

승강장 혼잡관리를 위한 열차의 정차시간 예측모형

Development of the Train Dwell Time Model : Metering Strategy to Control Passenger Flows in the Congested Platform

김 현* · 이 선 하** · 임 국 현***

* 주저자 및 교신저자 : 한국교통연구원 연구위원
 ** 공저자 : 국립공주대학교 도시·교통공학과 교수
 *** 공저자 : 한국교통연구원 연구위원

Hyun KIM* · Seon-Ha Lee** · Guk-Hyun LIM***

* Dept. of Railway Transport Research, The Korea Transport Institute
 ** Dept. of Urban and Transportation Engineering, Univ. of Kongju
 *** Dept. of Railway Transport Research, The Korea Transport Institute

† Corresponding author : Hyun KIM, hyun_kim@koti.re.kr

Vol. 16 No.3(2017)
 June, 2017
 pp.15~27

ISSN 1738-0774(Print)
 ISSN 2384-1729(On-line)
<https://doi.org/10.12815/kits.2017.16.3.15>

Received 23 March 2017
 Revised 10 April 2017
 Accepted 18 April 2017

© 2017. The Korea Institute of
 Intelligent Transport Systems. All
 rights reserved.

요 약

열차 정차시간 증가는 열차 서비스 빈도를 감소시켜 열차와 승강장의 혼잡이 발생하게 된다. 그러므로 열차 정차시간(Train dwell time)에 관한 연구는 열차 운행 계획수립 관점에서 매우 중요하게 다루어 왔다.

본 논문은 계획된 정차시간을 준수할 수 있도록 승객의 유입을 관리하여 승강장 혼잡을 줄일 수 있는 전략들에 활용할 수 있는 실시간 열차 정차시간 예측모형을 개발하였다. 모형의 특징은 실시간으로 수집 가능한 승차인원, 하차인원, 그리고 열차의 중량 등 3가지 독립 변수를 적용하였고, 모형의 설명력($R^2=0.809$)이 대체적으로 정확한 결과를 보여주었다. 실시간 정차시간 모형은 열차가 계획된 정차시간을 준수하도록 승차 승객 수를 조정하는 게이트 미터링 전략에 활용될 수 있다.

핵심어 : 열차 정차시간, 승강장 혼잡관리, 게이트 미터링, 정시성

ABSTRACT

In general, increasing train dwell time leads to increasing train service frequency, and it in turn contributes to increasing the congestion level of train and platform. Therefore, the studies on train dwell time have received growing attention in the perspective of scheduling train operation.

This study develops a prediction model of train dwell time to enable train operators to mitigate platform congestion by metering passenger inflow at platform gate with respect to platform congestion levels in real-time. To estimate the prediction model, three types of independent variables were applied: number of passengers to get into train, number of passengers to get out of trains, and train weights, which are collectable in real-time. The explanatory power of the estimated model was 0.809, and all of the dependent variables were statistically significant at the 99%. As a result, this model can be available for the basis of on-time train service through platform gate metering, which is a strategy to manage passenger inflow at the platform.

Key words : Train Dwell Time, Congestion Management For Platform, Gate Metering, Punctuality

I. 서 론

우리나라 도시철도는 대도시들을 중심으로 최근 수십 년간 급성장 하였다. 한해에 무려 약 25억 명이 도시철도를 이용하였다(index.go.kr, 2017). 도시철도가 이처럼 대중들에게 중요한 교통수단이 되었지만, 출퇴근 시간 동안의 과수요와 이로 인해 발생하는 혼잡은 승객들의 불편뿐만 아니라 승객들 1인당 평균 승하차시간을 2배 증가시킨다는 연구 결과가 있다(Oh, 2005). 열차와 승강장의 혼잡은 출퇴근 시간대 기준으로 반복해서 발생하는 유형과 스포츠 경기와 행사 등에 따른 이벤트성 유형으로 구분된다. 각 도시철도 운영기관의 경영평가 보고서(2016)에 근거하면 도시철도의 혼잡 수준은 서울 9호선(여의도~노량진) 239%, 서울 2호선(사당~방배) 200%, 서울 7호선(군자~어린이 공원) 180%, 인천 1호선(예술회관~시청) 156%, 부산 1호선(서면~범례골) 125% 등으로 나타나 있다. Shon(2013)은 열차의 혼잡이 발생하는 이유로 승객이 의도적으로 특정 칸을 선호하고 있다 것을 설문조사에 근거하여 밝히고, 그 결과는 특정 열차 칸이 혼잡하다는 것을 열차 중량자료에 근거하여 증명하였다.

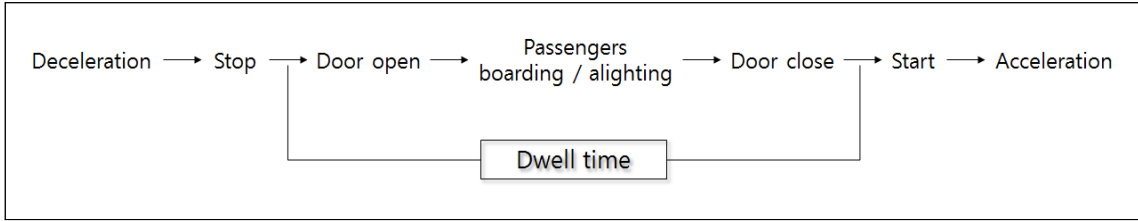
본 연구는 대도시 도시철도의 운영 효율성을 높이기 위해 철도의 혼잡을 관리하는 AFC(Automatic Fare Collection)를 이용한 미터링 전략을 수립하는데 필수적 요소에 해당하는 열차의 실시간 승하차시간 예측에 관한 것이다. 철도의 승강장과 열차 혼잡 수준은 승하차 시간이 주원인이다(Puong, 2000). 이는 열차 운영계획에 따라 도시철도의 정시 운영이 가능하게 된다. 승하차시간의 증가는 열차의 정차시간(Train Dwell Time)을 증가시키고 운행의 중요한 요소인 운전시격을 늘리게 되며, 결과적으로 전체 철도시스템의 서비스 용량이 줄어들게 된다. 이와 같이 승객들의 승하차 행위와 이들이 승하차시간에 미치는 영향을 이해하는 것은 계획된 정차시간을 유지하고, 전체 시스템의 서비스 용량을 유지하기 위해 매우 중요하다.

기존 연구들에서도 정확한 승하차 시간의 이해를 바탕으로 역사 내에서 혼잡을 줄이고 정차시간의 지체를 막기 위한 다양한 노력을 찾아 볼 수 있다. 예를 들어, 역사 내 승객들의 효율적인 분산과 흐름을 유도하기 위해 첫째 안내유도 사인 설치, 둘째 에스컬레이터 운영 지침 개선, 셋째 질서 안내원 증가 등의 방안 등이 제안되었다(Daniel and Rotter, 2009; Washington Metropolitan Area Transit Authority, 2005). 하지만 이와 같은 전략들을 효과적으로 계획하고 운용하기 위해서는 정확한 승하차 시간의 예측이 필수적인 상황이다.

본 연구의 목적은 승강장 혼잡과 열차의 정차시간을 줄일 수 있는 전략들에 활용 가능한 승하차 모형을 개발하고자 한다. 이를 위해 제2장에서는 먼저 열차의 정차시간 예측을 위해 제안되었던 모형들을 고찰하도록 한다. 제3장에서는 승하차시간과 관련된 다양한 변수들을 확인한 후 모형화하며, 현장조사를 통해 수집된 자료들을 분석하여 승하차시간 예측모형을 개발한다. 마지막으로 연구의 결과와 함께 추후 연구과제들에 대해 논의하고자 한다.

II. 열차 정차시간(Dwell time) 예측모형의 고찰

열차의 정차시간 예측모형들을 소개하기 이전에, 이 연구에서 사용될 정차시간 및 승하차 시간에 대한 정확한 정의가 필요하다. 대부분의 연구에서 정차시간은 열차가 역내에 들어온 뒤 정지한 시점부터, 승객들의 승하차가 끝난 후 다시 열차가 출발하기까지의 시간으로 정의된다. 즉 열차가 역내에서 정지한 상태에서 머무른 시간으로 정차시간(DT)이 정의된다. 이는 <Fig. 1>과 같이 도식화 할 수 있다.



〈Fig. 1〉 Definition for Train Dwell time

정차시간은 크게 두 가지 구성요소로 나누어지는데 기능적 정차시간과 승하차 시간이다. 기능적 정차시간은 열차가 도착 후 승강장 문이 열릴 때까지의 시간과 승하차가 모두 끝난 후 열차 문이 닫히고 출발할 때까지 걸리는 시간의 합으로, 이는 대부분 승강장에서 고정 값으로 정해진다. 반면 승하차 시간은 열차 문이 열린 후 승객들의 승하차가 끝날 때까지 걸린 시간으로 승객의 승하차에 따라 다양한 결과가 나타난다.

열차의 정차시간 예측은 많은 선행연구에서 회귀분석을 포함한 다양한 접근 방법을 제안하였다. 현재까지 개발된 모형식들은 그 복잡성과 사용된 변수들의 다양성에 따라서 크게 세 가지로 구분할 수 있다.

1. 승하차 인원수를 통한 예측

Wirasinghe and Szplett(1984)은 각 출입문 별 승차인원과 하차인원을 변수로 포함하는 정차시간 예측 모형을 제안하였다. 이 모형은 일단 각 출입문별 승하차시간을 예측한 후, 그 중 최대값을 선택하여 기능적 시간과 합하여 최종 열차의 정차시간을 계산하는 방식이다. 또한 승차와 하차인원들의 비율에 따라 실제 승하차 시간이 변할 수 있다는 가정을 하고 아래와 같이 다섯 가지의 회귀분석을 통한 예측모형을 제안하였다. 모형은 캐나다 켈거리시의 LRT(Light Rail Transit) 노선 2개 역에서 수집된 자료를 사용하였다.

$$\begin{aligned}
 DT &= \max(t_i) && (1) \\
 t_i &= 1.92 + 0.90A_d && (\psi = 0) \\
 t_i &= 1.22 + 1.00A_d + 2.38B_d && (0.01 \leq \psi \leq 0.32) \\
 t_i &= 2.55 + 0.63A_d + 1.63B_d && (0.33 \leq \psi \leq 0.66) \\
 t_i &= 0.321 + 1.47A_d + 1.40B_d && (0.67 \leq \psi \leq 0.99) \\
 t_i &= 1.92 + 1.39B_d && (\psi = 0.32)
 \end{aligned}$$

여기서, DT : 정차시간
 t_i : i 번째 출입문의 승하차시간
 A_d : 출입문별 하차인원수
 B_d : 출입문별 승차인원수
 ψ : 승차인원 비율 = $\frac{B_d}{B_d + A_d}$

Lam and Poon(1998)은 많은 정보 없이 편리하게 적용되어 질 수 있도록 열차별 총 승차인원과 총 하차인원의 두 가지 변수만을 이용하여 홍콩의 MTR(Mass Transit Railway)역들을 대상으로 다음과 같은 회귀모형식을 개발하였다.

$$ST = 10.5 + 0.021A + 0.016B \quad (2)$$

여기서, ST : 승객 승하차시간
 A : 열차중 하차인원수
 B : 열차중 승차인원수

이 예측모형은 승강장에서 열차에 승차하는 인원들과 열차에서 하차하는 인원들이 열차의 출입문 별로 균일하게 분포되어 있다는 가정하에 개발되었다. 하지만 이와 같은 가정은 승강장 길이가 긴 서울 수도권 도시철도 역에서는 충족되기 어렵다. Wigenraad(2001)의 연구는 영국 전철역들을 대상으로 한 조사결과에서 계단과 엘리베이터 주위로 승하차 인원들이 집중되는 현상을 증명하였다. Jong and Chang(2005)은 열차 출입문별 승하차인원들을 변수로 선택하여 타이페이 주요 역에서 아침 출근시간에 수집된 자료를 바탕으로 선형 모형식을 개발하였다. 이 모형은 승하차시간의 예측을 목적으로 열차의 종류를 완행과 급행으로 구분하여 다음의 두 가지 예측모형들을 제안하였고, 열차의 구성 종류별로 다른 모형식의 필요성을 증명하였다.

$$ST = 2.168903 + 0.739998A_d + 0.971878B_d \quad (\text{완행열차}) \quad (3)$$

$$ST = 1.377865A_d + 1.642144B_d \quad (\text{직행열차})$$

이와 같이 두 가지 변수, 즉 승차 인원수와 하차 인원수만을 이용하는 모형식들은 필요한 정보가 간단하고 단순하기 때문에 쉽게 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있지만, 정차시간에 영향 줄 수 있는 다른 변수들이 고려되지 않기 때문에 결과적으로 예측의 정확성과 신뢰도에 영향을 줄 수 있다.

2. 승하차 인원수 및 입석 인원수를 사용한 예측

열차의 정차시간에 영향을 줄 수 있는 변수들 중의 하나로, 승하차시의 주변 혼잡도를 뽑을 수 있다. 출퇴근시간 시 열차의 정차시간은 열차 내 그리고 승강장 내의 혼잡으로 인해 지연되는 현상이 발생된다. 특히 열차 내 출입문 주변에서 하차를 하지 않는 입석인원들은 승하차 승객들이 흐름을 방해함으로써 정차시간이 결과적으로 증가하게 된다. 기존 연구들(Weston, 1989; Lin and Wilson, 1992; Puong, 2000)은 혼잡도에 영향을 미치는 변수인 열차 내 입석인원수를 포함하는 비선형 모형식을 제안했다.

가장 먼저 Weston(1989)는 기존 연구들에서 열차의 출입문별 승하차 인원수가 균일하게 분포하지 않는다는 점을 들어, 정차시간 모형식에 승객분포 변수(F)를 포함시켰다. 또한 이 모형에서는 총 승하차승객의 숫자들(A,B)이 변수로 사용되었는데, 총 열차의 출입문 개수(D)로 나누어 정밀성을 향상시켰다. 이 모형식은 런던의 도시전철역에서 조사된 자료들을 사용하여 개발되었으며, LUL(London Underground Limited) 공식으로 널리 알려져 있다.

$$DT = 15 + 1.4 \left[1 + \frac{F}{35} \left(\frac{T-S}{D} \right) \right] \left[\left(\frac{FA}{D} \right)^{0.7} + \left(\frac{FB}{D} \right)^{0.7} + (0.027 \left(\frac{FA}{D} \right) \left(\frac{FB}{D} \right)) \right] \quad (4)$$

여기서, 15 : 기능적 정차시간(초)
 D : 총열차출입문갯수
 F : 승객분포도변수(최고분출입문 혼잡도/평균출입문 혼잡도)
 T : 열차내 하차하지 않은 총승객수
 S : 열차내 총 좌석수

위 LUL 식은 호주 시드니 도시전철역에 맞도록 변화된 모형으로 개발되었다. LUL 모형이 복잡하고 많은 변수들을 적용되고 있기 때문에 이를 단순화시키기 위해 열차의 총 승하차인원수 대신에, 각 출입문별로 정보를 수집하여 예측이 가능한 모형식을 고안하였다. 또한, 총 승객 수에서 단순히 좌석수를 빼는 것이 아니라, 열차안의 입석수를 변수(Std_d)로 채택하여 개발된 모형식 결과의 신빙성을 향상시켰다.

$$DT = 10 + 1.9A_d^{0.7} + 1.4B_d^{0.7} + 0.007(A_d + B_d) \cdot Std_d + 0.005(A_d \cdot B_d) \quad (5)$$

여기서, Std_d : 도착후 출입문별 입석인원(오전 첨두) 혹은 출발시 출입문별 입석인원수(오후첨두)

Lin and Wilson(1992)도 유사한 이론으로 식(6)을 제안하였다. Lin and Wilson은 역내로 들어오는 열차내에 입석인원수(AS)가 하차승객들에 영향을 줄 수 있고, 승하차를 마치고 역을 떠나는 열차안의 입석인원수(BS)는 승차승객들에 영향을 줄 수 있다는 근거를 바탕으로 회귀분석을 개발하였다.

$$DT = 13.93 + 0.36A + 0.27B + 8 \times 10^{-4} \cdot (A \cdot AS + B \cdot BS) \quad (6)$$

여기서, AS : 승하차 전 열차내 입석인원수
BS : 승하차 후 열차내 입석인원수

Puong(2000)은 Lin and Wilson(1992)의 모형식을 보다 이론적으로 보완하여 모형의 정확도를 향상시켰다. 이 연구에서는 떠나는 열차의 입석인원(LS) 대신에, 하차가 끝난 후 열차 내 입석인원수(TSD)가 승차승객들에 더 직접적인 영향을 줄 수 있다는 주장을 바탕으로 변수를 교체하였다. 입석인원수는 하차가 모두 이루어진 후 승차가 시작된다는 가정하에 계산하였으며, 또한 종속변수와 독립변수들 간의 관계들이 1차식이 아닌 3차 다항식의 관계를 가지고 있다는 이론적 가정하에, 단계적 회귀분석(stepwise regression)을 통한 다음의 모형식을 개발하였다.

$$DT = 1.22 + 1.82A_d + 2.27B_d + 6.2 \times 10^{-4} \cdot TS_d^3 \cdot B_d \quad (7)$$

여기서, TS_d : 하차 후 출입문별 입석인원수

Parkinson and Fisher(1996)의 연구 또한 입석인원이 승하차시간에 영향을 줄 수 있다는 인식하에 모형식을 개발하였다. 또한 앞에서 언급된 Wirasingh와 Szplett의 연구와 마찬가지로 출입문별 승하차 비율에 따라 다른 모형식의 필요성을 인식하여, 승하차 인원수에 따라 승차위주 승하차, 하차위주 승하차, 기타 등 3가지 식을 제안하였다.

$$\begin{aligned} DT &= 1.0724 + 0.104A + 0.124B - 0.00153A^2 - 0.00194B^2 + 0.0782BS && \text{(승차위주)} \\ DT &= 1.302 + 0.105A + 0.147B - 0.00165A^2 - 0.00511B^2 + 0.653BS && \text{(하차위주)} \\ DT &= 1.363 + 0.0864A + 0.106B - 0.00159A^2 - 0.00235B^2 + 0.0563BS && \text{(기타)} \end{aligned} \quad (8)$$

앞에서 언급되었던 것처럼, 열차내의 입석인원 숫자를 독립변수로 포함하는 많은 종류의 모형식이 개발되

었다. 따라서 입석인원이 승하차시간에 중요한 영향을 미치는 변수 중 하나라는 점과 함께, 실제로 입석인원 수를 모형식에 포함시킴으로써 예측모형의 신뢰도와 정확성이 증가할 수 있다는 점이 증명되었다. 반면, 입석인원수는 정확한 계측이 어렵기 때문에 현장조사를 통한 자료를 이용하여 평균 승차시간은 모형화가 가능하지만, 실시간 계측을 통한 실시간 정차시간 예측을 위한 목적으로는 사용이 불가능하다는 단점도 가지고 있다.

3. 기타 다른 변수들을 포함하는 예측

지금까지 소개된 예측모형들은 단순히 승하차 승객수와 혼잡도만을 이용하기 때문에 노선별로 다른 종류의 열차들이 운행하거나 역사별 구조적 특성인 상대식 승강장과 섬식 승강장을 고려하지 않는 모형식들은 다른 환경을 가진 역사에 적용할 때 정확한 예측결과를 기대할 수 없다. 특히 최근 같은 역에서 다른 종류의 열차(직행 및 완행)가 운행되는 경우가 있다. 따라서 이들을 다양한 환경변수들로 모형에 포함시키는 추세가 확인된다.

예를 들어, LUL 모형식은 처음에는 열차안의 혼잡도가 승하차시간에 영향을 줄 수 있다는 점을 고려하여 그 관련 변수들을 정차시간 모형식에 포함시킴으로써 세계 곳곳의 도시철도 노선에 적용되었다. 이를 위해 단순히 총 승하차 인원만을 변수로 사용한 것이 아니라, 이를 열차의 출입문 갯수로 나누어 줌으로써, 다른 구조와 열차들이 운행하는 역사에서도 큰 오차 없이 사용이 가능하도록 고안되었다. 하지만 LUL 모형식은 애초에 런던 도시전철역에 초점을 두고 만들어 졌기 때문에, 고정된 지수 값을 다른 도시의 열차 노선에도 사용하는 것에 대한 타당성이 Harris(2006)를 통하여 제기되었다. Harris(2006)는 그와 같은 문제점을 인식하여, LUL 모형을 변화가능한 지수를 이용할 수 있도록 개선하였다. 또한 열차의 세부구조 관련변수 출입구 통로 수용력과 유효 출입문 폭을 포함시켰다. 또한, 현실에서는 대부분 가장 혼잡한 출입문에서 가장 긴 정차시간이 발생한다는 점을 인식하여 다음과 같은 3가지 식을 제안하였다.

$$\begin{aligned} \text{하차시간} &= 1.5 \cdot \left(1 + 0.9 \frac{T}{VC}\right) + A^a \cdot DWF \\ \text{교차시간} &= 0.027 \cdot A \cdot B \\ \text{승차시간} &= 1.3 \cdot \left(1 + 0.8 \frac{T}{VC}\right) + B^b \cdot DWF \end{aligned} \tag{9}$$

여기서, VC : 열차 출입문 통로 수용력
 a : 하차인원의 지수
 b : 승차인원의 지수
 DWF : 유효출입문 폭 변수

열차의 정차시간을 계산하기 위해 중요한 변수가 승하차인원 및 열차 내 혼잡도라는 것은 이미 검증되었다. 하지만, 첨단설비 없이 승하차인원과 열차 내 혼잡도를 실시간으로 수집하기가 어렵다는 점도 틀림없는 사실이다. 이와 같은 어려움을 극복하기 위해서 Li et al.(2014)는 실시간으로 수집하기 쉬운 대체가 가능한 변수들을 이용하여 선형 회귀분석 모형식을 네덜란드의 Utrecht 와 Eindhoven도시들의 철도 이용자 정보를 바탕으로 개발하였다.

$$DT = -14.50 + 0.60L_k^s + 0.77L_{k-1}^s + 0.18DT_{k-1}^s + 1.09\sqrt{DT_k^{s-1} \cdot D_k^{s-1}} \tag{10}$$

여기서, L_k^s : 열차의 길이
 L_{k-1}^s : 이전에 역에 도착했던 기차의 길이
 DT_{k-1}^{s-1} : 이전에 역에 도착했던 기차의 정차시간
 DT_k^{s-1} : 전역에서 열차가 머무른 정차시간
 D_k^{s-1} : 전역에서 열차의 출발지연시간

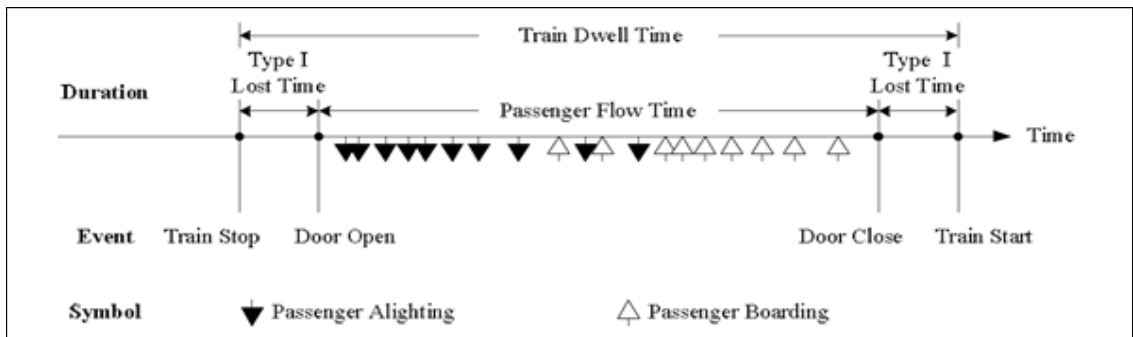
이 모형식은 승객흐름, 열차구조, 역사구조 관련 정보들을 수집할 필요가 없다는 큰 장점을 가지고 있지만, 정차시간의 정확성은 그리 높지 않으며 RMSE를 통한 실측과 예측 정차시간의 오차는 대략 6초에서 8.7 초 정도로 나타났다.

실질적으로 정차시간 예측 식은 개발하지 않았지만, 모형식 개발을 위해 참고가 필요한 몇 가지의 연구들도 있다. 먼저 Harris(2006)는 승하차가 일어나는 속도가 각각 그룹에서도 일정하지 않다는 주장을 실측된 자료들의 분석을 통해 발표하였다. 또한 Hansen et al.(2010)과 Kecman and Goverde(2013)들은 열차의 정차시간이 선착 혹은 연착 시 많은 영향을 받을 수 있다는 조사 결과를 그들의 연구를 통해 증명하였다.

III. 서울 도시철도의 정차시간 예측모형 개발

열차의 정차시간을 정확하게 예측하기 위해 지금까지 많은 연구들이 다양한 접근방법과 변수들을 이용하여 시도되었다. 특히 승하차인원 및 열차 내 혼잡도는 모형에 필수적으로 포함되어야 하는 것으로 판단되지만, 현실적으로 실시간 계측이 어려운 정보들은 다른 정보들로 대체하여 보다 정확하고 현실적으로 예측이 가능한 모형을 개발하기 위한 노력들 또한 확인할 수 있었다. 하지만 아직까지 실시간으로 열차의 정차시간을 대체적으로 정확하게 예측할 수 있는 모형식은 개발되지 않았기 때문에, 이 연구에서 적용할 모형식과 변수들은 현실에서 실시간 수집이나 비교적 정확한 예측이 가능한 정보들만을 사용하도록 하였다.

AFC 미터링 전략의 효과적인 운용을 위해서는 정차지체의 정확한 판단과 예측이 필요하다. 이 장에서는 문헌고찰을 통해 밝혀진 열차의 정차시간에 영향을 미치는 다양한 요소들을 이용하여 정차시간 예측모형을 개발하고자 한다. 이미 언급된 것처럼 열차의 정차시간(Train Dwell Time)은 <Fig. 2>에 제시하고 있는 바와 같이 기능적 정차시간(Type I: Lost Time)과 승하차 시간(Passenger Flow Time)으로 구분할 수 있다. 예측모형의 개발을 위해 7호선 가산디지털단지역에서 오후 침두시간 동안 기능적 정차시간과 승객 승하차 시간을 관측하였으며, 이를 바탕으로 기능적 정차시간을 분석하고 승하차시간 예측모형을 개발하였다.



<Fig. 2> Mechanism for train dwell time analysis

가산디지털단지역은 서울 1호선과의 환승역이며 서울도시철도공사의 관할 역 중에서 출퇴근 이용객수가 가장 많은 역들 중 하나이다. 승강장은 2면 2선의 상대식 구조이며 승객들의 안전을 위해 스크린 도어가 설치되어 있다. 현장조사는 2015년 4월 29일 오후 6시부터 8시까지 2시간 동안 진행되었으며 양방향 부평구청 방면과 장암방면 열차들에 대해 기능적 정차시간, 승하차 시간, 그리고 승하차 승객숫자를 조사하였다.

1. 기능적 정차시간 분석

열차의 정차시간은 다음과 같은 구성요소들로 정의할 수 있으며, 아래 식에서 승하차시간을 제외한 다른 요소들은 기능적 정차시간에 포함된다.

$$DT_n = A + ST_n + B \tag{11}$$

여기서, DT_n : 열차 n 의 정차시간
 A : 열차가 완전히 정지한 후 출입문 개방까지의 시간
 ST_n : 승객들의 승하차시간
 B : 승하차가 끝난 후 열차출발까지의 시간

지하철 공사의 운행규정은 기관사가 열차 정지 후 출입문을 열기 전에 정차위치가 승객의 승하차에 적당 한지를 확인 후 출입문을 개방하도록 하였으며, 또한 출입문을 닫을 때에는 승객의 흐름 등 승하차 상태를 감시하면서 닫도록 하였다. 이 규정에 따라 변수 A 와 B 는 열차마다 약간의 변동이 있을 것으로 예상하였다. <Table 1>은 현장조사를 통해 관측된 기능적 정차시간을 방향별로 정리하였다.

<Table 1> Dwell time of train direction

Bupyeong-gu Office direction						Jangam direction					
Arrival time	A(sec)	B(sec)	Arrival time	A(sec)	B(sec)	Arrival time	A(sec)	B(sec)	Arrival time	A(sec)	B(sec)
18:00:13	5	8	19:11:11	5	5	18:02:55	5	8	18:59:58	5	7
18:06:11	5	7	19:14:16	4	11	18:07:33	4	9	19:05:55	5	7
18:14:52	6	10	19:19:20	6	12	18:11:37	6	7	19:09:43	5	7
18:17:46	5	12	19:21:48	4	8	18:15:29	4	10	19:16:17	4	9
18:24:29	6	10	19:25:27	5	7	18:19:12	4	8	19:20:53	5	7
18:28:46	5	6	19:30:50	6	7	18:22:57	5	5	19:24:13	5	8
18:33:56	4	7	19:34:23	5	9	18:27:14	6	12	19:27:12	6	17
18:42:37	6	18	19:38:43	6	6	18:30:47	4	7	19:32:37	5	7
18:45:35	5	11	19:42:50	5	6	18:34:45	6	5	19:37:12	6	7
18:48:42	4	8	19:45:23	4	8	18:39:22	5	6	19:46:00	6	6
18:52:18	4	9	19:49:18	4	9	18:42:55	5	5	19:48:37	5	6
18:59:09	5	12	19:55:28	5	7	18:47:36	5	14	19:52:57	4	7
19:02:44	5	10	19:58:49	5	6	18:51:25	5	7	19:56:53	6	7
19:06:21	6	8				18:57:12	5	7			
Maximum	6		18			Maximum	6		17		
Minimum	4		5			Minimum	4		5		
Average	5.0		8.8			Average	5.0		7.9		

<Table 1>에 정리된 바와 같이 열차가 도착 후 승객의 승하차가 시작하기 전까지의 시간(A)은 대체적으로 4~6초 내외에서 균일하며 양방향에서 관측된 평균값 또한 5.0초로 같았다. 하지만 승하차가 끝난 후 열차가 출발하기까지의 시간(B)은 최소 5초에서 최대 18초로 다양한 값들이 관측되었으며 부평균청 방면에서는 평균 8.8초, 장암 방면에서는 평균 7.9초의 값들이 관측되었다.

승하차가 끝난 후 열차가 출발하기까지의 시간(B)이 대체적으로 편차가 큰 이유는 열차의 운행간격을 맞추기 위한 것과 또는 다른 이유들로 인해 승하차가 끝났음에도 일정시간 동안 출력이 지연될 수 있기 때문이다. 하지만 승하차 시간이 길어져 정차지체가 예상되거나 이미 발생한 경우 더 이상의 지체를 막기 위해 즉각 열차를 출발한다고 가정하는 것이 타당할 것이다. 따라서 이 연구를 위해 기능적 정차시간은 고정으로 사용하도록 하며 A의 경우 평균값 5.0초를 사용하고, B의 경우 관측된 최소값 5.0초를 사용하도록 한다.

2. 승하차시간 예측 모형

문헌조사를 통해 승하차시간에 영향을 줄 수 있는 다양한 요소들이 확인되었다. 보다 정확한 예측을 위해서는 이들 요소들을 가능한 모두 모형에 포함시키는 것이 바람직하지만, 예를 들어 열차 내 입석인원수 등의 정보는 실시간 관측이나 예측이 어렵기 때문에, 본 연구를 통해 개발될 예측모형은 실시간 관측이 가능하거나 또는 비교적 정확한 예측이 가능한 정보들만을 이용하도록 하였다.

먼저 예측의 목적은 각 출입문별 승하차시간 (ST)의 예측이며, 이를 위해 3가지 변수, 즉 출입문별 승차인원수(λ), 출입문별 하차인원수(μ), 그리고 차량별 승객중량(δ)이 사용되었다. 출입문별 승차인원수는 승강장 혼잡을 설명할 변수이고, 객차별 승객중량은 차량의 혼잡도를 설명해 주는 변수이다. 차량별 하차인원은 승객중량 정보와 함께 현장조사 결과의 분석을 통하여 예측하도록 한다.

이상 3가지 정보들은 독립변수로 두고 열차의 정차시간을 예측하는 회귀모형을 개발하였다. 종속변수는 각 출입문별로 조사된 승하차시간(ST)을 예측하도록 하였다. 승하차 시간은 첫 승객이 하차하는 시점부터 시작하여 마지막 승객이 승차할 때까지 걸리는 시간으로 정의하여 현장조사를 통해 측정하였다. 따라서 같은 열차 내에서도 승하차시간은 출입문별로 다양한 값을 가지게 되며, 열차의 중량은 역에서 승하차가 모두 이루어진 후에 측정되기 때문에 가산디지털단지역 바로 이전 역에서 조사된 승객중량을 모형식 개발에 사용되었음을 밝힌다. 따라서 철도역 승강장(j)에 도착하는 열차(n)의 승하차시간은 ST_n^j 라고 정의하면 승하차시간은 위에 언급된 3가지 독립변수에 의해 결정된다.

$$ST_n^j = f(\mu_n^j, \lambda_n^j, \delta_n^{j-1}) \tag{12}$$

- 여기서, ST_n^j : 철도역 j에 도착한 열차 n의 승하차시간
- μ_n^j : 열차 n이 철도역 j에 도착했을 때 하차하는 승객수
- λ_n^j : 열차 n이 철도역 j에 도착했을 때 승차하는 승객수
- δ_n^{j-1} : 열차 n이 철도역 j-1에서 승하차를 모두마친 후의 중량

문헌조사를 통해 밝혀진 것처럼 열차 내 입석인원은 승하차시간을 지연시킬 수 있는 중요한 요소로 인식되어 여러 모형식들에서 독립변수로 채택되었다. 하지만, 실시간 관측이나 예측이 어렵기 때문에 이와 높은 상관관계를 가지고 있는 열차 내 승객중량을 대체변수로 채택하였다. 즉 승객중량을 독립변수로 모형에 적용함으로써 열차 내 혼잡도에 의한 승하차시간의 영향을 간접적으로 모형식에 포함시킬 수 있다.

오후 침두시간 2시간 (오후 6~8시)동안 진행된 현장조사를 통해, 총 1,471개의 열차출입문에서 승객 승하

차인원과 승하차시간이 조사되었다. 이전에 발표된 연구들 중 Parkinson and Fisher(1996)는 출입문 사용을 승차위주 그리고 하차위주의 사용으로 구분한 다음 각기 다른 승하차시간 예측 모형을 개발하였다. 하지만, 가산디지털단지역의 경우 하차위주 (하차승객 66.7% 이상)의 특성이 단지 14개 샘플에서만 관측되었다는 점에서 다수의 모형식 개발보다는 단일 모형식 개발을 목표로 하였다.

회귀분석 모형 개발을 위해 승차인원과 하차인원이 승하차시간에 영향을 준다고 가정하였고, 또한 열차의 중량이 승차와 하차에 각각 추가적인 영향을 줄 수 있다는 가정하에 다음과 같은 기본 모형을 사용하였다.

$$ST_n^j = \beta_o + (\beta_1 \cdot \mu_n^j) + (\beta_2 \cdot \lambda_n^j) + (\beta_3 \cdot \mu_n^j \delta_n^{j-1}) + (\beta_4 \cdot \lambda_n^j \delta_n^{j-1}) \quad (13)$$

식(13)은 SPSS 프로그램을 통한 단계적 회귀분석(Stepwise Regression)을 시행하였다. 단계적 회귀분석은 잠재적 가능성이 있는 변수들을 순차적으로 하나씩 독립변수로 선택하거나 제거하여 가장 좋은 회귀모형을 선택하는 방법으로, 통계적으로 중요하지 않는 변수들을 식별하기 위한 좋은 방법들 중 하나로 뽑히고 있다. 이와 같은 이유로 단계적 회귀분석이 승하차 모형식 개발 방법으로 채택되었으며, 변수들의 포함 유무는 각 변수들의 유의확률에 의해서 구별되었다. 만약 어떤 변수의 유의확률이 0.050보다 작다면 통계적으로 의미가 있는 변수로 간주되어 모형식에 포함되었으며, 반면 유의확률이 0.100보다 크다면 통계적으로 무의미하다고 간주되어 모형식에서 제외되었다. 그 자세한 회귀분석 과정은 <Table 2>를 통해 자세히 볼 수 있다.

<Table 2> Results of Stepwise Regression

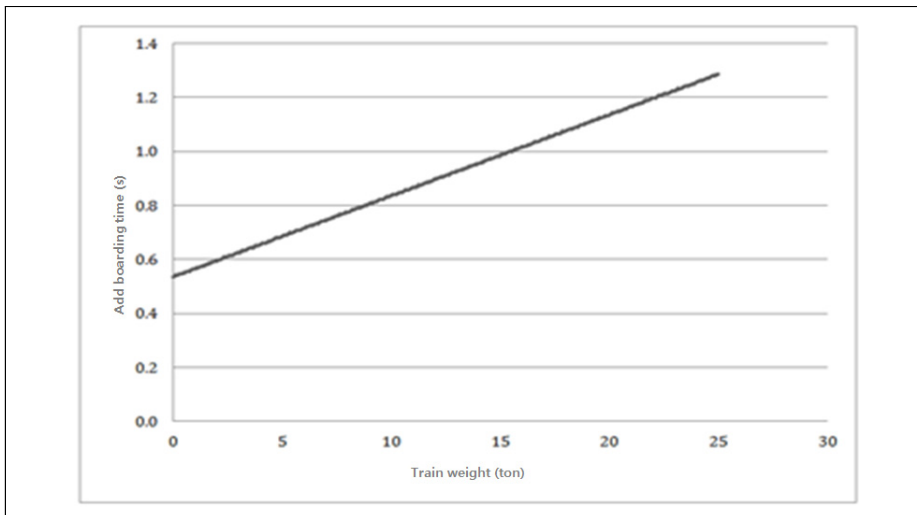
step by step ariable select/remove	model	$\overline{R^2}$	Sig.
λ_n^j add	$ST_n^j = 2.264 + 0.907\lambda_n^j$	.691	(Constant) : .000 λ_n^j : .000
$\mu_n^j \delta_n^{j-1}$ add	$ST_n^j = 2.335 + 0.747\lambda_n^j + 0.069\mu_n^j \delta_n^{j-1}$	.790	(Constant) : .000 λ_n^j : .000 $\mu_n^j \delta_n^{j-1}$: .000
$\lambda_n^j \delta_n^{j-1}$ add	$ST_n^j = 2.716 + 0.633\lambda_n^j + 0.049\mu_n^j \delta_n^{j-1} + 0.017\lambda_n^j \delta_n^{j-1}$	.799	(Constant) : .000 λ_n^j : .000 $\mu_n^j \delta_n^{j-1}$: .000 $\lambda_n^j \delta_n^{j-1}$: .000
μ_n^j add	$ST_n^j = 2.478 + 0.625\mu_n^j + 0.527\lambda_n^j - 0.011\mu_n^j \delta_n^{j-1} + 0.029\lambda_n^j \delta_n^{j-1}$	.809	(Constant) : .000 μ_n^j : .000 λ_n^j : .000 $\mu_n^j \delta_n^{j-1}$: .161 $\lambda_n^j \delta_n^{j-1}$: .000
$\mu_n^j \delta_n^{j-1}$ add	$ST_n^j = 2.493 + 0.536\mu_n^j + 0.545\lambda_n^j + 0.027\lambda_n^j \delta_n^{j-1}$	.809	(Constant) : .000 μ_n^j : .000 λ_n^j : .000 $\lambda_n^j \delta_n^{j-1}$: .000

분석 결과 다음과 같은 모형식이 개발되었으며, 수정된 결정계수($\overline{R^2}$)가 0.809로써 모형식의 높은 적합도가 반영되었음을 알 수 있다.

$$ST_n^j = 2.493 + 0.536\mu_n^j + 0.545\lambda_n^j + 0.03\lambda_n^j \delta_n^{j-1} \quad (\overline{R^2} = 0.809) \quad (14)$$

열차의 정차시간 모형식에 따르면 승객들이 하차과정에는 열차 내 중량이 통계적 측면에서 볼 때 크게 영향을 주지 않기 때문에 단계적 회귀분석 중 독립변수에서 제외되었다($\mu_n^j \delta_n^{j-1}$ 의 유의확률=0.161). 반면 승차과정에서의 열차 내 중량은 승차시간의 중요한 영향을 준다는 통계적 결과가 관측되어 모형식에 독립변수로 포함되었으며, 그 정해진 계수로부터 열차중량에 따라 추가되는 승차시간 여부는 <Fig. 3>를 통해 나타내어진다. 결론적으로 서울도시철도 7호선 가산디지털단지역의 경우 출퇴근 시간동안 극심한 혼잡과 더불어 잦은 열차의 정차지체가 발생하며, 운행하는 열차들의 종류와 길이가 같기 때문에 더 이상의 독립변수들 (예를 들어, 열차의 길이, 열차 출입문 폭 등) 없이 비교적 정확한 예측이 가능한 모형이 개발되었다. 개발된 회귀분석 모형의 통계분석 결과는 <Table 3>에 정리되었다. 가산디지털단지역은 평균 승하차시간이 13.2초, 출입문 1개소 기준 평균 하차 승객수가 3인, 승차 승객수가 12인에 해당한다.

모형의 설명력은 수정 설명력(\bar{R}^2)이 0.809로 충분한 통계적 적합도를 보이고 있으며, 설명변수들에 대한 t-통계량은 99.5%의 신뢰수준에서 통계적 유의성이 확보되었다.



<Fig. 3> The relationship between added boarding time and train weight variable

<Table 3> Regression statistical analysis for the train dwell time model

Number of Observations	1471			
R^2	0.809			
\bar{R}^2	0.809			
Sum of Squared Residuals	14947.459			
Standard Error of Regression	3.192			
		DT_n^j	μ_n^j	λ_n^j
		Mean	13.2039	3.1516
		Standard Deviation	7.3032	3.1271
		Minimum	0.0	0.0
		Maximum	38.0	21.0
		Skewness	.575	1.672
				$\lambda_n^j \delta_n^{j-1}$
				Mean
				Standard Deviation
				Minimum
				Maximum
				Skewness

Dependent Variable DT_n^j			
Independent Variable	Estimated Coefficient	Standard Error	t-Statistic
(Constant)	2.493	0.179	13.895
	0.536	0.032	16.979
	0.545	0.019	29.077
	0.027	0.002	16.982

IV. 결 론

우리나라 도시철도는 대도시들을 중심으로 한해에 무려 약 25억 명을 수송하고 있다. 도시철도가 이처럼 대중들에게 중요한 교통수단이 되었지만, 출퇴근시간의 과수요로 인해 발생하는 도시철도의 혼잡율은 125~250%까지 도달하고 있다. 계획된 열차의 정차시간이 증가하여 열차의 운전시격을 늘리게 되어, 결과적으로 전체적인 철도시스템의 서비스 용량이 줄어드는 현상이 발생하고 있다. 이러한 서비스 용량 감소 현상은 첨두시간대 열차와 승강장의 혼잡이 발생하는 원인으로 지적된다. 열차운행계획의 정시성은 각 승강장에서 정해진 열차의 정차시간(dwell time) 준수 여부에 따라 의존된다. 따라서 열차의 정차시간이 정해진 값보다 길어지게 되면 열차 서비스 빈도가 감소하여 차내 혼잡과 승강장 혼잡이 발생하게 된다.

본 연구는 실시간 기반 열차의 정차시간을 예측하는 모형을 제시하였다. 열차의 정차시간은 열차운행계획 수립 관점에서 기존 연구들이 중요하게 다루어 왔다. 반면 본 연구에서는 각각의 승강장에서 열차의 정차시간을 준수하고 정해진 서비스 빈도를 달성하기 위해 승강장 혼잡과 도시철도의 혼잡을 반드시 관리해야만 한다. 이를 위해 승차와 하차 수요에 따라 달라져야 하는 열차의 정차시간은 실시간으로 예측되어야만 한다. 특히 도시철도의 혼잡과 승강장 혼잡은 반드시 하차해야 하는 승객보다 승차 승객의 수요를 관리해야 한다. 이러한 관리 기법은 고속도로 본선 교통량의 일정 수준 이상의 속도 서비스를 유지하기 위해 고속도로로 유입하는 램프 교통량 수요를 조절하는 방법과 동일한 개념인 램프 미터링(Ramp metering)에 해당한다.

본 연구는 대도시 도시철도의 혼잡을 관리하는 AFC(Automatic Fare Collection)를 이용한 미터링 전략을 수립하는데 필수적 요소에 해당하는 실시간 기반 열차의 정차시간 예측모형을 개발하였다. 본 정차시간 모형은 7호선 가산디지털단지역에서 현장조사를 통해 수집된 승객들의 승하차 자료와 승하차시간을 이용하여 회귀분석 기법을 이용하여 개발하였다. 모형의 특징으로 실시간 수집 가능한 승하인원, 하차인원, 그리고 열차의 중량 등 3가지 독립변수만을 이용하였다. 회귀모형의 설명력이 대체적으로 충분한 통계적 값을 보여주었다($R^2=0.809$). 또한, 열차의 정차시간을 설명하는 변수들은 각각 99%의 신뢰수준에서 통계적 설명력이 있다는 것을 t-통계량으로 증명하였다. 따라서 본 열차의 정차시간 모형은 실시간 자료에 기반하여 도시철도 승강장의 열차 정차시간 예측이 가능하게 되었다. 예측한 정차시간이 사전에 계획한 정차시간보다 길어지는 경우 특정 승강장에서 승차하는 승객 수를 조정(metering)하는 전략 수립에 활용이 가능하게 되었다.

본 열차의 정차시간 예측모형의 정확도는 통계적 평가를 통하여 입증되었으나, 입력변수에 해당하는 하차인원과 열차의 중량은 예측을 통해 결정해야 하므로 예측의 정확성이 모형의 전체적인 신뢰도에 영향을 미치게 된다. 또한 본 연구에서는 현장조사일 하루 동안의 열차중량 자료와 같은 날 가산디지털단지역의 오후 첨두시간 하차승객 자료를 분석하여 평균값을 모형에 입력변수로 사용하였다. 하지만 실제 AFC 미터링 전략의 적용을 위해서는 보다 정확한 변수들의 입력을 위해 요일별 그리고 시간대별 등의 다양한 이력자료와 함께 스마트카드 자료 등 실시간 자료를 활용하여 더욱 정확한 승하차시간 예측이 가능할 것이며 이는 추후 연구를 통해 이루어져야 한다.

마지막으로, 본 연구를 통해 승객들의 승차 시 계단 및 에스컬레이터의 위치에 따라 승차승객들이 집중되는 현상이 증명되었다. 정차지체를 예방하기 위해 가장 이상적인 상황은 열차 내 승객들의 숫자와, 하차인원의 숫자, 그리고 승차인원의 숫자가 열차별로 고르게 분포되어 모든 출입문에서 승하차시간이 거의 균일한 특성을 갖는 것이다. 이는 다른 의미에서 열차의 용량을 최대로 효율적으로 사용하는 것이며, 결과적으로 정차시간지체의 감소와 함께 전체 열차 시스템의 효율성을 크게 높일 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 향후 연구를 통해 승강장으로 진입하는 승객들을 적절한 출입문으로 안내할 수 있는 기술에 관한 연구가 필수적이라고 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 철도기술연구사업 “RPSD(로프 상하 스크린도어) 국제표준인증 및 상용화기술개발” 과제번호 16RTRP-B068537-04) 지원으로 수행하였습니다.

REFERENCES

- Daniel J. R. and Rotter N. G.(2009), *Customer Behaviour Relative to Gap Between Platform and Train*, New Jersey Institute of Technology.
- Hansen I. A. et al.(2010), “Online Train Delay Recognition and Running Time Prediction,” *13th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp.1783-1788.
- Harris N. G.(2006), “Train boarding and alighting rates at high passenger loads,” *Journal of advanced Transportation*, vol. 40, no. 3, pp.249-263.
- Jong J. and Chang S.(2005), “Algorithms for generating train speed profiles,” *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 6, pp.356-371.
- Kecman P. and Goverde R.(2013), “An online railway traffic prediction model,” *Proceedings of the 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*, Copenhagen.
- Lam W. H. et al.(1998), “A study of train dwelling time at the Hong Kong mass transit railway system,” *Journal of advanced Transportation*, vol. 32, pp.285-295.
- Li D., Goverde R. et al.(2014), “Train Dwell Time Distributions at Short Stop Stations,” *Proceedings of 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, October 8-11, Qingdao, China.
- Lin T.-M. and Wilson N. H. M.(1992), Dwell Time Relationships for Light Rail Systems, *Transportation Research Record*, pp.287-295.
- Oh S. -M.(2005), “An Analysis of the Passenger Flow Time in the Congested Subway Stations,” *Conference of the Korean Society for Railway*, pp.42-49.
- Parkinson T. and Fisher I.(1996), *TCRP Report 13: Rail Transit Capacity*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- Puong A.(2000), *Dwell time model and analysis for the MBTA red lin*, Massachusetts Institute of Technology Research Memo.
- Shon(2013), “Optimizing Train-Stop Positions Along a Platform to Distribute the Passenger Load More Evenly Across Individual Cars,” *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, vol. 14, no. 2. pp.994-1002.
- Washington Metropolitan Area Transit Authority(2005), *Passenger Flow and Train Dwell Time*.
- Weston J. G.(1989), *Train service model - technical guide. London Underground operational research note*, 89/18.
- Wiggenraad P.(2001), *Alighting and boarding times of passengers at Dutch railway stations*, TRAIL Research School, Delft.
- Wirasinghe S C. and Szplett D.(1984), “An Investigation of Passenger Interchange and Train Standing Time at LRT Stations,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 18, no. 1, pp.13-24.