

에너지 절약형 열차시각표 작성에 관한 연구

A Study on Energy Efficient Timetabling Problem

김경민*
Kyung Min Kim

오석문*
Oh Seog-Moon

민재홍*
Jae Hong Min

ABSTRACT

This paper describes an Energy Efficient Timetabling Problem(EETP). In these days, the researches on development of an energy efficient railway systems are highlighted over the world. The departures occurred in an electrical power feeding circuit at the same time are necessary to be reduced as far as possible, to minimize the energy consumption. The paper addresses the operational requirements and facility restrictions to construct a mathematical model for EETP. In addition, it suggests several types of objectives for the model.

(국문요약)

최근 철도시스템에서의 에너지 효율을 증가시키고자하는 다양한 노력들이 국내외에서 일어나고 있으며 특히 대도시의 주요 대중교통수단인 도시철도는 시격이 짧고 출발-정차의 반복이 매우 빈번한 운전 특성을 가지고 있다. 따라서, 동일 전력공급계통 내에서 개별 열차들이 각 역에서 출발-정차를 반복할 때, 여러 대의 열차가 동일한 전력공급 계통에서 동시에 출발할 경우 상당히 큰 기동전류가 발생할 수 있고 이러한 과도적인 대규모 기동전류는 전기 에너지의 열 손실로 귀결되어 에너지 효율성을 저하하는 요소가 된다. 본 연구에서는 전력공급 계통 단위별로 열차의 균을 설정하고, 설정된 열차군 들을 중심으로 각 역에서의 출발·기동시간을 분산 관리하며 동시에 각종 운영 제약을 만족시키는 열차시각표 작성 수리모형에 대한 설계 방법을 제시한다. 이를 통하여 과도한 기동전류를 최소화 하고 열차운영체계의 운영 효율성을 확보하고자 한다.

1. 서론

최근 비용 효율성과 환경 경쟁력의 측면에서 에너지 효율을 증가시키고자하는 다양한 노력들이 모든 분야에서 일어나고 있으며 수송 효율(Kcal/인·키로)과 이산화탄소의 발생비율이 가장 낮아 환경적 영향이 가장 적은 운송 수단중의 하나인 철도분야 철도시스템에서도 꾸준히 이와 같은 노력이 국내외로 확산 되고 있는 실정이다. 특히, 장기적 관점에서의 철도차량의 경량화, 최첨단 견인장치, 에너지회수장치 등 철도 차량의 기술적 개선뿐만 아니라 이와 더불어서 에너지 효율적 운전 및 에너지 절약형 시각표 작성 등의 중·단기적 운영효율화를 통한 에너지 효율 증대 노력이 필요하다. 그리고 Trade-Off관계가 있는 에너지 효율과 승객수송능력 사이에서 승객수송을 최대로 해야 하는 첨두시간과는 달리 비첨두 시간에는 에너지 효율을 높여 운영비용을 감소시키는 것은 철도 운영자에게 중요한 문제이다.

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

특히 대도시의 주요 대중교통수단인 도시철도는 시격이 짧고 출발-정차의 반복이 매우 빈번한 운전특성을 가지고 있다. 따라서, 동일 전력공급계통 내에서 개별 열차들이 각 역에서 출발-정차를 반복할 때, 여러 대의 열차가 동일한 전력공급 계통에서 동시에 출발할 경우 상당히 큰 기동전류가 발생할 수 있고 이러한 과도적인 대규모 기동전류는 전기 에너지의 열 손실로 귀결되어 에너지 효율성을 저하하는 요소가 된다. 본 연구에서는 전력공급 계통 단위별로 열차의 군을 설정하고, 설정된 열차군 들을 중심으로 각 역에서의 출발·기동시간을 분산 관리하며 동시에 각종 운영 제약을 만족시키는 열차시간표 작성 수리모형에 대한 설계 방법을 제시한다. 이를 통하여 과도한 기동전류를 최소화 하고 열차운영체계의 운영 효율성을 확보하고자 한다.

2. 기존연구

일반적으로 수리모형을 통한 열차 시간표 작성(Train Timetabling Problem : TTP)에 대한 연구는 크게 시스템의 특성이 스케줄이 주기성을 가지는 경우(Cyclic timetabling)와 주기성이 없는 경우(Noncyclic timetabling)으로 구분되어진다. 주기성을 가지는 열차시간표 작성에 대한 대표적인 연구는 Serafini et. al.[3]의 연구이다. 그들은 Periodic Event Scheduling Problem(PESP)에 대한 수리모형을 처음으로 제시하였으며 그 후 Schrijver et. al.[4]은 PESP에 대한 제약만족 기법 알고리즘을 사용한 해법을 제시하였고 이를 네덜란드 시간표작성 프로그램인 DONS에 반영하였다. 비주기성 열차시간표 작성에 대한 연구는 주로 열차의 운행횟수 및 철도네트워크가 크고 선로용량의 제약이 있는 환경에서 적용되어 왔다. Szpigel et. al.[5]은 각 역에서의 열차출발순서를 이진변수가 아닌 Disjunctive 제약을 사용한 수리모형을 제시하였고 특정 문제에 대하여 분지한계법을 사용하여 해를 도출하였다. Alberto et. al.[1]는 다양한 열차 운행제약을 반영 가능한 Directed Multigraph 모형을 제시하였고 Integer linear programming 하였다. 또한, Lagrangian Relaxation 기법을 통한 해법을 제시하였다.

특히 본 연구에서 다루고자하는 에너지 효율적 시간표(Energy Efficient Timetabling Problem : EETP)는 계획되지 않는 경합에 의하여 발생하는 제동 및 에너지 소모를 최소화하는 시간표, 에너지 효율적 운전을 만족하는 시간표 등 다양하게 정의 되어 왔다. 지멘스와 베를린 기술대학교에서 개발된 지멘스 메트로마이저(Siemens Metromiser)[2]는 경전철, 교외선 및 지하철 시스템을 위한 운전 권고 시스템으로 시간표 최적화 모듈을 가지고 있다. 이 모듈은 시간표의 에너지 효율성을 점검하는 차량 기반의 소프트웨어 프로그램으로 차량의 특성, 지형 및 승객유동을 고려하여 기존의 운행 시간표에 맞춰 에너지 최적화된 새로운 시간표를 작성한다. 최근 유럽에서는 점차 증가하는 에너지 비용에 대처하기 위하여 UIC가 주축이 되어 27여개의 기관이 2006년부터 RAILENERGY 프로젝트를 진행 중에 있다. 이 프로젝트의 목표는 2020년까지 철도 전체 시스템에서의 에너지 소모를 6% 감소시키는 것이며 특히 이중 철도 운영부분에서 2%를 감소시키고자 에너지 효율적 운전 및 시간표작성을 연구 중이다.

3. 에너지 절약형 시간표

3.1 정의

본 연구에서는 에너지 절약형 열차 시간표에 대한 정의를 크게 출발시간 분산, 출도착시간 연계 두 가지로 구분하였다. 첫 번째 출발시간 분산은 동일한 역군에서 동일시간에 출발하는 열차의 수를 최소화하는 것이다. 그림 1과 같이 열차출발시의 기동손실이 $I^2R(I : 전류, R : 저항)$ 에 비례할 때, 역A에서 열차1이 출발하는 시간과 역B에서 열차2가 출발하는 시간이 같을 때의 총 에너지 손실은 제곱에 비례하여 증가하므로 일반적인 열차출발시의 손실의 4배가 되지만 출발시간이 분산되었을 때에는 산술 합에 비례하여 증가하므로 에너지 손실은 2배가 된다. 또한, 전기요금의 산정기준이 전력 사용량의 15분 평균값을 Block 단위로 나누어 이중 가장 큰 값으로 결정되므로 부하변동이 심하여 피크전력의 편차가 클

수속 기본요금이 과다하게 부과되는 결과가 초래되게 된다.(전용주 외[6])

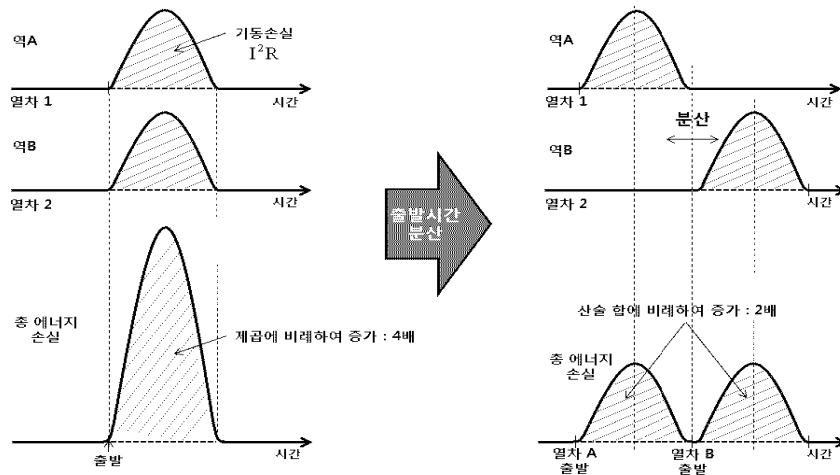


Fig. 1. Overview of the idea of EETP

이를 열차시간표에서 정의하면 그림2의 왼쪽과 같이 동일 역군 $Q \in \{q_0, \dots, q_6\}$ 에서, t_2, t_4, t_6 시점에서 출발이 집중되어있는 시각표에 비하여 모든 시점에서 열차출발이 골고루 분산되어있는 오른쪽 시각표가 에너지 효율적인 시간표이다.

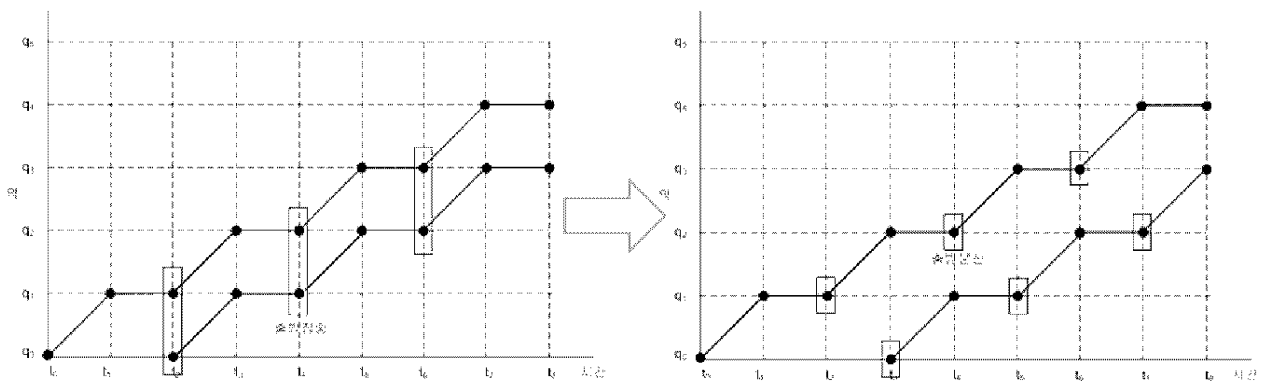


Fig. 2. Comparison of Departure between non-EET and EET

또한, 변전소로부터 급전선에 공급된 전력은, 역행하는 전기차의 주전동기에서 운동에너지로 변환된다. 열차가 감속 혹은 정지시, 주전동기를 발전기로 작동하게 함으로, 전기차의 운동에너지를 전기에너지로 변환하여 이를 변전소 혹은 다른 역행차에 전력을 공급하는 것을 ‘전력회생’이라 한다. 이와 같이 일단 차량에 공급한 에너지를 다시 회수할 수 있는 것은 전기철도의 큰 이점 중 하나이며 이를 효율적 열차시각표 작성에 적용하면 그림 3의 왼쪽과 같이 열차의 출발과 도착이 동일 역군에서 일치되지 않는 시간표에 비하여 특정 시점에서 열차의 출발과 도착이 일치되어있는 오른쪽 시각표가 에너지 효율적인 시간표라고 볼 수 있다.

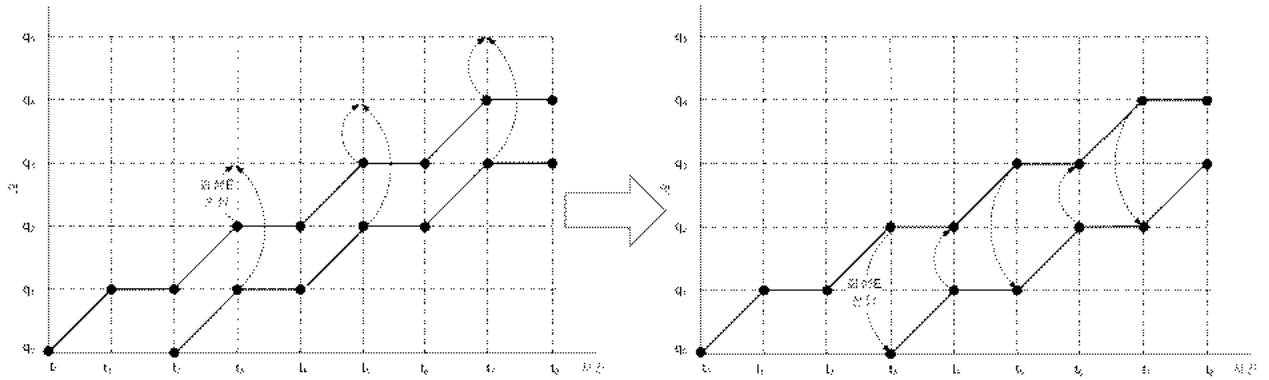


Fig. 3. Comparison of Departure & Arrival between non-EET and EET

3.2 동시출발 분석

30초목으로 작성된 수도권 지하철 한 노선의 운전시각표를 오전 6시부터 오후 9시까지 총 230여개의 열차 동시출발을 분석한 결과는 표1과 같다. 총수는 한 시간 동안 30초 간격으로 각 역에서 열차가 출발하는 총수를 의미하며 최소값, 최대값, 평균값은 특정시간(예를 들어, 7:05:00)에 동시 출발하는 열차의 최소, 최대, 평균수를 의미한다. 첨두시간(7h~9h, 18h~20h)에는 운행열차의 수가 많으므로 동시출발하는 열차의 최대 및 평균값이 12/5.27회로 비 첨두시간의 7.9/3.98회에 비하여 큼을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 비 첨두시간의 동시출발 열차의 수를 시각표 조정을 통하여 현재 보다 낮게 만드는 것을 주요목적 중 하나로 한다.

Table. 1. Result of Simultaneous Departure on Subway

| | 6h ~ 7h | 7h ~ 8h | 8h ~ 9h | 9h ~ 10h | 10h ~ 11h | 11h ~ 12h | 12h ~ 13h | 13h ~ 14h | 14h ~ 15h | 15h ~ 16h | 16h ~ 17h | 17h ~ 18h | 18h ~ 19h | 19h ~ 20h | 20h ~ 21h |
|-----|------------|------------|------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 총수 | 424 | 631 | 706 | 621 | 537 | 433 | 423 | 417 | 417 | 423 | 447 | 523 | 592 | 601 | 597 |
| Min | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 |
| Max | 7 | 12 | 12 | 10 | 8 | 8 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 9 | 11 | 11 | 10 |
| Avg | 3.53 | 5.26 | 5.88 | 5 | 4.48 | 3.61 | 3.53 | 3.48 | 3.48 | 3.53 | 3.69 | 4.36 | 4.93 | 5.01 | 4.98 |

4. 에너지 절약형 시간표 작성을 위한 네트워크 모형

4.1 네트워크 구성

본 연구에서는 수리모형 기반의 에너지 절약형 시간표 작성을 위하여 네트워크 모형을 제시한다. 에너지 절약시간표 그래프 $G=(V,E)$ 란 시간에 따라 각 역을 운행하는 열차를 그래프로 표현한 것인데, V 는 시간×역×열차 세 가지 요소로 구성되어있으며 시간은 15초목, 30초목 등 시간표 특징에 따라 이산(discrete)값을 가지게 된다. 일반적인 시각표가 시간과 역 2차원을 가진 반면에 네트워크 모형은 열차라는 차원을 하나 더 가지고 있다. 이는 수리모형 개발 시 다품종 흐름 문제가 단일품종 흐름 문제로 하기 위함이다. 또한, 노드와 노드를 연결하는 호(arc)를 연결하여 E 를 구성한다. 열차 시각표는 각 호에 흐름이 발생되면 나타나게 된다.

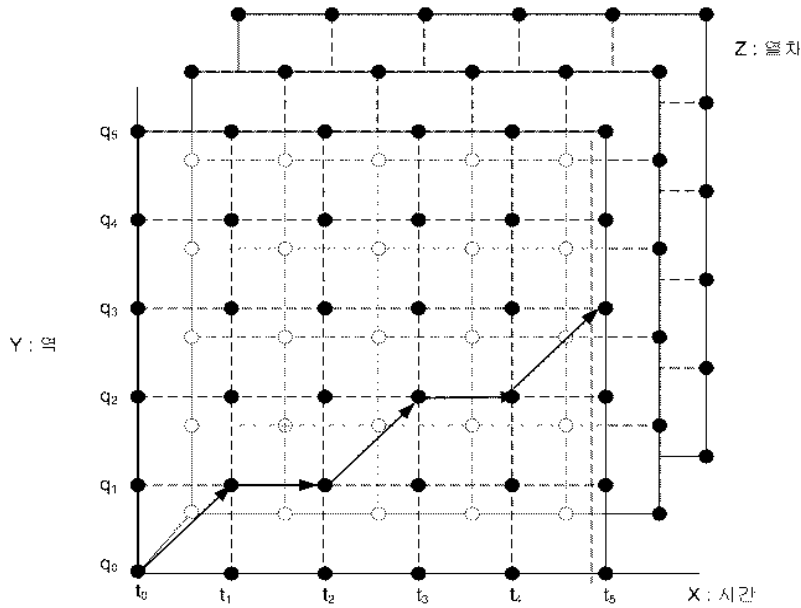


Fig. 4. Network Model for EETP

4.2 목적함수

수리모형의 목적함수는 크게 4가지로써, 아래와 같이 가중 합을 최소화하는 것이다.

$$\text{Min } \alpha \text{Obj}_1 + \beta \text{Obj}_2 + \gamma \text{Obj}_3 + \delta \text{Obj}_4$$

- Obj_1 : 동일시간에 동일역군에서 동시에 출발하는 열차수의 합
- Obj_2 : 출발-도착 연계 불일치 횟수
- Obj_3 : 에너지절약형시각표와 기본열차시각표상의 시발시각 차이
- Obj_4 : 에너지절약형시각표와 기본열차시각표상의 종착시각 차이

여기서 3, 4번째 목적은 수요가 반영되어 작성된 기존의 열차스케줄을 최대한 만족시키므로써, 에너지절약형 시각표의 현실성을 높이기 위하여 추가되었다.

4.3 주요 운영 제약

앞에서 설명한 네트워크 모델을 이용하여 각종 열차 운영 제약을 만족시키는 열차시간표 작성 수리모형에 대한 설계 방법을 제시한다. 시각표 작성시에 고려되어야할 주요 운영제약은 한 역에서의 열차가 동시에 도착 및 출발을 할 수 없고 일정한 시간간격을 유지하도록 하는 여유시격 만족제약이 있다. 실제 열차는 신호기에 의하여 이를 반영한다. 또한, 승객의 승하차를 위하여 계획된 일정시간동안 역에서의 정차시간 및 차량 성능을 고려한 역간주행시간 만족제약이 있다.

1) 여유시격 만족제약

여유시격에 대한 제약은 특정역에서 두 열차 사이에 발생하게 된다. 예를 들어, 그림 5과 같이 \$q_0\$역에서 \$t_0\$시간에 출발하는 열차 A와 \$t_2\$시간에 출발하는 열차 B가 있을 때 \$|t_0 - t_2| \geq\$ 출발여유시격 보다 커야하며 그림 6과 같이 \$q_2\$역에 \$t_3\$에 도착하는 열차 A와 \$t_5\$에 도착하는 열차 B가 있을 때에도 \$|t_3 - t_5| \geq\$ 도착여유시격 보다 커야한다.

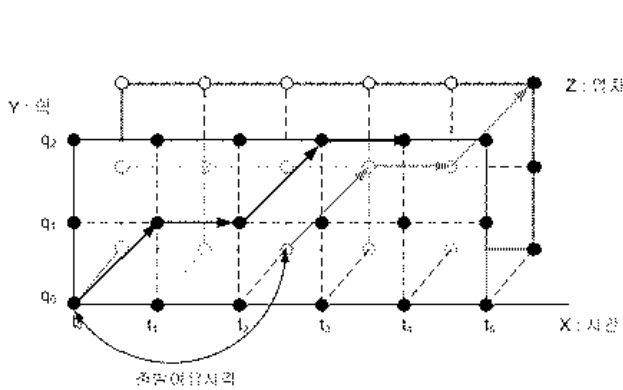


Fig. 5. Departure Headway Constraint

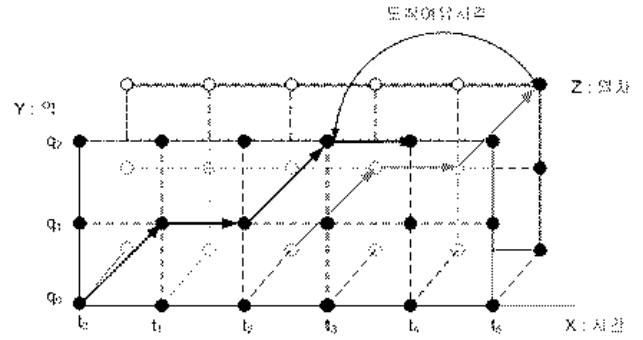


Fig. 6. Arrival Headway Constraint

2) 시간 만족제약

최소정차시간 만족제약은 특정 한 열차가 특정역에서의 도착과 출발 사이에 발생한다. 예를 들어, 그림 7과 같이 q_1 역에서 t_1 시간에 도착하여 t_3 에 출발하는 열차가 있을 때 $|t_1 - t_3| \geq$ 최소정차시간 보다 커야하며 최소이동시간 만족제약은 특정 열차가 연속된 역에서의 출발과 도착사이에서 그림 8과 같이 q_1 역의 출발시간과 q_2 역의 도착시간의 차이($|t_4 - t_2|$)가 출발여유시각 보다 커야한다.

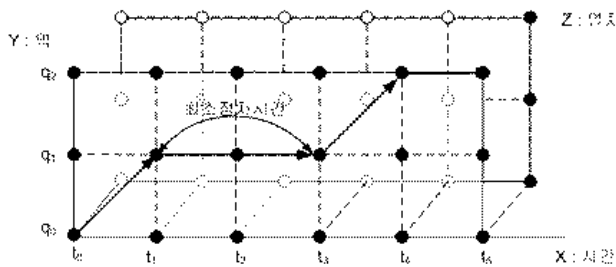


Fig. 7. Minimum Dwell Time Constraint

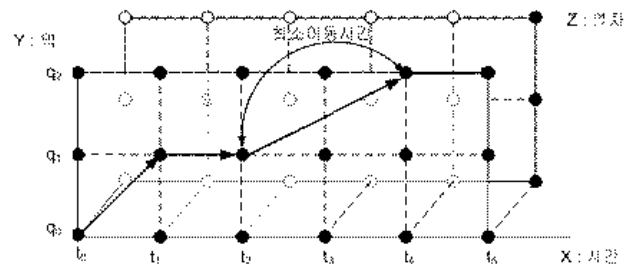


Fig. 8. Minimum Run Time Constraint

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 전력공급 계통 단위별로 설정된 역군을 중심으로 각 역에서의 출발 및 도착시간을 분산 혹은 연계하여 에너지 절약형 열차 시각표 작성 수리모형에 대한 설계 방법을 제시하였다. 에너지 절약형 열차시각표는 최근 확대되고 있는 각 지방자치단체의 도시철도 운영기관의 운영비용 절감에 활용될 수 있을 것이다. 따라서, 향후 에너지 절약형 열차시각표 작성에 대한 수리적 모형 및 알고리즘을 개발하는 연구와 전기철도 차량시스템의 출발-기동시 과도전류 발생현황을 분석하여 에너지 효율적 시각표 작성의 효과를 정량화하는 연구가 필요하다.

참고 문헌

[1] C. Alberto, F. Matteo, T. Paolo, Modeling and Solving the Train Timetabling Problem, Operations Research (2002)
 [2] UIC, IZT, EVENT(철도차량 및 운행에 관한 에너지 효율 기술평가), Technical report (2003)
 [3] P. Serafini, W. Ukovich, A mathematical model for periodic event scheduling problems. SIAM

Journal on Discrete Mathematics (1989)

- [4] A. Schrijver, A. Steenbeek,. Dienstregelingontwikkeling voor Railned. Technical report, CWI (1994)
- [5] B. Szpigel, B, Optimal train scheduling on a single track railway, Operation Research (1973)
- [6] 전용주, 이유경, 조광우, 이성욱, 전기철도의 부하패턴 분석을 통한 피크 에너지 절감방안 연구, 한국철도학회2006 춘계학술대회 논문집 (2006)