

도시철도에 있어 이동폐색방식과 고정폐색방식의 상호비교 연구

A Comparative Study of the Flexible Moving Block System and the Fixed Block System in Urban Railway

정광섭* · 박정수** · 원제무***

Jeong, Gwangseop · Park, Jeongsoo · Won, Jaimu

Abstract

Recently, The flexible moving block system in train operation has been introduced to the worldwide rail transportation markets. This paper is a comparative study of the conventional fixed block systems effects and the flexible moving block system on train operating time saving. Based on the literature review, the new algorithm is developed. It is to calculate the optimum headway time of the train. The proposed algorithm can overcome some of the existing algorithm problems, such as the limits of the data and unaware of the rail characteristic. The total travel time saving effect has been analyzed by applying the skip stop scheduling system to the each block system. The results of this study indicated that the total travel time is approximately 40% decreased and the schedule velocity is approximately 24% improved when the moving block system is applied. The results of this study could be used as a theoretical basis for the selection of rail signal system in Seoul's subway number 2 line.

Keywords : flexible moving block, fixed block, headway, schedule velocity

요 지

본 연구는 지하철의 표정속도 향상을 통해 승객의 총통행시간을 절감시키고자 수행하였다. 본 연구가 갖는 기존연구와 차별성은 열차의 신호시스템측면을 고려하여 승객의 통행시간변화를 분석했기 때문에 기존의 운영계획측면에서 임의로 운전시격을 변화시켜 분석한 열차의 승객통행시간 절감효과보다 신뢰성과 현실성을 높일 수 있다. 본 연구의 주요내용은 열차운행의 신호시스템측면에서 기존의 고정폐색방식보다 우수한 이동폐색방식을 적용하여 사례노선의 최소운전시격을 산정(시뮬레이션)한 후, 이를 단독 또는 Skip-stop방식과 혼용하여 승객통행시간 절감효과를 분석·제시하였다. 본 연구의 분석결과, 이동폐색방식은 고정폐색방식보다 총통행시간과 표정속도에서 각각 24.4%, 32.3% 향상 효과가 나타났으며, 이를 Skip-stop방식 중 격역정차방식과 혼용하여 적용할 경우, 총통행시간은 38.1~52.5%, 표정속도는 최대 58.1%까지 향상되는 시너지 효과가 나타났다.

핵심용어 : 이동폐색방식, 고정폐색방식, 최소운전시격, 표정속도

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

현재 지하철과 도시철도는 도로교통이 혼잡한 도심구간과 정체가 심각한 일부구간에서만 경쟁력을 가지고 있고 전체적으로 비교하였을 경우에는 버스와 경쟁되는 노선 및 간선 도로 승용차와 경쟁력이 없다고 판단된다(김경철, 2002). 특히, 도시철도와 연계되는 가장 많은 환승역을 가진 지하철 2호선의 경우는 지하철과 도시철도의 효율적인 연계측면에서도 이러한 문제가 조속히 해결되어야 할 실정이다.

지하철의 효율성을 높이기 위해서는 운행 열차의 다양화와 더불어 속도 및 성능 향상, 운전시격단축 등을 통해 경쟁력을 높여 지하철의 수요 증가를 도모할 필요성이 있다. 본

연구에서는 운영계획측면에 맞춰진 표정속도향상 방법에서 열차 신호제어시스템측면인 이동폐색(Flexible moving block system) 열차제어시스템을 적용하여 열차의 표정속도(Schedule Speed)를 향상시키고 기존의 고정폐색방식(Fixed block system)과 비교하여 이동폐색방식이 갖는 승객의 통행시간 절감효과를 분석하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

지하철의 표정속도 향상 방법은 선로기술측면, 차량기술측면, 신호시스템측면, 운영계획측면에서 살펴볼 수 있다. 이 중 교통분야에서 Skip-stop방식 또는 급행선 도입 등을 통한 표정속도 향상 및 총통행시간 단축과 같은 운영계획측면에서 연구되어 왔다. 본 연구에서는 이 중 신호시스템측면과

*정희원 · 한양대학교 도시대학원 교통물류학과 졸업 · 영동대학교 산학협력단 외래강사 (E-mail : jngscorp@korea.com)

**정희원 · 한양대학교 도시대학원 SOC · 교통학과 박사수료 · 서울특별시 지하철공사 (E-mail : pajs0087@hanmail.net)

***한양대학교 도시대학원 SOC · 교통학과 교수 (E-mail : won21@hanyang.ac.kr)

운영계획측면을 함께 고려하고자 한다.

본 연구의 방법은 먼저 지하철 2호선 구간을 대상으로 이동폐색 열차제어운행 알고리즘을 구축하여 최소운전시격을 산정할 수 있는 시뮬레이션을 실시하였다. 그리고 지하철 2호선 구간의 일일 역간 승객 O/D 데이터를 이용하여 운영계획별(시나리오 0, 1, 2, 3)로 표정속도, 평균통행시간 그리고 총통행시간을 산정하였다.

시나리오별 분석결과는 크게 고정폐색방식과 이동폐색방식으로 나누어 살펴볼 수 있도록 하였으며 신호시스템 단독 비교와 신호시스템+운영계획 혼합비교 결과를 함께 제시하였다.

2. 선행 연구의 고찰

지하철의 급행화 및 표정속도 향상 등에 관한 연구를 살펴보면 크게 운영계획 측면과 열차신호시스템측면으로 나누어 살펴 볼 수 있다.

2.1 운영계획 측면

원제무, 황준환(1997)은 급행열차를 지하철 3호선에 도입하여 승객의 통행시간 절감효과를 분석하고자 하였다. 방법은 격역제와 주요역 정차방식을 혼용하여 주행시간, 대기시간, 총통행시간 변화를 추정하였고 이를 원행방식(현황)과 비교하였다. 급행지하철 도입결과, 주행시간 11.3%, 총통행시간 8.2%의 절감효과를 제시하였다.

김경철(1998)은 급행열차 도입시 통행시간 절감효과를 분석하는 방법론을 정립하였다. 방법은 사례노선을 선정하여 급행열차의 운행회수와 구간최고속도, 정차시간, 총통행량의 변화에 대해 통행시간 절감효과를 추정하였다. 분석결과, 10% 이상의 승객통행시간 절감효과를 제시하였다. 그리고 급행·원행열차 혼용운행시에는 추월선(대피선)의 위치를 선정한 후, 그에 따른 최적열차 다이어agram을 작성하여 분석하였다. 가상노선에 시뮬레이션한 결과, 10~25분 정도 통행시간 절감효과를 보이는 것으로 나타났다.

서원호(2000)는 도시철도의 급행열차 도입을 위한 대안으로 각역정차와 격역정차 혼용방식의 스케줄링 알고리즘을 작성하였다. 방법은 지하철 5호선구간에 열차운행 알고리즘을 적용하여 5개의 시나리오를 작성·평가하고 시나리오별로 주행시간, 대기시간, 총통행시간을 추정하였다. 분석결과, 침두시를 기준으로 각역정차제와 비교했을 때 승객의 총통행시간은 7.8% 절감되며 표정속도는 12% 증가한다고 제시하였다.

2.2 신호시스템 측면

정동윤(1995)은 도시철도 신호보안설비의 선로용량 증대와 운전시격단축 그리고 선로의 효율적 이용을 위하여 열차폐색방식별 운전시격산정과 그 특성에 대해 연구하였다. 방법은 운전시격의 단축방안에 관련된 변수들과 상황에 따른 운전시격 계산방법을 고찰하고 궤도회로로 구성된 고정폐색방식에 열차가 스스로 운행상황을 판단하여 폐색구간을 증·감할 수 있는 이동폐색방식을 적용하여 새로운 알고리즘을 구축하였다. 이를 컴퓨터 프로그래밍하여 실시간 운영체제하

에서 시뮬레이션 분석한 결과, 이동폐색방식의 운행이 고정폐색방식보다 열차간 안전확보뿐만 아니라 열차운전시격단축에서 있어서도 약 20% 이상 향상 효과가 나타난다고 제시하였다. 하지만 분석을 위한 사례노선구간(지하철 2호선)이 전제노선이 아닌 일부구간이며 열차와 노선관련 변수를 다양하게 고려하지 못해 미시적 운전시격단축의 한계점을 나타낸다.

장광지(1998)는 도시철도의 열차자동제어시스템 분야를 열차폐색방식별로 파악하여 열차의 운전시격을 계산하였다. 방법은 폐색방식을 고정폐색, 준이동폐색(차상폐색), 이동폐색으로 구분하여 각각의 변수들을 검토하고 이를 통해 각 방식별로 운전시격을 산정·비교하였다. 비교 결과, 도시철도 신호시스템에 있어 준이동폐색방식이 이동폐색방식에 비해 최소운전시격 산정에서 5초정도 차이를 보이지만 구현난이도, 경제성, 안전성 측면에서 종합적으로 고려할 때는 최적의 운전시격을 제공하는 방식이라고 하였다.

2.3 선행 연구의 적용 및 한계

선행 연구들의 주요 내용을 정리해 보면, 운영계획측면은 Skip-stop방식을 각 사례노선에 따라 다양하게 적용하여 승객의 통행시간 절감효과를 분석하였다. 연구에 따라 차이가 있지만 김경철(1998)이 분석방법론을 정립한 후로 분석 알고리즘에 있어서는 큰 차이가 없으며 초기 연구에서 제기되었던 여러 가지 제약사항들과 Skip-stop방식을 급행열차도입측면에서 좀 더 다양하고 세부적으로 고려하고 있다.

신호시스템측면은 신신호방식인 이동폐색방식이 기존 고정폐색방식보다 열차운전시격 단축면에서 큰 효과를 나타내고 있다. 하지만 단축된 운전시격을 현실에 적용할 경우 이용자측면의 편의, 즉 어느 정도의 승객통행시간 절감효과가 나타나는지를 알 수 없다.

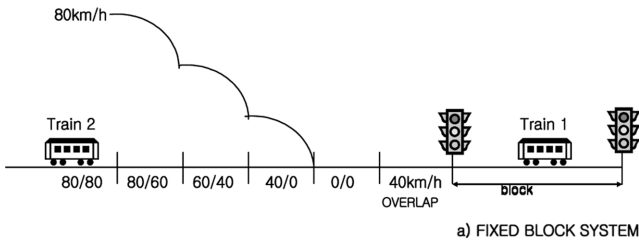
따라서 이러한 연구들의 한계와 비연계성의 문제를 해결하기 위하여 운영계획측면의 연구와 신호시스템측면의 연구를 동시에 고려할 필요성이 제기된다. 실제 적용 가능한 최소운전시격을 산정할 수 있는 시뮬레이션을 구축하고 이 값을 사용하여 스케줄링한 Skip-stop방식을 실제 사례노선을 대상으로 적용한 후 승객통행시간 절감효과를 분석할 필요가 있다.

3. 이론적 고찰

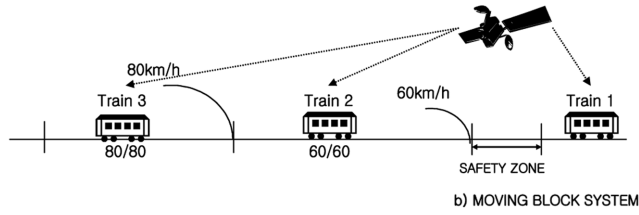
3.1 열차 신호제어시스템

3.1.1 이동폐색방식

폐색방식의 개념은 크게 궤도회로를 기본으로 한 고정폐색방식(fixed block)과 유무선 통신을 기본으로 한 이동폐색방식(moving block)이 있다. 현재 국내 지하철에서 사용되고 있는 ATC 신호방식의 체계는 ATP/ATP Sub-System에 의한 고정폐색방식이다. 이 신호체계방식은 열차의 속도제어를 지상의 일정 폐색구간의 궤도회로에서 열차위치를 검출한 후 후방 폐색구간에 열차의 제한속도 코드를 차상에 송신하여 후속열차를 제어한다. 이와 같은 고정폐색방식은 전방 폐색구간에 있는 열차는 무조건 정지해 있는 것으로 판단하고 이를 기준으로 후속열차는 추돌방지 등 안전을 위해 단계적



a) FIXED BLOCK SYSTEM



b) MOVING BLOCK SYSTEM

그림 1. 열차 신호제어시스템의 종류

으로 속도를 줄인다. 이때 단계마다 제동 및 공주거리를 필요로 하므로 거리적 손실이 많아지며 이러한 여러 속도단계(그림 4a)는 곡선, 구배, 분기부에서의 제한속도에 적절히 대응할 수 없어 필요 이상의 속도저하를 초래한다. 하지만 이동폐색방식(그림 4b)은 특정한 폐색구간 없이 선형열차와 후속열차의 위치에 따라 연속적으로 열차운행을 제어할 수 있는 방식으로 열차무선 또는 인공위성을 이용하여 주행 중인 열차의 운행상황을 파악하고 열차 상호간의 속도를 제어한다.

3.1.2 이동폐색방식의 열차 위치 검지

이동폐색방식의 열차 위치 파악은 선로변 Loop의 일련의 교차점에 의하여 구분된 위치코드에 의하여 이루어진다. 이것은 궤도에 규칙적인 정보의 전송을 가능하게 하며, 차상에서는 이를 통해 전방 제한속도를 수신한다. 각 열차의 차상에서는 수신된 전방 정보를 통하여 현재 열차의 위치와 속도를 궤도 데이터와 비교하여 열차의 가·감속 실행을 산정 최대속도를 결정한다. 이 속도는 전방의 각종 조건에 따른 제한속도와 관련하여 안전제동거리를 확보한다.

3.2 최소운전시각

이동폐색방식은 일반적으로 고정폐색방식의 절반 가까이까지 운전시각을 단축시킨다. 하지만 이는 열차노선구간의 각 폐색길이와 선로조건 그리고 최소이격거리의 차이에 따라 달라질 수 있다. 또한 운전시각이 결정되었다 하더라도 정차시간, 역간 거리에 따라 폐색구간내에서 열차가 차지할 수 있는 점유공간은 한정되어 있어 일정시간내 이 구간을 빠져나가지 못할 경우 후속열차 지연이 발생한다. 따라서 이동폐색방식을 적용한 사례노선의 효과분석을 위해서는 분석구간에 적용 가능한 최소운전시각을 먼저 산정할 필요가 있다.

3.2.1 본선구간의 운전시각

최소운전시각은 본선에 운행하는 열차간 최소간격에 의하여 결정되며 선형열차와 후속열차간의 간격은 후속열차의 실제동거리, 공주거리, 여유거리 합산으로 이루어지며, 다음과 같이 산정한다.

$$L_s = L_1 + L_2 + L_3, \quad L_1 = \frac{V_{\max}}{3.6} \times t, \quad L_2 = \frac{V_{\max}^2}{7.2\beta}, \quad L_3 = 20\text{m}$$

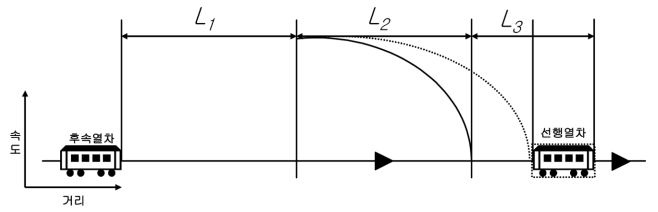


그림 2. 선·후행 열차간 시뮬레이션 조건의 최소운전시각

$$H_w = 3.6 \times \frac{L_s + \text{열차장}}{V_s} \quad (1)$$

여기서, L_s : 제동거리(m), L_1 : 공주거리(m), L_2 : 실제동거리(m), L_3 : 여유거리(m), V_{\max} : 역간 최고열차속도(km/h), V_s : 역간 열차속도(km/h), β : 상용감속도(3.5km/h/s), t : 공주시간(초), H_w : 최소운전시각(초), 열차장: 차량 길이×편성량수(산정 예: 열차 1량의 길이 20.5m×10량편성기준=205m)

3.2.2 플랫폼내의 운전시각

플랫폼내의 운전시각은 선형열차가 역에 정차한 후 역을 출발하여 플랫폼 궤도에 진행신호까지와 후속열차간의 간격을 의미하여 다음과 같이 산정한다.

$$L_s = \frac{V_{\max}^2}{7.2\beta} + \frac{V_{\max}}{3.6} \times t + \text{여유거리}$$

$$H_s = 3.6 \times \frac{L_s}{V_a} + t_s + t_a \quad (2)$$

여기서, L_s : 열차간격(m), V_{\max} : 역간 최고열차속도(km/h), β : 상용감속도(3.5km/h/s), t : 공주시간(초), V_a : 최고속도에서 정차하기까지 평균속도(45km/h), t_s : 역 정차시간, t_a : 운행여유시간(선형열차출발 후 약 35초), H_s : 플랫폼내의 최소운전시각

3.3 표정속도 및 통행시간 산정

3.3.1 표정속도

열차의 운전시간은 크게 주행시간과 정거장 정차시간으로 나눌 수 있고 이 둘을 포함하여 산정한 속도를 표정속도라고 한다. 표정속도는 다음과 같이 산정한다.

$$V_i = \frac{D_i}{t_d + T_{tr}} \quad (3)$$

여기서, V_i : 표정속도(km/h), D_i : 총주행거리(km), t_d : 정차시간(h), T_{tr} : 총주행시간(h)

3.3.2 통행시간

정류장간 주행시간은 운행속도시간, 가·감속시간, 정차시간으로 구성되며, 통행시간은 여기에 정거장 대기시간과 환승시간을 더하여 산정한다. 총통행시간은 통행시간에 이동하는 정류장간의 승객 O/D를 곱하여 산정한다.

주행시간은 다음과 같이 산정한다.

$$t_{ij} = \sum_i^{j-1} t_{k,k+1}$$

$$t_{k,k+1} = \Delta t + \frac{d_{k,k+1}}{V} + \frac{V}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad (4)$$

여기서, i, j : 출발역과 도착역, Δt : k 정거장 정차시간, $d_{k,k+1}$: 정거장 k 와 $k+1$ 간의 거리, V : 운행속도, a, b : 가·감 속도

총통행시간과 평균통행시간은 다음과 같이 산정한다.

$$T_{ij} = t_{ij} + w_{ij} + f_{ij}$$

여기서, T_{ij} : 총통행시간, t_{ij} : i 역에서 j 역간의 주행시간(차내시간+정차시간), w_{ij} : i 역에서 j 역간의 대기시간, f_{ij} : i 역에서 j 역간의 환승시간

$$T_t = \sum_i^{j-1} (T_{ij} \times OD_{ij}) \quad (5)$$

$$T_a = \frac{\sum_i^{j-1} (T_{ij} \times OD_{ij})}{OD_t} \quad (6)$$

여기서, OD_{ij} : i 역과 j 역간의 승객통행량, OD_t : 총승객통행량, T_{ij} : 통행시간, T_a : 평균통행시간

4. 시뮬레이션 실험 및 적용

4.1 열차운행 시뮬레이션의 전제조건

열차 최소운전시격을 산정하기 위한 시뮬레이션을 구동하기 위해서는 열차운행자료와 분석구간 노선자료가 필요하다. 분석을 위한 열차운행 변수와 지하철 2호선 노선자료는 표 1과 같다. 열차운행자료 입력시 정거장의 정차시간은 정차역의 대기지수에 따라 달라질 수 있지만 본 연구에서는 정차시간을 30초로 고정하여 정차시간에 따른 열차지연은 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 또한 분석구간인 지하철 2호선의 역간 선로조건에 따른 곡선, 구배, 열차중량, 열차주행 저항 등의 제약은 결과에 비례하여 증·감되므로 운전조건에서 제외하였다.

4.2 열차운행 시뮬레이션

분석을 위한 노선정보($l_{(*)}$)와 열차정보($t_{(*)}$)가 입력·인식되면 초기 최소운전시격($h_{(0)}$)이 산정된 후, Train 1에서부터 Train 15까지 운전시격을 변수로 하여 열차운행이 실행된다.

- Train 1은 0초에 0번 역을 출발하여 기준역을 통과하며 이때의 시간을 절대시간 $T_{(sec)}$ 라 한다.
- Train 2는 $h_{(0)}$ 초에 0번 역을 출발하여 $T_{(sec)}$ 에 기준역을 통과한다.
- Train 3은 $2h_{(0)}$ 초에 0번 역을 출발하여 $T_{(sec)}$ 에 기준역을 통과하며, Train 1과 $2h_{(0)}$ 시간 차이로 동일하게 진행한다.

모든 열차는 첫 번째 열차가 통과한 시간과 동일한(열차지연이 발생하지 않은 시간)($T_{(sec)}$)초에 지정된 분석구간의 기준역을 통과한다. 만일($T_{(sec)}$)시간 안에 지정된 분석구간의 기준역을 통과하지 못하여 후속열차의 지연이 발생되면 ($T_n < T_{(sec)}$), 초기 최소운전시격을 기준으로 조정된(상향) 새로운 운전시격 변수값 산정을 통해 열차운행이 재 실행된다.

이러한 운행과정을 반복적으로 시행하여 각 열차의 분석구간 기준역 통과시간(T_n)이 절대시간($T_{(sec)}$)와 유사해지는 평형점을 찾는다.

이 평형점을 최소운전시격으로 간주한 후 프로그램을 완료한다.

최소운전시격 산정을 위한 시뮬레이션 흐름은 그림 4와 같다.

4.3 시뮬레이션 결과

4.3.1 최소운전시격 분석결과

최소운전시격 산정 시뮬레이션을 통하여 지하철 2호선 노선구간을 분석한 결과 고정폐색방식은 열차 운전시격이 110초 이상이면 출발역에서부터 시간과 속도가 같은 분포로 이루어져 열차지연이 발생되지 않았고, 이동폐색방식은 열차

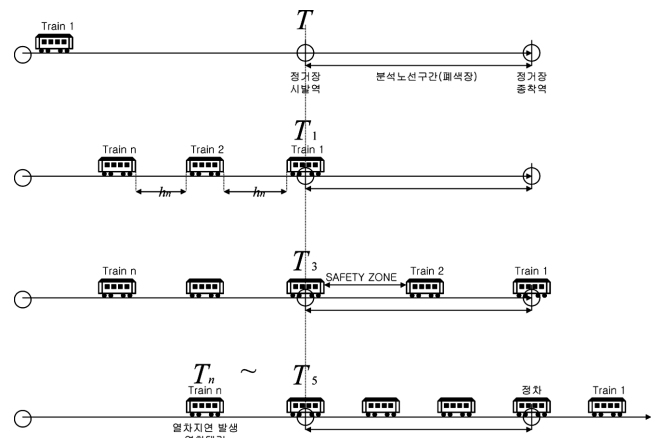


그림 3. 열차운행 시뮬레이션

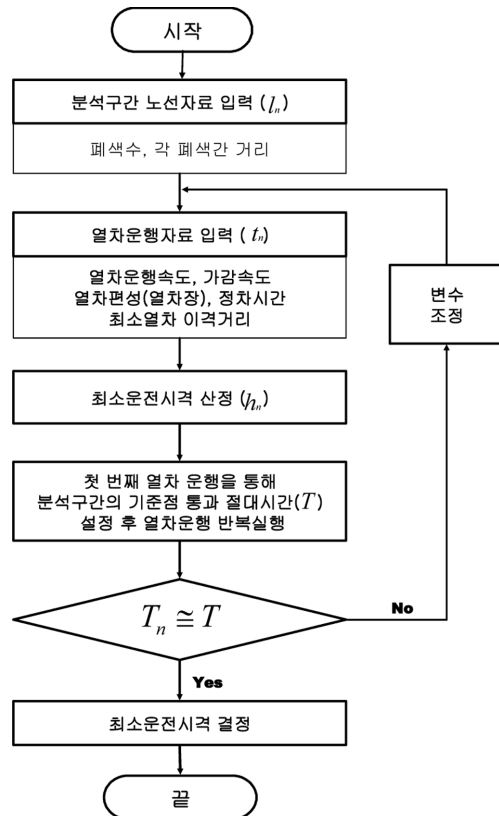


그림 4. 열차운행 시뮬레이션 과정

표 1. 열차운행기본변수와 노선자료

열차운행을 위한 변수값			
최저운행속도	0km/h	열차편성	10량
최고운행속도	80km/h	열차장	205m
가·감속도	감속도 : 3.5km/h/s	정차시간	30초
운전시격	시뮬레이션 변수(h)	최소열차이격거리	고정폐색 : 200m

역간거리 및 폐색수					
역명	거리(m)	폐색수	역명	거리(m)	폐색수
시청	0	-	교대	1200	6
을지로입구	700	4	서초	700	4
을지로 3가	800	4	방배	1700	9
을지로 4가	600	3	사당	1600	8
동대문운동장	1000	5	낙성대	1700	9
신당	900	5	서울대입구	1000	5
상왕십리	900	5	봉천	1000	5
왕십리	800	4	신림	1100	6
한양대	1000	5	신대방	1800	9
뚝섬	1100	6	구로공단	1100	6
성수	800	4	대림	1100	6
건대입구	1200	6	신도림	1800	9
구의	1600	8	문래	1200	6
강변	900	5	영등포구청	900	5
성내	1800	9	당산	1100	6
잠실	1000	5	합정	2000	10
신천	1200	6	홍대입구	1100	6
종합운동장	1200	6	신촌	1300	7
삼성	1000	5	이대	800	4
선릉	1300	7	아현	900	5
역삼	1200	6	충정로	800	4
강남	800	4	-	-	-

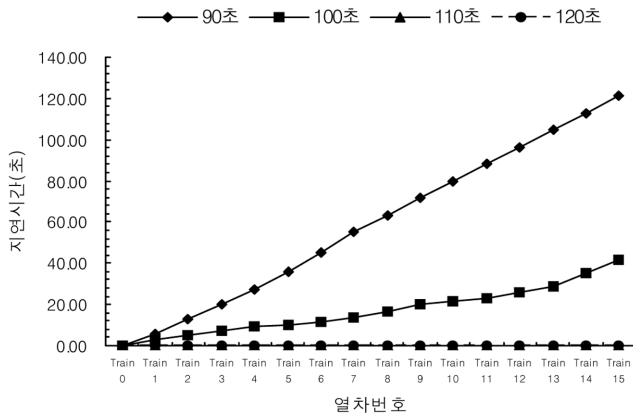


그림 5. 고정폐색 열차운전시격 지연시간

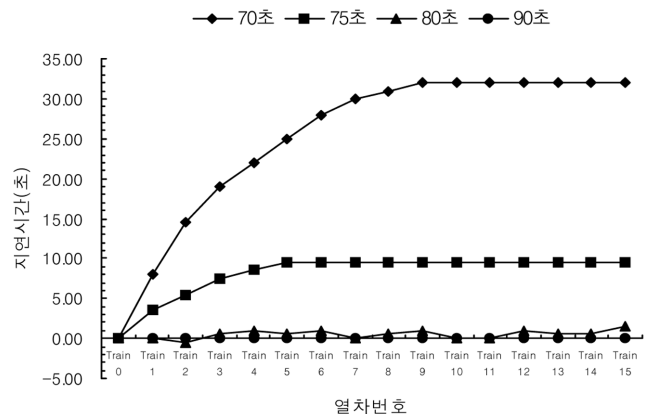


그림 6. 이동폐색 열차운전시격 지연시간

운전시격이 80초 이상이면 출발역에서부터 시간과 속도가 같은 분포로 이루어져 열차지연이 발생되지 않는 것으로 분석되었다. 그림 8과 9를 보면, 고정폐색방식과 이동폐색방식 모두 산정된 최소운전시격 이하의 운전시격에서는 열차의 지연시간이 발생하며, 지연시간의 증가폭은 고정폐색방식이 이동폐색방식보다 크게 증가하는 것으로 나타나고 있다.

표 2는 고정폐색과 이동폐색의 운전시격 차이에 따른 열차운행시간 절감률을 비교한 것이다. 두 방식 모두 열차지연이 발생하지 않는 최소운전시격으로 운행하여 기준역을 통과하는 열차들의 누적통과시간을 살펴보았다. 분석결과, 운행열차가 증가할수록 누적통과시간은 더욱 큰 차이를 나타내게 된다. 이는 이동폐색보다 고정폐색에서의 열차지연이

표 2. 고정폐색과 이동폐색방식의 운전시각 비교

구분	고정폐색(초)	이동폐색(초)	열차운행시간 절감률(%)
T(sec)	0.0	0.0	100.0
운전시각(sec)	110.0	80.0	27.3
Train 0	0.0	0.0	100.0
Train 1	110.0	80.0	27.3
Train 2	214.0	159.0	25.7
Train 3	318.0	238.0	25.2
Train 4	422.0	317.0	24.9
Train 5	526.0	396.0	24.7
Train 6	630.0	475.0	24.6
Train 7	734.0	554.0	24.5
Train 8	838.0	633.0	24.5
Train 9	942.0	712.0	24.4
Train 10	1046.0	791.0	24.4
Train 11	1150.0	870.0	24.3
Train 12	1254.0	949.0	24.3
Train 13	1358.0	1028.0	24.3
Train 14	1462.0	1107.0	24.3
Train 15	1566.0	1186.0	24.3

그 만큼 증가한다는 것을 나타낸다.

이동폐색과 고정폐색을 같은 운행조건에서 비교하였을 경우, 열차운전시각 단축에서 약 25%의 향상 효과가 나타났다.

5. 효과분석

5.1 노선선정 및 데이터 입력 자료

지하철 2호선 시청역에서 충정로사이 43개역, 47.7km 구간을 대상으로 하였으며, 총통행시간 산정에 이용된 일일 역간 승객 O/D는 2002년 5월 서울시지하철공사 AFC OD분석자료를 사용하였다.

5.2 시나리오 작성

고정폐색방식, 이동폐색방식, 고정폐색방식+Skip-stop방식,

이동폐색방식+Skip-stop방식의 4개 시나리오를 작성하였다. 시나리오 0과 1은 각역정차방식이고, 시나리오 2와 3은 Skip-stop방식과 혼용하였다. 폐색방식별로 Skip-stop방식과 혼용한 시나리오는 격역(짜 · 흡수역)정차방식과 각역정차 및 주요역 정차방식으로 세분하였고, 환승역이 있는 「시청, 을지로3가(3호선), 을지로4가(5호선), 동대문운동장(4호선), 신당(6호선), 왕십리(1호선, 5호선), 성수(지선), 건대입구(7호선), 잠실(8호선), 종합운동장(9호선), 선릉(분당선), 교대(3호선), 사당(4호선), 대림(7호선), 신도림(지선), 영등포구청(5호선), 당산(9호선), 합정(6호선)」에서는 모두 정차하는 것으로 가정하였다.

5.3 시나리오 별 효과분석

시나리오 별 특성을 살펴보면, 시나리오 0은 현 지하철 2호선의 운영상황(현황)을 나타내는 고정폐색방식이고 시나리오 1은 이동폐색방식으로 하였다. 시나리오 2와 시나리오 3은 고정폐색과 이동폐색방식을 운영계획측면에서 skip-stop방식과 혼용하여 사용할 경우 나타나는 시너지효과를 분석하였다.

시나리오 2와 시나리오 3의 폐색방식별 운영계획을 좀 더 세부적으로 나누어 보면, 시나리오 2-1과 2-2는 고정폐색방식을 시나리오 3-1과 3-2는 이동폐색방식을 적용하였다. 운영계획별로는 시나리오 2-1과 3-1은 짝수역(a)과 흡수역(b)을 격역으로 정차하는 동시에 주요환승역에서는 모두 정차하는 방식으로 분석하였고, 시나리오 2-2와 3-2는 각역정차방식(a)과 주요환승역에서만 정차하는 방식(b)으로 분석하였다. 각 시나리오별 운전시각과 환승시간 조건은 표 3과 같다.

분석결과는 위 시나리오에 따라 운행하였을 때, 표정속도, 평균통행시간, 총통행시간이 어떻게 변화하는지 살펴보았다. 각각의 결과는 표 4와 같다.

표정속도의 경우, 이동폐색방식을 적용한 시나리오 1은 현황을 나타내는 고정폐색방식의 시나리오 0보다 10km/h 증가하여 32.3% 속도향상 효과가 나타났다. 폐색방식별로 Skip-stop방식을 혼용한 경우, 이동폐색방식의 시나리오 3은 고정폐색방식의 시나리오 2보다 3~8km/h 증가하여 6.7~24.2% 향상효과가 나타났다. 48~49km/h의 가장 높은 표정속도를 보인 시나리오는 이동폐색방식과 격역정차방식을 혼용한 시나리오 3-1로서 이동폐색방식 단독 운행보다 16.7~19.5% 속

표 3. 시나리오 별 운전시각 및 환승시간 조건

	시나리오 0	시나리오 1	시나리오 2				시나리오 3			
			2-1		2-2		3-1		3-2	
운전시각(초)	150	110	짝수역	150	격역	150	짝수역	80	짝수역	80
			흡수역	150	주요역	300	흡수역	80	흡수역	300
환승시간(초)	-	-	정방향 : 150, 역방향 300							

표 4. 시나리오별 표정속도 비교

단위:km/h

시나리오	0	1	2-1(a)	3-1(a)	2-1(b)	3-1(b)	2-2(a)	3-2(a)	2-2(b)	3-2(b)
표정속도	31	41	45	48	45	49	33	41	39	45

표 5. 시나리오별 평균통행시간 비교

단위 : 분

시나리오	0	1	2-1(a)	3-1(a)	2-1(b)	3-1(b)	2-2(a)	3-2(a)	2-2(b)	3-2(b)
평균통행시간	27.51	19.17	19.23	17.50	18.18	15.95	19.99	18.96	13.90	12.70

표 6. 시나리오별 총통행시간 비교 단위 : 분

시나리오	총통행시간	시나리오	총통행시간
시나리오 0	16,237,630	시나리오 3-1(b)	3,660,724
시나리오 1	12,279,496	시나리오 2-2(a)	12,794,960
시나리오 2-1(a)	4,895,421	시나리오 3-2(a)	11,082,070
시나리오 3-1(a)	4,059,030	시나리오 2-2(b)	688,966
시나리오 2-1(b)	4,631,502	시나리오 3-2(b)	598,990

도가 향상된 결과를 도출하여 이동폐색방식의 우수성과 시너지효과가 있음을 알 수 있다.

1인당 평균통행시간의 경우, 시나리오 1은 시나리오 0보다 6분 20초 감소하여 30.3% 시간절감 효과를 보였고, 시나리오 3-1은 시나리오 2-1보다 1분 44초~2분 14초 감소하여 9~12.3% 절감효과가 나타났다. 시나리오 3-2는 시나리오 2-2보다 1분 2초~1분 12초 감소하여 5.2~8.6% 절감효과가 나타났다. 또한 표정속도와 마찬가지로 폐색방식별로 Skip-stop을 혼용하였을 때 절감효과가 더 큼을 알 수 있다.

총통행시간의 경우, 시나리오 1은 시나리오 0보다 24.4% 감소하는 시간절감 효과를 보여 이동폐색방식의 우수성을 보여주었다. 폐색방식별로 Skip-stop을 혼용하였을 때는 격역정차방식이 각역정차+주요역정차방식보다 우수한 것으로 나타났다. 고정폐색방식의 시나리오 2-1은 시나리오 2-1보다 29.3% 감소하는 절감효과가 나타났고, 이동폐색방식의 시나리오 3-1은 시나리오 3-2보다 37.8% 감소하는 절감효과가 나타났다. 또한 폐색방식별로 단독으로 운행하였을 경우와 Skip-stop과 혼용하였을 때를 비교하면 Skip-stop방식 중 격역정차방식이 각역정차+주요역정차방식 보다 절감률이 큰 것으로 나타났다. 절감률을 살펴보면, 이동폐색방식에 격역정차방식을 혼용한 시나리오 3-1은 단독으로 운행한 시나리오 1보다 37.1% 시간절감 효과를 보였고, 각역정차+주요역정차방식을 혼용한 시나리오 3-2는 시나리오 1보다 4.9% 절감효과를 보여 운영계획을 혼용할 경우, 시너지효과가 있음을 증명하고 있다. 하지만 격역정차방식인 시나리오 3-1에 비해 각역정차+주요역정차방식인 시나리오 3-2의 절감률이 5% 미만으로 큰 차이를 보이는 것은 환승시간에 따른 총통행시간의 증가가 원인으로 판단된다.

시나리오들을 비교한 결과 모든 항목에서 이동폐색방식이 고정폐색방식보다 우수한 것으로 나타났으며, 특히 이동폐색방식과 Skip-stop중 격역정차방식을 혼용한 경우에는 높은 시너지 효과가 나타남을 알 수 있었다. 하지만, 격역정차방식의 경우 동시 정차하는 환승역에서의 통합 시격이 배로 감소하여 2호선과 같은 중량전철에서는 운행의 어려움을 유발할 수 있다. 본 연구에서는 이에 따른 정류장 지체 현상의 해결방안으로 열차 출입문수 증가, 승강장 계단 분산 설치, 수직이동시설 및 다양한 동선 확보 등 정거장 및 열차 시스템 개량을 통하여 승하차 시간을 단축시킨다는 가정 하에 상기의 결과를 제시하고자 한다.

6. 결론 및 향후연구과제

본 연구의 수행은 열차운행의 신호제어시스템측면에서 기

존의 고정폐색방식보다 우수한 성능을 보이는 이동폐색 열차제어시스템을 적용하여 사례노선의 최소운전시격을 산정할 후 이를 단독 또는 Skip-stop 방식과 혼용하여 승객통행시간 절감효과를 분석하였다.

본 연구는 효과분석을 위한 사례노선 전 구간을 대상으로 시뮬레이션 하여 산출된 최소운전시격을 적용하여 분석하므로 기존 운영계획측면의 연구에서 임의로 운전시격을 변화시켜 분석한 열차의 승객통행시간 절감효과보다는 신뢰성과 현실성을 높일 수 있다.

사례분석을 위한 노선선정은 서울의 강남과 강북을 연결하는 순환노선인 동시에 도시외곽과 서울을 연결하는 주요 도시철도와 모든 환승역이 존재하는 지하철 2호선으로 선정하였다.

분석결과, 사례노선에 적용 가능한 최소운전시격은 이동폐색방식의 경우 80초, 고정폐색방식의 경우 110초로 산출되었다. 단, 이동폐색방식의 운전시격 80초는 열차운영의 여러 가지 조건 상 현실적인 운전시격과는 다소 차이가 있을 수 있다.

다음으로 총통행시간과 평균통행시간 그리고 표정속도에 대한 효과분석의 결과는 다음과 같다.

- 이동폐색방식은 고정폐색방식보다 총통행시간과 평균통행시간에서 각각 24.4%, 30.3% 절감효과가 있으며, 이를 Skip-stop방식과 혼용하여 적용할 경우, 총통행시간은 38.1~52.5%, 평균통행시간은 5.2~12.3%의 절감효과가 나타났다.
- 표정속도에 있어서도 이동폐색방식이 고정폐색방식보다 32.3% 속도향상 효과가 나타났으며, Skip-stop방식과 혼용하여 적용할 경우에는 최대 58.1%까지 속도향상 효과가 나타났다. 이와 같은 산출결과는 열차운영에 있어 물리적인 시스템 변경과 운영계획의 변화가 더 큰 시너지효과를 발휘한다는 것을 보여주고 있다.

본 연구의 향후 연구 과제로는,

1. 본 연구에서 적정운전시격 산정모형과 효과분석모형이 상호 연계되지 않아 이로 인해 발생하는 오차(error)를 고려하지 못하였다. 따라서 향후 종합적(신호시스템, 운영계획)인 시뮬레이션 발을 통해 보다 현실적인 분석이 필요하다.
2. 지하철과 도시철도를 연계(예 : 지하철 2호선+안산선)하여 적용 · 분석함으로써 서울과 수도권의 전체적인 승객이용 변화행태까지 고려할 필요가 있다.
3. 본 연구에서는 총통행시간 산정시 역간 일일 승객 O/D를 사용하였는데, 현실적으로 이동폐색방식이 가장 크게 영향을 미칠 수 있는 첨두시간대를 대상으로 분석할 필요가 있다.
4. 이동폐색방식이 적용될 때, 이와 혼용하여 분석할 수 있는 여러 가지 다른 운영계획측면(예: 정차시간단축)도 고려할 필요가 있다.
5. 고정폐색방식은 첨두시간과 같은 시간대에는 열차운행회수 및 대수를 추가적 증가 시키는데 한계가 있다. 반면, 이동폐색방식을 적용할 때는 훨씬 더 유연하게 조정할 수 있어, 열차의 고밀도운전을 실현할 수 있다. 하지만 이럴 경우, 운영지측면에서 추가적으로 소요되는 비용(전력사용

- 량, 추가적인 열차 구입 등)이 발생하므로 향후 운영자측면과 이용자측면을 함께 고려한 연구가 필요하다.
6. 이동폐색방식 적용 후 달라지는 승객의 승차거리변화를 고려하여 편익을 누리는 이용자집단을 구분하여 분석할 필요가 있다.

참고문헌

김경철(2001) 도시철도 급행서비스의 통행시간 감축효과에 대한 비교, 국토계획, 제36권 2호.

김경철(2002) 기존선 개량을 통한 도시철도 속도향상방안 기초연구, 서울시정개발연구원.

박정수(2002) 지하철 운영개선 방안에 관한 연구, 서울특별시지하철공사.

서원호(2000) 철도 Skip Stop System 구축에 관한 연구, 석사

학위논문, 서울대학교.

원제무(1997) 급행지하철의 시간절감 효과 분석 연구, 국토계획, 제32권 6호.

정동윤(1995) 도시철도 운전시격단축을 위한 이동폐색시스템 관한 연구, 석사학위논문, 서울시립대학교.

Hay, W.W. (1982) *Railroad Engineering Second Edition*, John Wiley & Sons Inc

Kikuchi, Shinya and Vuchic (1982) Transit vehicle stopping regimes and spacings, *Transportation Science*, Vol. 16, No. 3

Ref GEC ALSTHOM (1990) *Flexible Moving System*, Ref GEC ALSTHOM

TCRP REPORT 113 (1977) *Rail Transit Capacity*, TRB.

Vuchic, V. R. (1981) *Urban Public Transportation Systems and Technology*, PRENTICE-HALL

(접수일: 2006.3.2/심사일: 2006.4.17/심사완료일: 2006.6.22)