

에너지절약을 위한 열차운행전략에 관한 시뮬레이션 연구

A Simulation Study on the Energy Saving Strategy of Train Operation

주영복* 최규형**
Joo, Young-Bhok Choi, Kyu-Hyoung

ABSTRACT

Energy saving is an important topic for each heavy user of the power system, including railway operators. Therefore, four strategy of train operations studied that maximum speed reduction, reduced acceleration rate, anticipatory coasting, and saw-tooth coasting for energy saving. The Simulation model of the study used to investigate the performance of a railway system, and it was used to study the effect of energy saving strategies for the train operation. The Study investigate train operation strategy for energy saving, investigate the effect of strategy, and find the energy optimization of acceleration, coasting, braking section used Run-Curve simulator from train data.

1. 서 론

에너지절약은 철도운영자에게 있어 매우 중요한 문제가 되고 있다. 철도운영에 있어서 열차속도, 소요시간, 에너지소모량 등을 고려하여 열차운행전략의 최적점을 찾기 위해 그동안 국내, 국외에서 많은 연구가 수행되어 왔다. 그 가운데 열차성능계산프로그램인 TPS(Train Performance Simulation) 프로그램을 이용한 연구들이 많이 수행되어 왔다.

열차운행에는 가속구간, 속도유지구간, 타행구간, 제동구간이 있다. 차량조건, 선로조건, 속도조건을 계산하여 운전속도, 열차소요시간, 에너지소모량 등을 운전곡선과 함께 시뮬레이션 할 수 있다.

본 논문에서는 그 가운데 3가지 에너지절약 전략 즉, 최고속도 감속 전략, 가속도 감속 전략 그리고 타행운행 전략과 3가지 열차정차 방식과의 관계를 비교, 분석하여 각 정차방식에 따른 가장 효과적인 에너지절약 전략을 제시하고자 한다. 본 논문은 경부고속철도 KTX의 열차데이터를 바탕으로 분석하였고, 경부선 서울-광명-천안-대전-대구-경주-부산 구간을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 열차성능해석 프로그램

TPS(Train Performance Simulation) 프로그램은 목적하는 선로에 차량의 운전속도조건과 소요시간, 소요동력 등을 시뮬레이션하기 위해 개발된 프로그램이다. 운행 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 차량, 선로, 속도의 기본데이터를 필요로 한다.

그림1의 시뮬레이션 흐름도에서 보듯이 열차운행시간 예측 시뮬레이션의 입력데이터로 활용되어, 출발점에서 최종 정차역까지 거리별 최대효율의 가속도 및 감가속도, 에너지소모율 등과 같은 주요 열차 성능인자들을 계산한다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정, 정회원

E-mail : bhok111@snut.ac.kr

TEL : 010-3936-9195

** 서울산업대학교 교수, 정회원

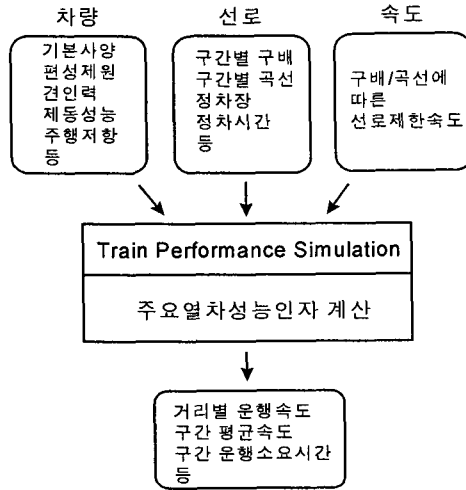


그림1. 시뮬레이션 흐름도

열차성능해석 프로그램의 핵심은 전방향 및 후방향 궤적을 계산하여 이를 통합하는 것이다. 전방향 계산에서는 열차의 운동방정식이 양의 시간이나 전방향의 거리 단위로 적분되는 반면에 후방향 계산에서는 음의 시간이나 후방향 단위로 적분된다.

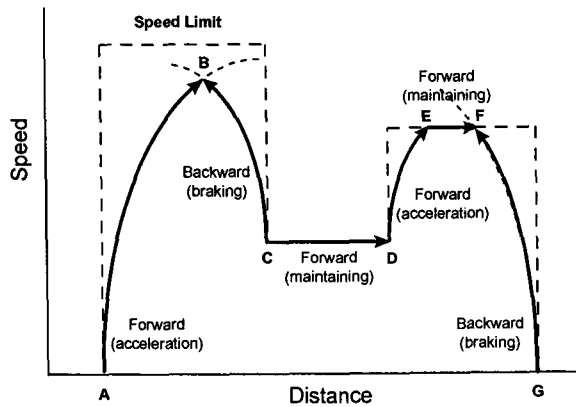


그림2. 열차성능해석 프로그램 계산 과정

그림2는 열차성능해석 프로그램 계산 과정을 나타내고 있다. A점에서 출발하여 순방향으로 가속하여 속도제한선에 접할 때까지 가속한다. 속도제한선에 접하지 않으면 C점까지 가속하고, C점에서 역방향으로 감가속도를 적분하여 속도선도를 구하여, A점으로부터 출발한 순방향 속도선도와 교차하는 B점까지 적분과정을 수행한다. C점에서 D점까지 일정속도로 순방향적분과정을 수행한다. D점에서 속도제한선에 이르는 E점까지 순방향 가속을 수행하고 E점에서 G점까지 일정속도로 주행한다. G점에서 역방향으로 적분과정을 수행하여, D점에서 출발한 순방향 속도선도나 속도제한선에 교차하는 F점에 이를 때까지 계속된다. 이러한 주행속도계산과정을 통하여 선로제한속도조건을 부합된 ABCDEFG의 주행속도선도를 구할 수 있다.

2.2 에너지 소모량 계산

열차운행에 따른 에너지 소모량 계산을 위한 방법들은 많이 있다. 본 논문에서는 간소화된 계산 방법을 사용하였다. P: 전력량, F: 견인력, S: 속도, V: 열차의 전압, I: 전류, θ : 역률 이라고 할 때, 전력량은

$$P = FS = VI\theta \tag{1}$$

로 된다. 전류 I는 역률 θ 가 일정할 경우, 견인력과 전류의 열차특성곡선을 통해 얻을 수 있다. 열차의

전압은

$$V = \frac{FS}{I\theta} \tag{2}$$

로 된다. E: 총 에너지 소모량, t: 시간 이라고 할 때, 총 에너지 소모량은

$$E = \int P dt \tag{3}$$

가 된다.

2.3 에너지절약 전략 분석

에너지절약을 위한 열차운행전략으로 최고속도 감소, 가속도 감소, 타행 운영을 적용하였다. 이 3가지 열차운행전략을 바탕으로 3가지 열차정차 방식 즉, 각역 정차방식(all-stop pattern), 3개역 정차방식(three-stop pattern), 무정차 방식(non-stop pattern)에 대한 열차주행소요시간, 평균주행속도, 에너지소모량과의 관계를 비교, 분석하여 각 정차방식에서의 가장 효과적인 에너지절약 전략을 제시한다. 경부선 총 7개역 즉, 서울-광명-천안-대전-대구-경주-부산역 중, 각역 정차방식은 출발역을 서울역으로 하여 중간정차역 5개역을 모두 정차하여 도착역인 부산역에 도착하는 방식으로 하였고, 3개역 정차방식은 중간정차역을 대전, 대구, 경주 3개역을 정차하는 방식으로, 무정차 방식은 중간정차역 없이 서울에서 부산까지 직행방식으로 하였다.

그림3은 고속철도 KTX의 견인력 곡선을 나타내고 있으며, 그림4는 에너지소모량과 열차속도와의 관계를 나타내고 있다.

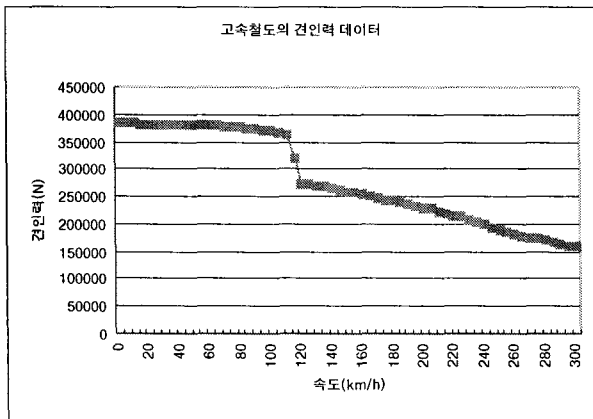


그림3. 고속철도의 견인력 데이터

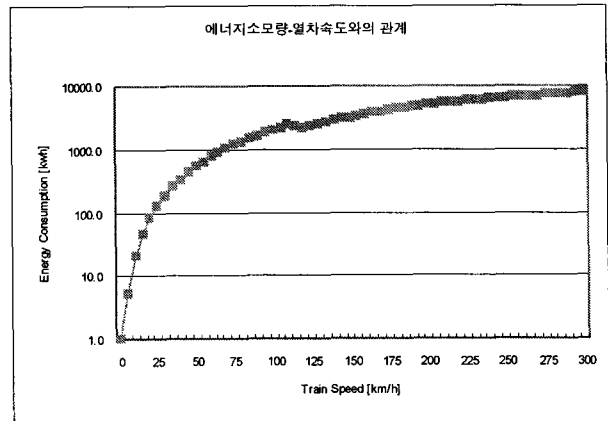


그림4. 에너지소모량-열차속도와의 관계

각각의 운행전략과 열차정차방식에 따른 운행소요시간, 평균주행속도, 총소비전력량을 구하기 위하여 그림5와 같은 시뮬레이터를 사용하였다.

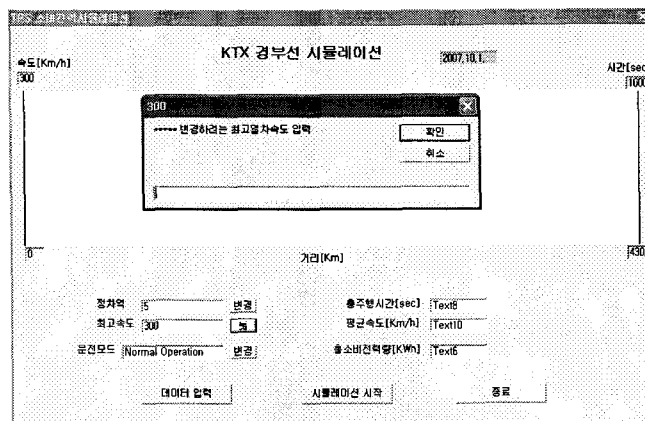


그림5. TPS 소비전력시뮬레이션

2.3 시뮬레이션 결과

TPS 소비전력시뮬레이션을 통해서 중간정차역, 최고속도, 운전모드 값을 설정하여 시뮬레이션을 분석한 결과 각역 정차방식(all-stop pattern)의 경우, 최고속도 감속 전략이 총주행시간은 6998[sec]로 가장 적게 소요되었고, 평균속도는 221[km/h]로 예측타행과 같이 가장 높은 평균속도를 보였으며, 총 소비전력량은 22891[kwh]로 가장 적게 소비된 것으로 나타났다. 가속도감속전략의 경우는, 총주행시간은 7063[sec], 평균속도 217[km/h], 총소비전력량 23022[kwh]로 나타났다. 예측타행운행 전략은, 총주행시간 7014[sec], 평균속도 221[km/h], 총소비전력량 22950[kwh]로 나타났다. 이 결과값은 속도 300[km/h]의 경우이며, 속도가 280[km/h]로 낮추었을 때에도 최고속도감속 전략이 가장 효과적인 운행전략으로 나타났으며, 예측타행전략이 두 번째로 효과적인 것으로 나타났다. 3개역 정차방식(three-stop pattern)의 경우와 무정차 방식(non-stop pattern)의 경우도 최고속도 감속 전략이 가장 효과적인 것으로 나타났으며, 예측타행전략, 그리고 가속도 감속 전략 등의 순서로 효과적인 것으로 나타났다.

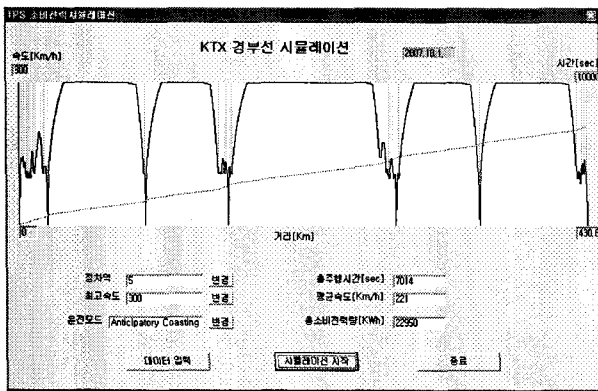


그림6. 각역정차방식 - 최고속도감속 전략

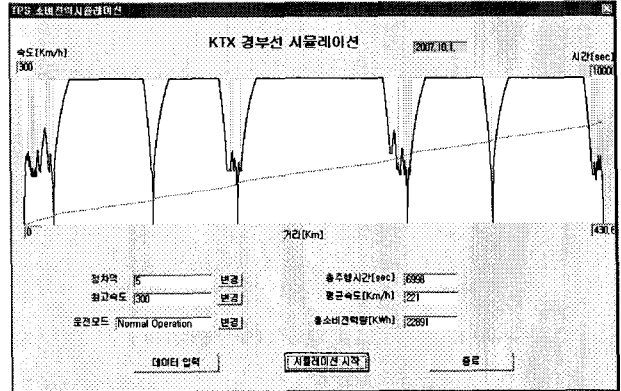


그림7. 각역정차방식 - 예측타행운행 전략

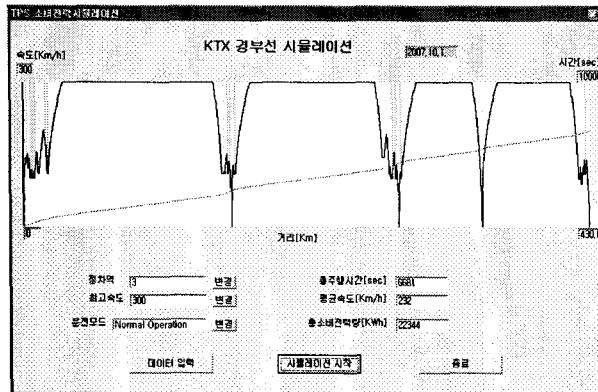


그림8. 3개역정차방식 - 최고속도감속 전략

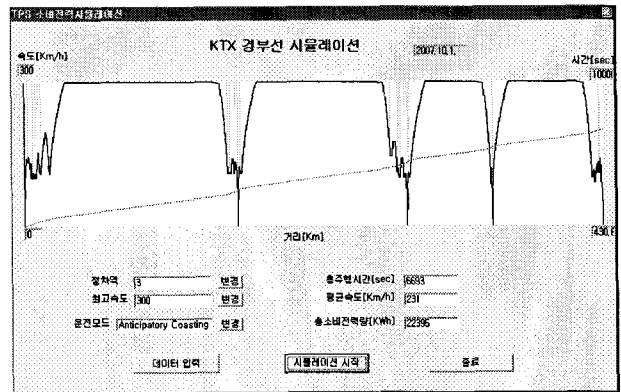


그림9. 3개역정차방식 - 예측타행운행 전략

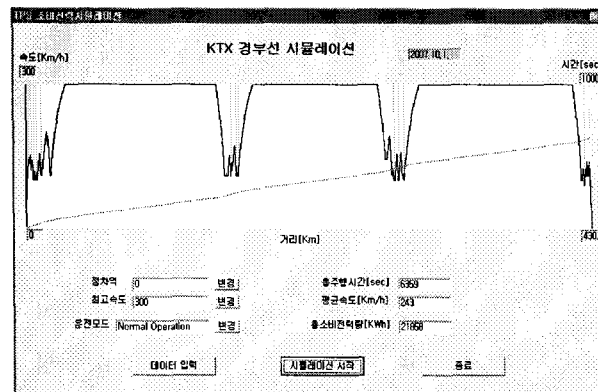


그림10. 무정차방식 - 최고속도감속 전략

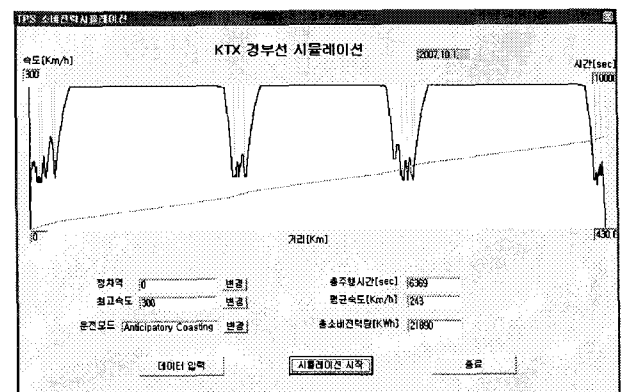


그림11. 무정차방식 - 예측타행운행 전략

각각의 열차정차방식 중, 무정차 방식으로 운행했을 때, 주행소요시간이나 에너지소모율에 있어서 3개역 정차방식, 각역정차방식 보다 더욱 효과적인 것으로 나타났다.

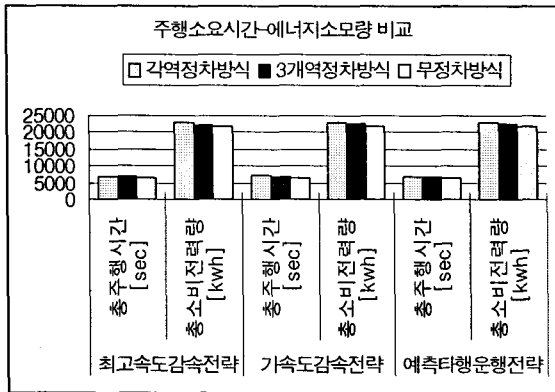


그림12. 주행소요시간-에너지소모량 비교

	최고속도감속 전략		가속도감속 전략		예측타행운행 전략	
	주행 시간 [sec]	소비 전력량 [kwh]	주행 시간 [sec]	소비 전력량 [kwh]	주행 시간 [sec]	소비 전력량 [kwh]
각역정차방식	6998	22891	7063	23022	7014	22950
3개역정차방식	6681	22344	6729	22443	6693	22395
무정차방식	6359	21858	6388	21930	6369	21890

표1. 주행소요시간-에너지소모량 결과값

3. 결론

본 논문에서는 고속철도 KTX 열차제원을 바탕으로 경부선 서울-광명-천안-대전-대구-경주-부산역 총 7개 정차역에 따른 거리, 곡선구간, 구배구간, 속도제한구간 등을 고려하여 TPS 시뮬레이션을 수행하였다.

에너지절약을 위한 열차운행전략 즉, 최고속도감속, 가속도감속, 예측타행운행을 각각 분석하였으며, 3가지 열차정차방식에서의 결과값을 비교, 분석하였다. 그 결과, 가장 효과적인 에너지절약을 위한 운행 전략과 열차정차방식을 파악할 수 있었다.

각역 정차 방식(all-stop pattern), 3개역 정차방식(three-stop pattern), 무정차 방식(non-stop pattern)에서 최고속도감속 전략이 가장 효과적인 것으로 나타났다. 또한, 열차정차방식 중에서는 무정차 방식으로 열차를 운행했을 때, 에너지소비율 및 소요시간 면에서 가장 효과적인 것으로 나타났다.

본 논문에서는 경부선 KTX 열차데이터를 바탕으로 시뮬레이션을 수행하였으나 본 시뮬레이터로 일반 철도, 지하철의 주행소요시간, 에너지소모량 등의 비교, 분석을 수행할 수 있으리라고 생각된다.

참고문헌

1. 황희수(2003년), “주행에너지 소비저감을 위한 운전제어 전략”, 고속철도기술개발사업단.
2. Chi-Kang LEE, “A Simulation Study on the Energy Saving Strategy of Train Operation” National Cheng Kung University, Taiwan 70101, R.O.C.
3. 이동승(2005), “컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 열차운행제어 분석에 대한 기초검토”, 석사학위논문, 서울산업대학교 철도전문대학원.
4. 최규형(1999), “열차운용시뮬레이션 프로그램 개발에 관한 연구”, 한국철도기술연구원.