

동력운전 분산 시각표 작성을 위한 수리모형 및 해법

A Model and Approaches for Smoothing Peaks of Traction Energy in Timetabling

김경민[†] · 오석문^{*}

Kyung Min Kim · Seog-Moon Oh

Abstract This paper describes a reduction in the peaks of traction energy for metro railways in timetabling. We develop a mixed integer programming (MIP) model, which minimizes the number of trains running simultaneously. We suggest two approaches. In the first approach, we use the commercial MIP solver, CPLEX. In the second approach, we propose a heuristic algorithm. We apply both methods to the current daily timetable of the Korea Metropolitan Subway. We determine an optimal solution, which results in an improvement of approximately 25% over the current timetable.

Keywords : Smoothing Peak Energy, Timetabling, Mathematical Model, Heuristic, Metro Railway

요 지 본 연구는 도시철도 시스템에서 동일시간에 동력운전하는 열차수를 최소화하여 전기에너지소모의 최대치를 최소화하고자 한다. 이를 위하여 열차동력운전 분산 열차 시각표 작성에 대한 문제를 정의하였다. 정의된 문제를 혼합정수계획(Mixed Integer Programming)모형으로 정식화하고 문제의 해법으로 상용소프트웨어를 활용한 해법과 휴리스틱 해법 두 가지를 제시하였다. 실제 열차시각표에 적용하여 동시 동력운전 열차수를 25% 감소시켰으며 본 연구결과와 유용성을 확인하였다. 이를 통하여 기존 시각표의 서비스품질을 악화시키지 않는 에너지 효율적 열차시각표를 작성하였다.

주 요 어 : 열차동력운전 분산, 열차시각표작성, 수리모형, 휴리스틱, 도시철도

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 기후변화대비 및 친환경 철도기술개발의 필요성이 대두됨에 따라 대용량 에너지를 필요로 하는 철도 시스템에서 에너지 소모를 감소시키는 다양한 노력이 진행 중이다. 특히, 가감속 성능 및 에너지이용 효율이 높은 전기철도는 전철화 사업 등으로 인해 점차 그 비중이 높아지고 있다.

이에 따라 에너지 절약대책과 에너지 재사용 증대 및 에너지 효율적 운영에 대한 요구가 커지고 있다.

대도시의 주요 대중교통수단인 도시철도는 시격이 짧고

출발-정차의 반복이 매우 빈번하며 열차의 역간 주행시 동력운전구간(역행)은 무동력운전구간(타행, 제동)에 비해 짧고 에너지소모가 큰 운전특성을 가지고 있다. 따라서, 여러 대의 열차가 동일한 전력공급 계통에서 동시에 동력운전하는 경우 에너지 소모의 최대치(피크전력)가 증가하게 된다. 따라서 본 연구에서는 기존시각표를 에너지 소모의 최대치를 최소화하는 열차동력운전 분산 열차 시각표로 변경하는 수리적 접근방안을 제시한다.

도시철도 전기요금제도는 Table 1과 같이 기본 요금과 사용요금이 결합되어있는 형태이다. 기본요금은 월간 전기요금의 약 15%를 차지하고 있다. 기본요금은 본 연구에서 다루고자하는 최대전력사용과 관련된 요금이다. 따라서, 동시 동력운전 집중으로 인해 피크전력의 편차가 클수록 기본요금이 과다하게 부과되는 결과를 초래하게 된다 [1].

[†] 책임저자, 정회원, 한국철도기술연구원, 철도교통물류연구실
E-mail : kmkim@krti.re.kr

TEL : (031)460-5491 FAX : (031)460-5499

^{*} 한국철도기술연구원, 정책전략연구실

Table 1. Monthly electric charges of a metro railway

Num.	Type	Details	Charges (천원)	Ratio
①	기본요금	=최대전력[kw]× 최대전력단가[원/Kw]	219,355	15.3%
	감액요금	=최대전력[kw]×최대전력 단가[원/Kw]×감액율	11,545	0.8%
②	사용요금	=사용전력량[Kwh] ×사용전력단가[원/Kwh]	1,038,085	72.6%
③	부담금	=(기본요금+사용요금) ×부담율	46,525	3.3%
④	부가세	=(기본요금+사용요금) ×부가세율	125,744	8.8%
⑤	합계	= ① + ② + ③ + ④	1,429,710	100.0%

도시철도 전기요금제도는 Table 1과 같이 기본요금과 사용요금이 결합되어있는 형태이다. 기본요금은 월간 전기요금의 약 15%를 차지하고 있다. 기본요금은 본 연구에서 다루고자하는 최대전력사용과 관련된 요금이다. 따라서, 동시 동력운전 집중으로 인해 피크전력의 편차가 클수록 기본요금이 과다하게 부과되는 결과를 초래하게 된다 [1].

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 시각표작성을 연구 중이다. 또한, 열차시각표를 작성하는 상용 소프트웨어들이 다수 개발되었으나 단순히 에너지소모를 계산하는 한계를 가지고 있다(Table 2).

Table 2. Timetabling tools for calculating an energy consumption

Timetabling tool	Developers(Users)
RAILSYS	IVE(DB, Alstom, BV)
VIRIATO	SMA und Partner AG
OPENTRACK	OpenTrack Railway Technology (SBB, DB)

1.2 기존연구 고찰

열차의 동력운전분산 혹은 에너지 소모 최대치를 최소화 하는 다양한 연구가 진행되어 왔다.

열차제어를 통한 에너지 절감 방안에 대한 연구로 Albrecht et al.[2]은 역간 이동시간의 여유시간을 이용하여 최대에너지 소모는 분산시키고 열차들의 제동과 역행은 동기화 시켜 회생에너지사용을 극대화하는 연구를 하였고 역

간 이동시간을 최적 제어하는 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 제안하였다. Gordon et al.[3]은 에너지소모를 감소시키는 열차 운영에 대한 몇 가지 전략을 제시하였다. 특히, 타행 및 열차의 정차시간 및 출발시간을 조정(Coordination)을 통한 방법을 제시하였다. 그러나, 다른 열차의 회생에너지 수급을 위하여 정차시간을 늘려 계획 출발시간 이후에 출발하게 되는 등의 수송력을 감소시킬 수 있는 한계를 가지고 있다.

새로운 시각표를 작성하는 연구로 Lindner et al.[4]은 스케줄이 주기성을 가지는 경우(Cyclic Timetabling) 에너지 비용을 고려한 열차스케줄을 작성하는 정수계획 모형(Integer Programming)을 제시하였다. Medanic et al.[5]은 단선구간에서의 화물열차를 대상으로 에너지효율적 시각표를 작성하는 이산사건모델(Discrete-Event-Model)을 개발하였다. 이 모델은 재계산이 빠르고 용이하여 계획스케줄에서 변경발생시 유용하다.

본 연구와 같이 기존의 시각표를 변경하는 연구로 Chen et al.[6]은 도시철도 각 역에서 열차의 정차시간 조절을 통해 최대 에너지 소모를 최소화하는 연구를 제시하였다. 각 역에서의 정차모드를 감소정차모드(25초), 증가정차모드(35초) 두 가지로 구분하였으며 유전자 알고리즘을 적용하였다. 시뮬레이션을 통하여 약 28%의 에너지 소모 감소를 증명하였다. 시뮬레이션 대상인 Kaohsiung MRT는 1시간을 대상으로 16개 열차, 전체 역의 수 14개, 편도 운행시간 22.5분, 평균시격 6분~9분이다.

그러나, 본 연구에서 대상으로 하는 시격 2분~4분인 고밀도 운행구간에서는 각 역에서 열차별 5초단위의 정차시간 조정이 어렵고 종착역에서의 도착시간이 계획대비 1분 이상 차이가 나게 되면 차량 운용계획 및 승무계획의 불일치로 현실적용성이 떨어지게 된다. 본 연구에서는 시발시각만 ±30초 조정하는 방법으로 종착역에서의 도착시간은 계획과 ±30초 차이난다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 동력운전 열차의 최대수를 최소화하는 열차 시각표 작성 문제를 정의한다. 3절에서는 정의된 문제의 수리모형 및 해법을 제시하며 4절에서는 실제 시각표에 개발된 해법을 적용한 실험 결과를 보여 준다. 마지막 5절에서는 결론 및 향후 연구방향을 제시한다.

2. 문제정의

본 연구에서는 동일시간에서 열차의 동력운전을 분산하여 에너지 효율적 열차 시각표를 정의하기 위하여 시간 Slot과 시간 Slot에서의 각 열차별 동력운전여부를 정의하였다.

시간 Slot은 시간을 이산(Discrete)하게 15초 단위로 구분한 것이다. 먼저 시간을 이산적으로 표현한 것은 현재, 열차시각표가 30초목을 사용하고 있고 시간에 따른 전기적에너지 소모를 연속적으로 파악할 필요는 없기 때문이다. 하지만, 운전선도를 분석한 결과 역간 거리에 따라서 동력운전시간이 30초미만이 경우가 있어 15초 단위로 구분하였다.

열차의 동력운전여부는 동력운전시(역행) 1, 무동력운전시(타행, 제동) 0 두 가지로 구분한다. 각 시간 Slot에서의 동력운전여부는 역에서의 도착, 출발시간에 따른 열차스케줄 및 운전선도에 따라 결정 된다. 일반적으로 운전선도에는 각 역에서의 출발위치, 출력Off위치 및 출력Off에서의 속도 정보가 있으므로 이를 통해 각 역에서의 동력운전 이동시간을 계산하고 이를 시간 slot단위로 근사한다. 예를 들어, 역에서 출발후 출력Off까지의 이동거리가 327m이고 그때, 출력 Off속도가 75km/h이면 동력운전 이동시간은 약 31초이며 2 slot으로 근사시킨다.

Table 3. Sample trains

Train	Dpt.Stn.	Arr.Stn.	Dpt.Time (Slot)	Arr.Time (Slot)	Traction Time Slot
1	A	B	6:19:00 (1)	6:20:15 (6)	2
	B	C	6:20:45 (8)	6:23:30 (15)	3
2	D	E	6:19:15 (2)	6:20:30 (7)	2
	E	F	6:21:00 (9)	6:22:00 (13)	1

Train 1, 2의 스케줄과 운전선도 분석을 통한 동력운전 이동시간이 Table 3과 같을 때, 위에서 정의한 시간slot에서의 열차별 동력운전여부는 Fig. 1의 Train 1, Train 2와 같다. 두 열차의 시간slot별 동력운전여부를 통하여 전체 시간slot중 동력운전이 동시에 발생하는 두 개의 시간slot(2번, 9번)을 계산할 수 있다. 이러한 상황에서 만약 Train 2의 D역에서의 시발시간을 30초 늦추게 되면 Train 2의 동력운전여부는 Train 2'와 같이 변경되고 이에 따라 전체 시간slot에서 동시에 두 열차가 동력운전 하지 않는다.

본 연구에서 제시하는 에너지 효율적 시각표 작성방법은 정차시간 및 역간이동시간은 기존시각표와 동일하며 시발역에서의 열차 출발시간을 ±30초(30초목) 조정하여 동일 시간에 동력운전을 분산 시키는 것으로 한다. 그 이유는 고밀도 운행상황에서 동력운전분산을 위하여 정차시간 및 역간이동시간을 증가 시키게 되면 시각표의 품질(수송력감소, 순환시간 증가 등)을 악화시키게 되며 에너지 효율적 시각

표의 현실 적용성(차량운용계획, 승무계획, 수송수요 등)을 고려할 때 현재 시각표를 최대한 반영시키기 위함이다.

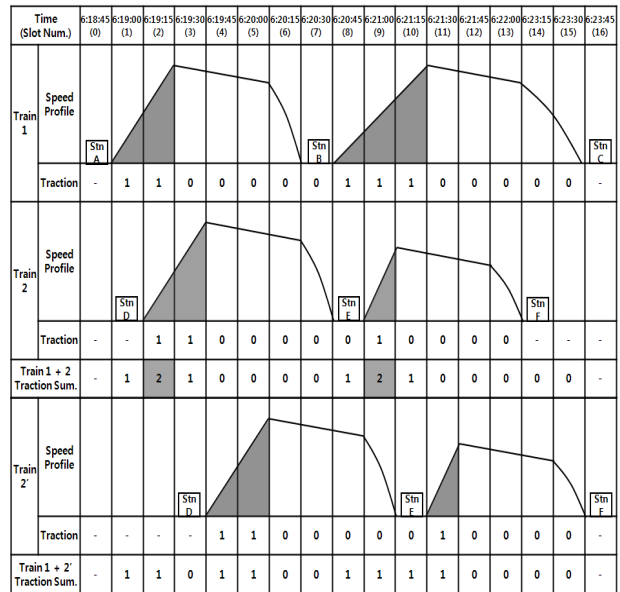


Fig. 1. Reducing a traction energy from the Table 3

이와 같은 방법으로 한 열차의 상태는 조상시발(Shift Up : -30), 조하시발(Shift Dn : +30) 혹은 현행유지 3가지 중의 하나를 선택하게 되고 이에 따라 시각별 동력운전 여부가 결정된다. 즉, 현재시각표를 통하여 열차 i 가 시간slot t 에서 현행유지시 동력운전여부($E_{i,t}$)를 구하고 이를 바탕으로, 조상시발시($E_{i,t}^+$), 조하시발시($E_{i,t}^-$) 값을 계산한다. 예

Table 4. Changing traction state of the train 2 in Table 3, according to the shift process

Time slot	Train 2		
	Constant (E)	Shift Up (E^+)	Shift Dn (E^-)
0	-	1	-
1	-	1	-
2	1	0	-
3	1	0	-
4	0	0	1
5	0	0	1
6	0	0	0
7	0	1	0
8	0	0	0
9	1	0	0
10	0	0	0
11	0	0	1
12	0	-	0
13	0	-	0
14	-	-	0
15	-	-	0

를 들어, Table 3 Train 2의 경우 조상시발, 조하시발 혹은 현행유지시 시각별 동력운전여부는 Table 4와 같다.

따라서, 시각표 작성 대상 열차의 수가 증가 할수록 최적 열차의 상태의 선택이 어려워지는 전형적인 조합최적화 문제가 된다.

3. 수리모형 및 해법

3.1 수리 모형

동시 동력운전 열차수의 최대치를 최소화시키는 최적화 시각표 작성문제는 혼합정수계획법(Mixed Integer Programming)으로 모형화 된다.

- 집합
 - I : 열차집합
 - T : 시간 slot 집합
- 파라미터
 - D_i : 열차 i 의 계획된 시발 시간 slot
 - $E_{i,t}$: 열차 i 가 현행운전시 시간 t 에서 동력운전여부
 - $E_{i,t}^+$: 열차 i 가 조상시발시 시간 t 에서 동력운전여부
 - $E_{i,t}^-$: 열차 i 가 조하시발시 시간 t 에서 동력운전여부
- 변수
 - $y_{i,t} \in R^+$: 열차 i 의 시간slot t 에서의 동력운전여부
 - $a_i \in \{0,1\}$: 열차 i 의 시발시간에 변화가 없는 경우 $a_i = 1$, 변화가 발생하는 경우 $a_i = 0$ 의 값을 가짐
 - $b_i \in \{0,1\}$: 열차 i 가 조상시발 하는 경우 $b_i = 1$, 변화가 발생하는 경우 $b_i = 0$ 의 값을 가짐
 - $c_i \in \{0,1\}$: 열차 i 가 조하시발 하는 경우 $c_i = 1$, 변화가 발생하는 경우 $c_i = 0$ 의 값을 가짐
 - $k \in R^+$: 최대 동력운전 열차수

• 수리 모형

$$\min k \quad (1)$$

subject to

$$k \geq \sum_i y_{i,t}, \quad \forall t \in T \quad (2)$$

$$y_{i,t} = E_{i,t} \times a_i + E_{i,t}^+ \times b_i + E_{i,t}^- \times c_i, \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (3)$$

$$a_i + b_i + c_i \leq 1 \quad \forall i \in I$$

목적함수 (1)은 대상시각표의 동력운전열차수 최대치를 최소화하는 기능을 수행한다. 식 (2)는 시간 slot에서 동력운전 열차수의 최대치를 계산하며 식 (3)은 각 열차가 조상

시발, 조하시발 혹은 현행유지 따른 시각별 동력운전 여부를 계산한다. 식 (4)는 각 열차는 조상시발, 조하시발 혹은 현행유지 중 하나의 상태를 선택함을 의미한다.

3.2 해법

본 연구에서는 동력운전분산 시각표 작성을 위한 두 가지 해법을 제시한다. 첫 번째로는 상용최적화 프로그램인 CPLEX를 활용하여 해를 도출하는 방법이다. 상용최적화 프로그램은 일반적으로 분지한계법[7]을 이용한다. 그러나, 본 연구에서 제안한 수리모형은 열차수가 늘어나고 시간 slot이 작아짐에 따라 최적해 도출이 어렵고 계산시간이 증가하는 한계를 보이므로 간단한 휴리스틱 알고리즘을 개발하였다.

알고리즘의 주요아이디어는 동력운전 열차수가 최대가 되는 특정시점에서 동력운전하는 한 열차를 선택하여 특정 시점의 ± 30 초에서의 동력운전 열차수를 비교하여 여유가 있는(작은) 방향으로 조상 혹은 조하 시키는 것이다.

열차집합을 I , 시간 slot 집합을 T 라 하고 알고리즘 개발을 위한 몇 개의 용어를 도입하면 다음과 같다.

- $E_{i,t} \in \{0,1\}$: 열차 i 가 시간 t 에서 동력운전하면 1 아니면 0
- $MAXVAL \in R^+$: 변경전 최대동력운전 열차수
- $NEWVAL \in R^+$: 변경후 최대동력운전 열차수
- $MAXTIME \in T$: 최대 동력운전 시간slot
- $UPVAL \in R^+$: $MAXTIME-1$ 시간 slot에서의 동력운전 열차수
- $DNVAL \in R^+$: $MAXTIME+1$ 시간 slot에서의 동력운전 열차수
- $SHIFT_i \in \{0,1\}$: 열차 i 가 Shift 가능하지 않는 경우 $SHIFT_i = 1$, 가능한 경우 $SHIFT_i = 0$ 의 값을 가짐

구체적인 알고리즘은 아래와 같다.

단계0. 열차의 Shift를 초기화($SHIFT_i = 0, \forall i \in I$)하고 $MAXVAL, MAXTIME$ 계산

단계1. $SHIFT_i = 0$ 인 열차 i 가 존재하면 단계2로 이동, $SHIFT_i = 1, \forall i \in I$ 이면 알고리즘을 종료

단계2. $E_{i,MAXTIME} = 1$ 이고 $SHIFT_i = 0$ 인 열차 중 i^* 를 임의로 선택

단계3. $UPVAL, DNVAL$ 계산

- $UPVAL > DNVAL$ 이면, i^* 를 조하
- $UPVAL > DNVAL$ 아니면, i^* 를 조상

단계4. $NEWVAL$ 계산

- $NEWVAL < MAXVAL$ 이면 단계 0으로 이동

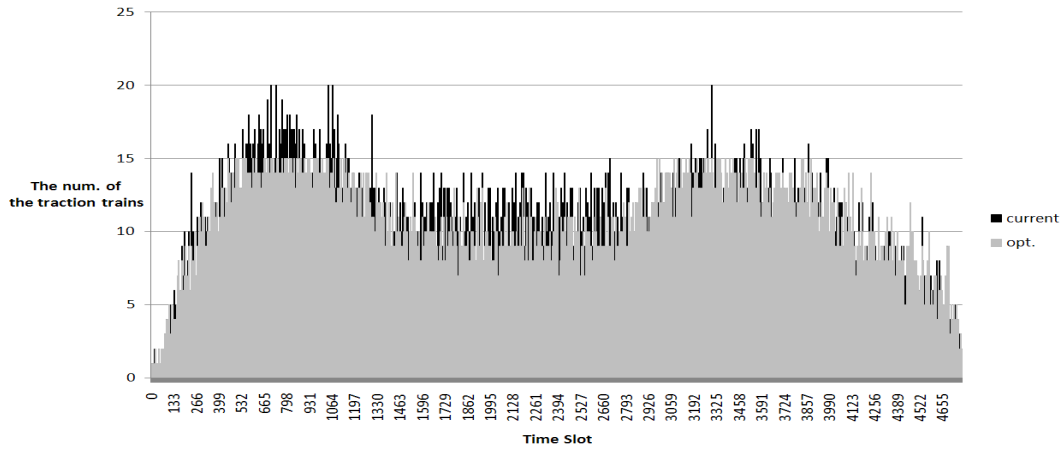


Fig. 2. A comparison of the current timetable and the smoothing peak timetable

- $NEWVAL < MAXVAL$ 아니면, i^* 의 조상/조하를 취소, $SHIFT_i = 1$, 단계 1로 이동

4. 실험결과

본 연구에서 제시한 최적화모형과 휴리스틱 알고리즘을 실제 수도권 지하철 한 노선의 열차 스케줄에 적용해 보았다. 하루전체 총 516개(상행 258, 하행 258) 열차, 6:08:00~익일 1:01:00까지 15초단위의 4773개 시간 slot을 실험 대상으로 하였다. 실험환경은 Core2 Quad CPU 2.50GHz, 3.50GB RAM, CPLEX 11.1, Visual Studio 2008을 사용하였다.

실험결과 최적화 모형의 경우 현행시각표 대비 최대 동력운전열차를 5대 줄여 약 25%의 감소효과를 보였다. 평균 시간 slot당 5.9대의 열차가 동력운전하고 있으며 두 가지 해법 모두에서 동력운전 열차수의 표준편차 값은 현재 시각표에 비하여 감소하였다(Table 5).

Fig. 2는 전체 시간slot에서 현재 시각표와 최적화모형을 통해서 새롭게 계산된 시간표의 열차동력운전 열차수를 비교한 것이다. 분석결과 본 연구의 모형은 침두시간 뿐만 아니라 비침두시간에도 효과가 있음을 확인하였다.

Table 5. Summary of the experiment results

Measure	Current Timetable	CPLEX (Opt)	Heuristic
Maximum Num. of Traction Trains	20	15 (-5)	18 (-2)
Std. Num. of Traction Trains	3.93	3.81	3.90
Shift	Shift Up	-	192
	Shift Dn	-	160
	Sum	-	352

최적화 모형의 경우 전체 열차의 68%(352열차)를 조정하였으나 휴리스틱 모형은 5%(27열차)를 조정하였다. 계산 시간은 최적화 모형의 경우 600.42초, 휴리스틱모형의 경우 253.37초인 것으로 나타나 본 연구에서 제안한 알고리즘이 계산시간 측면에서 유용함을 확인하였다. 또한, 이와 같은 최대전력량 감소시 이상적으로 Table 1과 같은 도시철도 한 노선에서 약 54,838천원을 월간 절감할 수 있으며 이는 전체 월간 전기요금의 약 4%에 해당한다.

5. 결론

본 연구에서는 동시에 동력운전하는 열차의 수를 최소화하여 철도 전기에너지 소모의 최대치를 최소화하는 열차동력운전 분산 열차 시각표 작성에 대한 수리모형 및 휴리스틱 해법을 제시하였다. 제시한 해법을 실제 열차시각표에 적용하여 동시 동력운전 열차수 약 25% 감소 및 열차출발 간격 분산을 통하여 본 연구결과의 유용성을 확인하였다. 에너지 절약형 열차시각표는 최근 확대되고 있는 각 지방자치단체의 도시철도 운영기관의 전기요금 절감 및 전력설비 부담을 감소시켜 운영비용 절감에 활용될 수 있을 것이다. 그러나, 에너지 효율적 시각표 측면에서 볼 때, 제동시 발생하는 회생전류까지 고려하는 연구로의 확장이 필요하며 전기철도 차량시스템의 동력운전 시의 발생 전력현황 및 제동시 발생하는 회생전류를 분석하여 실질적으로 에너지 효율적 시각표 작성의 효과를 정량화하는 연구가 필요하다.

참고 문헌

1. 전용주, 이유경, 조광우, 이성욱(2006), “전기철도의 부하패턴

분석을 통한 피크 에너지 절감방안 연구,” 한국철도학회2006 춘계학술대회 논문집.

2. T. Albrecht(2004), “Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control,” Computers in Railways IX.
3. S. P. Gordon and D. G. Lehrer(1998), “Coordinated train control and energy management control strategies,” Railroad Conference.
4. T. Lindner and U. T. Zimmermann(2005), “Mathematical methods of operations research.”
5. J. Medanic and M. J. Dorfman(2002), “Energy efficient

strategies for scheduling trains on a line,” 15th Triennial World Congress.

6. J. F. Chen, R. L. Lin, and Y. C. Liu(2005), Optimization of an MRT Train Schedule: Reducing Maximum Tranction Power by Using Genetic Algorithms, Power Systems IEEE.
7. L. A. Wolsey(1999), *Integer Programming*, John Wiley and Sons, INC.

접수일(2009년 10월 1일), 수정일(2009년 10월 31일),
게재확정일(2009년 11월 7일)