

철도차량의 주행패턴 최적화에 대한 연구

A Study on Optimization of Travelling Pattern for Railway Vehicle

*#김영국¹, 박찬경¹, 김석원¹, 김기환¹

*#Y. G. Kim(ygkim@krii.re.kr)¹, C. K. Park¹, S. W. Kim¹, K. H. Kim¹

¹ 한국철도기술연구원

Key words : Optimization, Genetic algorithm, ATO, Objective function, Design variables, Constraints

1. 서론

철도기술의 비약적인 발전으로 인해 300 km/h 이상의 주행속도로 운행하는 고속철도가 세계적으로 보편화됨에 따라 한동안 침체했던 철도 교통은 다시 활성화되고 있다. 또한, 철도는 이산화배출량이 적고 에너지 소모량이 작기 때문에 친환경적 교통수단으로 각광을 받고 있다.

철도차량의 주행성능은 견인이나 제동신호 투입 후 실제의 작용력이 발생하기까지 소요되는 공주시간, 차륜과 레일간의 유효한 점착력, 곡선, 구배, 터널 등의 선로조건과 열차운행조건 등 다양한 조건에 의해 영향을 받기 때문에 정확한 주행성능을 파악하기가 쉽다[1].

도시 지하철 및 경량전철의 경우는 열차를 무인으로 운전하는 ATO(Automatic Train operation)의 사용이 증가하고 있다. ATO의 주행패턴을 결정하기 위해서는 주행해석을 통해 효율적인 주행패턴을 결정하여야 한다. 일반적으로 철도차량이 주행해석을 위해 상용화되어 있는 열차주행해석프로그램(TPS, Train Performance Simulation)이 많이 사용되는데, 이는 최대 역행 및 최대 제동상태에서의 열차의 주행해석만이 가능하다. 따라서 임의의 역행, 제동이 가능한 열차주행해석 프로그램이 필요하며, 이를 통해 효율적인 주행패턴을 결정할 필요가 있다[2-4].

본 논문에서는 임의의 역행, 견인, 제동이 가능한 철도차량의 주행성능을 예측할 수 있는 해석 프로그램을 개발하고 이를 한국형 고속열차(HSR-350x)를 이용하여 검증하고, 이 해석 프로그램을 활용하여 하나의 예제에 대해 시간과 에너지관점에서 최적인 주행패턴을 유전자 알고리즘을 통해 찾고 이를 비교분석하고자 한다.

2. 주행성능 해석 프로그램의 개발 및 검증

열차 운행 시에 철도차량의 진행방향에 대한 운동방정식은 뉴턴(Newton)의 제2법칙으로부터 식(1)과 같이 얻을 수 있다. 식(1)에서 견인시는 $F_{braking} = 0$, 제동시는 $F_{traction} = 0$, 타행시는 $F_{traction} = F_{braking} = 0$ 이다.[1,3,4]

$$F_T = m(1+\alpha)a = F_{traction} - F_{braking} - R_r - R_g - R_c \quad (1)$$

여기서, F_T 는 열차의 관성력, m 은 열차 질량, $F_{traction}$ 는 열차의 견인력, $F_{braking}$ 는 열차의 제동력, a 는 열차의 가속도, α 는 회전상당계수, R_r 은 열차의 주행저항, R_g 는 구배저항, R_c 는 곡선저항을 각각 나타낸다.

열차의 진행방향에 대한 가속도는 식(1)를 이용하여 식(2)와 같이 구할 수 있고, 열차의 주행속도 및 주행거리는 가속도-속도, 속도-거리와의 관계로부터 얻어진 식(3)과 식(4)를 적분하여 구할 수 있다.

$$a = \frac{F_T}{m(1+\alpha)} \quad (2)$$

$$dv = a \times dt \quad (3)$$

$$ds = v \times dt \quad (4)$$

여기서, v 는 열차의 주행속도, s 는 주행거리를 나타내고 있다. 그리고, 견인장치와 제동장치에서 발생하는 에너지는 에너지-힘과의 관계식인 식(5)를 적분하여 구할 수 있다.

$$dE_{traction \text{ or } braking} = F_{traction \text{ or } braking} \times ds \quad (5)$$

주행성능 해석 프로그램은 Labview를 사용하여 작성되었으며, 프로그램의 입력 항목으로는 차량무게, 선로구배, 주행저항, 견인력/제동력 선도 등의 해석을 위해 필요한 기초 데이터와 주행상태(견인/제동/타행)의 선택, 각 장치들의 On/Off 상태 확인, 마스크에서 전해지는 작용력 크기 선택 등을 필요로 한다. 또한, 출력항목은 열차의 주행패턴을 최적화하기 위해 목적함수(objective function) 및 제한조건(constraints)에 사용될 주행시간, 최대 가속도, 최대/최소 저크, 전기에너지 등이다.

본 프로그램은 KTX-II의 개발모델인 한국형 고속열차가 고속선 광명 ~ 신탄진 구간에서 실시한 성능시험 결과와 해석결과를 비교하여 검증하였다. 검증은 운전모드가 견인, 제동, 타행 및 견인/타행/제동이 순차적으로 변화하는 하는 경우에 대해 수행하였으나, 지면의 제약상으로 견인/타행/제동이 순차적으로 변화하는 하는 경우에 대해서만 설명한다. Fig. 1은 검증 예제에 대한 운전모드 제어신호와 PWM 신호 및 그에 따른 열차의 주행속도를 측정된 결과로 운전모드가 변화하는 과정을 알 수 있다. 견인신호가 5V, 제동신호가 0V인 경우는 운전모드가 견인모드를, 견인신호가 0V, 제동신호가 5V인 경우는 제동모드를, 견인신호가 0V, 제동신호가 0V인 경우는 타행모드를 말한다. 그림에서 알 수 있듯이 운전모드는 견인 → 타행 → 제동 → 타행 → 제동의 순서로 변화되고 있다. 이때, PWM 신호는 0 ~ 100% 범위에서 변화하고 있으며, 이 PWM 신호 변화 비율에 따라 견인력이나 제동력이 발생하게 된다.

Fig. 2는 검증예제에 대해 시험결과와 해석결과를 비교한 것으로 그림에서 보는 바와 같이 주행거리에 대한 열차속도의 시험결과와 해석 결과의 오차가 2.3% 이하로 가 잘 일치하고 있다. 이는 성능해석을 위한 입력 자료의 획득방법, 데이터 및 성능해석 프로그램이 타당함을 입증하는 것으로 본 주행성능 해석프로그램을 이용하여 다양한 조건에서 철도차량의 주행성능을 예측해도 문제가 없을 것으로 판단된다.

3. 주행패턴 최적화

지하철이나 경전철과 같은 거리가 짧은 역을 운행하는 경우의 운전패턴은 최대 역행, 타행, 최대제동을 사용하는 것이 일반적이며, 이 경우 운행시간의 관점에서는 최적화되었다고 말할 수 있으나 에너지관점에서는 반드시 최적이라고 말할 수 없다. 만일 운행시간의 여유가 있다면 운행시간이 허용하는 범위 내에서 역행은 적을수록 소비에너지를 작게 하고 제동은 크게 할수록 회생에너지는 크게 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 역간 거리가 짧은 경전철 운행 구간에 대해 시간과 에너지 관점에서 주행패턴을 최적화하고자 한다.

Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 주행패턴을 최적화하려는 구간에서의 최대제한 속도는 80 km/h이며, 최대구배는 4%이다. 주행패턴의 최적화를 위한 구간을 제한속도 변곡점을 포함하여 9개로 구분하였고, 각각의 구간에서는 PWM이 일정하도록 하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 최적화 변수는 각 구간의 PWM 9개와 제한속도변곡점을 제외한 각 구간의 시작점 6개로 총 15개로 하고, 구속조건은 최대 가속도/감속도(2개), 최대/최소 저크(2개), 각 구분점에서의 제한속도와 실제 주행속도와의 차이(9개)로 총 13개로 하여 최적화를 수행하였다.

최적화 알고리즘(Algorithm)은 Model Center S/W에서 제공하

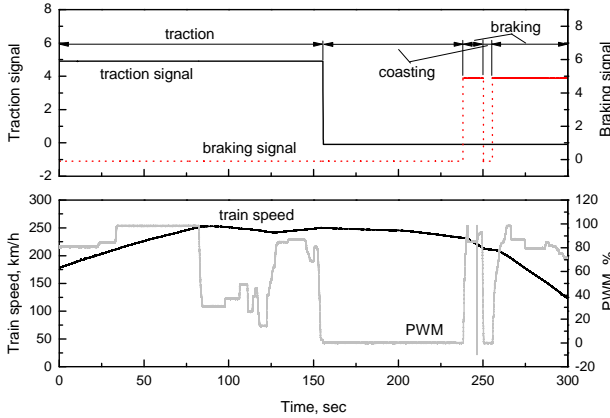


Fig. 1 Control signals, PWM and train speed for verification example

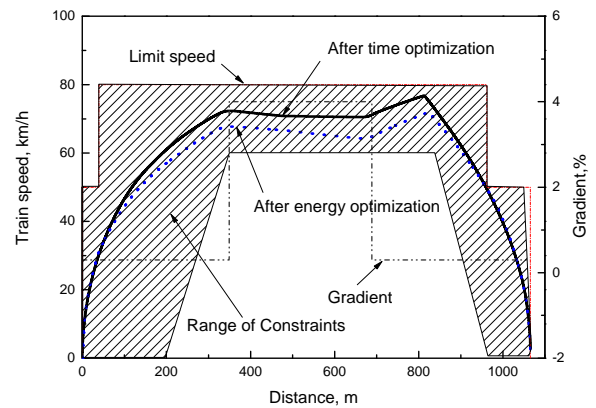


Fig. 4 Train speed patterns after optimization for example

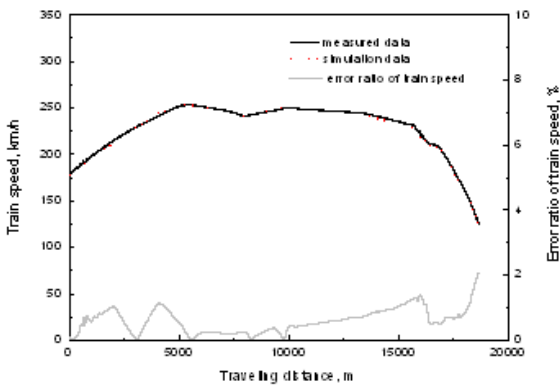


Fig. 2 Comparisons between measured and simulation result for verification example

는 유전자 알고리즘(모집단 크기 15개, 교배확률 1, 돌연변이확률 0.05)을 사용하였다.

Fig. 3은 시간 최적화 및 에너지 최적화 후의 최적화 변수 중에서 일부인 D1~D9(PWM)을 나타낸 것이며, Fig. 4는 시간 최적화 및 에너지 최적화 후의 최적화 변수를 사용하여 구한 주행속도 패턴을 나타낸 것이다. Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 시간 최적화의 경우는 최적화 변수의 허용범위의 상한치에 근접하고 있으며, 이는 시간 최적화 경우의 시간을 줄이기 위해서 가능한 한 최대의 역행 및 제동을 하고 있음을 말해준다. 에너지 최적화의 경우는 허용범위의 하한치에 근접하며, 이는 역행시의 에너지 소비를 줄여 전체의 전기에너지의 소비를 작게 하려는 노력이다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 최적화된 주행패턴은 제한조건 내에 있음을 알 수 있다.

시간 최적화 및 에너지 최적화 후의 주행시간과 전기 소비에너지를 비교해보면, 에너지를 최적화 한 경우가 시간을 최적화 한 경우에 비해 주행시간을 약 10% 크지만 전기 소비에너지는 약 3.5% 감소한다. 주행시간의 입장에서는 주행시간의 여유가 허용한다면 에너지 관점에서의 최적화를 고려할 필요가 있다.

4. 결론

본 논문에서는 임의의 역행, 견인, 제동이 가능한 철도차량의 주행성능을 예측할 수 있는 해석 프로그램을 개발, 검증하였고, 이 해석 프로그램을 이용하여 시간과 에너지관점에서 최적인 주행패턴을 유전자 알고리즘을 통해 찾을 수 있었다.

시간 최적화의 경우는 최적화 변수 허용범위의 상한치에 근처에서 최적치를 찾았고 에너지 최적화의 경우는 이보다 낮은 허용범위 내에서 최적치를 찾았다. 또한, 에너지 최적화의 경우의 시간 최적화의 경우보다 전기 소비에너지를 적게 하는 최적점을 찾을 수 있었다. 이 결과들은 향후 최적의 주행패턴을 구하고자 하는 많은 경우에 활용될 수 있을 것이다.

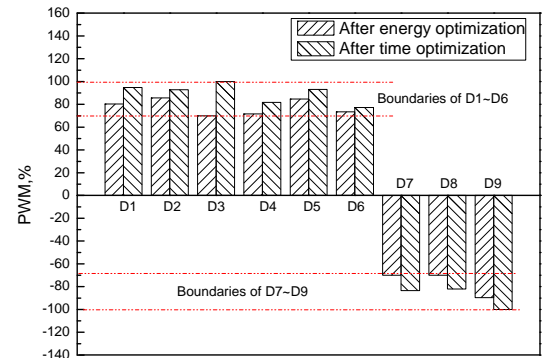


Fig. 3 Design variables D1~D9(PWM) after optimization for example

Table 1 Optimization variables and constraints

Optimization variables	Definition Optimization variables
D1 ~ D9	PWM at each interval(%)
D10 ~ D15	Starting point of each interval(m)
Constraints	Definition Optimization variables
C1 ~ C9	Difference between limit speed and real speed at each interval(km/h)
D10 ~ D11	Max. acceleration/ max. deceleration(m/sec ²)
D12 ~ D13	Max./min. jerk(m/sec ³)

후기

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07 차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김영국 등, "견인/제동/타행 성능 해석 프로그램 개발 및 검증", 한국철도학회, 10권 2호, 153~160, 2007.
2. Hee-Soo Hwang, "Control strategy for optimal compromise between trip time and energy consumption in high speed railway." IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: System and Humans, Vol. 28., No. 6, 1998.
3. 강문호 등, "에너지 최적의 열차속도 계획 생성을 위한 GA 기반 알고리즘", 한국철도학회, 12권 6호, 878-886, 2009.
4. 이태형 등, "전기철도차량 경제운전 모형 개발", 한국철도학회, 9권, 1호, 76-80, 2006.