

■ 論 文 ■

대피선 설치를 통한 수도권 광역철도 급행화 방안

Mixed Operation with Express Train for Urban Railways in Seoul Metropolitan Area

손 기 민

(서울시정개발연구원 연구위원)

목 차

- I. 서론
 - II. 기술사항 검토
 - 1. 운전선도 작성
 - 2. 열차제어체계
 - 3. 최소운전시격
 - 4. 급완행 교행 시 안전시격
 - III. 급완행 혼합운행 스케줄링
 - 1. 전제 사항
 - 2. 모형구축
 - 3. 풀이 알고리즘
 - IV. 사례연구 : 안산선을 대상으로
 - 1. 급행 정차 대안
 - 2. 운전시분 초기값 결정
 - 3. 안전시격 산출
 - 4. 분석 대안 구성
 - 5. 분석 방법
 - 6. 분석 결과
 - V. 결론 및 향후 연구과제
- 참고문헌

Key Words : 급행열차, 운전선도, TPS 시뮬레이션, 열차 스케줄, Branch & Bound, 대피선 Railway Operation, Branch & Bound, TPS, Railway Schedule, Siding

요 약

수도권 광역통행의 과다한 승용차 이용은 서울시 교통문제의 핵이다. 시계 도로망의 혼잡과 더불어 도시내부로 유입된 승용차가 유발하는 2차 통행도 심각하므로 광역 승용차 통행을 줄이는 것이 시급하다. 이러한 문제를 해결하는 가장 효과적인 방안중 하나는 광역철도의 경쟁력 제고이다. 광역철도와 승용차를 비교해보면 대부분 수도권 지역에서 철도의 통행시간이 승용차를 초과하는 실정이다. 본 연구는 광역철도가 통행시간에 대한 경쟁력을 갖게 하기 위한 방안으로 대피선 설치를 통한 급행열차 도입을 제안한다. 급행과 완행열차의 혼합운행은 매우 정교한 기술적 검토를 요구하며 실질적인 운행방안의 제시가 필요하다. 본 연구에서는 급행열차에 대한 운전선도를 시뮬레이션하고 급완행 열차의 교행 패턴을 도출하는 스케줄 작성 알고리즘을 제시하고 안산선을 대상으로 가상 적용 사례를 제시한다. 시뮬레이션 결과, 안산선의 경우 1~2개의 신규 대피선 설치를 통해 급행열차의 표정속도를 63kph 까지 향상시킬 수 있음을 입증한다.

The urban railways connecting between the inner city and suburb of Seoul metropolitan area, has lost the competitiveness against cars because too many stops deteriorated operating speed and passenger's level of service. This paper suggests that an express train should be introduced into the urban railway system in order to sort out such a complication. There are two considerations in the present study. Firstly, train schedule problem should be taken into account. In this regard, a new model for urban railway system was developed by revising the existing models dealing with single line freight railway. Approximate branch and bound algorithm based on conflict group rather than a single conflict was adopted. Consequently, it was found that the time saving in calculating the optimal schedule is the most meaningful contribution of the algorithm. The second consideration is associated with the application of the model. A case study was carried out using the actual operation data from Ansan line. In conclusion, the operation speed of the line can increase considerably with minimal number of new sidings.

이 논문은 서울시정개발연구원 「2007 기본연구과제」의 내용 중 일부분일.

I. 서론

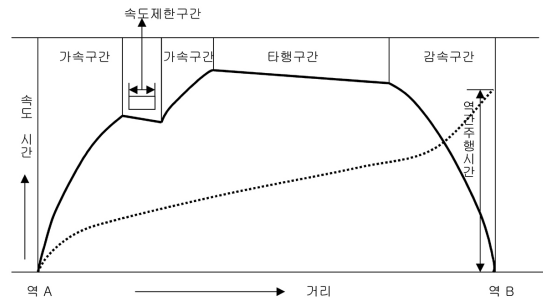
현재 수도권 광역교통의 경우 철도의 이용율은 약 35%로 낮은 편이며 반대로, 승용차 의존도는 매우 높은 실정이다. 승용차 억제를 통한 광역철도 이용 활성화가 수도권 뿐 아니라 서울의 교통문제를 해결하는 해답이 되고 있으나 효과적인 승용차 억제책을 찾지 못하고 있다. 강제적인 승용차 수요관리를 주장하는 목소리도 커지고 있지만 광역철도의 서비스 제고 없이 시행하는 승용차 수요관리 정책은 수도권 주민들의 반발 우려가 크다. 승용차 수요관리의 전제 조건으로 광역철도의 서비스, 특히 속도의 향상이 시급한 시점이다. 현재의 광역철도의 노선은 굴곡이 심하고 역수가 많아서 시민들이 만족할 만한 서비스를 제공하지 못하고 있다. 본 연구에서는 급행열차 도입을 통해 기존 광역철도 노선의 속도를 획기적으로 향상할 수 있는 구체적인 방안을 제시한다. 그간 김경철(1998) 등 도시철도의 급행화 방안이 검토된 바 있으나, 교통차원의 효과분석에 치중하였고 급행열차 도입과 관련된 기술적 실행가능성은 철도기술분야 고유 문제로 간주하여 다루지 않았다. 급행열차를 도입할 경우, 물리적인 시스템 환경이 어떻게 조성되어야 하며 필요한 속도 개선은 정확하게 어느 수준인지 알아야 한다. 본 연구는 열차운전 및 제어분야의 실질적인 기술을 바탕으로 실행 가능한 급행화 대안(급완행 혼합운행 스케줄)을 제시하고 사례분석을 통해 효과를 분석한다.

우선, II장에서는 급완행 혼합운행 스케줄 작성을 위해 선행되어야 할 몇 가지 철도기술 사항을 소개하고, III장에서는 본 연구의 핵심인 급완행 혼합운행 스케줄 작성법을 핵심내용으로 다룬다. 기존 알고리즘을 수정하여 현실적인 실행시간을 갖는 새로운 휴리스틱(heuristic) 알고리즘을 제시한다. IV장에서는 제안한 알고리즘에 의한 스케줄 작성을 안산선을 대상으로 적용하고 결과를 논의한다.

II. 기술사항 검토

1. 운전선도 작성

운전선도(거리-속도 그래프)의 작성은 열차운전에 있어 가장 기본이 되는 사항으로 열차의 구간 운전 속도를 거리에 따라 표시한다. 기존의 각역정차 방식의 완행열



〈그림 1〉 운전선도 예시

차운전은 각 역 구간에 대한 고유한 열차운전 패턴을 가지고 있어서 이를 기반으로 열차를 운행하고 있다. 즉, 각 궤도 구간에 대한 곡선, 구배, 분기상태 등을 고려하여 미리 설정된 제한속도를 준수하면서 차량의 성능에 맞는 감가속을 통한 열차운전을 기반으로 한다. 반면, 급행열차가 도입될 경우 해당 열차의 정차 패턴은 기존의 각역 정차 패턴이 아니라 일부 특정 역에만 정차하는 새로운 패턴을 갖게 되므로 이에 따른 새로운 운전선도가 필요하다. 구간별 열차의 운전선도는 잘 알려진 열차성능시뮬레이션(TPS: Train Performance Simulation)을 통해 구할 수 있는데 Hay(1982)는 궤도의 구배, 곡선반경, 속도제한, 역간거리 등의 궤도조건과 차량편성, 차량무게, 견인력 특성 등의 열차조건에 따른 열차성능시뮬레이션(TPS) 방안을 제시하였다. 시뮬레이션 결과로서 〈그림 1〉과 같은 운전선도를 출력한다.

2. 열차제어체계

하동욱(2004)에 의하면 철도신호는 열차 운행에 있어서 안전을 보장하고 선로용량 결정에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 고전적인 의미의 신호는 선로의 폐색체계로부터 시작한다. 폐색체계란 선로를 일정구간으로 나누어 각 구간에 1대의 열차의 진입만을 허용하는 것을 의미하며 신호를 통해 폐색구간의 열차 진입을 제어한다. 서울시 지하철 1, 2호선의 경우 고정폐색 노상신호체계를 갖고 있는데 이는 열차 운전자의 신호오판위험이 항상 존재한다. 3~8호선부터는 차상신호를 포함한 Speed-code 방식의 자동제어 신호 체계를 갖추고 있어서 열차안전 측면에서 진보되었다. 최근에 인천 지하철, 부산 지하철 2호선 등에 사용하고 있는 시스템인 Distance to go 방식은 Speed-code 방식보다 운전시각을 줄일 수 있는 진보

된 체계이다. 기존의 평균 배차시격을 유지하면서 급행열차와 완행열차의 안전한 혼합운행을 보장하기 위해서, 본 연구에서는 기존의 Speed-code 방식의 열차제어체계는 한계가 있다고 보고 차상 자동 제어장치(ATO)를 갖춘 Distance to Go 방식을 급행화 계획의 전제로 제안한다.

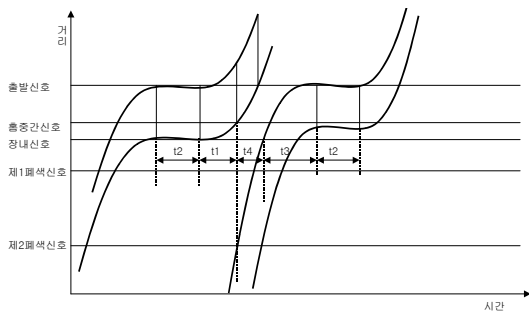
3. 최소운전시격

최소 운전시격은 열차 안전을 보장하면서 운행할 수 있는 연속 열차간의 최소 시간간격을 말한다. 최소 운전시격은 주행구간에서 결정되기보다는 열차가 정차하는 역구간이나 회차를 필요로 하는 시중점역에서 결정된다. 일반 구간의 운전시격은 폐색구간의 길이를 줄이고 열차의 속도를 증가시키면 상당부분 줄일 수 있으나 노선전체의 가장 큰 시격보다 줄일 수는 없다.

김선호(1997)가 제시한 방법에 따라 플랫폼 중간신호기가 있는 역을 예로 최소운전시격 계산방법을 소개하면 <그림 2>와 같다.

<그림 2>에서 굵은 선으로 표시된 곡선은 각각 열차의 머리와 꼬리의 궤적을 의미한다. 여기서 최소운전시격은 $t_1 \sim t_5$ 의 합으로 표시되는데 각각의 의미는 다음과 같다.

- t_1 : 선행열차가 발차 후 출발신호기(전방 50m에 있는=HD)를 통과하든가 또는 플랫폼의 중간신호기를 열차의 꼬리(중간 신호기와 열차 꼬리의 간격 $20m=TL$)가 통과하기까지의 시분
- t_2 : 정차시분
- t_3 : 후속열차의 머리가 장내 신호기(플랫폼 후방 50m에 있는)에 진입 후 정차하기까지의 시분
- t_4 : 후속열차가 상류 제2폐색신호기와 장내신호기 사이(2개의 폐색구간 경우에 따라서는 1개일



<그림 2> 최소시격 모델

수도 있음)를 주행하는 시분

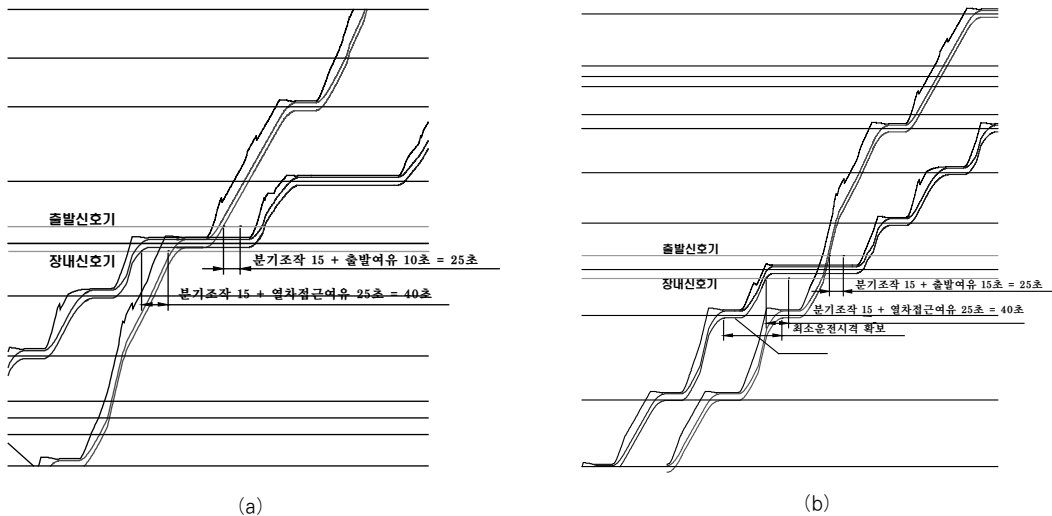
t_5 : 신호변환 및 제동공주 시간의 합(대개 4초 이상)

$t_1 \sim t_5$ 의 합을 풀어서 정리하면 식(1)과 같다. 여기서 가속도(α), 감속도(β), 열차길이(L), t_2, t_4, t_5 가 주어지면 최소운전시격을 구할 수 있다. 식에 따르면 열차의 가감속이 최소운전시격에 미치는 영향이 가장 크다는 것을 알 수 있다.

$$T = \sqrt{\frac{TL \times 7.2}{\alpha}} + t_2 + \sqrt{\frac{(L+HD) \times 7.2}{\beta}} + t_4 + t_5 \quad (1)$$

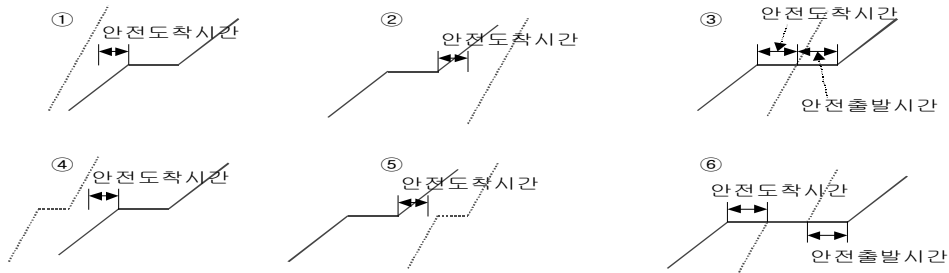
4. 급완행 교행 시 안전시격

앞서 언급한 일반적인 최소운전시격 결정 방법을 적용하면, 급완행이 혼합 운행되는 경우, 역에서 연속한 이종 열차간의 안전시격도 결정이 가능함을 알 수 있다. 급완행 운행에 따른 완행열차 대피 유형은 완행열차 대피 정차 중 급행열차 도착정차 후 출발 <그림 3(a)>와 완행열차 대피 중 급행열차 통과 <그림 3(b)>의 두 가지 경우가 있다. 열차시격 상 최악의 상황은 대피선역 전후역에 급행열차 정차가 있을 때 발생하므로 이 부분의 안전시격을 계산할 때 해당 역에 대해서만 고려하면 심각한 문제가 생길 수 있다. 그림에서 각 열차는 3개의 선으로 표현되는데 맨 앞 선은 열차 머리에서 안전제동거리만큼의 여유선이며 두 번째 세 번째는 각각 열차의 머리와 꼬리에 해당하는 선을 나타낸다. Distance to go 방식의 개념 하에서 선행열차 꼬리를 기준으로 볼 때 후속열차의 접근은 운전선도 상 정상적인 속도로 접근 할 경우 실시간 열차속도에 대한 오차율을 감안한 안전제동거리가 열차간 안전시격을 산출하는 기준이 된다. 즉, 후속열차의 안전제동 여유선이 선행열차의 꼬리가 점유한 폐색구간의 끝선에 닿지 않도록 안전시격을 산출한다. <그림 3(b)>의 경우는 열차간 안전시격을 결정하는데 해당 역의 대피정차시간 보다는 상류역의 운전시격이 중요한 요인으로 작용하였다. 위와 같이 정밀한 분석을 통해 산출된 열차간 안전시격을 이용하면 다음 절에서 설명할 급완행 혼합 스케줄 작성 시 요구하는 단순형식의 안전시격을 쉽게 구할 수 있다. 반면, 스케줄링 모형에서는 열차의 궤적이 평균 속도 개념의 직선으로 표시되고, 요구하는 안전시격도 각 역에서의 열차간 출발과 도착시간의



〈그림 3〉 급완행 교통 시 열차 안전 시격 산정(예시)

— 일반열차 ····· 급행열차



〈그림 4〉 스케줄링에서의 간략화된 열차 안전시격

차로 간단히 나타내므로 전체열차의 스케줄을 결정하는 시점에서 볼 때, 충분한 안전율을 감안하여 최대 안전시격을 〈그림 4〉와 같이 몇가지 유형으로 간략화 하여 적용한다.

III. 급완행 혼합운행 스케줄링

1. 전제 사항

본 절에서는 대피선 입지가 정해졌을 때 열차 지체를 최소화하는 추월패턴 및 역별 열차출발 도착시간을 구하는 일반적인 스케줄링 모형 및 알고리즘을 설명하고, 본 연구에서 제안하는 새로운 알고리즘을 소개한다. Kraay et al.(1991) 모형에 기초하여 급완행 열차가 혼합 운행하는 도시철도에서의 최적 스케줄 모형을 구축한다.

2. 모형 구축

1) 전제 사항

본 연구에서는 도시철도 스케줄링 모형을 혼합정수선형문제(MILP)로 정식화 하는데 다음과 같은 사항을 고려하였다.

- 대피선유치역은 미리 정해서 주어지는 것으로 한다.
- 시발역 배차패턴을 입력한다. 즉, 시발역에서 열차별 계획 출발 시간을 지정한다.
- 각 열차별로 다른 열차와의 상충을 무시한 종착역 도착시간(희망도착시간)을 지정한다.
- 각 역 구간별 운행가능 최소시분을 지정한다. 앞 절에서 설명한 열차운행시물레이션(TPS)을 통해 산정한다.
- 목적함수는 열차지체 즉, 종착역에서 희망도착과 실

제 도착시간의 차이를 적용한다.

- 급행열차를 완행열차보다 우선하여 목적함수 구성 시 가중치를 적용한다.
- 안전시격은 인접한 열차간의 최소 허용 가능한 고정 시격으로 처리한다. <그림 4>에서 제시한 안전출발 시간 및 안전도착시간으로 구분한다.
- 시발역, 종착역의 회차용량은 충분한 것으로 가정하고 열차의 상하행 회차는 고려하지 않는다.

2) 모형의 정식화

스케줄링 모형의 대상이 되는 노선의 구성은 <그림 5>와 같다. 우선, 시발역 1에서부터 종착역 N 까지 일련 번호를 원소로 갖는 역집합 Q 를 설정한다. 집합 Q 의 부분집합으로 급행열차가 정차하는 역 집합을 Q_1 으로 설정한다.

$$Q = \{1, 2, \dots, N\}, Q_1 = \{q | q = \text{급행정차역}\}, Q_1 \subset Q \quad (2)$$

$s=1, 2, 3, \dots, M$ 을 지정한다. 시종점역을 포함하여 대 피선이 설치된 역만을 기준으로 구간을 나누고, 이렇게 나누어진 구간 s 의 시점역을 P_s 라 하면 그 구간 내부에 포함된 일반역들의 집합 Q_s 를 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

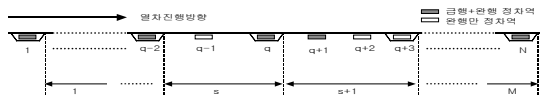
$$Q_s = \{q | p_s < q < p_{s+1}\} \quad s=1, 2, 3, \dots, M \quad (3)$$

단, $p_{M+1} = N$

시발역에서의 출발순서대로 첫 열차 1에서부터 마지막 열차 J 를 원소로 갖는 열차집합 I 를 설정하고 그 중 급행 열차에 해당하는 열차번호들의 집합을 I_1 으로 정의한다.

$$I = \{1, 2, \dots, J\}, I_1 = \{i | i = \text{급행열차}\}, I_1 \subset I \quad (4)$$

모형정립에 필요한 파라메타를 정리하면 다음과 같다.



<그림 5> 스케줄 모형의 노선 개요

- h_q : 역 q 에서 선행열차출발 후 후행열차 도착까지의 안전시격
- $h1_q$: 역 q 에서 선행열차도착 후 후행열차 도착까지의 안전시격
- $h2_q$: 역 q 에서 선행열차출발 후 후행열차 출발까지의 안전시격
- μ : 열차간 추종관계를 표현하기 위한 모형계수로써 상당히 큰 수
- $d_{q,q+1}$: 역 q 와 $q+1$ 사이 거리
- $v_{q,q+1}^i$: 역 q 와 $q+1$ 사이에서 열차 i 의 허용 최고속도
- DW_q^i : 역 q 에서 열차 i 의 정차시간
- Y_1^i : 시발역에서 열차 i 의 출발시간 최소값
- Y_N^i : 종착역에서 열차 i 의 회차 도착시간
- W^i : 목적함수 설정시 열차 i 의 중요도(가중치)

급행열차 추월패턴을 나타내는 상충변수는 스케줄링 모형에서 구해야 할 이진정수 결정변수로서 다음과 같이 표현된다.

$$C_{ijs} = \begin{cases} 1 & \text{1열차 } i \text{가 열차 } j \text{보다 먼저 구간 } s \text{에 진입할 경우} \\ 0 & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases} \quad (5)$$

스케줄링 모형의 또 다른 결정변수는 열차의 역별 도착 및 출발시간인데 연속변수로 표현된다.

- D_q^j : 역 q 에서 열차 j 의 출발시간
- A_q^j : 역 q 에서 열차 j 의 도착시간

식(6)와 (7)은 급행열차의 안전한 추월과 연속한 열차간의 안전시격 보장을 위한 상충해소 제약조건이다.

$$\left. \begin{aligned} \mu * C_{ijs} + (D_{q_s}^i - D_{q_s}^j - h2_{q_s}) &\geq 0 \\ \mu * C_{ijs} + (A_{q_{s+1}}^i - A_{q_{s+1}}^j - h1_{q_{s+1}}) &\geq 0 \\ \mu * C_{ijs} + (A_q^i - D_q^j - h_q) &\geq 0, \quad q \in Q_s \end{aligned} \right\} \begin{aligned} s &= 1, 2, 3, \dots, M \\ \forall i, j \in I, i \neq j \end{aligned} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu * (1 - C_{ijs}) + (D_{q_s}^i - D_{q_s}^j - h2_{q_s}) &\geq 0 \\ \mu * (1 - C_{ijs}) + (A_{q_{s+1}}^i - A_{q_{s+1}}^j - h1_{q_{s+1}}) &\geq 0 \\ \mu * (1 - C_{ijs}) + (A_q^i - D_q^j - h_q) &\geq 0, \quad q \in Q_s \end{aligned} \right\} \begin{aligned} s &= 1, 2, 3, \dots, M \\ \forall i, j \in I, i \neq j \end{aligned} \quad (7)$$

식(6)은 열차 j 가 열차 i 보다 먼저 구간 s 에 진입한 경우($C_{ijs} = 0$)를 설명한다. 이 때 식(7)은 항상 만족한

다. 식(6)의 첫번째 식은 구간 s 의 시점역에서 열차 j 가 출발한 후 안전시간 후에 열차 j 가 진입함을 보장한다. 두 번째 식은 구간 s 의 종점역에서 열차 j 가 도착한 후 일정 안전시격을 보장한 뒤 열차 j 가 도착함을 나타내고, 세 번째 식은 구간 s 내부에 포함된 역에서 잇따른 열차간의 안전시격 보장을 나타낸다. 식(7)은 반대로 열차 j 가 열차 j 보다 먼저 구간 s 에 진입한 경우($C_{ijs} = 1$)에 대한 제약을 설명하고 이때도 식(6)은 항상 만족한다.

$$A_{q+1}^i - D_q^i \geq \frac{d_{q,q+1}}{v_{q,q+1}} \quad \forall q \in Q - \{N\}, \forall i \in I \quad (8)$$

$$A_q^i - D_q^i \leq -DW_q^i \quad (\forall q \in Q_1 \wedge \forall i \in I) \vee (\forall q \in Q \wedge \forall i \in I) \quad (9)$$

$$A_q^i - D_q^i = 0 \quad \forall q \in Q - Q_1 \wedge \forall i \in I_1 \quad (10)$$

$$D_1^i + h2_1 \leq D_1^{i+1} \quad \forall i \in Q - \{J\} \quad (11)$$

$$Y_s^i \leq D_s^i \leq Y_s^{i+1} \quad \forall s \in S, \forall i \in I \quad (12)$$

식(8)은 실제 역구간에서 운행가능 최소시분(TPS 결과)을 나타내지만 정식화에서 최대속도 개념으로 변환되었다. 식(9)는 열차의 역 정차 시 정해진 정차시간을 준수해야함을 의미하며 (10)은 급행열차의 역 통과 시에는 정차시간이 없음을 나타낸다. 식(11)은 시발역에서 열차 배차 순서는 불변임을 나타내고 식(12)은 계획 스케줄 제약으로써 실제 출발시간은 정해진 최소 출발시간보다는 크고 다음열차의 출발시간보다는 작아야 함을 나타낸다. 이 제약을 통해서 계획 배차간격을 지정할 수 있다.

다음으로 스케줄링 문제에서의 목적함수를 설정한다. 선행 연구들(Kraay et al.(1991), Higgins et al.(1996))에서는 대부분 열차 지체와 운행비용을 선택적으로 목적함수에 적용해 왔다. 열차 지체는 종착역에서의 실제 열차 도착시간과 계획된 희망 도착시간과의 차이로 표현한다. 열차운행비용은 내연기관일 경우 연료비로 표현되고 전기철도의 경우 전력량으로 나타낼 수 있는데, 본 연구에서는 첨두시 도시철도 운행에 대한 최적 스케줄링에 초점을 맞추므로 에너지 소비보다는 승객 서비스와 열차의 속도 개선을 목적으로 하는 것이 타당하다고 판단하여 식(13)과 같이 열차지체시간만을 목적함수로 설정하였다. 열차운행비용을 제외함으로써 스케줄링 문제를 선형문제로 국한 할 수 있다. 본 연구에서 식 (13)을 급완행이 혼합운영되는 광역철도의 최적 스케줄링 모형으로 제안한다.

$$\text{Min}_{C_{ijs}, A_q^i, D_q^i} \sum_{i \in I} W^i * (A_N^i - Y_N^i) \quad (13)$$

제약조건) 식(6)~식(12)

3. 풀이 알고리즘

1) 개요

상기 스케줄링 모형은 정수변수와 연속변수가 혼합된 선형 정수계획 문제(MILP)이다. Higgins et al. (1996), Kraay et al.(1991), Carey(1994), Carey and Lockwood (1995)등 많은 기존연구에서 공통적으로 적용한 Branch & Bound 열거법을 기본 알고리즘으로 채택하였다. 본 문제와 같이 많은 수의 이진변수를 갖는 문제는 이진변수의 수에 대해 지수적으로 증가하는 문제의 복잡도(Complexity)를 갖게 되므로, 이진변수 트리로 구성할 경우, 최악의 복잡도는 $O(2^n)$ 이 된다. 이때, n 은 이진변수의 수가 되고 계산 단위는 선형문제(LP)풀이 1 회가 된다. 이진변수 (C_{ijs})의 수는 $n = \text{열차수} \times \text{대피선구간수}$ 의 관계가 되므로 이진변수를 기준으로 한 Branch & Bound 방법을 적용하는 것은 효율적이지 못하다. 본 연구에서는 Kraay et al.(1997), Higgins et al.(1996)등이 채택한 Cutting Plane 기법을 응용한 상충기준 Branch & Bound 부분 열거법을 적용한다. 스케줄링 문제의 경우 Cutting Plane 기법을 응용하면 탐색트리의 각 노드에서 해당상충이 일어나는 열차쌍 및 그 열차쌍이 사용 가능한 대피선 제약만을 추출하여 LP문제를 풀게 되므로 이진변수 트리에 비해 훨씬 작은 탐색트리를 구성할 수 있다. 열차 상충을 기준으로 탐색트리를 구성하고 상충해소 가능 역을 상충이 일어나는 대피선 구간의 시종점에 국한하면 문제의 복잡도(Complexity)는 $O(2^{\text{상충수}})$ 가 된다. 상충의 탐색은 알고리즘 진행 중 순차적으로 결정하지만 최초의 희망 스케줄(상충을 무시하고 각 열차의 궤적을 표시한 스케줄)에서 대략 그 수를 추측할 수 있다. 일반적으로 상충수는 이진변수개수보다 훨씬 작으므로 최적 스케줄을 찾기 위한 LP풀이 수가 상당량 줄어든다.

2) 기존 알고리즘

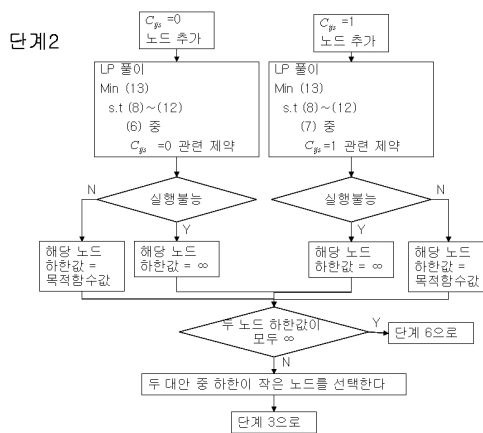
(1) 단계 1

주어진 배차시격에 따라 열차를 생성하고 속도 및 정차시간 최초출발시간 제약(8)~(12)에 대해 목적함수

(13)을 풀어 초기 희망스케줄을 도출하고 이에 대한 시작 노드($No = 0$)를 생성한다. 이로써 상층을 무시한 이른바 희망스케줄이 생성된다. 현재 값(Incumbent = ∞)을 무한대로 설정한다.

(2) 단계 2

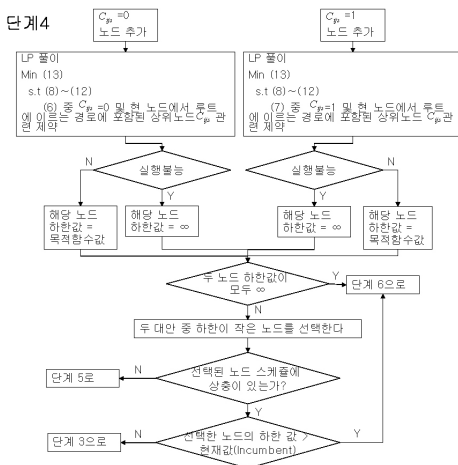
시발역에서부터 가장 가까운 최초 상층을 선택한다. 그 상층에 해당하는 상층변수 C_{ijs} (열차 $i, j \in I$ 및 상층이 일어나는 구간 $s \in \mathcal{S}$)를 확인한다.



(3) 단계 3

현 노드에서 헤에서 시간 기준으로 최초 상층을 선택한다. 그 상층에 해당하는 상층변수 C_{ijs} (열차 $i, j \in I$ 및 상층이 일어나는 구간 $s \in \mathcal{S}$)를 확인한다.

(4) 단계 4



(5) 단계 5

현 노드의 목적함수 값(하한 값)이 작은 것을 최적으로 저장하고 이 값이 현재 값보다 작으면 현재 값을 갱신한다.

(6) 단계 6

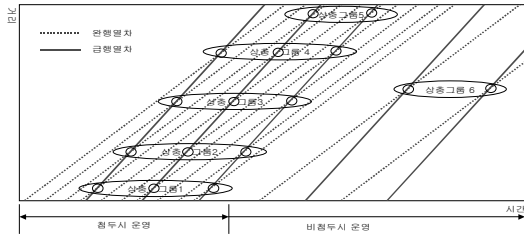
탐색 트리의 현 노드에서부터 형제노드, 부모노드 순으로 자식 노드가 없고 그 하한 값이 현재값(Incumbent)보다 작은 노드가 발견될 때까지 한 계층씩 차례로 상위로 올라가면서 탐색한다. 탐색 중 최상위 노드에 이르면 탐색을 중지하고 현 최적치를 저장하고 종료한다. 그렇지 않으면 단계 3으로 돌아간다.

3) 제안 알고리즘(상층그룹 기준 알고리즘)

(1) 알고리즘 개요

상층기준 탐색으로 이진변수 기준보다 빠른 시간내에 최적해를 도출한다 하더라도 근본적으로 지수형태의 복잡도(NP-Hard)를 갖는 철도 스케줄링 문제를 대규모 도시철도 운행분석에 적용하기는 어렵다. 본 연구에서는 문제의 복잡도 한계를 극복하기 위해 도시철도가 짧은 배차간격을 가지며 주기적으로 반복되는 스케줄에 따른다는 점에 착안하여, 같은 속성의 상층들을 그룹핑하여 처리하는 방안을 제안한다. 같은 속성의 상층이란 열차 스케줄 상에서 상층이 일어나는 시점과 해당 상층열차쌍은 다르지만 공간적으로 같은 지점에서 발생하는 상층들 로써 정의한다. <그림 6>은 초기 희망 스케줄 상의 상층들을 공통 속성에 따라 그룹핑한 것을 보여준다. 공통 상층을 기준으로 탐색트리를 구성할 경우, 최대 LP 풀이 횟수는 $2^{공통상층수+1} - 1$ 번이 되는데, 여기서 공통 상층수는 스케줄 패턴변화가 없다고 가정하면 근사적으로 모든 상층수를 열차 주기의 반복 빈도수로 나눈 값과 같으므로 문제의 크기가 급격하게 축소된다. 물론, 실제 Branch & Bound 알고리즘 적용 시에는 탐색트리의 각 노드별로 하한 값 비교를 통해 노드 소거가 일어나므로 이보다 훨씬 적은 수의 LP풀이만으로도 최적 스케줄을 구할 수 있다. 상층그룹 기준 알고리즘에서는 각 노드의 스케줄에서 열차 상층을 찾을 때 하나의 최초 상층만을 찾지 않고 최초 상층과 같은 지점에서 발생하는 상층들 중에서 상층에 포함된 열차 쌍의 속도 프로파일이 최초 상층에 포함된 열차 쌍의 그것과 동일할 경우의 상층을 모두 찾아내 그룹핑한다는 점을 제외하면 개별상층

기준 알고리즘과 동일하다. 그룹내의 상층들은 알고리즘 내부에서 동일하게 간주하여 항상 같은 대피선 역에서 처리하게 된다.



〈그림 6〉 공통상층 구분 예시

2) 최적성 검토

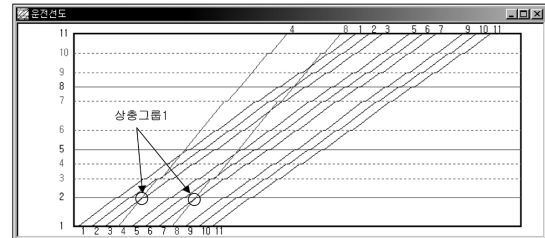
상층그룹 기준의 알고리즘은 실행속도 면에서 파격적이지만 휴리스틱 알고리즘이므로 항상 최적해를 찾지는 못하는 단점을 갖는다. 배차간격이 작고 배차패턴이 규칙적인 도시철도에서는 매우 드문 경우라 할지라도 개별 상층 및 상층그룹 기준의 해가 서로 다를 수 있다. 이 경우 개별상층 기준의 최적해와 상층그룹 기준의 근사해 사이의 목적함수 값 차이가 미비한 반면, 실행속도를 결정하는 LP 풀이 횟수는 엄청나게 최적해 도출 쪽이 큰 것을 알 수 있다. 또 한 가지 중요한 사실은 두 가지 해가 일치하지 않을 경우의 실제 최적 스케줄은 각 역별 열차도착 패턴이 일정치 못하다는 점이다. 도시철도에서 승객 서비스 수준을 결정하는 지표 중 열차의 규칙적인 도착, 출발은 매우 중요하다. 만약, 문제의 제약조건에 각 역별 시간상의 제약, 즉 역별 열차도착의 정시성 제약을 추가한다면 이러한 문제를 피해 갈 수 있다.

4) 알고리즘 해설

상층그룹기준 Branch & Bound - Cutting Plane 부분 열거법의 이해를 돕기 위한 간단한 예제를 소개한다. 예제 초기 조건으로 분석시간 20분, 완행 대 급행 배차비율 3:1, 시발역 배차시격 2분, 대피선 3개소, 급행정차 3개역, 안전시격 40~50초, 정차시간 30초를 설정하였다. 역구간별 급행 및 완행 운전시분은 적절히 가정하였다. 다음은 예제에 대한 상층그룹 기준 알고리즘의 세부 절차이다.

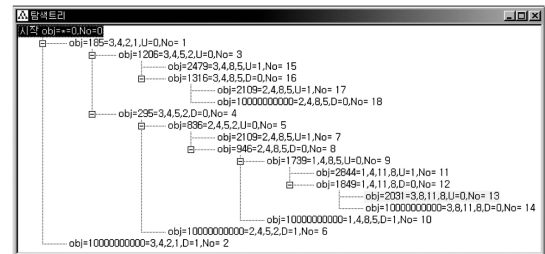
시발역 배차시격에 따라서 상층을 그대로 운행선도에 나타내면 〈그림 7〉과 같다. 그림에서 가로축은 시간을

세로축은 거리를 나타내고, 기울기가 큰 선은 급행열차의 궤적을 기울기가 작은 선은 완행열차의 궤적을 나타낸다. 노드 목적함수 값(하한 값)들의 비교를 위해 현재 값을 1E+10로 설정한다.

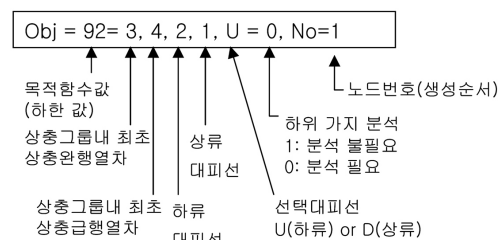


〈그림 7〉 초기 상층해소 전 희망스케줄 예시

〈그림 7〉에서 첫번째 상층그룹(상층그룹1)은 열차 3과 4, 7과 8이 대피선 1과 2사이에서 발생하는 두 상층이다. 이때 2번 대피선에서 상층을 해소하면 목적함수 값(하한 값)은 185이고, 1번 대피선에서 상층을 해소하려 하면 열차 3과 4, 7과 8이 시발역에서의 출발시간이 바뀌어서 실행불능이 된다. 〈그림 8〉은 탐색트리를 나타내는데 노드 1은 첫 번째 상층그룹을 2번 대피선에서 노드 2는 1번 대피선에서 해소함을 의미한다. 노드 2의 목적함수 값(하한 값)이 1E+10을 나타내는 것은 실행불능을 나타낸다. 각 노드별 문자열의 의미는 〈그림 9〉와 같다.

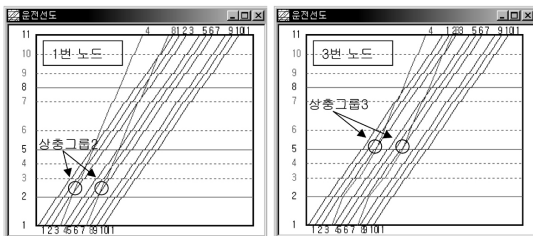


〈그림 8〉 탐색 트리 예시



〈그림 9〉 노드 문자열

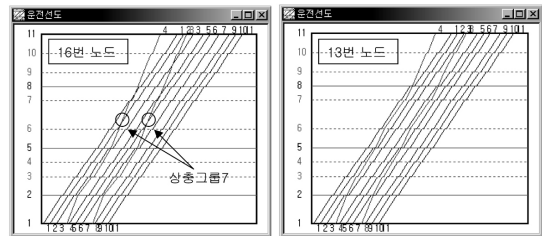
노드 1, 2 중 목적함수 값(하한 값)이 더 작은 노드 1을 선택하고 노드 1의 목적함수 값(하한 값)이 현재 값 1E+10보다 작으므로 <그림 10>의 1번 노드 스케줄에서 다음 상충그룹을 탐색한다. 노드 1에 해당하는 스케줄에서 시발역 기준 최초 상충그룹(상충그룹2)은 다시 열차 3과 4, 7과 8이 대피선 2와 5사이에서 발생시키는 상충이다. 상충그룹 2로부터 노드 1의 자식노드 3, 4를 생성한다. 노드 3은 해당 상충그룹을 5번 대피선에서 노드 4는 2번 대피선에서 해소함을 의미한다. 노드 4의 목적함수 값(하한 값) 295가 노드 3의 1,295보다 작으므로 다음 탐색노드로 노드 4를 선택한다. 노드 4의 하위로 계속 상충이 존재하므로 노드번호 쌍 5-6, 7-8, 9-10, 11-12, 13-14의 순서로 다음 상충그룹을 구하고 두 가지 상충해소 대안에 대해 LP문제를 푸는 상기 과정을 반복한다. 노드 13, 14의 하위로는 더 이상의 상충그룹이 존재하지 않으므로 노드 13, 14의 목적함수 값(하한 값)중 작은 값인 노드 13의 목적함수 값(하한 값) 2,031을 현재 값으로 설정한다. 노드 13에서부터 탐색트리를 역추적 하여 목적함수 값(하한 값)이 현재 값보다 작고 자식노드를 갖지 않은 노드를 찾는다. 12, 9, 8, 5, 4번 노드는 자식노드가 있으므로 생략하고 11, 10, 7, 6번 노드는 자식노드는 없지만 목적함수 값이 현재 값 2,031보다 크므로 생략한다. 3번 노드에 이르면 목적함수 값(하한 값)이 1,206으로 현재 값 2,031보다 작고 아직은 자식노드가 생성되지 않았으므로 3번 노드를 탐색 노드로 설정한다.



<그림 10> 노드별 중간 스케줄

<그림 10>의 3번 노드(스케줄)에서 다음 상충그룹을 구한다. 다음 상충그룹(=상충그룹3)은 열차 3과 4, 7과 8이 대피선 5와 8사이에서 발생시키는 상충을 포함한다. 노드 15는 해당 상충그룹내 상충들을 8번 대피선에서, 노드 16은 5번 대피선에서 해소함을 나타낸다. 노드 16의 목적함수 값(하한 값) 1,316이 노드 15의 목적함수 값(하한 값) 2,476보다 작으므로 노드 16을 다음 탐색

노드로 설정한다. <그림 11>의 16번 노드의 스케줄을 보면 열차 2와 4, 6과 8이 대피선 5와 8사이에서 상충하므로 이를 각각 8번, 5번 대피선에서 해소할 경우의 노드를 생성한다. 생성된 노드 중 17은 해소해야 할 상충그룹(상충그룹7)이 잔존하지만 그 목적함수 값(하한 값) 2,109가 현재 값 2,031보다 커서 제외하고 18은 실행 불가능이므로 생략한다. 노드 17에서부터 목적함수 값(하한 값)이 현재 상한 값보다 작고 자식노드를 갖지 않은 노드를 역추적하면 최상위 노드(Root)에 이를 때까지 조건을 만족하는 노드를 찾지 못하므로 현재 값인 2,031을 최적 값으로 설정하고 탐색트리의 최상위 노드(Root)에서 노드 13에 이르는 가치가 최적 스케줄을 생성한다. <그림 11>의 13번 노드 스케줄은 실행가능하면서 열차지체를 최소화하는 최종 스케줄을 나타낸다.



<그림 11> 노드별 중간 스케줄(최적 스케줄 포함)

5) 알고리즘 비교

예제를 대상으로한 제안 알고리즘에 대한 비교 분석 결과는 <표 1>과 같다. 도시철도 시스템에 한해서는 규칙적으로 반복되는 스케줄 특성에 의한 상충그룹 기준 탐색트리 구성이 과거적으로 실행시간을 줄일 수 있다는 것을 알 수 있었다.

<표 1> 알고리즘 비교(LP 풀이 횟수)

| 분석시간 | | 10분 | 20분 | 30분 | 40분 |
|------|---------|--------|--------|---------|---------|
| LP풀이 | 상충그룹 기준 | 17(70) | 19(69) | 23(63) | 23(65) |
| | 개별상충 기준 | 17 | 87 | 1877(-) | 9313(-) |

* ()안은 LP 풀이에서 일반 Simplex 대비 Dual Simplex 적용 시 실행시간 비율 %

* (-)는 메모리 과다 요구로 Dual Simplex 적용 불가능

IV. 사례연구 : 안산선을 대상으로

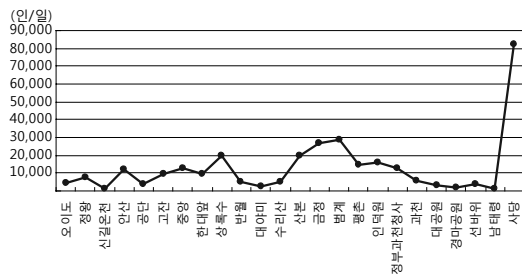
1. 급행 정차 대안

안산선에 급행을 도입할 경우 급행 정차역의 결정은

수요패턴에 의해 결정한다. 본 연구에서는 <그림 12>의 역별 승하차 수요를 기반으로 <표 2>와 같이 승객이용이 많은 역을 중심으로 급행정차 대안을 설정한다. 설정한 대안에 따른 최적 급완행 혼합 운행 스케줄을 제시한다.

2. 운전시분 초기값 결정

급완행 혼합 운행 스케줄을 만들기 위해서는 완행 및 급행열차에 대한 초기 운전 시분이 필요하다. 초기에 입력된 급완행의 운전시분은 대피선에서의 안전한 급완행 열차의 교행을 보장하기 위해 지연되므로, 초기 열차운전시분은 운행가능 최소가능 운전시분으로 간주할 수 있다. 모형에서는 최대 속도 개념을 적용하므로 환산이 필요하다.



<그림 12> 역별 이용 승객수 패턴

<표 2> 급행정차 대안

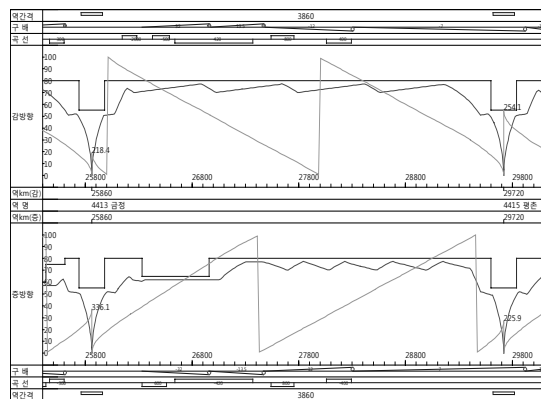
| 대안 | 정차역 수 | 정차역 | |
|-----|-------|-----|--|
| 안산선 | 411 | 12 | 오이도, 정왕, 안산, 중앙, 상록수, 대야미, 금정, 평촌, 정부과천청사, 과천, 선바위, 사당 |
| | 412 | 12 | 오이도, 정왕, 안산, 중앙, 상록수, 반월, 금정, 평촌, 정부과천청사, 과천, 선바위, 사당 |
| | 413 | 12 | 오이도, 정왕, 안산, 중앙, 상록수, 반월, 금정, 인덕원, 정부과천청사, 과천, 선바위, 사당 |
| | 421 | 7 | 오이도, 안산, 상록수, 금정, 정부과천청사, 선바위, 사당 |
| | 422 | 7 | 오이도, 안산, 상록수, 금정, 평촌, 정부과천청사, 사당 |
| | 423 | 7 | 오이도, 안산, 상록수, 금정, 인덕원, 정부과천청사, 사당 |
| | 424 | 7 | 오이도, 안산, 상록수, 금정, 인덕원, 과천, 사당 |
| | 431 | 5 | 오이도, 중앙, 금정, 과천, 사당 |
| | 432 | 5 | 오이도, 상록수, 금정, 과천, 사당 |
| | 433 | 5 | 오이도, 중앙, 금정, 인덕원, 사당 |
| | 434 | 5 | 오이도, 상록수, 금정, 인덕원, 사당 |

완행 통행시분 초기값은 일단 현재 안산선에서 서비스 중에 있는 열차운전시분을 초기 기준시분으로 한다.

<표 3> 완행열차 운전시분

| 구분 | 출발역 | 도착역 | 거리(m) | 실제 시분(초) |
|------|--------|--------|-------|----------|
| 안산선 | 오이도 | 정왕 | 140 | 120 |
| | 정왕 | 신길온천 | 290 | 180 |
| | 신길온천 | 안산 | 220 | 150 |
| | 안산 | 공단 | 180 | 210 |
| | 공단 | 고잔 | 150 | 120 |
| | 고잔 | 중앙 | 140 | 90 |
| | 중앙 | 한대앞 | 160 | 90 |
| | 한대앞 | 상록수 | 150 | 90 |
| | 상록수 | 반월 | 370 | 210 |
| | 반월 | 대야미 | 200 | 120 |
| | 대야미 | 수리산 | 260 | 120 |
| | 수리산 | 산본 | 110 | 60 |
| | 산본 | 금정 | 230 | 240 |
| | 금정 | 범계 | 260 | 180 |
| | 범계 | 평촌 | 130 | 90 |
| | 평촌 | 인덕원 | 160 | 120 |
| | 인덕원 | 정부과천청사 | 300 | 210 |
| | 정부과천청사 | 과천 | 100 | 90 |
| | 과천 | 대공원 | 100 | 90 |
| | 대공원 | 경마공원 | 90 | 90 |
| 경마공원 | 선바위 | 100 | 90 | |
| 선바위 | 남태령 | 200 | 180 | |
| 남태령 | 사당 | 160 | 90 | |

급행 통행시분 초기값 결정은 현재 서비스 중인 운전시분이 없으므로 새로 시물레이션 하여 설정하였다. 급행열차의 운전 시물레이션은 앞서 기술사항에서 제시한 방안에 따라 시행하였고 결과는 <표 4>와 같다.



<그림 13> 급행열차 운전 시물레이션 결과(예시)

〈표 4〉 급행정차대안에 따른 시뮬레이션 운전시분

| 대안 | 출발역 | 도착역 | 거리 (m) | 운전시 분(초) | 대안 | 출발역 | 도착역 | 거리 (m) | 운전시 분(초) |
|-----|---------|---------|--------|----------|---------|---------|---------|--------|----------|
| 411 | 오이도 | 정왕 | 140 | 102 | 422 | 오이도 | 안산 | 650 | 346 |
| | 정왕 | 안산 | 510 | 275 | | 안산 | 상록수 | 780 | 407 |
| | 안산 | 중앙 | 470 | 255 | | 상록수 | 금정 | 1170 | 613 |
| | 중앙 | 상록수 | 310 | 180 | | 금정 | 평촌 | 390 | 226 |
| | 상록수 | 대야미 | 570 | 308 | | 평촌 | 정부과 천청사 | 460 | 252 |
| | 대야미 | 금정 | 600 | 337 | 정부과 천청사 | 사당 | 750 | 512 | |
| | 금정 | 평촌 | 390 | 226 | 423 | 오이도 | 안산 | 650 | 346 |
| | 평촌 | 정부과 천청사 | 460 | 252 | | 안산 | 상록수 | 780 | 407 |
| | 정부과 천청사 | 과천 | 100 | 82 | | 상록수 | 금정 | 1170 | 613 |
| | 과천 | 선바위 | 290 | 181 | | 금정 | 인덕원 | 550 | 303 |
| 선바위 | 사당 | 360 | 310 | 인덕원 | | 정부과 천청사 | 300 | 176 | |
| 412 | 오이도 | 정왕 | 140 | 102 | 정부과 천청사 | 사당 | 750 | 512 | |
| | 정왕 | 안산 | 510 | 275 | 424 | 오이도 | 안산 | 650 | 346 |
| | 안산 | 중앙 | 470 | 255 | | 안산 | 상록수 | 780 | 407 |
| | 중앙 | 상록수 | 310 | 180 | | 상록수 | 금정 | 1170 | 613 |
| | 상록수 | 반월 | 370 | 210 | | 금정 | 인덕원 | 550 | 303 |
| | 반월 | 금정 | 800 | 434 | | 인덕원 | 과천 | 400 | 227 |
| | 금정 | 평촌 | 390 | 226 | 과천 | 사당 | 650 | 460 | |
| | 평촌 | 정부과 천청사 | 460 | 252 | 431 | 오이도 | 중앙 | 1120 | 571 |
| | 정부과 천청사 | 과천 | 100 | 82 | | 중앙 | 금정 | 1480 | 764 |
| | 과천 | 선바위 | 290 | 181 | | 금정 | 과천 | 950 | 500 |
| 선바위 | 사당 | 360 | 310 | 과천 | | 사당 | 650 | 460 | |
| 413 | 오이도 | 정왕 | 140 | 102 | | 432 | 오이도 | 상록수 | 1430 |
| | 정왕 | 안산 | 510 | 275 | 상록수 | | 금정 | 1170 | 613 |
| | 안산 | 중앙 | 470 | 255 | 금정 | | 과천 | 950 | 500 |
| | 중앙 | 상록수 | 310 | 180 | 과천 | | 사당 | 650 | 460 |
| | 상록수 | 반월 | 370 | 210 | 433 | | 오이도 | 중앙 | 1120 |
| | 반월 | 금정 | 800 | 434 | | 중앙 | 금정 | 1480 | 764 |
| | 금정 | 인덕원 | 550 | 303 | | 금정 | 인덕원 | 550 | 303 |
| | 인덕원 | 정부과 천청사 | 300 | 176 | | 인덕원 | 사당 | 1050 | 658 |
| | 정부과 천청사 | 과천 | 100 | 82 | | 434 | 오이도 | 상록수 | 1430 |
| | 과천 | 선바위 | 290 | 181 | 상록수 | | 금정 | 1170 | 613 |
| 선바위 | 사당 | 360 | 310 | 금정 | 인덕원 | | 550 | 303 | |
| 421 | 오이도 | 안산 | 650 | 346 | 인덕원 | | 사당 | 1050 | 658 |
| | 안산 | 상록수 | 780 | 407 | 421 | | 오이도 | 안산 | 650 |
| | 상록수 | 금정 | 1170 | 613 | | 안산 | 상록수 | 780 | 407 |
| | 금정 | 정부과 천청사 | 850 | 448 | | 상록수 | 금정 | 1170 | 613 |
| | 정부과 천청사 | 선바위 | 390 | 233 | | 금정 | 평촌 | 390 | 226 |
| | 선바위 | 사당 | 360 | 310 | | 평촌 | 정부과 천청사 | 460 | 252 |
| 사당 | 안산 | 650 | 346 | 정부과 천청사 | | 과천 | 100 | 82 | |

3. 안전시각 산출

대피선에서의 안전시각은 앞서 설명한 대로 선행행 열차의 충돌을 피할 수 있는 차원에서 결정된다. Distance to go 방식의 자동신호체계를 전제하므로 선행열차의 점유 폐색구간의 끝선을 후행열차의 안전제동 한계가 침범하지 않는 제약에 따라 결정된다. 이때, 주의해야 할 사항 중 하나는 분기조작 시간을 반드시 고려해야 한다는 것이다. 즉, 완행열차가 분기를 통해 대피선으로 완전히 진입한 이후, 급행열차가 통과할 수 있도록 분기기를 다시 정위치로 돌리기까지의 소요시간을 안전시각에 포함해야 한다. 이와 같은 원칙에 따라 대피선 설치 후보역들에 대해 대피선이 설치된다고 가정했을 경우의 안전시각을 도출하여 모형에 적용하였다. 기존 대피선 역을 기준으로 40~50초의 안전출발시간, 안전도착시간이 필요한 것으로 분석 되었다.

4. 분석 대안 구성

대안 작성 기준은 급행정차 패턴, 급완행 열차 운행 비율로 정한다. 운전시각은 안산선의 오이도~안산~사당 구간의 침두시 평균 시적인 5분으로 설정한다. 〈표 5〉는 분석대안을 나타낸다.

5. 분석 방법

급완행 혼합운행 스케줄 작성에서 가장 중요한 문제는 대피선의 위치이다. 일단, 대기하는 완행열차의 승객 서비스와 궤도 유지관리 차원에서 대피선을 정차역에 두는 것이 타당하다. 최적 대피선 설치 위치는 모든 역사에 대피선이 있다고 가정하고 최적 스케줄을 작성한 결과로부터 쉽게 구할 수 있다. 즉, 급완행 교행을 위해 이용된 대피선이 최적 대피선이 된다.

그러나, 24개에 달하는 역사에 대피선을 가정하고 최적해를 도출할 경우 현실적인 계산시간이 상당히 증가할 수 있다. 이를 피하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 방안을 각 분석대안에 대해 적용하였다.

- 급완행 열차의 안전교행을 고려하지 않고 작성한 희망스케줄을 기반으로 상충(열차간 충돌)이 일어나는 시공도상의 지점과 가장 가까운 역사에 대피선을 설치하는 것으로 초기 상태를 설정함.

- 각 상층그룹에 초기 상태에서 설정한 대피선 위치를 인근 역사로 바꾸어 가며 복수의 스케줄을 작성하고 그 스케줄들 중에서 가장 작은 열차지체를 기록한 경우를 해당 분석대안의 대피선 설치 위치로 정함. 기타 스케줄 자성의 나머지 부분은 앞서 제시한 알고리즘을 적용하여 분석하였다.

〈표 5〉 분석대안

| 구분 | 완행:급행 | | 정차역 |
|-------|-------|-----------------------|--|
| | 2:1배차 | 1:1배차 | |
| 안산선 | 411-1 | 411-2 | 오이도, 정왕, 안산, 중앙, 상록수, 대야미, 금정, 평촌, 정부과천청사, 과천, 선바위, 사당 |
| | 412-1 | 412-2 | 오이도, 정왕, 안산, 중앙, 상록수, 반월, 금정, 평촌, 정부과천청사, 과천, 선바위, 사당 |
| | 413-1 | 413-2 | 오이도, 정왕, 안산, 중앙, 상록수, 반월, 금정, 인덕원, 정부과천청사, 과천, 선바위, 사당 |
| | 421-1 | 421-2 | 오이도, 안산, 상록수, 금정, 정부과천청사, 선바위, 사당 |
| | 422-1 | 422-2 | 오이도, 안산, 상록수, 금정, 평촌, 정부과천청사, 사당 |
| | 423-1 | 423-2 | 오이도, 안산, 상록수, 금정, 인덕원, 정부과천청사, 사당 |
| | 424-1 | 424-2 | 오이도, 안산, 상록수, 금정, 인덕원, 과천, 사당 |
| | 431-1 | 431-2 | 오이도, 중앙, 금정, 과천, 사당 |
| | 432-1 | 432-2 | 오이도, 상록수, 금정, 과천, 사당 |
| | 433-1 | 433-2 | 오이도, 중앙, 금정, 인덕원, 사당 |
| 434-1 | 434-2 | 오이도, 상록수, 금정, 인덕원, 사당 | |

6. 분석 결과

각 노선별로 급행 및 완행열차에 대한 운전 시분, 표정속도, 대피선 위치 등을 결과로 제시하면 〈표 6〉과 같다. 각 대안에 대한 최적 스케줄은 대안 고유의 입력조건에 따라 앞서 설명한 열차지체 최소화 방안을 적용하여 열차 스케줄을 도출하였고, 대안들 간의 비교는 모형에서 설정한 목적함수 값을 기준으로 하였다. 제안한 모형의 목적함수는 열차지체다. 열차의 지체시간이란 희망스케줄 상의 최종역 도착시간과 실제 스케줄상의 도착시간 차이를 의미한다. 열차가 두 대라고 가정하고 열차1의 희망도착시간이 10, 열차2가 20이라고 하면 열차지체 목적함수는 (열차1의 실제도착시간-10) + (열차2의 실제도착시간-10)이 된다. 각 열차의 희망도착시간은 상수이므로 모두 목적함수에서 제외해도 무방하므로 남아 있는 목적함수는 최종역의 열차도착시간의 합이 된다.

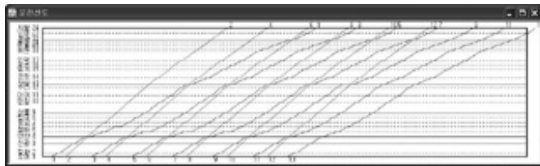
〈표 6〉에서 보듯이 안산선의 경우, 완행 대 급행 배차 비율이 1:1인 대안이 2:1에 비해 전반적으로 열차지체 수준이 낮은 것으로 분석되었으며, 그 중 급행열차 5개 역사(오이도, 중앙, 금정, 인덕원, 사당) 정차, 선바위역 대피선 설치 대안(433-2)이 총열차지체시간을 최소화하는 대안임을 확인하였다. 〈그림 18〉은 433-2대안의 스케줄을 보여준다. 433-2안의 경우, 기존 안산역, 산본역 대피선을 이용할 수 있다면 신규로 1개소의 대피선(선바위역) 설치로 급행열차의 표정속도를 63kph까지 향상시킬 수 있다. 이를 시간으로 따져보면 오이도에서 사당까지 41분이 소요되어 62분가량 소요되는 기존 완행에 비해 21분(34%)의 시간절감을 가져올 수 있다. 열차의 통행시간 절감은 궁극적으로 철도 이용율을 높이는 결과를 가져올 수 있고 광역교통의 승용차이용을 억제하는 요인이 될 수 있다. 반면, 급행열차를 교행시키기 위해 대피해야 하는 완행열차에 대해서는 약간의 시간 손실이 있는데 안산선의 경우, 기존 62분이 65분으로 늘어나 3분(4%)

〈표 6〉 분석결과

| 대안 | 평균 시종점 통행시간(분) | | 표정속도 (kph) | | 신규 대피선 설치 위치* | 목적함수 (분) |
|-------|----------------|----|------------|----|---------------|----------|
| | 완행 | 급행 | 완행 | 급행 | | |
| 411-1 | 63 | 48 | 40 | 53 | 공단 | 754.2 |
| 412-1 | 63 | 48 | 40 | 53 | 공단 | 751.8 |
| 413-1 | 63 | 48 | 40 | 53 | 공단 | 751.4 |
| 421-1 | 63 | 43 | 40 | 59 | 대야미, 과천 | 737.6 |
| 422-1 | 63 | 43 | 40 | 59 | 수리산, 경마공원 | 736.1 |
| 423-1 | 63 | 43 | 40 | 59 | 수리산, 경마공원 | 735.9 |
| 424-1 | 63 | 43 | 40 | 59 | 수리산, 경마공원 | 736.2 |
| 431-1 | 63 | 41 | 40 | 62 | 공단, 선바위 | 725.5 |
| 432-1 | 63 | 41 | 40 | 62 | 공단, 선바위 | 725.3 |
| 433-1 | 63 | 41 | 40 | 62 | 공단, 선바위 | 725.5 |
| 434-1 | 63 | 41 | 40 | 62 | 공단, 선바위 | 725.4 |
| 411-2 | 63 | 49 | 40 | 52 | 고잔 | 728.6 |
| 412-2 | 63 | 49 | 40 | 52 | 고잔 | 728.0 |
| 413-2 | 64 | 48 | 40 | 53 | 공단, 대공원 | 729.4 |
| 421-2 | 65 | 44 | 39 | 58 | 남태령 | 709.7 |
| 422-2 | 65 | 43 | 39 | 59 | 남태령 | 706.3 |
| 423-2 | 65 | 43 | 39 | 59 | 남태령 | 707.4 |
| 424-2 | 66 | 43 | 39 | 60 | 선바위 | 710.2 |
| 431-2 | 65 | 41 | 39 | 63 | 선바위 | 691.8 |
| 432-2 | 65 | 41 | 39 | 63 | 선바위 | 692.1 |
| 433-2 | 65 | 41 | 39 | 63 | 선바위 | 691.7 |
| 434-2 | 65 | 41 | 39 | 63 | 선바위 | 692.1 |

* : 안산선의 기존 대피선은 모두 포함된 상태임 : 오이도, 신길은 천, 안산, 상록수, 산본

의 시간손실이 있다. 최적안의 열차 배치비율(1:1)을 고려하여 열차시분의 순 단축분(Net saving)을 계산하면 급완행 열차 1쌍에 대해 18분이 된다.



〈그림 14〉 최적 스케줄 : 대안 433-2

또한, 급행열차를 도입하게 되면 특정 역간을 이동하는 일부 승객의 통행이 불편해질 수 있는 소지가 있다. 예를 들어, 급행열차의 교행이 일어나는 역들을 포함한 구간을 이동하는 완행 이용자는 급행교행을 위해 지체되는 시간만큼을 손해 보게 되고, 급행이 정차하지 않는 역간을 완행 및 급행 환승을 통해 이동한다면 대기시간이 추가된다.

V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 광역철도가 승용차에 대하여 통행시간에 대한 경쟁력을 갖게 하기 위한 방안으로 대피선 설치를 통한 급행열차 도입을 제안하였다. 급행과 완행열차의 혼합 운행은 매우 정교한 기술적 검토를 요구하며 실질적인 운행방안의 제시가 필요하다. 본 연구에서는 급행열차에 대한 운전선도를 시뮬레이션하고 급완행 열차의 교행 패턴을 도출하는 열차 스케줄 작성 알고리즘을 제시하고 안산선을 대상으로 적용 사례를 제시하였다. 결과적으로, 안산선의 경우 1개의 신규 대피선 설치를 통해 급행열차의 표정속도를 63kph 까지 향상시킬 수 있음을 보였다.

본 연구는 열차운행의 관점에서 열차지체의 최소화에 초점을 맞추었지만 궁극적으로, 통행수요를 감안한 총통행시간을 최소화하는 연구가 필요하다. 그러나, 열차운전 패턴에 따라 변화하는 통행수요 패턴까지 문제에 포함한다면 목적함수가 비선형으로 바뀌면서 NP-Hard인 스케줄 문제가 더욱 더 풀기 어려운 문제가 된다. 현재까지 통행수요를 고려하여 총통행시간을 최소화하는 열차 스케줄 문제는 시도된 바가 없으며 본 연구가 향후연구로서 제안하는 현실적인 복안은 다음과 같다.

- ① 복수의 열차운행 시나리오(급행 대 완행 배치빈도, 열차시격, 급행 정차역등 기준)를 설정한 후 각 시나리오 별로 제시한 방법에 따라 열차지체 최소화

스케줄을 작성한다.

- ② 각 시나리오별 통행수요 패턴을 별도로 분석하여 열차운전 스케줄상의 통행시간과 대기시간을 고려하여 총통행시간을 도출한다.
- ③ 도출된 총통행시간을 비교하여 최적 시나리오를 설정한다.

이때 시나리오별 통행수요 패턴(급완행 통행수요)을 결정하는 것도 별도의 큰 연구주제가 된다.

참고문헌

1. 김경철(1998) 도시철도 급행화 계획을 위한 기초 연구. 서울시정개발연구원, 시정연98-M-03
2. 김선호. (1997). 철도 시스템의 이해. 자작 아카데미
3. 하동욱 (2004). 도시철도기술자료집 (열차제어), 서울시 지하철 건설본부, Vol 10
4. Hay, W. (1982). Railroad Engineering. John Wiley & Sons
5. Higgins, A., E. Kozan and L. Ferreira. (1996). Optimal Scheduling Of Trains On A Single Line Track. Transportation Res-B Vol 30, pp147-161
6. Kraay, D., P. T. Harker and B. Chen. (1991). Optimal Pacing of Trains in Freight Railroads: Model Formulation and Solution. Operations Research, Vol 39, pp82-99
7. Carey, M. (1994). Extending a Train Pathing Model from One Way to Two Way Track. Transportation Research Part B 28 (5), pp 395-400
8. Carey, M., Lockwood, D. (1995). A Model, Algorithm and Strategy for Train Pathing. Journal of the Operation Research Society 46 (8), pp 988-1005

- ✉ 주 작 성 자 : 손기민
- ✉ 교 신 저 자 : 손기민
- ✉ 논문투고일 : 2007. 7. 3
- ✉ 논문심사일 : 2007. 9. 18 (1차)
2007. 10. 1 (2차)
2007. 10. 10 (3차)
- ✉ 심사판정일 : 2007. 10. 10
- ✉ 반론접수기한 : 2008. 2. 29