

한국ITS학회논문지 제18권 제5호 통권85호

ISSN : 1738-0774(Print) 2384-1729(Online)

스마트카드자료를 활용한 지하철 승강장 동적 혼잡도 분석모형

신성일, 이상준, 이창훈

To cite this article : 신성일, 이상준, 이창훈 (2019) 스마트카드자료를 활용한 지하철 승강장 동적 혼잡도 분석모형 , 한국ITS학회 논문지, 18:5, 49-63

① earticle에서 제공하는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 학술교육원은 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다.

② earticle에서 제공하는 콘텐츠를 무단 복제, 전송, 배포, 기타 저작권법에 위반되는 방법으로 이용할 경우, 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

www.earticle.net

스마트카드자료를 활용한 지하철 승강장 동적 혼잡도 분석모형

A Model for Analyzing Time-Varying Passengers' Crowdedness Degree of Subway Platforms Using Smart Card Data

신 성 일* · 이 상 준** · 이 창 훈***

* 주저자 : 서울연구원 교통시스템연구실 연구위원

** 교신저자 : 서울연구원 교통시스템연구실 연구위원

*** 공저자 : 서울교통공사 도시철도연구원 전문위원

Seongil Shin* · Sangjun Lee** · Changhun Lee***

* Department of Transportation System Research, The Seoul Institute

** Department of Transportation System Research, The Seoul Institute

*** Urban Railway Research Institute, The Seoul Metro

† Corresponding author : Sangjun Lee, sangjun115@gmail.com

Vol.18 No.5(2019)

October, 2019
pp.49~63

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2019.18.5.49>

Received 2 September 2019
Revised 23 September 2019
Accepted 23 September 2019

© 2019. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요 약

지하철 승강장의 혼잡도 관리는 열차지연방지, 승객안전 등의 서비스수준 향상을 위해 중요하다. 승강장 혼잡개선정책을 효과적으로 수립하기 위해서는 혼잡수준을 정확하게 추정하는 방안이 필요하다. 현재 지하철 승강장 혼잡도는 1-2년 주기의 특정 장소 및 시간에 계수방법(Hand Count)로 측정되어 시공간적 제약이 존재한다. 한편 스마트카드자료는 매일 실시간 생성되는 빅데이터 자료로서 승강장혼잡 추정을 위한 기초자료로서 적합하다. 본 연구는 카드자료를 승강장 혼잡도를 동적으로 추정하는 모형을 제안한다. 연구는 우선 혼잡도를 지하철 네트워크를 동적으로 이동하는 승객이 승강장에 집중하는 수요개념으로 정의한다. 이를 위해 지하철 네트워크에서 개별승객이 동적으로 이동하는 궤적을 모형을 통하여 파악한다. 또한 지하철 승강장에 집중 및 분산되는 승객흐름을 1분 단위로 산정한다. 마지막으로 승강장구조별 단위 실용대기면적에 따른 승강장 혼잡도를 계산한다.

핵심어 : 지하철 승강장, 동적 혼잡도, 스마트카드, 교통카드, 실용대기면적

ABSTRACT

Crowdedness management at subway platforms is essential to improve services, including the prevention of train delays and ensuring passenger safety. Establishing effective crowdedness mitigation measures for platforms requires accurate estimation of the congestion level. There are temporal and spatial constraints since crowdedness on subway platforms is assessed at certain locations every 1-2 years by hand counting. However, smart cards generate real-time big data 24 hours a day and could be used in estimating congestion. This study proposes a model based on data from transit cards to estimate crowdedness dynamically. Crowdedness was defined as demand, which can be translated into passengers dynamically moving along a subway network. The trajectory of an individual passenger can be identified through this model. Passenger flow that concentrates or disperses at a platform is also calculated every minute. Lastly, the platform congestion level is estimated based on effective waiting areas for each platform structure.

Key words : Subway station platforms, Time-dependent crowdedness, Smart card, Practical waiting area

I. 서론

지하철 역사 승강장은 승객의 열차대기 및 역사 이동행태가 집중되어 나타나는 장소이다. 따라서 지하철 역사 승강장의 적절한 혼잡도 유지는 열차운행관리의 기준이 될 뿐만 아니라 승객안전사고위험에 대비하기 위하여 중요성이 강조되는 부분이다. 서울시는 역사 내 통로, 계단, 에스컬레이터와 같은 물리적인 시설 확충과 개선에만 치중하고 있다. 그러나 물리적인 시설 확충이 예산 대비 효과가 크지 않아 침두시 집중되는 수요를 분산하는 방안이 요구되는 실정이다. 최근 서울시에서 시행 중인 대중교통조조할인은 대표사례로 향후 더욱 다양한 수요관리정책 도입의 필요성이 제기되고 있다.

지하철 승강장 혼잡도 관리를 위해서는 역사, 승강장, 시간대별 통행 집중행태 파악이 선행되어야하며, 이는 수도권 지하철 네트워크 차원에서 분석할 필요성이 있다. 그 이유는 서울시 특정 지하철 역사 승강장 혼잡의 경우 수도권 전체 역사에서 특정 역사에 승객이 집중되는 결과로서 유기적인 연관성을 갖기 때문이다. 그러나 기존 승강장 혼잡도 추정은 1-2년 주기의 특정 장소 및 선별된 시간에 수행되는 계수방법(Hand Count)에 의존하고 있어 정확성이 결여되는 단점이 있다. 이와 같은 부정확한 추정결과가 교통정책 수립에 근거자료로서 활용된다면 많은 문제가 야기될 수 있다.

반면 최근 AFC(Automated Fare Collection)와 ICT(Information Communication Technology) 기술이 접목된 스마트카드자료를 활용한다면 승강장 혼잡도를 시간대별로 보다 정확하게 산정할 수 있다. 수도권 대중스마트카드는 일일 약 800만 명의 승객 통행 자료를 포함하며, 이는 10개 노선 약 600개 이상의 수도권 지하철역사에서 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 지하철 승강장의 혼잡도를 동적으로 추정하기 위해 스마트카드자료를 활용하였다. 여기에서 ‘동적’이란 용어는 스마트카드자료를 활용하여 모든 지하철 이용자가 움직이는 시간대별 궤적을 파악하여 집중 및 분산되는 수요를 1분 단위로 추정하는 동적 통행이동모형으로 시간대별 통행량과 혼잡도 변화양상을 추정하는 것을 의미한다. 또한 지하철 역사 승강장 수요를 역사 환승통행, 자체역사 직승직하 이용통행, 노선간 환승통행으로 구분하여 개별 역사의 승강장 혼잡도를 추정하였다.

승강장 혼잡도 기준은 Urban Railway Station and Transfer and Convenience Facilities Design Guidelines(2015)를 준용하였다. 이 지침서는 투자재원의 효율성과 사회적·경제적인 측면을 고려하여 적절한 수준에서 보행시설을 설계하도록 제안하고 있어 이를 이용하여 지하철 승강장 혼잡도와 서비스 수준을 분석한다. 마지막으로 지하철 승강장 동적 혼잡도 모형이 다방면으로 활용할 수 있는 방안을 제시한다.

본 연구는 다음과 같은 과정으로 수행되었다. 2장에서는 기존연구에 발표된 대중교통 혼잡도 분석 연구를 검토하고 본 연구의 차별성을 제시한다. 3장에서는 동적 혼잡도 모형을 구체화하고 분석방법론을 제시한다. 4장에서는 수도권 스마트카드자료를 이용하여 모형에 적용시켜 분석을 수행하고 노선 및 승강장 혼잡도를 도출된 결과를 검토한다. 마지막으로 5장은 연구 결론과 분석 모형의 향후 활용방안에 대해 논의한다.

II. 대중교통 혼잡도 관련 선행연구 검토

침두시 교통상태 혼잡 완화는 교통연구 분야의 영원한 난제이다. 혼잡 분석 연구는 교통시설, 교통수단, 이용대상 등에 따라 관련이론이나 분석방법론이 다양하게 적용되고 있다. 특히 도로교통의 혼잡에 관한 연

구는 오래전부터 이어져왔으나 상대적으로 대중교통의 혼잡에 관한 연구는 저조편이었다. 그 이유는 대중교통 이용객의 통행행태 분석 및 검증이 현장조사 또는 가구통행실태조사에 의존했기 때문에 고비용 발생하고 자료 검증의 신뢰성이 낮기 때문이다. 반면 스마트카드 원자료는 버스와 철도 이용객의 통행기록 자료이므로 추정결과 검증이 용이하고 자료 검증의 신뢰성이 높다. 2000년대 중반부터 스마트카드 이용이 대중화되면서 스마트카드자료를 이용한 대중교통 혼잡도에 관한 연구가 최근에 활발히 진행 중이다.

스마트카드자료를 이용한 대중교통 혼잡도 연구는 크게 버스와 철도로 교통수단에 따라 분류된다. 버스 혼잡도를 연구한 Chung and Bae(2015)는 하차 시 스마트카드를 접촉하지 않는 부산시 스마트카드시스템의 특수성을 반영하여 현장조사를 통해 정류장별 하차인원 비율에 따라 시내버스 내 재차인원 추정과 혼잡도를 표출하였다. 그러나 현장조사 결과를 적용한 버스 재차인원의 추정결과는 정확성이 저하될 수 있으며, 일반화의 한계성을 내포하고 있다.

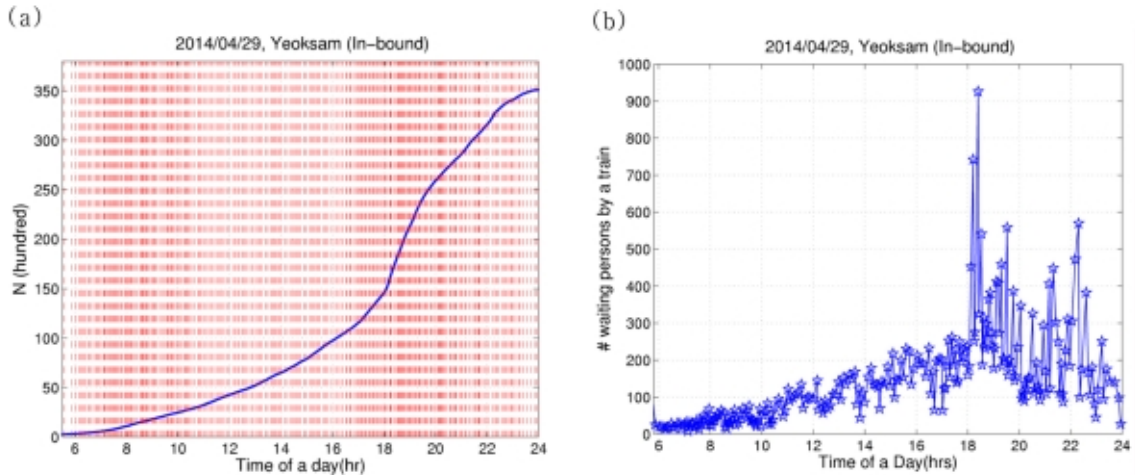
철도 혼잡도 추정에 관한 연구인 Eom et al.(2014)은 승객 OD분석 통해 서울시 지하철 최대 혼잡구간인 2호선 외선구간(사당~삼성)의 혼잡도 추정하고 통행 수요관리정책을 제시하였다. 삼성역 이전 목적지 승객과 삼성역 이후 목적지를 가진 승객의 수요를 분리 유도하기 위해 기존 순환선과 삼성역까지 운행하는 단절운행 열차를 혼합으로 운행하는 대안을 제안하였다. 그러나 2호선 일부구간의 혼잡도를 분석 연구로서 분석사례가 제한적이며, 단절운행열차의 도입으로 인해 순환선 승객의 대기시간 증대 및 통행시간 증가에 따른 불편함이 예상된다. 이 연구에서는 열차 내 혼잡도 완화 대안을 제시하였으나 역사 내 대기공간 혼잡도 완화 대안을 고려하지 않았다.

Horcher et al.(2017)은 통행시간손실에 상응하는 철도 승객의 혼잡비용 추정방법론은 제시하고 경로선택 선호도 분석체계를 구축하였다. 여기서 이용수요, 열차위치정보, 입석밀도, 좌석착석 확률 등 관련정보를 이용하여 열차 내 혼잡도 변화를 측정하였다. 이 연구 또한 역사 내 승강장의 혼잡도를 반영하지 못한 한계가 있다.

대중교통수단인 버스와 철도의 혼잡도 분석 연구는 교통수단 내 혼잡도만 국한되어 교통시설의 대기공간 혼잡도를 반영하지 못하였다. 즉, 정류장 및 승강장의 혼잡도를 반영한 연구가 필요한 것이다. Lee and Choi(2015)는 지하철 승강장의 시간대별 혼잡도를 추정하는 알고리즘을 개발하였다. 알고리즘은 환승역 여부와 승강장 구조 등의 역사정보, 개별 승하차 자료, 이력 OD자료, 이력 환승자료를 바탕으로 방향별 누적승강장유입인원을 계산하고 역별 열차출발시간정보를 토대로 승강장 대기인원을 산정하였다. 승강장 대기공간은 실제역사의 실용대기면적을 그대로 반영하였고, 방향별 승강장 혼잡도는 실제 승강장 대기공간 수용가능인원 대비 추정된 승강장 대기인원으로 계산하였다. 그러나 혼잡도 분석에서 단일역사에 한정하였고 승하차 승객만 고려하고 환승 역사 내 환승 대기인원을 고려하지 못한 한계가 있다.

지금까지 대중교통 혼잡도 분석이 이루어졌지만 전수화된 스마트카드 전체를 분 단위별로 지하철 노선과 승강장 혼잡도를 추정한 연구는 없었다. 지하철 침두시 배차간격이 2~3분임을 감안하면 배차간격보다 작은 분석단위로 철도 승강장의 혼잡도를 분석할 필요성이 있다. 더불어 보행시설 승객의 동적 흐름을 파악하기 위해 1분 분석단위가 필요하다. 또한 환승역에서 환승승객의 경로선택 알고리즘을 적용하여 열차와 승강장 혼잡도를 동시에 추정하는 연구가 병행되어야 한다.

본 연구는 선행연구와 다음과 같은 차별성이 있다. 첫째, 지하철 전체 승객의 시간대별 통행체적을 파악하여 집중 및 분산되는 수요를 1분 단위로 동적 혼잡도를 추정한다. 둘째, 철도 승강장 수요를 역사환승통행 및 직승직하통행, 노선간 환승통행으로 구분하여 개별 역사의 승강장 혼잡도를 예측한다. 마지막으로 기존 연구들이 교통수단 또는 교통시설에 한정되어서 혼잡도를 분석한 것과 달리 본 연구에서는 교통수단과 교통시설 이용객의 혼잡도를 동시에 분석한다.



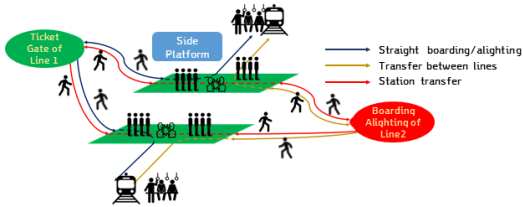
<Fig. 1> Analysis of platform congestion at Yeoksam station(in-bound): (a) cumulative arrival passengers at a platform superimposed on a train departure time; (b) the number of waiting persons at a platform for each train, Lee & Choi(2015)

Ⅲ. 지하철 승강장 동적 혼잡도 분석 방법론

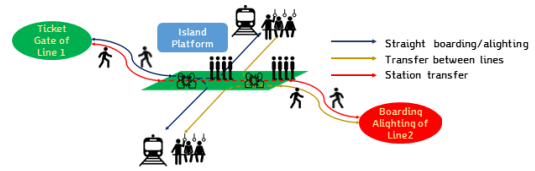
1. 승강장 형태 및 통행유형 구분

승강장이란 승객들이 열차를 타고 내리는 공간으로 승강장 행태는 기본적으로 상대식 승강장과 섬식 승강장이 있으며, 파생된 형태의 승강장으로 쌍섬식(2명 4선식) 승강장, 쌍대식 승강장, 2면 3선식 승강장 등으로 구분할 수 있다. 상대식 승강장은 상·하행 2개 선로를 중앙에 두고 대칭적으로 마주보는 형태이며, 대합실에서 승강장으로 내려갈 때 상하행으로 분리되어 있는 구조이다. 섬식 승강장은 선로와 선로 사이에 승강장이 위치한 형태로, 대합실에서 승강장으로 내려가며 상하행을 모두 이용할 수 있는 구조이다(Lee et al., 2016).

승강장 형태에 따른 승객의 통행유형도 자체 노선 직승직하와 노선 간 환승, 역사환승 등 3가지로 분류한다. 자체 노선 직승직하 승객은 지하철 출입 역사의 노선과 실제 승하차 이동 노선의 ID가 동일한 경우로서 빈도수가 가장 많은 종류의 통행이다. 단일 노선 역사의 경우 직승직하 통행 비율이 100%를 차지한다. 노선 간 환승이동은 환승역사에서 발생하는 통행으로 목적지로 이동하기 위한 역사 내 통행이다. 환승통행이 발생할 경우 첫 번째 노선의 승강장에서는 하차통행이 발생하며, 환승통로 이동 후 환승노선 승강장에서는 승차통행이 발생한다. 따라서 보행통행량은 두 노선의 승강장 모두에서 집계된다. 역사환승은 환승역사에서 발생하는 것은 동일하나 지하철 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 지하철 2호선과 신분당선이 교차하는 강남역의 경우 2호선 태그 후 신분당선 이동 승객은 2호선 지하철 승강장과 신분당선 승강장을 모두 경유한다. 이는 2호선 강남역을 태그했더라도 자체 노선 환승통행의 경우, 2호선 승강장과 신분당선 승강장 모두 집계가 필요하며 승강장 혼잡도에도 이를 고려할 필요가 있다. 이와 같이 통행유형을 구분하는 이유는 자체노선 승하차 승객이 많은 경우 승하차통행량이 혼잡의 원인이고 환승통행이나 자체노선 환승이 많은 경우 환승승객이 혼잡의 원인이 되기 때문에 승강장의 혼잡도를 증가시키는 요인을 정확히 분석하기 위함이다.



<Fig. 2> Passenger flow of side platform



<Fig. 3> Passenger flow of island platform

<Table 1> Passenger travel type at platform

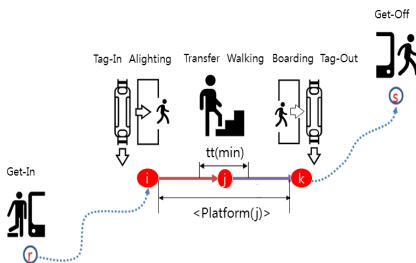
Travel type	Contents	Example
Straight boarding/alighting	Boarding/Alighting lines and travel routes are the same	Tag at Gangnam Station Line 2 and travel via Line 2
Station transfer	Boarding/Alighting lines and travel routes are different	Tag at Shinbundang Line and travel via Line 2
Transfer between lines	Normal transfer	Transfer to Shinbundang Line from Line 2

2. 지하철 승강장 동적 승객 통행모형

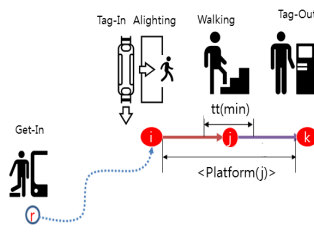
승객 통행배정모형은 승차역에서 하차역까지 최소통행시간 경로를 선택하는 가정으로 구축하였다. 개별 승객들은 최소통행시간 경로를 선택하며, 지하철 혼잡도를 고려하면 목적함수를 Eq. (1)과 같이 구축할 수 있다. 여기서, r (출발지), s (도착지), p (선택경로)이며, t 시점에서 $\xi_p^{rs}(t)$ 는 일반화비용(통행시간), $f_p^{rs}(t)$ 는 경로를 선택할 확률, $q^s(t)$ 는 승객수이다.

$$\min \int_0^T \left\{ \sum_r \sum_s \sum_p \xi_p^{rs}(t) \cdot f_p^{rs}(t) \right\} dt \dots\dots\dots (1)$$

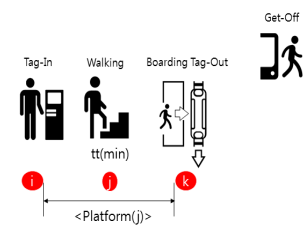
$$s.t \quad q^s(t) = \sum_p f_p^{rs}(t) \quad \forall p, r, s, t \quad f_p^{rs}(t) \geq 0 \quad \forall p, r, s, t$$



<Fig. 4> Concept for transfer



<Fig. 5> Concept of alighting



<Fig. 6> Concept of boarding

지하철 승강장 승객 산출모형을 구축할 때 승강장 통행속성은 승하차 및 환승통행으로 구분되기 때문에 모형의 함수는 출발지, 노선간 환승, 도착지로 3가지로 구분한다. 각 통행 속성 수식은 산출된 경로(p)에 특정 승강장(j)이 경로에 포함되는 모든 승객의 총합이 승강장 통행량을 의미하며, 분석단위는 분석 단위는 1분이다. 지하철

승강장 동적 통행배정모형은 Eq. (2)와 같으며, $V_j(tt)$ 은 특정시점(tt) 승강장 대기승객, $\delta_{p,j}^{rs}(tt)$ 는 승강장 환승 통행, $\delta_{p,j}^{js}(tt)$ 는 도착통행, $\delta_{p,j}^{rj}(tt)$ 는 승강장 출발통행이다. 여기서, t 시점이 tt 에 포함되면 1, 아니면 0이다.

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

3. 지하철 승강장 동적 혼잡도 산정방안

지하철 승강장 동적 혼잡도 추정 단계는 다음과 같은 3단계를 거친다. 첫째, 스마트카드자료를 기반으로 1분 단위 통행량을 산출하고, 배차간격을 고려하여 승객 통행량을 산출한다. 둘째, 승객 통행유형을 고려하여 승강장 내 통행량을 추정한다. 셋째, 승강장별 실용대기면적을 나누어 혼잡도를 추정한다.

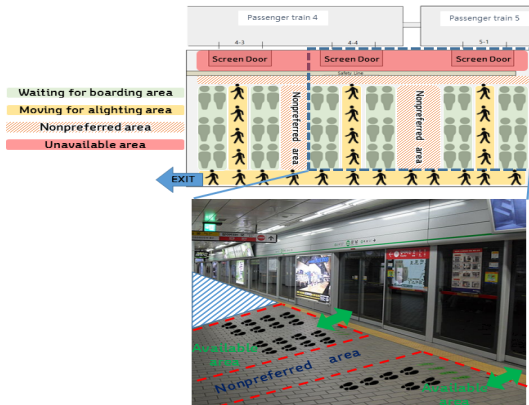
스마트카드자료에는 승하차시간이 저장되기 때문에 승객들의 이동 패턴과 배차간격을 고려하여 승강장에서 이동 및 대기시간을 추정할 수 있다. 게이트 진입에서 승차시간은 3분이고 하차에서 게이트 진출은 1분으로 가정하였다. 환승역 간 환승시간은 환승역간 거리를 평균 통행시간으로 환산하여 적용하였다. 예를 들어 노선 승객이 지하철 게이트에서 12시 정각에 Tag-in하면 승강장 도착시각은 12시 3분이며, 대기시간 3분을 적용하여 12시 6분에 승차한다고 가정한다. 하차통행의 경우 1분을 대기하고 게이트에서 Tag-out 이동한다고 가정한다. 환승통행의 경우 경로선택모형을 적용하여 분석역사에서 노선간 환승거리자료를 기반으로 평균 보행통행속도(1.2m/s) 적용하여 환승통행시간을 추정한다. 그리고 1분 단위로 승객의 통행유형을 고려한 승강장에서 이동 및 대기인원을 추정한다. 마지막으로 실제 승강장의 동적 혼잡도는 승강장에서 승객 이동 패턴을 반영한 실용대기면적을 고려하여 Eq. (3)과 같이 추정한다. 여기서, 조절변수(α_j^s)는 역사 및 승강장별 승강장 형태가 다양하므로 이를 반영하기 위한 변수이다. 그러나 조절변수를 반영하려면 모든 승강장 유형 및 형태별 전수조사자료를 이용하여 변수를 추정해야하지만 관련 자료 부재로 본 연구에는 반영하지 못하였다.

$$\delta_j^s(tt) = \frac{\sum_a \chi_{ja}^s(tt) + \sum_b \chi_{jb}^s(tt) + \sum_c \chi_{jc}^s(tt)}{A_j^s} \cdot \alpha_j^s(tt) \quad (3)$$

여기서, a : 직승직하 승객수(인)
 b : 노선간 환승 승객수(인)
 c : 역사 환승 승객수(인)
 α_j^s : 조절변수(역사 및 승강장별 영향변수)
 A_j^s : s역사 j승강장에서 실용대기면적(m^2)
 χ_j^s : s역사 j승강장에서 승객(인)
 δ_j^s : s역사 j승강장에서 승객혼잡도(인/ m^2)

지하철 승강장은 승하차 및 환승을 위해 승객이 대기하는 공간으로, 정확한 혼잡도 산정을 위해서는 대기 공간에 대한 상세한 조사나 연구가 필요하다. Lee et al.(2016)은 승강장 공간을 아래와 같이 구분하였다. 첫

째, 승강장 내의 구조물로 인해 승객이 활용하지 못하는 공간을 ‘활용 불가 공간’으로 설정하였다. 둘째, 승하차 문과의 이격거리가 멀거나 승객의 활용도가 떨어지는 공간을 ‘승차 비선호 공간’으로 설정하였으며, 셋째, 승객이 승차를 위해 대기하는 공간을 ‘실용대기 공간’으로 정의하였다. 본 연구에서는 이와 같이 세 가지 유형으로 승강장 공간을 적용하기로 한다.



<Fig. 7> Concept of available area in subway platform

<Table 2> Railway platform design for level of service

LOS	Occupancy rate (m ² /passenger)	Density (passenger/m ²)
A	≥ 1.3	≤ 0.8
B	≥ 1.0	≤ 1.0
C	≥ 0.7	≤ 1.4
D	≥ 0.3	≤ 3.3
E	≥ 0.2	≤ 5.0
F	< 0.2	> 5.0

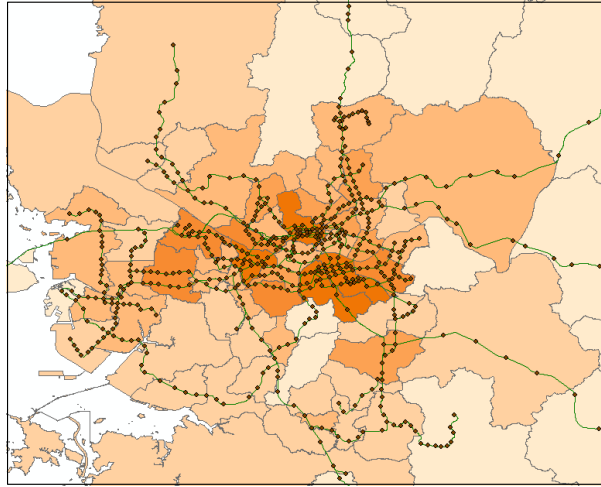
Urban railway station and transfer and convenience facilities design guidelines(2015)에서 제시된 점유공간과 승객 밀도는 승강장 서비스 수준 나타내는 지표로 적합한 것으로 판단되므로 국내기준을 적용하기로 한다. 국내기준은 한국인 체형을 적용하여 대기공간에 대한 서비스 기준을 제시했기 때문이다. 승강장 설계시 필요공간을 0.8m²/인으로 설계하고 첨두시간대 승강장 서비스 수준은 D로 설계하도록 제시하고 있다. 이는 점유공간 0.3m²/인 이상 0.7m²/인 이하로 평균 대기공간 0.5m²/인이다. 승강장 서비스 수준 D는 설계기준으로 실제 역사에서 발생하는 혼잡도 추정 기준이다. 예를 들어 역삼역 내선의 승강장 가용면적은 기존 조사 결과 783.5m²이며, 승객이 활용하는 혼잡 공간을 235m²로 가정한다면 계획상의 승강장 이용 권장 승객수는 평균 대기공간 0.5m²/인을 적용하여 약 470명으로 산출된다. 만약 첨두시간에 승강장에 470명 이상 통행량이 발생할 경우 계획 용량을 초과하기 때문에 개선이 필요한 역사로 분류할 수 있다.

IV. 지하철 승강장 동적 혼잡도 사례 분석

1. 자료

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

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



<Fig. 8> Seoul metropolitan subway network

2. 모형 정확도 검증

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

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

검증 결과 민자 환승자료상 승객 경로가 첫 번째 최적 경로에서 탐지된 비율이 79.82%, 나머지 유사한 경로까지 탐지된 비율이 19.48%로 대부분(99.3%)이 탐지되었다. 최적 경로 선택 알고리즘의 경로 탐색 결과와 실제 사용자의 통행 경로가 대부분 일치하고 있어 모형이 현실을 충분히 묘사하고 있다고 판단된다.

<Table 3> Validation results for using private transfer information

Division	Route search	Number	Ratio(%)
Route search	Optimal routing(K[0])	162,689	79.82
	Non-optimal routing(K[1]-K[9])	39,698	19.48
Non-route search	-	1,434	0.7
Sum	-	203,821	100

3. 단일 역사 분석결과(강남역)

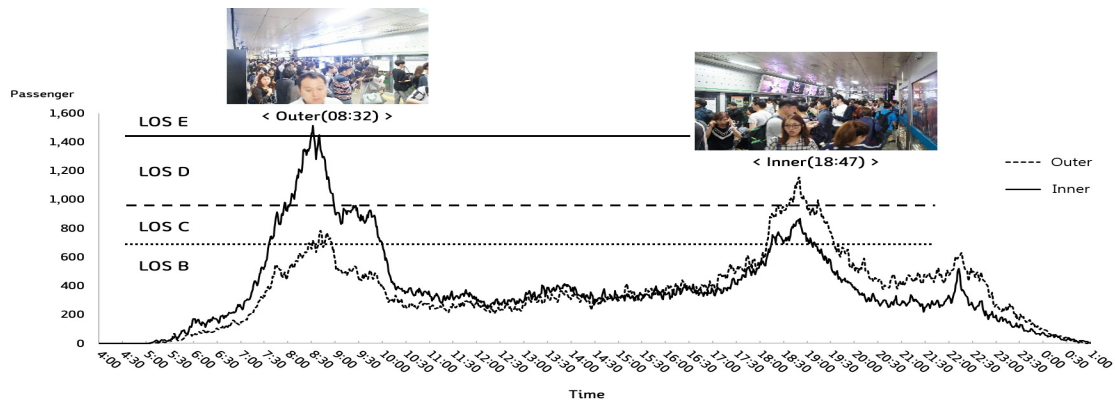
전체 수도권 지하철 역사 중 다섯 번째로 통행량이 많은 강남역은 2011년 10월 신분당선이 개통되면서 환승역이 되기 전까지는 비환승 역사 중 승객이 가장 많은 역사였다. 신분당선이 개통됨에 따라 2010년 기준 약 20만 통행에서 2016년 10월 기준 약 30만 5천 통행으로 통행량이 1.5배 이상 증가하였다. 이는 강남역을

이용하고자 하는 자연 증가분을 포함하여 신분당선을 이용한 후 강남 도심 방면으로 이동하려는 환승 수요가 합류되기 때문이다. 전체통행량 대비 통행 종류별 수요를 보면 여전히 노선 승하차 통행량이 73%를 차지하고 있고 노선환승 수요는 24%를 차지하고 있다. 그러므로 강남역을 단일역사의 사례분석 대상으로 선정할 당위성은 충분하다고 사료된다.

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·학원 시설이 매우 밀집되어 있는 서울 3도심 중 하나인 강남 도심에 위치해 있기 때문에 극심한 혼잡도가 발생하는 것으로 해석된다.

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 장시간 동안 통행이 이루어지기 때문으로 분석된다.



<Fig. 9> Analysis results of pedestrian LOS at Gangnam Station

4. 환승 역사 혼잡도 분석결과

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

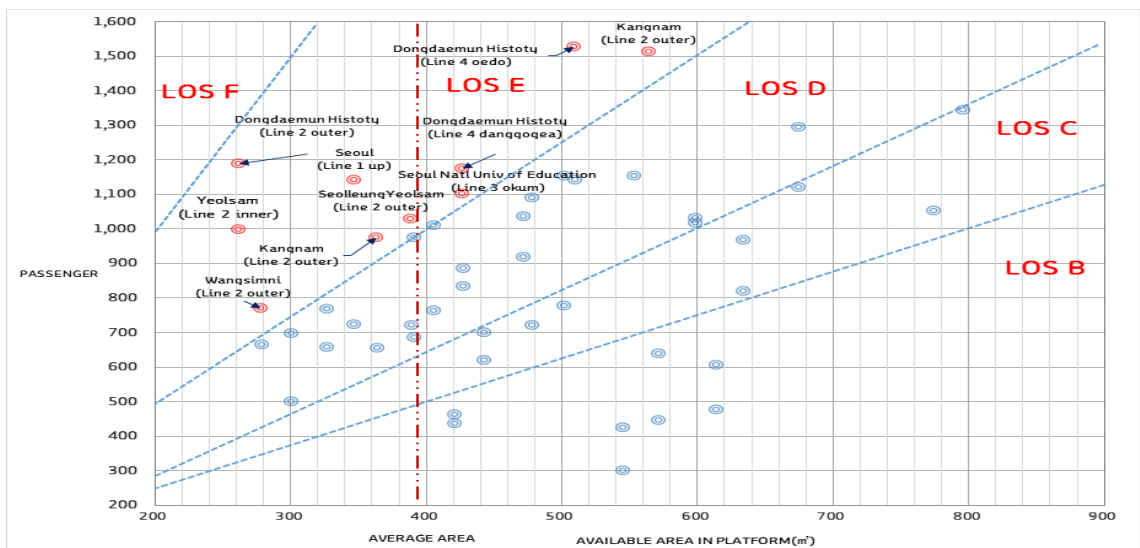
사당역의 경우 2호선과 4호선이 교차하는 환승역으로 수도권 도시철도 중 통행량이 일곱 번째로 많고, 교대역은 2호선과 3호선이 교차하는 환승역으로 통행량이 아홉 번째로 많다. 사당역과 교대역의 통행 종류별 비율은 매우 유사한 특성을 지닌다. 고속터미널역의 경우 수도권 도시철도 중 통행량이 네 번째로 많은 역사

로 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.

<Table 4> Top 10 stations by passenger traffic volumes

Station	Total	Transfer between lines	Station transfer	Straight boarding/alighting	Station transfer + Straight boarding/alighting
Sindorim	361,252	221,934	42,545	96,773	139,318
Dongdaemun Histoty	348,524	256,539	30,950	61,035	91,985
Seoul	330,816	164,428	59,533	106,856	166,388
Express Bus Terminal	308,269	152,615	61,064	94,590	155,654
Kangnam	305,794	74,369.50	8,332	223,093	231,424
Jamsil	294,733	116,668	7,604	170,461	178,065
Sadang	294,165	140,308	46,446	107,412	153,857
Jongno3	245,154	126,982	53,122	65,050	118,172
Seoul Natl Univ of Education	242,384	117,891	37,882	86,611	124,493
Wangsimni	221,199	135,868	53,744	31,587	85,331

지하철 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 지하철 역사별 통행 특성을 고려하고, 구조 특성을 조사하여 승강장 혼잡도를 산정하였다.

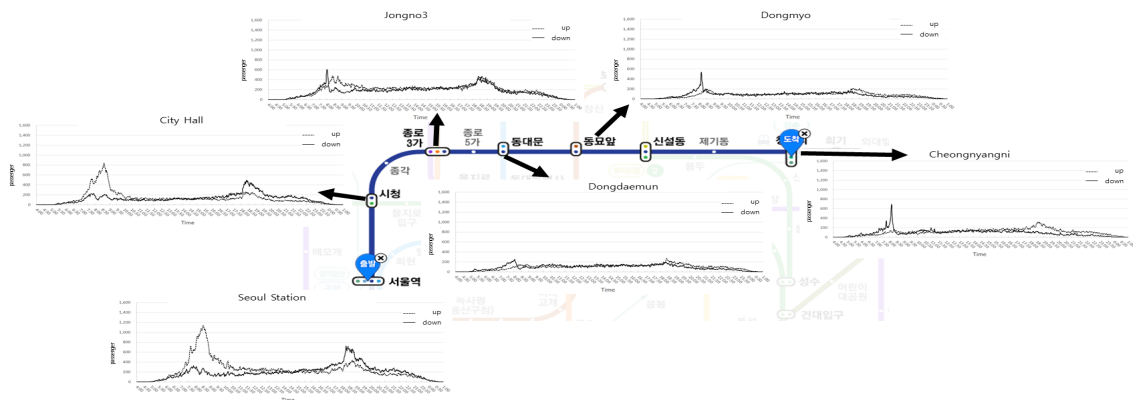


<Fig. 10> Platform crowdedness at passenger volume and practical waiting area

5. 수도권 지하철 노선별 승강장 혼잡도 분석결과(1~4호선, 9호선)

지하철 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.

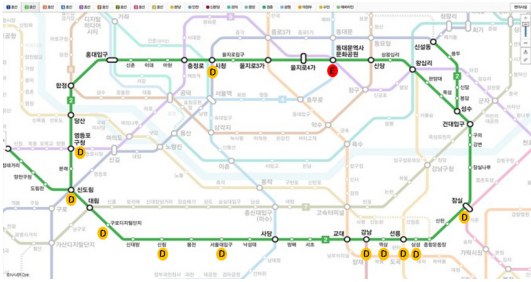
하지만 개통된 지 50년 이상 지나 역사 구조 및 시설이 매우 낙후되어 있기 때문에 개선 필요성이 있다. 세부내용을 살펴보면 1호선 주요 환승역인 서울역에서 상행 방향으로 오전 첨두시간에 최대통행량이 1,142명 발생하였고 시청역 역시 상행 방향으로 오전 첨두시간에 최대통행량이 838명 발생하였다. 특히 서울역 상행 방향 승강장의 서비스 수준은 LOS E를 보이고 있다. 기타 종로3가역, 동묘앞역, 청량리역 등은 혼잡도가 비교적 낮으나 오전 첨두시간에 일시적으로 통행량이 급증하는 특성을 보인다.



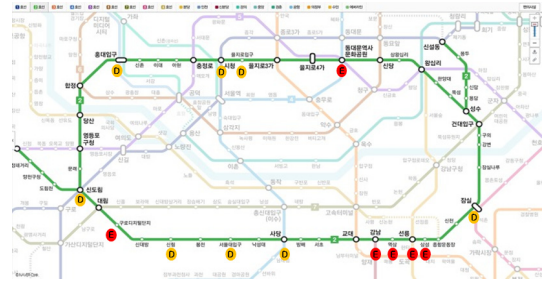
<Fig. 11> Platform passenger volume of Line 1

지하철 2호선은 지하철 노선 중 가장 이용객이 많은 구간임에도 불구하고, 승강장 면적은 1호선, 4호선에 비해 오히려 좁아 다른 노선에 비해 지하철 혼잡도가 높다. 실제 2호선 사당에서 강남까지 이르는 구간은 9호선을 제외하면 가장 높은 혼잡도를 기록하고 있다. 사당~강남 구간 중 강남역의 승하차 승객은 23만 명으로 지하철 역사 중에 가장 많고 사당, 교대 역사도 10만 명이 넘는 승하차 통행이 발생한다. 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.

2호선 승강장에 대해 가장 혼잡한 시간에 서비스 수준을 분석한 결과 내·외선 방향 구분 없이 동대문역 사문화공원역에서 LOS E로 서비스 수준이 가장 낮았다. 또한 사업체와 여가 시설이 집중되어 있는 강남에서 역삼까지는 외선 구간에서 LOS E로 서비스 수준이 낮았다. 그 밖에 환승 통행이 빈번한 잠실역과, 통행량이 가장 많은 신도림역, 사업시설이 집중되어 있는 구로디지털단지역에서 LOS E로 혼잡하였다. 전체적으로 외선 방향이 내선 방향보다 상대적으로 혼잡도가 높았는데, 이는 강남 방향, 외선 방향으로 출근 첨두시간에 승객이 집중되었기 때문으로 판단된다.

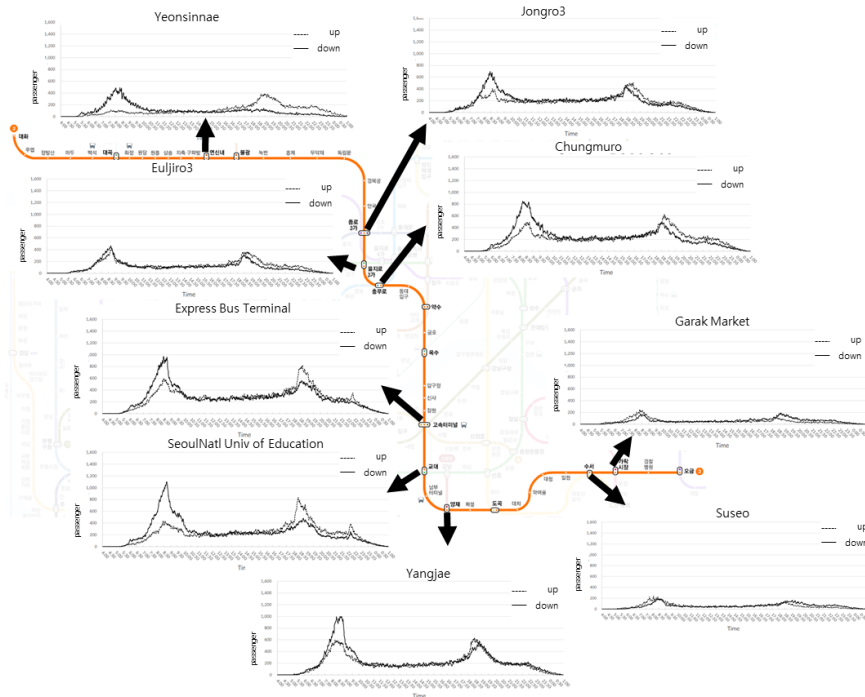


<Fig. 12> Platform crowdedness level of Line 2 inner circle line



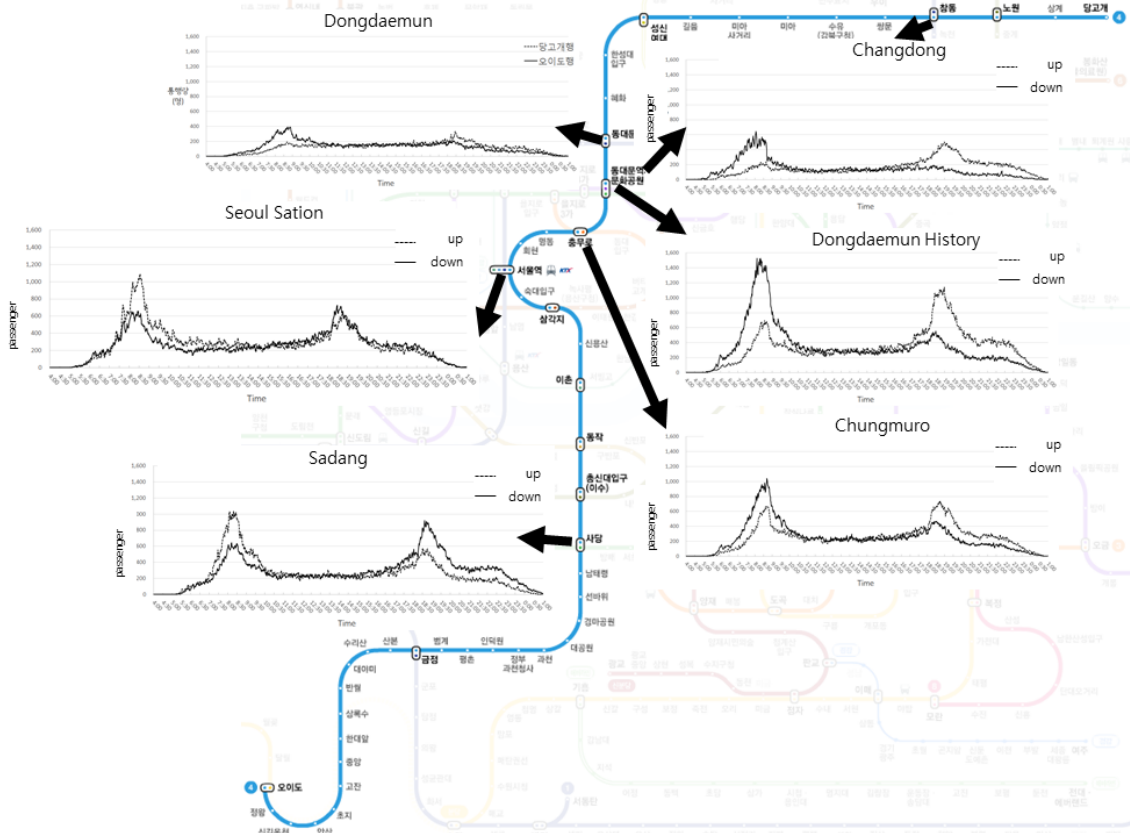
<Fig. 13> Platform crowdedness level of Line 2 outer circle line

지하철 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 환승역사 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. 을지로3가역과 연신내역의 경우 승강장 면적이 평균 대비 60% 수준에 불과하지만 통행량이 상대적으로 적어 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.



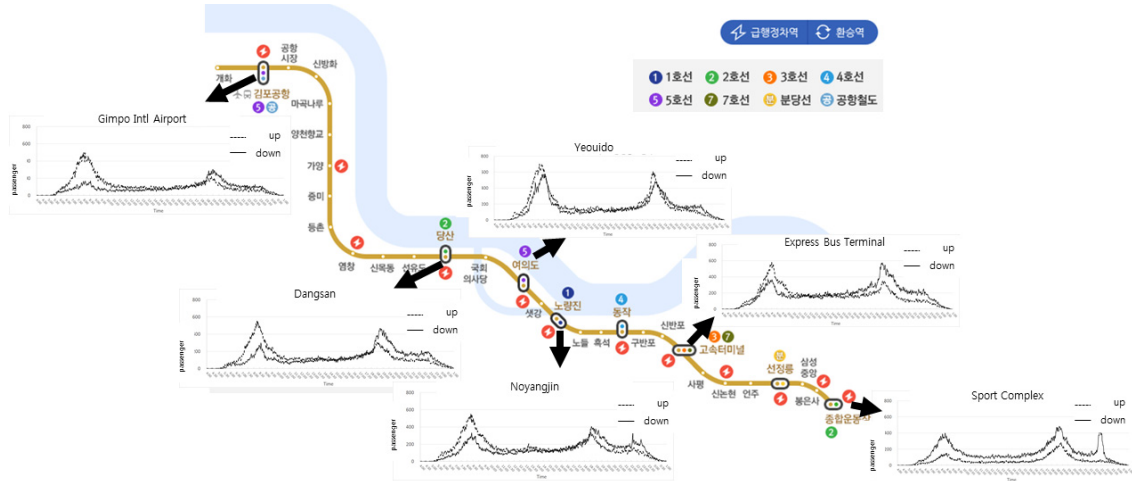
<Fig. 14> Platform passenger volume of Line 3

지하철 4호선은 3호선과 유사하게 한양도성과 강남 도심을 연결하는 중심 노선이다. 출퇴근 첨두시간에는 강북지역과 안산, 과천에서 서울 주요 도심 방향으로 유입되는 통행량이 많다. 주요 혼잡역사로 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 LOS E로 분석되었다. 사당역과 서울역은 출근 첨두시간 최대통행량이 각각 1,038명, 1,092명으로 비슷한 수준을 보이며, 승강장 면적도 전체 평균과 유사하여 두 역사 모두 LOS D를 보인다.



<Fig. 15> Platform passenger volume of Line 4

지하철 9호선은 수도권 전체 역사에서 혼잡도가 가장 높은 노선이다. 지하철 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.



<Fig. 16> Platform passenger volume of Line 9

V. 결론 및 향후과제

수도권 지하철의 노선혼잡도와 승강장혼잡도는 교통정책의 지표로서 매우 중요하다. 혼잡도 완화는 혼잡 비용을 줄이면서 승객의 안전을 도모하는 변수로서 파악될 필요가 있다. 본 연구는 기존 혼잡도 연구인 목적 및 단일역사 혼잡도 추정에 한정되어 있는 상황에 대한 한계를 파악하고 AFC기반의 ICT와 관련된 빅데이터 자료인 스마트카드자료를 토대로 모형을 구축하는 방안을 시도하였다.

모형은 동적으로 승객 흐름 파악하고 승강장에서 나타나는 현상을 노선간환승, 노선 도착·출발로 나타나는 역사환승 및 직승직하 통행으로 구분하여 최적의 유사경로를 선택하는 모형으로 구축하였다. 승강장 혼잡도를 파악하기 위하여 기존에 제안된 실용대기면적에서 승객의 집중도를 산정하는 수식을 제안하였다.

사례연구를 통해 1분 단위 승객의 동적흐름을 재현하고 수도권 전체 지하철 네트워크에서 나타나는 승객 흐름을 구현하였으며, 승강장 별로 승객의 이동특성을 파악하는 방안도 제시하였다. 그리고 본 연구를 통해 단일역사의 승객이동, 노선별 승객이동, 환승역사 통행실태, 승객의 동적 승강장 이용실태 등 다양한 관점의 결과가 도출될 수 있음을 예시하였다.

특히 본 연구는 승강장 혼잡도 분석, 운영, 설계 3가지 측면에서 다양한 활용방안에 대해 근간을 이룰 수 있는 모형을 구축하였다. 승강장 동적 혼잡도 모형의 활용방안은 다음과 같다. 첫째, 분석 측면에서는 혼잡도 추정의 시공간적인 제약이 없기 때문에 혼잡도 변화에 대한 장기간 분석이 가능하고 지역별·노선별 지하철 혼잡도 평가에 활용이 가능하다. 둘째, 운영 측면에서는 승객에게 혼잡도 정보를 실시간 및 예측 정보를 제공함으로써, 승객 스스로가 혼잡 시간을 피하거나, 경로 변경을 통해 초기 단계의 혼잡도를 개선 대응책으로 활용할 수 있을 것이다. 또한 열차 스케줄 조정 및 추가 투입 등을 혼잡 완화 대응자료로 활용할 수 있다. 셋째, 설계 측면에서는 실시간 통행량 정보를 토대로 산출 때문에 승강장 구조 설계 및 변경에 활용할 수 있다. 또한 긴급 상황에 대비하여 대피 공간 및 대피 경로 설계 등에 활용할 수 있다. 향후과제로는 승강장 혼잡도를 보다 정확히 추정하기 위해 열차스케줄, 실시간 정보, 가변수요, 날씨 등 다양한 변수들을 반영한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업(Transportation & Logistics Research Program (TLRP))의 연구비지원 (19TLRP-B148684-02-000000)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Eom J. K., Song J. Y. and Choi J. K.(2014), "Load Factor Decrease In The Seoul Metro Circle Line through Analyzing Passenger OD Demand," *Journal of the Korean Society for Railway*, vol. 17, no. 6, pp.457-465.
- Horchler D., Graham D. J. and Anderson R. J.(2017), "Crowding cost estimation with large scale smart card and vehicle location data," *Transportation Research Part B*, vol. 95, pp.105-125.
- Jung Y. R. and Bae S. H.(2015), "Estimation of Bus Passenger Occupancy and Degree of Congestion by Using Bus Card Data in Busan," *Journal of Transport Research*, vol. 22, no. 3, pp.13-24.
- Lee H. and Choi J. K.(2015), "Development of an Algorithm for Estimating Subway Platform Congestion Using Public Transportation Card Data," *Journal of the Korean Society for Railway*, vol. 18, no. 3, pp.270-277.
- Lee H., Chang K. B and You B. S.(2016), "Analysis of an Effective Waiting Area in Urban Railway Platform," *Journal of Transport Research*, vol. 23, no. 4, pp.61-71.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2015), *Urban Railway Station and Transfer and Convenience Facilities Design Guidelines*.