

열차경합 검지 및 해소 문제를 위한 현실제약의 고찰;

한국철도의 사례를 중심으로

**A Review on Field Constraints for Railway Conflict Detection
and Resolution Problem; focusing on the Korean Regional
Railway System**

오석문*	김재희*	홍순흠**	박범환***
Oh, Seog-Moon	Kim, Jae-Hee	Hong, Soon-Heum	Park, Bum-Hwan

ABSTRACT

Railway conflict detection and resolution problem (RCDRP) involves complicated field constraints that should be considered for practical service. In this paper, we address those constraints in brief. Particularly, following situations are addressed; (1) temporal change of network topology, (2) consideration of diverse conditions of track and train, for example, single/double tracks and passenger/freight service, (3) siding capacity limitation, (4) bidirectional sides used by both inbound and outbound trains, (5) regulation for passenger transfer service, (6) consideration of siding length, (7) Restriction on stopping before the track segment with steep slope.

1. 서론

열차경합 검지 및 해소 문제(railway conflict detection and resolution problem, RCDRP)는 짧은 시간(real-time)내에 혼선된 열차 스케줄을 정상으로 회복시키기 위한 문제이다. 이 문제는 현재까지 NP-hard 문제로 알려져 있다[1, 2]. 열차의 운행밀도(traffic intensity)가 보통(moderate)이고, 대상시간(time-horizon)이 8시간인 열차경합 검지 및 해소 문제의 경우, 최적의 회복스케줄을 작성하는데 슈퍼 컴퓨터를 이용하여도 12일 이상이 소요된다는 보고로부터 이 문제의 복잡도(complexity)를 짐작할 수 있다.

* : 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** : 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

*** : 한국철도기술연구원 선임연구원, 비회원

열차경합 검지 및 해소 문제는 기본열차 스케줄 작성 문제(tactical train schedule problems)와 같이 분류될 수 있다. 그러나 한가지 큰 차이점은 열차경합 검지 및 해소 문제의 경우에는 실시간의 응답을 요구하는 제어 시스템(control system)이라는 점이다.

Szpigiel [3]은 이 문제의 수리적 해법 도출에 관한 선구적인 연구이다. 그는 열차경합 검지 및 해소 문제를 혼합정수계획모형(mixed integer programming, MIP)으로 모형화하고, 분지한계법(branch-and-bound, B&B)을 이용한 해법을 제시하였다. 이후 많은 연구들이 이 연구의 뒤를 이었다.

북미의 여러 철도회사들은 장거리 단선 화물열차를 주로 운영하였다. 이들 철도회사들은 열차 운행에서의 혼잡을 완화하고, 연료사용을 감소하며, 승무원의 근무조건을 만족시킬 수 있는 방법에 대해 연구하였다. 이러한 연구의 결과로 열차경합 검지 및 해소의 문제에 대한 초기의 성과를 달성하였다. 특히, Norfolk Southern 사 (Sauder et al., [4])와 Burlington Northern 사 (Harker et al., [5])의 프로젝트들은 모두 이 분야의 성공적인 프로젝트로 널리 인정받고 있다. 북미에 이어 호주에서도 이 분야의 연구를 실시하였다. 북미와 호주는 모두 장거리 단선 화물열차를 위주로 운영하는 비슷한 운영조건을 가지고 있다.

최근, 유럽연합의 유럽위원회(European Commission, EC)에서는 열차운영에 있어서 국가간의 상호운영성(interoperability)를 확보하기 위한 체계(European Railway Traffic Management System, ERTMS)를 제시하였고, 이 체계하에서 열차경합 검지 및 해소에 관한 프로젝트들을 실시하였다. 우리는 지난 논문에서 이러한 프로젝트들에 대해 검토한바 있다[6].

현재, 철도청에서는 기존의 열차운행관리 시스템(central traffic control, CTC)을 한곳으로 통합하고, 해당 소프트웨어를 개선하는 프로젝트를 추진하고 있다. 이 프로젝트에서는 열차경합 검지 및 해소 시스템에 관한 내용을 포함하고 있다.

본 논문에서는 열차경합 검지 및 해소 시스템을 구축하는 경우, 추가적으로 고려되어야하는 세부적인 현실제약조건들을 한국철도의 사례를 통해 검토한다. 본 논문의 이후 구성은 다음과 같다. 먼저 제2절에서는 열차경합 검지 및 해소 문제의 기본모형을 소개한다. 다음 제3절에서는 추가적으로 고려되어야하는 현실제약들의 특징을 검토한다. 마지막으로 제4절에서는 결론을 제시한다.

2. 열차경합 검지 및 해소 문제의 이론적 모형

지금까지 열차경합 검지 및 해소 모형에 관한 연구들이 다수 보고되었다. 본 논문에서는 이중 Mills et. al. [7]의 모형을 기초로 소개한다. 모형에서 사용되는 기호는 다음과 같이 정의된다.

집합

- $P = \{1, 2, \dots, p, \dots, n-1\}$, 트랙섹션(track section)을 나타내는 인덱스 집합.
- $P_1 \subseteq P$, 단선 구간을 나타내는 인덱스 집합.
- $P_2 \subseteq P$, 복선 구간을 나타내는 인덱스 집합.

- $P = P_1 \cup P_2, P_1 \cap P_2 = \emptyset$.
- $Q = \{1, 2, \dots, NQ\}$, 역(station)을 나타내는 인덱스 집합.
- $I = \{1, 2, \dots, NI\}$, 열차(train)을 나타내는 인덱스 집합.
- $I_1 \subseteq I$, 여객열차 인덱스 집합.
- $I_2 \subseteq I$, 화물열차 인덱스 집합.

상수

- O^i , 열차 i 의 시발역.
- D^i , 열차 i 의 종착역.
- d_{O}^i , 열차 i 가 시발역에서 출발하도록 계획된 시간.
- d_{D}^i , 열차 i 가 종착역에 도착하도록 계획된 시간.
- d_q^i , 열차 i 가 역 q 에서 출발하도록 계획된 시간.
- a_q^i , 열차 i 가 역 q 에 도착하도록 계획된 시간.
- s_q^i , 열차 i 가 역 q 에서 정차하도록 계획된 시간.
- t_p^i , 열차 i 가 트랙섹션 p 를 최고속도로 운행할 때 소요되는 시간.
- L_p , 트랙섹션 p 의 길이 (km).
- s_d , 최소 안전시격(열차의 운행방향이 다른 경우).
- s_s , 최소 안전시격(열차의 운행방향이 같은 경우).
- M , 매우 큰 수(big M).

변수

- δ_q^i , 열차 i 가 q 역에서 출발하는 시간(≥ 0).
- α_q^i , 열차 i 가 q 역에 도착하는 시간(≥ 0).
- δ_o^i , 열차 i 가 시발지에서 출발하는 시간(≥ 0).
- α_o^i , 열차 i 가 종착지에 도착하는 시간(≥ 0).

- τ_p^i , 열차 i 가 트랙섹션 p 을 운행하는 소요되는 실제시간.
- A_{ijp} , 하행열차(outbound train) i 가 상행열차(inbound train) j 보다 선행하는 경우 1, 그렇지 않은 경우 0을 갖는 이진변수.
- B_{ijp} , 하행열차 i 가 하행열차 j 보다 선행하는 경우 1, 그렇지 않은 경우 0을 갖는 이진변수.
- C_{ijp} , 상행열차 i 가 상행열차 j 보다 선행하는 경우 1, 그렇지 않은 경우 0을 갖는 이진변수.

열차경합 금지 및 해소 모형의 목적함수(objective function)는 열차 지연을 최소화하기 위한 항 (1)과 열차의 연료사용비용을 최소화하기 위한 항 (2)로 구성된다.

$$Z_1 = \sum_{i,q} w^i \cdot (a_q^i - \alpha_q^i)^+ \quad (1)$$

$$Z_2 = \sum_{i,p} C_F \cdot M^i \cdot \eta \cdot L_p \cdot \left[r_o + r_1 \left(\frac{L_p}{\tau_p^i} \right) + r_2 \left(\frac{L_p}{\tau_p^i} \right)^2 \right] \quad (2)$$

여기서,

- C_F 는 연료단가.
- M^i 는 열차 i 의 중량.
- η 는 연료효율.
- r_o , r_1 , and r_2 는 주행저항 계수.

식 (1)은 화물열차의 경우 종착역의 도착시간에 대한 정시성의 관점으로 변환된다. 식 (2)로부터 연료사용비용 최소화를 위한 열차경합 금지 및 해소 모형이 비선형 모형(nonlinear integer programming)임을 알 수 있다.

$$s_d + \alpha_q^j \leq \delta_q^i + M \cdot A_{ijp}, \quad \forall i, j \in I, p \in P_1 \quad (3)$$

$$s_d + \alpha_{q+1}^i \leq \delta_{q+1}^j + M \cdot (1 - A_{ijp}), \quad \forall i, j \in I, p \in P_1 \quad (4)$$

$$s_s + \alpha_{q+1}^j \leq \delta_q^i + M \cdot B_{ijp}, \quad \forall i, j \in I, p \in P \quad (5)$$

$$s_s + \alpha_{q+1}^i \leq \delta_q^j + M \cdot (1 - B_{ijp}), \quad \forall i, j \in I, p \in P \quad (6)$$

$$s_s + \alpha_q^j \leq \delta_{q+1}^i + M \cdot C_{ijp}, \quad \forall i, j \in I, p \in P \quad (7)$$

$$s_s + \alpha_q^i \leq \delta_{q+1}^j + M \cdot (1 - C_{ijp}), \quad \forall i, j \in I, p \in P \quad (8)$$

$$d_o^i \leq \delta_o^i, \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$\alpha_q^i + s_q^i \leq \delta_q^i, \quad \forall i \in I_1, p \in P \quad (10)$$

식 (3) - (8)은 열차 트랙섹션 p 에서 열차 i, j 의 선후행에 관한 제약을 나타낸다. 식 (9)는 시발역의 출발예정시각보다 먼저 출발할 수 없음을 나타낸다.

앞에서 정의된 기호와 목적함수 및 제약식을 사용하여 열차경합 검지 및 해소 문제를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } Z_1 + Z_2 & (11) \\ & \text{subject to (3) - (10)} \end{aligned}$$

식 (11)에서 정의된 열차경합 검지 및 해소 문제는 이 문제의 주요한 특징만을 나타내는 이론적인 모형이다. 이러한 모형을 현실에 적용할 때에는 현실여건을 추가적으로 반영해야 한다. 다음 절에서는 한국철도의 사례를 중심으로 열차경합 검지 및 해소 문제에서 추가적으로 검토되어야 하는 현실제약조건들을 검토한다.

3. RCRP에 관한 현실제약

가. 사고에 의한 네트워크 구성의 변화

식 (11)에서 주어지는 문제는 대상이 되는 철도 네트워크의 구성(topology)이 사전에 확정된 상태임을 가정한다. 그러나, 현실에서는 철도 네트워크의 구성이 여러 가지 사유에 의해 수시로 변경된다. 따라서, 모형은 이러한 네트워크 구성이 변경을 수용할 수 있는 구조라야 한다.

나. 단/복선 및 여객/화물에 따른 목적함수 및 제약식의 변화

식 (11)에서 주어지는 문제로부터 네트워크의 구성형태가 단/복선으로 구분되는 경우, 열차가 여객/화물로 구분되는 경우에 목적함수와 제약조건에서 다르게 검토되어야 하는 부분이 있다. 우리는 이러한 내용의 일부를 앞 절에서 간단한 언급하였다.

다. 대피용량 제약

식 (11)에서 주어지는 문제는 각 역의 대피용량이 무한대임을 가정한다. 그러나, 현실에서는 각 역의 대피용량이 유한하게 제한된다.

라. 상하행 양방향 대피선의 존재

식 (11)에서 주어지는 문제는 각 역의 대피선(side)이 상행 또는 하행에 대해 별도임을 가정한 다. 그러나, 현실에서는 상행과 하행 열차들에 대해 공통으로 적용되는 대피선이 존재한다.

마. 여객환승을 위한 접속대기 규정

식 (11)에서 주어지는 문제는 여객 환승을 위한 열차간의 접속관계를 규정하지 않고 있다. 그 러나, 현실에서는 여객환승을 위한 접속대기 규정이 일부열차에 대해 부과되고 있다.

바. 열차장과 유효장의 관계

식 (11)에서 주어지는 문제는 각 열차의 길이와 각 역에서의 유효장(siding length)에 관한 제 약을 고려하지 않고 있다. 그러나, 현실에서는 열차가 안전하게 역에 대피하기 위한 호환관계를 고려해야 한다.

사. 최급 구배 전방에서의 정차

현실적으로 특정 열차들(중량화물열차 또는 고속열차 등)은 최급 구배 전방에서 기동건인력의 부족의 문제를 고려해야 한다. 그러나, 식 (11)에서 주어지는 문제는 이러한 점을 고려하지 않고 있다.

4. 결론 및 향후 방향

우리는 앞에서 열차경합 검지 및 해소 문제에 관한 이론적인 모형을 소개하고, 이 문제에 대한 현실모형을 개발할 때 추가적으로 고려해야할 현실제약조건들을 검토하였다. 여기서, 언급된 현실 제약조건들은 한국철도의 사례를 기준으로 제시한 것이다. 우리는 이러한 현실제약조건들에 대한 엄밀한 수리적 모형(mathematical formulation)을 개발하고 있으며, 이 연구결과는 다음 논문에서 적절한 예제와 함께 발표될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Jovanovic D. N., Improving railroad on-time performance: Models, Algorithms and Applications, Ph.D Dissertation, Univ. of Pennsylvania, 1989.
- [2] Petersen, E. R., Taylor A. J. & Martland, C. D., An introduction to computer assisted train dispatch, Journal of Advanced Transportation, 20(1), pp. 63-72, 1986.
- [3] Szpigel, B., (M. ROSS, eds OR□□72). Optimal Train Scheduling On a Single Track Railway, North-Holland Publishing Company: pp. 343-352, 1973.
- [4] Sauder, R. L. & Westerman. W. M., Computer aided train dispatching decision support through optimization, Interfaces, 13(6), pp. 24-37, 1983.
- [5] Harker, P. T., Use of advanced train control systems in scheduling and operating railroads: models, algorithms, and applications, Transportation Research Record, 1263, pp. 101-110, 1989.
- [6] 오석문, 홍순흠, MARCO · COMBINE 프로젝트의 조사 연구, 한국철도학회 2003년 춘계 학술대회 논문집, 2003.
- [7] Mills, R. G. J., & Perkins, S. E., (eds.) Nonlinear programming applied to the dynamic rescheduling of trains, Recent Developments in Mathematical Programming, pp. 345-357, 1991.