한국철도학회논문집 제18권 제6호 ▌pp. 619-629 (2015년 12월)
JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR RAILWAY VOL.18, NO.6 ▌pp. 619-629 (December 2015)
ISSN 1738-6225(Print)
ISSN 2288-2235(Online)

시공간 네트워크를 이용한 열차 경합해소모형

The Train Conflict Resolution Model Using Time-space Network

김영훈 · 임석철*
Young-Hoon, Kim · Suk-Chul, Rim

Abstract The train conflict resolution problem refers to an adjustment of the train operation schedule in order to minimize the delay propagation when a train conflict is predicted or when a train conflict occurs. Previous train studies of train conflict resolutions are limited in terms of the size of the problems to be solved due to exponential increases in the variables. In this paper, we propose a train conflict resolution model using a time-space network to solve the train conflict situation in the operational phase. The proposed model adjusts the size of the problem by giving only the dwell tolerance in the time-space network only for stops at the station after a train conflict. In addition, the proposed model can solve large problems using a path flow variable. The study presents a train delay propagation analysis and experimental results of train conflict resolution assessments as well using the proposed model.

Keywords : Delay propagation, Conflict detection resolution, Scheduling, Optimization

초 록 열차 경합해소 문제는 열차의 경합이 발생되거나 예측될 때 지연 확산을 최소화하기 위해 열차 운행스케줄을 조정하는 것이다. 기존연구에서는 폭발적으로 증가하는 변수로 인해 풀 수 있는 문제의 크기가 제한적이다. 본 논문에서는 열차 운영단계에서 열차 경합을 해소하기 위해 시공간 네트워크를 이용한 열차 경합해소모형을 제안한다. 제안한 모형은 시공간 네트워크에서 경합발생 이후 운행 열차들에 대해 정차 역에서의 정차 허용치만을 부여함으로써 문제의 크기를 조절하였다. 또한, 경로흐름변수를 사용해 대형문제도 풀 수 있도록 하였다. 제안한 모형을 이용하여 열차경합의 지연파급분석과 경합해소 실험결과를 제시하였다.

주요어 : 지연파급, 경합검지해소, 스케줄링, 최적화

1. 서 론

열차 운행계획은 노선계획과 같은 전략적인 단계에서 시각표 작성, 차량 및 승무원 할당 계획, 선로할당계획과 같은 전술적인 단계, 실시간 운영관리 및 리스케줄링 업무를 수행하는 운영단계로 구성된다[1]. 열차시각표 작성은 열차 지연을 회복할 수 있고 열차와의 경합 영향을 최소화할 수 있도록 여유시간을 부여하고 있으나 열차종류별 우선순위와 열차속도, 정차역의 수, 역의 혼잡도에 따른 여객취급 지연 등 여러 가지 외란에 의해 열차 지연이 발생한다. 열차 지연이 발생하여 다른 열차에게 영향을 미치기 시작하면 이를 빠른 시간 내에 조정할 필요가 있는데 이러한 열차 지연은 다른 열차의 지연을 초래하여 연쇄지연(knock-on delay)으로 나타나기 때문이다[2]. 따라서 철도 관제사는 이러한 열차지연 발생을 최대한 억제하기 위해 노력한다. 그럼에도 불구하고 열차 지연이 발생하면 빠른 시간 내에 열차 스케줄을 회복하거나 열차 스케줄을 조정할 수 있는 열차경합 해소 기술이 필요하며 이는 열차 운행관리 업무에서 매우 중요한 문제이다. 열차경합 해소(railway conflict resolution) 문제는 계획된 열차시각표를 기준으로 운행하는 열차의 지연을 검지한 이후 또 다른 지연 확산을 최소화하기 위해 경합을 해소하는 기술을 말한다.

이 논문의 목적은 열차 운영단계에서 열차 경합이 발생하면 지연 파급을 확인하고 경합을 해소할 수 있는 열차경합 해소모형을 제안한다. 제안한 모형은 철도 네트워크와 열차를 시공간 네트워크(time-space network)로 표현하고 혼합정수계획법(mixed integer programming)으로 모형화한 후 열 생성(column generation) 알고리즘으로 경합문제를 해결하였다. 또한 제시된 모형으로 열차지연 발생에 따른 지연 파급 영향을 확인하고, 여러 가지 경합 상황에 따른 경합해소 실험결과를 제시하였다.

*Corresponding author. Tel.: +82-31-219-2424, E-mail : scrim@ajou.ac.kr.
© 2015 The Korean Society for Railway. All rights reserved.
http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2015.18.6.619

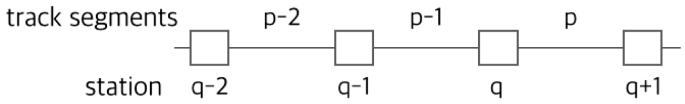

Fig. 1. The network of the stations and track segments.

2. 기존연구

열차경합해소 문제는 여러 가지 접근 방법으로 문제를 해결하여 왔다. 가장 초기에 열차경합해소 문제를 수리적 방법인 혼합정수계획법모형을 이용하여 분지한계법(Branch and Bound)으로 해법을 제시한 Szpigel[3]의 연구를 들 수 있다. 후속 연구는 Jovanovic과 Harker[4], Higgins 등 [5]의 연구를 들 수 있다. 국내에서는 Kim 등 [6]이 Higgins 모형을 이용하여 단선구간에서의 열차경합해소 문제를 한국철도 특성을 고려하여 열차 지연시간을 최소화하도록 혼합정수계획모형의 해법을 제시하였다.

특히 Higgins의 연구는 단선구간에서 상·하행 열차들의 정차 및 교행 역 결정을 실시간으로 지원하는 툴을 개발하였으며 열차 시각표 변경이나 시설물 변경에 따른 영향력을 평가할 수 있도록 하였다. 이 논문에서는 열차지연 및 운영비용 최소화를 목적함수로 정하고 이의 하한 값을 구하는 알고리즘을 분지한계법을 이용하여 타부탐색(Tabu Search)의 결과보다 우수함을 제시하였다. Fig. 1은 역 번호와 역과 역 사이의 트랙세그멘트 번호가 부여된 열차 노선의 개념을 보여주며 각 역에서의 도착, 출발, 조착, 지연에 대한 변수를 이용하여 동일 방향의 열차 운행 경합과 교행 열차 간의 경합에 대한 제약, 각 트랙세그멘트에서의 열차속도제약 및 계획된 출발, 정차시각을 준수하는 제약식을 고려하였다. 그러나 Higgins 논문은 역 용량(station capacity)과 같은 시설 제약을 포함하지 않고 단지 열차시간의 총합을 최소화 했으며 대용량 문제의 경우 이를 해결할 수 없는 단점이 있다.

최근 시공간 네트워크를 활용하여 열차의 시각표 작성문제에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데 이에 대한 연구 [7-9]를 살펴보면 시공간 네트워크를 이용하여 열차의 운행 상황을 네트워크 흐름문제(network flow problem)로 표현하고 혼합정수계획모형을 라그랑지안 완화법을 사용하여 경합문제를 해결하였다. 그러나 이 경우 아크흐름변수(arc flow variable)의 사용으로 인해 변수의 크기가 폭발적으로 증가하여 문제의 복잡도가 증가하기 때문에 대형문제에 적합하지 않은 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 경로 흐름 변수(path flow variable)를 사용하고 열 생성 알고리즘을 사용한 연구 [10-13]을 살펴보면 문제의 복잡도 증가를 극복하면서 운행계획 단계에서의 열차 시각표 작성에 따른 경합 해소 결과를 제시하였다. Park 등 [14]는 역내 열차 경합검지 및 해소를 위해 역에서 폐색구간 단위로 구분하여 운행하는 모든 열차의 가중된 지연 합을 최소화하는 문제를 제시하였다.

경합 검지 및 해소와 관련된 연구는 관제사를 위한 의사결정지원시스템을 개발하는 연구들도 진행되었는데 이러한 지원시스템은 열차의 이동을 예측하는 기능, 경합을 검지하는 기능, 경합을 해소할 수 있도록 제안하는 기능을 가지고 있다. Ho 등 [15]는 동적 프로그래밍(dynamic programming) 기법을 이용하여 선로전환기에서의 열차 경합을 최소화하기 위한 모형을 제안하였다. 특히, 유럽에서는 열차간의 경합검지와 해소를 위해 Fig. 2와 같이 신호기와 신호기 사이의 폐색구간(block section) 단위로 운행하는 열차

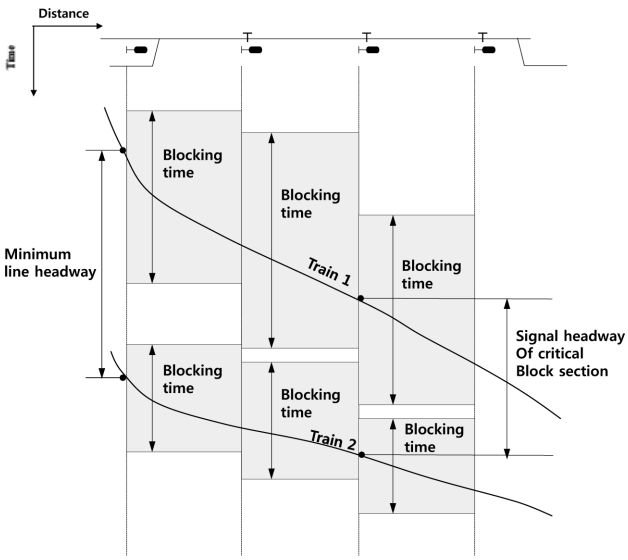

Fig. 2. Minimum headway according to the blocking time[16].

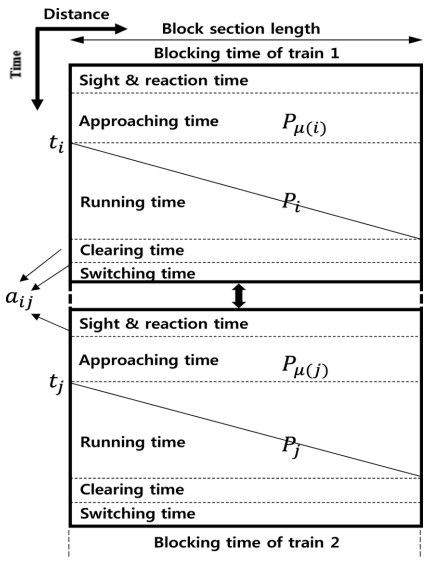

Fig. 3. Train headway distance[18].

의 점유 시간인 blocking time[16]을 이용한 연구가 진행되었는데, Jacobs[17]은 폐색구간에서 열차운행 시간을 추정하여 추가적인 지연 운행시간을 최소화하기 위한 상세 모델을 개발하였다. D'Ariano 등 [18]은 실시간 열차 운행 외란에 따른 열차 경합을 해소하기 위해 Fig. 3에서 제시된 폐색구간 운행에 따른 점유시간을 이용하여 선행열차와 후속열차 간격을 alternative graph model을 사용하여 열차 속도를 조정할 수 있는 모형을 제시하였다. 이 논문에서는 열차 시각표에 주어진 완충시간(buffer time)을 의미하는 t_β의 계산($t_\beta = t_j - p_{u(j)} - a_{ij} - p_i - t_i$)을 통해 선·후행열차의 경합여부를 확인하고 지연이 발생하면 정차시간의 단축과 최대속도 운행을 통해 경합을 해소하도록 하였다.

앞에서 살펴본 기존 연구 중에서 Higgins 논문의 경우 역 용량을 고려하지 않은 점과 대형문제에 적합하지 않은 점, Brännlund, Caprara, Cacchiani에서의 논문은 변수와 수가 조합 폭발적으로 증가하는 단점, Jacobs와 D'Ariano의 논문에서는 폐색구간 운행에 따른 점유시간을 기반으로 문제를 해결하는 경우 시설관련 데이터와 실시간 열차 위치데이터 등 복잡한 데이터 구조를 가지며 폐색구간 내에 정확한 위치를 확보하지 못하는 상태에서는 사용하기 적합하지 않은 모형이다. 따라서 본 모형에서는 역 용량을 고려하고, 변수의 수를 조절하기 위해 시공간 네트워크상의 열차를 경로흐름변수를 사용하고 경합이 발생한 열차를 기준으로 출발하지 않은 열차의 경우 출발 지연 허용치를 줌으로써 변수의 범위를 줄여 대형문제에 적용할 수 있도록 하였다.

3. 열차경합해소 모형

3.1 문제정의 및 시공간 네트워크

본 논문에서는 열차 지연에 따른 열차 경합이 발생하면 다른 열차들의 지연 파급을 확인할 수 있고 열차 경합에 따라 지연된 열차 또는 지연 영향을 받는 열차들의 스케줄을 조정함으로써 경합을 해소할 수 있는 모형을 제시한다.

이러한 열차 경합 해소를 위해 역과 열차의 이동경로, 경합이 발생한 시각 등을 Fig. 4와 같은 시공간 네트워크 형태의 데이터를 작성한다. 시공간 네트워크는 시간을 가로축으로 공간인 역을 세로축으로 표현하고 있으며 열차 이동을 노드와 노드 사이의 경로를 비 순환 네트워크 $G=(V, A)$의 형태로 표현한다. 가로의 시간 축은 각 노드를 1분 간격으로 구성하였으며 시발역과 종착역을 제외한 중간 정차 역은 역에서의 열차의 대피와 지연을 허용하기 위해 도착과 출발 노드를 분리하여 구성하였다. 역 용량은 열차가 정차하는 역에서 열차의 대피와 추월이 가능한 측선의 수를 표현한 것으로 모든 경우는 측선의 수를 1개만 가지고 있는 경우를 대상으로 하였다.

Fig. 4의 예를 설명하면 1번 열차가 역 B와 C에서 지연이 발생되고 10:03분에 지연이 검지되면 1번 열차가 역 C에 10:04분에 도착할 예정이었으나 2분 지연되어 약 10:06분에 도착할 것으로 예상된다. 따라서 2번 열차와 안전시격 3분의 운영규정 제약을 위배하여 경합 발생이 예상된다. 이를 해결하기 위해서 2번 열차의 경우 아직 역 B에 도착하지 않았으므로 역 B에서의 1분 정차시간을 3분으로 늘려서 운행하면 1번 열차와의 경합을 해소할 수 있게 된다. 여기서 중간 정차 역에서 정차허용치(dwell tolerance)는 부여한 수만큼 열차지연 아크를 생성하여 새로운 열차 경로를 생성할 수 있다. 2번 열차와의 지연운행으로 인해 1번 열차와의 경합은 해소하였으나 2번 열차가 10:07분 도착이 2분 지연운행으로 인해 10:09분 도착으로 변경됨에 따라 3번 열차와의 경합이 또 발생하게 된다. 따라서 3번 열차의 1분 출발 지연을 하여 10:10분에 출발하여 경합을 해소한다. 3번 열차는 역 B에 정차하지 않으

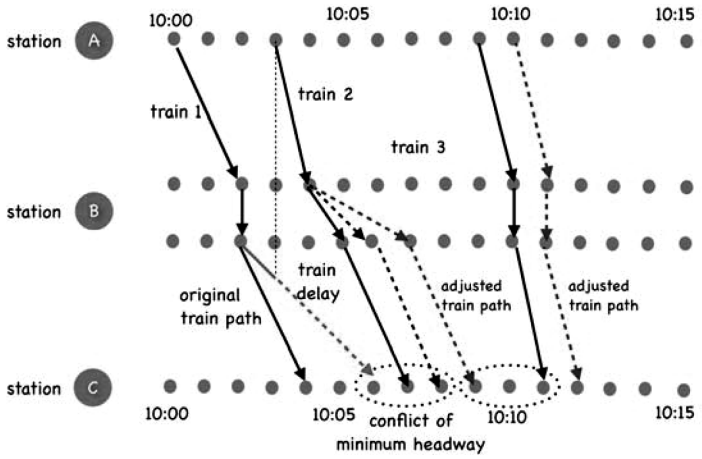

Fig. 4. The train conflict resolution method using a time-space network.

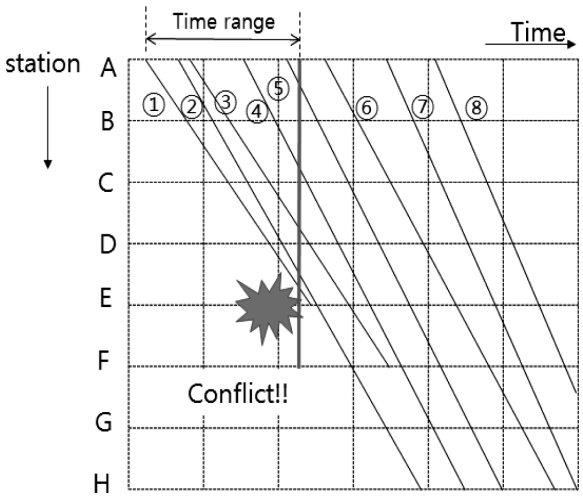

Fig. 5. The time-space network generation method by train conflcit time.

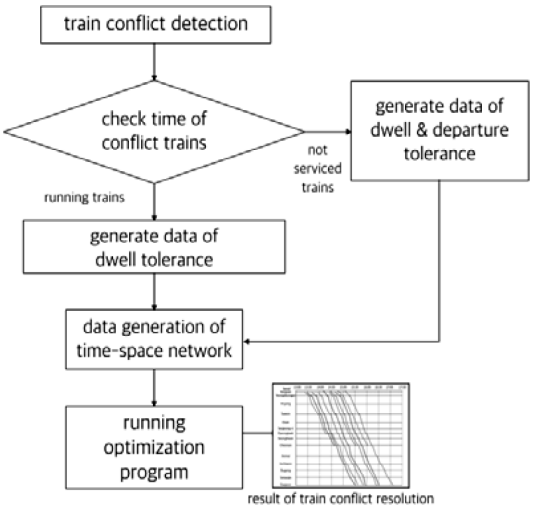

Fig. 6. The train conflict resolution method using a time-space network.

므로 정차 허용치를 부여하지 않는다.

본 논문에서는 열차 지연에 따른 경합 발생을 가정하고 이 시점을 기준으로 후속열차의 시공간 네트워크를 작성한다. Fig. 4에서 2번 열차의 경우와 같이 중간 역에서의 정차 허용치만을 작성하도록 하여 문제의 크기를 줄이도록 하였다. 예를 들면, Fig. 5에서 1번 열차의 지연으로 인해 2번 열차와 경합이 역 E에서 발생하게 되면 1번 열차의 출발 시각에서 지연이 발생한 시각 이전의 시간 범위(time range)에 운행 중인 2번에서 5번까지의 열차는 이미 운행 중인 열차이므로 Fig. 4에서 표시한 경합이 발생한 시간 축 이전에 열차의 스케줄을 조정할 수 없기 때문에 경합이 발생한 시간 축 이후에 대해서만 열차 스케줄을 조정할 수 있도록 시공간 네트워크를 구성하였다. 따라서 이미 열차가 운행 중인 경우에 대해서는 Fig. 4의 train 2와 같이 중간 역에서의 지연 허용 경로만을 작성하고 아직 출발역에서의 운행을 시작하지 않은 Fig. 5의 6번에서 8번까지의 열차인 경우는 출발역에서의 지연허용치와 중간 역에서의 정차 허용치를 포함한 경로를 작성하도록 한다. 열차 경합 검지 이후 시공간 네트워크 데이터 생성과 최적화 이용한 풀이 절차를 Fig. 6에 제시하였다.

3.2 경합해소 모형

본 절에서는 앞 절에서 설명한 시공간 네트워크 데이터를 이용하여 경합 발생 시점에서 지연의 영향을 받을 수 있는 열차들에 대해서 중간 정차 역에서의 지연시간을 조정하고, 아직 운행을 시작하지 않은 열차들에 대해서는 출발시각과 정차시간, 도착시간을 조정할 수 있도록 각각의 1개 열차에 대해서 가상의 출발노드와 도착노드를 두어 경합을 회피한 임의의 경로가 선택되어 스케줄을 조정할 수 있도록 하였다. 또한 주어진 열차종류별로 역간 운행시간은 다르게 부여 되었고 정차 역에서의 정차시간은 1분을 부여했고, 대전역과 동대구역만 2분 정차를 부여하였다. 경합해소 모형에서 가장 중요한 열차 경합해소를 위해서 출발역과 도착역에서의 안전시격과 역과 역 사이에 운행되는 열차가 추월하지 못하도록 하는 제약과 역에서의 정차와 추월을 할 수 있도록 하는 역 용량 제약조건을 부여하였는데 만일 경합이 발생하는 조건이라면 이러한 제약조건을 위배하게 된다. 즉, 열차 경로와 아크가 동시에 포함되는 경합조건들을 경합방지의 집합(γ)이라 하고 이의 집합의 모임(Γ)을 표기하였다. 따라서 경합해소모형에서는 경합이 발생한 경합방지의 집합을 해소하게 되면 경합이 발생된 제약조건을 위배하지 않는 경로를 만들 수 있게 된다.

경합해소 모형은 열차 경합이 발생된 이후에 시각표의 열차 데이터를 기반으로 시공간 네트워크 데이터를 생성하고 이를 입력데이터로 사용하여 경합해소 모형 문제를 해결한다. 경합해소 모형의 파라미터와 변수, 모형은 다음과 같다.

- 결정변수

$f_k(p)$: 주어진 열차 k의 경로 p의 사용여부

- 파라미터

$G=(V, A)$: 시공간 그래프, V는 노드집합, A는 아크집합

K: 지연 열차들의 집합, 원소는 k

P^k: 지연열차 k의 경로 집합, 원소는 p

γ: 경합방지 열차-아크 쌍의 집합, 원소는 (k, a)이며 아크 a는 지연열차 k에 대한 대응 아크
Γ: 경합방지 열차-아크 집합의 모임, 원소는 γ
$c^k(p)$: 지연열차 k의 경로 p의 수익
$c_a{}^k$: 시공간 네트워크에서의 아크의 비용

아래 모형은 열 생성 기법을 이용할 때의 주문제(master problem)로 선형계획 완화의 대상이 된다.

$$\max \sum_{k \in K} \sum_{p \in P^k} c^k(p) f_k(p) \tag{1}$$

$$s.t. \sum_{p \in P^k} f_k(p) \le 1, \quad \forall k \in K \tag{2}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P^k | p \cap \gamma \ne \varnothing} f_k(p) \le 1, \quad \forall \gamma \in \Gamma \tag{3}$$

$$f_k(p) \in \{0, 1\}, \quad \forall p \in P^k, k \in K \tag{4}$$

목적함수인 식(1)은 지연 열차를 포함한 열차 k에 대한 경로 p의 사용여부에 따라 출발 지연 허용치와 중간 정차 허용치 범위 안에서 최대한 많은 열차가 수락될 수 있도록 하였으며 경로수익 $c^k(p)$는 경합 회피를 위해 시발역에서의 출발이 1분씩 지연되거나 정차 역에서 1분씩 지연될 경우 주어진 경로수익에서 1씩 낮아지도록 하였다. 제약식(2)는 원래 주어진 열차운행 경로들 중에서 많아야 하나의 경로가 지정되어야 하며, 제약식(3)은 안전시격 제약과 추월 제약과 같이 경로와 아크가 동시에 포함되지 않는 제약조건으로 열차 지연에 따른 열차 경합을 해소하는 중요한 제약식이다. 제약식(4)는 지연열차 k에 대한 경로 p는 선택되거나 그렇지 않은 경우를 나타낸다.

목적함수의 값을 개선할 수 있도록 수정비용을 사용한 부문제(sub problem) 작성을 위해 제약식(2), (3)의 쌍대 변수를 각각 π_k, σ_γ라 하면 선형완화식의 최적 조건은 식(5)와 같다.

$$\sum_{a \in P^k} c_a^k - \sum_{a \in P^k} \sum_{\gamma | (k,a) \in \gamma} \sigma_\gamma - \pi_k \le 0 \tag{5}$$

$$\sum_{a \in P} c_a^k - \sum_{a \in P} \sum_{\gamma | (k,a) \in \gamma} \sigma_\gamma = \sum_{a \in P} [c_a^k - \sum_{\gamma | (k,a) \in \gamma} \sigma_\gamma] \tag{6}$$

$$c_a^k - \sum_{\gamma | (k,a) \in \gamma} \sigma_\gamma \tag{7}$$

식(5)와 식(6)은 목적함수를 개선할 수 있도록 식(7)과 같은 새로운 경로의 아크 수정비용으로 최장경로를 구한 후에 그 경로들 중에 식(5)를 위배하는 경로를 찾고 이에 대해서 결정변수에 반영하여 새로운 주문제를 만든다. 경로가 추가된 주문제는 일정횟수 이하만을 반복할 수 있도록 하였고 구해진 경로들로 분지한계법을 이용해 최적해를 구할 수 있도록 하였다.

4. 모형실험 및 결과

제안한 모형의 성능을 검증하기 위해 3가지 실험을 수행하였다. 첫 번째는 열차 종류에 따라 열차 경합해소 실험을 수행하였다. 이 실험은 경합이 발생한 경우 열차 우선순위를 가지는 열차 등급에 따라 경합을 해소하는지 확인하기 위함이다. 두 번째는 역과 열차 수, 경합 개수에 따른 모형 수행시간과 열차들의 평균운행시간을 비교하였다. 이 실험은 제안한 모형이 문제 크기를 점차적으로 확대하여 문제를 해결하는데 소요되는 시간을 확인하기 위함이다. 세 번째 실험은 단선구간 네트워크 상황에서의 열차 경합 해소문제를 해결하는 실험을 수행하였다. 이 실험은 앞의 두 실험과 달리 복잡한 네트워크 상황에서 단선구간의 경합을 원활히 해소하는지 확인하기 위함이다. 모든 실험은 2.7GHz CPU와 16GB 램을 보유한 PC에서 CPLEX 12.5를 이용하였다.

4.1 열차종류에 따른 경합해소 실험

4.1.1 실험 예제

열차종류에 따른 경합해소 실험 목적은 제안한 모형이 열차등급별 경합을 확인하고 이를 조정할 수 있는지 확인하기 위함이다.

Table 1. Train information for the conflict resolution test.

Train O/D	Train types(Train No.)
Yongsan-Daejeon	M(1,4,15), S(10)
Seoul-Busan	M(2), S(12)
Yongsan-Cheonan	M(3)
Seoul-Cheonan	M(5)
Seoul-Gupo	M(6)
Seoul-Yeongdeungpo	K(7,9,11)
Seoul-Dongdaegu	M(8)
Yongsan-Yeongdeungpo	K(13)
Seoul-Miryang	M(14)

K: KTX, S: Saemaul, M: Mugungwha

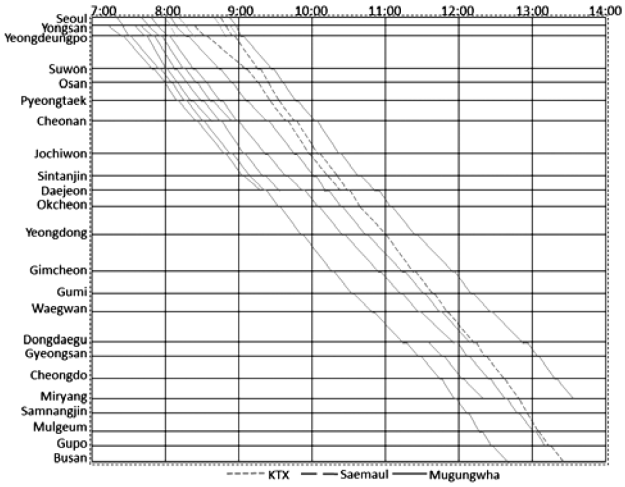

Fig. 7. Train diagram of the experimental example.

실험조건은 경부선 구간에서 열차등급 순위에 따라 KTX, 새마을, 무궁화 열차를 총 15편성, 서울에서 부산까지 40개 역, 9개의 열차운행 패턴으로 구성된 시각표를 실험 대상으로 하였으며 열차종별 열차번호 정보를 Table 1에 정리하였다. 각 열차에 대한 운행패턴과 운행시각을 파악 할 수 있도록 Fig. 7에 열차운전 선도(train diagram)로 표시하였다.

열차종류에 따른 경합해소 실험 내용은 총 3개의 경합이 동시에 발생한 것을 가정하였으며 경합 내용은 같은 차종의 경합이 발생할 경우, 우선순위가 낮은 열차가 우선순위가 높은 열차와 경합이 발생한 경우와 우선순위가 높은 열차가 우선순위가 낮은 열차

Table 2. Train conflict schedule consisting of 15 trains.

Station name		Conflict schedule														
		1 (M)	2 (M)	3 (M)	4 (M)	5 (M)	6 (M)	7 (K)	8 (M)	9 (K)	10 (S)	11 (K)	12 (S)	13 (K)	14 (M)	15 (M)
Seoul	d		7:20			7:40	7:48	8:00	8:10	8:22		8:40	8:44		8:53	
Yongsan	a		7:25			7:45	7:53	8:04	8:15	8:27		8:44	8:50		8:58	
	d	7:15	7:25	7:35	7:40	7:45	7:53	8:04	8:15	8:27	8:35	8:44	8:50	8:53	8:58	9:05
Yeongdeungpo	a	7:20	7:30	7:40	7:45	7:50	7:58	8:09	8:20	8:33	8:40	8:49	8:54	8:58	9:03	9:14
	d	**7:31**	7:31	7:41	7:46	7:51	7:59		8:21		8:41		**9:05**		9:04	9:15
Suwon	a	***7:52***	7:52	8:02	8:07	8:12	8:20		8:42		8:59		***9:23***		9:21	9:36
	d	***7:53***	7:53	8:03	8:08	8:13	8:21		8:43		9:00		***9:24***		9:22	9:37
Osan	a	***8:02***	8:02	8:12	8:18	8:22	8:30		8:52		9:08		***9:32***		9:30	9:46
	d	***8:03***	8:03	8:13	8:17	8:22	8:31		8:53		9:08		***9:32***		9:30	9:46
Pyeongtaek	a	***8:13***	8:13	8:23	8:28	8:33	8:41		9:03		9:18		***9:42***		9:40	9:56
	d	***8:14***	8:14	8:24	8:29	8:34	8:42		9:04		9:18		***9:42***		9:40	9:57
Cheonan	a	***8:30***	8:30	8:40	8:45	8:50	8:58		9:20		9:33		***9:57***		9:55	10:10
	d	***8:31***	8:31		8:46		8:59		**9:31**		9:34		***9:58***		9:56	10:11
Jochiwon	a	***8:49***	8:49		9:04		9:17		***9:49***		9:48		***10:12***		10:10	10:34
	d	***8:50***	8:50		9:05		9:18		***9:50***		9:49		***10:13***		10:12	10:35
Daejoen	a	***9:16***	9:16		9:31		9:44		***10:16***		10:21		***10:37***		10:34	11:01
	d		9:18				9:46		***10:18***				***10:39***		10:36	
Iwon	a		9:32				10:01		***10:33***				***10:52***		10:48	
	d		9:32				10:02		***10:34***				***10:53***		10:48	
Dongdaegu	a		11:03				11:31		***11:54***				***12:03***		12:13	
	d		11:05										***12:03***			
Busan	a		12:27										***13:16***			

a: Arrival, d: Departure, K: KTX, S: Saemaul, M: Mugungwha

에 경합이 발생한 경우에 이를 해결하는 실험을 통해 경합 해소의 결과를 제시하며 실험 스케줄은 Table 2와 같다. 세부적인 실험 계획은 1번 열차와 12번 열차는 영등포역에서, 10번 열차는 천안역에서 지연을 발생토록 하였다. 열차별 지연 발생 시점은 진한글씨체로 표현하였으며 지연 발생이후에 열차 시각은 진한글씨체를 기울여서 표현하였다. 그리고 열차 지연에 따른 다른 열차와 경합 상황은 표 배경색을 진하게 하였다.

4.1.2 열차종류에 따른 경합해소 실험결과

제안한 모형을 이용하여 열차 경합 해소를 위해 주어진 경합 스케줄을 시공간 네트워크 형태의 데이터 파일로 변경하고 출발지연 및 정차지연 허용치를 각각 10분씩 부여하고 최적화 프로그램을 구동하였다. 경합을 해소하기 위해 역용량은 모든 정차역에서 대피가 가능하도록 하였다.

3가지 경합 해소에 대한 실험결과는 Table 3과 같다. 동일차종에 대한 경합 실험 결과는 1번 열차가 영등포역에서 3분 정차한 후에 운행하게 되면 2번 열차와의 경합을 해소한다. 하위차종 지연에 따른 상위차종과의 경합 실험은 하위 차종의 8번 무궁화열차가 천안역에서 6분을 추가정차 하여 경합을 해소하였다. 상위차종 지연에 따른 하위차종과의 경합 실험결과도 14번 무궁화 열차가 영등포역에서 5분, 조치원역에서 1분, 대전역에서 2분 추가정차 함으로써 경합을 해소하였다. 특히, 열차 등급이 높은 열차가 먼저 운행되고 열차 등급이 낮은 열차가 대피할 수 있도록 시공간 네트워크 생성 시에 열차등급에 따라 운행수익 값을 부여하고 경합해소 모형에 경합이 발생할 경우 이를 처리할 수 있도록 하였다.

이 실험을 위해 시공간 네트워크 데이터 파일 생성 프로그램 구동시간은 23.20초가 소요되었다. 시공간 네트워크 데이터를 이용해 최적화 프로그램을 구동하여 경합 해소에 걸린 구동시간은 2.98초가 소요되어 빠른 시간 내에 경합을 해소함으로써 모형의 계산시간상 실용적임을 검증하였다.

Table 3. Train conflict resolution schedule.

Station name		Resolution schedule														
		1 (M)	2 (M)	3 (M)	4 (M)	5 (M)	6 (M)	7 (K)	8 (M)	9 (K)	10 (S)	11 (K)	12 (S)	13 (K)	14 (M)	15 (M)
Seoul	d		7:20			7:40	7:48	8:00	8:10	8:22		8:40	8:44		8:53	
Yongsan	a		7:25			7:45	7:53	8:04	8:15	8:27		8:44	8:50		8:58	
	d	7:15	7:25	7:35	7:40	7:45	7:53	8:04	8:15	8:27	8:35	8:44	8:50	8:53	8:58	9:05
Yeongdeungpo	a	7:20	7:30	7:40	7:45	7:50	7:58	8:09	8:20	8:33	8:40	8:49	8:54	8:58	9:03	9:14
	d	7:34	7:31	7:41	7:46	7:51	7:59		8:21		8:41		9:05		**9:09**	9:15
Suwon	a	7:55	7:52	8:02	8:07	8:12	8:20		8:42		8:59		9:23		9:26	9:36
	d	7:56	7:53	8:03	8:08	8:13	8:21		8:43		9:00		9:24		9:27	9:37
Osan	a	8:05	8:02	8:12	8:18	8:22	8:30		8:52		9:08		9:32		9:35	9:46
	d	8:06	8:03	8:13	8:17	8:22	8:31		8:53		9:08		9:32		9:35	9:46
Pyeongtaek	a	8:16	8:13	8:23	8:28	8:33	8:41		9:03		9:18		9:42		9:45	9:56
	d	8:17	8:14	8:24	8:29	8:34	8:42		9:04		9:18		9:42		9:45	9:57
Cheonan	a	8:33	8:30	8:40	8:45	8:50	8:58		9:20		9:33		9:57		10:00	10:10
	d	8:34	8:31		8:46		8:59		9:37		9:34		9:58		10:01	10:11
Jochiwon	a	8:52	8:49		9:04		9:17		9:55		9:48		10:12		10:15	10:34
	d	8:53	8:50		9:05		9:18		9:56		9:49		10:13		**10:18**	10:35
Daejoen	a	9:19	9:16		9:31		9:44		10:22		10:21		10:37		10:40	11:01
	d		9:18				9:46		10:23				10:39		**10:44**	
Iwon	a		9:32				10:01		10:39				10:52		10:56	
	d		9:32				10:02		10:40				10:53		10:56	
Dongdaegu	a		11:03				11:31		12:00				12:03		12:21	
	d		11:05										12:03			
Busan	a		12:27										13:16			
delay time		+3							+6						+8	

a: Arrival, d: Departure, K: KTX, S: Saemaul, M: Mugungwha

4.2 경합횟수 비교실험

이 실험은 역과 열차 수를 점차적으로 확대시켜서 문제 크기를 확대시키고 경합의 수도 증가시켜 제안한 모형성능을 확인하고자 한다. 역수는 경부선 구간의 실제데이터를 사용하여 10개의 역에서 40개의 역까지 확대하여 실험하였다. 경합해소를 위한 경로를 찾을 수 있도록 출발지연과 정차지연을 10분씩을 주었다. 경합문제를 해결하기 위해서는 역과 열차의 운행 정보를 시공간 네트워크 형태로 표시하고 열차 경로와 아크가 동시에 포함되는 경합조건들인 경합방지의 집합을 생성한다. 이때 소요되는 시각을 네트워크 생성 시각(Network generation time)과 최적화 모형을 이용하여 CPLEX에서 문제를 해결한 시각도 Table 4에 표시하였다. 또한 경합을 해소하고 각 열차가 지연된 평균운행시각도 같이 표시하였다.

결과적으로 역과 열차와 경합의 수가 증가할수록 시공간 네트워크 생성시간도 증가되고 최적해 프로그램 구동시간도 선형적으로 증가됨을 확인하였다. Table 4의 가장 복잡한 문제를 약 2분 16초에 네트워크를 생성하고 최적화 모형 해결시각은 10.61초에 이를 해결하였다.

Table 4. Comparative experimental conflict: numbers of stations and trains.

No. of stations	No. of trains	No. of conflicts	Computing time		Av travel time (% increase)
			Network generation time (sec)	Optimization running time (sec)	
10	10	3	4.24	2.48	1.010
		5	4.33	2.62	1.011
	20	5	5.35	2.64	1.007
		10	5.50	2.80	1.015
		12	5.44	2.82	1.066
	25	5	7.78	3.40	1.022
		15	7.04	3.00	1.054
		18	7.04	3.07	1.062
20	10	3	13.59	3.18	1.013
		6	13.55	3.21	1.017
	20	5	19.57	3.63	1.023
		10	31.31	3.73	1.038
		14	19.78	4.10	1.074
	25	5	27.43	4.18	1.008
		15	27.49	4.40	1.014
		17	27.52	4.46	1.026
30	10	3	22.31	3.44	1.012
		6	22.07	3.44	1.025
	20	5	56.74	6.47	1.066
		10	73.32	6.47	1.043
		15	46.71	6.61	1.046
	30	5	72.03	6.31	1.007
		15	71.88	6.49	1.072
		20	72.07	6.60	1.075
40	10	3	36.35	3.69	1.016
		6	36.49	3.72	1.011
	20	5	82.07	6.67	1.022
		10	65.13	6.55	1.043
		15	67.07	6.69	1.151
	30	5	131.96	9.66	1.042
		15	131.99	9.72	1.097
		20	136.09	10.61	1.116

Table 5. Train O/D types and the Youngju station schedule.

Train No.	Train O/D	Youngju station schedule
13	Jeongdongjin → Bujeon	17:01 – 17: 02
4	Jeongdongjin → Gimcheon	17:25 – 17 :26
22	Cheongnyangni → Youngju	17:54 – 18 : 01
29	Andong → Cheongnyangni	17: 58 – 17: 59

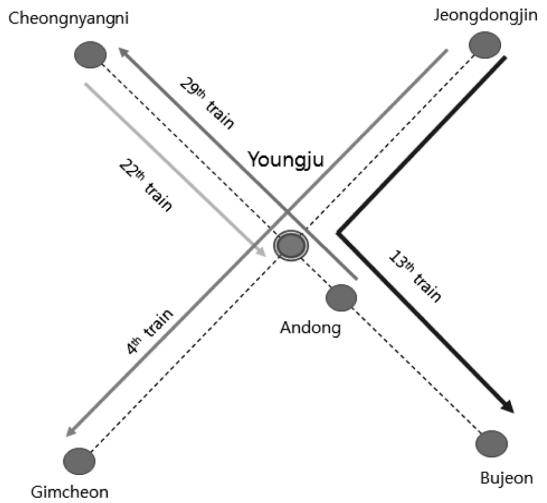

Fig. 8. Train network with the Youngju station at the center.

4.3 단선구간 네트워크 경합실험

4.3.1 실험 예제

이 실험은 앞의 두 가지 경우와 달리 단선구간이고 X자형 네트워크 형태를 대상으로 한다. 단선 구간은 양방향 열차 운행을 위해 계획상에 정차할 역에 대피할 열차와 반대편에서 운행되는 열차는 이 역을 통과할 열차가 결정되어 운행된다. 이러한 이유로 단선 구간에서 경합이 발생되면 더욱 경합해소가 어렵다.

이 실험에서는 상·하행 열차가 1개의 단선 구간을 이용하고 영주역 주변의 중앙선, 경북선, 영동선의 열차가 운행되는 복잡한 구간으로 63개역 32개 실제 운행되는 열차를 대상으로 한다. 각 노선별 운행패턴은 총7개가 있으며 영주역과 김천역 사이의 6개의 상·하행열차, 정동진에서 김천 사이의 2개의 열차, 정동진역과 영천역 사이의 4개 열차. 정동진역과 부전역간 4개 열차. 청량리역과 부전역 사이의 2개 열차, 청량리역에서 영주역 사이의 4개 열차, 청량리역에서 안동역까지 10개의 열차가 운행된다.

단선구간 네트워크 경합실험은 Table 5에 주어진 4개의 열차 운행패턴을 대상으로 하였으며 Fig. 8에 영주역 주변의 4개 열차 운행패턴의 운행 방향을 정리하였다. 이 열차들은 영주역을 오후 5시대에 통과하는 열차들로 운행방향들이 각기 상이하고 모두 영주역을 통과하거나 정차하여 이러한 열차 중에서 지연이 발생하면 경합 상황이 복잡해서 이를 핵심 분석 대상으로 하였다.

실험을 위해서 영주역에서 경합이 발생할 수 있도록 경합상황 도출을 위해 13번 열차를 동해역에서 23분 지연 시켰고 29번 열차를 안동에서 3분 출발지연을 시켰다.

4.3.2 실험 결과

단선구간 네트워크 경합실험 예제에서는 핵심 분석 대상은 4개의 열차이지만 앞의 두 실험과 달리 열차 지연에 따른 경합 상황을 완벽히 파악하기 어렵기 때문에 모든 운행열차를 대상으로 하였다. 경합을 해소하기 위해 모든 열차에 출발지연 및 정차지연을 5분씩 부여하였다. 앞의 두 가지 실험에서는 도착 및 출발역끼리 안전시격에 대한 경합만을 검지하여 확인하는데 이번 실험은 단선구간이기 때문에 열차끼리 운행구간이 반대일 경우에 어느 특정 역에서 상행 열차의 출발시각과 하행 열차의 도착시각을 함께 확인하여야 한다.

경합이 해소된 스케줄을 분석해 보면 13번 열차와 29번 열차의 지연에 의해 4번, 22번, 23번, 30번 열차 스케줄이 조정된 것으로 확인 되었다. 조정된 4개의 열차스케줄 지연시간은 총 14분이다. 특히 29번 열차의 지연은 3개의 열차 스케줄에 지연 파급 효과를 주는 것으로 확인되었으며 그 대상 열차는 22번, 23번, 30번 열차이다. 자세한 경합 해소 스케줄은 Table 6에서 9까지 그 결과를 제시하였다.

이번 실험에서는 역수가 63개역이고 열차가 32개인데 출발지연 및 정차지연을 5분씩 부여하고 시공간 네트워크 데이터 생성에 총 2분 41초가 소요되었다. 또한 경합해소를 위한 최적화 모형 구동시간은 6.42초가 소요됨으로써 제안한 모형이 단선 구간과 영주역과 같이 복잡한 역에서도 매우 빠른 시간 내에 경합 스케줄을 해소할 수 있는 것으로 확인되었다.

Table 6. Conflict resolution schedule for the 4th train.

Station name	a/d	Original schedule	Revised schedule	Delay time
Jeongdongjin	d	14:05	14:08	+3
Donghae	a	14:34	14:37	
	d	14:35	14:39	+1
Dogye	a	15:13	15:17	
	d	15:14	15:20	+2
Chunyang	a	16:46	16:52	
	d	16:47	16:54	+1
Youngju	a	17:25	17:32	
	d	17:26	17:33	
Gimcheon	a	19:34	19:41	
Total delay minutes				+7

a: Arrival, d: Departure

Table 7. Conflict resolution schedule for the 22nd train.

Station Name	a/d	Original schedule	Revised schedule	Delay time
Cheognyangni	d	15:10	15:10	
Yongmun	a	15:47	15:47	
	d	15:48	15:49	
Yangdong	a	15:58	15:58	
	d	15:59	16:01	
Youngju	a	17:54	17:54	
	d	18:01	18:04	+3
Andong	a	18:26	18:29	
Total delay minutes				+3

a: Arrival, d: Departure

Table 8. Conflict resolution schedule for the 23rd train.

Station name	a/d	Original schedule	Revised schedule	Delay time
Cheognyangni	d	17:07	17:07	
Sukbul	a	19:52	19:52	
	d	19:53	19:55	+2
Youngju	a	22:08	22:10	
	d	22:09	22:11	
Andong	a	22:39	22:41	
Total delay minutes				+2

a: Arrival, d: Departure

Table 9. Conflict resolution schedule for the 30th train.

Station name	a/d	Original schedule	Revised schedule	Delay time
Youngju	d	18:30	18:30	
Wonju	a	20:07	20:07	
	d	20:08	20:10	+2
Cheognyangni	a	21:11	21:13	
Total delay minutes				+2

a: Arrival, d: Departure

5. 결 론

본 논문에서는 열차 운영단계에서 열차경합이 발생될 경우 효율적으로 경합해소 결과를 도출할 수 있는 최적화 모형을 제안하였다. 철도 현장에서 관제사는 열차 경합이 발생되거나 예측될 경우에 경합에 따른 지연파급이 어느 열차까지 그 영향을 미치는지 파악하는 것이 중요하다. 제안한 모형은 열차 경합에 따른 지연 파급정도를 확인할 수 있도록 하였다. 또한, 최적화 프로그램 구동시간을 단축하기 위해 열차들의 중간 역에서의 지연 허용치 범위를 지연 열차 운행시간 범위에 있는 열차들에게만 부여하였다. 또한 선행연구에서 대형문제 해결에 대한 단점을 극복하기 위해 경로기반의 최적화 모형을 제시하였다.

모형 실험결과에서 볼 수 있듯이 열차 등급이 상이한 열차들의 경합에서는 열차의 우선순위가 낮은 열차가 대피하고 열차 우선순위가 높은 열차가 지연을 회피하면서 운행할 수 있도록 확인하였다. 두 번째 실험에서는 열차 수와 역수를 점진적으로 증대시켜 제안한 모형과 알고리즘이 빠른 시간 내에 문제를 해결하는지 확인하였다. 세 번째 시험에서는 영주역과 같이 복잡한 단선 구간 네트워크에서 열차의 지연을 발생시켜 경합에 영향을 주는 열차들을 확인할 수 있고 경합을 빠른 시간에 해소할 수 있는 모형임을 검증하였다. 다만, 제안한 모형과 알고리즘이 경합을 회피하기 위해 생성되는 시공간 네트워크 데이터가 역수와 열차들이 증가할수록 문제의 범위가 커짐으로써 시공간 네트워크 데이터 생성에 비교적 많은 시간이 소모되기 때문에 이에 대한 개선은 필요한 상황이다. 그러나 시공간 네트워크 생성이후에 최적화모형으로 경합 상황을 해결할 때는 빠른 시간에 경합해소를 할 수 있음을 확인하였다.

향후 추가적인 연구는 열차 경함 검지 모형을 추가하여 경합검지에서 경합해소까지 모두 일괄적으로 해결할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요할 것이다. 또한 제안한 모형은 계획 시각표 데이터를 활용하여 문제를 해결하였으나 실제 철도운영 현장에서 사용

할 수 있으려면 실제 운행되는 열차 위치를 기반으로 한 시각데이터를 받아서 빠른 시간 내에 시공간 네트워크 데이터를 생성하고 경합문제를 해결해야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] R. Borndörfer, T. Schechte, S.Weider (2010) Railway track allocation by rapid branching, *Proceedings of the 10th workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems*, Dagstuhl, the Germany, 4, pp. 13-23.
[2] J. Yuan, I.A. Hansen (2007) Optimizing capacity utilization of stations by estimating knock-on train delays, *Transportation Research Part B*, 41, pp. 202-217.
[3] B. Szpigel (1973) Optimal train scheduling on a single track railway, *Proceedings of IFORS Conference on Operations Research,* Amsterdam, the Netherlands, pp. 344-351.
[4] D. Jovasovic, P.T. Harker (1991) Tactical scheduling of rail operations : The SCAN I system, *Transportation Science*, 25(4664), pp. 46-64.
[5] A. Higgins, E. Kozan, L. Ferreira (1997) Heuristic techniques for single line train scheduling, *Journal of Heuristics,* 3(1), pp. 43-62.
[6] J.H. Kim, S.M. Oh, S.H. Hong (2005) An exploratory development of mathematical programming model for the railway conflict resolution problem on a single line track, *Journal of the Korean Society for Railway*, 8(4), pp. 314-320.
[7] U. Brännlund, P.O. Lindberg, A. Nou, *et al*. (1998) Railway timetabling using Lagrangian Relaxation, *Transportation Science*, 32(4), pp. 358-369.
[8] A. Caprara. M. Mischetti, P. Toth (2002) Modelling and solving the train timetabling problem, *Operation Research*, 50(5), pp. 851-861.
[9] V. Cacchiani, A. Caprara, P. Toth (2010) Scheduling extra freight train on railway networks, *Transportation Research Part B,* 44(2), pp. 215-231.
[10] B.H. Park, S.H. Hong, C.S Kim (2012) An optimization model for railway slot allocation reflecting the operational policy, *Journal of the Korean Society for Railway,* 15(5), pp. 524-530.
[11] B.H. Park, S.H. Hong (2013) A column-generation based approach to developing an optimized railway timetable using time-space network, *Proceedings of the Korean Society for Railway,* Daegu, the Korea, pp. 160-167.
[12] Y.H. Kim, S.C. Rim (2014) Additional freight train schedule generation model, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society,* 15(6), pp. 3851-3857.
[13] Y.H. Kim, S.C. Rim (2014) A study on the addtional train scheduling method, *Journal of the Korean Society for Railway,* 17(4), pp. 313-319.
[14] B.H. Park, K.M. Kim, S.H. Hong, Y.H. Kim (2007) An algorithm for detection and resolution of train conflicts occuring whitin station, *Journal of the Korean Society for Railway*, 10(2), pp. 179-185.
[15] T.K. Ho, J.P. Norton, C. Goodman (1997) Optimal traffic control at railway junction, *Proceeding of Inst. Electr. Eng.,* Kharagpur, the India, 144(2), pp. 140-148.
[16] J. Pachl (2002) Railway operation and control, *Mountlake terrace WA:VTD rail*.
[17] J. Jacobs (2004) Reducing delay by means of computer-aided 'on-the-spot'rescheduling *in Computers in Railway IX WIT Press,* Southampton, the United Kingdom, pp.605-612.
[18] A. D'Ariano., D. Pacciarelli, M. Pranzo (2007) A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network, *European Journal of Operational Research*, 183(2), pp.643-657.

(Received 18 August 2015; Revised 14 October 2015; Accepted 10 November 2015)

Young-Hoon Kim: yhkim@krri.re.kr
Logistics System Research Team, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldo Bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 16105, Korea
Suk-Chul Rim: scrim@ajou.ac.kr
Department of Industrial Engineering, Ajou university, 206 Worldcup-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 16499, Korea