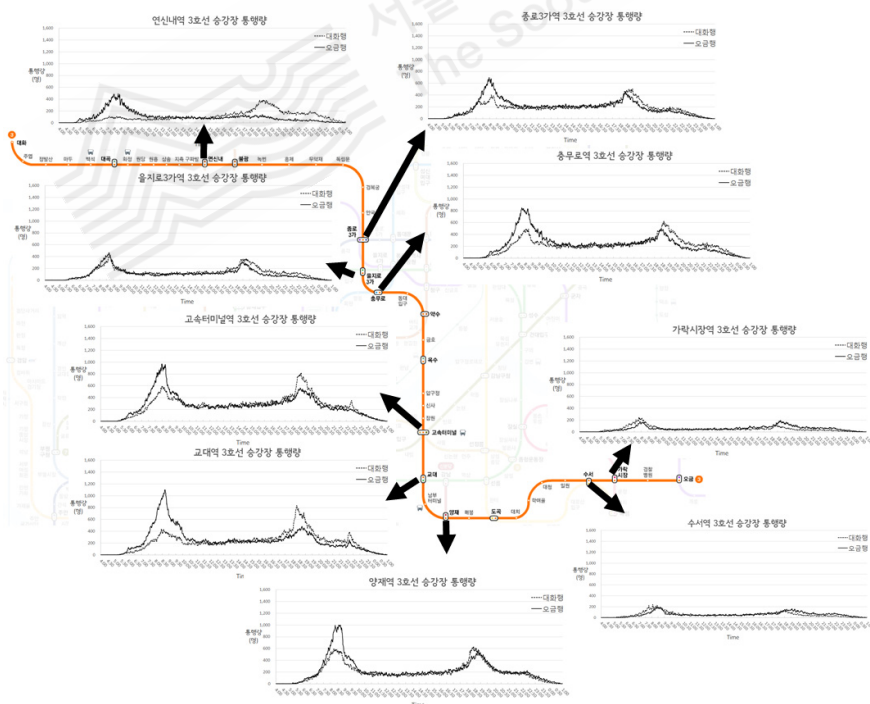
[그림 3-4] 2호선 내선 방향 승강장 최대혼잡도



[그림 3-5] 2호선 외선 방향 승강장 최대혼잡도

3) 도시철도 3호선

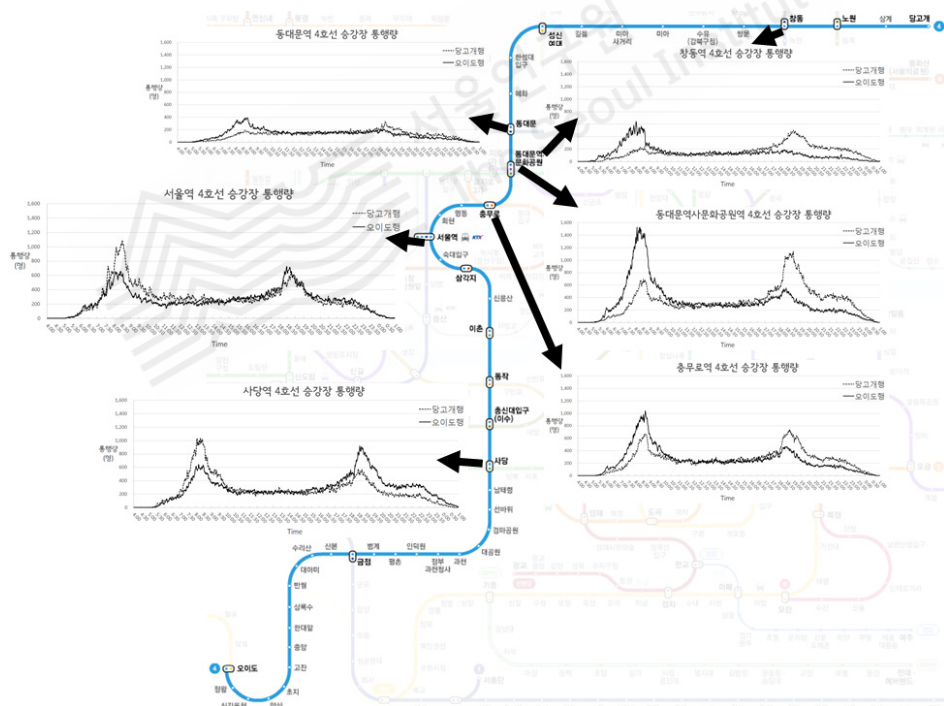
도시철도 3호선은 10량 열차가 운영 중인 1호선~4호선 노선 중 평균 승강장 면적이 가장 작은 반면 한양도성 및 강남 도심을 통과하고 있어 통행량은 매우 많다. 우선 한양도성 내에 위치한 종로3가역과 충무로역의 최대 통행량은 각각 698명, 1,041명으로 통행량이 많은 편이다. 종로3가역의 경우 환승역사의 승강장 평균 역사 면적에 비해 2/3 수준으로 매우 협소할 뿐만 아니라 충무로역도 승강장 면적이 평균 이하로서 두 역사 모두 혼잡도가 높을 가능성이 크다. 강남 도심에 위치한 교대역과 양재역의 경우 최대 통행량이 각각 1,103명, 999명으로 통행량이 매우 많고 승강장 면적도 평균 수준을 보이고 있다. 기타 을지로3가역과 연신내역의 경우 승강장 면적이 평균 대비 60% 수준에 불과하지만 통행량이 상대적으로 적어, 서비스 수준은 LOS D를 보이고 있다. 향후 통행량이 많아질 경우 승강장 구조 개선의 여지가 필요할 것으로 판단된다. 고속터미널역의 최대 통행량은 969명으로 많은 반면, 승강장 면적이 평균 대비 1.5배 정도 넓어 통행량을 충분히 감당하고 있다.



[그림 3-6] 도시철도 3호선 노선 통행량

4) 도시철도 4호선

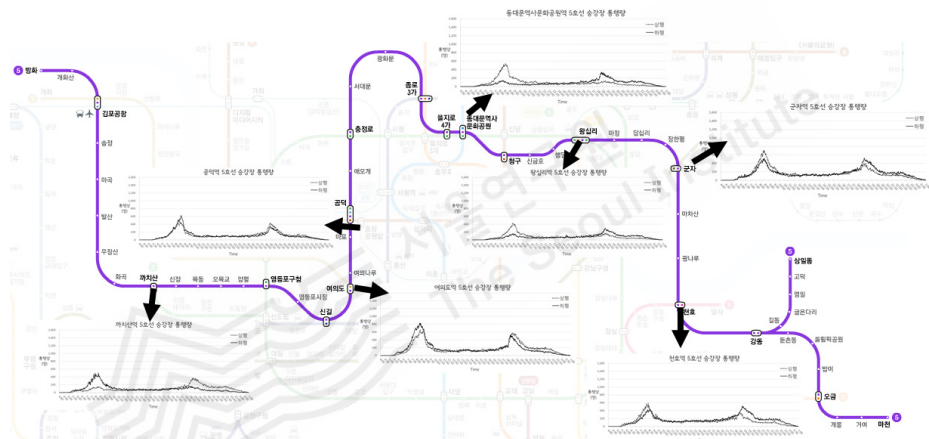
도시철도 4호선은 3호선과 유사하게 한양도성과 강남 도심을 연결하는 중심 노선이다. 출퇴근 첨두시간에는 강북지역과 안산, 과천에서 서울 주요 도심 방향으로 유입되는 통행량이 많다. 주요 혼잡 역사로 한양도성 내에 동대문역사문화공원역과 충무로역, 서울역이 위치하며, 강남 도심으로 이동하기 위한 환승역인 사당역이 있다. 동대문역사문화공원역은 수도권 도시철도 역사 중 가장 혼잡한 역사 중 하나로서 최대통행량이 1,528명에 이른다. 승강장 구조 면적은 전체 평균보다 넓은 편이지만 통행량이 매우 많아 향후 개선이 필요할 것으로 판단된다. 충무로역은 출근 첨두시간 최대 통행량이 1,041명으로 많은 편인 반면 승강장 면적은 전체 평균보다 좁아 서비스 수준은 LOS E이다. 사당역과 서울역은 출근 첨두시간 최대 통행량이 각각 1,038명, 1,092명으로 비슷한 수준을 보이며, 승강장 면적도 전체 평균과 유사하여 두 역사 모두 LOS D를 보인다.



[그림 3-7] 도시철도 4호선 노선 통행량

5) 도시철도 5호선

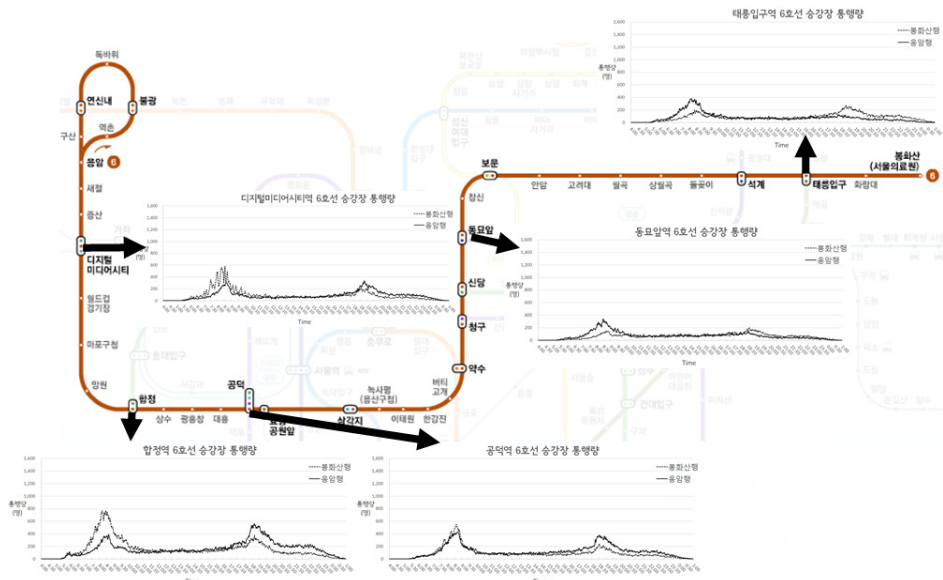
도시철도 5호선은 강서와 강동 지역을 연결하는 중심 노선으로 여의도와 한양도성을 통과한다. 주요 혼잡 역사로 한양도성 내에 종로3구역, 동대문역사문화공원역이 있고, 여의도심에 여의도역 등이 위치한다. 동대문역사문화공원역은 강동 지역에서 한양도성 방향으로 이동하는 수요가 많은 방화역 방향의 승강장이 출근 첨두시간에 최대 통행량이 1,174명으로 매우 많다. 반면 승강장 면적은 전체 평균 이하로 서비스 수준이 LOS E로 개선이 필요하다. 여의도역은 강서 지역에서 여의도심으로 이동하는 수요가 많은 상일동·미천 방향 승강장에서 최대 통행량이 835명으로 비교적 많고, 승강장 면적은 전체 평균과 유사하여 서비스 수준은 LOS D이다.



[그림 3-8] 도시철도 5호선 노선 통행량

6) 도시철도 6호선

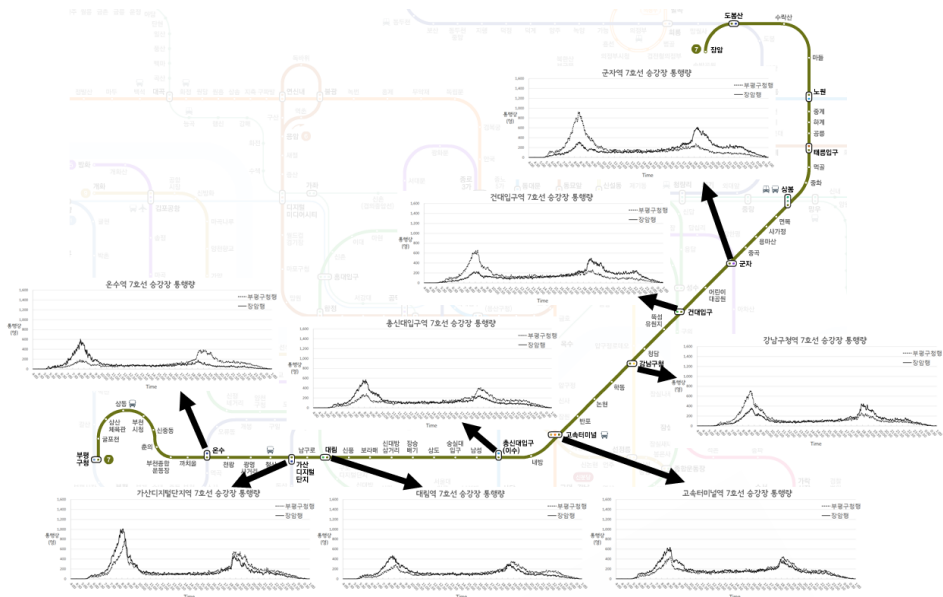
도시철도 6호선은 강북 지역의 교통 소외지역을 아우르는 노선으로 서북부 지역과 동북부 지역을 연결하고 있다. 환승 노선으로서 역할이 지배적이어서 통행량은 다른 노선에 비해 비교적 낮아 대부분의 역사에서 혼잡 수준은 양호한 편이다. 가장 혼잡한 역사는 서북부 지역에서 이동하여 환승하는 승객이 많은 합정역으로, 승강장 면적은 평균보다 작지만 최대 통행량도 771명으로 기타 혼잡 역사보다 적어 LOS D를 보이고 있다.



[그림 3-9] 도시철도 6호선 노선 통행량

7) 도시철도 7호선

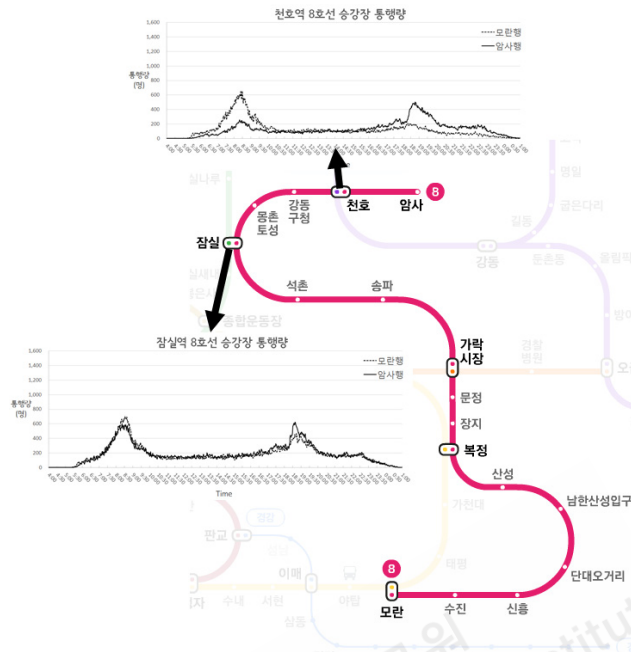
도시철도 7호선은 부천·광명 지역과 동북부 지역을 연결하는 노선으로 강남 도심 방향을 통과한다. 주요 혼잡 역사로 가산디지털단지역, 고속버스터미널역, 강남구청역, 건대입구역, 군자역 등이 있다. 가산디지털단지역은 부천·광명 지역에서 이동하는 수요와 1호선 환승승객이 맞물려 매우 혼잡한 역사이다. 출근 첨두시간에 양방향으로 많은 통행량이 발생하는 특성을 보이며, 부평구청 방향의 승강장은 최대 통행량이 765명, 강남 도심으로 이동하는 수요가 많은 장암 방향의 승강장은 최대 통행량이 1,012명이다. 승강장 면적은 전체 평균보다 협소한 편으로, 양방향 모두 서비스 수준이 LOS D이다. 고속버스터미널역은 승강장 면적이 넓고, 최대 통행량도 적은 편으로 혼잡도가 양호한 편이다. 강남구청역은 분당선과 환승 역사로 강남 도심으로 이동하는 수요가 많은 부평구청역 방향 승강장에서 혼잡도가 비교적 높게 나왔다. 최대 통행량은 717명이며, 승강장 면적은 전체 평균보다 협소한 편으로 서비스 수준은 LOS D이다. 군자역과 건대입구역은 각각 5호선과 2호선과 환승역사로, 강북 지역에서 강남 방면으로 이동하는 수요가 많은 부평구청 방향 승강장의 혼잡도가 높다.



[그림 3-10] 도시철도 7호선 노선 통행량

8) 도시철도 8호선

도시철도 8호선은 성남시와 강동 지역을 연결하는 노선으로 서울교통공사에서 운영 중인 노선 중 유일하게 6량 열차가 운영되고 있다. 주요 혼잡 역사로 5호선 환승역사인 천호역과 2호선 환승역사인 잠실역이 있다. 천호역은 강동 지역에서 강남 도심으로 이동하는 수요가 많은 역사로서 출근 첨두시간에 최대통행량 661명이 발생하고 있고, 승강장 면적은 전체 평균 수준을 보인다. 잠실역도 유사한 특성을 보이며 출근 첨두시간에 최대통행량 701명이 발생하며, 승강장 면적도 평균 수준이다. 하지만 8호선 특성상 승강장 면적은 6량 열차 구조 기준이며, 단위 승강장 면적은 동일 10량 기준 역사 승강장보다 넓은 편이다. 두 역사 모두 혼잡도는 LOS C로 양호한 수준이다.



[그림 3-11] 도시철도 8호선 노선 통행량

9) 도시철도 9호선

도시철도 9호선은 수도권 전체 역사에서 혼잡도가 가장 높은 노선이다. 실제 도시철도 내부 혼잡도가 가장 높은 1위에서 4위까지 모두 9호선이 차지하고 있다.

[표 3-5] 도시철도 혼잡도 상위 10개 구간 현황

순위	호선	역명	시간대	혼잡도2)(%)
1	9호선(급행)	염창->당산	07:30~08:30	234
2	9호선(급행)	당산->여의도	07:30~08:30	219
3	9호선(급행)	노량진->동작	07:30~08:30	213
4	9호선(급행)	여의도->노량진	07:30~08:30	210
5	9호선(급행)	염창->신목동	07:30~08:30	199
6	2호선	사당->방배	08:30~09:00	192
7	2호선	사당->방배	08:00~08:30	191
8	2호선	방배->서초	08:30~09:00	188
9	2호선	방배->서초	08:00~08:30	184
10	2호선	낙성대->사당	08:00~08:30	183

자료: 서울시 내부조사 결과

도시철도 9호선은 4량 열차가 운행되고 있기 때문에 기존 8량·10량 열차에 비해 다수의 승객을 수용할 수 없는 구조적인 한계가 있다. 9호선 주요 환승역사에는 출퇴근 첨두시간에 600명 내외의 승객이 집중되는데, 이를 10량 열차로 환산하면 약 1,500명 수준이다. 2호선에서 혼잡도가 가장 높은 동대문역사문화공원역이 약 1,200명 수준임을 감안하면 집중도가 높은 편이다. 또한 9호선은 급행열차를 운행하고 있기 때문에 이를 이용하기 위한 대기 승객까지 고려한다면 혼잡도가 더욱 높을 것으로 판단된다.



[그림 3-12] 9호선 승강장 혼잡도 시계열

2) 도시철도 객차 내 혼잡도: 열차 1량당 정원 158명일 때 100% 기준

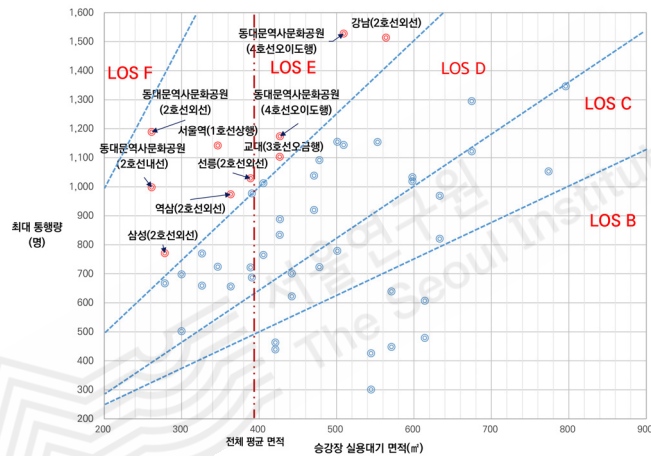
04

도시철도 승강장 동적 혼잡도 사례분석

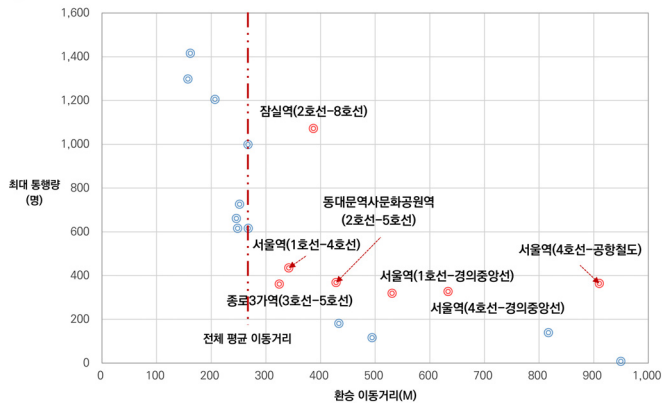
- 1_노선승하차 통행 비율이 높은 역사 사례
- 2_환승통행 비율이 높은 역사 사례

04 도시철도 승강장 동적 혼잡도 사례분석

도시철도 역사 구조나 승객들의 통행 특성이 각기 다르기 때문에, 사례 역사별로 승강장 혼잡도 완화를 위한 전략이 필요하다. 승강장 혼잡도에 영향을 미치는 주요 변수는 통행량, 승강장 실용대기면적이며, 기타 노선 간 환승 거리 등도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 도시철도 역사별 통행 특성을 고려하고, 구조 특성을 조사하여 적절한 승강장 혼잡도 완화 방안을 모색한다.



[그림 4-1] 최대 통행량과 실용대기면적에 따른 승강장 혼잡

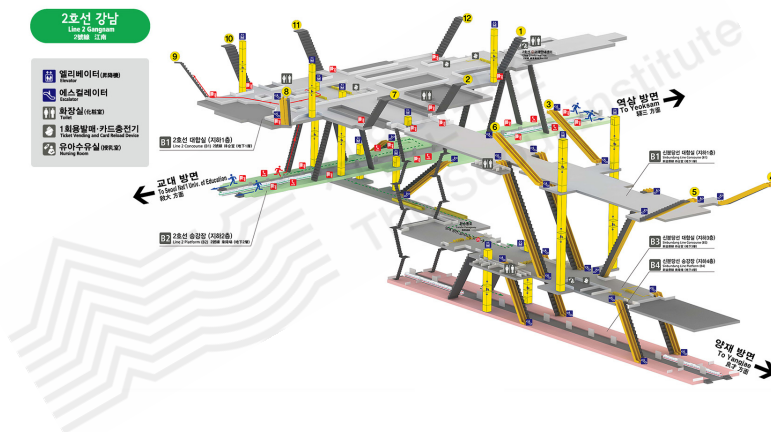


[그림 4-2] 주요 환승 역사의 환승 이동거리 및 최대 통행량 양상

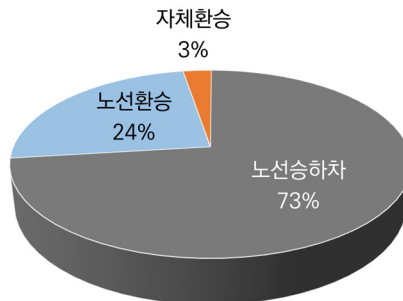
1_노선승하차 통행 비율이 높은 역사 사례

1) 사례역사 개요

전체 수도권 도시철도 역사 중 다섯 번째로 통행량이 많은 강남역은 2011년 10월 신분당선이 개통되면서 환승역이 되기 전까지는 비환승 역사 중 승객이 가장 많은 역사였다. 신분당선이 개통됨에 따라 2010년 기준 약 20만 통행에서 2016년 10월 기준 약 30만 5천 통행으로 통행량이 1.5배 이상 증가하였다. 이는 강남역을 이용하고자 하는 자연 증가분을 포함하여 신분당선을 이용한 후 강남 도심 방면으로 이동하려는 환승 수요가 추가되었기 때문으로 판단된다. 전체통행량 대비 통행 종류별 수요를 보면 여전히 노선 승하차 통행량이 73%를 차지하고 있고, 노선환승 수요는 24%를 차지하고 있다.



[그림 4-3] 강남역 내부 구조

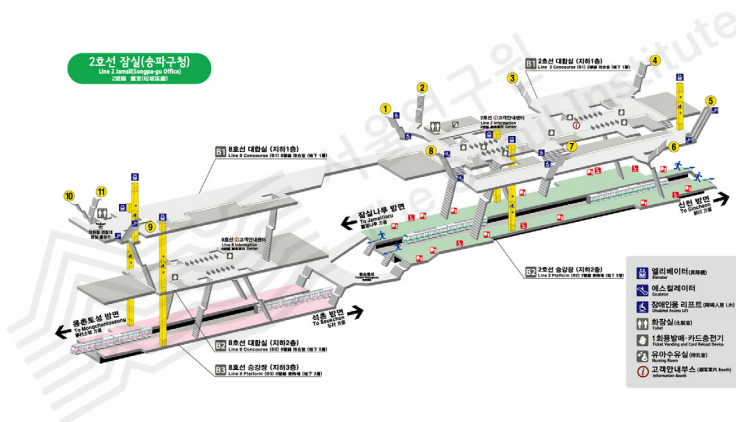


[그림 4-4] 강남역 통행 종류별 비율

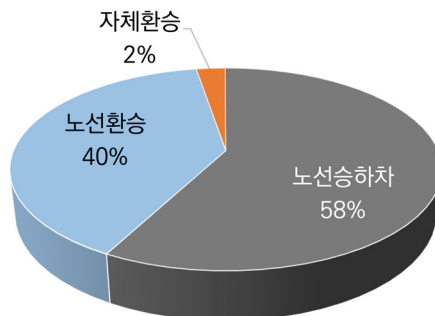
인근 역삼역, 삼성역의 경우 승하차 통행량이 각각 약 11만 통행이 발생되고 있으며, 이는 비환승 역사 중 3, 4위를 차지하고 있을 정도로 혼잡한 역사이다. 또한 2호선과 분당선이 교차하는 선릉역의 경우 환승 통행을 배제한 노선승하차 통행량이 약 15만 통행이다.

강남 도심에 위치한 4개 역사(강남, 역삼, 선릉, 삼성역)에서 전체 승하차 수요는 61만 6천 통행이 발생하고 있다. 강남구 인구가 2016년 기준 57만 명임을 감안하면 구 전체 인구보다 많은 승객이 4개 역사를 이용하고 있다.

전체 수도권 도시철도 역사 중 여섯 번째로 통행량이 많은 잠실역은 삼성역에서 3개 역사 떨어진 송파구에 위치하고 있다. 8호선 개통 후 환승 역사로 바뀌었으며 강동구, 성남시, 하남시 등 외곽 지역에서 강남 방면으로 연결해주는 거점이다. 노선승하차 목적 통행이 전체 통행량 대비 58%로 과반수를 차지하고 있으며, 노선환승은 40%를 차지하고 있다.



[그림 4-5] 잠실역 내부 구조



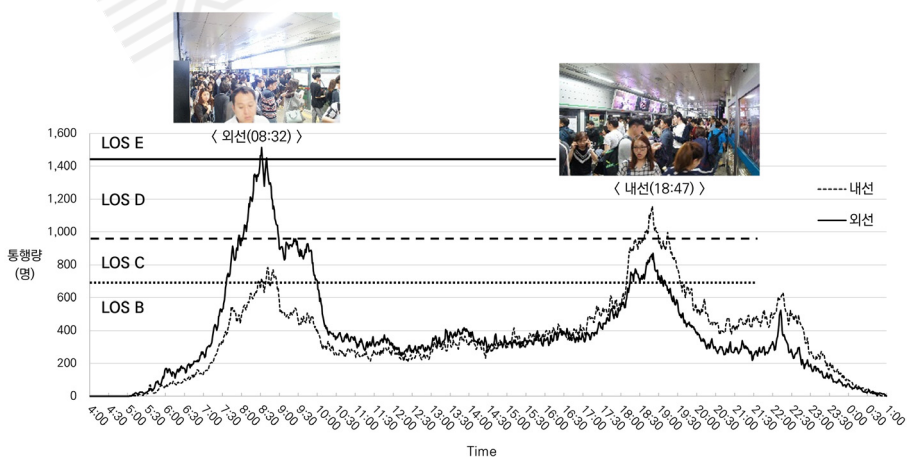
[그림 4-6] 잠실역 통행 종류별 비율

2) 혼잡도 분석 결과

강남역 내선 승강장에서 발생하는 혼잡도를 분석한 결과 출근 첨두시간(08:00~09:00)보다 퇴근 첨두시간(18:00~19:30)에서 상대적으로 혼잡하게 나타나고 있다. 강남역 내선 승강장은 사당역 방향으로 과천, 안양 및 강북 지역으로 퇴근하기 위한 승객이나 관악구, 구로구, 영등포구 등 강서 지역 및 부천, 인천으로 퇴근하는 승객이 집중된다. 또한 22시 전후로 회식, 학원 등을 마치고 귀가하는 승객이 집중되는 2차 첨두가 뚜렷하게 관측되고 있다.

외선 승강장에서 발생하는 혼잡도를 분석한 결과 출근 첨두시간(08:00~09:00)에서 최대 혼잡도가 발생하고 있다. 여기에 22시 전후로 학원 및 회식 이후 귀가하는 승객으로 인해 2차 첨두가 뚜렷하게 관측되고 있다. 강남역은 상업·업무 시설이 매우 밀집되어 있는 서울 3도심 중 하나인 강남 도심에 위치해 있기 때문에 극심한 혼잡도가 발생하고 있다.

강남역의 내·외선 승강장의 실용대기면적은 평균 승강장 면적 대비 넓은 편이나, 통행량도 아주 많아 매우 혼잡하다. 강남역에서 하루 중 가장 혼잡한 시간은 외선 방향으로 출근 첨두시간 중 8시 32분으로 나타나고 있고, 서비스 수준은 LOS E이다. 퇴근 시간의 경우 출근 시간보다 상대적으로 혼잡도가 높는데, 이는 퇴근 통행은 출근 통행에 비해 긴 시간 동안 통행이 이루어지기 때문으로 분석된다.



[그림 4-7] 강남역 내·외선 승강장에서 시간별 혼잡도

계속해서 강남 도심에 위치한 선릉역, 역삼역, 삼성역에 대해 승강장 혼잡도 분석을 실시하였다. 선릉역의 실용대기면적은 390㎡로 평균 이하이며, 최대 통행량은 강남역의 2/3 수준이다. 선릉역은 승강장 면적이 좁고 통행량도 많아 승강장 서비스 수준이 LOS E이다. 역삼역의 경우 실용대기면적은 363㎡로서 평균 이상이고, 삼성역의 실용대기면적은 278㎡로서 평균 이하이다. 강남 도심에 위치한 4개 역사 모두 출근 첨두시간에 승강장 혼잡도가 LOS E로서 개선이 필요하며, 잠실역의 경우 LOS D로 분석되었다.

잠실역의 경우 실용대기면적은 675㎡로 넓은 편이며, 최대 통행량은 강남 도심 방면으로 출근하는 통행이 많은 내선 기준 승강장에서 8시 42분에 발생하고 있고, 서비스 기준은 LOS D이다.

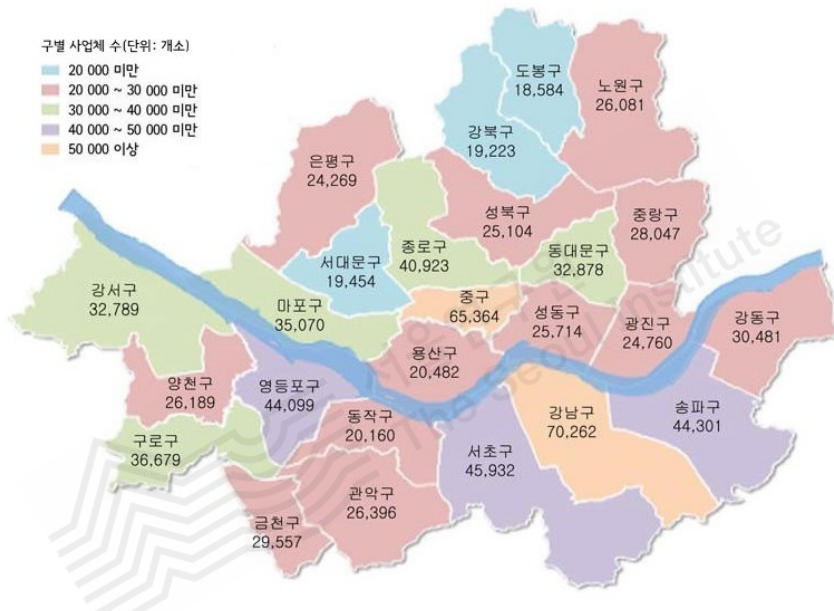
[표 4-1] 강남 도심 및 인근 역사별 승강장 면적 및 혼잡도

역사명	실용대기면적 (㎡)	최대 통행량 (명)	LOS	특성
2호선 강남	564 (외선기준)	1,514	E	환승
2호선 역삼	363 (외선기준)	974	E	비환승
2호선 선릉	390 (외선기준)	1,029	E	환승
2호선 삼성	278 (외선기준)	771	E	비환승
2호선 잠실	675 (내선기준)	1,295	D	환승

3) 혼잡도 개선을 위한 과제

먼저 구조적인 측면에서 살펴보면, 강남역과 잠실역은 승강장 면적이 비교적 넓은 편이고, 선릉역은 평균 수준인 반면, 역삼역과 삼성역의 경우 실용대기면적이 평균 이하이다. 또한 잠실역의 경우 2호선과 8호선 환승 이동거리가 385m로 매우 긴 편이기 때문에 개선이 필요하다. 승강장의 대기 면적을 확장하고, 효율적인 이동 동선을 구축하여 승강장 혼잡도를 감소시켜야 하는 것이 앞으로의 과제이다.

강남 도심 내 도시철도 역사는 주변에 상업·업무 지구가 밀집되어 있기 때문에 통행량이 다른 지역보다 매우 많은 편이다. 지역 특성상 환승 승객보다는 최초 출발 통행 혹은 최종 도착 통행이 대부분이기 때문에 출·퇴근 시간에 강남 도심 방향으로 노선승하차 승객의 비율이 높다. 여기에 잠실역은 주변 지역이 대표적인 거주 중심 지역인 동시에 잠실역 광역환승센터가 위치해 있어 버스와 도시철도 간 환승 통행이 다수 발생하는 역사이다. 따라서 수요 분산 전략을 고려하여 혼잡을 완화시킬 필요성이 제기된다.



자료: 사업체 조사 보고서(통계청, 2014)

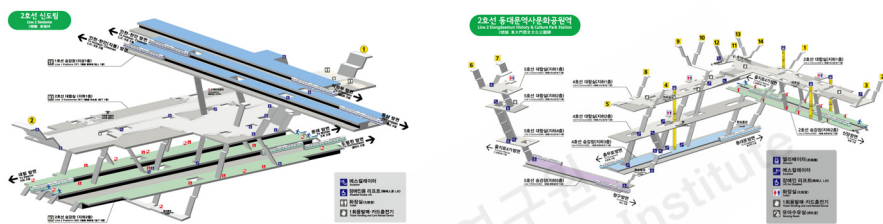
[그림 4-8] 구별 사업체 분포 현황

결론적으로 승하차 통행이 우세한 역사에서는 수요 분산이나 수단 분산을 통한 승강장 혼잡도 완화가 효과적인 방안이 될 수 있다. 따라서 출퇴근 시간 차등 요금제 및 기업체 유연근무제 등을 통해 출·퇴근 목적 통행 분산을 위한 다양한 수요 분산 정책 도입과, 수요대응형 버스 도입을 검토해야 할 것이다.

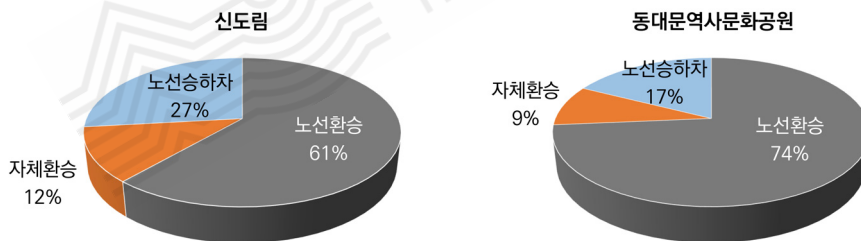
2_환승통행 비율이 높은 역사 사례

1) 사례역사 개요

신도림역의 경우 수도권 도시철도 중 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 도시철도 역사 통행량 상위 10개소 중 가장 높은 비율이다.

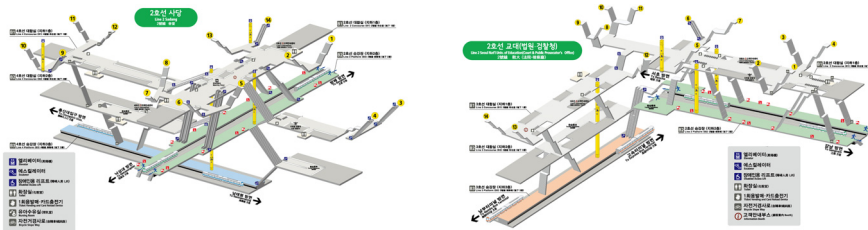


[그림 4-9] 신도림역 및 동대문역사문화공원역 내부 구조

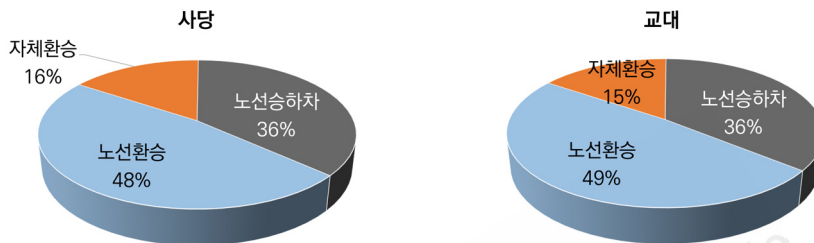


[그림 4-10] 신도림역 및 동대문역사문화공원역 통행 종류별 비율

사당역의 경우 2호선과 4호선이 교차하는 환승역으로 수도권 도시철도 중 통행량이 일곱 번째로 많고, 교대역은 2호선과 3호선이 교차하는 환승역으로 통행량이 아홉 번째로 많다. 사당역과 교대역의 통행 종류별 비율은 매우 유사한 특성을 지닌다.

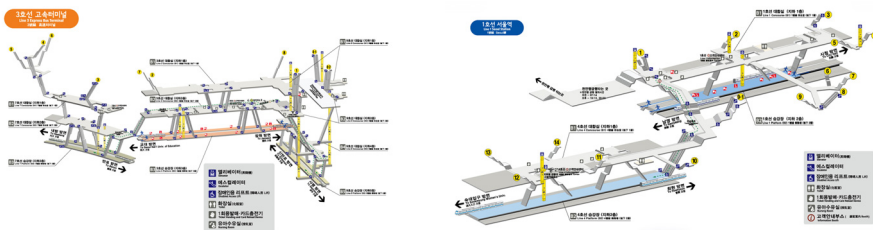


[그림 4-11] 사당역 및 교대역 내부 구조

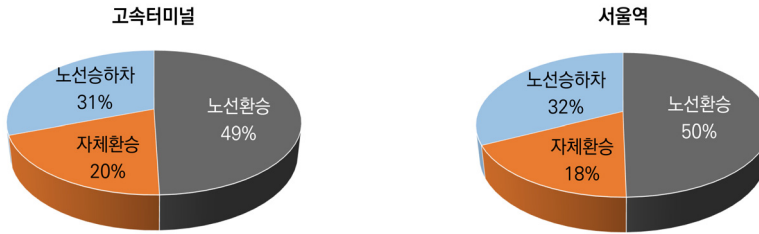


[그림 4-12] 사당역 및 교대역 통행 종류별 비율

고속터미널역의 경우 수도권 도시철도 중 통행량이 네 번째로 많은 역사로 3호선, 7호선, 9호선 등 3개 노선이 교차하는 환승역이다. 서울역은 통행량이 세 번째로 많은 역사로 1호선, 4호선, 경의중앙선, 공항철도 등 4개 노선이 지나는 환승역으로서 왕십리역, 공덕역과 더불어 환승 노선이 가장 많다. 두 역사 모두 통행 종류별 비율이 유사하며, 노선환승 및 자체환승, 노선승하차 비율이 5:3:2이다. 특히 자체환승 비율이 고속버스터미널의 경우 20%, 서울역은 18%로 전체 평균 대비 높다.

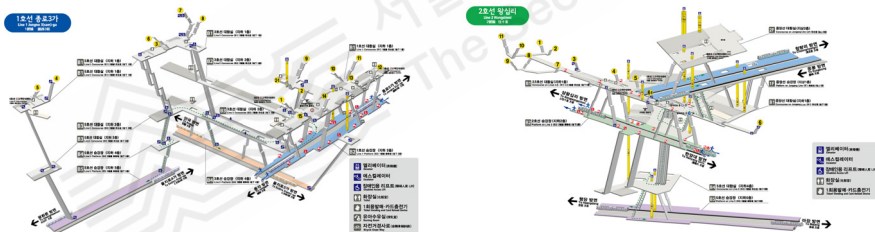


[그림 4-13] 고속터미널역 및 서울역 내부 구조

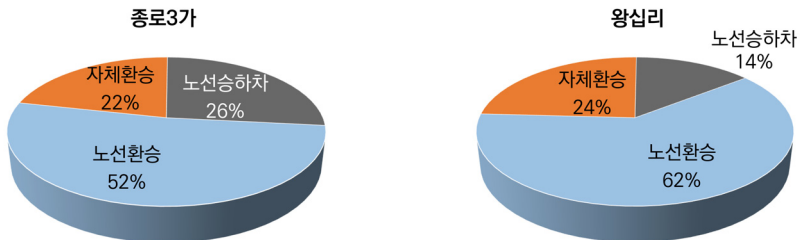


[그림 4-14] 고속터미널역 및 서울역 통행 종류별 비율

종로3가역은 수도권 도시철도 중 통행량이 여덟 번째로 많은 역사로 1호선, 3호선, 5호선이 교차하는 환승역이다. 왕십리역은 통행량이 열 번째로 많은 역사로 2호선, 4호선, 분당선, 중앙선 등 4개 노선이 교차하는 환승역이다. 종로3가역의 경우 자체환승 비율이 22%, 왕십리역의 경우 24%로 비교적 자체환승 비율이 높은 역사이다. 왕십리역은 열 개 역사 중 노선승하차 비율이 자체환승 비율보다 낮은 유일한 역사로서 역사 내 이동이 빈번한 특성을 보이고 있다.



[그림 4-15] 종로3가역 및 왕십리역 내부 구조

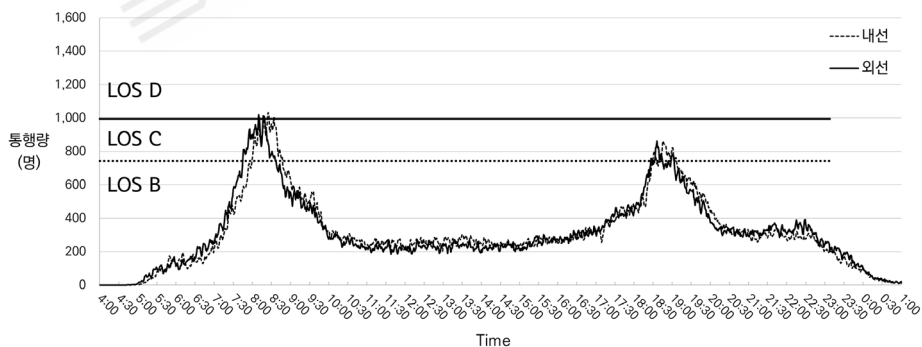


[그림 4-16] 종로3가역 및 왕십리역 통행 종류별 비율

2) 혼잡도 특성 분석 결과

(1) 신도림역

2호선 신도림역 승강장은 쌍상대식 구조이다. 출근 시간대 신도림 출발 열차나 도림천행, 신도림역이 종점인 열차를 제외한 대부분의 열차는 가운데 섬식 구조인 본선 승강장을 활용한다. 따라서 2호선 본선을 이용하는 모든 열차와 승객은 본선 승강장을 이용한다고 가정하고 분석을 실시하였다. 2호선 신도림역 승강장은 섬식 구조이며, 실용대기면적은 598m²이다. 신도림역 내·외선 승강장에서 발생하는 혼잡도를 분석한 결과 출근 시간(08:00~09:00)이 퇴근 시간(18:00~19:30)보다 상대적으로 혼잡하게 나타나고 있다. 출근 시간에 강서 및 부천, 인천 지역에서 신촌·강북 방향으로 이동하는 승객이 집중되며, 외선 승강장의 경우 사당·강남 방면으로 이동하는 승객이 집중된다. 내선 승강장의 경우 8시 25분에 최대 통행량이 나타나며, 외선 승강장의 경우 최대 통행량이 8시 10분에 발생한다. 통상적으로 역사에서 양방향 혼잡 시간대는 각각 다른 시간대(출/퇴근)에 나타나지만, 신도림역의 경우 양방향 모두 출근 시간대에 최대 통행량이 발생하는 특성을 보이며 통행량 시계열에도 유사한 형태가 나타나고 있다. 이는 외선의 경우 강남 도심 방면으로 이동하는 승객이 많고, 내선의 경우 한양도성 방향을 비롯한 홍대입구, 신촌으로 이동하는 승객이 동시에 집중되기 때문이다. 이로 인해 신도림역에서는 양방향 통행이 유사한 특성을 보이고 있고, 출근 시간에 LOS D를 보인다.



[그림 4-17] 신도림역 2호선 승강장별 통행량 시계열

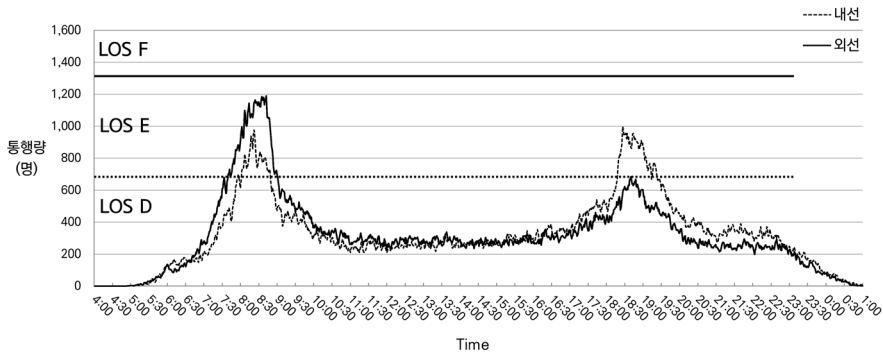
(2) 동대문역사문화공원역

동대문역사문화공원역은 신도림역에 이어 두 번째로 통행량이 많은 역사이나, 승강장은 매우 협소하다. 특히 2호선 승강장은 환승역의 평균 승강장 면적의 절반에 불과하고, 4호선, 5호선은 전체 승강장 평균 수준에 불과하다. 2호선 외선은 실용대기면적이 261m^2 에 불과하지만 최대 통행량은 1,189통행으로 승객 1인당 대기면적이 $0.22\text{m}^2/\text{인}$ 으로 도시철도 승강장 중 가장 작다. 내선도 마찬가지로 승객 1인당 대기면적이 $0.26\text{m}^2/\text{인}$ 으로 매우 혼잡하다. 외선의 경우 출근 시간에 최대 혼잡도가 나타나고 내선의 경우 퇴근 시간에 최대 통행량이 나타나며, 양방향 모두 서비스 수준 LOS E를 보인다. 4호선의 경우 승강장 면적은 평균 수준으로 설계되어 있으나, 상대적으로 통행량이 많아 당고개 방향 승강장이 퇴근 시간에 LOS D를 보이며, 오이도행 방향 승강장은 출근 시간에 LOS E를 보인다. 5호선 승강장의 경우 상일동·마천 방향 승강장은 퇴근 시간에 LOS D를 보이며, 방화 방향 승강장은 출근 시간에 LOS E를 보인다.

분석 결과를 종합하면 동대문역사문화공원역은 전체적으로 승강장 면적이 매우 협소한 반면, 환승통행이 아주 많다. 또한 환승통행이 많음에도 불구하고 환승거리가 매우 긴 편이며, 특히 2호선과 5호선 환승거리가 429m이다. 승강장과 환승통로 구조 개선이 시급한 실정이다.

[표 4-2] 동대문역사문화공원역 승강장별 면적 및 혼잡도

호선	방향	실용대기면적 (m^2)	최대 통행량 (명)	LOS
2호선	내선	261	998	E
	외선	261	1,189	E
4호선	당고개행	509	1,144	D
	오이도행	509	1,528	E
5호선	상일동·마천행	427	888	D
	방화행	427	1,174	E



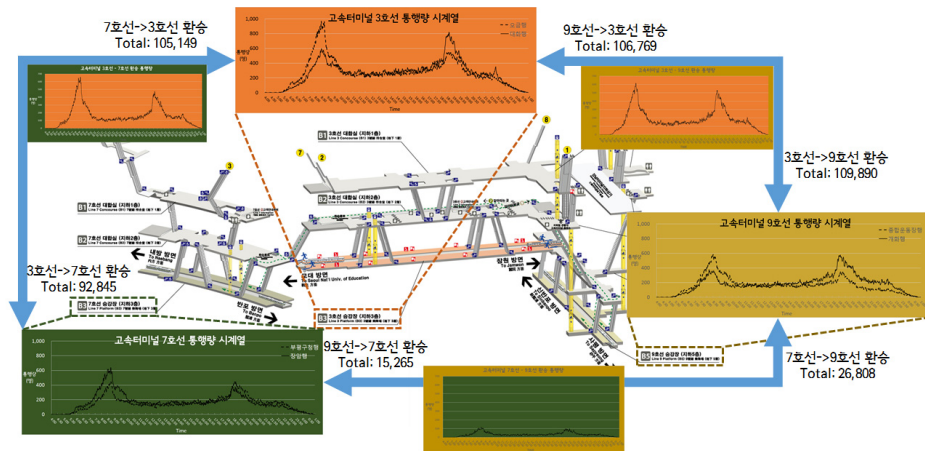
[그림 4-18] 동대문역사문화공원역 2호선 승강장별 통행량 시계열

(3) 고속터미널역 및 서울역

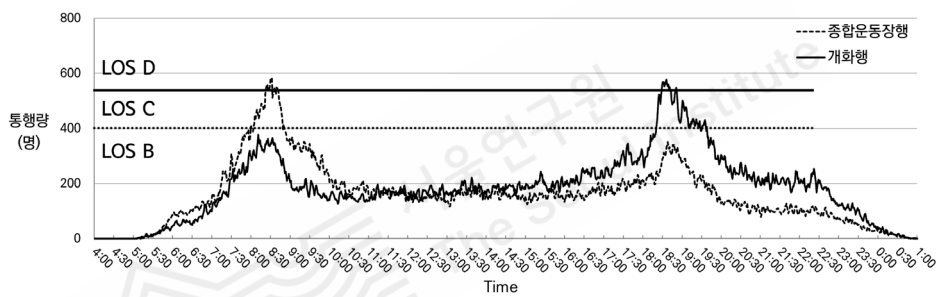
고속터미널역은 3, 7, 9호선이 교차하는 환승역으로서 노선환승 통행이 많고, 고속버스 및 일반 열차, KTX 등과의 연계 환승을 위해 노선 자체환승 통행량이 많은 역사이다.

전반적인 통행량을 살펴보면 3호선 통행량이 가장 많고, 7호선과 9호선은 통행량이 비슷한 특성을 보인다. 각 호선별 승강장 혼잡도의 경우 3호선과 7호선이 출근시간대에 최대 혼잡도를 보이고 있다. 9호선은 종합운동장행 방향이 출근 시간에, 개화행이 퇴근 시간에 양방향 유사한 최대 혼잡도를 보인다. 각 호선 간 환승 통행 패턴을 살펴보면 3호선과 7호선 간 환승 통행량과 3호선과 9호선 간 환승 통행량이 유사한 특성을 보이며, 두 노선 모두 최대 환승 통행량은 출근 시간에 600여 통행이 발생된다. 반면 7호선과 9호선 통행량은 상대적으로 적다. 그 이유는 첫째, 7호선과 9호선 간 환승 거리가 멀어 승객의 환승 저항이 발생하고 있고, 둘째, 두 노선은 강남 구간에서 경쟁 노선이기 때문에 환승 필요성이 낮기 때문으로 파악된다.

각 노선별 승강장 최대 혼잡도는 3호선의 경우 양방향에서 LOS C로 분석되었으며, 7호선의 경우 부평구청행이 LOS A, 장암행이 LOS B로서 3호선, 7호선 모두 양호한 편이다. 하지만 9호선의 경우 LOS D로 나타나 장기적으로 관리가 필요한 실정이다.



[그림 4-19] 고속터미널역 통행 세부 현황



[그림 4-20] 고속터미널역 9호선 승강장별 통행량 시계열

[표 4-3] 고속터미널역 승강장 면적 및 혼잡도

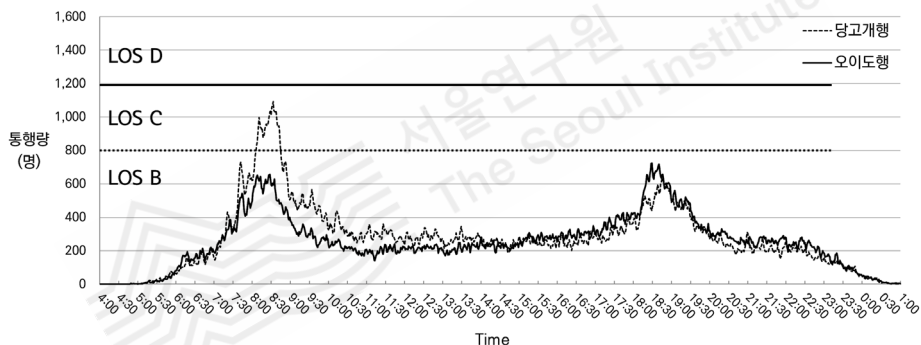
호선	방향	실용대기면적 (㎡)	최대 통행량 (명)	LOS
3호선	오금행	633	969	C
	대화행	633	821	C
7호선	부평구청행	571	448	A
	장암행	571	639	B
9호선	개화행	486 (324)	577	D
	종합운동장행	486 (324)	584	D

주: 괄호 안은 9호선 4량 기준 실용대기면적

서울역에서의 통행 특성을 분석한 결과 출근 시간에 업무·상업 시설이 밀집한 한양도성 방향으로 이동하는 승객이 많다. 1호선의 경우 시청·종각·종로3가 방향의 통행량이 많아 8시 34분에 최대 통행량이 발생하며, 4호선의 경우 명동, 충무로 방향의 통행량이 많아 8시 33분에 최대 통행량이 발생한다. 승강장 혼잡도는 1호선의 경우 출근 시간대에 LOS E로 개선이 필요하며, 4호선의 경우 LOS C로 비교적 양호한 편이다.

서울역의 경우 노선 환승 이동거리가 매우 긴 편이다. 서울역 4호선과 공항철도 환승 이동거리는 910m, 4호선과 경의중앙선은 634m, 1호선과 경의중앙선은 531m, 1호선과 4호선은 342m로 대부분의 환승 이동 거리가 도시철도 환승역사 평균치 이상을 보이고 있다.

서울역은 1호선 승강장의 경우 면적이 매우 협소하고, 노선 환승 이동거리가 매우 긴 특성을 보인다.



[그림 4-21] 서울역 4호선 승강장별 통행량 시계열

(4) 사당역 및 교대역

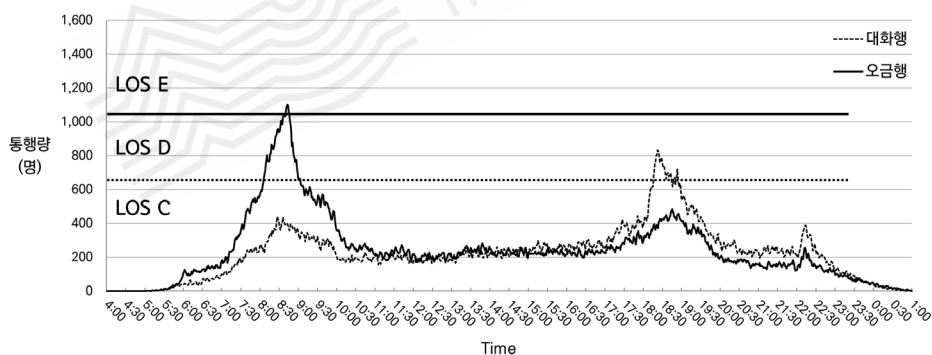
사당역과 교대역은 각각 2개 노선이 교차하는 역사로, 강남 도심지역으로 이동하기 위한 통행량이 많이 발생하는 지역이다. 사당역의 환승 통행 특성은 강북 지역과 안양, 과천에서 강남 방향으로 이동하는 통행량이 많고, 교대역의 경우 일산, 강북 지역에서 강남 방향으로 이동하는 통행량이 많다. 따라서 사당역의 경우 출근 시간대인 8시 19분에 최대 통행량이 발생하며, 교대역은 8시 43분에 최대 통행량이 발생하고 있다. 교대역의 경우 일산·강북 지역에서 강남 도심방향으로 환승하기 위해 이용하는 2호선 외선방향 승강장

과 3호선 오금행 승강장에서 혼잡도가 높다.

교대역의 경우 2호선과 3호선의 최대 통행량은 비슷한 반면, 3호선 승강장이 상대적으로 협소하여 혼잡도가 높다. 실제 3호선 오금행 방향의 승강장에서 출근 시간에 LOS E를 보이고 있어 개선이 필요하다.

[표 4-4] 사당역 및 교대역 승강장 면적 및 혼잡도

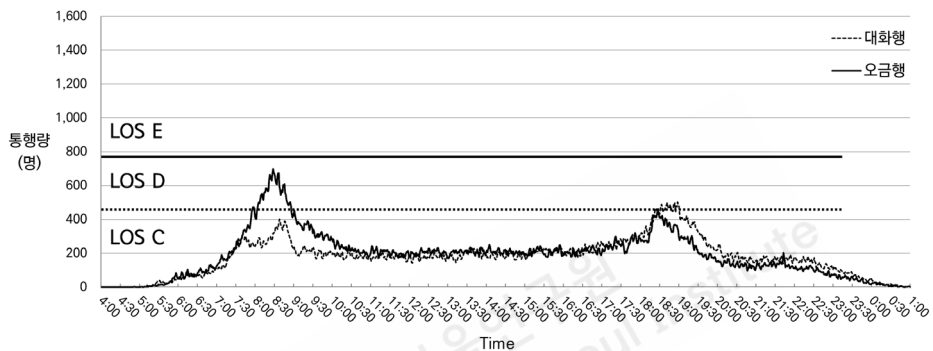
역사	호선	방향	실용대기면적 (㎡)	최대 통행량 (명)	LOS
사당	2호선	내선	740	1,053	C
		외선	740	1,346	D
	4호선	당고개행	471	1,038	D
		오이도행	471	920	D
교대	2호선	내선	501	779	C
		외선	501	1,155	D
	3호선	대화행	427	834	D
		오금행	427	1,103	E



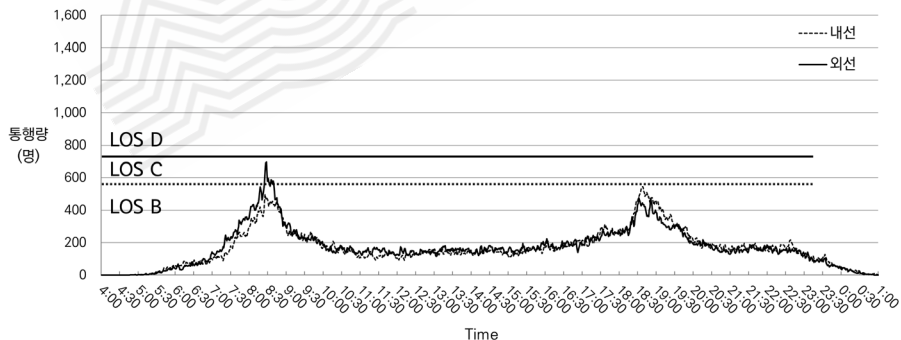
[그림 4-22] 교대역 3호선 승강장별 통행량 시계열

(5) 종로3가역 및 왕십리역

종로3가역은 3개 노선이 교차하는 환승역으로 한양도성 내에 위치한 역사로 통행량이 매우 많다. 특히 3호선 오금역 방향 승강장은 일산에서 한양도성 방향으로 출퇴근하는 승객이 집중되어, 출근 시간인 8시 28분에 최대 혼잡도가 나타난다. 승강장 서비스 수준은 LOS D이며, 승강장 면적 자체가 매우 협소하고 3호선과 5호선 간 환승 이동거리가 비교적 긴 특성을 보인다.



[그림 4-23] 종로3가역 3호선 승강장별 통행량 시계열



[그림 4-24] 왕십리역 2호선 승강장별 통행량 시계열

왕십리역은 4개 노선이 교차하는 환승역으로 역사 내 통행이 매우 빈번하다. 가장 혼잡한 승강장은 2호선 승강장으로 외선 방향에서 8시 28분에 최대 혼잡도를 보이며, 서비스 수준은 LOS C로 양호하다.

3) 혼잡도 개선을 위한 과제

노선환승 통행이 다수인 역사는 승하차 통행이 다수인 역사에 비해 수요 분산 정책의 효과가 상대적으로 떨어진다. 그 이유는 승강장 혼잡도에 영향을 미치는 요소인 노선환승 통행이 환승 역사에서 기종점이 결정되지 않아 이동 방향성이 불확실하기 때문이다. 특히 기종점 간 통행 수요를 분산시키는 것이 주요 목적인 DeRoute 전략은 노선환승 통행 수요 분산 효과가 크지 않다. 또한 시간 수요 분산을 위한 차등 요금제 및 Early Bird 캠페인을 비롯한 기업체 유연근무제는 사업체가 밀집하여 출근시간 도착 통행 비율이 높은 지역에서 효과적인 반면, 환승 비율이 높은 역사에서는 큰 효과가 없다.

따라서 환승 통행이 많은 역사는 승강장 구조 개선 전략이 효과적이다. 동대문역사문화공원역사의 경우 2호선 승강장은 수도권 도시철도 역사 전체와 비교했을 때 승강장 면적이 매우 협소한 역 중 하나이다. 신도림, 고속터미널, 사당, 교대 및 서울역 등의 승강장 면적도 평균 이하로 나타나 구조개선 사업이 필요한 것으로 판단된다. 동시에 서울역, 동대문역사문화공원역, 종로3가역에서 노선 환승 거리가 긴 것으로 나타나 승강장 혼잡도를 개선하기 위해서는 환승 통로 개선사업도 병행할 필요성이 제기된다.

05

도시철도 승강장 동적 혼잡도 개선방안

- 1_도시철도 혼잡 완화 정책 사례
- 2_승강장 혼잡도 개선을 위한 전략
- 3_교통카드 기반 수요분석 모형의 활용방안

05 | 도시철도 승강장 동적 혼잡도 개선방안

1_도시철도 혼잡 완화 정책 사례

본 장에서는 도시철도 승강장의 혼잡도 개선 방안을 도출하기 위해 국내외 관련 정책을 검토하고 국내 실정에 적합한 승강장 혼잡도 개선전략을 도출하고자 한다.

1) 국내 사례

국내의 승강장 혼잡도 개선방안으로는 승강장 관련 시설 개선, 열차운행 확대 및 계획변경, 대체수단 공급, 차등요금제 적용, 혼잡정보 등이 있다.

(1) 승강장 관련 시설 확대 및 개선

강남역·시청역·서울역·교대역·신도림역 등 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.

(2) 열차운행 확대 및 운행계획 변경

오이도역은 섬식 승강장으로 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.

(3) 대체수단 도입

9호선은 수도권 도시철도 노선 중에서 혼잡도가 가장 높은 노선이다. 출근시간대 혼잡도는 최고 233%에 달한다(연합뉴스, 2015). 서울시는 무료 급행순환버스 및 직행버스를 도입하여 도시철도9호선의 승객 수요를 분산시키고, 주요 혼잡 역사 중심으로 안전요원을 배치하는 등 승객의 불편과 혼잡도를 감소시키려는 정책을 추진하였다. 서울시는 시내버스 노선 기초조사 결과를 바탕으로 혼잡도가 높은 버스노선의 경우 도시철도역 기반으로 노선을 선정하여 수요대응형 버스를 도입하였다. 차내 혼잡이 극심한 출근시간대에 운행하는 출퇴근 맞춤버스, 일명 ‘다림쥬버스’를 운행하였다. 그러나 이 같은 대체수단 투입에 따른 도시철도 혼잡 완화 효과는 미미한 것으로 밝혀져 현재는 운행하지 않고 있다.

(4) 시간대별 차등요금제 적용

차등요금제는 첨두시 수요와 비첨두시 수요의 차이가 크게 발생할 때 첨두시 수요를 비첨두시로 유인하는 가격정책이다. 부과 방식은 첨두시간대와 비첨두시간대로 나누고 비첨두시간대 승객에게는 할인혜택을 주고 첨두시간대 승객에게는 할증요금을 부과한다. 대중교통인 도시철도 요금제는 첨두시간대를 기준으로 기본요금을 책정하며, 비첨두시간대에는 요금을 할인하는 정책을 시행하고 있다. 현재 도시철도 요금은 승객에게 조조할인 혜택을 주는 방식을 채택하고 있다. 첫차부터 오전 6시 30분까지 대중교통 기본요금의 20%를 할인해주고 있다. 교통카드로 결제할 경우 도시철도 기본요금은 1,250원인데, 250원을 할인받게 된다. 이 같은 할인제도가 교통수요관리 측면에서 수요분산 효과가 있는지에 대한 객관적인 연구 결과는 아직 없다. 따라서 현행 차등요금정책이 유용한지를 판단하려면 보다 정밀한 연구가 요구된다.

(5) 스마트폰 앱을 통한 혼잡정보 제공

‘도시철도 혼잡도’라는 앱은 열차도착, 급행, 환승 등 역별 기본 정보뿐만 아니라 역별 운행시간대별로 혼잡도에 대한 정보도 제공한다. 혼잡도 정보는 승객이 도시철도를 이용하기 전에 시간대별 혼잡도를 미리 인지하고 도시철도 이용시간을 탄력적으로 변경할 수 있다. 그러나 실시간 정보가 아니고 평일기준 단순 승하차 기준으로 산정한 혼잡도이므로 정보의 신뢰성이 높지 않은 한계를 갖고 있다.

[표 5-1] 국내의 도시철도 혼잡도 완화정책 현황

유형	정책	정책내용
승강장 관련 시설 개선	• 승강장과 환승통로 확대 및 출입구 신설	• 신도림역·강남역·시청역 등 혼잡역사 중심으로 승강장 및 환승통로 폭 확대, 출입구 신설
	• 승강설비 확충	• 엘리베이터 설치가 곤란한 역 위주로 휠체어 리프트와 에스컬레이터 등 승강설비시설 설치
열차운행 확대 및 계획변경	• 열차 운행횟수 및 용량 증대	• 혼잡도 조사와 모니터링을 통해 열차 운행횟수 확대
	• 첨두시간대 섬식 승강장 미운영	• 오이도역은 섬식 승강장이지만 첨두시간대에는 승객의 혼잡을 분산하기 위해 육교를 통해 환승이 이루어짐 • 열차운행 횟수가 적은 오전 10시부터 오후 5시까지 동일 승강장에서 환승이 가능하도록 열차를 운행
대체수단 공급	• 도시철도 9호선과 동일 노선에 급행/순환/직행 버스 도입	• 도시철도 9호선의 승객수요를 분산시키고 혼잡을 완화하기 위해 무료 급행순환 및 직행 버스 도입
	• 수요대응형 버스 서비스 도입	• 서울시 시내버스 노선 기초조사 결과를 바탕으로 혼잡도가 높은 버스노선의 경우 도시철도 역 기반으로 노선을 선정하여 수요대응형 버스를 도입 • 차내 혼잡이 극심한 출근시간대에 운행하는 출퇴근 맞춤버스, 일명 '다람쥐버스'를 운행
차등요금제 적용	• 조조할인	• 첫차부터 오전 6시 30분까지 대중교통 기본요금의 20%를 할인 • 교통카드 도시철도 기본요금은 1,250원이므로 250원 할인
혼잡정보 제공	• 도시철도 혼잡도 앱	• 도시철도 역별 혼잡도에 대한 정보 제공 • 열차도착, 급행, 환승 등 역별 기본 정보 제공

2) 국외 사례

국외의 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, 도시철도요금은 차등요금제를 적용한다. 첨두시 수요를 비첨두시로 유인하는 정책으로, 도시철도 차등요금제는 주로 선진국 대도시들이 시행하고 있는 것이 특징이다.

[표 5-2] 국외의 도시철도 혼잡도 완화정책 현황

국가/도시	정책	정책내용
영국/ 런던	혼잡 관리요원(SCCM: Station Crowd Control Manager) 배치	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 시 시민의 대피를 신속히 도와주는 것이 주요 임무
페루/ 리마	역 출입만 체크	혼잡 예방을 위해 승차 이용객만 체크
인도/ 뉴델리	혼잡 시 도착지 기준으로 승객의 보행경로 분리 및 발권장소 변경 등	- 뉴델리역 외 14개 역에서 혼잡할 경우 물리적으로 바리케이드를 설치하여 승객을 인위적으로 분류 - 도시철도 역사 주변에 혼잡을 피할 수 있도록 임시로 발권장소를 변경함
싱가포르 런던 밴쿠버 뉴욕	차등요금제	- 해외 대도시 도시철도 요금체계는 첨두와 비첨두 시간대를 구분하여 차등요금을 적용시켜 혼잡수요를 분산 - 첨두시간대에는 기본요금을 유지하고 비첨두 시간에는 할인 혜택을 부여

3) 국내외 사례의 시사점

승강장 혼잡도 국내 사례와 국외 사례를 비교 검토한 결과 네 가지 시사점을 도출하였다. 시사점을 토대로 현재 국내 여건을 고려하고 장래에 반영이 가능한 정책인지를 진단하여 향후 국내에 적용 가능한 정책을 제언하고자 한다.

영국과 미국에서는 혼잡수요를 관리요원이 직접 관리한다. 과거에 우리나라에서도 시행했던 정책이었는데 현재는 일부 혼잡 역사에 혼잡 관리요원을 배치하고 있다. 페루는 역에 출입하는 승객만 체크하여 승강장 혼잡도를 감소시키지만, 이는 단일요금제에서만 가능한 정책이다. 인도처럼 바리케이드를 설치하고 발권장소를 임시로 변경하는 등 인위적으로 혼잡수요를 통제하는 방안은 우리나라의 경제 및 시민 수준을 고려할 때 적합하지 않는 것으로 판단된다.

싱가포르, 뉴욕, 런던 등 대도시는 첨두와 비첨두시간대를 구분하여 대중교통 요금을 차등 부과한다. 선진국 대도시들은 비첨두시 대중교통요금을 10~50% 할인해주거나 무료로 이용할 수 있게 한다. 이는 대중교통 이용이 적은 시간대를 대상으로 수요창출을 유도하며, 첨두시 대중교통의 혼잡을 완화시킬 수 있다. 첨두·비첨두시간대도 각 도시의 특성에 따라 적용시간이 다르다. 우리나라 도시철도 요금제는 새벽시간대 조조할인 혜택만 부여하고 있기 때문에 할인 적용시간대가 매우 짧아 첨두시 수요가 비첨두시 수요로 전환되는 효과가 미미하다. 엄밀히 말해 현재 우리나라 도시철도 요금제는 차등요금제를 시행한다고 볼 수 없다. 따라서 수도권 혼잡수요의 특성을 파악하고 효율적으로 첨두시 수요를 비첨두시 수요로 전환할 수 있는 차등요금제 도입이 시급한 것으로 판단된다.

마지막으로, 과거 국내에서 시행되었던 수요대응형 버스는 현재 운행되고 있지 않다. 그 이유는 출근시간대에 운행되는 간선버스는 도로교통 혼잡으로 도시철도에 비해 정시성이 떨어지고 통행시간이 긴 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하려면 혼잡 역들을 연계해주는 버스 서비스가 필요하다. 즉, 지선기능을 수행할 수 있고 도로혼잡에 비교적 덜 영향을 받는 단거리 노선을 운행하는 수요대응형 버스 도입이 필요하다.

[표 5-3] 도시별 도시철도 차등요금제 현황

도시	첨두시		비첨두시	
	시간대	요금	시간대	요금
서울	6:30~막차	1,250원	첫차~6:30	기본요금 20% 할인
런던	6:30~9:30 16:30~19:30	2.8£ (1~2존 기준)	9:30~16:30 19:30~막차	2.2£ (1~2존 기준)
싱가포르	8:00~막차	거리비례제	첫차~7:45	무료
			7:45~8:00	기본요금 50% 할인
워싱턴 DC	첫차~9:30 15:00~19:00	2.25\$~6\$	9:30~15:00 19:00~막차	2\$~3.85\$
밴쿠버	첫차~18:30	CAD2.85\$ (1존 기준)	18:30~막차	CAD1.80\$ (1존 기준)
프랑크 푸르트	6:30~9:00 16:00~18:30	2.9€	9:00~16:00 18:30~막차	10% 할인
뉴욕	6:00~10:30 15:00~19:00	2.75\$	10:30~15:00 19:00~막차	1일 통행권 50% 할인

주: 교통카드 사용 시 2017년 기본요금임.

자료: www.wmata.com / www.lta.gov.sg / www.tfl.gov.uk / www.mta.info /
www.traffiq.de / www.translink.ca

2_승강장 혼잡도 개선을 위한 전략

앞서 제시한 국내외 정책 사례를 종합하면 승강장 혼잡도 개선을 위한 정책은 크게 3가지로 종합할 수 있다.

첫째, 승강장 내부 구조 변경을 통해 도시철도 승강장 혼잡도를 경감시키는 물리적인 구조 개선 정책이다. 승강장의 물리적인 면적은 혼잡도에 가장 직접적으로 영향을 미치는 변수로서, 승강장 구조 개선은 현재에도 시행하고 있고 앞으로도 지속적으로 실시해야 할 것이다.

둘째, 첨두 수요 분산 정책을 통해 승강장의 혼잡도를 개선하는 정책이다. 수요 분산 정책에서 가장 직접적인 방법으로는 차등요금제와 같은 요금 할인 정책이 있다. 이는 첨두 시간에 집중되던 통행량을 비첨두시간으로 유도하는 정책으로, 조조할인 제도 등이 그 한 예이다. 기업체 유연근무제(Early Bird, 자율출퇴근, 책임근무제 등) 문화를 적극 확장시키는 방법은 출퇴근 첨두시간의 통행량을 경감시킬 수 있는 간접적인 수요 분산 정책이다. 실제 국내외 다수의 기업에서 유연근무제가 시행 중인데, 기업체에서 보편적으로 시행된다면 승강장 혼잡 완화에 긍정적인 영향을 미칠 것이다. 또한 현재 이슈화되고 있는 무임승차 제도 개선을 통해 첨두시간대 수요를 비첨두시간대로 분산시키거나 수요를 제거하는 전략을 추진해 승강장 혼잡도를 완화시킨다.

셋째, 수요 자체를 다른 수단으로 전가하여 혼잡을 완화시키는 대표적인 전략으로 수요 대응형 버스 도입이 있다. 상세한 검토 후 도입한다면 승강장 혼잡도 완화에 효과가 있을 것이다.

[표 5-4] 혼잡도 개선 주요 전략

정책	전략	세부 내용	현재 반영	장래 반영
구조 개선 정책	승강장을 비롯한 도시철도 내부 구조 개선	- 승강장 면적 확장을 통한 혼잡 완화 - 승강장과 환승통로의 연결성 개선	△	○
첨두 수요 분산 정책	첨두시간 수요 분산 전략	- 차등요금제 적용 - 기업체 유연근무제 권장	△	○
	도시철도 무임승차 개선	- 무임승차 승객 출퇴근 혼잡시간 요금 부과 - 무임승차 승객 조건 강화(연령 상향 조정)	×	○
수단 간 분산 정책	DeRoute 전략	혼잡 역사 간 수요대응 버스 도입	×	○

주: ○(반영), △(일부반영), ×(미반영)

1) 구조 개선 정책 검토

서울시는 승강장 구조 개선에 대한 필요성을 감지하고 신도림역을 포함한 17개 역사에서 구조 개선 사업을 시작했다. 이에 2호선 신도림역, 강남역, 1호선 시청역, 1·4호선 서울역, 2·3호선 교대역, 1호선 종로3가역, 2호선 역삼역 등 7개 역사의 구조 개선 공사를 완료했다.

사업내용을 살펴보면 먼저 2호선 신도림 역사의 경우 '05년에 기본계획을 발표하고, '11년도에 1차 개선 사업을 마무리하였다. 폭 2.4m에 불과하던 좁은 승강장을 최대 폭 14.4m로 확장하였다. 이후 2호선 시청역, 강남역, 교대역과 1·4호선 서울역 등 주요 혼잡 역사에서 승강장 면적 및 환승 통로를 확장하는 동시에 승강편의시설을 구축하였다.

[표 5-5] 주요 역사별 승강장 구조 변경 내용

역사	개선 내용	완료
2호선 신도림역	승강장 폭 확장 및 통로 개선	'11년 말
2호선 강남역	승강장 폭 확장	'11년 말
2호선 시청역	- 승강장 폭 확장 및 1·2호선 환승 통로 확장 - 승강편의시설 확충	'13년 말
1·4호선 서울역	승강장 폭 확장 및 승강편의시설 확충	'14년 말
2·3호선 교대역	2·3호선 환승 통로 개선	'14년 말

자료: 서울시 내부자료

결과적으로 혼잡도가 극심한 역사에서 부분적인 개선이 이루어졌지만 기대한 만큼 개선효과를 얻기에는 역부족이라는 일각의 평도 있다. 실제 승강장 개선 사업이 마무리된 강남역, 교대역 등에서는 혼잡도 수준이 여전히 LOS E로서, 앞으로도 지속적인 개선 사업을 필요로 하고 있다.

승강장 구조 개선을 통한 혼잡도 감소 효과는 천문학적인 비용이 소요된다. 실제 신도림역 승강장 개선 사업에 들어간 예산만 380억이며, 시청역, 서울역, 교대역 역사 개선 사업에 들어간 비용은 817억 원에 이른다. 승강장 구조 개선은 반드시 필요한 사업이므로 지속적으로 시행되어야 하지만 신중한 계획과 접근이 필요할 것이다.

2) 수요 분산 정책 검토

수요 분산 정책은 두 가지 전략이 있다. 먼저 첨두시간 수요 분산 전략은 첨두시간에 발생하는 통행량을 비첨두시간으로 분산시키거나 첨두시간대 수요를 제거하여 첨두 통행량을 감소시키는 방안이며, 기업체 유연근무제, Early Bird 제도, 무임승차 제도 개선 등이 있다. 수단 간 수요 분산 정책은 DeRoute 전략이며, 대표적으로 수요대응형 버스 도입이 있다.

(1) 첨두시간 수요 분산 기대 효과

다양한 수요 분산 정책이 원활하게 시행된다면, 첨두시간의 통행량이 비첨두시간으로 이동하여 승강장 혼잡도 완화를 기대할 수 있다. 여기에서는 실제로 수요 분산 효과가 승강장 혼잡도에 어떻게 영향을 미치는지 검토하기 위해, 혼잡 권역을 대상으로 사례 분석을 실시하였다.

먼저 분석 대상 공간은 강남 도심권 내에 위치한 2호선 사당역에서 삼성역 구간으로 설정하였다. 해당 구간은 통행량이 가장 많고, 혼잡도도 가장 높은 구간으로 오래전부터 개선이 요구되었던 구간이다. 목표 시간은 도시철도 통행량이 가장 많은 출근 첨두시간(08:00~09:00)으로 설정하여 해당 시간에 승강장 혼잡도 감소 효과를 추정하였다.

대안 1의 경우 2호선 외선 구간 중 사당역-강남역 내 5개 역사의 출근 첨두시간 통행수요 중 20%가 1시간 이전으로 이동할 경우의 변화 양상을 추적했다. 대안 2의 경우 대

안 1과 유사하나 역사 범위를 사당역-삼성역으로 해 대상 역사를 8개로 확장하였다. 대안 3은 역사 범위는 대안 1과 동일하나 통행수요 변화를 20%에서 50%로 증가시켰다.

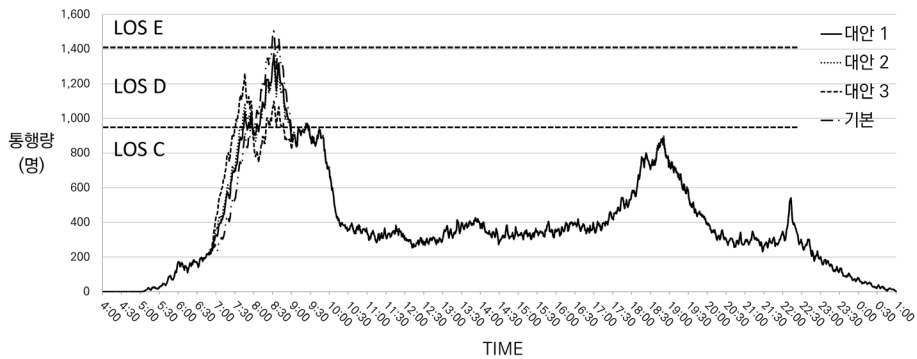
[표 5-6] 대안별 세부 내용

	기존	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	-	-20%	-20%	-50%

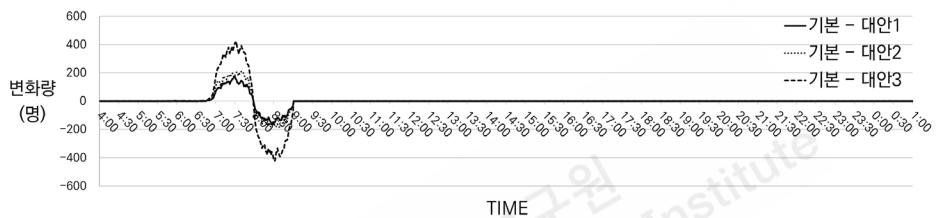
먼저 강남역 외선 승강장에서 대안별 혼잡도 분석을 실시하였다. 가장 혼잡한 시간은 8시 32분으로 파악되었고, 대안별 분석 결과 최대 통행량이 대안 1에서는 9.8%, 대안 2에서는 12.3%, 대안 3에서는 27.7%가 감소하였다. 승강장 서비스 수준도 기존 LOS E에서, 대안 2, 대안 3을 적용한 결과 LOS D로 낮아져 혼잡도가 완화되었다.

[표 5-7] 강남역 대안별 분석 결과

	대안 1	대안 2	대안 3
시간(최대 혼잡)	08:32		
통행량 감소(명)	1,521 -> 1,372 (-149)	1,521 -> 1,334 (-187)	1,521 -> 1,099 (-422)
통행량 감소율(%)	-9.8	-12.3	-27.7



[그림 5-1] 강남역 승강장 대안별 혼잡도 분석 결과

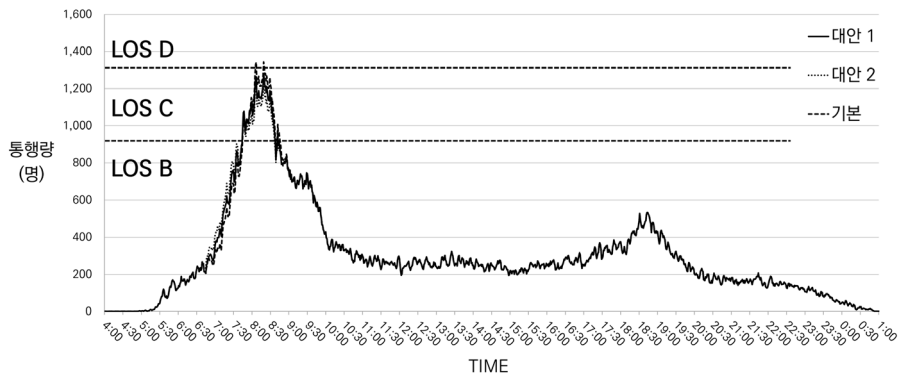


[그림 5-2] 강남역 승강장 대안별 통행량 편차

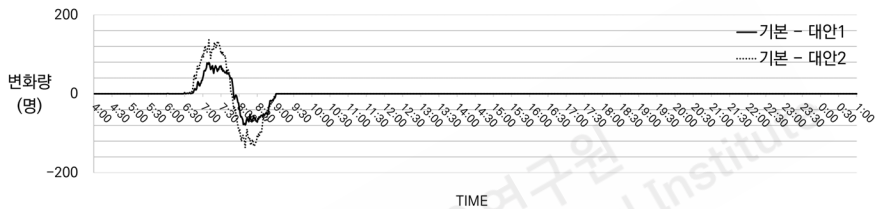
사당역 외선 승강장에서 대안별 혼잡도 분석 결과 가장 혼잡한 시간은 8시 19분으로 파악되었다. 대안별 분석 결과 최대 통행량이 대안 1에서 4.7%, 대안 2에서 9.7%가 감소하였다. 기존 승강장 서비스 수준은 LOS D였으나, 대안 적용 결과 LOS C로 혼잡도가 완화되었다.

[표 5-8] 사당역 대안별 분석 결과

	대안 1	대안 2
시간(최대 혼잡)	08:19	
통행량 감소(명)	1,343 → 1,280 (-63)	1,343 → 1,213 (-130)
통행량 감소율(%)	-4.7	-9.7



[그림 5-3] 사당역 승강장 대안별 혼잡도 분석 결과



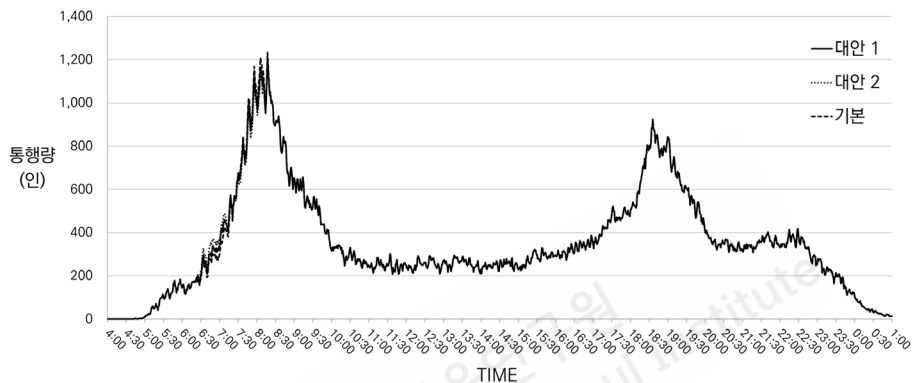
[그림 5-4] 사당역 승강장 대안별 통행량 편차

강남 도심 지역에 위치한 역사에 수요 분산 정책을 실시할 경우, 영향권 내에 위치한 역사(신도림역, 잠실역)에도 간접적인 혼잡도 완화 효과가 있는지를 검토해 보았다.

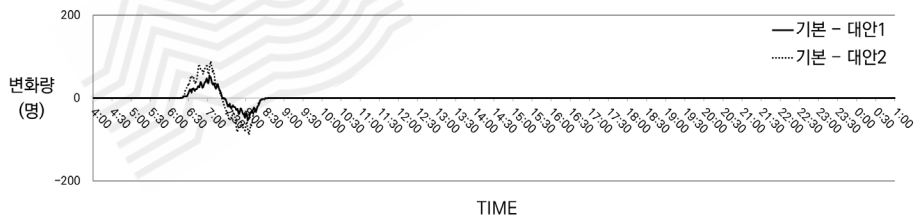
신도림역은 도시철도 역사 중 통행량이 가장 많은 역사로, 강서 지역과 부천, 인천 지역에서 강남 도심 방향으로 이동하기 위한 주요 환승역이다. 따라서 강남 도심에서 수요 분산 정책을 실시할 경우 신도림역 통행량도 변화할 것으로 추정되며, 완화 효과를 검증하기 위해 신도림역 통행량 변화를 추적하였다. 신도림역 외선방향은 8시 3분 비교적 이른 시간에 최대 혼잡도를 보이며, 대안 2에서 통행량이 최대 6% 감소하였다. 강남 도심 지역에 위치한 역사의 수요 분산 정책이 12개 역사 떨어진 신도림역에도 영향을 미쳐 혼잡도가 감소하는 효과를 보였다.

[표 5-9] 신도림역 대안별 분석

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



[그림 5-5] 신도림역 승강장 대안별 혼잡도 분석 결과

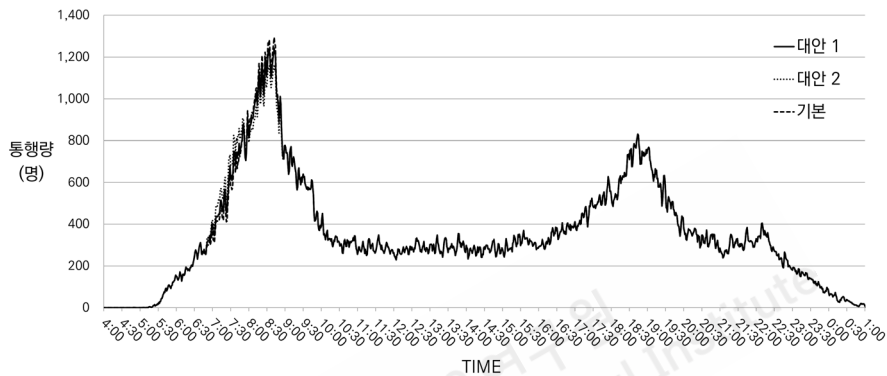


[그림 5-6] 신도림역 승강장 대안별 통행량 편차

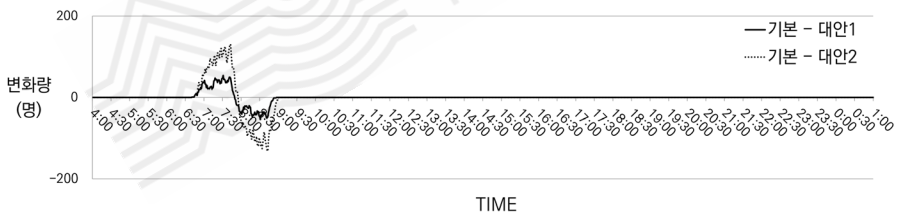
잠실역은 도시철도 2호선과 8호선이 교차하는 환승역이다. 강동 지역 및 성남시, 광주시 등 서울 외곽지역에서 강남 방향으로 이동하기 위한 주요 역사이다. 가장 혼잡한 시간은 8시 42분이며, 대안 2에서 통행량이 10% 감소하였다.

[표 5-10] 잠실역 대안별 분석

	대안 1	대안 2
시간 (최대 혼잡)	08:42	
통행량 감소 (명)	1,294 → 1,143 (-51)	1,294 → 1,164 (-130)
통행량 감소율 (%)	-3.9	-10.0



[그림 5-7] 잠실역 승강장 대안별 혼잡도 분석 결과



[그림 5-8] 잠실역 승강장 대안별 통행량 편차

이상 2호선 주요 혼잡구간을 대상으로 수요 분산에 따른 효과를 대안별로 분석하였다. 결과적으로 수요 분산을 실시하는 내부 권역에서 노선 승하차 통행이 많이 발생하기 때문에 승강장 혼잡 개선 효과가 가장 높았다. 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 수요 분산 효과가 신도림역, 잠실역 등 주변 역사까지 영향을 미친다는 결론을 얻을 수 있었다.

(2) 무임승차제도 개선

현재 도시철도 무임승차 승객으로 인한 비용은 2012년 기준 4,219억 원에 달한다. 무임승차 승객으로 인한 문제가 사회적인 이슈가 됨에 따라 도시철도의 혼잡과 관련하여 무임승차 승객의 도시철도 통행 조건을 강화할 필요성이 있다. 출근 시간에 무임승차 승객에 대한 요금 부분 징수를 통해 비첨두시간으로 통행을 유도하고, 무임승차 승객의 대상 조건을 강화하여 첨두시간 유입을 감소시키는 전략이 필요한 시점이다.

무임승차 주요 대상인 노인 승객은 현재 전체 통행량 중 약 12.7%이며, 이 중 출근 시간(08:00~09:00) 통행량의 무임승차 승객은 4.7%를 차지하고 있다. 따라서 무임승차 대상 승객을 감소시킬 경우 도시철도 승강장 혼잡도를 일부 감소시킬 수 있다. 다만 무임승차 개선은 매우 민감한 문제로서 사회적인 합의가 이루어진 다음 시행되어야 할 것이다.

[표 5-11] 무임승차 통행량 비율

(단위: 명)

구분	전체 통행량	무임승차 통행량	무임승차 통행량 비율(%)
전체 통행량	8,077,611	1,024,244	12.7
출근 첨두 통행량	1,039,890	48,591	4.7
출근 첨두 통행량 비율(%)	12.9	4.7	-

3) 수단 수요 분산 정책

DeRoute 전략은 도시철도 혼잡 구간의 통행 수요를 다른 대체 수단으로 전환시켜 혼잡도를 감소시키기 위한 전략이다. 수요 분산 전략과는 달리 수요 자체를 기타 수단으로 전가시키는 방식으로 수요 분산 전략보다 직접적으로 수요를 분산시키는 방법이다. 우리나라의 경우 '15년도에 9호선 혼잡 완화를 위해 가양역에서 여의도역까지 혼잡구간 급행 버스를 출근시간에 운행한 바 있다. 가양에서 여의도 방면으로 출근하는 11,000명 중 1,800명 정도를 분산시키고자 했지만, 교통 혼잡 등의 영향으로 효과가 미미하여 '16년 10월 운행을 종료했다.

9호선 혼잡구간 급행순환버스 운행



[그림 5-9] 9호선 가양-여의도 급행순환버스 경로

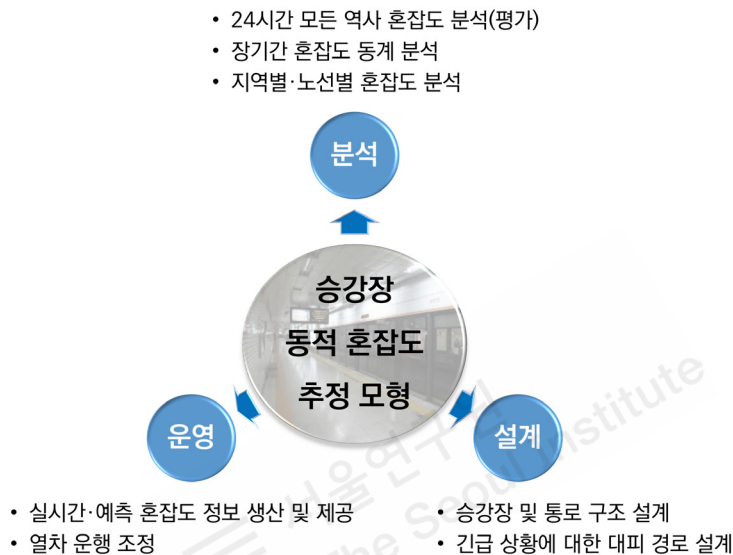
본 연구에서는 2호선 남부순환로 구간인 신림-사당에서 출근 시 도착 통행이 가장 많은 강남-삼성 구간까지 수요대응형 버스 도입 시 효과를 검토해 보았다. 먼저 해당 구간의 출근 시간(08:00~09:00) 통행량은 10,588명으로 기존 9호선 급행순환버스 구간과 통행량이 유사하여 충분한 수요는 존재한다. 하지만 해당 구간에서의 대체 수요가 통과하는 남부순환로 역시 출근 시간대에 매우 혼잡하기 때문에 수요대응형 버스를 도입했을 때 9호선 급행순환버스 사례처럼 실패할 확률이 높다. 따라서 남부순환로에서 버스전용차로 확대 등의 대중교통 정책과 연계해야만 타당성이 있을 것이다. 즉 혼잡 구간에 대한 수요 대응형 버스는 인근 도로의 환경을 고려하고, 대중교통 정책과 병행해야만 충분한 효과를 얻을 수 있다.

[표 5-12] 2호선 주요 혼잡 역사 간 OD 통행량

목적역 출발역	강남	역삼	선릉	삼성	총계
신림	1,091	837	721	674	3,323
봉천	342	282	260	242	1,126
서울대 입구	836	634	519	519	2,508
낙성대	500	389	344	324	1,557
사당	559	507	513	495	2,074
총계	3,328	2,649	2,357	2,254	10,588

3_교통카드 기반 수요분석 모형의 활용방안

본 연구에서 제시한 동적 혼잡도 분석연구 모형은 승강장의 분석·운영·설계 등 다양한 정책지원 모듈로서 활용이 가능하다.



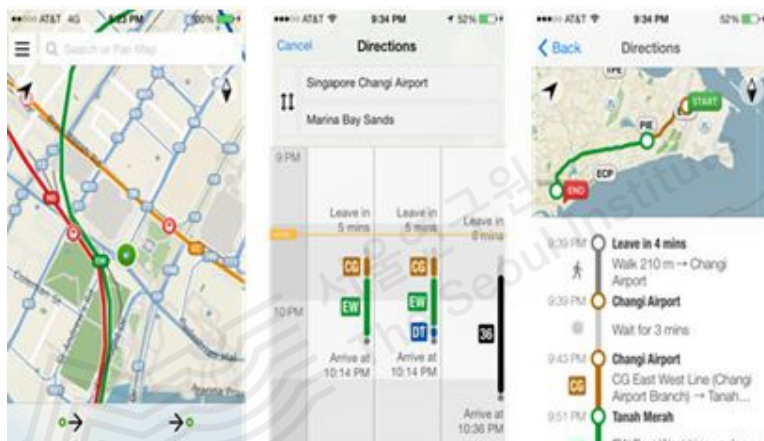
[그림 5-10] 승강장 동적 혼잡도 추정 모형 활용방안

1) 도시철도 승강장 분석 지원

기존 혼잡도 평가는 1-2년 주기로 실시되고 있을 뿐만 아니라 일부 혼잡 역사에 한에서만 실시하고 있다. 또한 일부 첨단기기(비디오 카메라, CCTV, 센서)로 혼잡도를 실시간 관측하고자 시도하고 있지만, 모든 역사를 시공간적으로 조밀하게 관측할 수 없는 현실적인 한계가 존재한다. 이러한 배경에서 교통카드자료는 관측이 필요 없이 전산상 자동으로 수집이 가능하기 때문에 매우 실용성 있는 자료로 판단된다. 본 연구의 수요 분석 모형을 연동한다면 24시간 수도권 도시철도의 모든 역사에서 혼잡도 추정이 가능하다. 또한 시공간적인 제약이 없기 때문에 혼잡도 변화에 대한 장기간 분석이 가능하고, 지역별·노선별 도시철도 혼잡도 평가도 가능하다.

2) 도시철도 승강장 운영 지원

실제 해외에서도 실시간 승강장 혼잡도를 제공하고 있다. 미국과 캐나다의 해외 대중교통 서비스 사업자(Urban Engines)는 가입한 일반 이용자들을 대상으로 실시간 데이터를 수집하고, 기존 대중교통 시스템 정보와 결합하여 혼잡 분석 후 실시간으로 결과를 이용자에게 정보를 제공하고 있다. 실제로 해당 시스템을 도입한 결과 7~15%가량 교통 혼잡이 개선되었다. 브라질, 싱가포르 등에서 활용되고 있으며, 워싱턴에서는 혼잡을 개선하기 위해 도시철도를 활용하는 통근자들을 대상으로 인센티브 제도를 시행해 동선 및 이동 시간을 변경시키고 있다.



[그림 5-11] Urban Engines에서 제공하는 사용자 지원 정보



[그림 5-12] Urban Engines에서 제공하는 대중교통 혼잡 정보

현재 교통카드자료에서 나타나는 승객 ID는 개인정보보호를 위해 전산상에서 암호화되어 저장된다. 따라서 과거 교통카드자료를 활용하여 승객 ID를 추적한다면 개별 승객의 승하차 지점까지 추정 가능하다. 나아가 현재 일별로 수집되는 교통카드자료를 실시간으로 수집할 수 있다면 Urban Engines에서 제공하고 있는 실시간 승강장 혼잡도 수준을 넘어서 단기 예측정보도 제공할 수 있을 것이다.

도시철도 운영자는 승객에게 혼잡도에 대한 실시간 및 예측 정보를 제공함으로써, 승객 스스로가 혼잡 시간을 피하거나, 경로변경을 하도록 해 초기 단계의 혼잡도를 개선할 수 있을 것이다. 또한 실시간 혼잡도 정보를 토대로 열차 스케줄 조정 및 추가 투입 등 혼잡 완화 대응 자료로 활용할 수 있다.

3) 도시철도 승강장 설계 지원

현재 도로용량편람에서는 승강장 통행량을 현장에서 집계하여 설계 면적을 산정하도록 하고 있다. 인적 자원이 투입되어 관측하는 통행량 집계는 앞서 언급한 것처럼 시공간적으로 상당부분 제한된 방법이다. 하지만 본 연구의 모형 결과는 실시간 통행량 정보가 산출되기 때문에 승강장 구조 설계에 효율적으로 활용할 수 있다. 또한 통행 종류별 통행량을 포함하고 있기 때문에 승강장 구조와 이동 및 환승 통로 등에 대한 설계에도 활용할 수 있으며, 긴급 상황에 대비하여 대피 공간이나 대피 경로 설계 시에도 활용할 수 있다.

4) 모형의 한계와 개선방향

본 연구에서 적용된 동적통행분석모형은 승객의 이동이 시간의 흐름에 따라 연속적으로 나타난다는 가정하에 적용되었다. 이 방법론은 통행시간을 주어진 상수로서 표현하는 방안의 가정이 필요하며, 기존 동적통행시간이 통행량에 따라 변하는 함수형태를 가질 경우 동적 통행량의 최적해를 도출하기 어렵다. 또한 승강장 혼잡도 파악이라는 현실 문제를 풀기 위한 방법론으로는 많은 가정이 필요하고, 연산절차가 복잡한 공학적인 가정이 요구된다. 본 연구의 통행배정모형은 이론에 근거한 부분이 많아 현실자료기반(Data-driven)의 보다 직관적인 통행배정방법을 찾는 것이 필요하다.

본 연구의 개선방안으로서 향후 열차의 도착 및 출발 스케줄을 고려하면 승객의 통행집중

행태가 보다 현실적으로 구현될 수 있다³⁾. 또한 역사 내부의 네트워크를 구축하고 경로선택모형을 구현해 승강장을 비롯한 역사 혼잡을 감소시키는 방법도 현실적인 대안이 될 수 있다⁴⁾.



³⁾ Hong, S. P. et al., 2016, "Precise estimation of connections of metro passengers from Smart Card data", Transportation, vol.43, no.5, 749-769.

⁴⁾ Xu, X. et al., 2018, "Passenger flow control with multi-station coordination in subway networks: algorithm development and real-world case study", Transportmetrica B: Transport Dynamics, 1-27.

참고문헌

- 국토교통부, 2013, 「도로용량편람」.
- 국토교통부, 2013, 「도시철도 정거장 및 환승편의시설 설계지침」.
- 서울연구원, 2011, 「최적 대중교통 통합네트워크 구축 연구」.
- 손자언, 2016, “대중교통카드기반 수도권 도시철도 통행수요배정모형”, 『대한토목학회지』, vol.36, no.1, pp.105-114.
- 연합뉴스, 2015, “서울 지하철도 9호선 출근시간대 혼잡도 최고 233%”, 『보도자료(2015. 10. 5)』.
- 윤태관·한성엽·김시곤, 2010, “환승 보행시설의 서비스수준 평가방법에 관한 연구”, 『대한교통학회지』, vol.28, no.1, pp.143-156.
- 이호·장기백·유봉석, 2016, “대도시철도 역사 승강장 실용대기공간면적 산정 연구”, 『교통연구』, vol.23, no.4, pp.61-71.
- 이호·최진경, 2015, “대중교통카드자료를 활용한 도시철도 승강장 혼잡도 추정 알고리즘 개발”, 『한국철도학회지』, vol.18, no.3, pp.270-277.
- 장승용·한성엽·김시곤, 2010, “도시철도 환승역의 환승보행시설의 서비스수준에 관한 연구”, 『한국철도학회지』, vol.13, no.3, pp.339-348.
- 통계청, 2014, 「사업체 조사 보고서」.
- Hong, S. P., Min, Y. H., Park, M. J., Kim, K. M., 2016, “Precise estimation of connections of metro passengers from Smart Card data”, Transportation, vol.43, no.5, pp.749-769.
- Ran, B., Boyce, D. E., 1996, Modeling Dynamic Transportation Networks.
- TRB, 2010, Highway Capacity Manual 2010.
- Xu, X., Li, H., Liu, J., Ran, B., Qin, L., 2018, “Passenger flow control with multi-station coordination in subway networks: algorithm development and real-world case study”, Transportmetrica B: Transport Dynamics, vol.6, no.3, pp.1-27.
- <http://www.wmata.com>(Washington Metropolitan Area Transit Authority)

<http://www.lta.gov.sg>(Land Transport Authority of Singapore)

<http://www.tfl.gov.uk>(Transport for London)

<http://www.mta.info>(Metropolitan Transportation Authority)

<http://www.traffiq.de>(RMV Frankfurt)

<http://www.translink.ca>(Metro Vancouver)



부록

1_수도권 주요 도시철도 역사 특성 현황

역사명	호선	면적	형태	특성	역사명	호선	면적	형태	특성
동대문	1호선	1,045	상대식	환승	성수	2호선	1,239	상대식	환승
동묘앞	1호선	2,097	상대식	환승	시청	2호선	959	섬식	환승
서울역	1호선	1,040	섬식	환승	신당	2호선	1,031	상대식	환승
시청	1호선	1,892	섬식	환승	신대방	2호선	1,240	상대식	
신설동	1호선	1,538	상대식	환승	신도림	2호선	1,794	혼합식	환승
제기동	1호선	1,408	상대식		신림	2호선	979	섬식	
종각	1호선	1,040	섬식		신촌	2호선	1,025	상대식	
종로3가	1호선	1,842	섬식	환승	아현	2호선	742	상대식	
종로5가	1호선	1,104	상대식		역삼	2호선	1,090	상대식	
청량리	1호선	886	섬식	환승	영등포구청	2호선	1,166	상대식	
강남	2호선	1,778	상대식	환승	왕십리	2호선	1,301	상대식	환승
강변	2호선	1,181	상대식		을지로3가	2호선	1,332	상대식	환승
건대입구	2호선	1,287	상대식	환승	을지로4가	2호선	1,251	상대식	환승
교대	2호선	1,503	상대식	환승	을지로입구	2호선	1,425	상대식	
구로디지털단지	2호선	1,172	상대식		이대	2호선	1,108	섬식	
구의	2호선	1,174	상대식		잠실	2호선	2,024	상대식	환승
낙성대	2호선	997	상대식		잠실나루	2호선	1,142	상대식	
당산	2호선	1,375	상대식	환승	잠실새내	2호선	1,281	상대식	
대림	2호선	1,235	상대식	환승	종합운동장	2호선	2,532	상대식	환승
동대문역사 문화공원	2호선	784	상대식	환승	충정로	2호선	1,199	섬식	환승
독성	2호선	1,712	상대식		한양대	2호선	1,084	상대식	
문래	2호선	1,149	상대식		합정	2호선	2,489	상대식	환승
방배	2호선	1,078	상대식		홍대입구	2호선	946	섬식	환승
봉천	2호선	872	섬식		도림천	2호선	653	상대식	
사당	2호선	2,220	상대식	환승	신정네거리	2호선	883	상대식	
삼성	2호선	835	섬식		양천구청	2호선	1,383	상대식	
상왕십리	2호선	959	상대식		도림천	2호선	653	상대식	
서울대입구	2호선	875	섬식		신정네거리	2호선	883	상대식	
서초	2호선	1,195	상대식		양천구청	2호선	1,383	상대식	
선릉	2호선	1,167	상대식	환승	가락시장	3호선	1,754	상대식	환승

역사명	호선	면적	형태	특성	역사명	호선	면적	형태	특성
경복궁	3호선	1,327	섬식		동대문	4호선	1,054	섬식	환승
경찰병원	3호선	1,444	상대식		동대문역사 문화공원	4호선	1,528	섬식	환승
고속터미널	3호선	1,900	상대식	환승	동작	4호선	2,696	상대식	환승
교대	3호선	1,280	섬식	환승	명동	4호선	1,416	섬식	
구파발	3호선	929	섬식		미아	4호선	1,032	상대식	
금호	3호선	908	섬식		미아사거리	4호선	1,292	상대식	
남부터미널	3호선	889	상대식		사당	4호선	1,413	섬식	환승
녹번	3호선	814	섬식		삼각지	4호선	1,465	상대식	환승
대청	3호선	1,312	상대식		상계	4호선	1,212	상대식	
남부터미널	3호선	889	상대식		서울역	4호선	1,434	섬식	환승
녹번	3호선	814	섬식		성신여대 입구	4호선	1,181	상대식	
대청	3호선	1,312	상대식		수유	4호선	1,187	상대식	
대치	3호선	1,499	섬식		숙대입구	4호선	1,013	상대식	
도곡	3호선	2,011	상대식	환승	신용산	4호선	1,085	상대식	
독립문	3호선	802	섬식		쌍문	4호선	1,045	상대식	
동대입구	3호선	1,008	섬식		이촌	4호선	1,064	상대식	환승
매봉	3호선	1,274	상대식		창동	4호선	986	상대식	환승
무악재	3호선	899	상대식		충신대입구	4호선	1,180	상대식	환승
불광	3호선	1,062	상대식	환승	충무로	4호선	1,237	상대식	환승
수서	3호선	1,667	복합식	환승	한성대입구	4호선	818	섬식	
신사	3호선	1,030	상대식		혜화	4호선	949	상대식	
안국	3호선	1,181	섬식		회현	4호선	1,351	섬식	
압구정	3호선	997	상대식		강동	5호선	1,510	복합식	환승
약수	3호선	820	섬식	환승	강동	5호선	1,510	복합식	환승
양재	3호선	984	상대식	환승	개롱	5호선	940	상대식	
연신내	3호선	825	섬식	환승	개화산	5호선	1,065	상대식	
오금역	3호선	1,365	상대식	환승	거여	5호선	908	상대식	
옥수	3호선	964	상대식	환승	고덕	5호선	1,143	상대식	
을지로3가	3호선	820	섬식	환승	공덕	5호선	848	섬식	환승
일원	3호선	1,510	상대식		광나루	5호선	1,115	상대식	
잠원	3호선	908	상대식		광화문	5호선	818	섬식	
종로3가	3호선	900	섬식	환승	군자	5호선	1,365	섬식	환승
지축	3호선	469	섬식		굽은다리	5호선	913	상대식	
충무로	3호선	1,930	섬식	환승	길동	5호선	852	상대식	
학여울	3호선	1,636	상대식		김포공항	5호선	1,743	상대식	환승
홍제	3호선	938	섬식		끼치산	5호선	1,379	상대식	환승
길음	4호선	1,098	섬식		답십리	5호선	938	상대식	
남태령	4호선	975	섬식		동대문역사 문화공원	5호선	1,281	섬식	환승
노원	4호선	1,489	상대식	환승	둔촌동	5호선	891	상대식	
당고개	4호선	1,230	상대식		마곡	5호선	1,169	상대식	

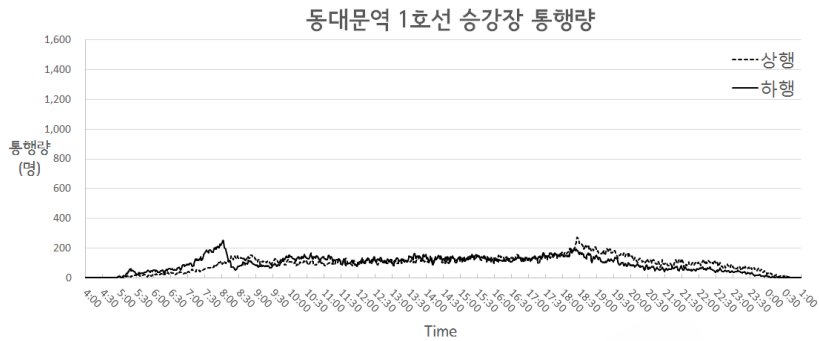
역사명	호선	면적	형태	특성	역사명	호선	면적	형태	특성
마장	5호선	988	상대식		돌곶이	6호선	1,080	상대식	
미천	5호선	905	상대식		동묘앞	6호선	1,372	섬식	환승
마포	5호선	998	섬식		디지털미디어시티	6호선	1,648	상대식	환승
명일	5호선	903	상대식		마포구청	6호선	1,061	상대식	
목동	5호선	1,014	상대식		망원	6호선	951	상대식	
발산	5호선	1,188	상대식		버티고개	6호선	1,315	상대식	
방이	5호선	932	상대식		보문	6호선	992	섬식	
방화	5호선	1,151	복합식		봉화산	6호선	1,481	복합식	
상일동	5호선	1,020	복합식		불광	6호선	699	상대식	환승
서대문	5호선	960	섬식		삼각지	6호선	1,227	섬식	환승
송정	5호선	1,154	상대식		상수	6호선	1,006	섬식	
신금호	5호선	1,219	섬식		상월곡	6호선	1,191	복합식	
신길	5호선	1,752	상대식	환승	새절	6호선	1,211	복합식	
신정	5호선	795	상대식	환승	석계	6호선	1,534	상대식	환승
아차산	5호선	918	상대식		신당	6호선	1,492	섬식	환승
애오개	5호선	917	상대식		안암	6호선	889	상대식	
양평	5호선	1,024	상대식		약수	6호선	955	상대식	환승
여의나루	5호선	1,161	섬식		역촌	6호선	963	상대식	
여의도	5호선	1,346	상대식	환승	연신내	6호선	1,210	상대식	환승
영등포구청	5호선	1,407	상대식	환승	월곡	6호선	941	상대식	
영등포시장	5호선	1,527	상대식		월드컵경기장	6호선	1,688	상대식	
오금	5호선	1,285	상대식	환승	응암	6호선	1,676	섬식	
오목교	5호선	1,229	상대식		이태원	6호선	967	섬식	
올림픽공원	5호선	1,061	상대식		종산	6호선	994	상대식	
왕십리	5호선	1,634	상대식	환승	창신	6호선	1,020	섬식	
우장산	5호선	995	상대식		청구	6호선	1,215	상대식	환승
을지4가	5호선	1,055	섬식	환승	태릉입구	6호선	1,644	상대식	환승
장한평	5호선	1,130	섬식		한강진	6호선	1,222	상대식	
종로3가	5호선	1,263	섬식	환승	합정	6호선	1,218	상대식	환승
천호	5호선	1,634	상대식	환승	화랑대	6호선	1,305	상대식	
청구	5호선	957	섬식	환승	효창공원앞	6호선	1,011	섬식	환승
충정로	5호선	960	섬식	환승	가산디지털단지	7호선	1,217	상대식	환승
행당	5호선	1,090	상대식		강남구청	7호선	1,186	상대식	환승
화곡	5호선	991	섬식		건대입구	7호선	1,073	상대식	환승
고려대	6호선	1,213	상대식		고속터미널	7호선	1,713	상대식	환승
공덕	6호선	2,284	상대식	환승	공릉	7호선	1,084	상대식	
광흥창	6호선	991	섬식		광명사거리	7호선	1,010	복합식	
구산	6호선	831	상대식		군자	7호선	1,138	상대식	환승
녹사평	6호선	1,021	섬식		굴포천	7호선	1,074	상대식	
대흥	6호선	1,073	섬식		까치울	7호선	969	섬식	
독바위	6호선	682	상대식		남구로	7호선	777	상대식	

역사명	호선	면적	형태	특성	역사명	호선	면적	형태	특성
남성	7호선	1,060	상대식		남한산성입구	8호선	740	상대식	
내방	7호선	1,046	상대식		단대오거리	8호선	818	상대식	
노원	7호선	1,038	섬식	환승	모란	8호선	1,080	상대식	환승
논현	7호선	1,223	상대식		몽촌토성	8호선	687	상대식	
대림	7호선	1,152	상대식	환승	문정	8호선	958	상대식	
도봉산	7호선	1,172	상대식	환승	복정	8호선	1,071	섬식	환승
독섬유원지	7호선	1,233	상대식		산성	8호선	1,132	상대식	
마들	7호선	1,050	섬식		석촌	8호선	821	상대식	
먹골	7호선	986	상대식		송파	8호선	957	상대식	
면목	7호선	924	상대식		송파	8호선	957	상대식	
반포	7호선	1,026	상대식		수진	8호선	833	상대식	
보라매	7호선	870	섬식		신흥	8호선	833	상대식	
부천시청	7호선	1,893	섬식		암사	8호선	706	상대식	
부천종합운동장	7호선	974	섬식		잠실	8호선	1,327	상대식	환승
부평구청	7호선	1,945	상대식	환승	장지	8호선	814	상대식	
사기정	7호선	989	상대식		천호	8호선	1,439	상대식	환승
삼산체육관	7호선	1,064	상대식		개화	9호선	1,745	섬식	일반
상도	7호선	895	상대식		공항시장	9호선	1,916	상대식	일반
상동	7호선	1,174	상대식		신방화	9호선	1,998	상대식	일반
상봉	7호선	878	상대식	환승	마곡나루	9호선	2,496	복합식	일반
수락산	7호선	1,177	복합식		양천향교	9호선	1,334	상대식	일반
송실대입구	7호선	1,048	상대식		가양	9호선	2,125	복합식	급행
신대방삼거리	7호선	894	상대식		증미	9호선	1,520	상대식	일반
신중동	7호선	1,866	섬식		등촌	9호선	2,156	상대식	일반
신풍	7호선	1,375	상대식		염창	9호선	1,692	상대식	급행
어린이대공원	7호선	935	상대식		신목동	9호선	1,614	섬식	일반
온수	7호선	1,356	복합식	환승	선유도	9호선	1,828	상대식	일반
용마산	7호선	1,016	상대식		당산	9호선	2,066	섬식	급행
이수	7호선	1,362	상대식	환승	국회의사당	9호선	1,961	섬식	일반
장승배기	7호선	936	상대식		여의도	9호선	2,484	상대식	급행
장암	7호선	500	상대식		샛강	9호선	1,994	상대식	일반
중계	7호선	1,021	섬식		노량진	9호선	2,151	상대식	급행
중곡	7호선	816	상대식		노들	9호선	1,014	상대식	일반
중화	7호선	955	상대식		노들	9호선	805	상대식	일반
천왕	7호선	896	상대식		흑석	9호선	885	상대식	일반
철산	7호선	1,026	상대식		흑석	9호선	870	상대식	일반
청담	7호선	1,113	복합식		동작	9호선	2,863	복합식	급행
춘의	7호선	975	섬식		구반포	9호선	861	상대식	일반
태릉입구	7호선	1,334	상대식	환승	신반포	9호선	1,964	상대식	일반
하계	7호선	1,031	섬식		고속터미널	9호선	2,916	상대식	급행
학동	7호선	1,179	상대식		사평	9호선	1,797	상대식	일반
가락시장	8호선	1,309	상대식	환승	신논현	9호선	2,503	상대식	급행
강동구청	8호선	828	상대식						

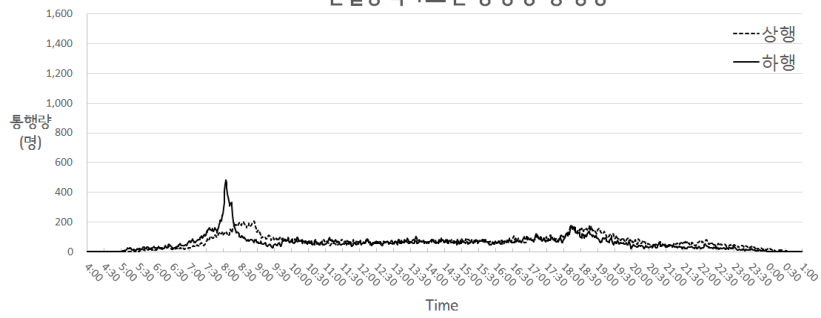
2_주요 역사 환승이동거리

역사명	출발노선	도착노선	출발->도착	도착->출발
			이동거리(m)	
강남역	2호선	신분당선	249.9	253.9
고속터미널역	3호선	7호선	246.6	245.5
	3호선	9호선	246.7	249.9
	7호선	9호선	493.3	495.5
교대역	2호선	3호선	264.8	270.0
동대문역사문화공원역	2호선	4호선	156.4	158.1
	2호선	5호선	429.5	427.7
	4호선	5호선	269.2	266.5
사당역	2호선	4호선	189.1	224.6
서울역	1호선	4호선	339.8	344.0
	1호선	경의선	530.2	531.7
	1호선	공항철도	811.3	822.9
	4호선	경의선	633.1	633.9
	4호선	공항철도	904.7	915.7
	경의선	공항철도	944.6	954.8
신도림역	1호선	2호선	156.1	167.3
왕십리역	2호선	5호선	226.7	223.7
	2호선	중앙선	180.0	176.2
	2호선	분당선	217.0	213.2
	5호선	중앙선	280.5	272.1
	5호선	분당선	332.5	325.1
	중앙선	분당선	102.0	102.0
잠실역	2호선	8호선	384.4	389.7
종로3가역	1호선	5호선	431.5	435.7
	3호선	5호선	324.6	324.7
평균	수도권 전체 역사		268.0	

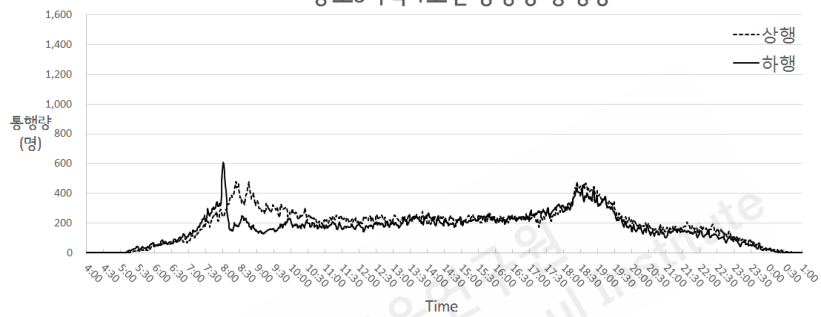
3_1호선 주요 역사별 승강장 혼잡도 시계열



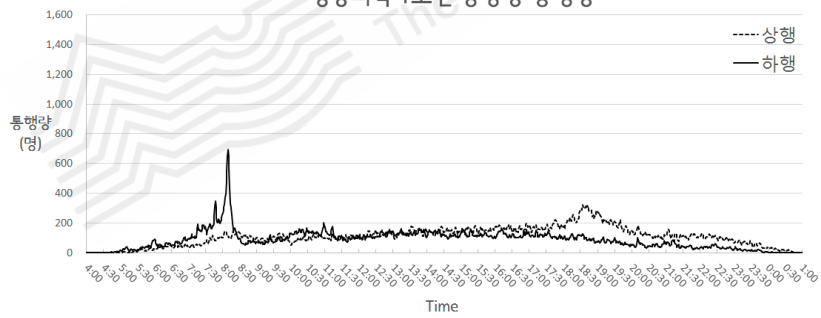
신설동역 1호선 승강장 통행량



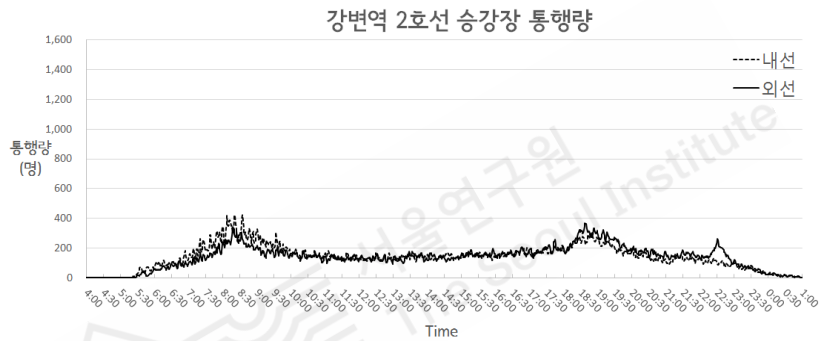
종로3가역 1호선 승강장 통행량



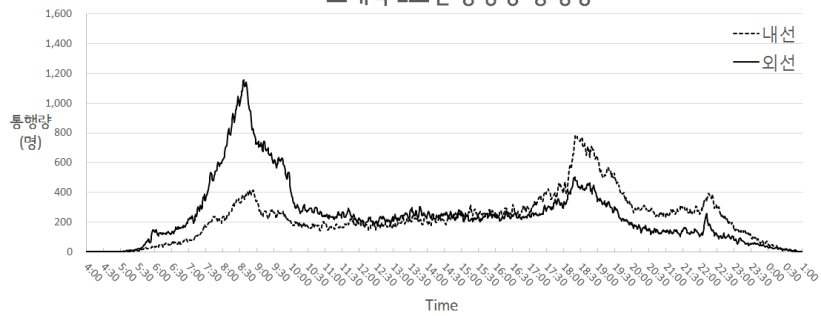
청량리역 1호선 승강장 통행량



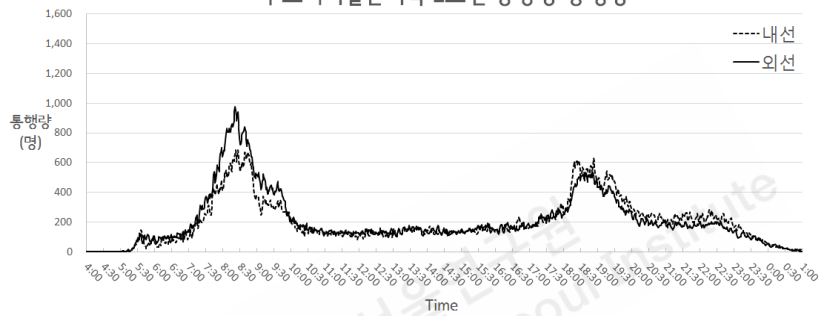
4_2호선 주요 역사별 승강장 혼잡도 시계열



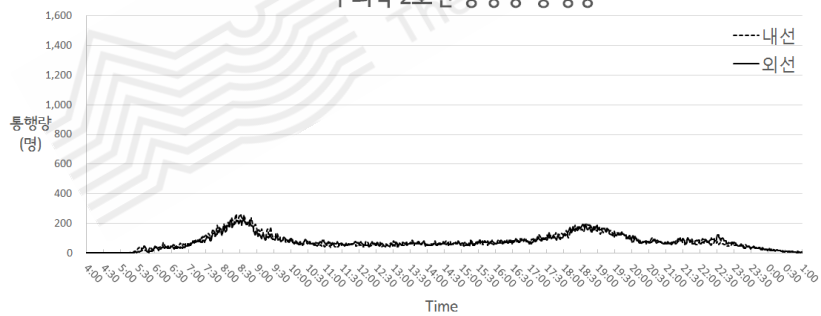
교대역 2호선 승강장 통행량



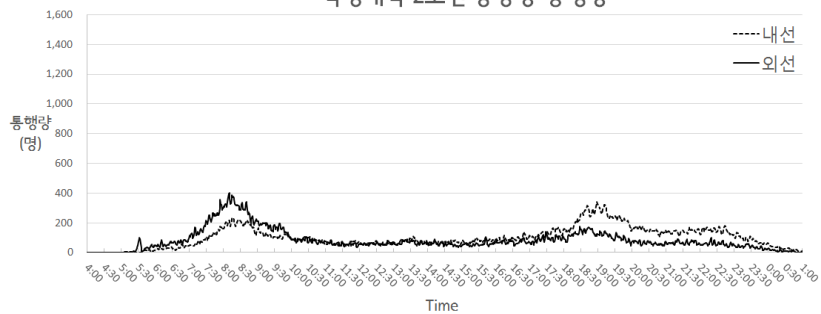
구로디지털단지역 2호선 승강장 통행량

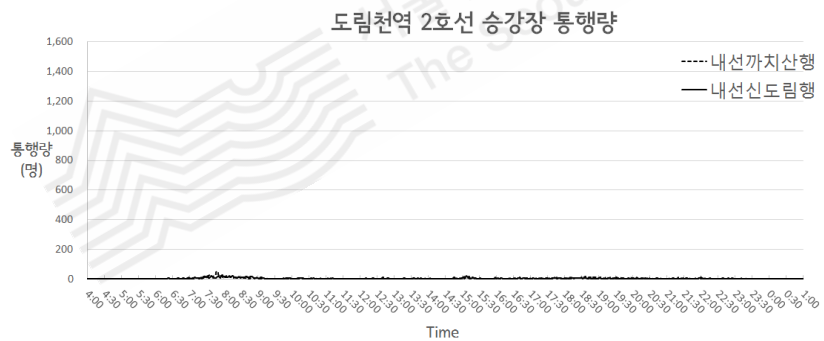
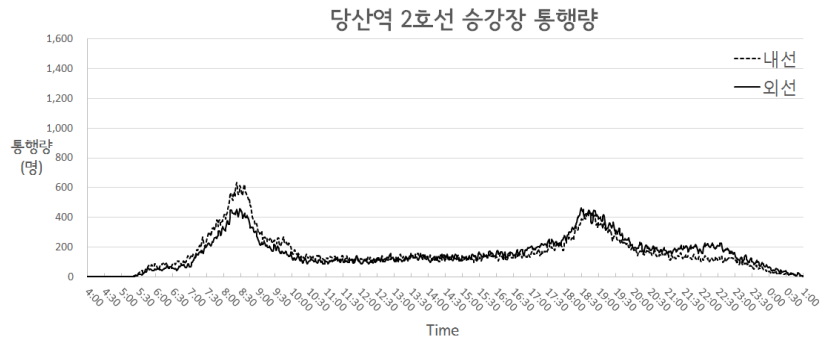


구의역 2호선 승강장 통행량

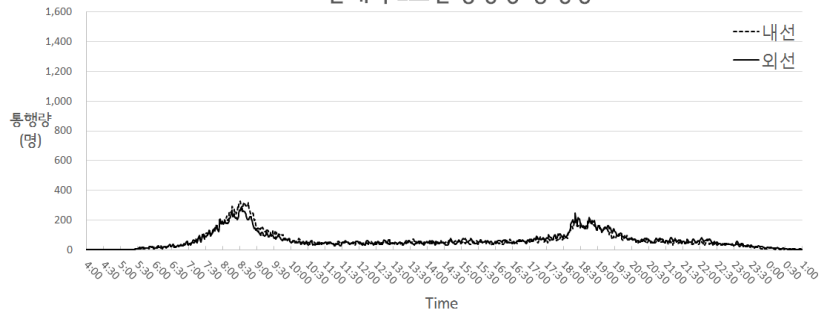


낙성대역 2호선 승강장 통행량

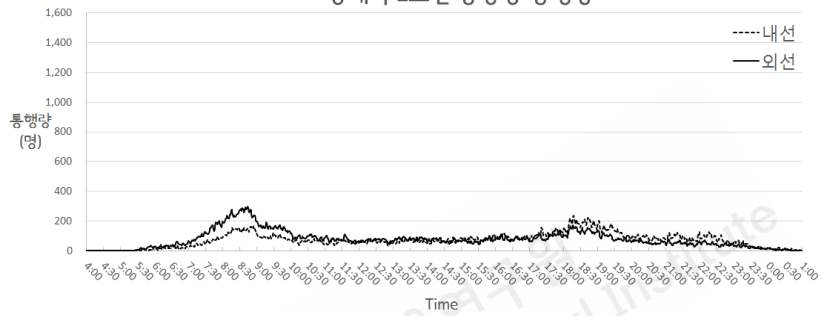




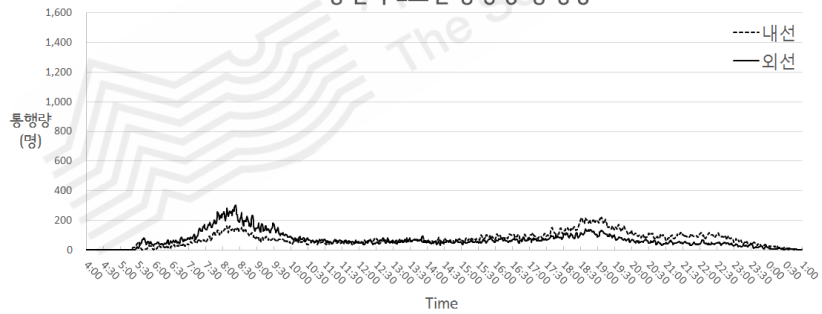
문래역 2호선 승강장 통행량



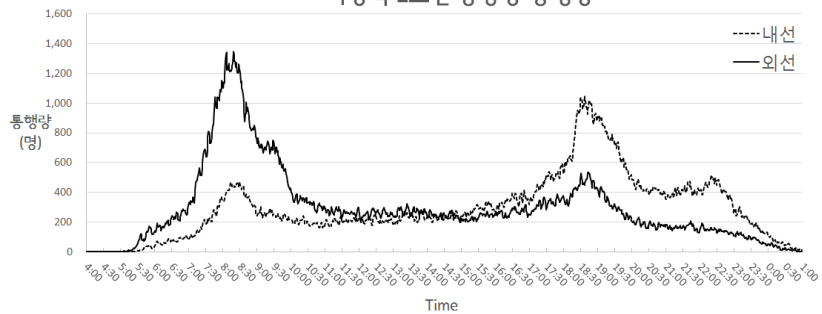
방배역 2호선 승강장 통행량

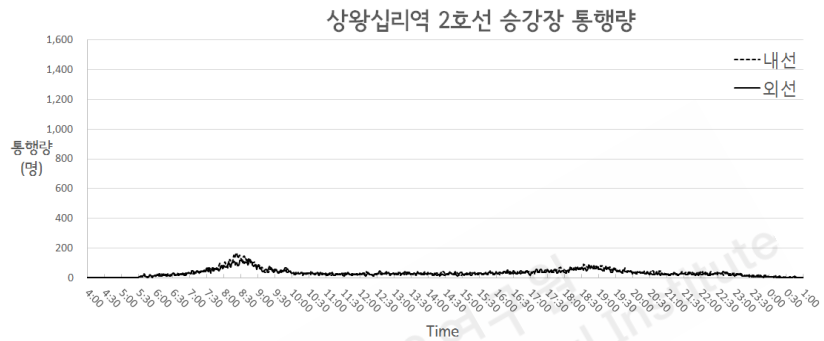
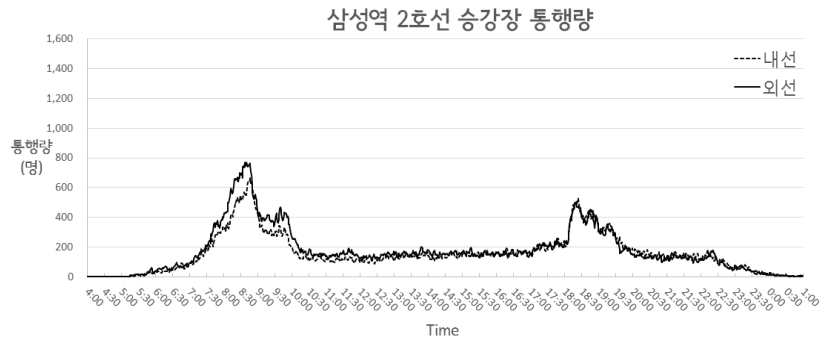


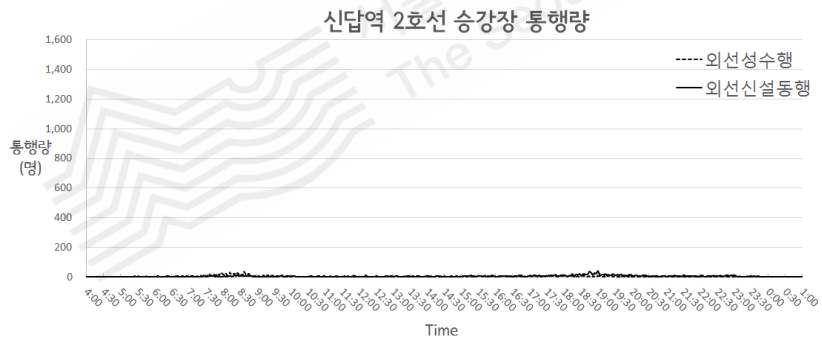
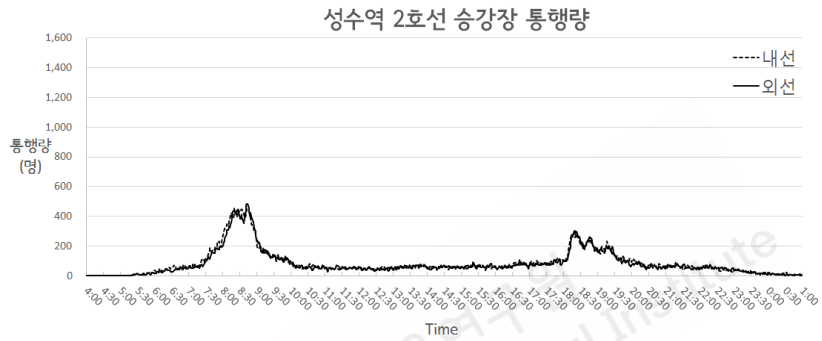
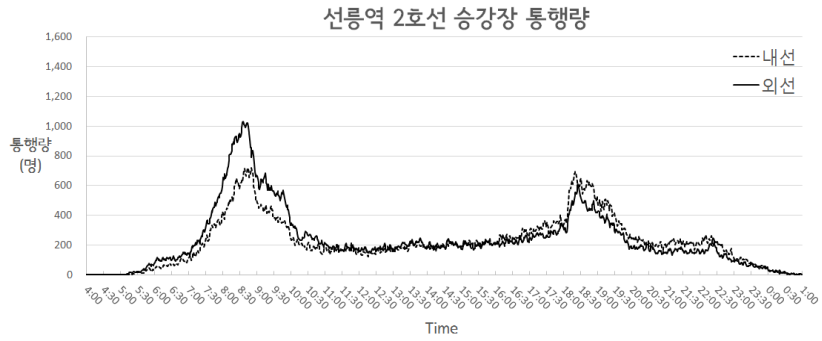
봉천역 2호선 승강장 통행량

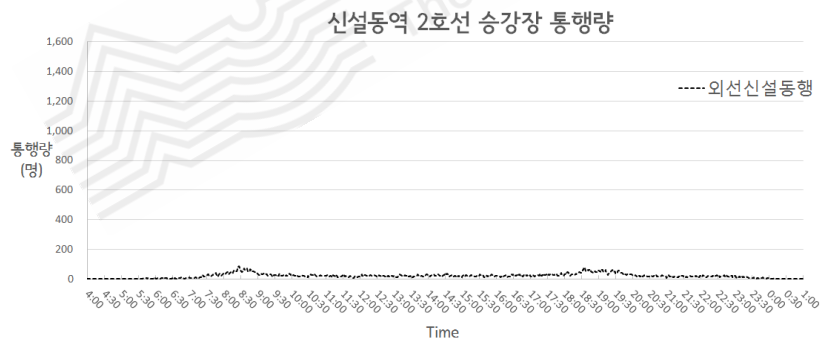
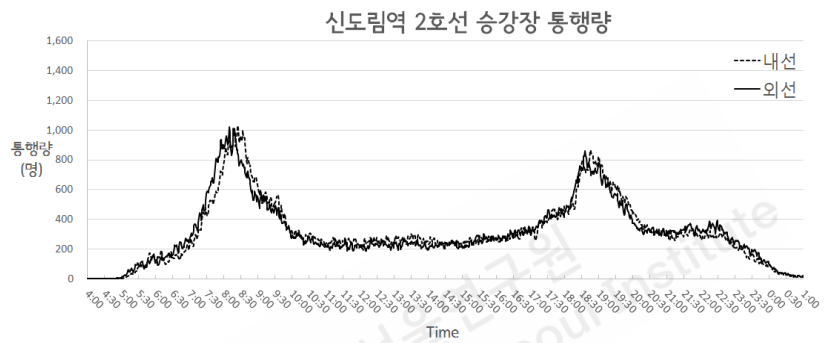
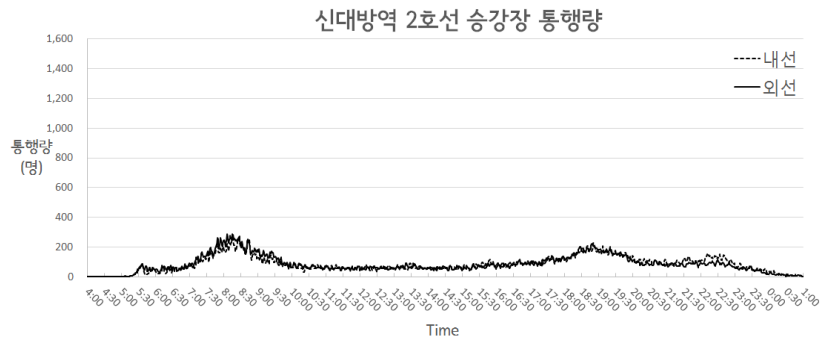


사당역 2호선 승강장 통행량

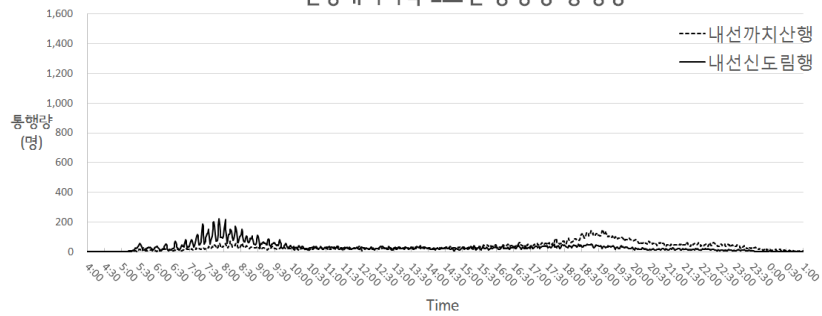




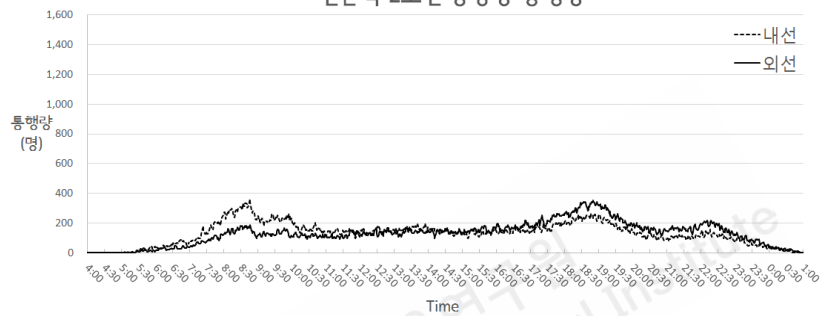




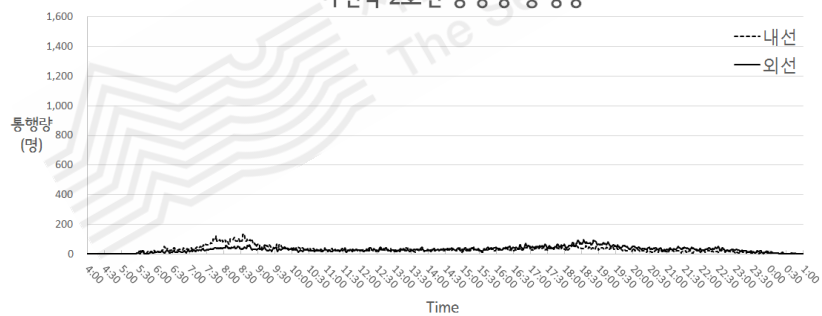
신정네거리역 2호선 승강장 통행량



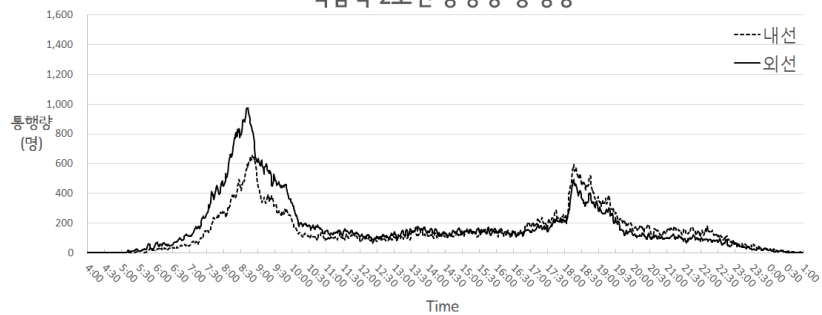
신촌역 2호선 승강장 통행량

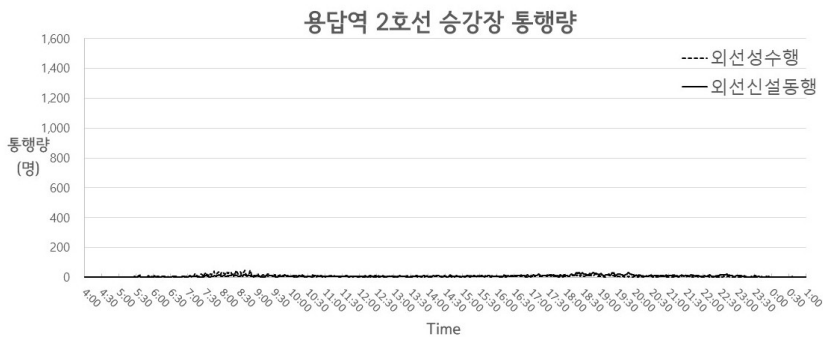
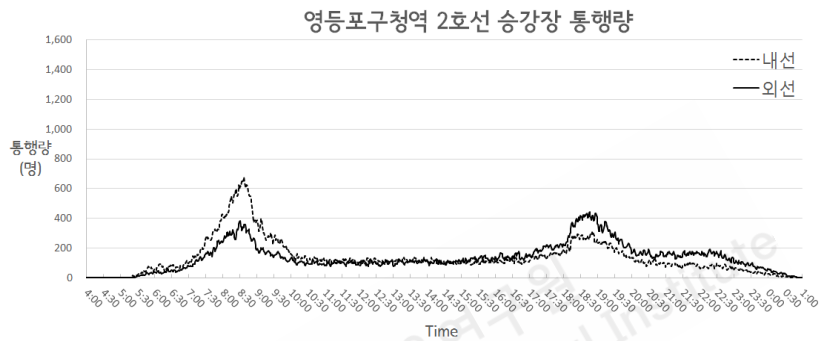
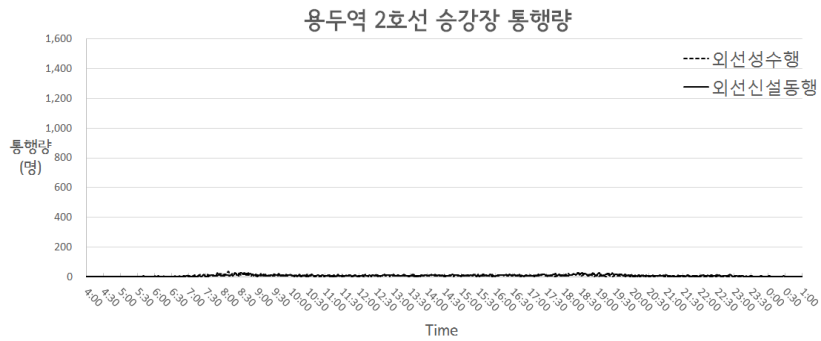


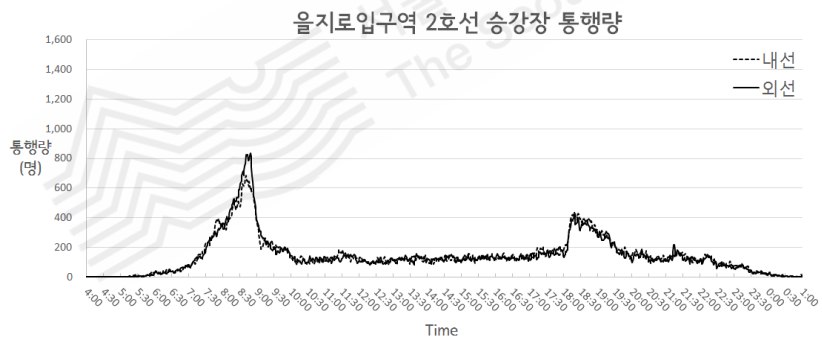
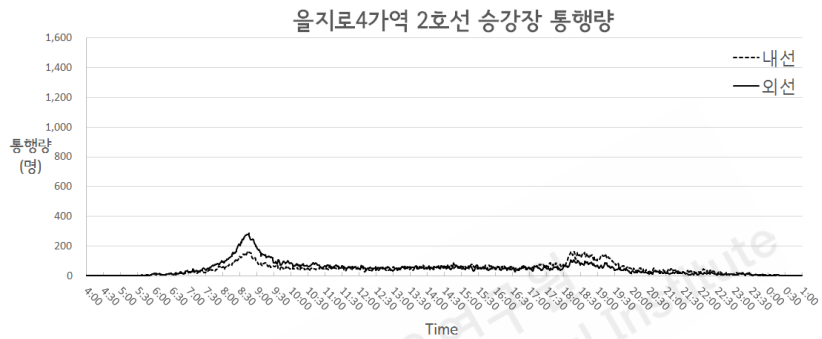
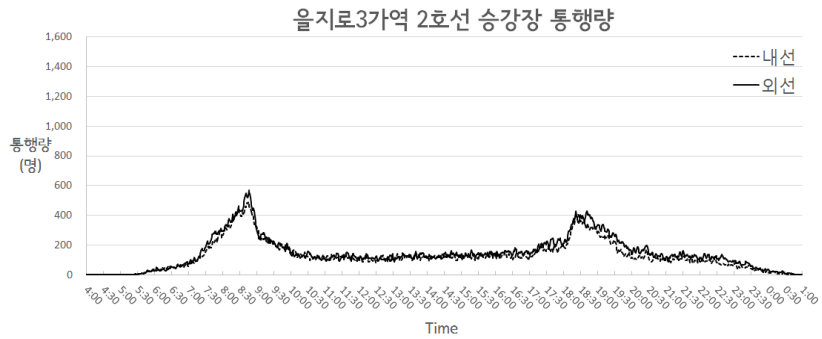
아현역 2호선 승강장 통행량

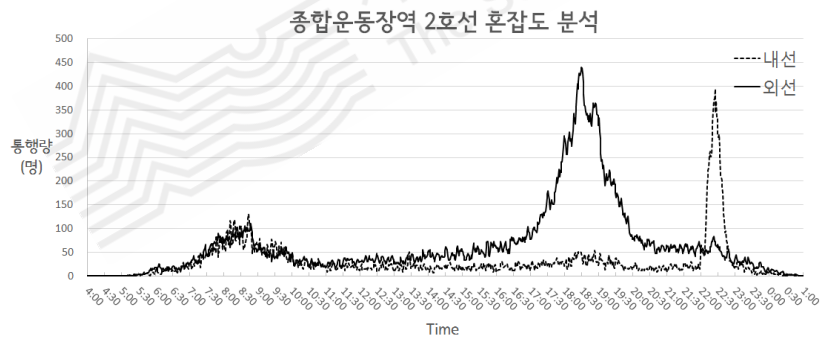
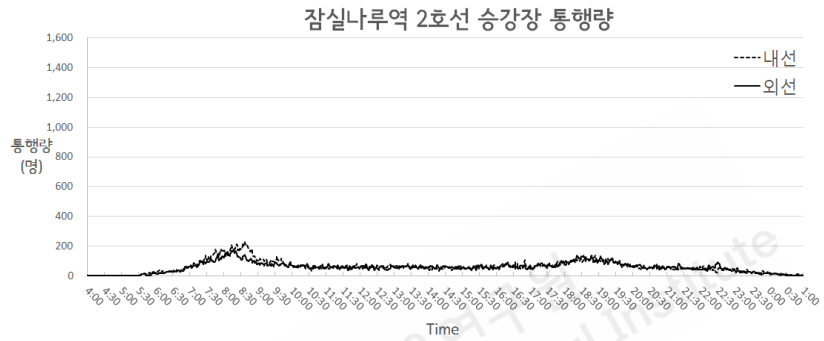
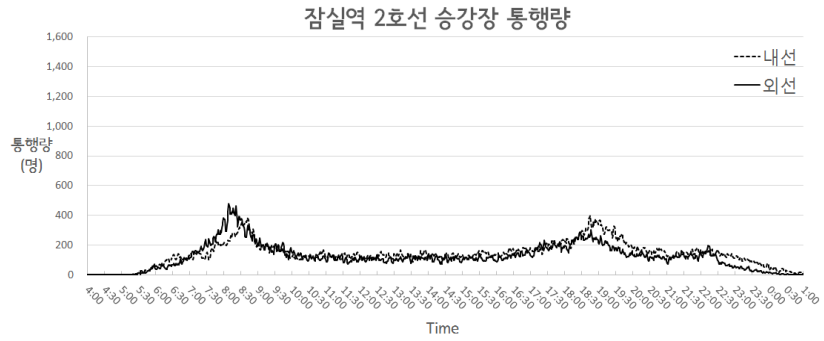


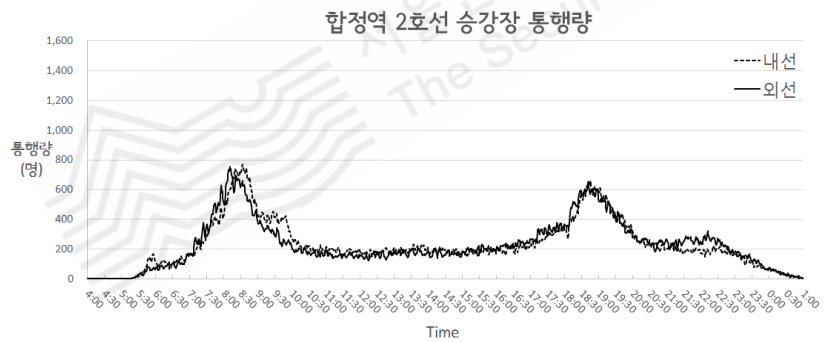
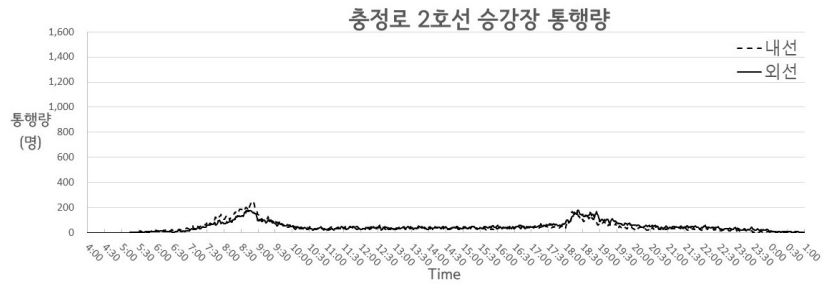
역삼역 2호선 승강장 통행량



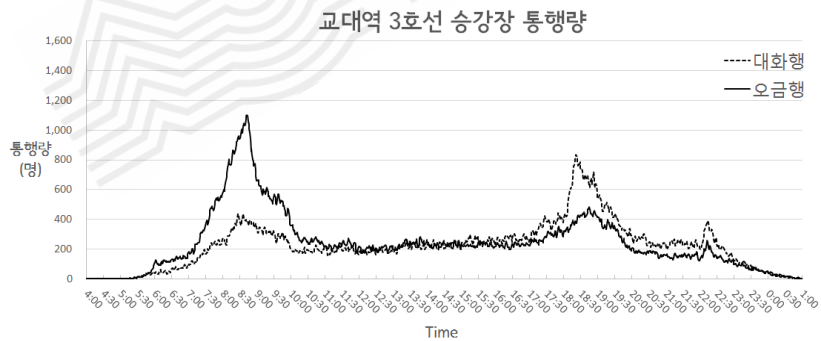
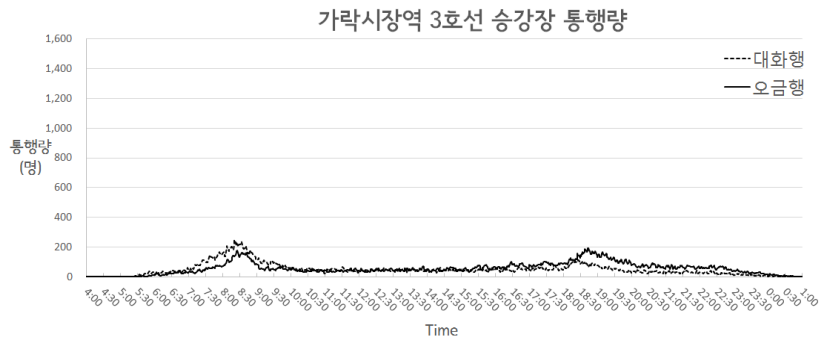




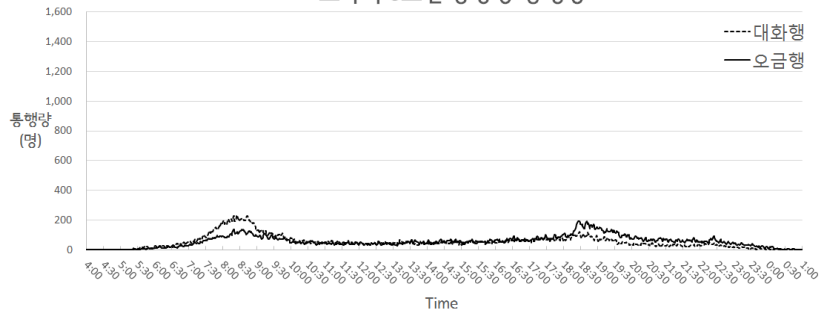




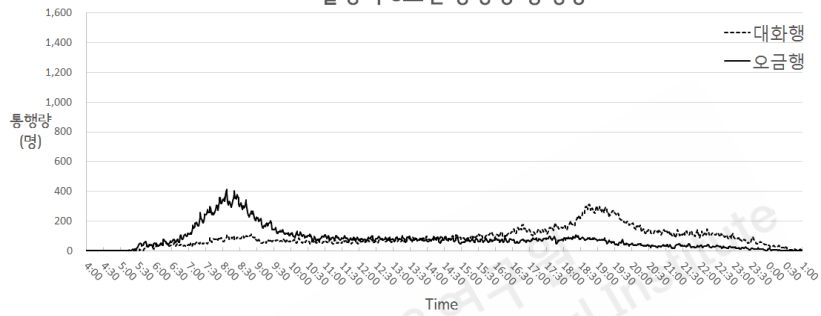
5_3호선 주요 역사별 승강장 혼잡도 시계열



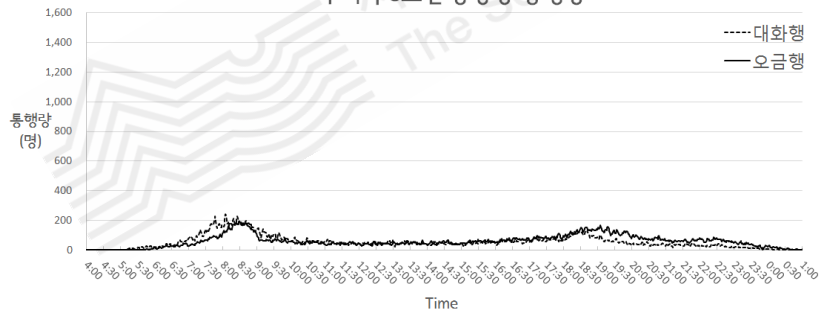
도곡역 3호선 승강장 통행량



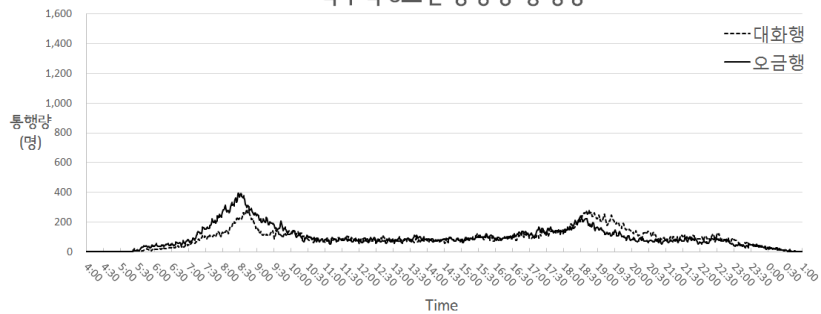
불광역 3호선 승강장 통행량

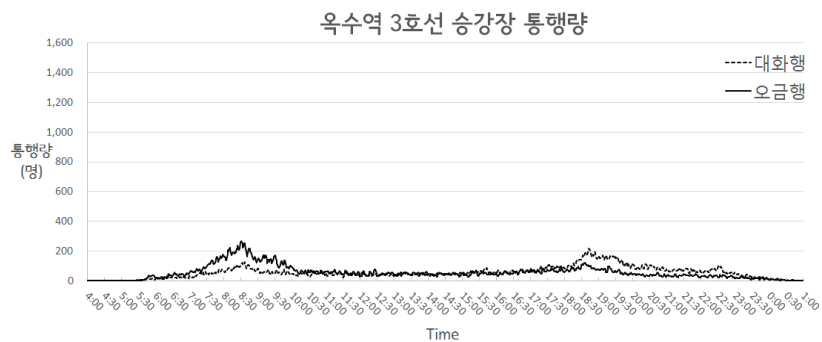
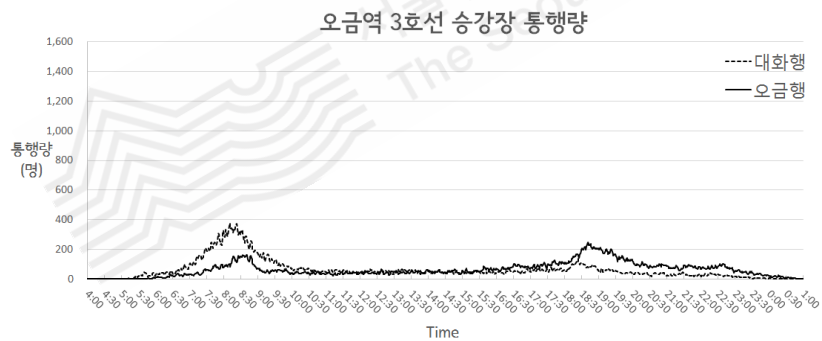
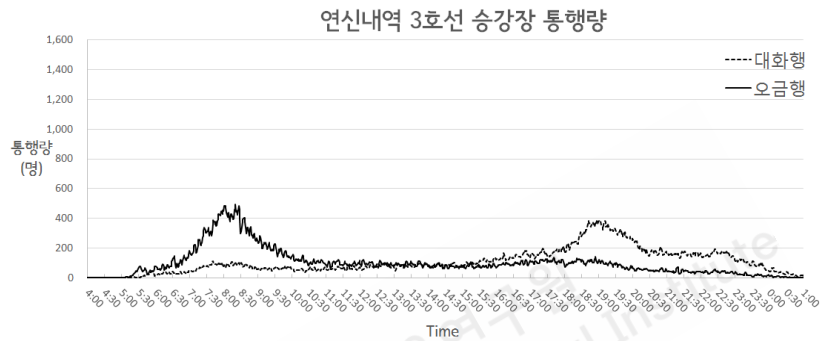
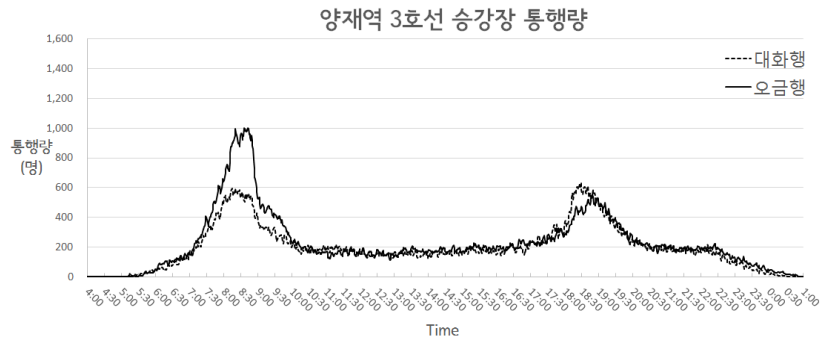


수서역 3호선 승강장 통행량

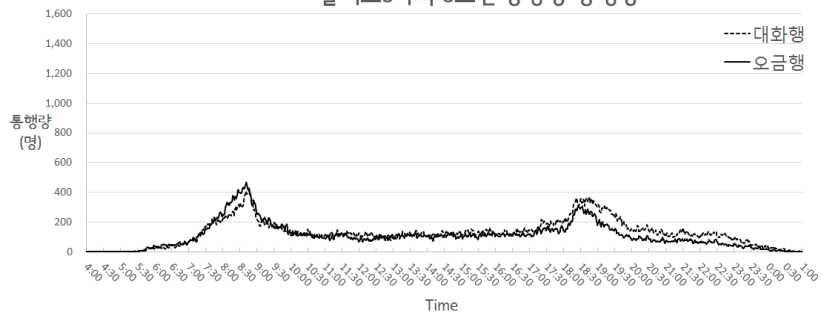


약수역 3호선 승강장 통행량

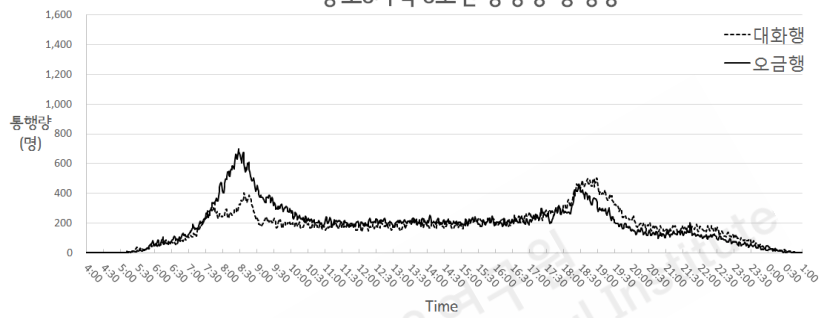




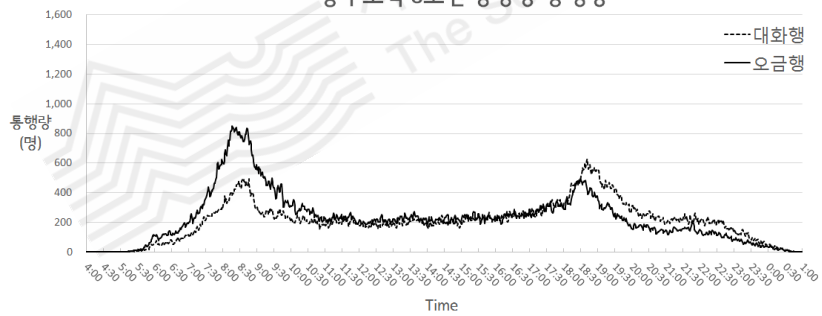
을지로3가역 3호선 승강장 통행량



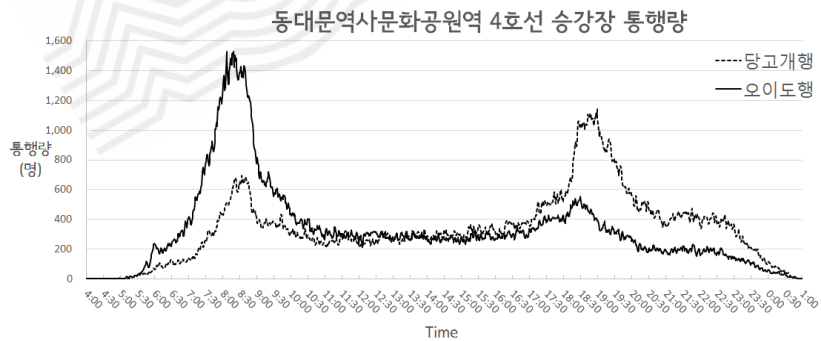
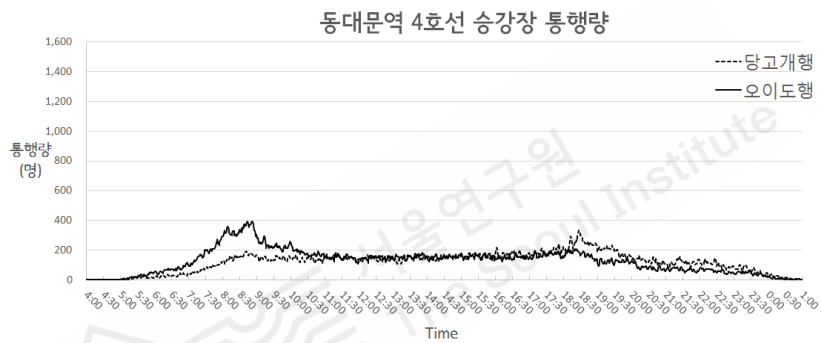
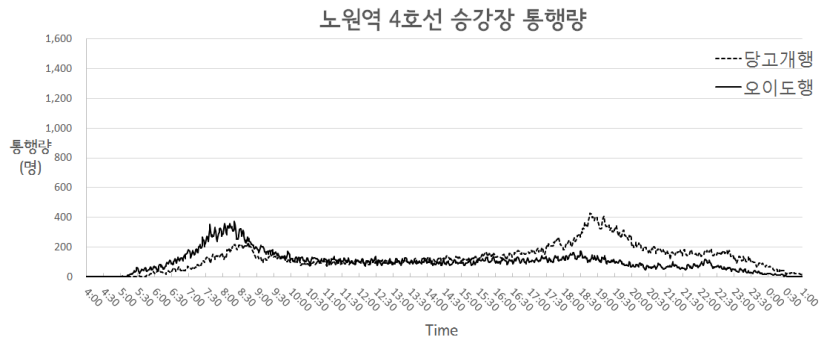
종로3가역 3호선 승강장 통행량



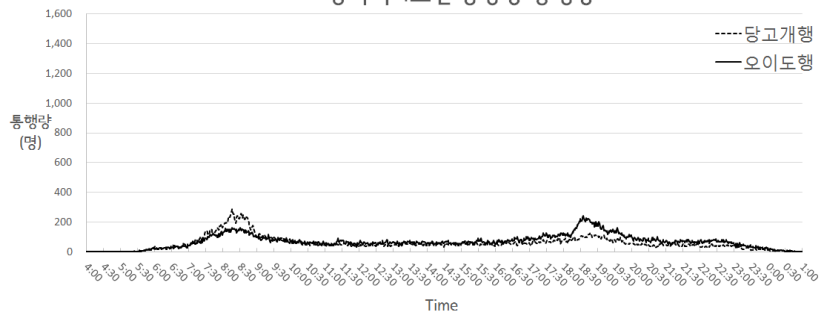
충무로역 3호선 승강장 통행량



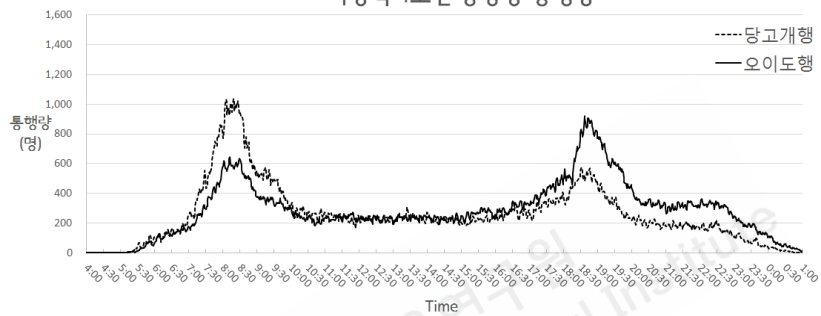
6_4호선 주요 역사별 승강장 혼잡도 시계열



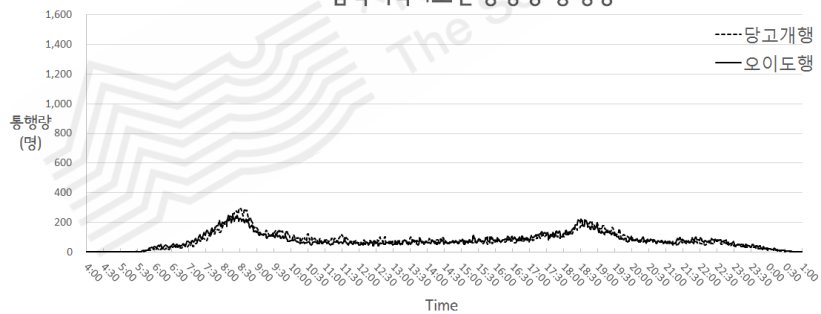
동작역 4호선 승강장 통행량



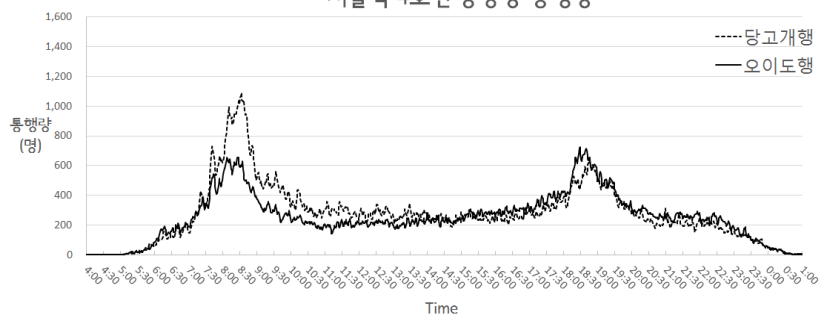
사당역 4호선 승강장 통행량



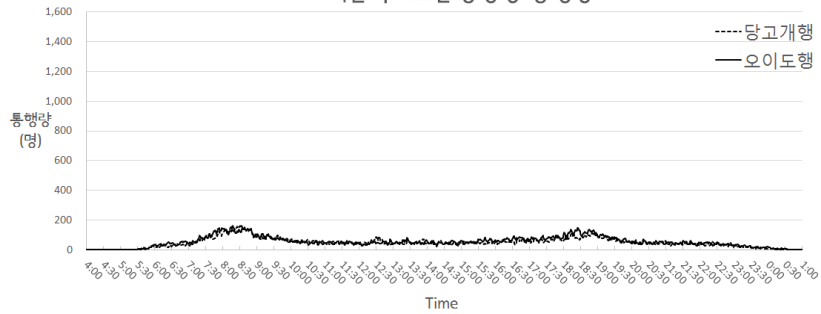
삼각지역 4호선 승강장 통행량



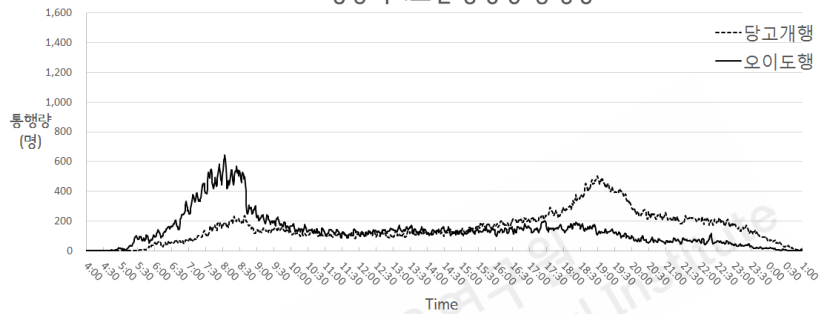
서울역 4호선 승강장 통행량



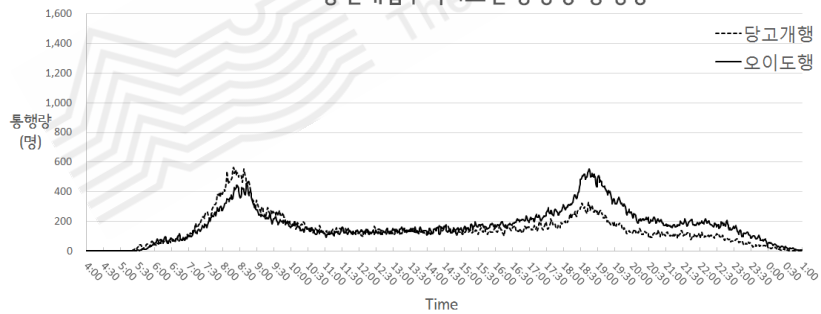
이촌역 4호선 승강장 통행량



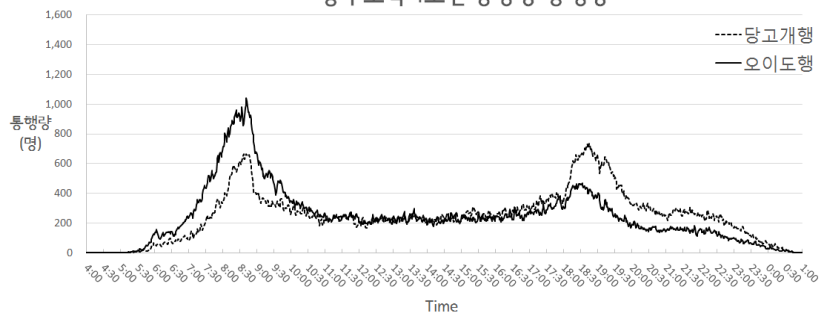
창동역 4호선 승강장 통행량



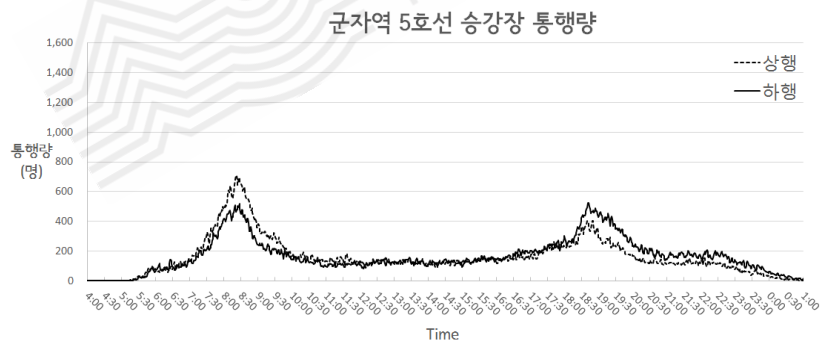
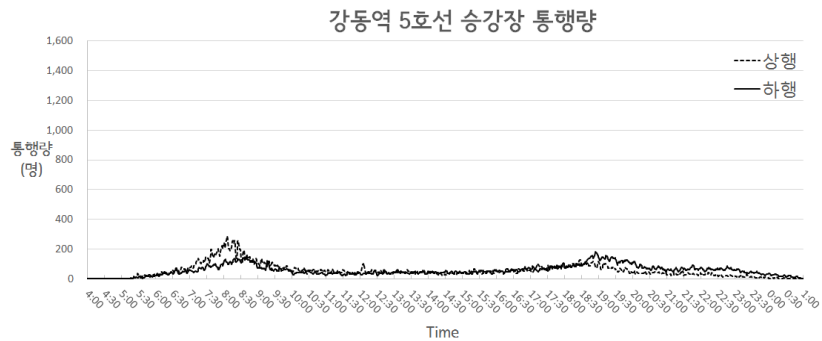
충신대입구역 4호선 승강장 통행량

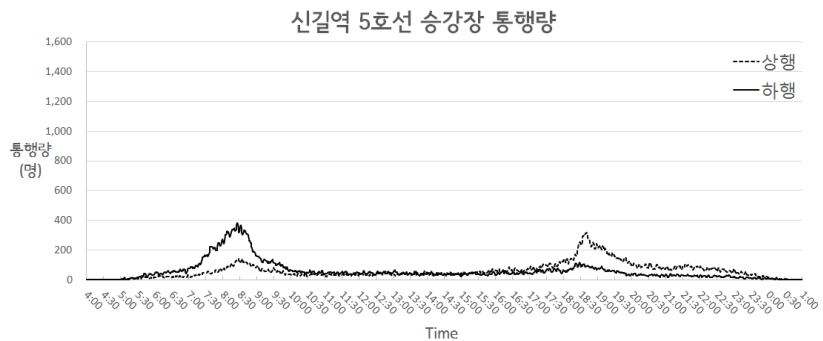
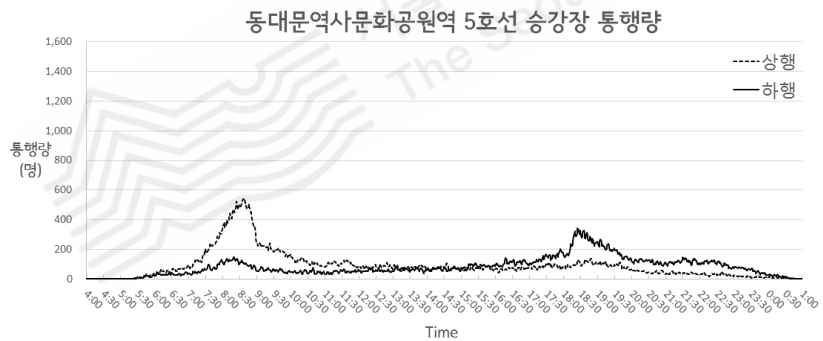
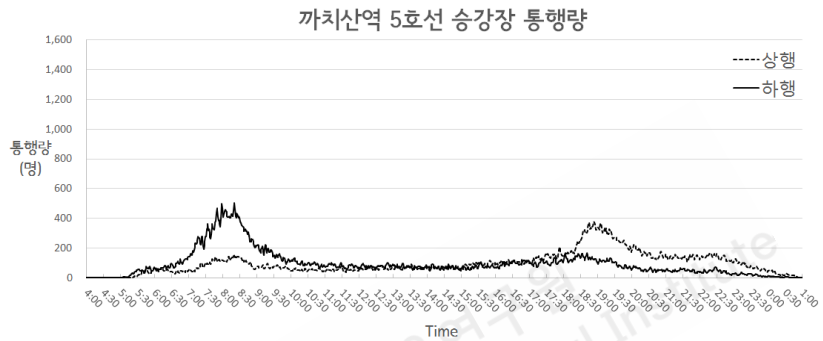
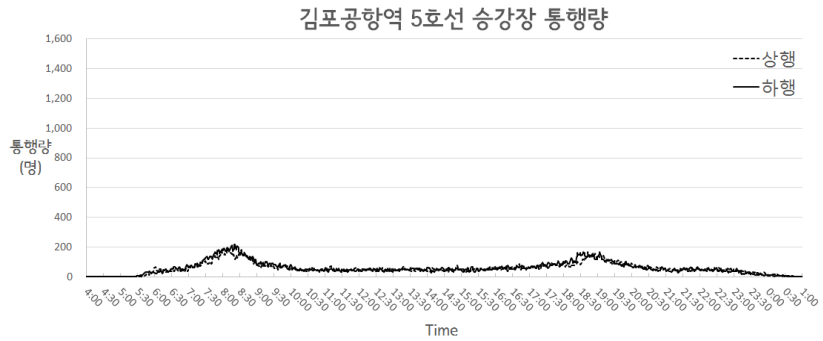


충무로역 4호선 승강장 통행량

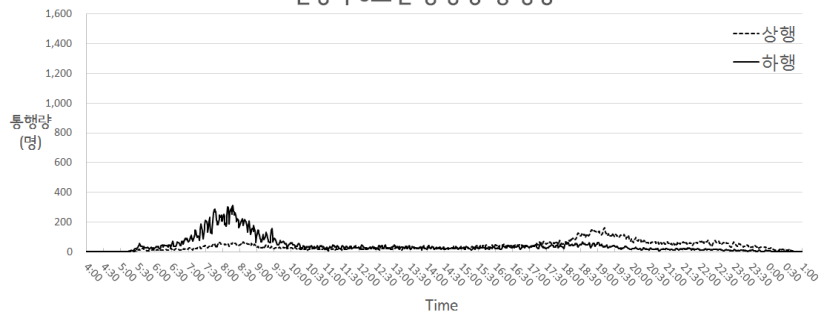


7_5호선 주요 역사별 승강장 혼잡도 시계열

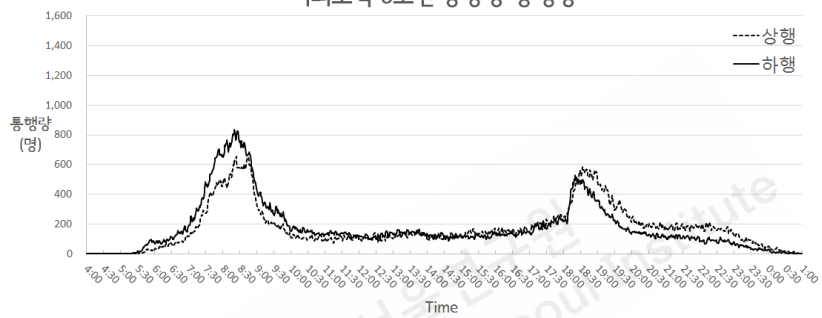




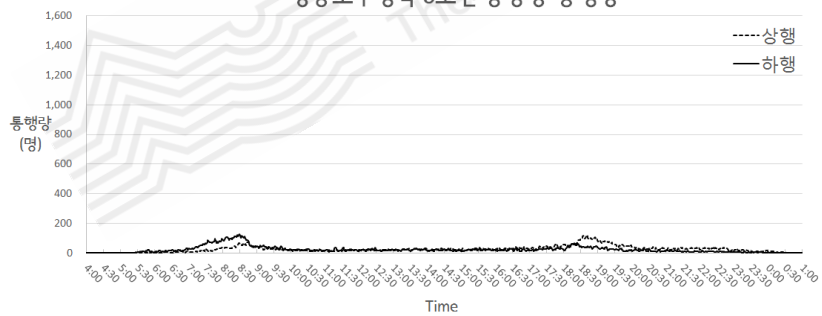
신정역 5호선 승강장 통행량



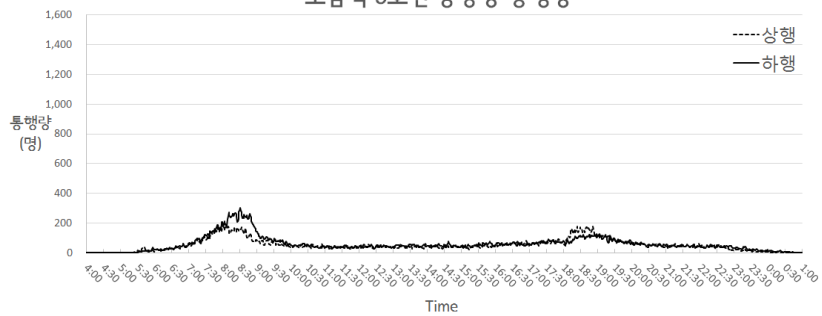
여의도역 5호선 승강장 통행량

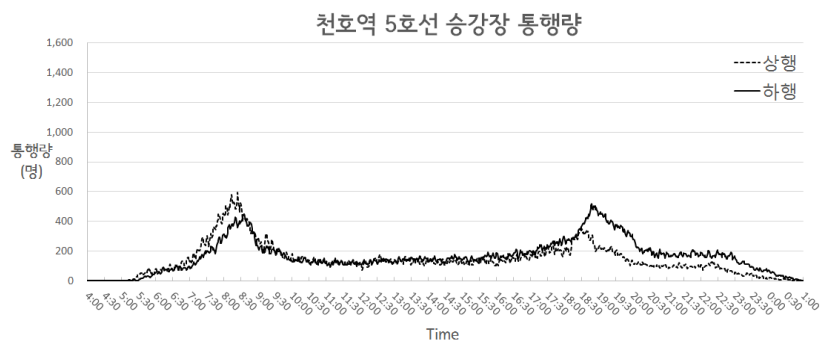
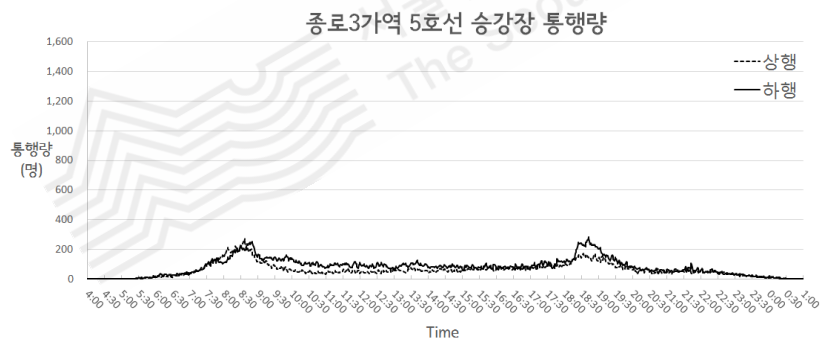
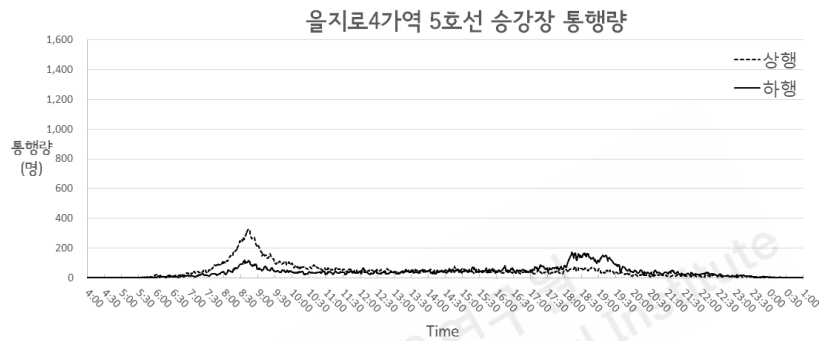
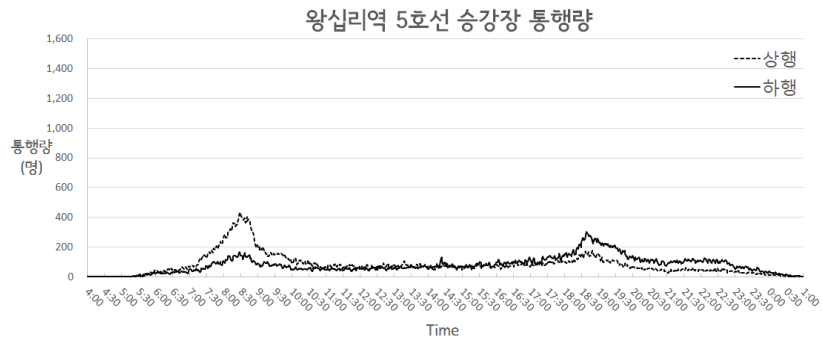


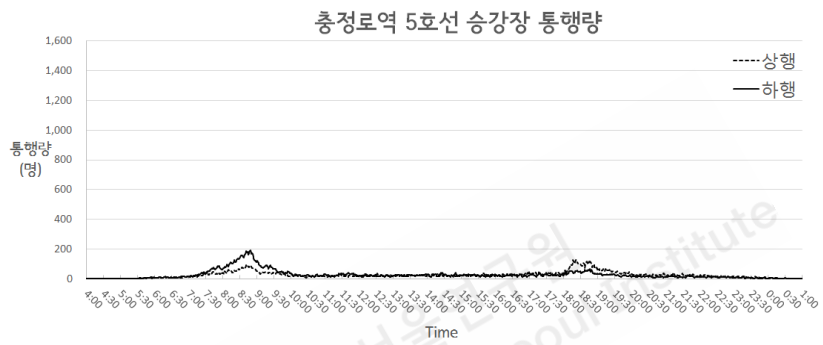
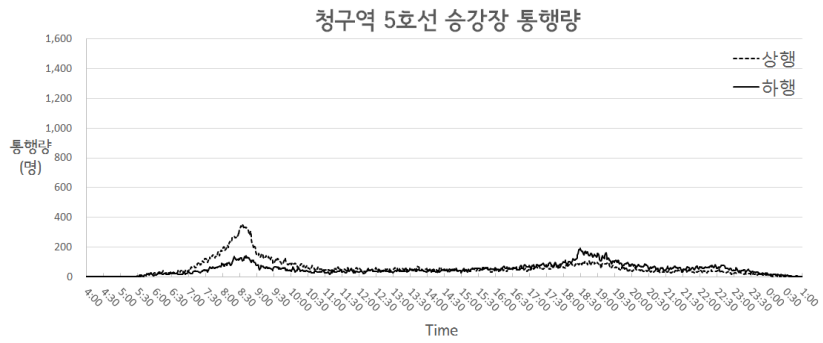
영등포구청역 5호선 승강장 통행량



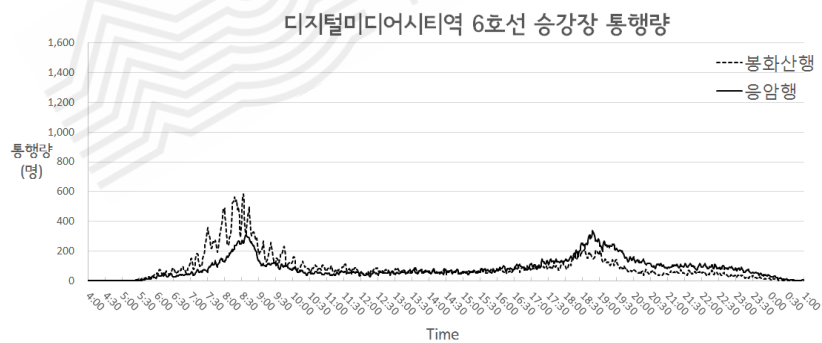
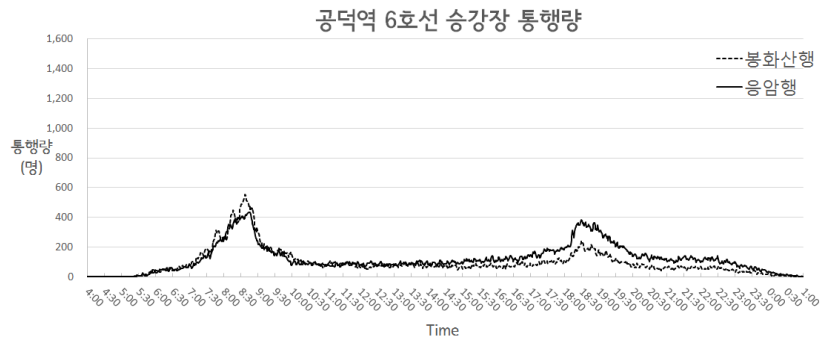
오금역 5호선 승강장 통행량



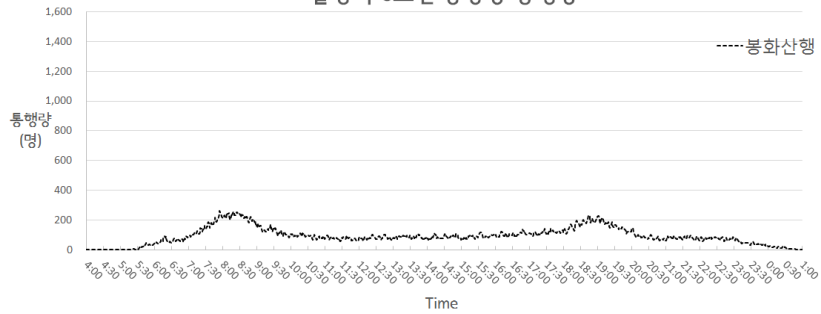




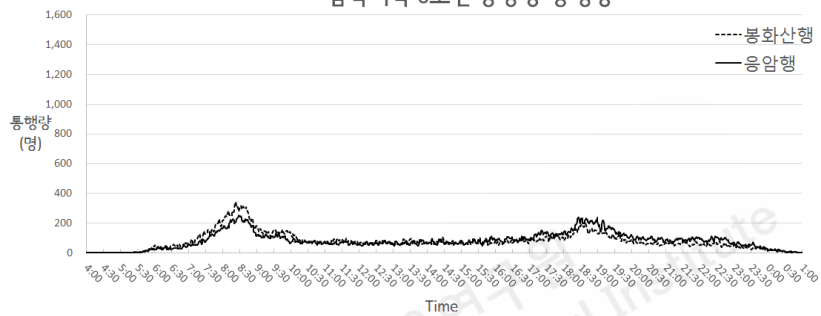
8_6호선 주요 역사별 승강장 혼잡도 시계열



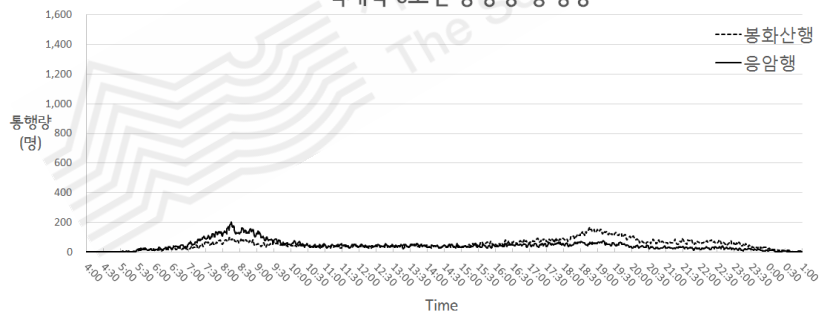
불광역 6호선 승강장 통행량



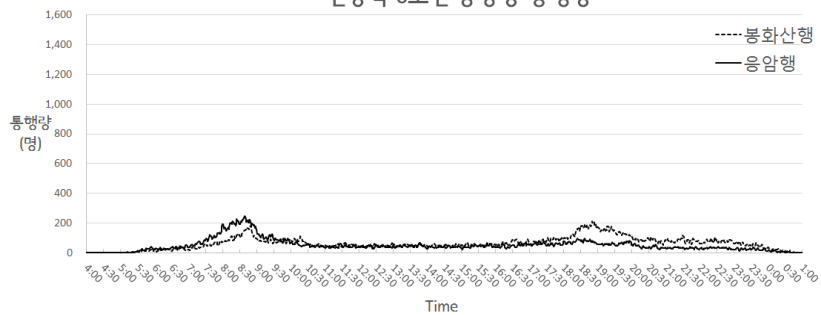
삼각지역 6호선 승강장 통행량

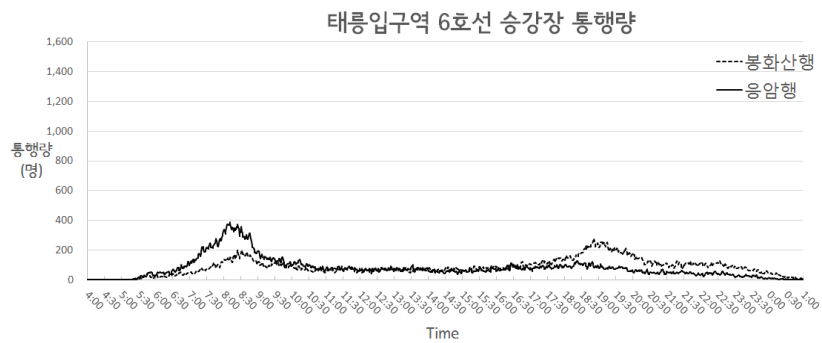
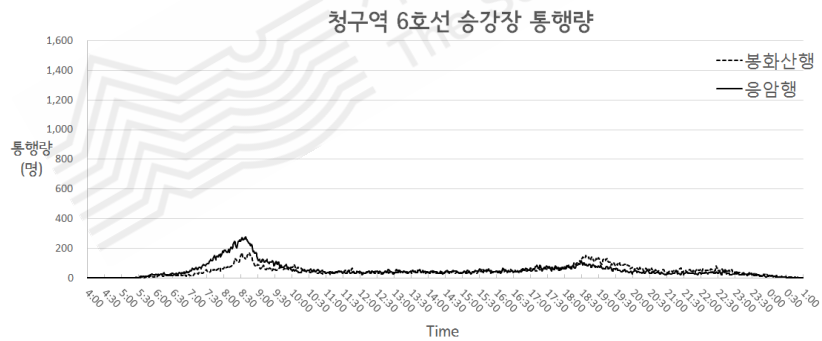
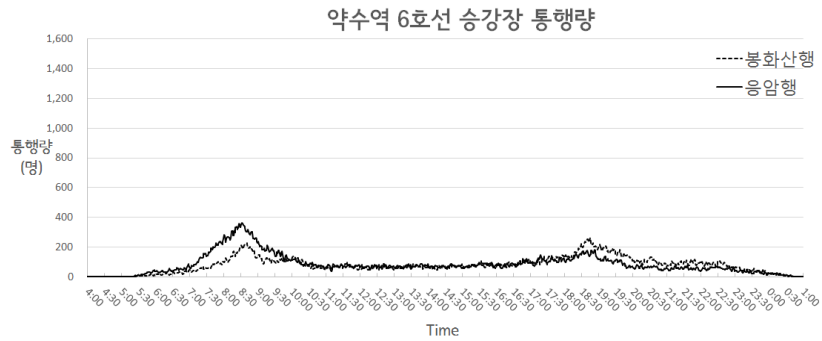


석계역 6호선 승강장 통행량

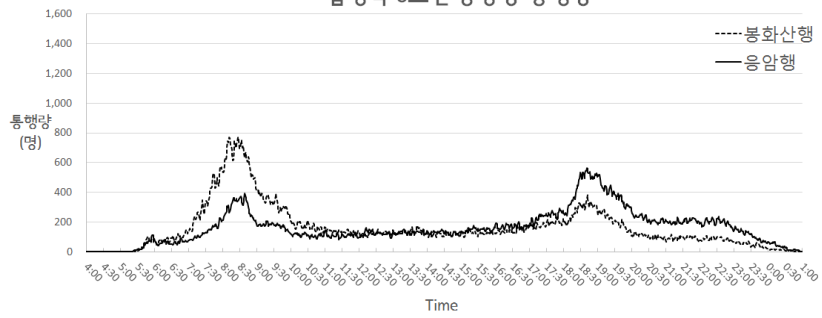


신당역 6호선 승강장 통행량

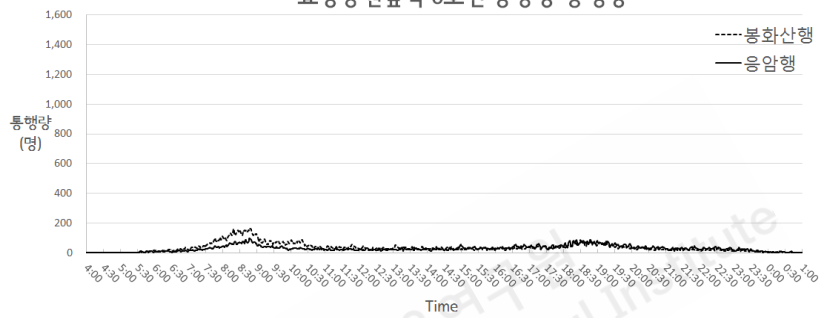




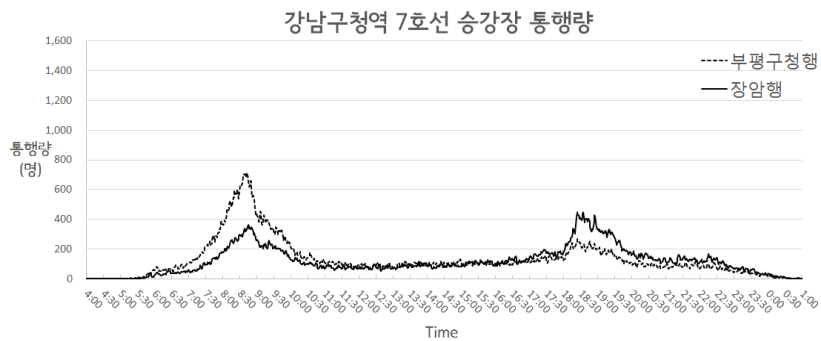
합정역 6호선 승강장 통행량

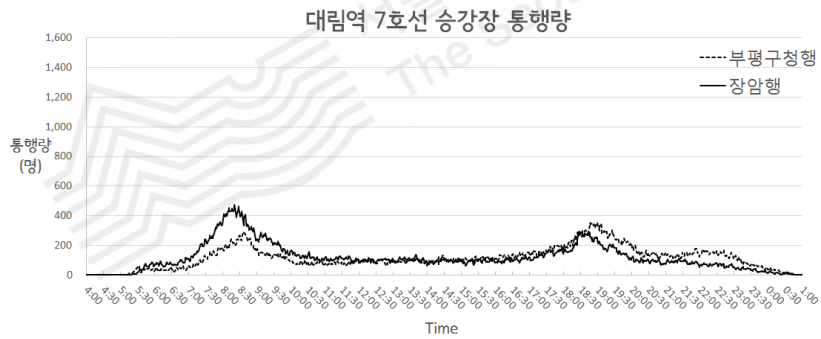
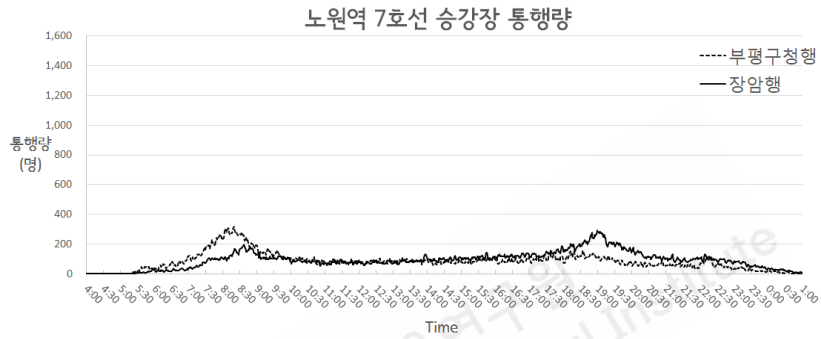


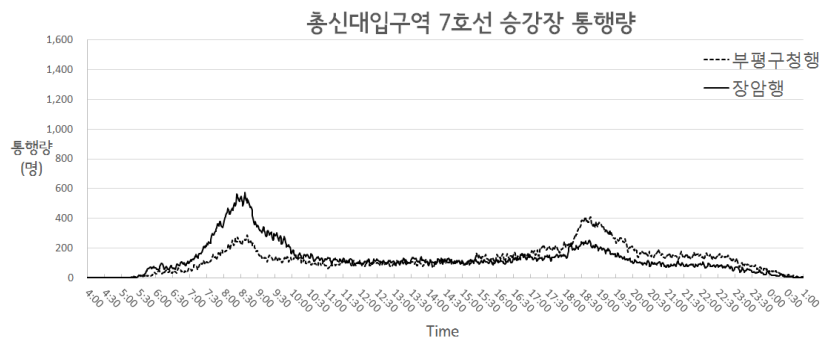
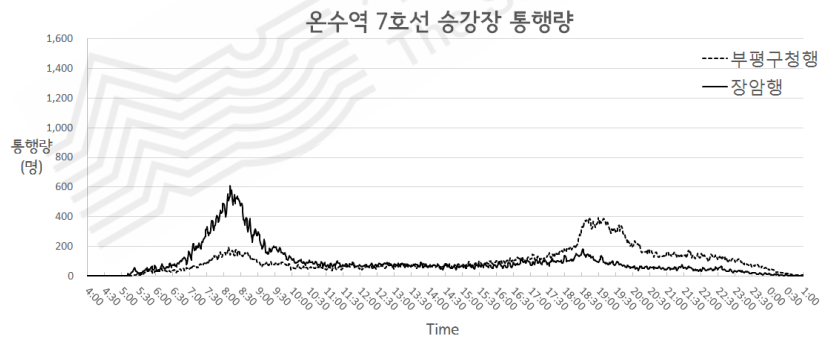
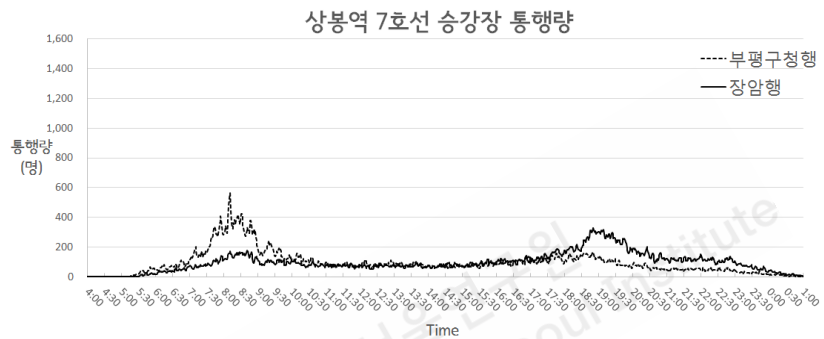
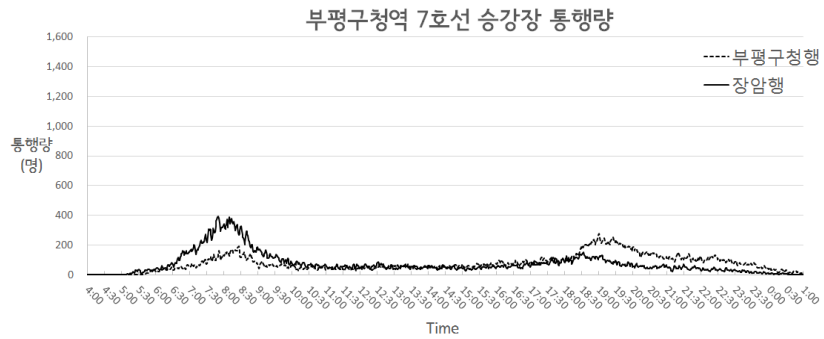
효창공원앞역 6호선 승강장 통행량

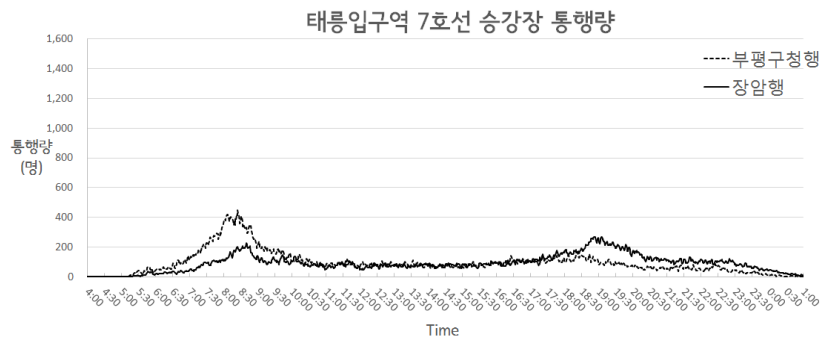


9_7호선 주요 역사별 승강장 혼잡도 시계열

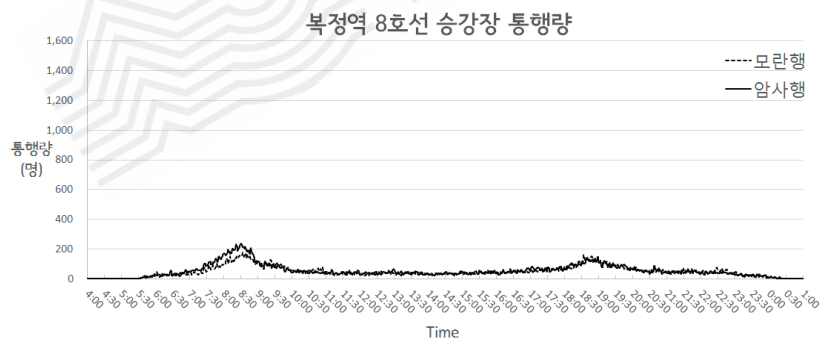
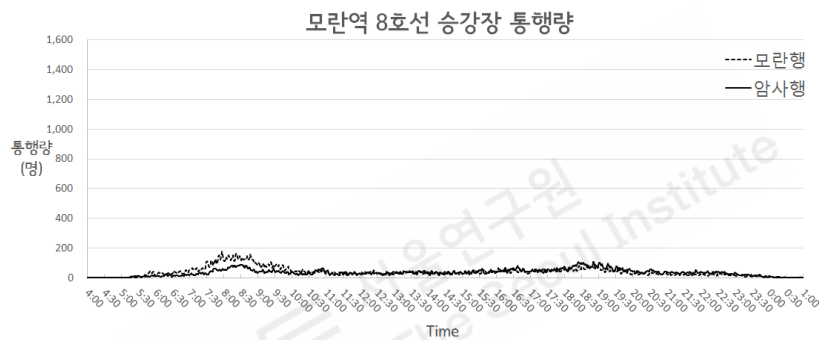
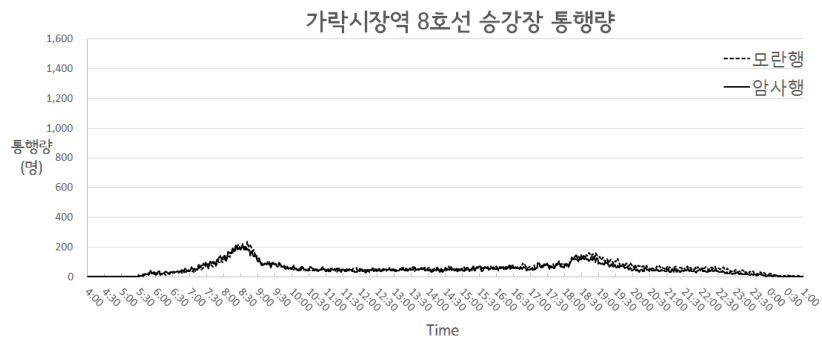


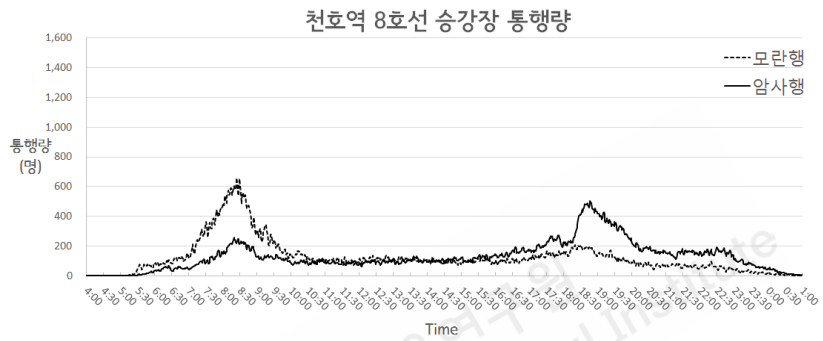






10_8호선 주요 역사별 승강장 혼잡도 시계열





Abstract

Analysis of Time Dependent Degree of Crowding of Urban Railway Platforms Using Smart Card Data

Seongil Shin · Minho Lee

The crowding management of urban rail platforms is important to improve level of service, such as train delay prevention and passenger safety. Measuring accurate crowding level should precede effective crowding improvement policies. However, the existing crowding level is measured only at specific locations and times every one or two years, resulting in low accuracy. In recent years, the smart card data has been effectively collected thanks to the development of the AFC (Automated Card Collection) technology and ICT (Information Communication Technology). The smart card data is collected in real time every day and can be used to measure the platform crowding by year, month, day and time.

This study suggests a method to estimate the time dependent crowding level of the urban railway platform using the smart card data. This study analyzes the crowding level at the urban railway network level, since crowding is the concentration of passenger moving through the network. Crowding is measured in two stages. First, it identifies the trajectory of all urban railway passengers recorded in the smart card data, and estimates the concentration and dispersed demand on the platform at every one minute interval. For this, a passenger's optimal route choice model is constructed to calculate the boarding, alighting and railway travel passengers of individual stations. The model was validated using the transfer information of the private lines recorded for the fare settlement.

Second, the crowding level is estimated by dividing the practical waiting area of each station platform into platform demand. The practical waiting area varies depending on the platform structure. For example, in the island-type platforms, all passengers of the two-way route use one platform, while in the side-type platform, passengers use separate platforms for each direction.

This study also proposed a strategy to mitigate crowding that would suit the characteristics of individual stations by utilizing estimated real-time crowding data. In addition, the effectiveness of the Early Bird policy, which is a representative example of demand management policy, was also assessed.

From this study, first it is possible to solve the temporal and spatial constraints of crowding estimation and to perform long-term time dependent analysis. In other words, it is possible to conduct crowding analysis at all times from the start to the end of operation across the railway network. Second, it provides real-time and future crowding information to passengers. Third, it can be used to design and change the platform structure and to adjust the train schedule.



Contents

01 Introduction

- 1_Background and purpose
- 2_Research methods

02 Estimation of time dependent crowding of urban railway platform

- 1_Data
- 2_Model for estimation of time dependent crowding
- 3_Method of estimation of time dependent crowding

03 Analysis of passenger flows in urban railway station

- 1_Demand of Seoul metropolitan area railway system
- 2_Demand by railway lines in Seoul metropolitan area

04 Case study

- 1_Station with a high percentage of boarding and alighting passengers
- 2_Station with a high percentage of transfer passengers

05 Improvement of time dependent crowding of urban railway platform

- 1_Policies for the mitigation of urban railway crowding
- 2_Strategies to improve platform crowding
- 3_Application of Smart Card-based Demand Analysis Model
- 4_Importance and improvement direction of Smart Card-based Demand Analysis Model

References

Appendices



서울연 2017-BR-18

교통카드자료 기반
도시철도 승강장의
동적 혼잡도 분석

발행인 _ 서왕진

발행일 _ 2017년 12월 31일

발행처 _ 서울연구원

ISBN 979-11-5700-313-6 93330 8,000원

06756 서울특별시 서초구 남부순환로 340길 57

본 출판물의 판권은 서울연구원에 속합니다.