수리모형 기반의 계층적 열차경합관리 설계 및 구현

Design and Implementation of Mathematical Model based Hierarchical Conflict Detection and Resolution

김경민* 홍순흠*
Kyung Min Kim· Soon-Heum Hong

ABSTRACT

Given the daily tactical schedule, the purpose of the traffic management system is to develop operating plan that will achieve the stated schedule as best as possible. The operating plan has to be modified during the day because of occurring disturbance(e.g. delay, infrastructure breakdown, etc.) Conflict detection and resolution(CDRS) are aimed for adjusting the distorted schedule to tactical schedule. Our research separate CDRS into two hierarchy modules, line conflict control module and station conflict control module. We define the role of each modules and design the cooperative architecture. We suggest the conflict detection and resolution approach based on mathematical model. These results can be implemented as prototype modules.

(국문요약)

일반적으로 열차경합은 사고나 인프라고장(선로, 신호기, 선로전환기 등) 등의 외란 발생으로 인하여 본래의 스케줄에 따라 열차운영을 할 수 없는 상황으로 정의 되어진다. 열차경합관리의 주요 목적은 열차 운영 중에 발생하는 열차경합을 사전에 검지하고 해소하는 것이다. 경합의 검지 방법은 선후행 열차간 운행시격과 최소 열차운행시격, 허용가능 지연시간초과, 선로 폐쇄상태의 시스템 자동검지 등 다양하며 해소 방안 역시 속도조절, 대기시간변경, 교행/대피 순서변경, 플랫폼 사용 변경 등 여러 가지가 복합적으로 적용된다. 현재 대부분의 열차운행제어체계는 중앙집중방식이며 소규모 역에서의 경합관리역시 원격으로 중앙에서 하고 있으나 CTC 차원에서 모든 역 상황을 최적으로 통제하는 것은 무리가 있다. 또한, 입환과 같은 구체적인 작업들은 CTC차원에서 파악조차 힘들기 때문에 로컬에서 수행하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 경합관리를 계층적으로 라인경합관리, 역경합관리 2가지로 구분하고 경합검지 및 해소에서 각각의 역할분담 및 협조체계를 설계하였다. 또한, 각각의 경합관리에서는 수리모형에 기반한 최적화모델을 적용하여 현실적이고 합리적인 경합관리모델 구현방법을 제시한다.

* 한국철도기술연구원 철도교통물류연구실
E-mail : kmkim@krri.re.kr (김경민)
TEL : (031)460-5491 FAX : (031)460-5499

1. 서론

일반적으로 열차경합은 사고나 인프라고장(선로, 신호기, 선로전환기 등) 등의 외란 발생으로 인하여 본래의 스케줄에 따라 열차운영을 할 수 없는 상황으로 정의 되어진다. 열차경합관리의 주요 목적은 열차 운영 중에 발생하는 열차경합을 사전에 검지하고 해소하는 것이다. 경합의 검지 방법은 선후행 열차간 운행시격과 최소 열차운행시격, 허용가능 지연시간초과, 선로 폐쇄상태의 시스템 자동검지 등 다양하다. 해소 방안 역시 속도조절, 대기시간변경, 교행/대피 순서변경, 플랫폼 사용 변경 등 여러 가지가 복합적으로 적용된다. 현재 대부분의 열차운행제어체계는 중앙집중방식(CTC)이며 소규모 역에서의 경합관리역시 원격으로 중앙에서 하고 있으나 CTC 차원에서 모든 역 상황을 최적으로 통제하는 것은 무리가 있다. 또한, 입환과 같은 구체적인 작업들은 CTC차원에서 파악조차 힘들기 때문에 로컬에서 수행하고 있는 실정이다. 위와 같은 운행관리 체계에서는 중앙에서의 의사결정을 로컬에서 수행하기 어려운 경우 및 중앙에서 의사결정시 역 상황과 조화를 이루지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 경합관리를 계층적으로 라인경합관리, 역경합관리 2가지로 구분하고 경합 검지 및 해소에서 각각의 역할분담 및 협조체계를 설계하였다. 또한, 각각의 경합관리에서는 수리모형에 기반한 최적화모델을 적용하여 현실적이고 합리적인 경합관리모델 구현방법을 제시한다.

2. 기존연구

일반적으로 열차경합 검지 및 해소 문제는 혼합정수계획모형(mixed integer programming)으로 모형화하여 역의 용량 제약을 만족시키도록 스케줄을 조정하는 방법으로 접근되어져 왔다. Higgins *et. al.*[1], 김재희 *et. al.*[5] 연구는 단선구간에 대해 분지한계법을 이용한 해법을 제시하였으며 홍성필 *et. al.*[6]은 역용량 제약을 완화하고 단선구간만이 아니라 복선구간까지 고려한 확장된 모형을 제시하고 Branch and Price 알고리듬을 개발 하였다. MARCO(Multilevel Advanced Railways Conflict Resolution and Operation)[8] 연구 프로젝트와 COMBINE2[4] 프로젝트 본 연구와 가장 유사한 연구로써 열차경합 검지 및 해소 시스템에 대한 상세한 요구사항과 시스템 사양, HTA(High Traffic Area)와 GAN(Global Area Network)에 대한 각각의 데모 프로그램을 개발하였고 Mascis *et. al.*[3]는 휴리스틱 Job-shop모형에 기반한 열차 경합 해소 모형을 제시하였다. 특히, Mazzarello *et. al.*[2]은 네덜란드의 Schiphol 지역의 고속열차에 대하여 Mascis *et. al.*[3]의 기법을 이용하여 주요 분기구에 대한 block section단위의 경합 검지 및 해소에 실시간 적용 가능함을 보였다. 본 연구는 수리모형에 기반한 계층적 경합관리모델을 제시하고자 한다. 이 연구는 기존 연구와 달리 지역단위 경합해소와 광역단위 경합관리의 역할을 분리하고 이에 따른 효율성 및 일치성 확보를 위한 협조체계를 설계하였다. 역 단위 경합관리에서는 입환 작업과 같은 역내 혼잡 상황을 반영할 수 있는 역내 출/도착 진로 설정과 출/도착 시각을 최적화하는 방법론을 적용하였고 라인단위 경합관리에서는 물리적으로 분기구를 포함하는 복수역에 대한 리스케줄링 MIP모형을 적용하였다. 본 연구는 위와 같은 설계에 따라 계층적 경합관리시스템의 프로토타입을 구현하였다.

3. 계층적 열차경합관리 설계

3.1 계층적 열차경합 관리 기본 설계

본 연구에서는 경합관리를 경합관리 범위, 경합관리 시간, 경합해소 방안에 따라 계층적으로 라인경합관리, 역 경합관리 두 가지로 구분하였다. 역 경합관리는 <그림 1>과 같이 해당역에서 제어가능한 구간이 물리적 범위가 되며 인접역에서 들어오는 운행실적을 바탕으로 20분 내에 해당역에서 발생하는 경합을 검지(본선, 입환 포함)한다. 경합 발생시에는 해당역 만의 용량을 고려하여 해당역에서의 출발시간, 출발/도착 진로

를 변경하여 경합을 해소한다.

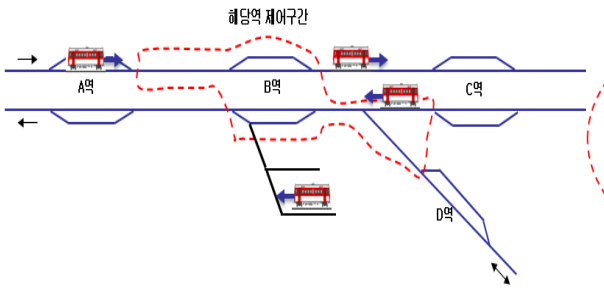

Fig. 1. Station Conflict Scope

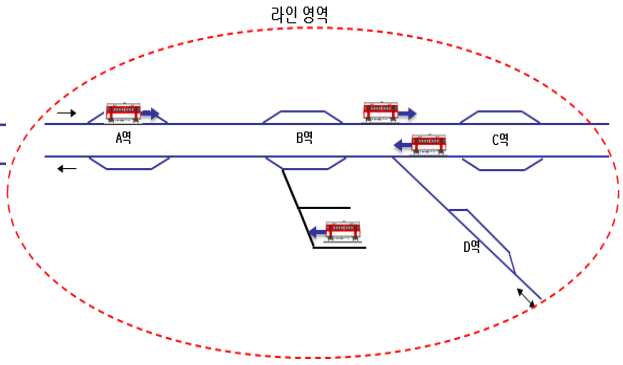

Fig. 2. Line Conflict Scope

라인경합관리는 <그림 2>와 같이 물리적으로 복수역의 집합을 의미한다. 이때, D역과 같이 분기구에서 분리되는 역도 포함가능하다. 라인경합관리는 각 역에서의 용량은 무한대라고 가정하고 각 역에서 들어오는 운행실적(열차도착, 출발 정보), 출발순서제안을 바탕으로 1시간 내에 관리영역에서 발생하는 경합을 검지한다. 경합발생시에는 열차의 교행/대피 순서를 변경 및 각 역에서의 열차의 출도착 시간을 변경하여 최적의 변경본선스케줄을 작성한다.

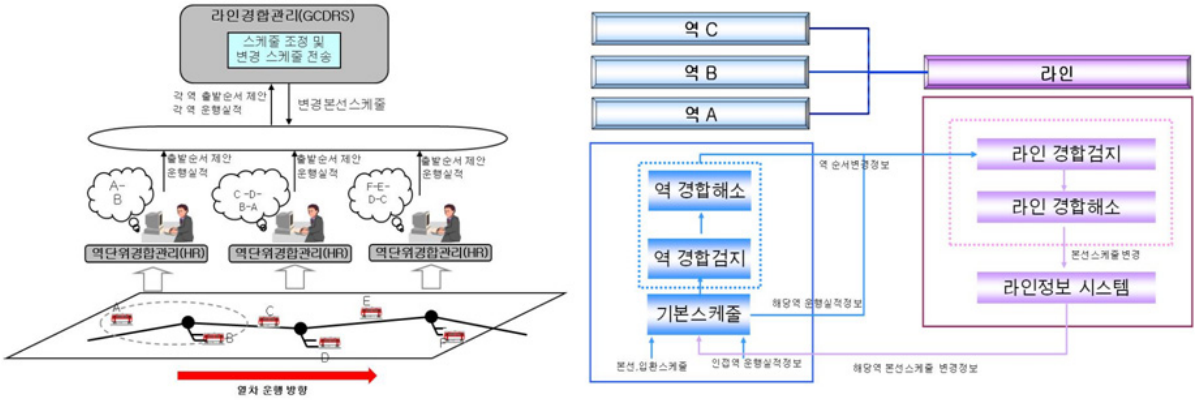

Fig. 3. Cooperation of Hierarchical Conflict Modules

라인경합관리에서는 역 용량을 무한대로 역 경합관리에서는 해당역의 용량만을 고려하므로 이를 현실적으로 구현하기 위해서는 두 경합관리 사이의 협조체계(그림 3)를 정의하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 먼저 각 역에서는 열차의 도착순서는 기본스케줄을 유지하도록 한다. 즉, 각 역에서는 출발순서의 변경만 가능할 뿐이다. 또한, 출발순서에 변경이 발생한 경우 이 사실을 라인경합관리에 통보를 한다. 라인경합관리에서는 각 역에서의 출발순서 변경 요청을 제약으로 하여 새로운 변경스케줄을 작성한 후 이를 다시 각 역으로 전송한다. 이로써 새로운 변경스케줄이 역에서의 기본스케줄이 된다.

3.2 계층적 열차경합 관리 기본 설계

1) 라인경합관리

라인경합검지는 크게 두 가지 경우에 실시한다. 첫 번째는 라인영역내의 역으로부터 열차 출발/도착 정보 수신시이고 이때, 도착실적 수신시에는 실제 역간이동시간을 계산하여 기본스케줄상의 역간이동시간과의

비교를 통해 이후 운행구간 대한 역간이동시간의 상한값을 설정한다. 출발실적 수신시에는 설정된 상한값을 바탕으로 향후 1시간에 대한 예측스케줄을 계산한다. 경합의 검지는 예측된 열차스케줄이 각 구간에서의 선로상황을 고려하여 (단선, 복선, 등) 출발여유시격, 도착여유시격을 만족시키는지 체크하는 것이다. 경합검지 시에는 경합열차, 발생구간, 발생시간을 사용자에게 알린다. 두 번째는 라인영역내의 역으로부터 출발순서 변경 요청 수신시이다. 검지 방법은 본선스케줄을 변경 요청 받은 역에서 변경요청 열차의 출발시간을 고정하는 예측스케줄을 만들고 첫 번째와 동일한 방법으로 경합을 검지한다. 경합검지시에는 경합해소를 하게 되는데 경합해소시의 주요 제약으로는 각 역에서의 열차출발순서 변경요청, 각 역에서의 출도착여유시간 준수 및 정차시간준수가 되며 목적함수로는 모든 열차의 가중된 지연 혹은 조착 시간의 합을 최소화하는 것이다. 경합해소의 결과는 변경된 본선 열차의 출/도착 시간이다.

2) 역 경합관리

역 경합검지의 트리거 시점은 다음과 같이 4가지이다. (1) 인접역으로부터 열차 출발/통과 정보 수신시 (2) 현재시간에서 20분 내에 해당역에 도착/출발하는 스케줄 발견시 (3) 해당역 제어구간을 벗어난 열차정보 수신시 (4) 제어구간에서의 고장 발생시이다. 경합 검지 방법은 (1) 특정 점유궤도의 도착순서와 출발순서를 비교하여 순서 준수가능성을 체크 (2) 고장으로 인한 사용불가 진로가 스케줄상에 설정되어있는지 체크 (3) 스케줄상의 상하 라인별 기본스케줄와 예측스케줄 간의 도착순서 일치성 체크 (4) 먼저 오는 열차를 먼저 제어하는 방식(FIFO)로 제어할 때 사용자가 허용하는 한도지연시간을 초과하는지 체크하여 구분한다. 경합해소의 목적함수로는 모든 열차의 가중된 지연시간의 합을 최소화하는 것이고 경합해소의 결과는 변경된 열차의 출/도착시간, 출/도착 진로이다.

4. 열차경합관리를 위한 수리모형

4.1 라인경합해소 수리모형

라인 경합관리에서는 홍성필 *et. al.*[6]에서 제시하는 아래와 같은 수리모형에 기초한 열차 경합 해소 알고리듬을 사용한다.

1) 용어

- I : 열차집합
- P : 구간(segment)의 집합, n_p: 구간 $p \in P$에서의 선로의 개수
- Q : 역(station)의 집합
- I_p : 구간 p를 지나는 열차의 집합

2) 파라미터

- c_i : 열차 i의 출발지연비용
- w_i : 열차 i의 조착 또는 도착지연비용
- d_p^i : 열차 i의 구간 p에서 계획된 출발시각
- a_p^i : 열차 i의 구간 p에서 계획된 도착시각
- h_q : q역으로 진입 또는 q역에서 나갈 때 같은 선로를 사용하는 열차간 여유시격
- h_m : 모든 역에서 착발시 최소여유시격
- s_q^i : 역 q에서 열차 i의 최소정차시간
- $\overline{t_p^i}$: 열차 i가 구간 p에서의 이동시간 상한값

- b_p^i : 열차 i의 구간 p에서 출발할 수 있는 가장 빠른 시각(경합원인)

3) 변수

- D_p^i : 열차 i의 구간 p에서의 출발시각
- A_p^i : 열차 i의 구간 p에서의 도착시각
- E_p^i : 열차 i의 구간 p에서의 조착 또는 도착지연시간
- $Z_{p,k}^i$: 열차 i가 구간 p의 k번째 선로를 지날 경우는 1, 아니면 0
- X_p^{ij} : 구간 p에서 열차 i가 j보다 먼저 출발하면 1, 아니면 0
- Y_p^{ij} : 구간 p에서 열차 i가 j보다 먼저 도착하면 1, 아니면 0

4) 수리 모형

$$\min \sum_{p \in P} \sum_{i \in I_p} c_i (D_p^i - d_p^i) + w_i E_p^i \tag{1}$$

subject to

$$\begin{aligned} (A_p^i - a_p^i) &\le E_p^i, \quad \forall p \in P, \forall i \in I_p \\ -(A_p^i - a_p^i) &\le E_p^i, \quad \forall p \in P, \forall i \in I_p \end{aligned} \tag{2}$$

$$\sum_{k=1}^{n_p} Z_{p,k}^i = 1, \quad \forall p \in P, \forall i \in I_p \tag{3}$$

$$M(1 - Z_{p,k}^i) + M(1 - Z_{p,k}^j) + \begin{cases} M(1 - X_p^{ij}) + D_p^i - D_p^j \ge h_r \\ M(1 - X_p^{ij}) + A_p^i - A_p^j \ge h_r \\ MX_p^{ij} + D_p^i - D_p^j \ge h_r \\ MX_p^{ij} + D_p^i - D_p^j \ge h_r \end{cases} \tag{4}$$

$$\forall p = (q,r) \in P, \ k = 1, \ldots, n_p, \quad \forall i,j \in I_p$$

$$\begin{aligned} &M(1 - X_p^{ij}) + D_p^i - D_p^j \ge h_r, \quad \forall p = (q,r) \in P, \ \forall i,j \in I_p \\ &MX_p^{ij} + D_p^i - D_p^j \ge h_r, \quad \forall p = (q,r) \in P, \ \forall i,j \in I_p \\ &M(1 - Y_p^{ij}) + A_p^i - A_p^j \ge h_r, \quad \forall p = (q,r) \in P, \ \forall i,j \in I_p \\ &MY_p^{ij} + D_p^i - D_p^j \ge h_r, \quad \forall p = (q,r) \in P, \ \forall i,j \in I_p \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} &2 - Z_{p,k}^i - Z_{p,k}^i + (X_p^{ij} - Y_p^{ij}) \ge h_m, \\ &2 - Z_{p,k}^i - Z_{p,k}^i - (X_p^{ij} - Y_p^{ij}) \ge h_m, \\ &\qquad \forall p = (q,r) \in P, \ \forall i,j \in I_p, \ k = 1, \ldots, n_p \end{aligned} \tag{6}$$

$$A_p^i - D_p^i \le \overline{t_p^i}, \ \forall p = (q,r) \in P, \quad \forall i \in I_p \tag{7}$$

$$D_p^i - A_p^i \ge s_q^i \tag{8}$$

$$D_p^i \ge b_p^i, \quad \forall p \in P, \ \forall i \in I_p \tag{9}$$

목적함수는 모든 열차의 가중된 지연 혹은 조착 시간의 합을 최소화하는 문제(Minimize total weighted delay and earliness)이다(식(1)참조) 식(2)는 도착시간의 지연 또는 조착시간을 의미하고, 식(3)은 복선의 경우 열차 선로 선택을 의미한다. 식(4)는 동일선로를 운행하는 열차간 시격 유지 제약이고 식(5)는 역에서 동시착발을 제한하도록 하는 제약이다. 식(6)은 동일선로를 운행하는 열차의 출도착 순서를 일치하도록 하는 것이며 식(7)은 구간별 최소 열차이동시간 제약이다. 식(8)은 역내의 계획된 정차시간 준수를 의미한다. 식(9)는 라인영역내의 각 역 경합해소를 요청하는 열차 출발 시간 제약이며 이 제약식은 경합의 원인이 된다.

4.2 역 경합해소 수리모형

역 경합관리에서는 박범환 *et. al.*[7]에서 제시하는 수리모형을 바탕으로 본선 및 입환 열차간 출발순

서유지제약, 사용 불가진로 제외제약 등을 추가하여 아래와 같은 수리모형을 사용한다.

1) 용어

- t : 열차
- p : 진로. 진입진로-플랫폼, 플랫폼-출발진로, 입환 진로, 사용자 지정 진로 등으로 구성
- *Inbound_Route(t)* : 열차 t가 진입가능한 진로의 집합
- *Outbound_Route(t)* : 열차 t가 출발가능한 진로의 집합
- *Outbound_Ahead(t)* : 열차 t보다 먼저 출발해야하는 열차의 집합
- *Route(t)=Inbound_Route(t)∪Outbound_Route(t).*
- $Incompatible(p)$: 진로 p와 동시에 사용할 수 없는 진로의 집합
- $CommonFf(p)$: 진로 p와 동일한 플랫폼을 사용하는 진로의 집합
- $Disabled(p)$: 고장난(사용불가) 진로의 집합

2) 파라미터

- d_t : 열차 t의 지연시간. 지연이 없으면 0.
- $\overline{y_p^t}$: 스케쥴 상의 열차 t가 진로 p를 설정하는 시작 시간. 현재시점 0을 기준으로 초로 계산 . 사용하지 않는 진로 p에 대해서는 0
- $\underline{y_p^t}$: 열차 t가 진로 p에 진입할 수 있는 최소 가능 시간. 지연이 없는 열차의 경우, $\underline{y_p^t}=\overline{y_p^t}$. 지연이 있는 열차의 경우, $\underline{y_p^t}=\overline{y_p^t}+d_t$
- δ_{pq} : 두 진로 p,q를 연속적으로 설정하기 위해 필요한 시간 간격
- W : 충분히 큰 양의 수
- $\underline{s^t}$: 열차 t의 정차시간의 하한. 통과열차의 경우 0.

3) 변수

- x_p^t : 열차 t가 진로 p를 사용하면 1 그렇지 않으면 0
- y_p^t : 열차 t가 진로 p를 설정하는 시작 시간. 프로그램 구동 시점을 0으로 했을 때, 진입시각은 경과 시간을 초(second)로 환산
- $z_{pq}^{t_it_j}$: 열차 t_i가 진로 p를 열차 t_j가 진로 q를 사용하는 것보다 빠르면 1, 그렇지 않으면 0
- $u_{pq}^{t_it_j}$: 열차 t_i가 진로 p를 혹은 열차 t_j가 진로 q를 사용하면 1 둘다 사용하지 않으면 0

4) 수리 모형

$$\min \sum_p \sum_t u_p^t (y_p^t - \overline{y_p^t}) \tag{10}$$

subject to

$$\sum_{p \in Inbound_Route(t)} x_p^t = 1 \qquad \forall t \tag{11}$$

$$\sum_{q \in CommonFf(p)} x_q^t = x_p^t,\ p \in Inbound_Route(t), q \in Outbound_Route(t). \tag{12}$$

$$y_q^{t_j} - y_p^{t_i} \geq (\delta_{pq} - W) u_{pq}^{t_it_j} + W z_{pq}^{t_it_j},\ q \in incompatible(p),\ \forall p \in Route(t_i),\ \forall q \in Route(t_j) \tag{13}$$

$$y_p^{t_i} - y_q^{t_j} \geq \delta_{pq} u_{pq}^{t_it_j} - W z_{pq}^{t_it_j},\ q \in incompatible(p),\ \forall p \in Route(t_i),\ \forall q \in Route(t_j) \tag{14}$$

$$2u_{pq}^{t_it_j} \geq x_p^{t_i} + x_q^{t_j},\ q \in incompatible(p),\ \forall p \in Route(t_i),\ \forall q \in Route(t_j) \tag{15}$$

$$y_p^t \leq M \cdot x_p^t,\ p \in Route(t), \forall t \tag{16}$$

$$y_p^t \geq \underline{y}_p^t \cdot x_p^t \ , \ p \in Route(t), \forall t \tag{17}$$

$$\underline{s}^t \leq \sum_{q \in Outbound_Route(t)} y_q^t - \sum_{p \in Inbound_Route(t)} y_p^t \ , \ \forall t \tag{18}$$

$$x_p^t = 0 \ , \ p \in Disabled(p) \tag{19}$$

$$y_p^{t_i} \leq y_q^{t_j} \ , \ q \in OutboundAhead(p), \ \forall p \in Route(t_i), \forall q \in Route(t_j) \tag{20}$$

$x_p^t, z_{pq}^{t_i t_j}$: 이진변수, y_p^t : 음이 아닌 정수

목적함수는 모든 열차의 가중된 지연 합을 최소화하는 문제(Minimize total weighted delay)이다(식(10)참조) 식(11-12)은 열차는 하나의 진입/출발 진로를 가짐을 의미하고, 식(13-15)는 양립불가능한 두 진로 간에는 반드시 δ_{pq}만큼의 시간 간격이 있어야 함을 의미한다. 식(16)은 변수 x_p^t와 y_p^t를 연관시키는 결합 제약식(coupling constraints)으로서, 열차 t에 대해 진로 p가 설정 될 때에만 y_p^t가 값을 가질 수 있음을 의미한다. 식(17)은 진로 설정 시각이 최소 진로 설정 가능 시각 $\underline{y}_p^t$보다 큼을 의미한다. 식(18)은 열차 t가 정차시간 제약이다. 식(19)은 고장 등으로 인해 사용 불가능한 진로설정을 제외시키기 위한 제약이며 식(20)은 라인경합관리에 순서변경요청을 제외하기 위한 출도착순서 유지시 사용하게 되는 제약이다.

5. 열차경합관리시스템 구현

앞에서 설명한 기본설계 및 수리모형을 바탕으로 열차경합관리 시스템을 구현하였다(<그림 4>, <그림5>). 역 경합관리 시스템은 스케줄 관리, 경합관리, MMI표시관리, 고장관리 4가지 프로세스로 구분되고 스케줄 관리 프로세스는 역의 스케줄 데이터를 DB 스캔 방식으로 데이터를 가져온다. 또한, 인접역 열차의 출발/통과 정보, 연동정보, 시스템 상태정보 등을 수신하고 예측스케줄을 만든다. 열차순서 변경 발생시 해당 정보를 라인경합관리로 전송한다. 경합관리프로세스는 기본스케줄, 예측스케줄을 이용하여 경합검지를 수행하고 경합해소 스케줄을 생성한다. MMI표시관리프로세스는 사용자에게 경합검지 및 해소 상태 정보를 제공하고 사용자가 입력하는 정보를 타 프로세스로 전송한다. 고장관리 열차, 궤도, 선로전환기, 신호기의 고장/해소 정보를 수신하고 열차, 궤도, 선로전환기, 신호기를 포함하고 있는 진로 정보를 찾아 고장/해소 상태를 적용한다.

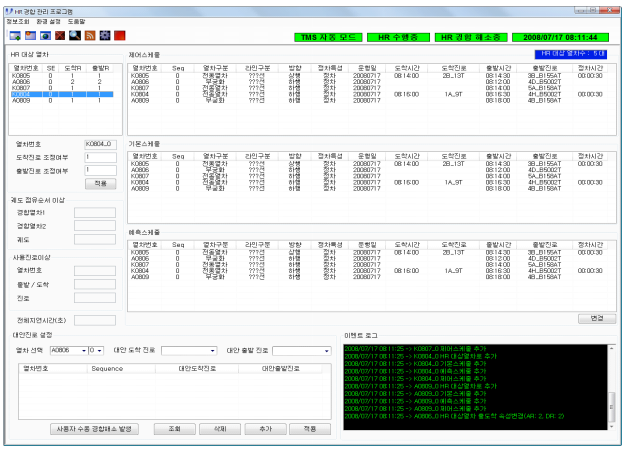

Fig. 4. Prototype of Station Conflict Resolution Module

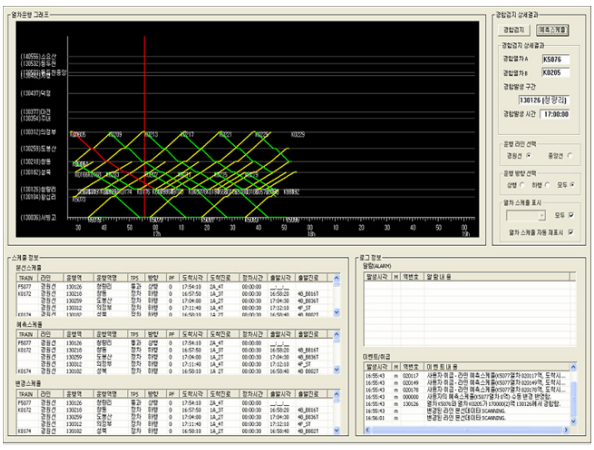

Fig. 5. Prototype of Line Conflict Resolution Module

라인 경합관리 시스템은 스케줄 관리, 경합관리, MMI표시관리 3가지 프로세스로 구성되어 있으며 스케줄관리 프로세스에서는 각 역에서의 본선열차 출도착 실적을 기록하고 이 정보를 바탕으로 예측스케줄을 만든다. 경합관리 프로세서에서는 경합관리프로세스는 기본스케줄, 예측스케줄을 이용하여 경합검지를 수행하고 경합해소 스케줄을 생성한다. MMI표시관리프로세스는 사용자에게 경합검지 및 해소 상태 정보를 제공하고 사용자와의 인터페이스가 이루어지게 된다.

6. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 경합검지 및 해소에 관련된 상호 역할 분담 및 협조가 가능한 계층적 경합관리를 설계하고 구현하였다. 본 연구에서 제시하는 계층적 경합관리는 현재 CTC와 로컬 두 곳에서 수행하는 경합검지 및 해소 사항을 현실적으로 충분히 반영할 수 있을 것으로 생각된다. 각각의 경합관리에서는 운행규정 및 경험이 반영 가능한 수리모형 기반의 최적화모델을 적용하였다. 열차 위치 정보를 바탕으로 라인과 역에서 열차 출도착 예정 시각을 정확히 산출가능해진다면 본 연구에서의 수리적 경합해소의 효과는 더욱 증대될 것이다. 향후, 다양한 경합 사례 및 시나리오를 바탕으로 하여 구현된 경합관리시스템의 협조성 및 경합해소의 효과에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

참고 문헌

[1] A.Higgins, E.Kozan, L.Ferreia, Optimal scheduling of trains of a single line track, *Transportation Research* (1996)

[2] M.Mazzarello, A traffic management system for real-time traffic optimization in railways, *Transportation Research* (2007)

[3] A. Mascis, D. Pacciarelli and M. Pranzo, “Scheduling Models for Short-term Railway Traffic Optimization”, *9th International Conference on Computer-Aided Scheduling of Public Transport (CASPT), technical report,* 2004

[4] Information Society Technologies, "enhanced COntrol centres for fixed and Moving Block sIgNalling systEms-2, 2003

[5] 김재희, 오석문, 홍순흠, 단선구간 열차경합해소문제를 위한 수리계획 모형의 기본설계, *한국철도학회논문집,* (2005)

[6] 홍성필, 김형석, 박명주, 민윤홍 열차경합해소문제에 대한 해법연구, *대한산업공학회/한국경영과학회 춘계공동학술대회,* (2008)

[7] 박범환, 김경민, 홍순흠, 김영훈, 역내 열차 경합 검지 및 해소를 위한 수리 모형 및 해법, *한국철도학회 논문집,* (2007)

[8] 한국철도기술연구원, Multi-Level Advanced Railways Conflict Resolution and Operation Control, *technical report*, (2002)