

고밀도 도시철도 운행품질 개선 방안 연구

김 동 희*

*한국철도기술연구원 교통물류연구실

On the Service Improvement of High-Density Urban Railway Transportation

Dong-Hee Kim*

*Transportation & Logistics Research Lab, Korea Railroad Research Institute

Abstract

Recently, there are many problems of service qualities such as regular-rapid-safe-comfortable transport, that was traditionally advantages in urban railway transportations. These problems cause train delays that affects consecutive schedule, capacity, operation plans, and it is hard to prevent the propagation of delay and find the recovery solution. Because the urban transport demands is continuously increased and the railway service is also expanded, the railway operation company makes efforts to improve operation performance and efficiency for passengers.

In this paper, we analyse the issues and problems existing in the major operation line of high-density urban railways, and suggest the development direction of intelligent operation technology to improve the urban railway service by minimizing the occurrence and propagation of delay. And the result of numerical case study is also presented.

Keywords : Urban Railway, Service Improvement, delay propagation,

1. 서 론

최근 대도시권 광역도시철도의 수요급증 및 공급용량 부족으로 철도의 전통적 장점이었던 정시성/신속성/안전성/쾌적성에 심각한 문제가 지속적으로 발생되고 있다. 특히 대도시 광역도시철도 주요 운행구간에서는 출퇴근시간대 객실 및 플랫폼의 혼잡도가 극심하고 열차가 상습적으로 지연됨에 따라 이용승객의 불만이 증가하고 있으며, 이러한 현상은 혼잡으로 인한 이용객의 불편만 야기하는 것이 아니라 정차시분 증대로 인한 지연운행을 야기하게 된다. 이는 후속열차들로 지연이 파급/확산되고 운행시각 비정형화로 이어져 특정열차의 정차지연이 확산되는 악순환이 발생되고 있는 실정이다. 이와 같이 열차지연은 열차운행스케줄, 선로용량,

차량운용계획, 선로형태, 시종착역에서의 입환, 여객수요 및 승객의 시공간적 분포 등 철도자원 및 운영규정 전체의 영향을 받을 뿐만 아니라 지연 자체가 원인이 되어 확산되는 특이한 특성으로 수요가 밀집되는 경우 지연확산 방지 및 회복방안의 수립이 쉽지 않다.

앞으로 경전철을 포함한 도시형철도는 확산되고 있는 추세이며, 도심권 궤도교통 수요는 더욱 증가될 것으로 예상되고 있다. 따라서 최근 도시철도 운영기관들은 과거 공급자 중심의 투자 및 운영 관행에서 벗어나 최근에는 고객(승객)지향형 고품질/고효율 궤도교통 서비스운행을 위해 노력하고 있다.

본 논문에서는 기존 고밀도 도시철도 주요 운행구간에서 발생되고 있는 상습지연 발생 및 확산 관리를 위해 필수적인 서비스품질지표를 제시하고 정차시분 및

† 본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업 연구비지원으로 수행되었음.

† 교신저자: 김동희, 경기도 의왕시 월암동 360-1 한국철도연구기술원 철도교통물류연구실

M · P: 010-6325-6255, E-mail: kdh777@krii.re.kr

2010년 6월 15일 접수; 2010년 8월 17일 수정본 접수; 2010년 8월 23일 게재확정

혼잡도 개선방안에 따른 서비스품질 실증분석 사례를 제시한다.

2. 연구 동향

최근 철도선진국들에서는 기존 하드웨어 중심 기술개발 투자의 한계를 인정하고 이를 극복하기 위하여 제한된 자원 하에서 운영효율성 향상을 위한 기술개발에 투자를 늘리고 있다. 특히 도시철도 운영에서는 기존 운영자 관점의 기술개발에서 이용승객 관점에서의 효율화 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 장에서는 정차시간 및 혼잡도, 열차자연 관련 대표적 연구사례와 시사점을 제시한다.

오석문(2005)은 서울시 혼잡 지하철역에서의 승하차 시간을 실측하여 혼잡형태별 승하차 시간 영향분석을 수행하였다. 이를 통해 승하차시간에 대한 분석이 노선의 신설 및 개량 사업의 경제적 타당성 조사에 미치는 영향을 제시하였다[3].

김동희(2009)는 고밀도 도시철도 주요구간의 실패 데이터를 이용하여 승객수요가 정차시분에 미치는 영향을 모델링하고 적정정차소요시분을 추정하였다[1].

김동희(2002)는 철도운행스케줄의 실제환경에서 운영 상황과 외란 파급영향을 분석할 수 있는 시뮬레이터를 사례분석과 함께 제시하였다[2].

Michael Peard(2007)는 혼잡시간에 승객 승하차시간이 열차 운행효율 및 정차시간에 미치는 영향과 후속 일정에 파급확산되는 Snowball Effect 현상을 분석하였으며, 플랫폼에서의 승객행동분석, 대기선 표시, 스크린도어 등의 효과 및 열차내의 출입문위치, 좌석패턴에 따른 승하차 시간에 대한 분석을 실시하였다[4].

Harris(2007)은 전세계 지하철 조사를 통해 실제 정차 시간과 제안 추정식으로 계산된 정차시간을 비교하여 추정식이 유의함을 제시하였다. 모수값의 큰 변화 없이 일반적으로 적용이 가능함을 보여주고, 열차의 특징에 따라 High-Frequency, Low-Frequency, Suburban을 구분하여 분석하였다[5].

Andre Puong(2004)은 MBTA Red Line을 사례로 승하차 승객수 및 혼잡도가 도어 개폐시간에 미치는 영향을 분석하였다. MBTA Red Line의 데이터를 수집하여 열차 도어 개폐시간의 수식을 산정하고 파라미터를 계산하였으며, 승하차 시간과 입석승객의 관계를 통하여 적정 입석승객수를 산정하였다[6].

Zhang Qi(2008)은 베이징 지하철역 승객들이 승하차하는 행동모형을 개발하고 역 설계 및 승객유도분석에 활용하였다[7].

Washington Metropolitan Area Transit Authority(2005)에서는 승객유동성 및 정차시간을 향상시키기 위하여 플랫폼에서의 여객분산방법, 승하차시간 단축, 차내 행동유도 등의 방안을 제시하였다[8].

William(1999)은 홍콩 경전철을 대상으로 역내 플랫폼에서의 승객서비스 및 차량 내에서의 혼잡도를 평가하는 기준을 산정하고 시간대별 승객 서비스를 분석하였다. 이를 통해 혼잡도가 전체 통행시간에 미치는 영향 및 혼잡을 고려한 열차정차시간모형 등을 제시하였다[9].

이들 연구동향으로부터 우리는 2000년 이후 각국에서는 도시철도 승객서비스 개선 및 효율성 향상을 위하여 승객관점의 분석 및 실증연구에 많은 관심을 가지고 있으며, 단순 승객 편의향상만이 아니라 전체 열차운영계획의 효율화를 동시에 목표로 하고 있음을 알 수 있다. 국내의 경우 이러한 승객관점에서의 서비스개선 및 운영효율성 향상 관련 연구는 미미한 실정이다.

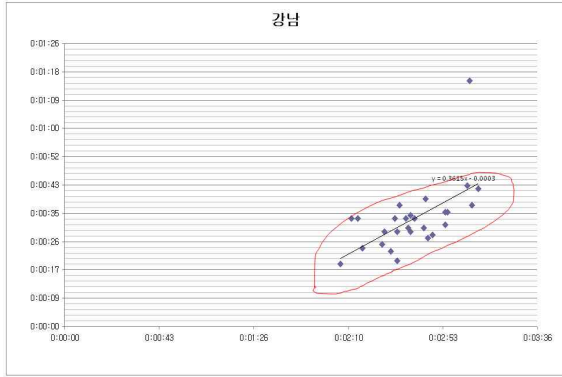
3. 고밀도 도시철도 운행특성과 이슈

국내 최대 도시철도운영기관인 서울메트로는 4개 노선을 운행하고 있으며, 총 영업거리는 134.9km, 115개역을 서비스하고 있다.

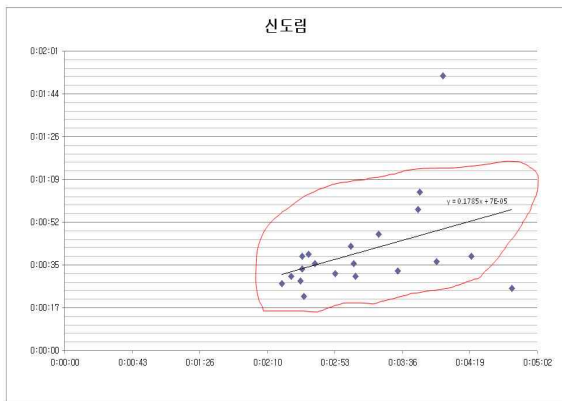
노선운행열차수는 1,861개, 일 총운행거리는 65,446km에 달한다. 일 평균 3,912명, 년 평균 1,427,728명을 수송하며, 2호선에서만 4개 노선 전체의 48% 승객을 수송하고 있다. 2호선 5개 주요 혼잡역에서의 평균정차

[표 1] 주요구간 계획대비 평균지연시분

계획대비 지연시분	외선	2.5(월)	1.30(화)	1.31(수)	2.1(목)	2.2(금)	평균
	신도림(A)	0:00:49	0:03:15	0:01:58	0:04:35	0:00:14	0:02:10
	신림(B)	0:03:00	0:07:36	0:03:51	0:04:47	0:01:52	0:04:13
	서울대(C)	0:03:51	0:10:29	0:04:12	0:05:16	0:02:38	0:05:17
	사당(D)	0:05:09	0:12:21	0:05:10	0:05:33	0:04:16	0:06:30
	교대(E)	0:06:10	0:13:08	0:06:12	0:06:04	0:05:14	0:07:22
	삼성(F)	0:07:15	0:13:41	0:07:34	0:06:26	0:06:31	0:08:17
	잠실(G)	0:06:52	0:13:13	0:07:20	0:05:55	0:06:00	0:07:52
	구간지연(F-A)	0:06:26	0:10:26	0:05:36	0:01:51	0:06:17	0:06:07



<그림 1> 강남역의 시각-정차시분 관계



<그림 2> 신도림역의 시각-정차시분 관계

시분은 외선 55초, 내선 40초를 보이고 있으며, 07년 실운영실적으로부터 산정된 주요역에서의 지연시분을 살펴보면 [표 1]과 같다. 실제 오전 피크시간대에 4대 연속열차에 대하여 시정-시정 1순환 소요시분을 탑승 측정해 본 결과 계획 표정시분 대비 1순환의 경우(계획 87분) 약 14분 가량 지연운영되는 경우도 발생되었다.

통상 도시철도에서는 평행다이아 방식으로 열차계획이 수립되나, 혼잡시간대, 혼잡역에서의 정차시간 증대는 해당 열차의 후속역에서의 지연 뿐만 아니라 후행 열차들에도 연쇄적으로 그 지연이 과급되어 전체 운행의 지연으로 확산되는 특성을 가지고 있다. 또한 탑승수요가 폭발적인 주요 혼잡역에서는 선행열차와의 시격에 따라 탑승수요가 누적될 것이고 따라서 후행열차의 수요는 그 만큼 증가되어 후행열차의 정차지연을 증대시키는 결과를 초래하게 된다.

<그림 1, 2>에서는 2호선 외선구간의 대표적 혼잡역인 신도림, 강남역에서 시격과 정차시분의 관계를 보여주고 있다. 선행시격과 정차시분은 이례사건을 제외하고는 비례한다고 볼 수 있다. 따라서 메트로 도시형 철도에서는 이례적 정차지연 발생자체를 최소화하고 발생된 지연의 과급확산을 최소화하는 것이 매우 중요한 문제이다.

이를 위해서는 인프라, 차량 등의 성능을 대폭적으로 개선하는 방법과 주어진 인프라 조건하에서 합리적 운행계획의 수립 및 실시간 최적의 운행제어를 통한 효율성 증대 방법이 있을 것이다. 최근 해외 철도선진국에서는 투자 대비 효과가 뛰어난 운영효율성 향상 분야의 기술개발 투자를 늘리고 있는 추세이다.

4. 운행서비스 품질 및 개선방안

4.1 도시철도 운행서비스 품질지표

운행계획(schedule) 혹은 다이아(dia)는 이용승객에 대한 약속이자 운영기관 내부의 승무원운영, 차량운영 및 유지보수 계획과 연계되어 신뢰성이 확보되어야 하는 특성을 가지고 있다. 따라서 고밀도 도시철도 운영기관에서는 계획다이아의 현실성 및 신뢰성을 높이기 위해 노력을 기울이고 있다. 그러나 실시간 운행상황에서 발생하는 수요폭증과 이례사건(지연 등)에 따른 영향으로 계획과 실운영과의 괴리로 문제해결이 쉽지 않다.

통상적인 도시철도운영기관에서는 실제 운행의 품질을 측정하고 개선하기 위하여 관리지표를 설정·분석하고 있으며, 이들 지표는 크게 운영자관점의 지표과 이용자관점의 지표로 나누어 볼 수 있다. 그러나 국내 도시철도운영기관에서는 운영자지표는 관리하고 있으나, 이용자지표는 측정/관리하지 못하고 있는 실정이다.

도시철도 운영기관에서는 현재 활용 중인 운영자관점 지표 외에 이용자관점의 지표를 포함하여 [표 2]에서와 같은 운행서비스 품질지표를 측정/관리하여야 한다. 여러 방법이 가능하겠으나 간단한 방법으로서 대기 불편(Wait Discomfort)은 탑승 전까지 열차를 대기하는 시간으로, 이동불편(Travel Discomfort)은 탑승 후 목적지까지 소요된 시간으로, 혼잡불편(Congestion Discomfort)은 열차를 대기하는 동안의 승차장혼잡도와 탑승후 목적지까지 이동하는 동안의 차내혼잡도의 가중합으로 표현할 수가 있다.

운영자지표는 차량 혹은 열차관점에서의 주요구간 소요시분 및 지연시분을 계획대비 관리하는 것으로 현재 운영기관에서도 관리하고 있는 지표이다.

그러나 이용자지표는 열차의 운행과 승객의 수요를 동시에 고려해야 하는 지표로서 현재 운영기관에서도 관리하지 못하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 실제 운행계획 대비 개선 시나리오에 대하여 이들 운영자 및 이용자지표가 어떻게 추정관리될 수 있는지 실증분석을 통하여 제시하고자 한다.

[표 2] 도시철도 운행서비스 품질지표

운영자지표	이용승객수요와 상관없는 차량운영 품질
<ul style="list-style-type: none"> · 순환 소요시분 및 지연시분 · 주요역간 소요시분 및 지연시분 	
이용자지표	이용승객 관점에서 느낄수 있는 서비스품질
<ul style="list-style-type: none"> · Passenger Wait Discomfort : ex) 승객 총 열차대기시간 = $\sum(\text{역/시간대별 열차간시격} \times \text{탑승수요})$ · Passenger Travel Discomfort : ex) 승객 총 이동소요시간 = $\sum(\text{OD소요시분} \times \text{OD승객수요})$ · Congestion Discomfort : ex) 승객 총 혼잡불편도 = $A\sum(\text{열차간시격} \times \text{대기승객수요} \times \text{플랫폼혼잡도}) + (1-A)\sum\text{구간별}(\text{소요시분} \times \text{승객수요} \times \text{차내혼잡도})$ 	

* OD : origin-destination 약어 , A : 플랫폼과 차내 혼잡도를 1로 보았을 때 플랫폼의 중요도 가중치

4.2 운행시나리오 품질지표 분석

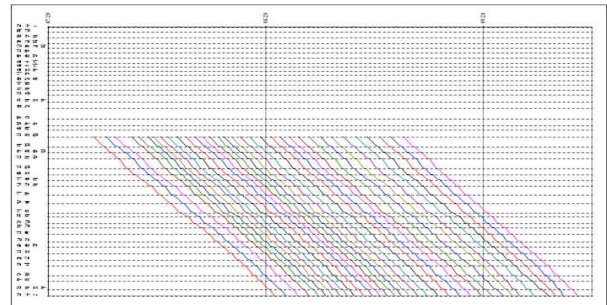
실제 운행데이터는 2호선에서 가장 혼잡한 외선 신도림-성수 구간 오전 출근시간대를 대상으로 하였다. 도시철도 운행계획시 30초 고정정차를 가정한 평행다이어를 사용하고 있지만, 실제상황에서의 운행품질을 추정하기 위해서는 승객의 집중현상으로 인한 실제정차시분과 지연발생 및 확산현상, 선행열차의 지연이 후행열차에 미치는 영향을 고려하여야 한다. 또한 실제 운행상황에서 선행열차의 발생지연이 후속열차에 과급확산되는 영향을 고려해야 한다. 이들 분석을 위해서 승객수요와 선행열차와의 시격을 고려한 역/시간대별 최소소요 정차시분 추정모델을 제시한 선행연구[1]와 운행중 발생하는 이례사건들이 다중열차운행에 미치는 영향분석 도구를 제시한 선행연구[2]를 활용하였다.

도시철도의 효율적 운행관리를 위해서는 우선 개별 열차의 승객수요로 인한 정차지연 발생자체를 최소화 해야 하며, 일단 발생된 지연이 전체열차운행에 미치는 과급확산을 최소화 해야만 한다. 정차지연발생은 승차수요가 10량 40개 도어에 미치는 부하를 최대한 분산(혼잡평준화)시킴으로서 최소화할 수 있으며, 일단 발생된 지연의 과급확산은 운행간격제어로서 그 영향을 최소화할 수 있다. 본 논문에서는 이 두 가지 방안에 대하여 제시된 운행품질지표인 운영자지표(지연시분)와 이용자지표(대기시간)의 변화를 살펴보고자 한다.

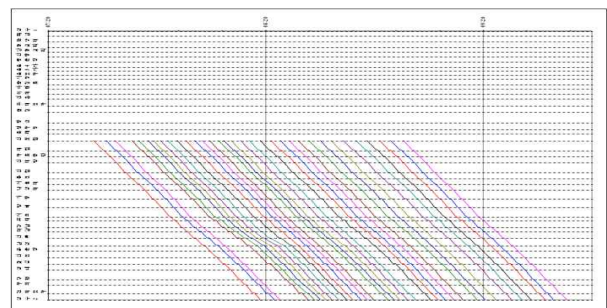
4.2.1 혼잡평준화 분석

실증실험에서는 오전 혼잡시간대의 2호 노선 외선구간을 운행하는 33대의 열차를 대상으로 하였으며, 선행연구[1]에서 사용한 혼잡평준화 변화에 따른 지연발생 및 과급확산 현상을 분석하였다. 분석대상의 운행계획은 <그림 3>이고, 혼잡평준화가 2배, 완전평준화일 때 각각 <그림

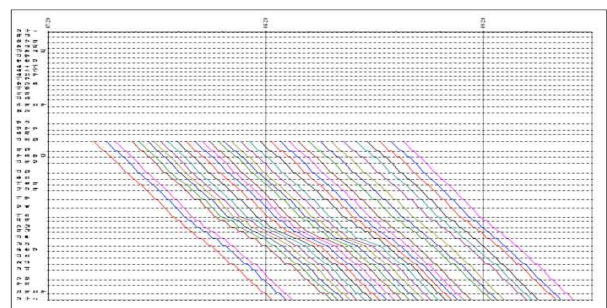
4, 5>와 같다. 실험의 운행품질지표 중 주요역간 지연시분 및 열차대기시간을 살펴보면 각각 <그림 6, 7>과 같다.



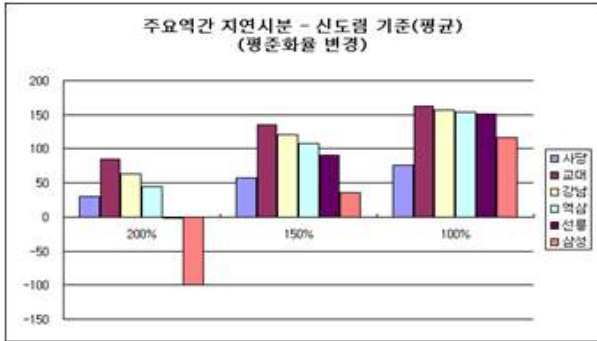
<그림 3> 기준 운행계획



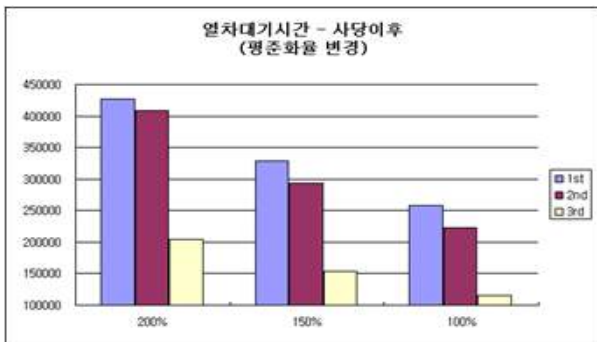
<그림 4> 완전평준화 결과



<그림 5> 혼잡평준화 2배 결과



<그림 6> 주요역간 지연시분



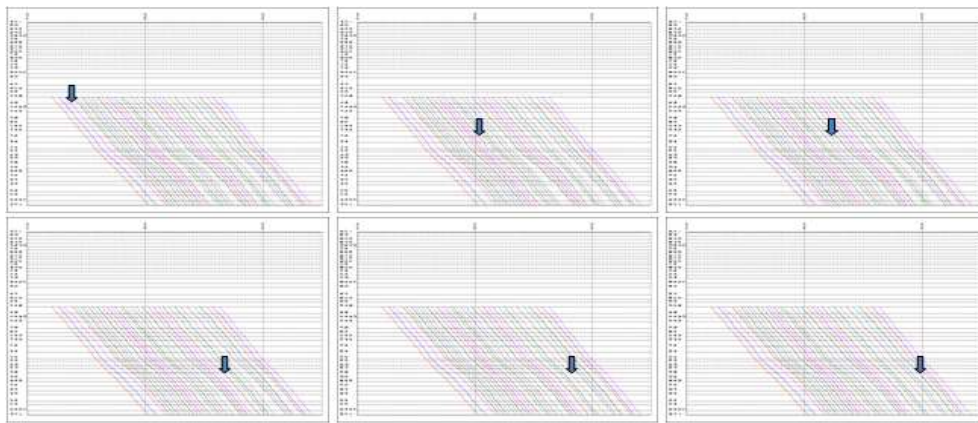
<그림 7> 열차대기시간

실험결과를 보면 운영자지표 및 이용자지표 모두 혼잡도분산 정도에 따라 유의한 개선효과를 보이고 있다. 따라서 혼잡평준화관리를 통한 운행개선은 정차시간 최소화관리를 위해 반드시 해결해야 할 대상으로 볼 수 있다.

4.2.2 운행간격제어 분석

운행도중 정상적 혹은 이례적으로 발생된 지연은 선형열차와의 시격을 커지게 하고 이는 후속일정에 누적되어 지연이 점점 커지는 영향을 미치게 된다. 또한 후속열차들의 지연으로 과급이 확산되는 현상을 야기하게 된다. 따라서 선행 열차간 운행시격을 모니터링하여 간격을 제어하는 운행관제를 시행하게 된다. 지연발생 및 과급이 예측될 때 운행관제를 순차적으로 시행하여 지연의 과급확산을 최소화하는 것이다. 본 논문에서는 그림 4의 결과를 기반으로 임의의 6군데 열차시격을 제어하는 것을 실험하였다<그림 8> 참조.

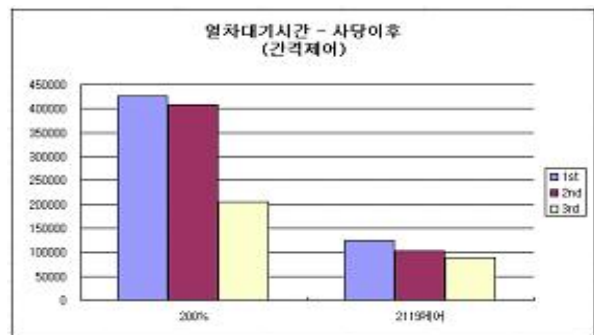
실험 결과를 보면 운영자지표 및 이용자지표 모두 유의한 개선효과를 보이고 있으나, 운영자지표는 일부 구간을 제외하고는 시각적 효과가 조금 나타나는 반면 [<그림 9> 참조] 이용자지표는 확연한 효과를 보이고 있다 [<그림 10> 참조].



<그림 8> 열차간격제어 결과



<그림 9> 간격제어 지연시분



<그림 10> 간격제어 대기시간

5. 결 론

본 논문에서는 향후 이용자중심의 도시철도 운행 개선을 위해 필수적인 운영자 및 이용자관점에서의 서비스 품질지표를 제시하고, 승하차수요의 혼잡평준화 정도에 따른 서비스품질 분석과 운행간격제어에 따른 서비스품질 분석결과를 제시하였다. 수요 및 선행시각에 따른 동적 소요정차시분에 따라 지연 발생뿐만 아니라 지연이 확산되는 결과를 확인하였으며, 혼잡평준화 관리정도에 따라 지연발생 자체를 최소화 가능성을 보였다. 이 경우 운영자 및 이용자 관점의 품질지표 모두 매우 유의한 개선을 보였으며, 승객부하를 완전평준화 하더라도 특정열차/시간대에는 수요에 의한 지연발생/확산 현상이 나타남을 알 수 있었다. 6군데 적정 열차 간격제어 결과에서는 지연발생 및 확산이 최소화 가능하며, 특히 사당역 이후 구간의 이용자품질지표 개선이 눈에 띄게 확인하였다. 지연발생을 최소화해도 어쩔 수 없는 지연은 발생되며, 발생한 지연의 확산을 최소화하기 위해서는 수요를 고려한 최적의 간격제어체계가 필요함을 시사하였다.

본 논문에서는 이용자품질지표 중 승객열차대기시간만을 분석하였다. 이외 이용자지표들은 시간대/역별/OD 별 상세승객수요데이터가 존재해야만 분석가능한 지표이며, 이는 별도의 연구주제로 다루어져야 할 내용이다. 추후 연구로는 상세승객수요데이터를 고려한 이용자품질지표의 분석이 필요할 것이다.

6. 참 고 문 헌

- [1] 김동희, “도시철도 적정 최소소요 정차시분 추정모델”, 한국철도학회지, 제12권 6호, 2009
- [2] 김동희, 이원순, 홍순흠, “열차스케줄 평가를 위한 다중열차주행 시뮬레이션”, 한국철도기술, 통권 33호, 2002
- [3] 오석문, 김형진, 서울시 혼잡 지하철역의 승하차 시간 분석, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, 2005
- [4] Michael Pead, The Impact of Boarding and Alighting Passengers on the Dwell Time at Railway Stations, Aston University Online Document, www.michaelpead.co.uk/writing, 2007
- [5] NG Harris. and R J Anderson, An international comparison of urban rail boarding and alighting rates, Proc. IMechE Vol. 221 Part F: J. Rail and Rapid Transit, 2007
- [6] Andre Puong, Dwell Time Model and Analysis for the MBTA Red Line, UC Berkeley Center for Future Urban Transport, MIT's Open Course Ware project, Assignments for 1.258. Last accessed October, http://ocw.mit.edu, 2004
- [7] Zhang Qi, Han Baoming, Li Dewei, Modeling and simulation of passenger alighting and boarding movement in Beijing metro stations, transportation research, part C 16, 2008
- [8] Washington Metropolitan Area Transit Authority, Passenger Flow and Train Dwell Time, http://www.wmata.com, 2005
- [9] William HK Lam*, Chung-Yu Cheung, C.F. Lam(1999), A study of crowding effects at the Hong Kong light rail transit stations, transportation research, part A 33, 1999

저 자 소개

김 동 회



인하대학교에서 학사, 석사, 박사 학위를 취득하였다. 관심분야는 철도운영최적화 및 시뮬레이션, DSS, 물류시스템 등이며, 현재는 한국철도기술연구원 철도교통물류연구실에 재직 중이다.

주소: 경기도 의왕시 월암동 360-1 한국철도연구기술원 철도교통물류연구실