

### 철도 전기차의 에너지효율화를 위한 패턴 분석

김강희\*, 한문섭\*, 창상훈\*, 정우성\*, 강문호\*\*  
 한국철도기술연구원\*, 선문대학교\*\*

### Analysis on driving pattern of railway electric train for the energy efficiency

Kim Kang-Wheo\*, Han Moonseob\*, Chang Sang-Hoon\*, Jeong Woo-Sung\*, Kang Moon-Ho\*\*  
 Korea Railroad Research Institute\*, SunMoon University\*\*

**Abstract** - In recent years, energy prices have soared, which of course have increased costs for railway operators. Simultaneously, the energy market has considerably changed that in most developed countries, it is deregulated, giving railway operators an opportunity to define new ways of using energy. Efficient operation of the railway system is considered as an essential way to energy saving while an efficient management of power level helps to lower the reference subscribed power, giving access to better energy rates. It is studied on the relation between time and force for the energy efficient driving of train in railway when the train is braking according to several slips.

#### 1. 서 론

철도 전기차의 운행 패턴은 에너지효율화 보다는 운행시간을 맞추는데 급급하였으나 최근의 에너지에 대한 국제적 관심이 대두되면서 에너지 효율화를 고려한 차량의 운행에 연구가 관심사가 되었다.

하지만 운전 패턴은 기관사의 운전습관에 의한 가속과 타행, 감속 등에 따른 운전방식에 따라 에너지 소모가 크게 차이가 난다. 본 논문에서는 기본적인 운행에 대한 검토를 위하여 주행저항을 고려하여 감속에 대한 운전패턴에 대한 연구를 수행하였다.

전기차의 TPS(Train Performance Simulator)를 Matlab SIMULINK를 이용하여 일정 운행거리에서 가속 시에는 최대 에너지 효율성을 내기 위하여 최대 노치로 가속 속력을 올린다음에 감속 시에 슬립을 변화시켜가면서 운행시간과 소요 견인력에 대한 운전 패턴의 특성을 제시하였다.

선로 주변의 시설물이나 전기차 내에 추가시설 없이 실제로 기관사가 운전하는 방식, 제동을 변화를 시켜 열차가 주행 시에 소모되는 에너지를 최소화 함과 동시에 최적의 감속 운전 패턴을 제시하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 TPS SIMULINK모델[1]

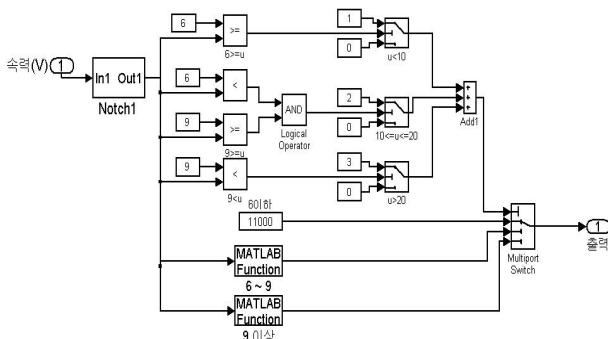


그림 1. 역행모드의 SIMULINK 모델

전기차가 주행을 할 때는 역간의 거리, 구배, 곡선 등의 선로의 조건, 주행저항, 견인력, 제동력, 차량의 성능 등을 말해주는 차량의 특성, 완전주행모드, 타행주행모드, 선로의 제한속도 등이 해당하는 운행제어 등

여러 가지 사항 등을 고려하면서 운전을 해야 한다. 이러한 여러 가지 조건 들을 만족하면서 주행에너지 소비에 최적화 하이 위한 주행은 전기차 의 운전모드에 따라 결정되는데 전기차 의 모드는 역행운전, 타행 운전, 제동운전 모드로 나누어지며 타행운전이란 전기차량의 가·감속 특성곡선을 이용하지 않고 타력으로 운행하는 것을 말한다.

역행 모드에서 큰 견인력을 사용하면 빠른 시간에 가속이 되고 주행 에너지는 크게 되지만 거리에 따른 에너지 효율은 가장 좋으며, 제동모드에서 작은 제동력을 사용하면 정해진 거리에 전기차를 정차시킬 수 없으므로 고정된 역간거리와 운전시분을 만족 할 수 있도록 최적의 타행모드의 시작점과 제동모드의 시작점을 찾는 것이 중요한 변수가 된다.

그림 1은 한 노치에 대한 역행 모드에 대한 SIMULINK모델이다. 속도에 대한 입력 값을 넣으면 속도에 따른 견인력 곡선을 3개 정도의 다항식으로 표현한 함수를 이용하여 그 속도에 따른 견인력이 출력이 된다. 제동모드도 이와 같은 방식이다. 여기서 사용되는 주행저항은  $F_R$ 로 표기하며 구하는 공식은 다음과 같이 사용된다.

$$F_R = a + bv + cv^2 \text{ (kg}_f\text{/ton)}$$

- 단,  $a$ =기계 부 부분저항
- $b$ =레일간의 마찰저항
- $c$ =저기저항과 차량 동요 저항
- $v$ =열차의 속도(km/h)

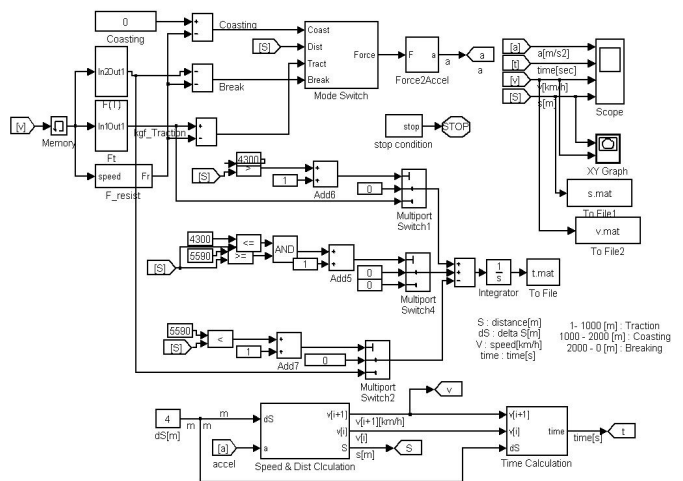


그림 2. 전체 주행의 SIMULINK 모델

그림2는 역행과 타행, 그리고 제동 부분을 하나로 연결하여 시뮬레이션을 할 수 있는 SIMULINK모델이다. 전기차가 역행운행과, 타행운행, 제동운행이 행해지려면 SIMULINK에서는 각각의 3가지 운행에 대해서 다음과 같이 표현을 한다.

- 역행운행  $F = F_T - F_R$  ( $F_T$ ; 가속력)
- 타행운행  $F = -F_R$  ( $F_R$ ; 주행저항)
- 제동운행  $F = -F_B - F_R$  ( $F_B$ ; 제동력)

## 2.2 TPS를 이용한 열차운전시물레이션

그림 3은 TPS 열차주행의 계산과정을 나타내고 있다. A점에서 속도 제한속도에 이를 때까지 가속을 하게 된다. 이때 속도 제한선에 접하는 B지점에서 부터는 일정속도로 운동을 하게 되고 D지점에서는 제동을 시작하여 이두선이 만나는 지점 C지점을 찾게 된다. E지점에서 속도 제한 선에 도달 할 때 까지 가속을 하려하지만 G지점에서는 제동을 시작하여, 이 두선이 겹치는 F점이 나오게 된다. 이러한 주행계산과정을 통하여 최적의 제동 시점을 구할 수 있다[6].

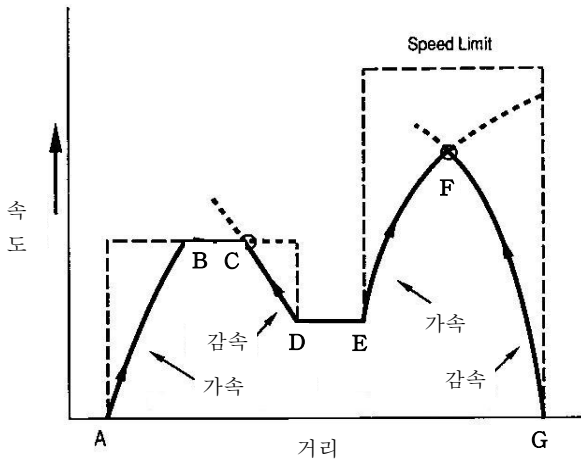


그림 3. TPS 주행계산법

## 2.3 감속 패턴 분석

TPS 주행계산 시물레이션을 이용하여 감속 패턴을 분석하기 위해서 일정 운행 거리와 속도 제한을 정해서 시물레이션을 실행하였다. 시물레이션을 위한 거리는 6km로 정하고 속도 제한은 110km/h로 정하여 시물레이션을 실행하였다. 이때 시물레이션 할 때의 역행은 최대 노치로 역행을 하게 하였다. 최대 노치로 역행을 하게 되면 빠른 시간에 원하는 속도까지 도달 할 수 있고 작은 노치보다 가속시 소요되는 에너지가 가장 적기 때문이다.[1]

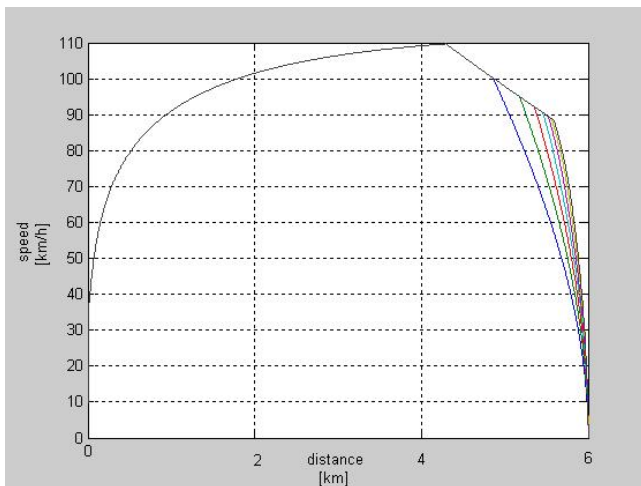


그림 4. 감속 슬립별 운행패턴의 변화

그림 4는 감속 슬립별 운행패턴의 변화를 보여주고 있으며 역행이 110km/h가 되는 시점 4.3km가 되면 그때부터 타행을 시작하게 되고 각 슬립별로 6km에 정차하기 위해서 타행 시작점이 변화하는 것을 볼 수 있다, 슬립이 작을수록 타행시작 위치가 빠르고 타행시작 속도도 큰 것을 볼 수 있다.

그림 5는 각 슬립별로 운행한 결과 소요 견인력에 대한 운행시간을 보이고 있다. 전반적으로 볼 때, 각 슬립별 운행시간과 소요견인력의 변

화는 슬립 s3000에서 s6000과 s7000에서 s9000, 2범위에서 선형성을 보이고 있으며 s6000과 s7000 사이에서 제동시간에 비해 다소 큰 소요 견인력의 차이를 보이고 있다.

결과적으로

1. 제동시 s3000과 s6000사이의 슬립을 사용하는 것이 최적의 소요 견인력을 얻을 수 있다.
2. 슬립이 작을수록 타행 거리가 짧고 슬립이 크면 타행거리가 길지만 반대로 제동시간은 길고 짧아져, 소요 견인력은 작고 크다.

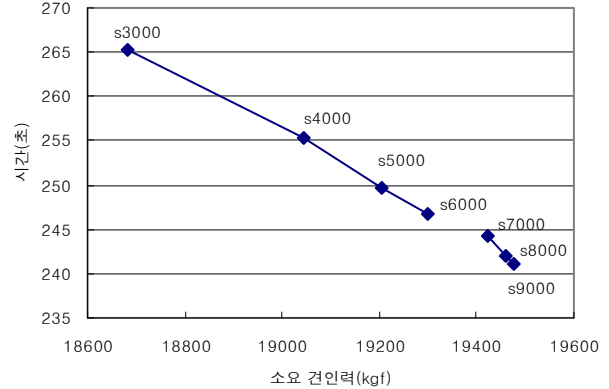


그림 5. 각 슬립별 소요 견인력에 대한 운행시간 변화

## 3. 결 론

본 논문에서는 서울지하철 4호선에서 운행 중인 전기차를 대상으로 가속 및 감속에 대하여 Matlab SIMULINK로 구현한 TPS 주행시물레이션을 수행하였다.

시물레이션 결과 제동시간과 소요 견인력을 보았을 때 2범위의 선형성을 나타남을 알 수 있어 제동시간만 확보된다면 이중 1범위에서 제동하는 것이 에너지 효율화에 기여할 것 이라 판단된다.

최적 주행을 달성하기 위해 본 논문에서는 짧은 타행거리에서 감속운행을 하는 것 보다 타행거리를 좀 더 두어서 큰 슬립으로 타행을 하는 것이 효과 적이라는 결과가 나왔다. 하지만 이것들을 실제로 적용시키기 위해서는 그만큼 타행 길어질 지므로 앞으로 운행거리에 따른 운행시간이 확보가 된다면 앞으로도 이에 대한 연구가 추후에 계속 진행 되어야 할 것이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 김강희, "철도 전기차의 에너지 효율화를 위한 가·감속 패턴", 한국에너지 공학회, pp. 1~6, 2009
- [2] P.G. Howlett and P.J. Pudney, "Energy-Efficient Train Control", Springer, pp. 1~24, 1995
- [3] C.S. Chang and S.S. Sim, "Optimising train movements through coast control using genetic algorithms", IEE proc. Electr. Power, Vol. 144, pp. 65~73, 1997
- [4] "과천/분당성 인버터제어 전동차 정비지침서", 철도청 pp.1-46~1-51, 1994
- [5] 김치태, "전동열차의 주행에너지 소비를 최소화 하는 최적 운전" pp. 18~46, 2001
- [6] 주영복, "에너지節約을 위한 列車運行戰略에 관한 시물레이션 研究" pp. 1~6, 2008