

서울지하철 2호선 열차 지연 및 혼잡 해소방안 연구

조성근* · 정일봉**

A Study on the Solution of Train Delay and Congestion on Seoul Subway Line 2

Seong Kun Cho* · Il Bong Chung**

요약 : 열차운행 스케줄의 정시성 보장과 차내 혼잡도를 적정수준으로 하는 것은 수송서비스의 중요한 품질요소들이다. 서울지하철 2호선은 도시의 강남·북을 연결, 순환하여 운행하는 구조이며, 48.8km의 영업거리에 43개 역이 있고 그중 20개 역에서는 타 노선과의 환승이 이루어진다. 1일 수송인원은 200만 명을 넘어서고, 특히 출근시간대에는 차내 혼잡도가 200%를 상회하여 상시 지연이 이루어지고 있는 노선이다. 본 논문에서는 2호선의 만성적 지연을 해소하고 차내 혼잡도를 완화하기 위하여 몇 가지 시험을 실시하였다. 주요 시험 방법은 2호선 혼잡구간 및 시간대에 성능이 우수한 ATO(Automatic Train Operation) 열차를 연속배차하고, 혼잡역에는 승객의 신속한 승·하차를 돕기 위한 질서도우미(커트맨)를 배치하여 효과를 측정하였다. 시험결과는 상당부분 긍정적으로 나타났으며, 그 결과를 본 논문에 제시하였다.

주제어 : 지연운행, 혼잡도, 정차시간, ATO열차, 커트맨

ABSTRACT : The accuracy of train schedule and the adequate level of train congestion are important quality factors determining the metro services. Seoul Subway Line 2 is a circular line connecting the north and south of the city. The distance of the line is 48.8km with 43 stations, of which 20 stations are transfer stations connecting to other lines. As over 2 million passengers use the line every day, the line has experienced chronic delay. In particular, for some sections, the degree of crowdedness is over 200%. This paper carries out some simulations in order to identify strategies for relieving the chronic delay and reducing the congestion in the train. For the simulations, Automatic Train Operation(ATO) trains were deployed in congested sections and 'cut-men' are placed in crowded station platforms for better boarding and alighting. The results of simulations are quite positive and reported in this paper.

Key Words : chronic delay, congestion, dwell time, ATO train, cut-man

* 국토교통부 철도안전감독관(Railway safety inspector, Ministry of Land Infrastructure and Transport),

교신저자(E-mail: chosk45@gmail.com, Tel: 044-201-4882)

** 서울메트로 운전처장(Director, Train operation department, Seoulmetro)

I. 서론

1. 연구의 필요성 및 목적

지하철 수송서비스는 사전에 계획된 열차운행 스케줄에 의해 운행하고, 승객은 운행스케줄 시각표를 보고 열차를 이용한다.

이상인 외(2004)는 철도시스템에 있어서 그 정시성(Punctuality)의 유지는 주행 속도, 서비스 빈도, 주행의 안락성, 고객정보와 함께 철도의 품질과 경쟁력에 관한 표준 판단기준이 되기 때문에 무엇보다도 중요하다고 하였다.

또한 쾌적한 열차이용을 위해 차내혼잡도를 낮추는 것도 필요하다. 이는 승객에 대한 중요한 약속이고 의무라 할 수 있으며 타 교통수단과의 경쟁력 수준을 결정하는 매우 중요한 요소이다.

2011년 기준 서울시 교통통계에 의하면 지하철 수송 분담률은 37.1%이고 수송인원은 연간 3.9억 명에 달하고 있다. 그중 1~4호선을 담당하는 서울메트로는 전체 지하철 수송인원의 39% 수준으로 연간 약 1.5억 명을 수송하고 있다.

특히 서울메트로가 운영하는 지하철 2호선은 서울의 강남·북을 연결하여 순환운행하고, 43개 역 중 47%에 해당하는 20개 역에서 타 노선과 환승이 이루어지고 있다. 1일 수송인원은 약 208만 명이며, 이로 인하여 출근시간대에는 202%의 혼잡도로 상시적인 열차지연이 발생하고 있다.

이러한 문제점을 해소하려면 근본적으로 단위 시간당 선로용량¹⁾ 확대가 이루어져야 한다. 그러나 이를 위해서는 막대한 비용이 들고 기술적으로

어려움이 있어 의사결정에 한계가 있을 수 있다.

본 연구에서는 상기의 하드웨어적 접근이 아닌, 소프트웨어적인 개선방안 도출을 목적으로 하고 있다. 따라서 기존 설비(전동차 등)를 최대한 활용하고 운행방식에 변화를 줌으로써 단위시간당 열차운행량을 늘려, 차내 혼잡도를 낮추고 지연을 해소하고자 하였다.

2. 연구의 범위 및 수행방법

1) 연구 범위

본 연구는 지하철 2호선 출근 시 최혼잡구간의 열차운행량을 늘리기 위하여 2가지 방법을 실험하는 것을 연구 범위로 하였다. 하나는 최근 서울메트로에서 일부 도입하여 운행하고 있는 고성능 사양의 ATO(Automatic Train Operation) 열차를 효율적으로 활용하는 방안이고, 다른 하나는 열차의 승강장 정차시간(Dwell time)을 단축하여 열차 흐름을 개선하고자 하였다.

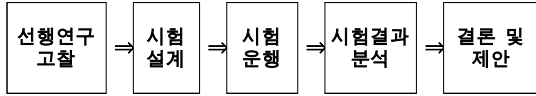
2) 연구 수행방법

연구 수행은 관련 선행연구를 분석 고찰하고, 취득한 자료를 바탕으로 모의시험방법을 설계하였다. 설계는 몇 개의 시험단계를 만들고 단계별로 ATO열차의 연속배차량을 달리하고, 각 단계에서 승강장 질서도우미인 커트맨(Cut-Man)²⁾을 배치했을 경우와 그렇지 않은 경우를 변수로 주었다.

이상의 단계별 시험을 마치면 현장 측정자료와 종합관제소의 전산실적 데이터를 비교 분석하여

1) 열차설정에서 열차를 하루에 몇 대 주행시킬 수 있는가를 말하며, 선구의 열차 설정능력을 나타내는 수치척도이다. 대도시 지하철 노선에서의 선로용량은 첨두시(peak time) 1시간당 몇 회로 표시된다(백남욱·이상진, 2007, 철도관련기사).

2) 승객의 승·하차를 돕거나 혼잡한 차량에 승차하려는 승객을 분산하거나 다음 열차 이용을 유도하는 안내원



〈그림 1〉 연구 흐름도

개선방안을 도출하는 순으로 연구를 진행하였다. 도식화된 연구 흐름도는 〈그림 1〉과 같다.

모의시험운행(Simulation)은 수리적으로 해결책을 구할 수 없는 복잡한 문제에 적용이 가능하고, 사용자가 쉽게 이용할 수 있고 사용이 편리하다는 등의 장점이 있다고 하였다(김동희, 2003).

본 연구에서 필요한 모의시험운행 기초자료는 서울메트로 내부에서 취득 활용하였으며, ATO 열차 집중배차와 병행하여 단계별로 임시열차를 추가로 투입하여 시험을 실시하였다.

II. 열차운행계획 및 열차지연에 대한 이론적 고찰

1. 열차운행계획

1) 열차속도, 정차시간 및 표정속도

열차운행계획에서 열차속도는 역 간 거리와 승차감, 열차운전의 안전확보 등을 감안하여 선로제한속도 범위 내에서 실제 운행하는 속도를 말한다.

정차시간은 열차가 승강장에 정차한 시간부터 승객이 승·하차하고 승강장을 출발하는 시간까지이다. 일반적으로 계획상 30초를 적용하고 승·하차 인원이 많은 혼잡 역에서는 10초 단위로 가감하여 차등 적용한다. 정차시간이 계획된 시간보다 길면 열차지연이 발생하고, 짧으면 운행시간

낭비가 발생하게 된다.

표정속도(Scheduled speed)는 열차의 역 정차시분을 포함한 전체 운행시간 동안에 이동한 거리로 평균한 속도이다. 표정속도는 운행계획을 작성하는 데 매우 중요한 개념이며 다음 식과 같이 산출한다.

$$\text{표정속도(km/h)} = \frac{\text{운행거리(km)}}{\text{정차시간 포함 전체 운행시간(h)}}$$

2) 정원 및 혼잡도

혼잡도(Congestion rate)는 차량 정원에 대한 승차인원의 비율이며 승객의 편의성 및 열차의 안전과 정시운행을 고려하여 설정한다. 서울메트로(2014)에 따르면 승차인원에 따른 혼잡도는 〈표 1〉과 같다.

이동근 외(2002)에 의하면 입석승객 밀도는 차량 내 좌석면적을 제외한 차량 바닥면에 승차한 입석승객의 수를 나타내며 차량 내 혼잡도를 가늠하는 실제적인 기준치이다. 혼잡도에 따른 입석승객의 밀도는 〈표 2〉와 같다.

〈표 2〉 혼잡도에 따른 입석승객 밀도

혼잡도(%)	100	150	200	240
입석승객 밀도(인/㎡)	2.9	5.0	7.2	9.0

3) 선로용량 및 운전시각

김훈 외(2006)에 의하면 선로용량이란 주어진 시설조건하에서 기술적으로 안전을 도모할 수 있

〈표 1〉 승차인원에 따른 혼잡도(전동차 1량 기준)

승객(인)	54	94	120	160	184	216	240	280	320	368	400	432
혼잡도(%)	34	59	75	100	115	135	150	175	200	230	250	270

는 최소 운행제약을 적용하여 산출한 최대 운행횟수(A; Frequency)를 말한다. 이론적 최대용량 또는 한계용량이라 정의한다. 수송력은 통상 정원의 1.5배(240명/량)를 적용한다.

최소 운전시격(Headway)은 열차 안전을 확보할 수 있는 열차 간의 최소 운행시간을 말한다.

김윤수·박정수(2009)는 운전시격을 최소화하기 위해서는 폐색구간 길이, 열차 길이, 가속도, 감속도 및 구배 등의 각종 변수들을 종합적으로 고려하여야 한다고 하였다.

수송 측면에서 혼잡시간대의 운행시격을 살펴보면 다음과 같은 계산식이 성립한다.

$$A = \frac{\text{혼잡시간대 최대 탑승객(인)}}{\text{수송력(정원의 1.5배 : 인)}}$$

$$B(\text{min}) = 60(\text{min}) \div A$$

A: Frequency (1hour), B: Headway

2. 선행연구 고찰

1) 지하철 2호선 혼잡도 완화방안 기초연구

조성근 외(2013)의 혼잡도 완화방안 기초연구에서는 기존에 실시해왔던 다양한 방법을 정리하여 차내 혼잡도를 낮출 수 있는 방안을 제시하였다.

기존에 실시해 왔거나 실험을 통해 효과를 측정해본 아이টে은 질서도우미 운용, 중간 시발열차 운용, 2호선 강남구간 열차 집중배차 및 소규모 ATO열차 연속배차 등이다.

질서도우미는 '10. 9. 2부터 12. 31까지 4개월간 서울지하철 1~4호선 혼잡역 25개소에 192명을 배치하여 승강장 승·하차 질서유지를 실시하였다. 2호선에서는 17개 역에서 실시하였으며, 현재는 운용을 중단한 상태이다.

중간시발 열차는 객실 내 누적 승객으로 인한 승·하차시간이 길어짐에 따라, 이를 해소할 목적으로 실시하였다. '08. 5. 30부터 '12. 3. 15까지 2호선 외선 대림역, 구로디지털단지역, 신대방역 및 신림역 등 4개 역에서 운용하였으며, 초기에는 혼잡도를 221%에서 202%로 낮추는 등의 효과가 나타났다.

그러나 운용이 장기화되면서 좌석에 앉아 가기 위해 해당열차를 기다리는 승객이 승강장을 더욱 혼잡하게 하는 등의 부작용으로 '12. 3. 16부터 운용을 중지하였다.

2호선 외선 강남구간에 열차를 추가 투입하여 운행하는 방안도 시험실시하였다.

'10. 10월 한 달간 총 6개 열차를 3단계로 나누어 2, 4, 6개 열차를 증편하여 운행한 결과, 2개 열차를 증편하여 운행하는 것이 효과가 가장 좋은 것으로 나타났다.

따라서 '10. 11. 22부터 정기운행에 2개 열차를 증편하여 운행시격을 2.5분에서 2.3분으로 단축하였고, 혼잡도는 202%에서 196%로 소폭 감소하는 결과를 얻었다.

ATO열차 연속배차 시험은 '11. 11. 23부터 한 달간 3차례로 나누어 6~10개 열차를 연속배차하였다. 시험결과는 열차흐름에 큰 변화는 없었으나, 누적지연은 오히려 96초가 늘어난 것으로 나타나, 추가시험이 필요하다고 제안하였다.

이 연구에서는 ATO열차 연속배차와 관련하여 배차대수를 보다 확대한 시험을 제안하고, 이와 더불어 승강장 질서도우미를 병행 운용하는 것이 효과적이라는 것을 간접적으로 시사하고 있다.

2) 혼잡 완화 및 수송력 증대 방안 연구

이현주 외(2008)의 연구에서는 혼잡 완화 및

수송력 증대를 위하여 개선방안 우선순위를 제시하였다. 우선 지하철 이용승객에 대한 설문을 통하여 불만족 사항을 도출하고, 계층화 기법(AHP, Analytic Hierarchy Process)을 사용하여 개선의 우선순위를 선정하였다.

설문결과는 서울지하철 노선 중 2호선이 '운행 간격 정확도'가 낮고, '출퇴근시간대 혼잡도'가 높다는 불만이 가장 크게 나타났다. 이에 따른 개선 우선 방안 선정을 위해 AHP 계층구조 평가에 기술성, 열차운행성, 정시성, 수익성, 경제성, 유지관리성의 6개 항목을 설정하였으며, 평가척도로는 열차운행 확대, 정거장 규모 및 시설개량, 대체 교통수단 개발의 3개 항목을 설정하였다.

분석결과는 열차운행 확대방안이 다른 척도보다 높게 나타났으며, 결론적으로는 열차운행 확대에 따른 신속한 수송과 원활한 열차소통을 위하여 정거장 내 승객 정체시간을 단축할 수 있는 방안의 연구가 필요하다는 점을 시사하고 있다.

따라서 본 논문이 연구의 주안점으로 여기고 있는 혼잡완화를 통한 열차지연 해소와 유사한 방향성과 필요성을 제시해주고 있다.

3) 적정 최소소요 정차시분 추정모델

김동희(2009)의 연구에 의하면 도시철도 열차 다이어그램(이하 다이어로 약칭)의 신뢰성 등 수송품질은 열차 간 운행시격(headway)과 정차시분(dwell time)이 대부분 결정한다. 특히 고밀도로 운행하는 도시철도의 경우 정차시분은 운행시격에서 차지하는 비율이 높다.

최소소요 정차시분 결정요소로는 선행열차와의 시격, 단위시간당 승·하차수요, 인당 평균 승·하차 소요시간, 혼잡 평준화율, 도어개폐시간 등이 있다. 본 선행연구에서는 도시철도 환경에 실

용적으로 활용할 수 있는 최소소요 정차시분 모델을 추정하기 위하여 일부 주요 역(7개 역)의 실제 기록데이터를 비교 분석하였다.

분석결과는 오전 8~9시대 2호선 외선 주요 역에서는 대부분 계획 정차시분 30초를 초과(15~30여 초)하였고 일부 역은 최대 67초까지 정차시분이 늘어난 것으로 추정하였다. 따라서 인위적인 승강장 승객의 통제 없이는 정차시분 관리가 어려워 운행시격 단축이 한계가 있음을 시사하고 있으며, 본 연구에서 추구하는 고성능 차량(ATO열차) 집중투입과 승강장 승객 통제를 통한 정차시분 관리에 대한 연구를 뒷받침해주고 있다고 사료된다.

3. 연구의 차별성

본 연구에서는 기존의 이론적 고찰 위주의 연구와 달리 직접 현장에서의 필드실험을 기반으로 연구를 수행하였다.

이는 이론적으로 고려하기 어려운 변수인 승객의 열차 승·하차 행태와 개인 선호에 따른 심리적 요인 등 다양한 변수를 고려하고자 함이다.

따라서 이론적으로 가능하다고 판단된 우수한 성능의 열차 투입과 승·하차에 대한 승객의 안내 유도가 승객의 다양한 심리적 변수와 어울려 어느 정도 개선효과를 보이는가를 판단하고자 하였다.

III. 서울지하철 2호선 운행현황

1. 열차운행 현황

서울메트로(2014)에 의하면 2호선 운행은 <표 3>에서 나타난 바와 같이 최고 혼잡도는 202% 수

<표 3> 서울지하철 2호선 열차운행 현황

차량 수 (편성)	운행시격 (분)	운행시간 (분)	운행횟수 (회/일)	총 운행거리 (Km/일)	승객 수 (천 명/일)	혼잡률 (%)
790량 (79)	RH 2.5 NH 6.0	87	548	24,534.4	2,057	202

<표 4> 서울지하철 2호선 운행열차 및 시격

구분	평균 (7:30~8:30)	7:30~ 7:40	7:40~ 7:50	7:50~ 8:00	8:00~ 8:10	8:10~ 8:20	8:20~ 8:30
열차 수(편성)	24	3	4	5	5	4	3
운행시격(분)	2.5	3.3	2.5	2	2	2.5	3.3

※ 신도림역 기준 - 오전 출근시간 30분(07:50~08:20) 운행시격은 평균 2분 08초

준이고 43개 역 중 20개 역에서 타 호선과 환승이 이루어지고 있다.

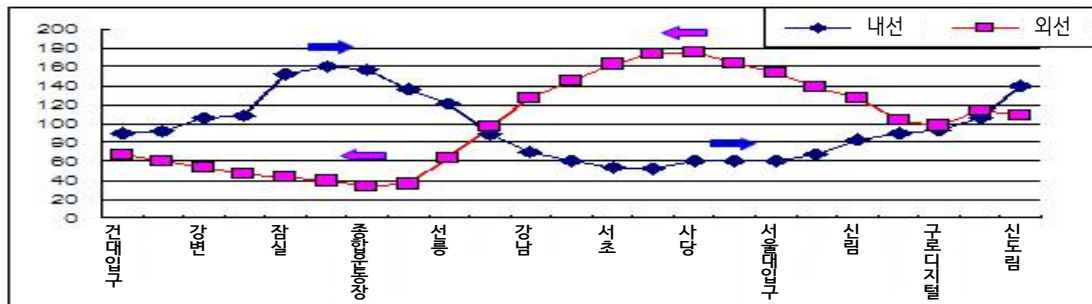
성수역과 신도림역에서 본선 전동차의 입출고가 이루어지고 두 역을 기점으로 성수지선과 신정지선이 시작된다.

오전 출근시간대를 기준으로 2호선에 투입되는 열차는 서울메트로(2014)에서 제시한 <표 4>와 같이 2호선 외선을 기준으로 총 24편성³⁾이다. 운행시격은 최소 2분에서 3.3분 간격으로 운행하며 평균적으로는 2.5분의 운행시격을 유지하고 있다. 또한 신도림역 기준 외선방향으로 07:50~08:20

까지 30분간은 평균 2분 08초 간격으로 열차를 배차하고 있다.

2. 혼잡도 조사

서울메트로(2014)에 의하면 출근시간대(08:00~09:00) 최혼잡구간(2호선 외선 사당~방배 구간)의 차내 혼잡도는 202%로 <표 5>에 나타난 바와 같이 2011년도 대비 6% 증가한 것으로 나타났다. 통행량은 일부 구간에 집중되고 있으며, 또한 이용승객의 36.1%가 오전과 오후 출퇴근시간대인



<그림 2> 2호선 오전 8~9시대 구간별 혼잡도 변화

3) 열차로 구성하기 위해 차량을 조합한 단위로, 서울지하철 2호선 본선은 10량을 1편성으로 하고 있다.

〈표 5〉 최혼잡구간 및 혼잡도

연도	구간	시간대	차량 수 (량)	이용객 (명)	혼잡도 (%)
2007	사당→방배역	08:20~08:50	110	38,930	221
2009	"	08:10~08:40	120	38,252	202
2011	"	08:20~08:50	120	37,196	196
2013	"	08:10~08:40	120	38,348	202

07:00~09:00(18.7%), 18:00~20:00(17.4%)에 집중되어 있다.

그중에서도 출근시간대(08:00~09:00)의 혼잡도 변화는 서울메트로(2014)에서 제시한 〈그림 2〉와 같이 내선구간은 건대입구역부터 혼잡도가 증가하기 시작한다.

이후 잠실, 신천역까지 증가한 후 삼성역부터 낮아져 역삼~구로디지털단지역까지 낮은 혼잡도를 유지한다.

외선구간은 신도림역부터 방배역까지는 혼잡도

가 높아져 사당역에서 202%를 나타내며 강남역을 지나면서 점차 낮아진다.

IV. 열차지연 해소방안 고찰

1. 해소방안 도출을 위한 전제

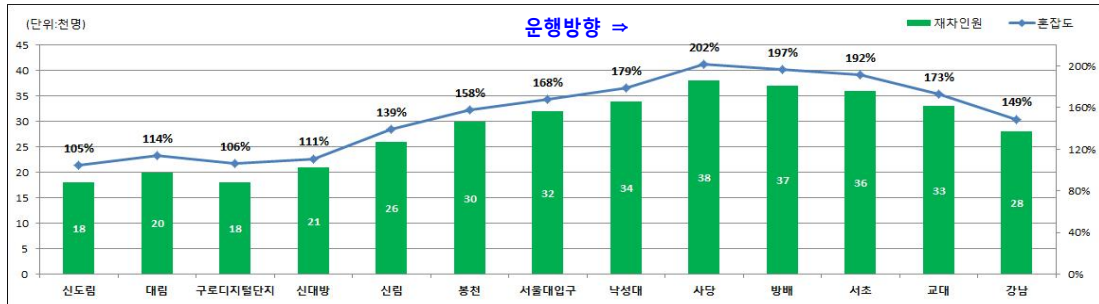
1) 개선여건 분석

서울지하철 2호선 건설지(1989)에서 계획하고 있는 역 정차시간은 30초로 정해져 있다. 그러나 종합관제소 열차운행 실적을 나타낸 〈표 6〉에서 보는 바와 같이 혼잡구간 주요 역의 실 정차시간이 평균 1분 이상으로 나타나므로 열차순연에 따른 누적지연이 발생하고 있다.

따라서 정거장에서의 승·하차를 신속히 할 수 있도록 하여 정차시간을 30초 수준으로 맞추는 것도 정시운행을 위해 필요한 요소 중 하나이다.

〈표 6〉 오전 첨두시간대 지연 및 정차시간 조사(2014년 5월 서울메트로 종합관제소 열차운행 실적)

구분	외선	1차	2차	3차	4차	5차	평균
지연시간	신도림(A)	0:45	2:08	3:08	2:26	0:55	1:52
	신림(B)	1:55	3:01	4:12	4:00	2:47	3:11
	서울대(C)	2:21	3:20	5:58	4:47	5:28	4:23
	사당(D)	2:48	3:34	6:14	4:58	6:10	4:45
	교대(E)	3:17	3:53	7:35	5:18	7:01	5:25
	삼성(F)	4:49	5:01	8:29	6:16	7:55	6:30
	잠실(G)	4:45	5:30	8:21	6:30	7:53	6:36
	구간지연(F-A)	4:04	2:53	5:21	3:50	7:00	4:38
정차시간	신도림(A)	0:57	1:04	1:04	1:20	1:10	1:07
	신림(B)	0:46	0:47	0:58	0:52	1:02	0:53
	서울대(C)	0:52	1:04	1:04	1:09	1:04	1:03
	사당(D)	1:17	1:18	1:18	1:17	1:15	1:17
	교대(E)	1:17	1:17	1:23	1:16	1:15	1:18
	삼성(F)	0:59	0:53	0:52	0:52	0:52	0:54
	잠실(G)	0:49	0:50	0:50	0:50	0:49	0:50
	평균	1:00	1:02	1:04	1:05	1:04	1:03



〈그림 3〉 2호선 외선 강남구간 첨두시 혼잡도

2) 차량특성 및 시스템적 제한

기존 2호선 차량은 기관사가 직접 운전조작을 하는 수동운전 방식이고, 신호보안장치는 ATS (Automatic Train Stop) 시스템을 사용해왔다.

그러나 1985년부터 사용한 차량과 신호시스템이 노후화됨에 따라 2010년 신형차량 도입 시부터는 자동운전을 할 수 있는 ATO(Automatic Train Operation) 전동차를 구매하였다.

현재 2호선의 전체 79편성의 전동차 중 ATO 전동차는 34편성을 보유하고 있으며, 나머지도 대 폐차 계획에 따라 순차적으로 교체할 계획이다.

2호선 개통 시부터 사용한 ATS 신호보안장치는 지상신호의 단계별 속도제어(Free, 65, 45, 25, 0Km/h)로, 뒤따라오는 열차의 근접운행을 제한하여 안전을 확보하는 방식이다. 따라서 운행열차 간 최소 600~800m 이상의 거리를 두어야 하므로 고밀도 운행이 어렵다.

ATO시스템은 거리중심제어(Distance to go)로 열차 간은 ATP(Automatic Train Protection)에 의한 안전 확보로 근접운행이 90~100m 정도 까지 되어, 이론상 고밀도 운행이 가능하다.

2. 개선방안 도출

1) 시험운행 방향

서울메트로(2014)에 의하면 〈그림 3〉과 같이 사당~방배역 구간의 혼잡시간대 30분간(8:10~8:40)⁴⁾ 이용승객이 38,348명이고 차내 혼잡도는 평균 202%로 나타났다.

따라서 이 구간을 중심으로 고밀도 운행이 가능한 ATO열차 연속배차를 하였다.

배차방법은 3단계로 나누어 단계별로 연속배차수를 늘리는 한편, 열차운행량 증가 가능성 판단을 위하여 임시열차를 추가 투입하는 시험도 병행하여 실시하였다.

서울메트로(2014)에 의하면 최혼잡시간대 2호선 외선 강남구간의 평균 정차시간은 〈그림 4〉와 같이 50초 이상인 역이 5개 역(사당, 교대, 서울대입구, 봉천, 신도림)으로 나타났다.

ATO열차 연속배차 단계별 계획과 더불어 정차시간 상승지연이 발생하는 5개 역에 커트맨을 배치하여 역 정차시간을 단축함으로써 열차흐름이 개선되는지도 시험하였다.

4) 신도림~사당역 간 운행시간은 20분 소요, 신도림에서 7:50~8:20 사이 배차한 열차가 사당역에 8:10~8:40 도착



〈그림 4〉 2호선 외선 강남구간 침두시 정차시간

〈표 7〉 단계별 시험운행 계획

구 분	1단계	2단계			3단계		
		1회차	2회차	3회차	1회차	2회차	3회차
ATO 연속배차 수	10	17	17	17	23	23	23
시험일수	3	3	3	3	3	3	3
열차운행 Type	A	A	A	B	A	A	B
커트맨	배치	배치	미배치	미배치	배치	미배치	미배치

※ 열차운행 Type A: 혼합배차(ATO & ATS) + 단계별 ATO 연속 + 혼합배차(ATO & ATS)
 열차운행 Type B: 혼합배차(ATO & ATS)

2) 단계별 세부시험운행 계획

(1) ATO열차 연속배차 시험

우선 ATO열차 연속배차 시험은 〈표 7〉에서와 같이 크게 3단계로 구분하여 실시하였다.

1단계는 10개 열차 연속배차, 2단계는 2개 임시 열차 추가와 함께 17개 열차 연속배차 그리고 3단계는 3개 임시열차를 추가하여 23개 열차를 연속 배차하였다.

단계별 시험일수는 월요일을 제외한 주중 각 3일간 하였으며, 시험운행시간대는 신도림역을 기준으로 7:30~8:30까지로 하였다.

(2) 정차시간 단축을 위한 커트맨 배치

승객의 승·하차를 돕는 커트맨 운영은 평균

정차시간이 50초 이상인 5개 역(신림, 봉천, 서울대입구, 사당, 교대역)에 배치하였다.

배치일은 1단계 시와 2, 3단계의 1회차 시험일에 배치하였고, 운영시간은 7:30~9:00(1시간 30분)로 하였다.

배치인원은 역당 4명씩 5개 역에 총 20명을 투입하였으며, 배치위치와 방법은 해당 역 승강장의 계단 밑 등 혼잡구역에서 승객을 분산하고 무리한 승차를 사전 통제하는 방법을 사용하였다.

또한 ATO열차 연속배차와 커트맨 배치에 따른 정차시간 단축효과를 비교하기 위해 2단계의 2회차 시험에서는 커트맨을 배치하지 않았다.

그리고 3회차 시험에서는 임시열차만 추가배차하고 평상시와 같이 커트맨도 배치하지 않고, ATO와 ATS열차도 혼합하여 배차하였다.

3) 시험운행 결과 및 분석

결과분석을 위하여 시험운행 실시 전 1주일간 종합관제소의 열차운행 실적 전산자료와 각 역 PSD (Platform Screen Door: 승강장 안전문)의 Log-File⁵⁾을 취득하여 시험결과와 자료와 비교하였다.

열차운행 기준은 아침 혼잡시간대 중에도 가장 혼잡한 사당~방배역 사이 30분간(7:50~8:20) 운행된 열차횟수를 기준으로 하였다.

시험운행 결과는 <표 8>과 같이 수집되었다.

세부적으로는 운행 열차횟수는 시험운행 실시 전 평균 11.2회였으나, 시험결과는 단계별로 11.9~13.2회로 증가하였다.

다시 말하면 ATO열차 연속배차는 열차흐름 개선에 효과가 있었으며, 연속배차 대수를 증가시킬수록 효과가 더 좋은 것으로 분석되었다.

따라서 23대의 ATO열차를 집중 배차한 3단계 1차 시험이 13.2회로 측정되어 효과가 가장 좋은 것으로 나타났다.

누적 지연시간의 분석 결과는 시험 전에는 6분 22초이던 것이 ATO열차 17개 편성을 연속배차하고 커트맨을 운영한 1단계에서 1분 38초가 단축된 4분 44초로 효과가 가장 좋았다.

또한, 커트맨이 배치된 2단계 1차 시험이 5분

03초(1분 19초 단축), 3단계 1차 시험이 4분 56초(1분 26초 단축)로 커트맨 운영이 지연해소에 효과적인 것으로 나타났다.

커트맨을 배치하지 않고 ATS와 ATO열차를 혼합운영하면서 2개의 임시열차를 추가한 2단계에서는 지연시간이 5분 47초~6분 25초로 시험 전과 유사한 수준이었다. 그러나 3개의 임시열차를 추가한 3단계에서는 8분 17초~8분 20초 수준으로 나타나 시험 전보다 오히려 악화되는 것으로 분석되었다.

이는 도로교통의 병목현상과 유사한 상황으로 별도의 조치 없이 선로용량을 넘어서는 열차투입이 지연을 악화시킨 것으로 보인다.

승강장 정차시간 단축시험은 단계별 1차 시험에서만 커트맨을 배치하였다. 결과는 <표 8>에 나타난 바와 같이 시험 대상 주요 5개 역의 평균 정차시간이 42~44초로, 시험 전 56초에 비하여 12~14초 단축되는 효과가 나타났다.

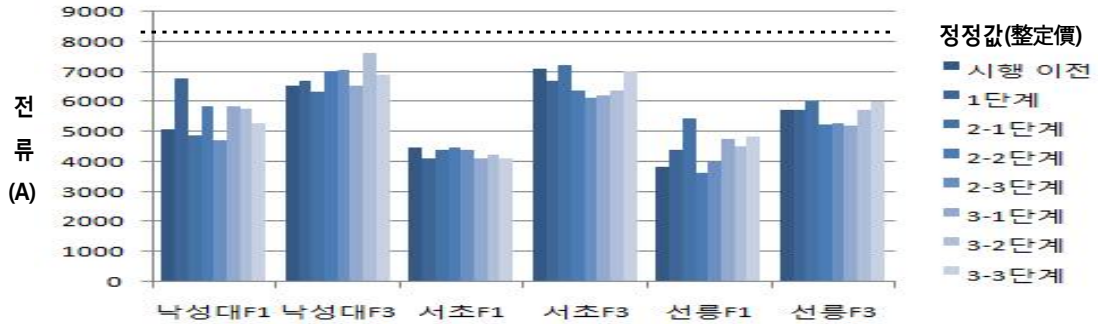
미미한 차이지만 1단계 평균정차시간이 44초로 가장 높게 나타난 이유는 커트맨 배치 1단계보다 2, 3단계로 가면서 커트맨의 승객 유도 노하우가 학습 효과에 의해 높아졌기 때문인 것으로 풀이된다.

또한 3단계 3차 시험과 같이 커트맨도 배치하

<표 8> 시험결과 - 단계별 최혼잡 30분간 운행열차 수 및 지연 실적

구분	시험 전	1단계	2단계			3단계		
			1회차	2회차	3회차	1회차	2회차	3회차
운행시격(분)	2.5	2.5	2.2	2.2	2.2	2	2	2
계획운행(편성)	12	12	14	14	14	15	15	15
실제운행(편성)	11.2	11.9	12.9	12.8	12.4	13.2	12.0	12.2
정차시간(분)	56	44	43	48	53	42	49	54
지연시간	6:22	4:44	5:03	5:47	6:25	4:56	8:20	8:17

5) 전자장비의 장애로부터 복원(recovery) 등에 필요한 정보(로그 데이터)를 수집하여 기록하는 파일



주: F1, 3의 F는 Feeder의 약자로 변전소에서 전차선으로 전기를 공급하는 급전 분기기를 의미함

〈그림 5〉 시험단계별 전력부하 측정

지 않고, 열차를 혼합하여 운행하며, 열차를 추가 배차한다는 것은 지연을 더욱 더 가중시킨다는 결과를 보여주고 있다.

시험결과를 종합 분석하면 23편성 이상의 ATO 열차를 연속배차하면서 승강장 커트맨을 병행 배치해야만 열차지연과 차내 혼잡도를 효과적으로 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

4) 시험운행에 따른 시설요인 분석

ATO열차 집중배차 시험운행에 따른 순간 전력 최고부하는 〈그림 5〉에 나타난 것처럼 급전 차단기 과부하 차단값(정정값: 整定價)인 8,500A 이내로 측정되었다.

따라서 ATO열차 및 신호시스템을 이용한 배차간격 단축(2.5분 → 2분)을 시행하여도 전력공급에 문제가 없는 것으로 확인되었다.

신호시스템에 대한 부하측정도 3단계 1, 2회차에서 ATO열차를 최대 23개 편성까지 연속 배차하여 2분 간격으로 운행하였다.

모니터링 결과는 열차 자동 제어 및 신호시스템에 장애나 문제가 발견되지 않았으므로 2분 간격으로 열차운행이 가능한 것으로 분석되었다.

3. 대안 제시

시험운행 종합결과에서는 열차지연 개선만을 보자면 1단계 시험인 현행과 같은 2.5분 시격으로 10대의 ATO열차를 연속 배차하는 것이 최선(지연 4:44)인 것으로 나타났다.

그러나 이는 이론상 선로용량 내에서의 운행으로 인한 효과와 커트맨의 승객안내 노하우에 대한 학습효과에 기인한 것으로 사료된다.

또한 본 논문에서 중점을 두고 있는 또 다른 목적이 혼잡도 개선임을 감안할 필요가 있다. 따라서 시험 결과 지연운행 개선과 혼잡도 개선에 대한 가중치를 50 대 50으로 하여 다음 식으로 단계별 개선효과를 산출하였다.

기준: 2호선 외선 강남구간 오전 R.H 시간대

$$R = \frac{Co - Co \frac{Rt}{St}}{Co} + \frac{Do - Ds}{Do}$$

Co: 시험 전 최고 혼잡도(%)

Do: 시험 전 평균 정차시간(sec)

Rt: 시험 전 평균 운행열차 수(대)

Ds: 시험 중 평균 정차시간(sec)

St: 시험 중 평균 운행열차 수(대)

R: 가중치 합

〈표 9〉 단계별 시험운행 종합결과

구분	시험 전	1단계	2단계			3단계		
			1회차	2회차	3회차	1회차	2회차	3회차
운행시격(분)	2.5	2.5	2.2	2.2	2.2	2	2	2
지연시간(분:초)	6:22	4:44	5:03	5:47	6:25	4:56	8:20	8:17
혼잡도(%)	202	190.1	175.4	176.8	182.5	171.4	188.5	185.4
종합개선효과(R)	0	0.3050	0.3358	0.2164	0.0886	0.3766	-0.2421	-0.2228

산출된 결과는 〈표 9〉의 종합개선효과(R)에 나열하였다. 우선 ATO열차 연속배차와 커트맨을 운용한 각 단계에서 0.3(30% 수준) 이상의 개선 효과를 나타내고 있다.

그중 가장 우수한 결과는 ATO열차를 23대 연속배차하고, 3대의 추가 임시열차를 투입하는 한편, 주요 혼잡 5개 역에 커트맨을 운용한 시험에서 0.3766(37% 이상 개선)이라는 우수한 효과를 보여주고 있다.

따라서 본 시험연구 결과를 바탕으로 ATO열차를 전면 도입 운영 전까지는 2호선 외선 강남구간에 현재 보유한 ATO열차를 2분 시격으로 23대 이상 연속 배차하고, 정차시간 상습지연 역에 승객유도를 위한 커트맨을 배치하는 안을 제시한다.

V. 결론 및 향후 연구과제

1. 결론

2호선 강남구간의 상습지연 해소를 위한 시험운행에서 혼잡시간대에 해당구간에 단계별로 ATO열차 연속배차와 승강장 커트맨 배치 운영을 실시하였다.

분석 결과는 시험운행 이전에 비해 운행열차 횟수 증가와 주요 역 정차시간 감소로 인한 혼잡

도 완화와 누적지연 감소 효과가 나타났다.

특히, 열차지연과 혼잡도 개선을 50 대 50의 가중치로 하여 일반적 산술평균방식으로 산출하여 더한 점수에서 3단계 1차 시험운행이 가장 효과가 좋은 것으로 나타났다.

구체적으로는 누적지연이 22.5%(6:22 → 4:56)가 개선되고 차내 혼잡률이 30%(202% → 172%)가 개선되어 가장 효과적인 것으로 분석되었다.

아울러, 출근시간대에 ATO열차를 연속배차하였으나 커트맨을 운영하지 않는 상태에서의 열차 증회 운행은 효과가 미흡하거나 오히려 열차지연이 가중되는 것으로 나타났다.

따라서 2호선 외선 강남구간의 사당~방배역간을 기준으로 오전 출근시간대 ATO열차의 2분 시격 연속배차와 병행하여, 주요 역 승강장에 커트맨을 배치하는 방안이 2호선 외선 강남구간 혼잡도와 지연운행 해소를 위한 최적방안이라는 결과를 도출하였다.

향후 본 시험결과를 열차운행계획에 반영할 경우 양질의 수송서비스가 제공될 것으로 기대된다.

2. 향후 연구과제

본 연구는 지하철 2호선 구간의 상습적인 열차지연 및 혼잡도를 해소하기 위한 것으로서 시험운

행을 통하여 2호선 혼잡구간에 대한 최적의 운행 조건을 도출코자 하였다.

이와 같은 과정은 해당 구간의 정확한 선로용량을 산정하여 최소 운전시격을 결정하는 과정이라 할 수 있다.

따라서 금번 연구를 바탕으로 정확한 선로용량을 산출하고 수요 변화 및 운행조건 변화 등을 추가 변수로 반영한 열차시행운행(Train Operations Simulations)을 실시하여 최적의 운행방안을 도출하는 추가 연구가 필요하다.

또한 서울지하철 2호선은 회차역 없는 고리형 순환노선이어서 운행 탄력성이 현저히 떨어지는 관계로 나머지 상습지연에 대한 처방이 필요하다.

혼잡시간대와 비혼잡시간대의 운행시간을 달리 한다거나, 초기 개통 이후 환승역 증가를 고려하여 운행시간 재산정에 대한 후속연구도 필요하다고 사료된다.

참고문헌

김동희, 2003, "철도운영시스템을 위한 시뮬레이션기법", 「한국철도기술」, 통권 43호: 18~25, 한국철도기술 연구원.
 _____, 2009, "도시철도 적정 최소소요 정차시분 추정모델", 「한국철도학회 논문집」, 제12권 제6호: 953~960.

김윤수·박정수, 2009, "도시철도 최적운영계획 수립에 관한 연구", 「한국철도학회 추계학술대회 논문집」, 1810~1822.
 김훈·김찬성·김연규, 2006, 「지역 간 철도 선로용량 관리를 위한 지표개발 연구」, 한국교통연구원 연구총서, 2006-08.
 백남욱·이상진, 2007, 「철도관련큰사전」, 도서출판 골든벨.
 서울메트로, 2014, 「2014년도 서울메트로 수송계획」, 서울메트로 영업처.
 서울지하철, 1989, 「2호선 건설지」, 서울지하철공사.
 이동근·고영호·권정원, 2002, "철도시스템의 운전계획 수립", 「한국철도학회 추계학술대회 논문집」, 929~936.
 이상인·김택룡·박진배·주영훈·홍효식, 2004, "열차경합 해소 문제를 위한 최적화기법 연구", 「정보 및 제어 학술대회 논문집」, 2004. 11: 720~722.
 이현주·국광호·손영진, 2008, "서울메트로 2호선 외순환 구간의 혼잡완화 및 수송력 증대방안에 관한 연구", 「한국철도학회 춘계철도학회 논문집」, 1403~1412.
 조성근·송정훈·정일봉·박정수, 2013, "지하철 2호선 혼잡도 완화방안 기초연구", 「한국철도학회 춘계학술대회 논문집」, 2013. 5: 193~203.

원 고 접 수 일 : 2014년 10월 20일
 1차심사완료일 : 2014년 11월 18일
 2차심사완료일 : 2014년 12월 16일
 최종원고채택일 : 2015년 1월 15일