

열차운용 스케줄링 최적화를 위한 대화식 시뮬레이션 프로그램 개발

황중규*, 오석문, 김영훈, 이종우, 현승호, 김용규
 한국철도기술연구원 고속철도기술개발 사업단

Interactive Simulation Program for Optimization of Train Linking Scheduling

Jong-Gyu Hwang*, Seog-moon Oh, Young-Hoon Kim, Jong-Woo Lee, Seung-Ho Hyun, Yong-Gyu Kim
 Korea Railroad Research Institute(KRRI)

Abstract - Hitherto, train schedules are made by several human experts and the scheduling is very long and tedious job. Moreover those results are not accepted as the optimal solution. The purpose of this research is the finding of optimal methodology and useful constraints for locomotive scheduling. For these purposes, the interactive simulation program for train linking schedule is developed. Some constraints and technique for train linking scheduling is able to be edited or modified by various interactive windows. The constraints, rules and methodology for scheduling can be analyzed and also obtained useful schedule results by using this program.

1. 서 론

현재 열차계획 시스템은 대부분이 수년간의 경험과 노하우를 가진 전문가에 의해 작업되어져 왔다. 이로 인해 열차계획을 위해서는 장시간의 지루한 수작업을 필요로 하고 있고, 전문가들의 판단에 절대적으로 의존할 수밖에 없다. 이런 수작업에 의하던 스케줄링을 시스템화함에 있어서 제일 중요한 것은 전문가들의 지식을 유추해 내는데 있다. 이들의 지식을 얼마나 잘 모델링하여 프로그램에 반영하느냐에 따라 스케줄링 시스템의 성능이 좌우된다(1)-(5).

이러한 열차 스케줄을 좀더 효율적으로 작성하고자 하는 스케줄링 문제는 최적화 문제가 된다. 즉, 전문가들로부터 유추한 지식으로부터 목적함수와 제약조건을 모델링하고 이를 통해 최적의 해를 찾는 문제로 귀결된다. 이러한 스케줄링 최적화를 위해서 본 연구에서는 열차운용 스케줄링과 이의 최적화에 대한 문제정의의 하였다. 또한 효과적인 스케줄링 방법과 제약조건들을 찾고자 열차운용 시뮬레이션 프로그램을 개발하였으며 실제 경부선 새마을호 열차계획을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다(5).

2. 열차운용 스케줄링

2.1 열차운용 스케줄링

열차운용 스케줄링은 수송수요를 비롯한 많은 제약조건들로부터 결정되어진 열차시차표를 바탕으로 설정된 열차들을 몇 개의 다이어로 묶어 동일한 동력차가 운행할 수 있는 운용다이어를 작성하는 과정을 말한다(2)(5). 그림1은 열차 다이어를 나타낸 것으로서 가로축은 시간축으로 왼쪽에서 오른쪽으로 시간이 증가됨을 나타내고, 세로축은 정차역을 거리별로 나타낸 것이다. 즉, 이 그래프의 기울기가 크면 클수록 열차의 속도는 느린 열차를 나타낸다.

그림에서 보듯이 #1, #2, #3 등의 열차는 A역에서 C역으로 운행하고, #5, #6, #7 등의 열차는 C역에서 A

역으로 운행하도록 설정되어 있다. 여기에서 예를 들어 임의의 동력차가 #1번 열차를 따라 A역을 출발하여 C역에 도착한 후 일정시간이 지난 후에 다시 운행을 위하여 그림에서와 같이 #5번의 열차로 운행하여 다시 맨 처음 출발역인 A역으로 되돌아오도록 설정된 열차들 하나의 묶음으로 연결시키는데 이를 열차운용 다이어라 한다.

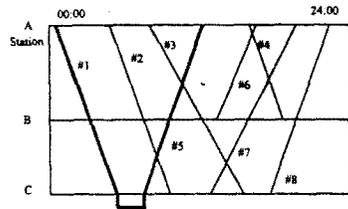


그림1. 열차운용 스케줄링

이러한 과정들을 반복하여 계획되어진 모든 열차들을 운용 스케줄링하게 된다. 이러한 열차운용 스케줄을 바탕으로 이 다이어에 실제 동력차들을 검수주기나 동력차 예비율 등을 고려하여 할당하게 된다. 즉 이 열차운용 스케줄은 차량의 할당 스케줄링 할 때에 절대적인 제약조건으로 작용하게 된다.

2.2 최적화를 위한 문제정의

열차운용 스케줄링시 임의의 열차를 어떤 열차와 연결시켜 하나의 운용다이어로 만든다에 따라 전체 열차운용의 성능이 달라진다. 여기에서 즉 어떤 방법으로 어떻게 연결하느냐 하는 문제가 발생하게 된다.

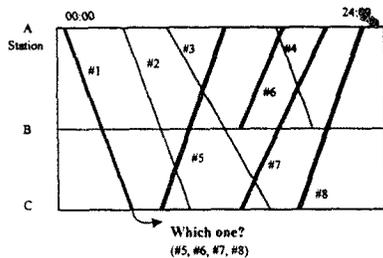


그림2. 열차운용 최적화

예를 들어서 #1번의 열차가 A역에서 출발하여 C역에 도착한 후 일정시간이 지난 후에 연결 가능한 #5, #6, #7, #8번 등의 열차들 중에서 어느 하나의 열차를 따라 운행하도록 운용다이어가 작성되어질 것이다. 만약 #6번 열차와 연결되게 되면 C역에서 B역까지 영업운전 없이 회송운전(Lighting Running)을 한 후 연결될 것이다.

하나 하나의 열차들 사이를 연결시에 최적이 되었다 하더라도 반드시 하루 운용다이어그램 전체로 보았을 경우 반드시 최적의 운용 스케줄이 아닐 수 있다. 이처럼 열차운용 스케줄링 최적화는 매우 복잡한 과정을 통하여 최종해가 얻어지게 된다. 즉, 각각의 열차들 사이의 연결을 결정하는 지역적인 최적화(Local Optimization) 문제에서 궁극적으로는 하루 전체 운용 다이어그램을 최적으로 스케줄링하는 전역 최적화(Global Optimization) 문제를 고려하여야 한다.

2. 열차운용 스케줄링 최적화 (2)(5)

열차운용 스케줄링 최적화 문제를 해결하기 위해서 우선적으로 고려되어야 할 것은 먼저 최적화를 위한 목적함수를 정의하는 것이다. 이 목적함수를 열차운용상 낭비되는 비용을 최소화 하는 관점에서 모델링 하였다.

즉, 열차운용 최적화 문제는 열차운용상의 비용이 최소로 되는 열차들의 묶음을 찾는 문제로 정리하였다. 이런 열차운용상의 낭비되는 비용은 크게 다음 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째로 임의의 열차가 종착역에 도착하여 정비를 마친 후 일정시간 대기하고 있다가 운행되는데 이 대기시간은 비효율적으로 낭비되는 시간이 될 것이다. 다음은 만약 임의의 열차가 하나의 역에서 운행을 마치고 나서 다음의 운행을 위해서 다른 역으로 회송 운전하여 새로운 영업운행을 하도록 열차운용 스케줄이 작성되면 이런 운전도 낭비의 요소가 된다. 이러한 점들을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$COST_{ij} = A_i \cdot LT_{ij} + B_j \cdot WT_{ij} \quad (1)$$

$COST_{ij}$: 열차 i 열차 j 를 연결시키는 데 낭비되는 운용비용

A_i, B_j : 각종 운용비용을 고려하여 정한 임의의 계수

LT_{ij} : 열차 i 도착역과 열차 j 출발역 사이의 회송운전 시간(분)

WT_{ij} : 열차 i 도착시간과 열차 j 출발시간 사이의 대기시간으로 회송시간 (LT_{ij})을 제외한 시간(분)

여기서 계수 A_i, B_j 는 승무원 운임, 전력 사용비, 감가상각비 등을 고려하여 정해지게 되며, 철도청의 경우 몇몇 문헌들을 통해서 $A_i, B_j = 4 : 1$ 로 제안되고 있다.

하나의 열차운용 다이어그램을 찾는 경우는 식(1)에 의해 최소값을 갖는 열차의 묶음을 찾으면 되지만 하루 전체의 열차운용스케줄의 비용을 최소화 하기 위해서는 식(2)과 같이 각 다이어그램의 운용비용 ($COST_{ij}$) 합을 최소화 하는 함수를 목적함수로 정하여서 이를 최소화 하는 하루의 운용 다이어그램을 찾는 문제로 모델링 될 수 있다.

$$\text{Min} \parallel \sum_{i,j} (A_i \cdot LT_{ij} + B_j \cdot WT_{ij}) \parallel \quad (2)$$

이처럼 하루 전체의 운용다이어그램에 대한 비용을 최소화 하는 운용 다이어그램을 찾기 위해서는 열차수가 n 일 경우 $n! \times n!$ 이 되며, 물론 이 많은 경우의 수 중에서 상당부분 중복되지만 이러한 방대한 경우의 수 중에서 운용비용을 최소화 하는 하나의 열차운용 다이어그램을 찾아야 한다. 이는 상당히 많은 처리시간을 필요로 한다.

앞에서 제시한 비용함수에서 계수들은 이들에 영향을 미치는 인자들이 조금만 바뀌어도 달라 질 수 있으므로 어느 특정한 하나의 값으로 정의하기가 매우 어렵기 때문이다. 이는 지금까지 대부분 소수의 전문가들에 의존하여 왔는데 이들의 지식들이 정량적으로 정리되어있지 않은 면도 있고 또 다른 이유로는 실제 철도의 문제가 다른 유사한 스케줄링 문제보다 훨씬 복잡하여 정량적으로 분석하기 어려운 이유 때문이기도 할 것이다.

즉, 모델링된 목적함수의 값이 최소로 되는 해가 가장 효율적인 해인지를 판단하기가 매우 어렵다. 목적함수의 값이 반드시 최소값이 아니더라도 근사 최적해를 찾을

수 있는 효율적인 방법을 사용하는 것이 더 현실적이라 할 수 있다. 따라서 대안으로 MMI를 적절히 활용하여 순간순간 사용자의 의견을 반영하여 좀더 효율적이고 최적의 스케줄이 되도록 하는 Interactive한 프로그램이 현실적인 방법 중의 하나라 할 수 있다.

이에 따라서 제약조건이나 스케줄링 알고리즘 등을 MMI를 활용하여 입력하거나 변경시켜가면서 효과적으로 열차운용 스케줄링을 시뮬레이션 할 수 있도록 프로그램을 개발하였다.

3. 대화식 시뮬레이션 프로그램 개발

열차운용 스케줄링 시뮬레이션 프로그램은 MMI를 적절히 활용하여 열차운용 스케줄링에 필요한 제약조건을 입력 및 수정하도록 하였으며 또한 스케줄링 결과들을 비교분석할 수 있도록 몇가지 탐색 알고리즘을 사용하였다. 또한 제약조건을 무시하고 수동으로 스케줄링이 가능하도록 하였으며 스케줄링 결과분석을 통하여 재 스케줄링이 가능하도록 하였다. 이러한 대화식 시뮬레이션 프로그램의 기본 방향은 다음과 같이 하였다.

- 데이터 입력모드를 통해 열차 시각표를 입력하도록 하고 입력된 열차 시각표도 수정 및 편집이 가능하도록 한다.
- 열차 시각표 입력시 출발역과 도착역 및 시각에 대한 정보뿐만 아니라 8량 또는 16량 편성 등의 열차편성 정보도 입력되도록 한다.
- 스케줄링시 필요한 운용시 최소대기시간, 목적함수 계수 등 각종 제약조건들은 기본적으로 가지고 있고 MMI를 통하여 수정이 가능하도록 한다.
- 회송운전은 기본적으로 가능하도록 하고 각 O-D별 또는 모든 O-D별 회송운전을 금지시킬 수 있도록 한다.
- 16량 편성의 열차를 8량으로 분할 운전하는 경우를 기본적으로는 금지시키고, MMI를 사용하여 분할운전 허용유무를 판단할 수 있도록 하여야 한다.
- 최적해를 탐색하는 알고리즘을 몇 가지 중 비교 선택할 수 있도록 하여 결과를 비교할 수 있도록 한다.
- 열차운용 스케줄을 알고리즘에 의해 자동으로 하거나 수동으로 스케줄링 할 수 있도록 한다.
- 수동으로 스케줄링시 연결가능 열차들의 정보와 비용 등의 판단할 수 있는 정보들을 제공한다.
- 경우에 따라서는 모든 제약조건을 무시하고 강제로 스케줄링 할 수 있도록 한다.
- 스케줄링 결과 창에는 비교 및 분석할 수 있도록 개별 운용 다이어그램 비용, 대기시간, 회송운전여부, 회송운전시간, 목적함수 값, 탐색시간 등의 정보를 상세히 제공한다.
- 스케줄링 후 임의의 몇몇 열차의 연결을 해제시키고 재 스케줄링이 가능하도록 한다.
- 스케줄링 출력을 텍스트와 열차운용 다이어그램 두 가지로 출력 하고 운용다이어그램에서 하나의 다이어그램에 연결되는 열차는 같은 색으로 처리하여 시각적으로 구별 가능하도록 한다.

개발된 프로그램으로 서울-부산간 O-D의 경부선 새마을호를 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 기본적인 제약조건은 다음과 같이 하였으며 이들 조건들은 모두 MMI를 통해 수정 가능하도록 하였다.

- 서울역 출발 가능 열차수 : 19편성
 - 부산역 출발 가능 열차수 : 8편성
 - 비용함수 계수 A_i, B_j 는 4 : 1
 - 회송운전 : 전구간 가능
 - 운용을 위한 최소 대기시간 : 3시간
- 이 프로그램은 크게 열차시각표 입력 창, 제약조건 입력 창, 스케줄링 창, 출력 및 재스케줄링 창으로 구성되도록 하였다. 이 중에서 스케줄링 부분은 현재는 Case I, I', Case II, II', Case III, III'로 구성되어 있다.

나 향후 좀더 최적화된 기법을 추가적으로 적용해 시물레이션 해 볼 수 있도록 하였다.

데이터 입력창을 통해 입력된 열차시각표는 그림3과 같은 열차 다이어 형태로 출력될 수 있고, 이 열차의 선을 클릭 하면 그림과 같이 열차에 대한 상세정보가 출력될 수 있도록 하였고 이 창으로부터 입력데이터의 수정이 가능하도록 하였다. 스케줄링 되고 난 후에는 운용다이하별로 선의 색을 달리하여 시각적인 구분이 가능하도록 하였다.

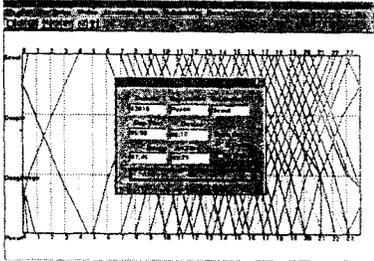


그림3 열차 다이어 출력 창

계약조건 입력 창은 스케줄링을 위해 필요한 각종 제약조건들을 입력하거나 변경시킬 수 있도록 하는 윈도우로서, 사용자가 이를 변경할 수 있도록 하였다. 여기에서 회송운행 여부나 차량편성 분할 허용 여부도 변경할 수 있도록 하였으며, 회송운전은 각 O-D별로도 회송가능여부를 선택할 수 있다.

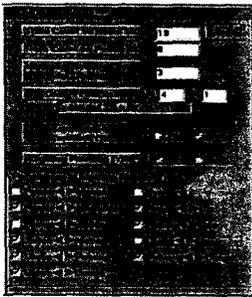


그림4 제약조건 입력 창

스케줄링 모드에는 자동 스케줄링과 수동 스케줄링 모드로 나뉘어 진다. 수동 스케줄링 모드는 주어진 제약조건을 만족하는 범위 내에서 그림5와 같은 윈도우를 통해서 임의로 운용 스케줄링을 하는 'Step by Step' 모드와 제약조건을 무시하고 강제적으로 열차운용을 할 수 있도록 하는 'Manual Scheduling' 모드로 구분된다.

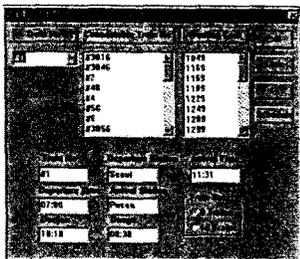


그림5 'Step by Step' 스케줄링 창

'Manual Scheduling' 모드에서는 제약조건들을 무시하고 임의로 열차운용 스케줄링을 작성할 수 있는 모드로서, 몇 개의 열차운용을 수동으로 설정하고 나머지 열

차들은 자동 모드로 전환시켜 입력된 제약조건 범위 내에서 선택된 알고리즘으로 스케줄링 할 수 있도록 하였다. 자동스케줄링 모드에서는 현재 몇 개의 탐색 알고리즘이 프로그램되어 있으며 향후 좀더 효율적인 탐색 알고리즘을 시물레이션 할 수 있도록 추가하고자 한다.

스케줄링 후 운용 다이어 번호, 열차정보, 운용비용, 회송여부, 전체 운용비용, 스케줄링 시 수행시간 등을 출력시켜 스케줄링 결과를 분석할 수 있도록 하였다. 또한 스케줄링 결과를 분석 후 몇몇 운용들의 연결을 해제시키고 다시 스케줄링 하고자 할 경우 재스케줄링 모드로 넘어가 열차운용의 일부를 해제하고 제약조건을 변경하거나 임의로 새로운 열차운용이 되도록 스케줄링 할 수 있게 하였다.

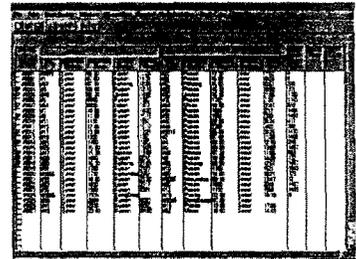


그림6 재스케줄링 창

개발한 프로그램은 효율적인 열차운용 해를 찾기 위한 시물레이션 프로그램으로서, MMI를 최대한 활용하여 제약조건들도 충분히 검증할 수 있도록 하고자 하였고 스케줄링도 자동모드와 수동모드를 두어 여러 각도에서 스케줄링 해 볼 수 있도록 하였고 수동과 자동모드의 혼용도 가능하도록 하였다. 자동으로 스케줄링 하는 모드의 경우 현재 몇 개의 알고리즘이 프로그램 되어 있으나 향후 지속적인 연구를 통해 좀더 최적의 스케줄링이 탐색 알고리즘을 추가하고 보완하여 나가하고자 한다.

4. 결 론

본 논문에서 제시한 대화식 열차운용 시물레이션 프로그램은 각종 제약조건들이나 스케줄링 방법들을 MMI를 사용하여 선택하거나 변경할 수 있도록 하여 이들이 스케줄링에 미치는 영향을 분석할 수 있도록 하였다. 이 프로그램의 지속적인 보완을 통해 열차운용 스케줄링에 필요한 제약조건이나 규칙들 및 이들 인자들이 스케줄링 결과에 미치는 영향 등을 분석할 수 있고, 또한 효율적인 운용 스케줄링 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

(참 고 문 헌)

- [1] A. Radtke, J. Horstel and A. Schumacher, 'Optimised Rostering and Maintaining of High-speed Rail Systems', COMPRAIL'96, pp. 402-409, 1996.
- [2] Chunhwan Kim, 'Exact & Heuristic Solution of Locomotive Scheduling Problems', MS degree paper, 1993.
- [3] K. Murphy, etc., 'The Scheduling of Rail at Union Pacific Railroad', Ninth Conference on Innovative Application of Artificial Intelligence (IAAI'97), pp. 903-912, 1997.
- [4] A. E. Croker and V. Dhar, 'A Knowledge Representation for Constraint Satisfaction Problems', IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering, Vol. 5, No. 5, pp. 740-752, Oct. 1993.
- [5] J.G.Hwang, etc., 'A Study on Constraints and Methodology for Solving the Locomotive Scheduling Problems', ICEE'98, pp.747-750, 1998.