

고성능 열차를 활용한 완급행 열차 운행 스케줄 최적화 방안 연구

Study on Optimization for Scheduling of Local And Express Trains Considering the Application of High Performance Train

김무선* · 김정태 · 고경준

Moosun Kim · Jungtai Kim · Kyeongjun Ko

Abstract In express operation plans for urban trains, it is effective for the reduction of the number of sidetracks to apply a high performance train that has improved acceleration/deceleration ability and a regular train to local and express trains, respectively. In this research, based on a plan to use a high performance train for a local train, an optimization methodology is suggested to reduce the number of sidetracks and the operation time of the local train simultaneously. The optimization solver applied in this research is a genetic algorithm; headway, location of sidetrack and waiting time at the sidetrack are considered as design variables in the optimization problem. Consequently, by applying this system to Seoul metro line no.7, the effect of the suggested methodology was verified by obtaining the proper optimum solution.

Keywords : Express/local, High performance train, Sidetrack, Optimization, Genetic algorithm

초 록 기존 도시철도의 급행화 방안으로 가감속도가 향상된 고성능 열차를 완행에 투입하고 기존 성능의 열차를 급행에 투입하는 방안은 대피선 수를 줄이는 효과를 가진다. 본 연구에서는 고성능 열차를 완행으로 투입하는 급행화 방안을 토대로, 대피선 수를 최소화하면서 완행 열차의 운행시간을 최소화 할 수 있는 동시 최적화 방안을 제안하였다. 최적화 방안은 유전알고리즘을 기반으로 하여 차두시간, 대피선 위치 및 대피 시간을 설계 변수로 정의하였다. 결과적으로 제안한 최적화 방법론을 서울 7호선에 적용하여 타당한 최적화 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

주요어 : 급행/완행, 고성능 전동차, 대피선, 최적화, 유전알고리즘

1. 서 론

현재 우리나라 수도권은 인구증가 및 주요산업의 집중으로 인하여 광역화가 빠르게 진행되고 있으며, 그 결과로 수도권 인구의 출퇴근 시간은 증대하고 있다. 이를 계기로 수도권 산업인구의 출퇴근 시간을 단축할 수 있는 교통체계가 절실히 요구되고 있으며, 그 일환으로 도시철도의 급행화에 관한 관심이 집중되고 있다. 도시 철도는 타 교통수단 대비 장점이라 할 수 있는 정시성을 특징으로 하지만, Fig. 1[1]의 OECD 국가별 출퇴근 소요시간과 교통수단별 부담율을 살펴보면, 서울의 경우 도시철도의 수송분담율이 세계 주요 대도시에 비해 현저히 떨어진다. 그 이유로는 수도권 광역도시철도의 노선우회도가 높으며 역간 거리가 짧아 타 교통수단 대비하여 속도 경쟁력이 떨어지기 때문이다. 이를 해결하기 위해서는, 표정속도를 향상시킨 급행열차 시스템 도입이 필요하다. 기존 도시철도 시스템에서 급행화를 도입하기 위해서는 완행 열차가 대피할 수 있는 대피선 설치가 필수인데, 기존 선로에서 대피선을 분기하여 설치하는 경우, 공사비 뿐만 아니라, 기존 열차 운영과의 간섭을 피해야 하는 제약이 따른다. 이러한 제약을 최소화 할 수 있는 방안중의 하나로서, 대피선 설치 횟수를 최소화 할 수 있도록, 가감속도가 향상된 고성능 열차를 투입하는 것을 고려할 수 있다. 이 경우, 고성능 열차를 완행에 투입해야 대피선 개수를 줄일 수 있으며, 또한 급행 열차 통과를 위해 완행열차가 대피하는 시간만큼의 손해를 상쇄할 수 있는 효과도 더불어 거둘 수 있다. 이러한 급행화 방안을 실현하기 위해서는 고성능 전동차 기술 개발 및 대피선로 설치 등 구체적인 기술방안 등이 함께 고려되어야 할 것이다. 그 중, 고성능 전동차의 주요 기술 중 하나인 가감속도 향상 기술은, 승객의 안전에 직접적인 영향을 미치는 요소이므로, 탑승 안전성을 확보할 수 있도록 심도 있는 연구가 필수적이다. 또한 감속도 향상에 따른 정위치 정차 성능 향상 기술 개발도 필요

*Corresponding author. Tel.: +82-31-460-5546, E-mail: mskim@krri.re.kr.

© 2016 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2016.19.2.234>

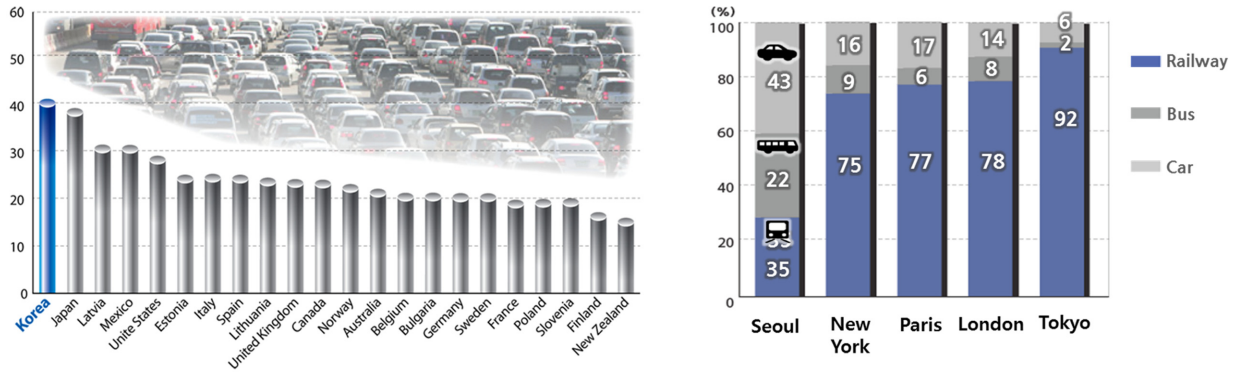


Fig. 1. Comparison of commuting time of OECD member nations and transport usage for main cities.

하다. 하지만, 그에 앞서 경제적인 급행화를 진행하기 위하여 적절한 대피선의 지정 검토가 필요하며, 운행시간의 단축효과에 대한 선행연구가 진행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는, 운행시간 단축 및 기존 시설을 대피선으로 활용할 때, 대피선 개수를 최소화할 수 있는 최적의 완급행 운영 방식을 수립할 수 있도록, 최적화 알고리즘을 제안하고자 한다.

2. 본 론

2.1 급행화 및 스케줄링 기술 연구 동향

대표적인 급행화 연구로는, 1990년대 후반 서울시 지하철 구간을 대상으로 Skip-Stop 방식, 논스톱 및 복합시스템의 급행화 방식을 소개한 연구[2]와 급행 지하철 이용의 통행 특성 및 분석을 통한 통행시간 단축효과에 관한 연구[3]가 진행되었다. 2000년대 들어, 지하철 전구간으로 연구 범위를 넓히고 대피선 및 추가 노선 설치를 통한 급행화 연구가 주로 이루어졌는데, Fujita 등[4,5]은 서울시 지하철의 급행화 방안 분석 및 서울역~수원 노선과 오사카~교토간 완급행 현황을 비교하였다. 정수영 등[6]은 김포도시철도의 현황 및 급행열차 운행방안에 대하여 검토하였고, 김재만[7]은 해외사례를 통한 국내 급행광역철도의 효과를 분석하였다. 김경철 등[8]은 급행열차 도입 노선 선정의 방법론을 제시하였고, 신용은[9]은 급행화 효과에 대한 분석을 진행하였다. 또한 김무선 등[1]은 고성능 전동차를 투입하여 대피선 최소화를 고려한 급행화 방안 연구를 진행하였고, 김정태 등[10]은 급행열차의 승차차 시간 단축을 위한 광폭출입문 효과 분석을 수행하였다. 권오현 등[11]은 급행열차의 최적화 된 정차역을 결정하는 방법론에 관하여 연구하였다. 다음으로, 열차 운영 스케줄링을 위한 최적화 연구로는, D'Ariano 등[12]이 메타휴리스틱(Meta-heuristic) 기반 알고리즘이 적용된 'ROMA(Railway traffic Optimization by Means of Alternative graphs)' 스케줄링 시스템을 제안하였으며, Tomii 등[13]은 PERT(Program Evaluation and Review Technique) 및 메타휴리스틱 기법 기반 알고리즘을 적용하여 스케줄링 최적화기법을 연구하였다. 휴리스틱 기법 결과의 최적해는 기법 특성상 엄밀해 보장이 어려우나 MIP(Mixed Integer Programming)기법은 정확한 해를 구하기가 수월한 반면, 계산 시간이 문제 사이즈에 좌우되는 단점이 있다. MIP 기법 적용 연구로는 Walker 등[14]이 열차 스케줄링과 기관사 근무시간을 동시에 고려한 최적화 연구를 수행하였고, Rodriguez[15]는 교차점에서 열차 안전운행을 위한 스케줄링 최적화 기법에 관하여 연구하였다. 또한 Ginkel등[16]은 다중 목적 함수를 다루는 최적화 기법을 제안하였고, Sato 등[17]은 승객 불편도를 최소화 할 수 있는 리스케줄링(rescheduling)의 최적화 기법을 연구하였다. 위와 같이 스케줄링 관련하여 다양한 최적화 연구가 진행된 반면, 기존 시설의 급행화 구현시 대피선 등의 최소화 등을 고려한 스케줄링 최적화 기법에 관한 연구는 전무한 실정이다. 이번 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이, 고성능 전동차를 투입한다는 가정하에 서울 도시철도 특정 노선에 대하여 기존 시설을 대피선으로 활용하면서 그 대피 횟수를 최소화 하고, 동시에 완행열차의 운영시간을 최소화 하는 완급행 운영방안을 확보할 수 있는 최적화 알고리즘에 관한 연구를 수행하였다.

2.2 고성능 전동차를 활용한 급행화 구현 방안

일반적인 급행화 방안은 급행열차와 완행열차가 교차하는 지점에 대피선을 지정하여, 교차시 완행열차가 급행열차 통과 때까지 대피선에서 대기하는 형태이다. 서울 지하철 9호선은 노선 설계시부터 급행화를 고려한 체계적인 계획에 따라, 대피선을 지정하여 노선 신설을 진행하였다. 따라서 9호선의 경우 대피선 건설에 대한 공사비 부담이 적었던 반면, 기존 노선에 대피선을 설치하는 경우에는 비용의 증가뿐만 아니라, 지하구간 노선에서의 열차 운영에 대한 지장까지 고려하여야 한다. 결국 기존노선

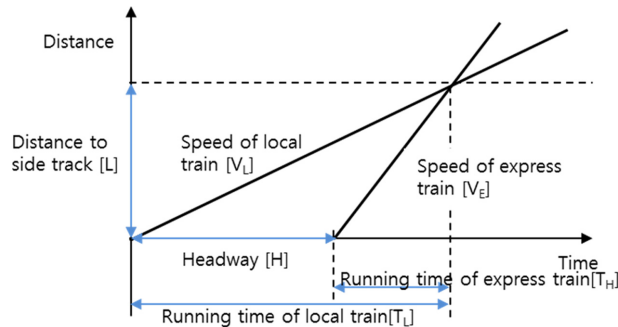


Fig. 2. Correlation between speed and distance of local and express trains.

에 급행화를 구현하기 위해서는 가능한 한 대피선 신설의 부담을 줄여야 한다. 대피선 신설 최소화를 위한 접근 방법중의 하나로, 기존 시설을 대피선으로 이용하는 방법을 고려할 수 있다. 예로, 각 노선에는 열차를 주차시키거나 일시적으로 대피할 수 있는 Y대피선이 갖춰져 있는데 이를 개량하여 급행화 대피선으로 이용하는 방안이다. 다음으로는, 완행과 급행의 교차 횟수를 근본적으로 줄이는 방안이다. 이를 위해서는 완행이 급행을 추종하는 속도를 높여야 한다. 이 경우에는 대피선 개수를 줄이는 효과뿐만 아니라, 대피에 따른 완행 운행 소요시간의 증가를 상쇄할 수 있는 효과를 동시에 얻을 수 있다. 완행의 추종속도 향상을 위한 방법으로는 완행 열차의 가감속도 성능 향상을 고려할 수 있다.

Fig. 2에 완행과 급행 열차의 표정 속도 및 교차지점까지의 거리에 관한 상관관계를 도식화 하였다. 시격(H)는 교차지점까지의 완행열차 주행시간(T_L)과 급행열차 주행시간(T_E)의 차이로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H = T_L - T_E = \frac{L}{V_L} - \frac{L}{V_E} \tag{1}$$

$$L = \frac{V_L \times V_E}{V_E - V_L} H$$

식(1)에서 대피선까지의 거리인 L 은 V_E (급행열차 표정속도)와 H 가 일정하다는 가정하에 V_L (완행열차 표정속도)이 커질수록 증가하게 된다. 이는 완행열차의 표정속도가 증가하게 되면 완행열차와 급행열차 교차지점까지의 거리가 증가하게 되며, 이에 따라 대피선 설치 간격이 넓어지게 되어 결론적으로 대피선 설치 횟수를 줄일 수 있게 된다. 고성능 전동차의 또 하나의 전제 조건은 김정태 등[10]이 연구한 바와 같이 광폭출입문을 적용하는 것이다. 연구 결과에 따르면, 현재 1,300mm로 제작되는 출입문 크기를 1,800mm로 확대하는 경우, 승하차 시간의 효과는 혼잡도 200%를 기준으로 약 20%의 단축효과가 있다. 따라서 고성능 전동차의 운행시간 단축에 광폭 출입문 적용에 따른 승하차 시간 절감을 고려하는 것이 타당함을 알 수 있다.

2.3 급행화 방안 최적화 알고리즘

2.3.1 급행화 방안 최적화를 위한 함수 정의

앞서 언급한 바와 같이 급행화 방안의 최적화를 진행하는 목적은 기존 노선에서 급행화를 구현하고자 할 때 비용과 직결되는 대피선 수를 최소화하고 동시에 완행 운영시간을 최소화 하기 위함이다. 문제 해결을 위한 최적화 알고리즘 적용을 위하여 설계 변수와 구속조건 및 목적함수를 우선 정의하여야 한다. 급행화 운영방안의 변수로서 고려할 수 있는 사항은, 열차의 성능 조건이 일정하다는 가정하에, 급행과 완행의 시격, 급행 정차역 위치, 대피선 위치 등이 있다. 그 중 급행 정차역의 선정은 승객 수요 등을 고려하여 지정해야 하는 사항으로, 급행운영 방안 수립시 가장 중요한 사항이기도 하다. 또한 다른 변수들과 같이 고려하여 최적화를 진행할 경우 최적화 프로그램의 복잡성 때문에 별도의 최적화 문제로 진행하는 것이 효율적이다. 따라서 이번 연구에서는 급행정차역의 위치가 선정되어 있다는 전제하에 진행하였다. 이번 최적화 문제는 기존 시설을 대피선으로 활용하는 조건때문에 대피선 설치 위치가 제한적이다. 이로 인하여 타당성 있는 최적화 해법을 구하는 게 물리적으로 불가능한 경우가 발생할 수 있는데 열차간 시격을 조절함으로써 어느 정도의 여유 해법을 찾을 수 있다. 하지만 열차 출발 시격에도 제한된 범위가 있으므로 완전한 해법이 될 수는 없으므로 이러한 문제점 해결을 위하여 열차 출발 시격과 더불어 대피선에서의 완행열차 대피 시간도 설계 변수로 고려하였다. 또한, 완급행 혼합 열차 운영시 열차간 일정 폐색 구간을 유지하여야 하는데, 각 역마다 폐색구간의 거리가 상이하므로, 열차간의 최소 시간간격을 지정함으로써 열차간 최소 거리 유지를 대체하였다.

$$\bar{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) \quad (2)$$

x_1 : local train – expresstrainhead way, x_2 : express train – local trainhead way, x_m : waiting time at $(m-2)$ th side track, where $3 \leq m \leq (2 + \text{the number of side tracks})$.

정리하면, 최적화 문제의 설계 변수로서, 완급행 열차의 시격, 대피선 위치, 그리고 대피선에서 완행열차의 대피시간으로 정의하였으며, 구속조건으로는 급행과 완행의 폐색구간 유지를 일정 시간 간격 유지로 대체하여 정의하였다. 이 때 열차간 최소 시간 간격은 1분으로 지정하였다. 설계 변수는 식(2)와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \text{Min } F(\bar{x}) &= T_l \\ \text{Subject to } &\begin{cases} T_{an, wl} + 1 \text{ min} \leq T_{an, e} \leq T_{dn, wl} - 1 \text{ min}, & \text{if crossing at } n\text{th station with side track} \\ T_{dn, pl} + 1 \text{ min} \leq T_{an, e} \text{ and } T_{dn, e} \leq T_{an, fl} - 1 \text{ min}, & \text{otherwise} \end{cases} \\ &\text{and } T_{dn, pl} + 1 \text{ min} \leq T_{an, fl} \end{aligned} \quad (3)$$

where $F(\bar{x})$: total traveling time of local train (T_l), T_{dn} : departure time at n th station, T_{an} : arriving time at n th station, pl : preceding local train, fl : following local train, wl : waiting local train, e : express train.

식(3)에는 이번 최적화 문제의 목적함수를 정의하였다. 목적함수는 완행열차의 총 운행시간으로 정의할 수 있는데, 대피선의 개수가 늘어날수록 완행 운행시간도 증가하게 되므로, 완행 운행시간의 최소화가 대피선 개수의 최소화와 연계되어 있다고 볼 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 열차간 최소 시간 간격을 1분으로 지정한 구속조건을 식(3)에 나타내었는데, n 번째 정차역에 대피선이 위치한 경우, 급행열차가 지나가기 전에 완행열차는 최소 1분 앞서 도착하여 대기하고 있어야 하며, 급행열차가 지나간 후 역시 최소 1분 이상을 대기하고 있어야 한다. 일반 정차역의 경우, 급행열차는 앞선 완행열차가 출발한 후 최소 1분 이후에 도착하여야 하며, 급행열차를 추종하는 완행열차는 급행열차가 출발한 후 최소 1분 이후에 도착하여야 한다. 또한 대피중인 완행이 대피선을 떠난 최소 1분 후에 다음 완행열차가 도착하여야 한다.

2.3.2 유전 알고리즘

문제 해결을 위한 최적화 알고리즘의 풀이 기법으로 유전 알고리즘을 적용하였다. 유전 알고리즘은 heuristic algorithm의 하나로써, 함수내의 상관관계가 불명확한 경우 해법을 찾는데 유용하다. 그리고 지역최적해(local solution)를 벗어나는 전역 최적해(global solution)를 찾는데 적합한 알고리즘이다. 다만 항상 정확하게 엄밀해를 찾기에는 제한이 있다. 하지만 열차의 스케줄링 문제와 같이 복잡도가 높은 문제에서는 많은 연구에서 유용하게 쓰이고 있다.

유전알고리즘은 생태계의 세대에 걸친 유전학적 특성 전달에 관한 자연현상을 모사한 기법으로서, 세대를 걸치면서 우성 인자의 유전학적 특성이 살아남는 확률이 크다는 것을 이용한 기법이다.

유전 알고리즘을 적용하기 위해서는 가장 먼저, 임의의 해들로 이루어진 모집단을 구성하는 것부터 시작한다. 모집단의 구성 원인 개별해는 일반적으로 이진수의 형태로 표현되는데, 다중 설계변수를 고려하는 경우 각 해당값을 이진수로 전환 후 연계하여 배열함으로써 하나의 개별해를 이루게 된다. 다음으로 모집단 내 각 개별해에 해당하는 적합도 함수 값을 구하게 된다. 적합도 함수(목적함수)의 값들을 기반으로, 모집단의 개별해들을 내림차순으로 정렬하고, 선택 확률로 해를 추출하는 선택(selection) 단계를 거치게 되면, 상대적으로 우수한 적합도를 갖는 해들이 선택되어 지는데, 이 때 가장 우수한 적합도를 가진 해는 다음 세대로 전달되는 엘리트즘(elitism)을 적용 할 수 있다. 다음으로 선택 단계를 거친 해들 중에서 두 개의 부모해를 추출하여 임의의 교차점을 기준으로 유전 띠를 교환하는 교배(crossover) 단계를 거치며, 미리 정해놓은 확률에 따라 돌연변이(mutation)를 적용할 수 있다. 그리고 다음 세대로 이어지는 자식해들로 구성된 새로운 모집단이 만들어지며, 위와 같은 단계를 반복하게 된다. 최종적으로, 세대 반복에 걸쳐 진화하는 개별해의 수렴 여부에 따라 알고리즘 진행을 멈추게 된다.

2.3.3 최적화 적용 노선 검토 및 TPS 프로그램 구성

완급행 최적화 운영방안을 적용할 노선으로 서울시 2기 지하철 7호선을 검토하였다.

먼저 Fig. 3에 7호선의 노선도 및 최적화 운영방안을 도출하기 위하여 이번 연구에서 급행정차역으로 지정한 역들을 표시하였다. 급행정차역 지정은 환승역은 기본으로 정차하도록 하며, 급행열차 정차역 사이의 통과역 수가 2개 이내가 되도록 임의로

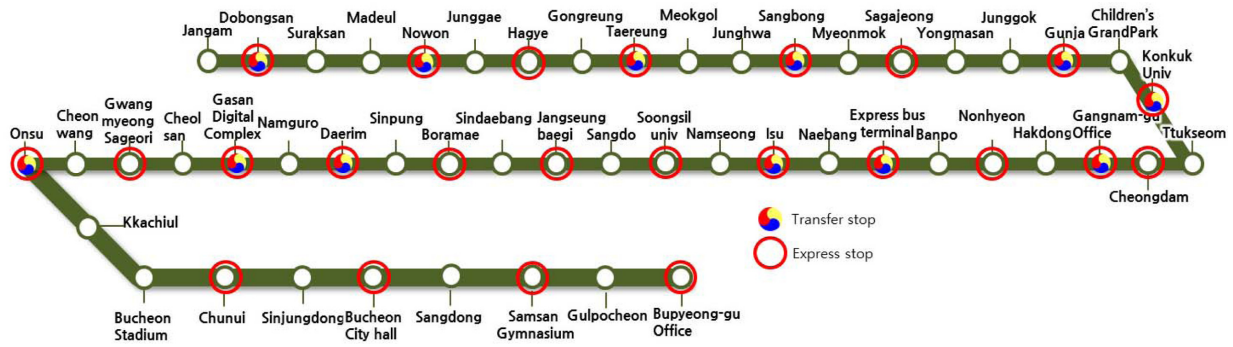


Fig. 3. Subway map of line no.7 and express train stops.

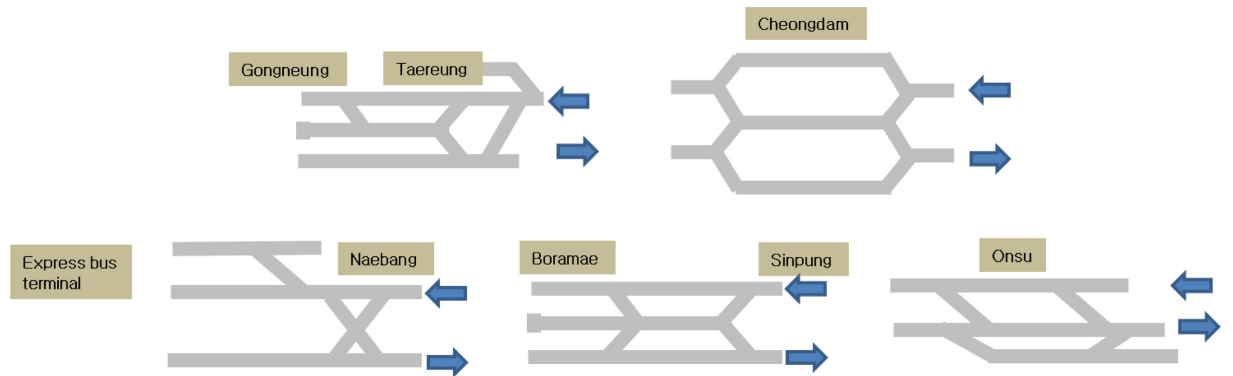


Fig. 4. Schematic outline of Y branch line.

선정하였다.

7호선 노선 중 대피선 또는 Y분기선이 갖춰져 있거나 향후 개량을 통해 Y분기선을 갖출 수 있는, 대피선으로 고려한 5개 구간의 현황은 Fig. 4와 같다.

각 파라미터에 관한 운영시간 검토 및 효과 등을 분석하기 위하여 열차주행시물레이션(TPS) 프로그램을 활용하였다. 분석에 쓰인 TPS는 매트랩을 활용하여 자체 개발한 프로그램이며, 입력 정보로 실제 역간 거리, 운행구간별 거리와 구간별 속도, 운행시각 등을 고려할 수 있고 대피선에 대한 대피소요시간을 고려할 수 있도록 프로그래밍하였다[9]. 열차의 성능은 급행열차의 경우 최고속도와 가감속도를 80km/h와 3/3.5km/h/s로 정의하였고, 완행열차의 경우 가감속 성능이 향상된 고성능 전동차를 투입한다는 전제하에 80km/h 및 5.4/5.2km/h/s로 정의하였다. 정차역에서의 정차시간은 급행열차 30초, 광폭출입문이 적용된 완행열차 25초로 지정하여 해석을 수행하였다. 그리고 해석에서 고려한 운행구간은 하행노선인 도봉산 역에서 부평구청역까지이다.

2.3.4 유전 알고리즘 적용 방안

앞서 언급한 바와 같이, 이번 7호선의 완급행 최적화 문제 설계 변수로 완급행 열차의 시각과 대피선에서의 대피 시간을 고려한다. 대피선으로서 가능한 구간은 5개 구간으로 정의하였으므로, 총 7개의 설계변수가 필요하다. 알고리즘 적용을 위해 완행-급행 그리고 급행-완행의 시각 x_1 , x_2 는 최소 1분에서 최대 6분 사이에 30초 간격으로 값을 가지며, 각 대피선에서의 대피시간 x_3 (공릉~태릉), x_4 (청담), x_5 (고속버스 터미널~내방), x_6 (보라매~신풍), x_7 (온수)은 최소 0분에서 최대 4분사이 30초 간격으로 값을 가지는 것으로 제약하였다. 대피시간이 0분인 경우, 이는 급행과의 교차가 발생하지 않는, 즉 대피선으로서의 역할이 필요치 않음을 의미한다.

급행의 운행소요시간은 열차 성능과 급행정차역이 정해져 있고, 대피선의 영향을 받지 않으므로, 설계변수 값에 상관 없이 일정한 값을 가지게 된다. 하지만 완행 소요시간은 대피선의 개수와 대피시간에 영향을 받으므로 최소화해야 하는 목적함수로 정의할 수 있다. 완행 소요시간을 식(3)에서의 $F(\bar{x})$ 로 정의하였는데, 이 때의 구조조건은 열차간 폐색구간의 거리, 즉 앞뒤 열차간의 시간간격이 최소 1분을 유지해야 한다는 것이다.

$$MinF(\bar{x}) = T_l + \sum_{i=1}^n (C_1 S_{1,i} + C_2 S_{2,i} + C_3 S_{3,i}) \quad (4)$$

subject to $S_{1,i}, S_{2,i}, S_{3,i} \in \{1, 0\}$

where C_1, C_2, C_3 : penalty constant

S_1 : decision variable to check valid time interval between previous and present trains at i th stop

(1 = invalid time interval, 0 = valid time interval)

S_2 : decision variable to check partly crossing of local and express trains at i th stop

(1 = partly crossing at i th stop, 0 = otherwise)

S_3 : decision variable to check valid crossing of local and express trains at i th stop

(1 = crossing at i th stop without side track, 0 = otherwise)

최적화 알고리즘에서 구속조건을 다루는 방법은, 어떤 해가 구속조건을 만족치 않은 경우 해를 버리고 새로운 해를 구성하거나, 또는 구속조건의 위반 정도에 따라 목적함수에 벌칙항(penalty)을 추가하는 방안이 있다. 이 때 구속조건을 어기더라도 벌칙항으로 목적함수에 반영이 되며, 이는 각 해가 가질 수 있는 최적해와의 근접성을 버리지 않고 고려할 수 있다는 장점이 있다.

따라서 이번 연구에서는 완행소요시간의 목적함수에 열차간 시간간격 유지의 구속조건을 벗어난 해의 고려를 위해 벌칙항을 추가하는 목적함수로 식(4)와 같이 새로이 정의한다.

식(4)에서 정의된 벌칙 함수는 결정변수 S 를 포함하여 완행이 정차하는 각 역에서 결정변수 적용여부를 판단하게 된다. S_1 은 정차역에서 이전 지나간 열차와 현재 지나가는 열차의 시간 간격에 관한 벌칙항을 부여하는 항목과 관련된다. 운행 열차 사이의 시간간격을 최소 1분으로 정의함에 따라 그 시간간격이 지켜지지 않은 경우 이 벌칙항이 적용된다. S_2 는 완행과 급행의 교차형태에 관한 벌칙항과 관련된 결정변수이다. 교차하되 부분적으로 교차하는 경우 벌칙항이 주어지게 된다. 마지막 S_3 는 급행과 완행의 교차가 대피선에서 발생하는지에 관한 결정변수이다. 이 항목에 따라 대피선이 위치하지 않는 i 번째 역에서 완급행 교차가 발생하면 벌칙항으로 목적함수에 반영된다. 각 결정변수에 관한 상황설명을 Fig. 5에 순서대로 도시하였다.

C_1, C_2, C_3 는 관련된 각 벌칙항의 상대적인 중요도를 결정하는 가중치이다. 앞서 정의한 바와 같이 벌칙항은 시간의 함수값으로 정의했는데, 이번 최적화 문제의 목적함수에서 완행운행시간과 대피선 횟수를 최소화하는 것이 목표이므로 각 개별해에서 구속조건을 벗어난 상황이 발생하게 되면 시간함수인 벌칙항으로 구현되어 목적함수의 시간값을 증가시킨다.

이상으로 정의한 최적화 문제를 유전알고리즘에 적용하기 위하여, x_1, x_2 는 각각 최소 1분에서 최대 6분 사이에 30초 간격씩 매칭되도록 0에서 10까지 11개의 정수로 정의하고, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7 은 최소 0분에서 최대 4분 사이에 30초 간격씩 매칭되도록 0에서 8까지 9개의 정수로 정의하였다. 최적화 해석은 매트랩의 정수 프로그래밍 기법을 활용한 유전알고리즘 기법을 적용하여 수행하였다.

2.4 최적화 결과 분석

완급행 열차 운행 스케줄 문제 풀이를 위해, 제한한 최적화 알고리즘을 유전알고리즘에 적용하여 최적해를 추적하였다. 해석 조건은 개별해로 30개, 세대 반복은 60번으로 지정하였다. 유전알고리즘의 세부 옵션으로 스케일링(scaling) 함수는 rank 함수를, 선택 함수는 stochastic uniform 함수를 적용하였으며, 엘리티즘 적용하는 2개로 제한하였다. 또한 교배율은 0.8로 정의하였으며, 교배시 scattered 방식을 적용하였다. 식(4)에서 벌칙항 상수 C_1, C_2, C_3 에 각 10, 20, 30의 가중치를 두어 해석을 진행하였다. 계산시간은 30개 개별해의 60세대 반복기준으로 약 60분이 소요되었다. 계산 결과로 최적화 해석에서 구해진 최적해에

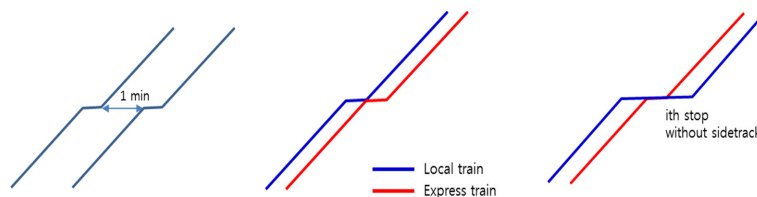


Fig. 5. Cases concerning decision variables S_1, S_2 and S_3 .

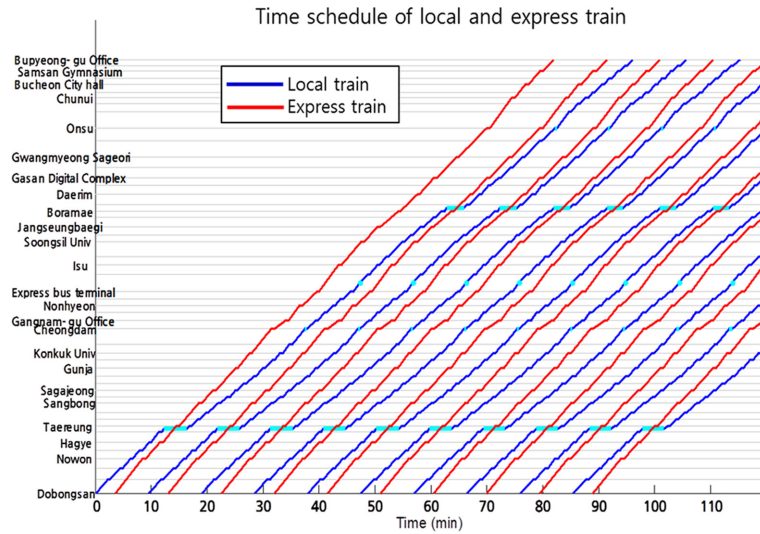


Fig. 6. Time schedule of local and express trains obtained by applying the optimum solution.

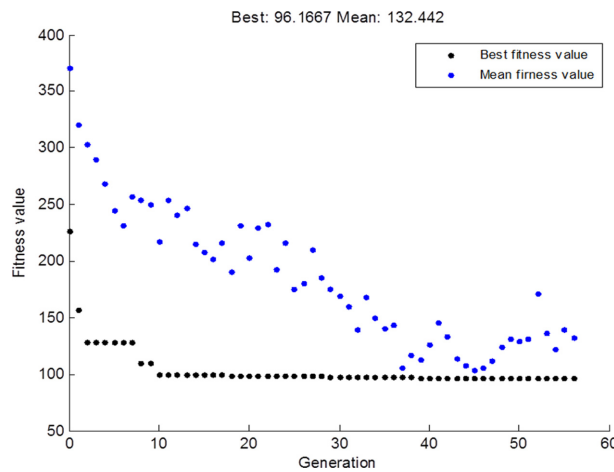


Fig. 7. Convergence of optimum solution.

해당하는 열차 운행스케줄을 Fig. 6에 도시하였다.

먼저 유전알고리즘으로부터 도출된 최적해에 관하여 살펴보면, 시격은 완급행 3.5분, 완급행 6분을 가지며 대피선은 공릉~태릉, 보라매~신풍 구간에서 각 4분 및 3분의 대피시간이 정의되었음을 알 수 있다. 또한 사용되지 않은 대피선 구간에서는, 대피선이 역에 위치하는 경우 완행열차가 기본 시간만 정차하거나, 역과 역 사이에 위치하는 경우에는 통과하였다. 그리고 선형 열차와 추종열차의 시간간격이 모든 구간에서 1분 미만으로 들어오지 않음을 확인할 수 있다.

열차 운행스케줄 결과를 살펴보면 급행열차 운영시간은 78.5분, 완행열차의 운영시간은 96분으로 확인되었다. 이는 도봉산에서 부평구청까지 정상적 운행시간인 100분보다 각각 21.5%와 4% 단축된 시간이다. 급행의 경우 시간 단축 효과는 당연한 결과이지만, 완행의 경우 급행열차 통과를 위해 2번의 대피를 고려했음에도 불구하고, 오히려 운행시간은 더 짧아졌다. 이는 서두에서 언급한 바와 같이 완행열차에 적용한 고성능 열차의 가감속이 증대된 성능에 의해 완행열차의 실제 표정속도는 향상됐음을 알 수 있다. 따라서, 고성능 열차를 완행에 투입한다는 가정하에, 필요한 대피선 개수를 줄이면서 동시에 완행열차의 운영시간도 단축할 수 있음을 확인하였다.

다음으로 문제에서 정의한 유전알고리즘이 최적해를 구한 경로에 대해 살펴보자. Fig. 7에 세대의 흐름에 따른 최적해 추적 경로를 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 세대를 거듭할수록 각 세대의 최적해 목적함수 값과 개별해의 목적함수 평균값이 점점 작아짐을 알 수 있다. 최적해의 경우, 초기 세대에서의 목적함수 값은 구속조건을 벗어나는 벌칙항의 영향 때문에 큰 값을 가지는 반면에 약 10세대 이후부터 구속조건을 만족하면서 목적함수 값의 수렴성을 보이며, 40세대 이후부터 최종 최적

해의 값에 수렴하였다.

이상으로, 완급행 열차 운행 방안의 최적해를 적용한 운행스케줄을 살펴보고, 제안한 최적화 알고리즘이 완급행 운영방안의 최적해를 효과적으로 찾을 수 있었다.

3. 결 론

이번 연구에서는 기존노선에 적용하여 완급행 열차를 운영하고자 할 때, 요구되는 대피선 수를 줄이고, 동시에 완행열차 운행시간의 최소화가 가능한 운영방안을 찾을 수 있는 최적화 방법론을 제안하였으며, 그 결과에 대한 타당성을 검토하였다. 대피선은 현재 노선에 갖춰져 있는 Y 분기선을 활용하는 것으로 가정하여 대피선 신설을 최대한 회피하였으며, 완행열차에는 가감속도가 향상되고 광폭출입문이 적용된 고성능 열차의 투입을 고려하였다.

최적운영방안 도출을 위한 목적함수는 완행열차의 총 운행시간으로 정의하였으며, 열차간 시간 간격 유지, 완급행 교차 지점의 타당성 등 구속조건의 적용을 위해 벌칙항을 새롭게 정의하여 목적함수에 포함하였다. 또한 설계 변수로는 열차간 시격과 각 대피선에서의 대피시간으로 정의함으로써 대피선 위치를 고려할 수 있도록 하였다. 최적화 구현은 유전알고리즘을 적용하였으며, 해석 결과로부터 얻어진 최적해를 적용한 열차 운행 스케줄 결과로부터 최적해의 타당성을 확인하였고, 제안한 최적화 알고리즘 정의가 효과적임을 알 수 있었다.

지금까지 본 연구에서 고려한 최적화 방법론은 일방향 운행만을 고려하였는데 향후 실질적인 현장 적용을 위해서는 양방향 운행까지 고려한 알고리즘 확장이 필요하다. 그리고 프로그램의 중량을 줄이기 위해 열차간 폐색구간을 최소 시간간격으로 대체한 사항에 대해서, 정확한 노선 정보를 바탕으로 각 구간의 특정치로 정의하여 프로그램 결과의 정확도를 높일 필요가 있다. 그 외에, 출퇴근이 집중된 혼잡시간대와 일반시간대의 운영방안을 차별화하여 혼잡도에 따른 운영방안의 원활한 연계에 관한 고려도 필요할 것이다.

이와 더불어, 완급행 운영 전제조건으로 고려한 고성능 열차의 개발을 위해서는 가감속 성능 향상이 기반이 되므로, 그에 따른 주행 안정성 및 정위치 정차 제어 성능의 향상 기술 개발이 뒤따라야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] M.S. Kim, J.T. Kim, T.S. Kim, S.S. Park, J.S. Hong, Y.H. Cho, J.H. Min (2013) Study of the Metropolitan Rapid Transport System to Minimize Sidetrack Construction, *Journal of the Korean Society for Railway*, 16(5), pp.1-8.
- [2] J.M. Won, J.H. Hwang (1997) An analysis on time saving effects of urban express rail systems, *Journal of Korea Planners Association*, 32(6), pp.121-130.
- [3] G.C. Kim, W.H. Kim (1998) A effects of passenger's time saving on express subway systems, *Proceedings of the Conference of the Korean Society for Railway*, Seoul, pp.160-171.
- [4] T. Fujita, H.J. Roh, G.C. Kim (2004) A study on implementation of rapid service in urban railway (In Seoul metropolitan area), *Proceedings of the Conference of the Korean Society for Railway*, Gyeongju, 6, pp.144-149.
- [5] T. Fujita, H.J. Roh, G.C. Kim (2004) A study on development of operation planning for rapid service in urban railway (An introduction), *Proceedings of the Conference of the Korean Society for Railway*, Gyeongju, 6, pp.165-170.
- [6] S.Y. Chung, J.B. Lee, J.S. Lee, B.G. Lim (2010) A review on the operation of high speed train on urban regions, *Proceedings of the Conference of the Korean Society for Railway*, Changwon, 7, pp.98-103.
- [7] C.M. Kim (2010) A study on functional positioning and effective analysis of great train express, *Report of Gyeonggi Research Institute*, 39, pp.3-98.
- [8] G.C. Kim, Y.J. Kim (2002) The analysis of effects on express subway service in the Seoul metropolitan area, *Seoul Studies*, 3(1), pp.69-80.
- [9] Y.E. Shin (2003) Effects of accelerated transit operation, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 23(6D), pp.745-751.
- [10] J.T. Kim, M.S. Kim, J.S. Hong, Y.H. Cho, T.S. Kim (2014) An Analysis of Boarding and Alighting Times for Urban Railway Vehicles, *Journal of the Korean Society for Railway*, 17(3), pp.210-215.

- [11] O.H. Kwon, M.H. Kim, S.M. Rhee, K.S. Chon (2011) A method for optimal express train stop scheduling using station OD data, *Proceedings of the Conference of the Korean Society for Railway*, Jeju, pp.1810-1815.
- [12] A. D'Ariano, F. Corman, D. Pacciarelli, M. Pranzo (2008) Reordering and local rerouting strategies to manage train traffic in real time. *Transportation Science*, 42(4), pp.405-419.
- [13] N. Tomii, Y. Tashiro, N. Tanabe, C. Hirai, K. Muraki (2005) Train rescheduling algorithm which minimizes passengers' dissatisfaction. *Innovations in Applied Artificial Intelligence, Lecture Notes in Computer Science*, 3533. Springer, Berlin, pp. 829-838.
- [14] C.G. Walker, J.N. Snowdon, D.M. Ryan (2005) Simultaneous disruption recovery of a train timetable and crew roster in real time. *Computers & Operations Research*, 32(8), pp. 2077-2094.
- [15] J. Rodriguez (2007) A constraint programming model for real-time train scheduling at junctions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(2), pp. 231-245.
- [16] A. Ginkel, A. Schobel (2007) To wait or not to wait? The bicriteria delay management problem in public transportation. *Transportation Science*, 41(4), pp. 527-538.
- [17] K. Sato, K. Tamura, N. Tomii (2013) A MIP-based timetable rescheduling formulation and algorithm minimizing further inconvenience to passengers, *Journal of Rail Transportation Planning & Management*, 3(3), pp. 38-53.

(Received 2 October 2015; Revised 18 November 2015; Accepted 8 January 2016)

Moosun Kim: mskim@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, #176 Cheoldo bakmulkwan-ro Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Jungtai Kim: jtkim@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, #176 Cheoldo bakmulkwan-ro Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Kyeongjun Ko : kkj8000@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, #176 Cheoldo bakmulkwan-ro Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea