한국철도학회논문집
제8권 제4호 2005년 ▌ pp. 314-320

단선구간 열차경합해소 문제를 위한 수리계획 모형의 기본설계

An Exploratory Development of Mathematical Programming Model for the Railway Conflict Resolution Problem on a Single Line Track

김재희† · 오석문* · 홍순흠**
Jae-Hee Kim · Seog-Moon Oh · Soon-Heum Hong

Abstract

This paper is designed to help train dispatcher resolve railway conflicts in real-time. We developed a mixed integer programming model to optimize the train schedule that determines the best overtaking or crossing positions. The objective of the model is to minimize the maximum lateness of the trains and reduce the total sum of the lateness, while satisfying the field constraints associated with the difference between passenger trains and freight trains, and the limited number of sidings. We applied the model on a portion of a single line track, Joong-Ang Line to ascertain the efficiency of the model, and showed how the model can be used to resolve the railway conflicts. The results indicates that our model can provide useful results in terms of optimal schedule for the test problem. This type of modeling approach would be useful for a train dispatcher to make a real-time railway conflict resolution.

Keywords : Mixed Integer Programming(혼합정수계획법), Railway Conflict Resolution Problem(열차경합해소문제), Railway Traffic Management System(열차운행관리 시스템)

1. 서 론

철도 네트워크에서는 정해진 선로를 운행하는 열차의 특성상 일부 열차의 지연이 다른 열차의 스케줄에 영향을 미치는 혼선(conflict)이 발생할 수 있다. 특히 운행 열차의 속도 종별이 다양한 한국철도의 경우 경합 발생의 가능성이 높아 추월·대피·교행 등의 열차 운행관리 업무가 매우 중요한 문제가 된다[1]. 즉, 짧은 시간 내에 혼선된 열차 스케줄을 정상으로 회복시킬 수 있는 열차경합 해소(railway conflict resolution)기술이 필요하다.

열차경합해소 문제는 열차 간 진행 순서와 추월(또는 대피나 교행) 장소(역)를 결정하는 문제로서, 확산된 열차 경합의 수가 증가함에 따라 전체 시스템에서 고려할 수 있는 경합 해소 대안의 수가 기하급수적으로 증가하는 성질을 갖고 있다. 즉, 확산된 열차 경합의 수가 n일 때 2^n의 복잡도(computational complexity)를 갖는 NP-hard문제가 된다[2].

† 책임저자 : 정회원, 국립군산대학교 경영회계학부
E-mail : jheekim@kunsan.ac.kr
TEL : (063)469-4487 FAX : (063)469-4481
* 한국철도기술연구원, 철도정책물류연구본부
** 한국철도기술연구원, 철도정책물류연구본부

열차경합해소 문제를 위해 다양한 최적화 기법들이 사용되어 왔다. Szpigel [3]의 연구는 이 문제의 수리적 해법 도출을 위한 선구적인 시도였다. 그는 열차경합 해소문제를 혼합정수계획(Mixed Integer Programming)모델로 모형화하고 분지한계법(Branch and Bound)을 이용한 해법을 제시하였다. 이후 많은 연구들이 뒤를 이었다. 대표적인 연구로 Harker [4]를 들 수 있다. 그는 연료사용비용과 운행지연에 따른 벌점의 합을 최소화하는 목적함수를 사용하고 속도와 연료비용과의 비선형 관계를 고려한 비선형계획 모형을 제안하였다. 그리고 Kraay & Harker [5]는 Harker [4]와 같은 비선형 목적함수식을 상정하고 이 문제를 위한 가장 실질적인 해법으로 라운딩 휴리스틱(rounding heuristic)기법을 제안했다. 가장 최근의 Higgins 등 [6]의 연구에서는 연료비용과 열차지연 최소화 목적함수를 적용한 수리모형을 제시하고 목적함수 하한값의 추정치(LB1)를 구하는 알고리듬을 개발하여 이를 분지한계법과 함께 적용했다. 그들은 LB1을 활용한 기법이 제약식을 완화해서 목적함수 하한치의 추정치(LB2)를 구한 후 이를 분지한계법에 활용하는 기법이나 타부 탐색(Tabu Search)을 적용한 결과보다 우수한 결과를 도출함을 보여주었다.

국내의 경우는 수리적 기법을 적용한 사례가 아직 미미한 실정이다. 오석문 등 [1]은 열차경합 해소 문제에 최적화 기법을 적용하기 위한 사전 연구로서 한국 철도의 노선별 운행패턴을 정량적으로 분석하고, 각 노선별 열차운행 패턴에 맞는 열차경합해소 문제의 해법을 제시하였다. 그리고 김재희 등 [7]은 복선구간에서 승객접속대기를 고려한 열차경합해소모형을 제시하였다.

본 연구에서는 단선구간의 열차경합 해소 문제를 위해 Higgins [6]의 모형을 토대로 한국철도의 특성을 고려한 새로운 열차경합해소 모형을 제시하고 이를 사례구간에 적용함으로써 그 활용 가능성을 확인하고자 한다. 제시된 모형은 열차 순서를 나타내는 이진정수 변수가 포함된 혼합정수계획모형으로, 역내 대피선의 용량을 고려했으며 외국의 연구가 주로 화물열차를 대상으로 했던 것과 달리 여객열차의 운행상황을 중점적으로 고려할 수 있도록 했다. 또한 단순히 열차지연시간의 합을 최소화하는 대신 가장 심각한 지연을 우선적으로 최소화하도록 하는 등, 철도서비스 정책의 현실을 반영하고자 했다.

2. 열차경합 해소를 위한 수학모형 수립

본 연구에서는 열차경합 해소를 위한 수학 모형을 수립하였다. 이 모형은 열차 우선순서와 대피선 용량을 고려하는데 필요한 이진정수 변수가 포함된 혼합정수계획모형으로 구성되었다.

2.1 고려사항

현재 열차 운행에서는 동일한 지연시간을 갖는 여러 열차가 경합할 경우 열차등급별 우선순위에 따라 열차진행 순서를 결정한다. 따라서 본 모형에서도 새마을호, 무궁화호, 화물열차의 열차 지연에 따른 벌점에 차등을 두어 열차종별 간 상대적 중요도를 반영할 수 있도록 했다.

2.2 제약식

2.2.1 기호정의

기호 정의에 앞서 열차 노선도의 개념을 도시하면 Fig. 1과 같다. 그림과 같이 상행선 끝에 위치한 역에서부터 순차적으로 번호를 매긴다. 또한 역간 트랙세그먼트에 대해서도 같은 방법으로 번호가 부여된다.

Fig. 1의 개념을 토대로 수학 모형 수립에 필요한 기호를 정의하면 다음과 같다.

$I = \{1, 2, ..., m, m+1, ...\}$: $(1, 2, ...m)$ 은 상행열차, 나머지는 하행열차

I_1 : 여객열차 집합

P : 단선 트랙세그먼트 집합

Q : 모든 역의 집합

Q_i : 열차 i 가 정차하는 역의 집합

2.2.2 상수 정의

w_i : 열차 i 의 지연도착에 따른 벌점

Y_O^i : 열차 i 의 시발역에서 계획된 출발시각

$Y_{a,q}^i$: 열차 i 의 역 q에의 계획된 도착시각

$Y_{d,q}^i$: 열차 i 의 역 q에서 계획된 출발시각

S_q^i : 열차 i 의 역 q에서 계획된 정차시간

$\underline{v}_p^i$: 열차 i 의 트랙세그먼트 p에서의 평균속도의 허용하한

$\bar{v}_p^i$: 열차 i 의 트랙세그먼트 p에서의 평균속도의 허용상한

$h_p^{i,j}$: 트랙세그먼트 p에서 선행 열차 i 와 후행열차 j 간의 최소 여유시격

d_p : 트랙세그먼트 p의 구간 길이

NS_q : 역 q의 구내 선로 용량 (대피선 개수)

M : 매우 큰 양의 상수

ϵ : 단위시간 크기와 $1/M$ 보다도 작은 양의 상수

ρ_1 : 1보다 매우 작은 양의 상수

ρ_2 : 1보다 매우 작은 양의 상수, $\rho_2 \ll \rho_1$

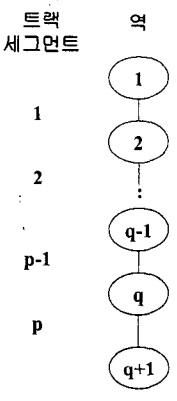

Fig. 1. Schematic diagram of a railway network

2.2.3 변수 정의

$A_{ijp}\begin{cases}1 & p \in P \text{ 에서 상행열차 } i \le m \text{가 } j \le m \text{ 보다 선행하는 경우}\\ 0 & \text{그렇지 않은 경우}\end{cases}$

$B_{ijp}\begin{cases}1 & p \in P \text{ 에서 상행열차 } i \le m \text{가 하행 열차 } j > m \text{ 보다 선행하는 경우}\\ 0 & \text{그렇지 않은 경우}\end{cases}$

$C_{ijp}\begin{cases}1 & p \in P \text{ 에서 하행열차 } i > m \text{가 } j > m \text{ 보다 선행하는 경우}\\ 0 & \text{그렇지 않은 경우}\end{cases}$

$D_{ijp}\begin{cases}1 & \text{역 } q\text{에서 열차 } i \text{ 와 } j\text{가 동시에 위치하면 1, 아니면 0}\\ 0 & \text{그렇지 않은 경우}\end{cases}$

$X^i_{a,q}$: 열차 i 의 역 q에의 도착시각
$X^i_{d,q}$: 열차 i 의 역 q에서 출발시각
X^i_O : 열차 i 의 시발역 출발시각
ET^i_q : 열차 i 의 역 q에서 조착시간
LT^i_q : 열차 i 의 역 q에서 지연시간

2.2.4 제약식

1) 상행 열차 간 경합

식 (1), (2)는 상행열차 간의 경합상황에서 각각 열차 j와 i 선행 시의 두 열차 간 최소여유시격제약을 의미한다.

$$\left.\begin{array}{l} M \cdot A_{ijp} + X^i_{a,q} \ge X^j_{a,q} + h^{j,i}_p \\ M \cdot A_{ijp} + X^i_{d,q+1} \ge X^j_{d,q+1} + h^{j,i}_p \end{array}\right\} \forall p \in P,\ i, j \le m \quad (1)$$

$$\left.\begin{array}{l} M \cdot (1 - A_{ijp}) + X^j_{a,q} \ge X^i_{a,q} + h^{i,j}_p \\ M \cdot (1 - A_{ijp}) + X^j_{d,q+1} \ge X^i_{d,q+1} + h^{i,j}_p \end{array}\right\} \forall p \in P,\ i, j \le m \quad (2)$$

2) 하행 열차 간 경합

식 (3), (4)는 하행열차 간의 경합상황에서 각각 열차 j와 i 선행 시의 두 열차 간 최소여유시격제약을 의미한다.

$$\left.\begin{array}{l} M \cdot C_{ijp} + X^i_{a,q+1} \ge X^j_{a,q+1} + h^{j,i}_p \\ M \cdot C_{ijp} + X^i_{d,q} \ge X^j_{d,q} + h^{j,i}_p \end{array}\right\} \forall p \in P,\ i, j > m \quad (3)$$

$$\left.\begin{array}{l} M \cdot (1 - C_{ijp}) + X^j_{a,q+1} \ge X^i_{a,q+1} + h^{i,j}_p \\ M \cdot (1 - C_{ijp}) + X^j_{d,q} \ge X^i_{d,q} + h^{i,j}_p \end{array}\right\} \forall p \in P,\ i, j > m \quad (4)$$

3) 교행 열차 간 경합

식 (5)는 교행열차간의 경합상황에서 각각 하행열차 j와 상행열차 i 선행 시의 두 열차 간 최소여유 시격제약을 의미한다.

$$\left.\begin{array}{l} X^j_{a,q+1} + h^{j,i}_p \le X^i_{d,q+1} + M \cdot B_{ijp} \\ X^i_{a,q} + h^{i,j}_p \le X^j_{d,q} + M \cdot (1 - B_{ijp}) \end{array}\right\} \forall p \in P,\ i \le m, j > m \quad (5)$$

4) 열차 속도 고려

실제 열차 경합 해소 과정에는 열차의 가속, 감속을 통해 운행시간을 조정한다. 식 (6), (7)은 각각 하행, 상행열차에 대해 역간 평균 주행속도를 정해진 규정내에서 유지시켜야 함을 의미한다.

$$\frac{d_p}{\bar{v}^i_p} \le X^i_{a,q+1} - X^i_{d,q} \le \frac{d_p}{\underline{v}^i_p} \qquad \forall p \in P,\ i > m \quad (6)$$

$$\frac{d_p}{\bar{v}^i_p} \le X^i_{a,q} - X^i_{d,q+1} \le \frac{d_p}{\underline{v}^i_p} \qquad \forall p \in P,\ i \le m \quad (7)$$

5) 열차의 계획된 출발/정차 시각 준수

식 (8)은 시발역의 모든 열차가 출발예정시각 이후에 출발해야 함을 의미한다. 식 (9)은 여객 열차의 경우 역의 출발예정시각 이후에 발차해야 함을 나타낸다. 여기서 화물열차에 대한 출발시각을 제약하지 않은 것은 화물열차의 경우 열차경합 해소과정에서 필요할 경우 출발예정시각보다 일찍 출발시키는 것이 가능하다고 가정했기 때문이다. 그리고 식 (10)은 모든 열차에 대해 계획된 정차시간(dwell time)을 준수해야 함을 의미한다.

$$X^i_O \ge Y^i_O \quad \forall i \in I \quad (8)$$

$$X^i_{d,q} \ge Y^i_{d,q} \quad \forall i \in I_1,\ q \in Q \quad (9)$$

$$X^i_{d,q} \ge X^i_{a,q} + S^i_q \quad \forall i \in I,\ q \in Q \quad (10)$$

6) 열차 도착 지연시간 산정을 위한 식

식 (11)은 열차 조착시간 값(ET^i_q)과 지연시간(LT^i_q)를 산정하기 위한 부가제약식이다. 이 식은 목표계획모형의 특성을 이용한 것으로, 실제 최적화 모형의 결과에서는 조착시각과 지연시간 중 하나가 0보다 크거나 같은 값을 갖고 나머지 하나는 반드시 0을 갖게 된다. 가령 계획된 도착시각($Y^i_{a,q}$)이 10인 상황에서 열차가 이보다 2분 지연된 12에 도착한다면 식 (11)은 ET^i_q=0, LT^i_q=2의 값을 가져 (12+0-2=10)을 만족하는 것이다. 이것은 최적화 모형이 식 (16)의 목적함수식을 통해 지연시간이나 조착시간의 최소화를 꾀하기 때문으로 모형의 결과에서 식 (11)이 (12+1-3=10)과 같이 만족되는 일은 발생하지 않는다.

$$X^i_{a,q} + ET^i_q - LT^i_q = Y^i_{a,q} \quad \forall i \in I,\ q \in Q \quad (11)$$

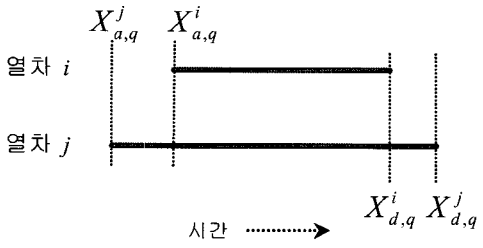

Fig. 2. A situation where train i and j dwell simultaneously at station q

7) 대피용량을 고려하기 위한 식

모든 역에서는 부본선(siding)의 수에 의해 열차 대피용량이 제한된다. 그리고 대피용량은 기존 대피선 중 일부에서 유지보수 업무를 수행하거나 사고 발생으로 일부 대피선을 사용할 수 없는 경우 감소할 수 있으며, 작업이나 사고처리 완료 후 정상 대피용량으로 환원될 수 있다. 따라서 대피용량을 매개변수로 처리해서 대피용량이 변화하는 상황을 표현할 수 있도록 했다.

식 (12-15)은 대피용량 제약을 혼합정수계획 모형으로 표현한 것이다. 먼저 식 (12)은 역 q에서 열차 j가 i 보다 일찍 도착할 경우에 한해 D^+_{ijq}=1이 됨을 의미한다. 이와 비슷한 원리로 식 (13)에서는 열차 j가 i 보다 늦게 출발할 경우에 한해 D^-_{ijq}=1이 된다. 그리고 식 (14)는 D^+_{ijq}와 D^-_{ijq}이 모두 1일 경우, 즉 j가 i 보다 일찍 도착해서 늦게 출발하는 경우에 D_{ijq}=1이 됨을 나타낸다. 이 경우는 가로축을 시간의 흐름으로 놓고 열차가 역내 머무는 시간을 선으로 표시할 경우 Fig. 2와 같이 열차 i 와 j가 동시에 정차하는 상황을 의미한다. 마지막으로 식 (15)는 식 (12-14)를 종합한 것으로 역내에서 동시에 정차하는 열차의 수가 대피선의 용량을 초과하지 않아야 함을 나타낸다.

$$\begin{cases} D^+_{ijq} \geq (X^i_{a,q} - X^j_{a,q})/M \\ D^+_{ijq} \leq (X^i_{a,q} - X^j_{a,q})/M + 1 \end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{cases} D^-_{ijq} \geq (X^j_{d,q} - X^i_{d,q})/M \\ D^-_{ijq} \leq (X^j_{d,q} - X^i_{d,q})/M + 1 \end{cases} \tag{13}$$

$$\begin{cases} D_{ijq} \geq (D^+_{ijq} + D^-_{ijq})/2 - (\frac{1}{2} + \epsilon) \\ D_{ijq} \leq (D^+_{ijq} + D^-_{ijq})/2 + (\frac{1}{2} - \epsilon) \end{cases} \tag{14}$$

$$\sum_{j \in I \setminus \{i\}} D_{ijq} \leq NS_q - 1 \quad \forall i \in I,\ q \in Q \tag{15}$$

2.3 목적함수

목적함수에서는 열차 지연시간을 최소화하도록 구성했다. 여기서 외국의 사례와 달리 연료사용에 따른 운행비용을 고려하지 않은 이유는 미국이나 호주가 장거리 단선 구간에서 화물 열차를 주로 운행하는 것과 달리 우리나라는 여객 열차가 주종을 이루고 연료사용비용 보다는 여객열차의 운행 지연 최소화에 주안점을 두기 때문이다. 또한 이는 운행비용의 복잡한 비선형식을 포함하는 데 따른 모형 수행도의 저하를 막기 위한 포석이기도 하다.

목적함수는 Higgins [6]의 모형이 단순히 열차시간의 총합을 최소화 한 것과 달리 정차역에서 발생한 지연시간 중 최대지연 시간을 우선적으로 최소화하고 부차적으로 전체 지연 시간의 합을 최소화할 수 있도록 했다. 이것은 여객열차 운행 시 20대의 열차가 1분씩 지연하는 경우와 1대의 열차에서 20분의 지연이 발생하는 경우를 가정할 때 후자가 더 나쁜 서비스를 의미하기 때문이다. 이러한 Min{Max}의 개념을 반영하기 위해 목적함수를 식 (16)과 같은 Augmented Weighted Tchebycheff Function형태로 정의했다. 이 식에서 ρ_1과 ρ_2가 붙은 항은 작은 영향이긴 하지만 지연시간의 총합과 조착시간의 총합을 최소화하는 역할을 한다. 여기서 ρ_1과 ρ_2값으로는 Steuer [8]의 권고 사항을 토대로 각각 0.01과 0.0001을 부여했다. 식 (16)에서 첫 번째 제약식은 지연시간 중 최대값을 추출하기 위해 부가적으로 추가된 식이며, 마지막 식은 모든 변수가 제약식 (1-15)을 준수해야 함을 의미한다.

$$\begin{aligned} \min \quad & \alpha + \sum_{i \in I, q \in Q_i} \left(\rho_1 \cdot w_i \cdot LT^i_q + \rho_2 \cdot w_i \cdot ET^i_q\right) \\ s.t. \quad & \alpha \geq LT^i_q \qquad \forall\ i \in I,\ q \in Q_i \\ & x \in S \end{aligned} \tag{16}$$

3. 모형수행 및 결과

모형의 전체적인 수행 절차는 Fig. 3과 같다. 먼저 제2절에서 제시된 수학 모형을 ILOG OPL(Optimization Programming Language) Studio 3.5를 사용하여 모델링한다. 이후 간단한 휴리스틱을 기반으로 하여 조합최적화 패키지 중 가장 강력한 것으로 알려진 ILOG CPLEX 8.0으로 최적해를 구한다. 그리고 우측 그림과 같은 열차다이어그램을 도시한다. 여기서 사용된 OPL Studio는 모형의 변수, 상수, 목적함수 그리고 제약식 등을 자연스런 대수학 기수법으로 정의하는 프로그램 라이브러리로서 이를 통해 제2절에서 수립된 복잡한 수리모형을 빠른 시간에 구현할 수 있었다.

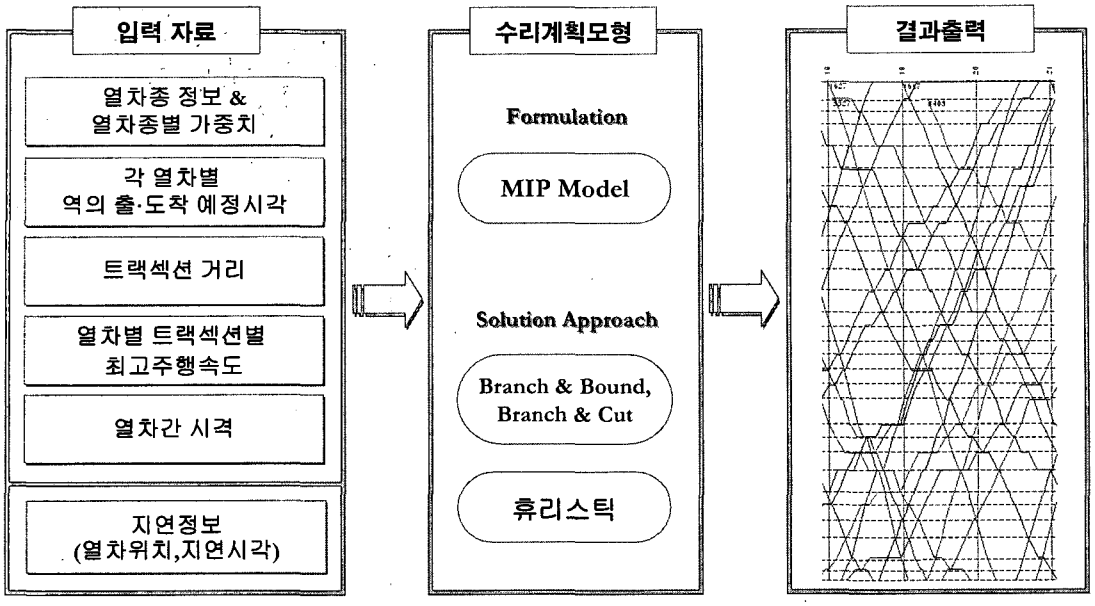

Fig. 3. Outline of the optimization procedure for railway conflict resolution

3.1 중앙선 예제

수립된 모형의 검증을 위해 단선철도 노선 중 열차종별 다양성이 커 열차 경합 발생의 가능성이 큰 중앙선을 분석 구간으로 선정했다. 그리고 이 중 서울지역관리사무소의 관할 구역인 청량리-봉양역 구간 33개 역을 포함하는 147.8km의 구간을 대상 구간으로 했으며 이 구간에서 평일 오후 12시부터 오후 11시까지 운행되는 총 37대의 열차를 문제의 고려대상으로 했다.

Fig. 4는 해당 구간에서 열차 지연이 없을 때의 정상다이어그램 중에서 지면 관계상 오후 3시부터 오후 10시까지 영역만을 확대한 그림이다. 여기에 지연 열차의 위치와 지연시간을 입력하고 최적화 모형을 수행했다.

3.2 해법절차

수립된 모형의 해를 구하는 과정은 ILOG CPLEX에 내장된 분지한계법(Branch & Bound)과 분지절단법(Branch & Cut)을 사용했다. 그리고 모형의 빠른 수행을 위해 해 공간(solution space)을 줄일 수 있는 휴리스틱을 적용해 보았다. 이 휴리스틱은 운행시간대가 전혀 다른 열차 간에는 경합의 영향이 미치지 않는 특성을 이용한 것이다. 실례로 어느 한 열차가 약 10여분 지연되었다고 가정할 때 열차 운행시각표상에서 출도착시간 기준으로 약 30분 이상 차이가 있는 열차들 간에는 정해진 순서를 어길 가능성이 적다고 볼 수 있다. 따라서 이들 열차들처럼 열차 간 출도착 순서가 거의 결정적인 경우 굳이 열차 간 순서를 결정하는 이진정수 변수를 포함시켜 모형의 복잡도를 키우는 대신 해당 변수 값을 미리 할당해 놓고 남은 변수만을 대상으로 문제를 풀어 해 도출시간을 줄이도록 했다. 실제 이 방법을 사용하지 않았을 때 예제 구간에 대한 문제를 푸는 데 걸리는 시간이 약 5-6여분에 달했던 것에 비해 앞서 설명한 휴리스틱을 적용한 경우 1분 내외에 최적해를 구할 수 있었다. 이는 중앙선의 실시간 열차 제어에 필요한 응답시간으로 받아들일 만한 수준으로 볼 수 있다.

3.3 최적화 수행결과

Fig. 5는 3330번 상행 화물열차가 유교역에서 약 35분 지연출발 하는 경우를 가정해서 최적화 모형을 이용해 열차 경합을 해소한 결과다. 이 다이어그램에서 원으로 표시된 부분은 지연 도착한 경우를 의미한다. 그림에서 유교역에서 35분 지연 출발한 3330번 열차의 경우 종착지인 망우역에서는 약 20분을 회복해서 도착할 수 있었다. 또한 3330열차 지연의 영향으로 3315, 1111, 3327, 3403번 하행열차와 3310, 1630번 상행열차에서도 지연이 발생하지만 시간이 지남에 따라 회복시켜 종착역 도착 이전에 정상다이어그램으로 복귀됨을 확인할 수 있었다. 한편, 이 결과는 최적화를 적용해도 한 열차의 지연이 다른 여러 대의 상·하행 열차의 운행에 지장을 미침을 보여준다. 따라서 이러한 조합최적화 문제를 사령의 수작업에만 의존할 경우 시스템 전체를 관망하지 못하는 한계로 부분적으로 좋지 않은 결정을 내릴 개연성을 배제할 수 없음을 확인할 수 있다.

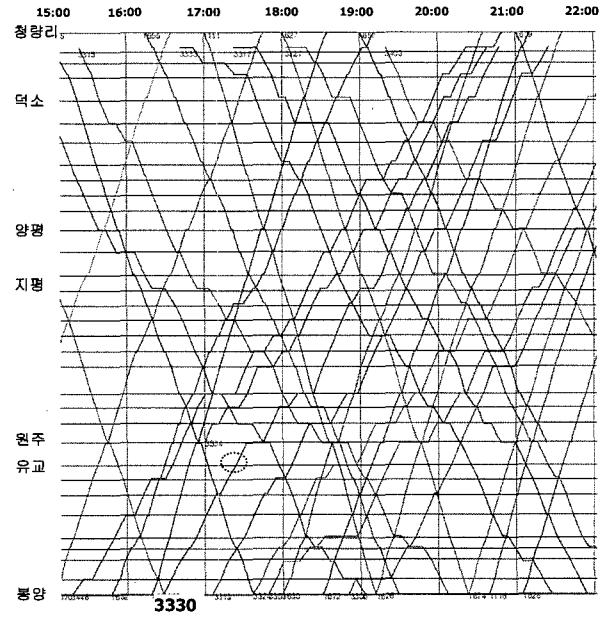

Fig. 4. Operation schedule of the Choong-Ang Line

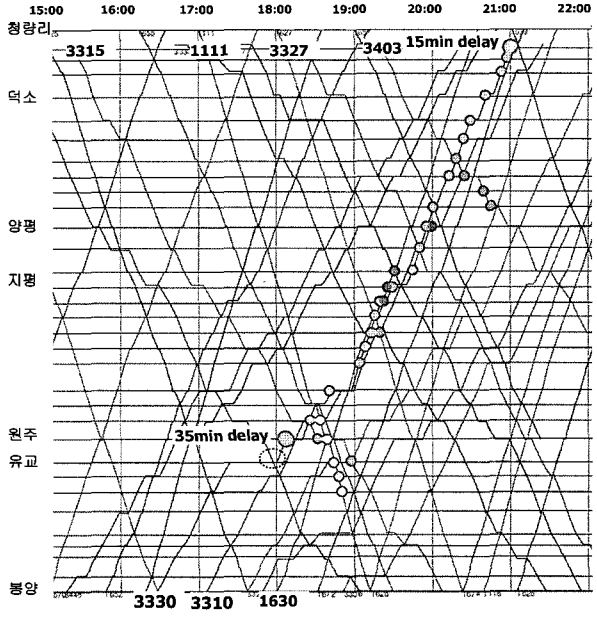

Fig. 5. Resolved train schedule

4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 여객열차와 화물열차가 동시에 운행되는 한국철도의 상황을 고려해서 열차경합해소를 위한 수리계획 모형을 제시하였다. 이 모형은 열차 진행순서와 대피선 용량을 고려하는데 필요한 이진정수 변수가 포함된 혼합정수계획모형으로 수립되었으며, 단순히 열차 지연시간의 총합을 최소화하는 대신 가장 심각한 지연을 우선적으로 최소화하고 부차적으로 전체 지연시간의 총합을 줄일 수 있도록 구성되었다. 수립된 모형을 중앙선 예제구간에 적용한 결과 복잡한 열차경합 상황을 효과적으로 해소할 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제시된 모형에 대한 해법을 확장할 경우 다른 노선의 열차경합 해소문제를 해결하는데 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 아울러 제시된 모형은 경합 발생 이후 시간표를 계획해 주는 모형의 특성상 열차 경합해소 기능 외에 열차 시각표 변경에 따른 영향을 분석해 볼 수 있어, 열차 시각표 작성을 위한 도구로서 역할도 가능할 것으로 기대된다.

한편, 본 연구에서 제시된 모형은 일부 단선구간을 대상으로 검증된 것으로서, 문제 크기가 커질 경우 특히 열차 시각표상 여유시간이 적은 복선구간을 포함할 경우에는 본 연구의 성과를 토대로 보다 빠른 수행도를 갖는 모형과 해법 절차를 개발할 필요가 있다. 또한 열차경합 문제를 역내 열차 순서결정의 문제로 확장해 볼 수 도 있는데, 이 역시 실시간 열차 제어의 중요한 문제가 된다. 따라서 향후 연구를 통해 역 구내 열차순서 문제를 고려해 보고자 한다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 차세대철도원천기술연구사업으로 지원된 "차세대 철도운영정보 기술연구" 과제의 연구결과의 일부입니다

참 고 문 헌

1. 오석문, 홍순흠, 최인찬, 2004, "열차경합 검지 및 해소시스템의 한국철도 적용에 관한 선행연구," 한국철도학회논문집, 제7권, 제2호, pp.71-76.
2. Petersen, E. R., Taylor A. J., and Martland, C. D., 1986, "An introduction to computer assisted train dispatch," Journal of Advanced Transportation, Vol.20, No.1, pp.63-72.
3. Szpigel, B., 1973, "Optimal train scheduling on a single track railway," Operations Research '72, ROSS, M. (eds.), North-Holland Publishing Company, pp.343-352.
4. Harker, P. T., 1989, "Use of advanced train control systems in scheduling and operating railroads: models, algorithms, and applications," Transportation Research Record, Vol.1263, pp.101-110.
5. Kraay, D. R. and Harker, P. T., 1995, "Real-time scheduling of freight railroads," Transportation Research, Vol.29B, No.3, pp.213-229.

6. Higgins, A., Kozan, E., and Ferreira, L., 1996, "Optimal scheduling of trains on a single line track," Transportation Research Part B: Methodological, Vol.30, No.2, pp.147-161.
7. 김재희, 오석문, 홍순흠, 김영훈, 2004, "승객연계수송을 고려한 열차경합해소 문제에 관한 연구," 대한교통학회 2004 추계학술발표회논문집, pp.212-212.
8. Steuer R. E., 1986, Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application, Wiley, New York.