

KTX열차와 일반열차 간 접속대기를 고려한 복선구간 열차시각표 재수립 모형의 기본설계

김재희^{1*}, 오석문²

¹전북대학교 경영학부, ²한국철도기술연구원

An Exploratory Development of Railway-timetable Rescheduling Model Considering Transferring Service between KTX and Conventional Train on a Double Line Track

Jaehye Kim^{1*} and Oh Seok Moon²

¹Division of Business Administration, Chonbuk National University

²Division of Railway Transport & Logistics, Korea Railroad Research Institute

요약 철도 네트워크에서는 정해진 선로를 운행하는 열차의 특성상 일부 열차의 지연이 다른 열차의 스케줄에 영향을 미쳐 열차 간 경합이 발생할 수 있고, 이는 전체 네트워크에 파급되어 혼선을 유발할 수 있다. 따라서 혼선된 열차 시각표를 빠른 시간 내에 재수립하는 것은 매우 중요한 문제가 된다. 이 문제는 동일 방향으로 진행 중인 열차가 선형열차를 추월하거나 다수의 노선이 하나로 수렴하는 경우에 열차의 진행 순서를 정하는 등의 문제로 이해될 수 있다. 그러나 이 문제를 위한 국내의 연구는 활발하지 못하며, 특히 일반열차와 고속열차(KTX)가 하나의 선로를 공유함으로써 두 열차 간의 연계가 필요한 한국 철도의 복잡한 현실까지 고려하지 못하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 열차 지연시간의 합을 최소화할 수 있는 최적화 모형을 제시하고자 한다. 제시된 모형을 일반열차와 KTX 열차가 혼재하는 경부선 복선 구간에 적용한 결과 열차 환승을 고려한 열차 시각표 재수립이 가능함을 확인하였다.

Abstract In the railway, the delay of a train may affect the schedule of other trains. Hence, the timetable management activity involving overtaking and transferring becomes an important issue. The timetable rescheduling is the conflict resolution of the disrupted schedule and a matter of deciding the sequence of moves among trains and the place for meeting. In Korea, there are few cases where operations research models were applied to railway timetable rescheduling problem in consideration of the transfer between Korea Train eXpress (KTX) trains and conventional trains. Hence, we present a mathematical approach that can minimize the total delay of the whole trains secondly. We applied the model to the exemplary section of a double-line track, the Gyung-Boo Line, and it is confirmed that the mathematical model could effectively address the transfer service as well as the complicated railway conflicts of Gyung-Boo Line.

Key Words : Transfer, railway timetable, rescheduling. double-line, minimax

1. 서론

고속철도(KTX)는 개통 전후의 여러 우려에도 불구하고 기술적인 면이나 시장 진입 측면에서 안정화를 이룬 것으로 평가되고 있다. 그에 따라 철도 부문의 점유율이

증가하였으며, 향후 고속철도에 대한 추가 투자가 계획대로 이뤄질 경우 철도 부문의 역할이 더욱 확대될 것으로 예상되고 있다. 그리고 이러한 변화는 지역 간 통행의 수단분담구조를 속도-거리별 비교우위 개념에 부합하는 합리적 구조로 변화시키는 부수적 효과도 낳고 있다[2].

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-331-D00662).

*교신저자 : 김재희(jheekim@chonbuk.ac.kr)

접수일 09년 05월 01일

수정일 (1차 09년 05월 25일, 2차 09년 06월 03일)

재재확정일 09년 06월 17일

철도 부문의 역할 증대는 결과적으로 철도교통에 대한 고객의 눈높이를 높이고 있다. 특히 타 교통수단과 비교해서 안전성과 정시운행은 고객이 철도에서 기대하는 가장 큰 편익이며, 특히 정시성 측면에서 여타 대중교통에 비해서 우월한 장점을 갖고 있다. 이 때문에 차량이나 선로 이상 또는 탑승 지연으로 인해 발생하는 출·도착 지연(delay)은 서비스 수준, 나아가 철도의 경쟁력을 좌우하는 데 매우 중요한 요소가 된다.

철도의 정시성 측면의 문제를 자세히 살펴보면, 대체로 열차 지연의 빈도는 작은 편이지만, 지연 시간의 크기가 비교적 크다는 특징이 있다. 표 1은 열차 사고 발생에 따른 처리시간의 분포를 조사한 것으로 사고 처리에 소요되는 시간이 작지 않음을 보여주고 있다. 이 때문에 한국철도공사에서는 열차서비스의 정시성에 관한 항목을 고객서비스현장에 명시하여 열차서비스의 품질을 관리하고 있으며, 현재 정시성에 관한 고객과의 약속으로 10분 이상 지연되는 열차를 최소화하려는 노력을 하고 있다.

[표 1] 열차 사고 유형별 처리시간 현황 [4]

| 사고 | 평균 처리소요시간 (분) | 최대 소요시간 (분) |
|------------------|---------------|-------------|
| 신호 시스템 | 11.8 | 76 |
| 전차선 시스템 | 10.7 | 72 |
| 엔진 | 19.9 | 65 |
| 외부요인(기후, 등) | 13.7 | 60 |
| 인간(human errors) | 9.0 | 15 |
| 궤도(보수, 등) | 5.2 | 28 |
| 기관사 부족 | 7.0 | 12 |
| 역 출발지연 | 17.5 | 28 |
| 기타 | 8.9 | 33 |

그러나 철도의 열차지연 문제는 단순하고 쉽게 해결될 수 있는 문제가 아니다. 왜냐하면 철도 네트워크에서는 정해진 선로를 운행하는 열차의 특성상 일부 열차의 지연이 다른 열차의 스케줄에 영향을 미쳐 열차 간 경합(railway conflict)이 발생할 수 있고, 이는 전체 네트워크에 파급되어 혼선(conflict)이 유발될 수 있기 때문이다. 따라서 불가피하게 발생하는 지연과 열차경합을 사전에 감지하고 짧은 시간 내에 혼선된 열차 스케줄을 재수립(Railway-Timetable Rescheduling)하는 기술이 필요하다.

특히 한국철도의 경우 고속철도 개통으로 시속 100km 이하의 화물열차에서 최고속도 300km대의 고속열차(KTX)에 이르는 다양한 속도종별의 열차들이 기존 선로를 공유함으로써 추월 경합이 빈번하게 발생함에 따라, 열차 지연시간을 최소화 할 수 있는 과학적 접근의 필요성이 매우 크다.

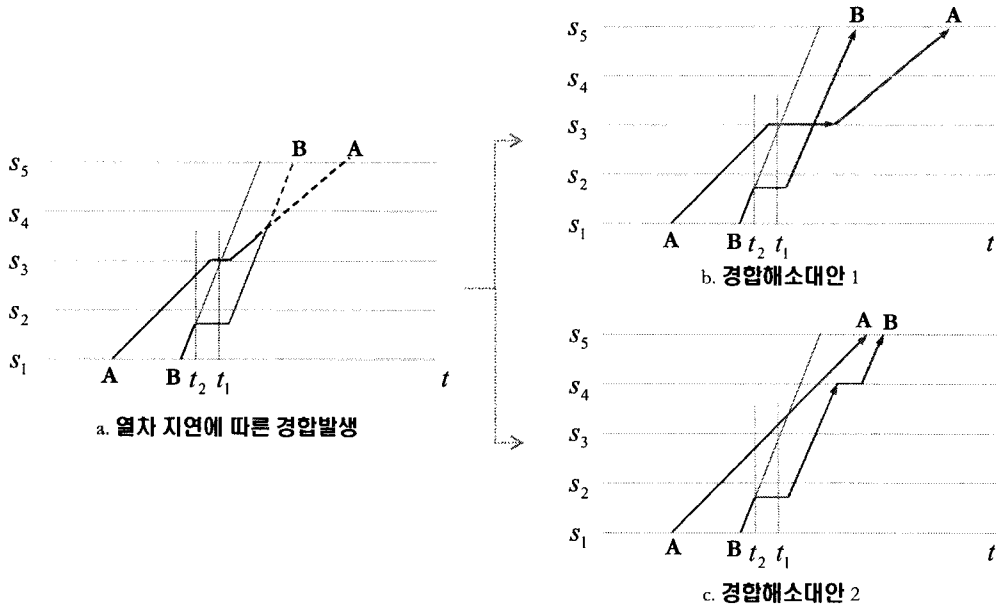
본 연구에서는 복선 구간에서의 열차경합 시 각 역에서 열차 출·도착 순서를 정할 수 있는 수리계획 모형을 수립하였다. 특별히 이 모형은 열차 우선순위를 정할 수 있는 기존의 연구를 토대로, 철도 운영자 측면에서 여객 접촉 대기를 고려할 수 있는 논리식이 포함된 혼합정수 계획모형으로 구성되어 있다.

이후의 구성은 다음과 같다. 먼저 제2장에서는 이론적 배경과 선행연구를 살펴보고, 제3장에서는 복선구간에서 KTX열차와 일반열차 간의 접촉대기를 고려해서 열차 시각표를 조정할 수 있는 최적화 모형을 제시한다. 그리고 제4장에서는 제시된 모형을 경부선 구간에 적용해보고 제5장에서 결론과 향후 연구 과제를 제시한다.

2. 이론적 배경 및 선행연구

2.1 이론적 배경

열차 서비스 시각표를 복구하는, 즉 실시간으로 운행 시각표를 재수립하는 문제에 대한 이해를 위해서는 철도에서 발생하는 경합의 상황을 살펴볼 필요가 있다. 한국 철도의 중심축을 이루는 경부선과 호남선과 같은 복선 구간에서 발생하는 열차경합의 종류로는 동일 방향으로 진행 중인 열차가 선행열차를 ‘추월’하는 경우와 경부, 호남선이 하나로 ‘수렴’하는 경우를 들 수 있다. 그림 1은 복선 구간에서 후행 열차가 선행 열차를 추월하는 경우의 열차 시각표를 도시화한 그림으로, 뒤따라오는 상급 열차나 지연 시간이 큰 열차에 우선권을 부여해서 먼저 출발시키는 상황을 나타낸다. 즉, 한국철도와 같이 운행 속도대가 상이한 열차들이 같은 선로를 공유하는 과정에서 자주 발생하는 추월경합의 예를 보여준다. 이 그림에서 s_1, s_2, \dots, s_5 는 철도역을 의미하고 가로축은 시간에 해당한다. 따라서 세로축으로 진행하지 않고 가로방향으로 그려진 선은 열차가 이동하지 않고 대기하는 것을, 그리고 직선의 기울기가 클수록 빠른 속도로 주행함을 의미한다. 그림 1.a에서 당초 계획은 저속열차 A가 선행하다가 역 s_3 에서 후행 KTX열차 B를 먼저 출발시키는 것이었다. 그러나 KTX열차 B가 $s_1 \sim s_2$ 구간에서 선로 이상으로 수분 간 멈춘 후 지연 출발하는 것을 가정하면 $s_3 \sim s_4$ 구간에서 두 열차가 충돌하는 상황이 예상된다. 이 문제를 해결하는 방법은 다양한 방법이 있지만, 간단한 예로 그림 1.b와 그림 1.c의 운행 방안을 고려할 수 있다. 즉, 열차 A가 역 s_3 에서 KTX열차의 통과를 위해 s_3 역에서 일정 시간 대기후 열차 B를 먼저 통과시키는 대안 1과 열차 A를 계획대로 정상 운행시키고 KTX열차 B가 구간



[그림 1] 열차 지연에 따른 경합발생과 해소 계획

s4~s5에서의 충돌을 막기 위해 역 s4에서 대기후 지연 출발하는 대안 2를 생각해 볼 수 있다.

그림 1의 경합해소 방안은 아주 간단한 예시로 그 해결방법을 직관적으로도 찾아볼 수 있지만, 이 문제를 전체 네트워크로 확대하면 한 열차의 지연이 전체 네트워크에 파급되어 더욱 복잡한 경합을 유발할 수 있고, 어느 역에서 추월할 지, 두 열차 간 순서를 어떻게 할 지를 결정하는 대안의 수가 기하급수적으로 증가해서 주먹구구식 대응으로 해결할 수 없는 어려운 문제가 된다[9,10]. 이와 관련해서 스웨덴의 국영철도(SJ)에서 1997년에 실시한 열차운행 의사결정자와의 인터뷰 조사 결과를 보면 거의 모든 열차사령이 경합전파에 따른 문제의 복잡도 증가로 인해 직관적인 방법으로는 전역적인 해결이 불가능하다고 응답한 사례가 있다[5].

2.2 선행 연구

열차 경합의 해소 문제와 관련하여 국외에서는 Szpigiel [13]등을 시작으로 수학적 모형을 활용한 다양한 방식의 이론적 접근이 이뤄졌다. 초창기의 연구가 화물열차 위주의 단선구간에 집중된 것과 달리 1990년대 이후에는 여객열차 서비스가 중심인 복선 노선에 초점이 맞춰졌다. 그리고 여객열차 서비스의 경우 열차운행시간에 관한 정시성 확보의 목적함수가 연료사용 비용 절감보다 더 중요하게 고려할 필요가 있다. 따라서 이들의 문제는 주로 총 가중지연시간을 최소화하기 위한 열차의 추월·

대피 스케줄의 작성이 된다. 또한 이 문제는 단선 화물열차 위주 노선 문제에 비해 열차운행 상황이 복잡하여, 각 상황에 따른 휴리스틱 알고리즘(Heuristic algorithms)들이 활용되기도 하였다. 그 밖의 참고할만한 연구로 Schaefer and Pferdmenges [11]의 전문가 시스템이나 Berge-Bresets et al. [6]이 제안한 규칙기반 (Rule-based) 방법을 들 수 있는데, 규칙 기반 방법은 경합해소를 위한 규칙이 쉽게 도출되는 문제에 한해 적용하는 것이 적합하다. 최근에는 Ghoseiri et al. [8]에 의해 가상의 열차경합 해소 예제 문제에 대해 다목적 특성을 고려해서 연료 사용 비용 및 승객 대기시간 최소화를 고려한 모형이 제시되기도 하였다.

한편, 이러한 연구는 실용성이 관건으로 실무적인 차원에서의 다수의 실용화 연구 사례를 찾아볼 수 있다. 즉, 북미지역의 선도적인 연구 이후 일본, 유럽, 호주 등에서 광범위하게 다뤄지기 시작하였으며, 고려 범위도 복선 여객열차 노선까지 확대되었다. 특히 이들 철도 선진국에서는 실제 활용할 수 있는 시스템의 개발에 주안점을 두고 연구가 진행되었다. 일본에서는 비교적 초기인 1993년에 여객열차를 대상으로 한 열차 제어 시스템인 ESTRAC-III가 소개되었으며[9], 동일본 철도(JR East)의 신간선 열차운행관리 시스템인 COSMOS (Computerized Safety, Maintenance and Operation Systems for Shinkansen)에서는 지연확산 시뮬레이션 수준의 열차경합 해소 기능을 내장하고 있다. 그리고 네덜란드에서는

열차경합 해소시스템을 도입하기 위해 CD/DS(Conflict Detection and Decision Support System)를 시범적으로 개발하였다[12]. 이 시제품은 1996년에 Eindhoven역에서, 그리고 1998년에 Uhrecht역에서 현장실험을 거쳐 효과가 입증되었는데, 한 가지 특이한 사항으로 네덜란드의 연구에서는 1990년대 초에 일본이 ESTRAC-III에 적용한 전문가시스템이 유지보수 측면에서 비효율적이라고 판단하고 이 방법론에 대한 추가적인 검토를 중단한 선례가 있다. 한편, 이 문제를 범유럽 차원에서 해결하려는 목적으로, 최근 유럽연합에서는 전 유럽 철도의 상호운용성(interoperability)을 확보하기 위한 'European Railway Traffic Management System(ERTMS) 프로젝트'를 추진하고 있다. 이러한 체계에서 국가 간을 운행하는 열차들(Border crossing trains)의 운행시간에 대한 정시성 확보는 매우 중요한 문제가 된다. 따라서 유럽연합에서는 열차서비스의 정시성 확보를 위해 OPTIRAIL (Optimization of Traffic Through the ERTMS) 등 열차경합 해소와 관련한 연구가 이어졌다.

철도 산업의 역사가 오래된 외국과 달리 국내의 경우는 관련 연구가 많지 않다. 대표적인 프로젝트로 철도청에서는 기존의 열차운행관리 시스템(Central Traffic Control)을 한 곳으로 통합하고 해당 소프트웨어를 개선하였으며, 이 프로젝트에서 열차경합 감지 및 해소 시스템에 관한 내용을 포함한 바 있다. 그러나 열차 경합 감지를 자동화했다는 데 주된 의의가 있으며, 열차 경합 시 시각표를 재수립을 위한 최적화 기반 시스템은 도입되지 않고 있다. 한편, 최근 김재희 등 [1]은 단선구간의 열차 경합 해소를 위한 수리계획 모형의 기본 형태를 제기한 바 있다. 그러나 이전 연구에서 제시된 모형은 KTX열차와 일반열차의 환승이 필요하지 않은 단선(single line)에 제구간을 대상으로 한 것으로, 경부선과 같이 고속열차와 일반열차가 서로 유기적인 수송체계를 갖는 경우에는 적용할 수 없는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 이전 연구의 모형을 토대로 복선(double line) 구간에서 KTX열차와 일반열차 간의 접속을 고려할 수 있는 수학적모형을 수립하고, 그 적용 가능성을 확인해 보고자 한다.

3. 복선 구간의 KTX접속 대기를 고려한 최적화 모형

열차 지연 발생 시 열차경합 해소를 위한 모형의 구성을 위해 기존의 김재희 등[1]의 모형을 토대로, KTX열차와 일반열차간의 환승을 고려할 수 있도록 모형을 설계하고, 지연 시간이 가장 큰 열차를 우선적으로 배려하기

위한 목적함수 식을 구성하였다. 본 논문에서는 기존에 제시된 모형에 대한 자세한 수식을 생략하고 본 연구에서 새롭게 추가된 부분을 중심으로 서술하고자 한다.

3.1 기호 정의

- $I = 1, 2, \dots, m, \dots$ (1, 2, ..., m)은 상행열차, 나머지는 하행열차
- I_1 : 여객열차 집합
- P : 트랙세그먼트 집합
- Q : 모든 역의 집합
- Q_i : 열차 i 가 정차하는 역의 집합
- Y_O^i : 열차 i 의 시발역에서 계획된 출발시간
- $Y_{a,q}^i$: 열차 i 의 역 q 에의 계획된 도착시간
- $Y_{d,q}^i$: 열차 i 의 역 q 에서 계획된 출발시간
- S_q^i : 열차 i 의 역 q 에서 계획된 정차시간
- u_p^i : 열차 i 의 구간 p 에서 평균속도의 허용하한
- v_p^i : 열차 i 의 구간 p 에서 평균속도의 허용상한
- $h_p^{i,j}$: 구간 p 에서 선행 열차 i 와 후행열차 j 간의 최소 여유시점
- d_p : 구간 p 의 구간 길이
- NS_q : 역 q 의 구내 선로 용량 (대피선 개수)
- ϵ : 1/big M보다 작은 양의 상수
- $A_{ijp}, C_{ijp}, D_{ijp} \in \{0,1\}$
- $X_{a,q}^i$: 열차 i 의 역 q 에의 도착시간
- $X_{d,q}^i$: 열차 i 의 역 q 에서 출발시간
- X_O^i : 열차 i 의 시발역 출발시간
- ET_q^i : 열차 i 의 역 q 에서 조작시간
- LT_q^i : 열차 i 의 역 q 에서 지연시간

3.2 목적함수

목적함수는 열차 지연시간과 조작시간의 총합을 최소화하는 부분과 지연된 열차 중 가장 큰 지연시간을 최소화하는 부분으로 나뉘볼 수 있다. 아래의 목적함수 식 (1)은 열차 지연시간의 총합과 조작시간의 총합에 해당하며, 여기서 사용된 상수 w_1 과 w_2 는 열차 i 의 지연도착 및 조기 도착에 따른 벌점이다. 이 식을 통해 조작보다는 지연에 더 큰 벌점을 부여하고 속도대가 빠른 열차에 대한 벌점을 크게 해서 상급 열차에 대한 서비스를 우선 고

려하였다. 참고로 w_{i1} 과 w_{i2} 를 정하는 과정에서는 지연 시간 최소화가 조차시간 최소화에 비해 선취적 (preemptive) 우선순위를 갖도록 하기 위해 $w_{i1} = 100w_{i2}$ 의 관계가 유지되도록 하였다.

$$Min z_1 = \sum_{i \in I, q \in Q} (w_{i1} \cdot LT_q^i + w_{i2} \cdot ET_q^i) \quad (1)$$

이때, I 는 모든 열차의 집합, Q_i 는 열차 i 의 정차역의 집합 다음의 모형 (2)는 각 정차역에서 발생한 도착 지연 중 가장 심각한 지연을 우선적으로 최소화하기 위한 것이다. 여기서 ρ 는 0에 가까운 양의 실수를 의미한다.

$$\begin{aligned} \min \quad & \alpha + \rho \cdot z_1 \\ \text{s.t.} \quad & \alpha \geq LT_q^i \quad \forall i \in I, q \in Q_i \\ & x \in S \end{aligned} \quad (2)$$

3.3 제약조건

■ 열차 간 경합 방지 및 시격 준수

복선구간에서 두 대의 상행열차, 또는 하행열차가 규정된 운행 시간 간격을 준수해야 한다. 이는 선행열차의 예기치 못한 정차 시 후행 열차와의 충돌을 막기 위한 제약이다.

$$\left. \begin{aligned} M \cdot A_{ijp} + X_{a,q}^i &\geq X_{a,q}^j + h_p^{i,j} \\ M \cdot A_{ijp} + X_{d,q+1}^i &\geq X_{d,q+1}^j + h_p^{i,j} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$\forall p \in P, i, j \leq m$

$$\left. \begin{aligned} M \cdot (1 - A_{ijp}) + X_{a,q}^i &\geq X_{a,q}^j + h_p^{i,j} \\ M \cdot (1 - A_{ijp}) + X_{d,q+1}^i &\geq X_{d,q+1}^j + h_p^{i,j} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$\forall p \in P, i, j \leq m$

$$\left. \begin{aligned} M \cdot C_{ijp} + X_{a,q+1}^i &\geq X_{a,q+1}^j + h_p^{i,j} \\ M \cdot C_{ijp} + X_{d,q}^i &\geq X_{d,q}^j + h_p^{i,j} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$\forall p \in P, i, j > m$

$$\left. \begin{aligned} M \cdot (1 - C_{ijp}) + X_{a,q+1}^i &\geq X_{a,q+1}^j + h_p^{i,j} \\ M \cdot (1 - C_{ijp}) + X_{d,q}^i &\geq X_{d,q}^j + h_p^{i,j} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$\forall p \in P, i, j > m$

■ 열차 속도 고려

다음은 역 사이의 평균 주행속도가 규정 이내에 있어야 함을 의미한다.

$$\frac{d_p}{v_p^i} \leq X_{a,q}^i - X_{d,q+1}^i \leq \frac{d_p}{v_p^i} \quad \forall p \in P, i \leq m \quad (7)$$

$$\frac{d_p}{v_p^i} \leq X_{a,q+1}^i - X_{d,q}^i \leq \frac{d_p}{v_p^i} \quad \forall p \in P, i > m \quad (8)$$

■ 열차의 계획된 출발/정차 시각 준수

식 (9)는 최초 시발역의 모든 열차가 출발예정시각 이후에 출발해야 함을 의미한다. 이때 여객 열차와 화물 열차는 출발시각에 대한 기준이 다소 다르게 적용될 수 있다. 즉, 여객 열차의 경우는 반드시 역의 출발예정시각 이후에 발차해야 하지만, 화물열차의 경우는 화물 적재가 완료되었을 경우 출발예정시각보다 일찍 출발시키는 것이 가능하다는 점을 고려한다. 또한 모든 열차는 계획된 정차시간을 준수해야 한다.

$$X_{i0}^i \geq Y_{i0}^i \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$X_{d,q}^i \geq Y_{d,q}^i \quad \forall i \in I_1, q \in Q \quad (10)$$

$$X_{d,q}^i \geq X_{a,q}^i + S_q^i \quad \forall i \in I, q \in Q \quad (11)$$

■ 열차 도착 지연 및 조차시간 계산을 위한 식

다음은 열차의 조차시간 값과 지연시간 값을 계산하기 위한 식이다.

$$X_{a,q}^i + ET_q^i - LT_q^i = Y_{a,q}^i \quad \forall i \in I, q \in Q \quad (12)$$

■ 대피용량을 고려하기 위한 식

다음은 다수의 열차가 특정 역에서 동시에 정차할 경우 역내 선로 개수를 초과하지 않도록 하는 식이다.

$$\left. \begin{aligned} D_{ijq}^+ &\geq (X_{a,q}^i - X_{a,q}^j) / M \\ D_{ijq}^+ &\leq (X_{a,q}^j - X_{a,q}^i) / M + 1 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} D_{ijq}^- &\geq (X_{d,q}^j - X_{d,q}^i) / M \\ D_{ijq}^- &\leq (X_{d,q}^i - X_{d,q}^j) / M + 1 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} D_{ijq} &\geq (D_{ijq}^+ + D_{ijq}^-) / 2 - (\frac{1}{2} + \varepsilon) \\ D_{ijq} &\leq (D_{ijq}^+ + D_{ijq}^-) / 2 + (\frac{1}{2} - \varepsilon) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\sum_{j \in T_i} D_{ijq} \leq NS_q - 1 \quad \forall i \in I, q \in Q \quad (16)$$

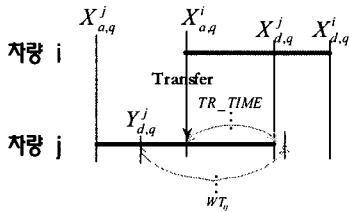
■ 열차 환승을 고려하기 위한 식

여객 접속 대기는 여객 환승을 고려한 것으로, 그림 2에서 보는 바와 같이 역에 먼저 도착한 열차 j 가 이후에 도착하는 열차 i 로부터의 환승을 위해 대기하는 것을 의미한다. 이 내용은 표 2와 같은 한국철도공사 열차운전

시행절차에 근거한 것이다. 일례로 선행한 무궁화호 열차는 지연된 KTX열차와의 환승을 위해 약 15분 까지 대기할 수 있는 것이다. 다음의 식 (17), (18)은 열차접속 대기 관련 현실 제약을 수학적식으로 표현한 것이다.

[표 2] 열차 접속 대기의 규정 [10]

| | | | |
|--------------|-------|-----|-----|
| 대기(j)\지연 (i) | KTX열차 | 새마을 | 무궁화 |
| KTX열차 | 5분 | 0분 | 0분 |
| 새마을 | 10분 | 10분 | 5분 |
| 무궁화 | 15분 | 15분 | 10분 |



[그림 2] 역 q 구내에서 여객접속 상황의 예

$$E_{ijq} \geq (Y_{d,q}^j - X_{a,q}^i + WT_{ij}) / M + \epsilon \quad (17)$$

$$X_{d,q}^j \geq X_{a,q}^i - M \cdot (1 - E_{ijq}) + TR \quad (18)$$

식 (17)에서 열차 j 의 도착시간에 연계수송을 위한 의무 대기시간을 더한 값이 열차 i 의 도착시간 보다 클 경우, 즉 $(Y_{d,q}^j + WT_{ij}) \geq X_{a,q}^i$ 이면 우변 값이 0보다 크고, 그 때에 한 해 $E_{ijq} = 1$ 이 된다. 그리고 이 경우에 식 (18)의 작용에 의해 열차 j 의 출발시간은 열차 i 의 도착시간에서 환승을 위해 이동하는 데 필요한 시간을 더한 값, $X_{a,q}^i + TR_TIME$ 보다 크게 되어 여객환승을 가능하게 해 준다.

[표 3] 여객접속 대기를 고려해서 재수립된 열차시각표 (동대구역 중심)

| 열차번호 | 도착시각 | | | 출발시각 | | |
|-------------|----------|----------|-------|----------|----------|-----------|
| | 당초시각표 | 모형수행결과 | 지연여부 | 당초시각표 | 모형수행결과 | 지연여부 |
| 1209 (무궁화호) | 18:29:00 | 18:29:00 | 정상운영 | 18:33:00 | 18:49:00 | 16분지연 |
| 23 (KTX열차) | 18:30:00 | 18:46:00 | 16분지연 | 18:32:00 | 18:47:30 | 15분30초 지연 |

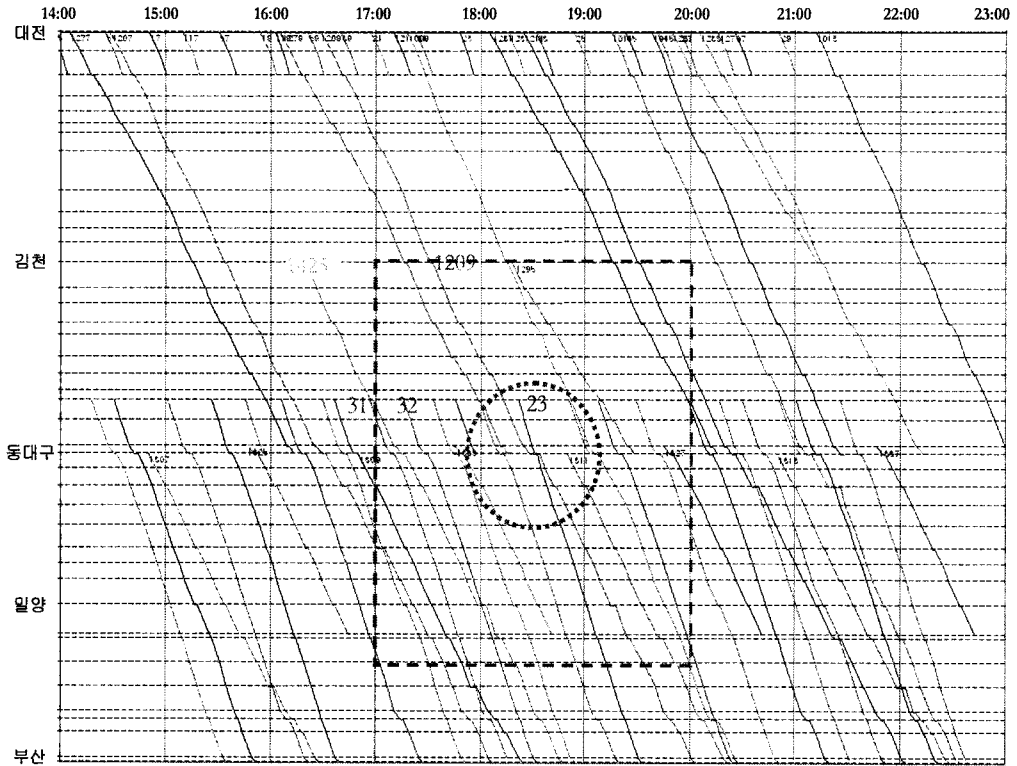
[표 4] 여객접속 대기를 포기해서 재수립된 열차시각표 (동대구역 중심)

| 열차번호 | 도착시각 | | | 출발시각 | | |
|-------------|----------|----------|-------|----------|----------|-----------|
| | 당초시각표 | 모형수행결과 | 지연여부 | 당초시각표 | 모형수행결과 | 지연여부 |
| 1209 (무궁화호) | 18:29:00 | 18:29:00 | 정상운영 | 18:33:00 | 18:33:00 | 정상운영 |
| 23 (KTX열차) | 18:30:00 | 18:49:00 | 19분지연 | 18:32:00 | 18:50:30 | 18분30초 지연 |

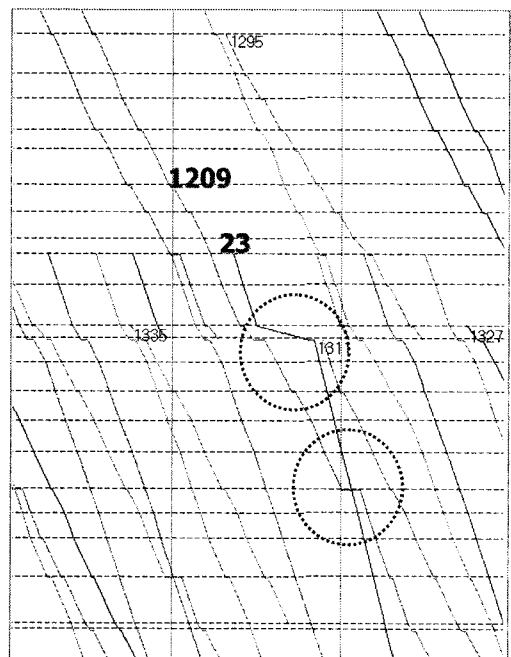
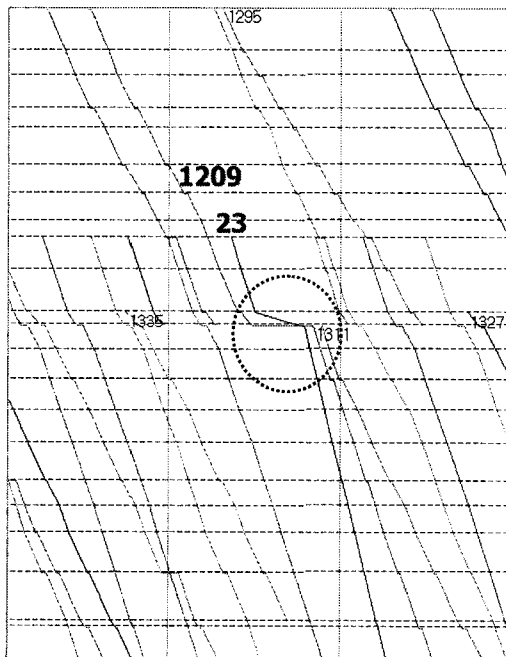
4. 모형검증 결과

앞서 수립된 모형을 경부선 대전-부산 간 하행구간에 적용해 보았다. 효율적인 모델링을 위해 ILOG OPL (Optimization Programming Language) Studio 5.5를 사용하였으며, 여기에 내장된 CPLEX 엔진을 통해 최적해를 도출하였다. 그림 3은 열차지연이 없는 정상 상태의 열차 운행 시각표 다이어그램(diagram)이다. 이 그림에서 세로 축의 점선은 역(station)을 의미하고, 가로축은 시간의 흐름, 그리고 대각선 방향의 실선은 하행열차의 진행 궤적에 해당된다. 또한 대전역부터 연속적으로 이어지지 않고 중간에 없어졌다가 다시 나타난 실선은 고속철도 구간을 운행하던 KTX열차가 기존선 구간에 합류한 상황을 의미한다. 그림 4.a와 그림 4.b는 특정 열차에서 심각한 지연이 발생할 경우에 열차 경합을 해소한 결과로서, 각각 여객 접속대기를 수행한 경우와 접속대기를 포기한 경우의 예를 보여준다.

먼저 그림 4.a는 23호 KTX열차가 '대구'~'동대구'역 구간의 이상 상황으로 인해 동대구역에 16분 지연 도착하는 상황을 상정한 후, 본 연구의 최적화 모형으로 시각표를 재수립한 결과이다. 그리고 표 3은 동대구역을 중심으로 자세한 출·도착 시각 자료를 정리한 것이다. 표에서 KTX열차의 동대구역 도착시각(18:46:00)은 선행열차인 1209번 무궁화호의 동대구역 출발예정시각(18:33:00)보다 13분이 늦을 것으로 분석되는데, 이 상황에서는 1209호 무궁화호가 KTX열차와의 연계를 위한 의무 대기시간 (최대 15분)을 기다릴 경우 환승이 가능한 상황이 된다. 따라서 먼저 도착한 무궁화호열차는 당초의 계획된 정차시간 이상을 대기했다가 KTX열차가 도착하면 승객을 환승 받는다. 이후 KTX열차는 최소 정차시간(1분 30초)을 머문 후 출발하며, 무궁화호 열차는 먼저 보낸 KTX열차와의 최소시격(안전을 고려한 열차 간 간격: 1분 30초)을 고려해서 18:49:00에 출발하게 된다.



[그림 3] 정상 상태의 열차 시각표 (운행계획)



[그림 4] a) 접속대기 고려한 열차경합해소 결과

b) 접속대기 고려 없는 열차 시각표

그림 4.b는 23호 KTX열차의 지연시간이 19분인 상황을 상정한 경우의 열차 시각표 재수립 결과이다. 이 경우 KTX열차의 도착시간(18:49:00)은 1209호 무궁화호 열차의 동대구역 출발예정시간(18:33:00)보다 16분이 늦어서 무궁화호 입장에서 KTX열차와의 접속을 위한 최대 의무 대기 시간 15분을 지켜도 소용이 없게 된다. 따라서 선행한 무궁화호 열차는 KTX열차를 위해 기다릴 필요가 없으며 열차접속을 포기하고 예정시간에 동대구역을 출발하게 된다. 따라서 당초의 시각표와 달리 1209호 무궁화호 열차가 23호 KTX열차를 선행하며, 이 순서는 이후 4개 역을 지나는 동안 유지된다. 그러나 속도대가 높은 KTX 열차가 저속 주행 중인 무궁화호를 뒤따를 경우 종착지인 '부산'역에서 KTX열차의 심각한 지연이 예상된다. 최적화 모형에서는 이러한 상황을 종합적으로 고려해서 재수립된 열차 시각표를 도출할 수 있다. 즉, 그림 4.b의 새로운 시각표에 따르면 KTX열차는 가속운행을 통해 무궁화호 열차와의 간격을 좁히고, 동대구역 이후 5번째 역인 '신기'역에서 1209호 무궁화호 열차가 대기선(siding)에 대피해 있는 동안 무궁화호를 추월한다.

이상의 결과들은 열차 접속대기의 실무 규정을 고려하면서 열차 시각표를 성공적으로 재수립한 예를 보여준다. 따라서 본 연구에서 제시된 최적화 모형이 KTX열차와 일반열차 간의 접속대기가 필요한 경부선 구간의 열차 시각표 재수립에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 KTX열차와 일반열차의 접속대기를 고려해서 열차 시각표를 재수립할 수 있는 최적화 모형을 제시하였다. 이 모형은 열차 환승을 위한 접속 대기를 고려할 수 있는 논리 제약이 반영된 혼합정수계획(Mixed Integer Programming)모형으로서, 열차 지연시간의 합을 최소화할 수 있도록 설계되었다. 이 모형을 경부선 대전~부산 간 하행선 예제에 적용한 결과 한국철도공사의 열차 접속대기 규정을 정상적으로 준수하면서 열차 혼선을 방지할 수 있는 열차 시각표를 재수립 할 수 있었다. 대개 경부선 여객 열차의 지연시간은 본 연구에서 시험 적용한 16분이나 19분 보다는 작은 경우가 주를 이룬다. 그리고 3~5분 내외 수준에서 열차 지연이 발생하는 실제 상황에서는 앞서 분석된 경우와 같은 심각한 시각표 교란이 발생하지 않을 개연성이 크다. 그러나 심각한 지연 사고의 빈도가 높지 않다고 하더라도 탑승률이 상당히 높은 한국철도의 특성 상 그 피해 승객의 수가 대규모가 될 수 있으므로 본 연구에서 제시된 형태의 모형이 실무

에 적용될 필요가 있다고 판단된다. 한편, 본 연구에서는 열차의 지연시간만을 고려해서 최적화를 수행했지만, 추후 연구를 통해 열차 운행비용까지 동시에 고려할 경우 모형의 실용성이 높아질 것으로 기대된다.

참고문헌

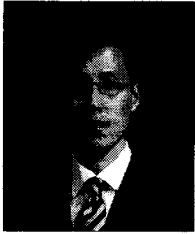
- [1] 김재희, 오석문, 홍순흠, “단선구간 열차경합해소 문제를 위한 수리계획 모형의 기본설계”, 한국철도학회 논문집, 제8권, 제4호, pp. 314-320, 2005.
- [2] 한국교통연구원, “지역간 통행의 효율성 제고를 위한 고속철도 이용증대방안 연구”, 2005.
- [3] 한국철도공사, “열차운전 시행절차”, 2005.
- [4] Adenso-Diaz, B., Gonzalez, M. O. and Gonzalez-Torre, P., On-line timetable re-scheduling in regional train services, *Transportation Research: Part B: Methodological*, Vol. 33, pp. 387-398, 1999.
- [5] Andersson, A. W., Frej, I., Gideon, A., Hellström, P. and Sandblad, B., A system analysis approach to modelling train traffic control, *Proceeding of WCRR 1997*, pp. 673~679, 1997.
- [6] Berge-Brezetz, S., Benoliel, S., Bain, G. and Menapace, G., Computer aided methods for railway operation conflict solving, *Computers in Railways VI*, pp. 563~572, 1998.
- [7] Ghoseiri, K., Szidarovszky, F. and Asgharpour, M. J., A multi-objective train scheduling model and solution, *Transportation Research: Part B: Methodological*, Vol. 38, pp. 927-952, 2004.
- [8] Higgins, A., Kozan, E., and Ferreira, L., Optimal scheduling of trains on a single line track, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 30, No. 2, pp. 147-161, 1996.
- [9] Komaya, K., An integrated framework of simulation and scheduling in railway systems, *Computers in Railways III*, Vol. 1, pp. 611-622, 1992.
- [10] Kraay, D. R., Harker, P. T. and Chen, B., Optimal pacing of trains in freight railroads: model formulation and solution, *Operations Research*, Vol. 39, No. 1, pp. 82-99, 1991.
- [11] Schaefer H. and Pferdmenges, S., An expert system for real-time train dispatching, *Computers in Railways IV*, Vol. 2, pp. 27-34, 1994.
- [12] Stolk, A., Automatic conflict detection and advanced decision support for optimal usage of railway infrastructure : purpose and concept, *Computers in*

Railways VI, pp. 629~638, 1998.

- [13] Szpigel, B., Optimal train scheduling on a single track railway, Operations Research '72, ROSS, M. (eds.), pp. 343-352, 1973.

김 재 희(Jaehye Kim)

[정회원]



- 1996년 2월 : 고려대학교 산업공학과 (공학사)
- 1998년 2월 : 고려대학교 산업공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 고려대학교 산업공학과 (공학박사)
- 2004년 3월 ~ 2005년 3월 : 한국철도기술연구원 철도정책물류연구본부 선임연구원
- 2005년 3월 ~ 2008년 8월 : 군산대학교 경영회계학부 전임강사-조교수
- 2008년 9월 ~ 현재 : 전북대학교 경영학부 조교수

<관심분야>

다기준의사결정, 교통/수자원시스템 분석, 생산관리

오 석 문(Oh Seog Moon)

[정회원]



- 1994년 2월 : 전북대학교 재료공학과 (공학사)
- 1996년 2월 : 전북대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 고려대학교 산업공학과 (박사수료)
- 1995년 12월 ~ 현재: 한국철도기술연구원 철도교통물류연구실 선임연구원

<관심분야>

수리계획, 교통과학, 철도계획