

전동열차의 주행에너지 소비를 절감하는 운전모드 해석

김 치 태^{*1)} · 김 동 환²⁾ · 박 영 일²⁾ · 한 성 호³⁾

철도청¹⁾ · 서울산업대학교²⁾ · 철도기술연구원³⁾

Optimal Driving Mode Analysis for Reducing Energy Consumption in Electric Multiple Unit

Chi Tae Kim^{*1)} · Dong Hwan Kim²⁾ · Young Il park²⁾ · Sung Ho Han³⁾

¹⁾Department of High Speed Railway CTC, Korea Railway, 267 Iljik-dong, Gwangmyeong-si, Gyeonggi 423-090, Korea

²⁾Department of Mechanical Design, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

³⁾Korea Railroad Research Institute, 374-1 Woulam-dong, Uiwang-si, Gyonggi 437-050, Korea

(Received 21 June 2004 / Accepted 22 October 2004)

Abstract : A train driving requires to run the fixed distance within given time, and it is desirable to consume low energy if necessary. Reducing energy consumption depends on the train operation modes by either manual or automatic operation. In this article, an operation to reduce energy consumption by changing modes of train operation by a driver without changing the train operation requirement is investigated. The powering model, braking model and consumed energy calculation model are developed, then simulated by using a Matlab software. The accuracy of the train dynamic model established by the simulations is verified by comparing with the real experimental data. Several simulations by various operations in the real track are executed, then the desirable pattern of train driving is found.

Key words : Powering(역행), Coasting(타행), Regenerative braking(회생제동), Consumed energy(주행에너지), Train operation(열차운전), Optimal driving(최적주행)

Nomenclature

- v : train velocity, m/s
- a : acceleration, km/h/s
- γ : deceleration, km/h/s
- m : mass of train, $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$
- k : spring coefficient
- b : damping coefficient
- F : traction or braking force, kg_f
- J : total consumed energy, kWh

1. 서론

최근 전기철도는 타 교통시스템에 비하여 환경친화성, 정시성, 안전성 측면에서 사회적 주요 관심 대상이 되고 있으며 보다 효율적인 최적의 주행을 위하여 승차감 향상, 주행에너지의 절감, 정시성의 확보를 위한 최적운전에 관한 연구가 계속 되어져 오고 있다.^{1,2)} 그러나 역간 거리와 운전시분이 짧고 회생제동을 사용하는 전동열차의 주행에너지 소비를 절감시키기 위한 최적주행(본 논문에서 최적주행의 의미는 계획된 운전시분과 역간 거리를 만족하면서 주행에너지를 절감하는 주행패턴을 말한다)에 관한 연구는 아직까지 미비한 상태이다. 또한 수

*To whom correspondence should be addressed.
chiti91@freechal.com

도된 전동열차의 경우 혼잡시간대를 제외하면 여유 운전시분³⁾이 더 발생하게 되는데 이렇게 발생한 여유 운전시분과 회생제동의 특성을 잘 활용하여 운전모드를 변화시키면 주행에너지 소비를 더욱 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

이를 위해 본 연구에서 개발된 주행 해석 모델을 실 노선의 역간 주행 실험치와 비교하여 모델의 유용성을 검증하고 다양한 조건하에서 시뮬레이션을 수행하여 운전모드의 변화를 통해 전동열차의 주행에너지 소비를 절감하는 최적주행(또는 에너지 소비 절감 주행)패턴을 찾고자 한다.

2. 열차의 주행과 주행에너지

2.1 열차의 주행

2.2.1 열차의 최적주행

열차는 여러 가지 선로의 조건, 차량의 특성, 운전시각의 단축을 위한 운행제어, 승차감 향상 등 많은 것을 고려하면서 운전하게 된다. 이러한 여러 가지 조건을 만족하면서 주행에너지의 소비를 최소화하는 최적주행은 열차의 운전모드에 따라 결정되는데 열차의 운전모드는 역행 운전모드, 타행 운전모드, 제동 운전모드로 나누어지며⁴⁾ 역행 운전모드를 짧은 시간 적용하면 주행에너지는 적게 소비되지만 운행속도가 낮아져 정해진 운전시분을 만족할 수 없게 되고 제동 운전모드를 빨리 적용하면 고정된 역간 거리를 만족할 수 없으므로 고정된 역간 거리와 정해진 운전시분을 만족하는 타행 운전모드의 시작점과 제동 운전모드의 시작점을 결정하는 운전모드의 선정이 최적주행을 결정하는 중요한 변수가 된다.

2.2.2 열차의 운전모드와 주행에너지

전동열차는 가선으로부터 공급받은 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환시켜 열차를 가속하게 된다. 이때 열차가 역행 운전모드 시 소비하는 에너지는 전체 소비에너지의 대부분을 차지하며, 역행 운전모드시의 에너지 소비를 줄이는 것이 열차의 주행에너지를 절감하는 주요한 변수가 된다. 또한 운행 중 여유운전시분이 발생하면 이를 활용하여 역행 운전모드시의 최고속도를 낮출 수 있으므로

주행에너지를 더욱 절감할 수 있게 된다.³⁾ 이와 같은 이유로 일반적인 제동을 사용하는 열차의 경우 주행에너지 절감을 위한 운전모드는 제동 운전모드에서 열차가 가진 최대 제동력을 사용함으로써 운전시분을 단축시키고 이를 역행 운전모드에서의 최고속도를 낮추는 것으로 활용하여 주행에너지를 절감하게 된다.

열차를 궤도상의 일정한 속도까지 주행시키고 나면 타행 운전모드를 시작하게 되는데 타행 운전모드의 시작은 공급된 에너지가 열차의 운동에너지와 위치에너지로 저장되면서 궤도 위에서 타력 주행함을 말한다.

일반적으로 제동 운전모드는 궤도상을 따라 주행하고 있는 열차가 가지고 있는 운동에너지를 감소시키거나, 0 (zero)으로 만들기 위해 견인력에 대해 반대방향의 힘을 작용시키는 것을 말한다(본 논문에서 에너지 손실이나 소비의 의미는 열차의 주행과 관련 없는 자연상태의 에너지로 변환됨을 말한다).

1984년 도입된 인버터제어 전기동차는 제동 시 회생되는 에너지를 전차선으로 반환시키는 회생제동의 사용으로 주행에너지를 더욱 절감하게 되었다. 이 인버터제어 전기동차의 제동은 먼저 회생제동이 사용되고 전체제동력의 부족분을 공기제동이 담당하도록 되어 있는데 이러한 회생제동의 특성을 잘 활용하여 열차의 운전모드를 변화시키면 주행에너지 소비를 절감할 수 있을 것으로 예상된다.⁵⁾

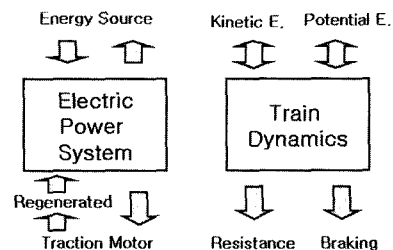


Fig. 1 A diagram of energy flow in electric multiple unit

본 논문에서는 제동 특성에 관한 자세한 내용은 상세히 언급하지 않고 주행에너지의 계산으로 대체한다.

2.2 열차의 주행에 따른 소비 에너지

2.2.1 열차에 있어서 에너지(energy)의 흐름

일반적으로 에너지는 Fig. 1과 같이 연료의 연소나 전기적인 에너지로 열차에 공급된다. 이 에너지는 견인전동기에 의해 기계적 에너지로 바뀌어 열차를 가속시키고 주행 중 열차의 주행저항, 구배저항, 곡선저항 등에 의해 손실되며, 제동작용에 의해 소비된다.¹⁾

본 논문에서의 주행에너지라 함은 역행 운전모드 시 소비되는 에너지와 제동 운전모드 시 회생되는 에너지, 즉 역학적 에너지를 말한다.

2.2.2 주행에너지의 산출

열차의 운동은 가해진 힘에 따라 대체로 평탄한 궤도를 따라 움직이는 하나의 질점의 운동으로 가정하고, 다음의 미분방정식을 만족한다.

$$v(t) = \frac{dx}{dt} \tag{1}$$

$$m\dot{x}(t) = F(t) - R(v(t)) + G(x(t))$$

여기서, t 는 시간, $x(t)$ 는 열차의 위치, $v(t)$ 는 열차의 속도, m 은 열차의 질량, $F(t)$ 는 열차에 가해진 힘의 성분, $-R(v(t))$ 는 주행저항, 그리고 $G(x(t))$ 는 구배저항을 말한다.⁶⁾

만약 열차가 정차상태에서 출발한다면 출발시간은 $t=0$ 이고 도착시간이 $t=T$ 라면, $x(0)=v(0)=0$ 이 된다. 또한 $x(0)=0$ 이고, $t=\tau \geq 0$ 일 때 열차에 의해 주행된 거리는 아래와 같다.

$$x(\tau) = \int_0^\tau v(t) dt \tag{2}$$

따라서 총 주행거리가 X 이면 $x(T)=X$ 이다.¹⁾

열차에 가해진 힘 F 의 경우, 양의 방향의 힘 $F_+(F(t)>0)$ 와 음의 방향의 힘 $F_-(F(t)<0)$ 로 구분되는데 $F(t)>0$ 인 경우는 에너지가 열차에 공급되어 가속을 하는 경우이고, $F(t)<0$ 인 경우는 제동에 의해 열차에 공급된 에너지가 소비되는 경우이다. 따라서, 열차의 주행에 의해 소비된 에너지 $J[kWh]$ 는 역행 시에 소비된 양(+)의 방향의 힘 $F_+(t)$ 에 의해 계산되는 J_+ 에서, 회생제동 시 에너지원으로 반환된 음(-)의 방향의 힘 $F_-(t)$ 에 의해 계산되는 J_- 를 식(3)과 같이 빼주어야 한다.¹⁾

$$J = J_+ - J_- \tag{3}$$

$$= \int_0^T F_+(t)v(t)dt - \int_0^T F_-(t)v(t)dt$$

3. 전동열차 모델링

3.1 전동열차의 구성

본 논문에서 모델링 하고자 하는 일산선 전동열차는 Tc-M-M-T-M-T1-T-M-M-Tc의 10량 편성으로 구성되며 각 M차마다 판토틀라프가 2개씩 설치되어 총 10개의 집전장치를 가지고 운행되며 M차 1량당 4개의 견인모터를 가지고 있어 역행 시에는 견인력을, 제동 시에는 회생제동력을 발휘한다. Tc차는 운전 제어실이 설치된 차량을 말하고 T1차는 SIV(Static Inverter : 객실보조전원장치)가 설치된 차량, T차는 추가적인 장치 없이 승객 수송을 위한 차량을 말한다.

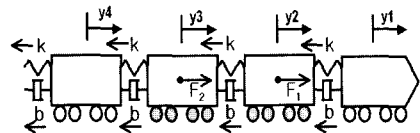


Fig. 2 Freebody diagram of EMU

3.2 전동열차 모델링

본 논문에서는 Fig. 2와 같이 서로 다른 질량 M_i 를 가진 각각의 차량을 스프링계수 k 와 댐핑 계수 b 의 요소로 연결되어 있다고 가정하여 모델링 하고, 또한 열차가 궤도상을 주행 할 때 휠(wheel)의 구름만이 존재하고 미끄러짐은 없다고 가정한다. 여기서 k 는 스프링계수, b 는 댐핑계수, y 는 변위이며, M_i 는 각 차량의 질량을 나타낸다. 힘 F_i 는 각각의 M차에서 발생하는 동륜주(wheel rim) 견인력이다.

뉴턴의 운동방정식에 의하여 운동방정식은 다음과 같이 결정된다.

$$M_1 \ddot{y}_1 = -k(y_1 - y_2) - b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2)$$

$$M_2 \ddot{y}_2 = F_1 + k(y_1 - y_2) + b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) - k(y_2 - y_3) - b(\dot{y}_2 - \dot{y}_3)$$

$$\vdots$$

$$M_9 \ddot{y}_9 = F_5 + k(y_8 - y_9) + b(\dot{y}_8 - \dot{y}_9) - k(y_9 - y_{10}) - b(\dot{y}_9 - \dot{y}_{10})$$

$$M_{10} \ddot{y}_{10} = k(y_9 - y_{10}) + b(\dot{y}_9 - \dot{y}_{10}) \tag{4}$$

다음과 같이 상태변수를 정의하면,

$$\begin{aligned} X_1 &= y_1 & X_2 &= \dot{y}_1 \\ X_3 &= y_2 & X_4 &= \dot{y}_2 \\ &\vdots & &\vdots \\ X_{19} &= y_{10} & X_{20} &= \dot{y}_{10} \end{aligned} \tag{5}$$

따라서, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2 \\ \dot{X}_2 &= -\frac{k}{M_1} X_1 - \frac{b}{M_1} X_2 \\ &\quad + \frac{k}{M_1} X_3 + \frac{b}{M_1} X_4 \\ \dot{X}_3 &= X_4 \\ \dot{X}_4 &= \frac{k}{M_2} X_1 + \frac{b}{M_2} X_2 \\ &\quad - \frac{2k}{M_2} X_3 - \frac{2b}{M_2} X_4 \\ &\quad + \frac{k}{M_2} X_5 + \frac{b}{M_2} X_6 \\ &\quad + \frac{F_1}{M_2} \\ &\quad \vdots \\ \dot{X}_{19} &= X_{20} \\ \dot{X}_{20} &= \frac{k}{M_{10}} X_{17} + \frac{b}{M_{10}} X_{18} \\ &\quad - \frac{k}{M_{10}} X_{19} - \frac{b}{M_{10}} X_{20} \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 F_1, \dots, F_5 는 각 M차에 입력되는 견인력 또는 제동력이며 본 논문에서는 각 M차의 견인력 혹은 제동력이 동일한 것으로 한다. 또한 각각의 스프링상수와 댐핑 계수도 동일한 것으로 하고, 시스템의 출력(y)을 운전실이 있는 첫 번째 차량의 속도(X_2)로 한다. 따라서,

$$y = X_2 \tag{7}$$

가 된다.

위의 열차시스템을 상태방정식의 표준형으로 나타내면,

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \tag{8}$$

이므로, 상태행렬 A와 입력행렬 B, 출력행렬 C는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k}{M_a} & -\frac{b}{M_a} & \frac{k}{M_a} & \frac{b}{M_a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k}{M_b} & \frac{2b}{M_b} & -\frac{2k}{M_b} & -\frac{2b}{M_b} & \frac{k}{M_b} & \frac{b}{M_b} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ B &= [0 \ 0 \ \frac{1}{M_2} \ 0 \ -\frac{1}{M_3} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -\frac{1}{M_6} \ 0 \ 0 \ 0 \ -\frac{1}{M_8} \ 0 \ -\frac{1}{M_9} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ C &= [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \\ D &= [0] \end{aligned} \tag{9}$$

식 (9)의 수식 중 M_x 에서 x 는 $a=1, b=2, \dots, i=9, j=10$ 을 나타낸다. 그리고 편의상 0_{18} 등은 0의 값이 18개 행렬의 요소(행방향)로 존재함을 나타낸다.

4. 시뮬레이션을 위한 Matlab모델

4.1 역행모델

역행모델에서 가장 중요한 견인력은 열차성능 곡선에 나타나는 동륜주(wheel rim)에서의 견인력 [kgf]을 사용하며 역행시간(powering time)을 정해 주면 주어진 시간 동안 열차시스템에 속도에 따른 인버터의 제어 모드별로 견인력⁶⁾을 산출하여 입력한다. 정토오크 영역(0~35 km/h)에서의 기동견인력(F_T)은,

$$F_T = 28.35(W_M \times I_M + W_T \times I_T + W_p) \times a + R_{35} \text{ [kgf]} \tag{10}$$

으로 계산되며 여기서 W_M 은 Motor차의 중량[ton]이고, W_T 는 운전실이 있는 W_{Tc} 와 SIV가 설치된 W_{Tn} , 그리고 부수차인 W_T 의 중량[ton]을 말하며 W_p 는 승객하중[ton], a 는 가속도[km/h/s], R_{35} 은 35 km/h일 때의 주행저항[kgf]이다.⁷⁾ 단위환산계수 28.35는 질량을 중량으로 m/s^2 을 $km/h/s$ 로, kg_f 를 ton으로 바꾸어 준다. 회전 부분에 대한 관성질량 보정계수³⁾로 I_M 은 M차, I_T 는 T차에 대해 사용한다.

열차의 최대견인력은 0~35 km/h일 때가 가속도 3.0 km/h/s를 유지하기 위해 가장 크며 정출력 영역(35~60 km/h)은 속도에 반비례하고 전동기특성 영역(60~110 km/h)에서는 속도의 제곱에 반비례하는 특성을 나타낸다.⁸⁾ 정출력 영역(35~60 km/h)에서의 견인력은 식 (11)로 계산한다.

$$F_P = \frac{F_T \times V_T}{V_P} \quad [kg_f] \quad (11)$$

여기서 F_P 은 정출력 영역에서의 견인력[kg_f], V_T 는 정토크 영역에서의 중단속도[km/h], V_P 는 정출력 영역의 중단속도[km/h]이다.⁹⁾

마지막으로 전동기특성 영역(60~110 km/h)에서의 견인력은,

$$F_M = \frac{F_P \times V_P^2}{V_M^2} \quad [kg_f] \quad (12)$$

이고, F_M 은 전동기특성영역에서의 견인력[kg_f], V_P 는 정출력 영역의 중단속도[km/h], V_M 은 열차의 최고속도[km/h]를 나타낸다.⁹⁾

4.2 제동모델

제동시 감속도 β 는 상용최대제동(7스텝)시 3.5 km/h/s이며 비상제동 시 4.5 km/h/s이다. 상용최대 감속도는 3.5 km/h/s에서 회생제동의 분담율은 일산 선 전기동차의 경우 약 84.7%이며 계산상으로는 약 2.96 km/h/s 까지는 회생제동만으로 가능한 것으로 되어 있지만 실제로는 그 여유분을 감안하여 감속도 2.85 km/h/s 까지는 회생제동만으로 제동이 가능하도록 되어 있다.¹⁰⁾ Fig. 3의 견인력 분담선도에서도 볼 수 있듯이 기관사가 상용 최대 제동인 7스텝 제동을 사용하면 감속도 3.5 km/h/s를 만족시키기 위해 회생제동 이외에 공기제동이 추가로 적용되어야 하고 5스텝 제동을 사용하면 2.5 km/h/s의 감속도를 유지하므로 회생제동 만으로도 열차를 감속 혹은 정차할 수 있게 된다. 또한 제동 시에는 역행시의 역순으로 인버터 제어모드가 적용되어 제동력은 정토크 영역인 52~10 km/h에서 회생제동이 최대가 된다.

전체제동력 F_B [kg_f]의 계산은 상용최대 제동 시 (7step) 가속도 3.5 km/h/s를 얻기 위해 열차속도 35

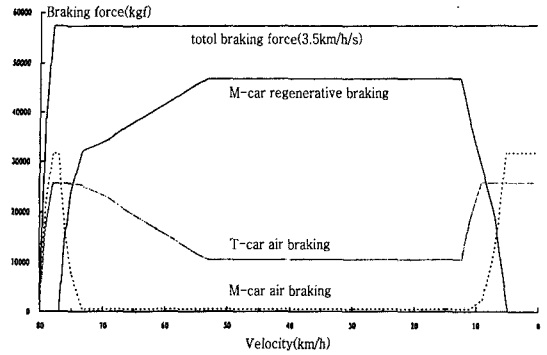


Fig. 3 Cross blending (7 step, fully loaded)

km/h일 때의 주행저항(R_{35})을 사용하여 식 (13)과 같이 나타낸다.

$$F_B = 28.35 (W_M \times I_M + W_T) \times I_T + W_P \times \beta - R_{35} \quad [kg_f] \quad (13)$$

정토크 영역에서 열차의 최대 회생제동력 (F_{Rg})은 식 (14)와 같이 계산된다.⁷⁾

$$F_{Rg} = W_M \times 1000 \times \mu \quad [kg_f] \quad (14)$$

식 (14)에서 F_{Rg} 는 열차 전체의 회생제동력[kg_f]이며, W_M 은 M차의 총 중량[ton], μ 는 제동 시 기대 점착 계수이다.

4.3 주행저항모델

전동열차의 주행저항 R_v 은 지하구간에서 식 (15)와 같이 표현된다.

$$R_v = 1.865 + 0.0359 V + 0.000745 V^2 \quad [kg_f/ton] \quad (15)$$

여기서 V 는 열차의 속도[km/h]인데, 열차의 총 중량을 곱하여 열차의 주행을 방해하는 힘으로 작용한다.⁹⁾

4.4 주행에너지 산출모델

주행에너지의 계산은 식 (3)을 이용하여 역행 시에 소비된 에너지는 열차를 견인하는데 공급된 견인력 $F_v(t)$ 와 열차의 속도 $v(t)$ 와의 곱을 적분함으로써 구할 수 있고¹⁾ 회생에너지의 계산은 Fig. 4와 같이 인버터의 특성에 따라 5단계로 구분하여 회생 에너지 J_- [kWh]는 식 (16)으로 구할 수 있다.

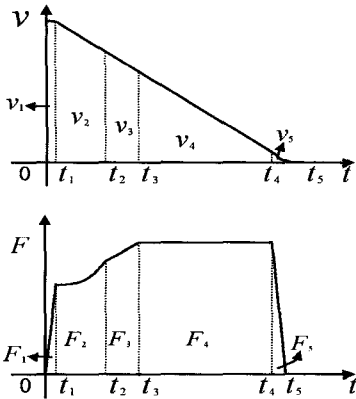


Fig. 4 Regenerative braking force and velocity for consumed energy calculation

이때 회생제동에 의한 회생에너지의 계산은, Fig. 4에서 보는 바와 같이 기관사가 제동을 처음 적용한 제동 시작 지점에서 실질적인 회생제동력 이 발생하기까지의 시간 ($t_0 \sim t_1$)과 정차직전 10 km/h이하의 속도에 해당하는 시간 ($t_4 \sim t_5$)은 회생제동이 극히 미약하거나 전혀 없는 상태이므로 0에 가까운 것으로 계산한다.¹⁰⁾

$$J_- = \int F_1 v_1 dt + \int F_2 v_2 dt + \int F_3 v_3 dt + \int F_4 v_4 dt + \int F_5 v_5 dt \quad (16)$$

따라서 제동을 개시한 후 시간 $t_0 \sim t_1$ 과 $t_4 \sim t_5$ 의 회생에너지는 식 (17)과 같다.

$$\int_{t_0}^{t_1} F_1 v_1 dt = \int_{t_4}^{t_5} F_5 v_5 dt \cong 0 \quad (17)$$

Fig. 5는 주행에너지를 계산하기 위해 시뮬링크를 사용한 블록 다이어그램이다. 입력요소로는 견인력과 제동력 그리고 속도가 입력되며 제동력 중에서 공기제동을 제외하고 속도별 인버터제어 특성에 따른 회생제동력을 주행에너지 계산에 사용한다. 출력요소로는 역행 시에 소비된 에너지에서 회생된 에너지를 뺀 전체 소비에너지가 출력된다.

5. 시뮬레이션 결과 및 실험치와 비교

5.1 시뮬레이션 방법 및 입력 파라미터

5.1.1 시뮬레이션 진행방법

먼저 시뮬레이션을 실행하기 전에 Matlab으로 구현한 시뮬레이션 모델을 실노선의 주행결과와 비교하여 구현된 모델이 정확한지를 확인한다. 그런 다음 실노선에서 계획운전시분 내에서의 운전과 여유 운전시분 10sec가 발생한 경우의 조건에 대하여 전동열차의 제동단수(1~7스텝) 중 기관사들이 주로 사용하는 3스텝, 5스텝, 7스텝 제동을 각각 적용하

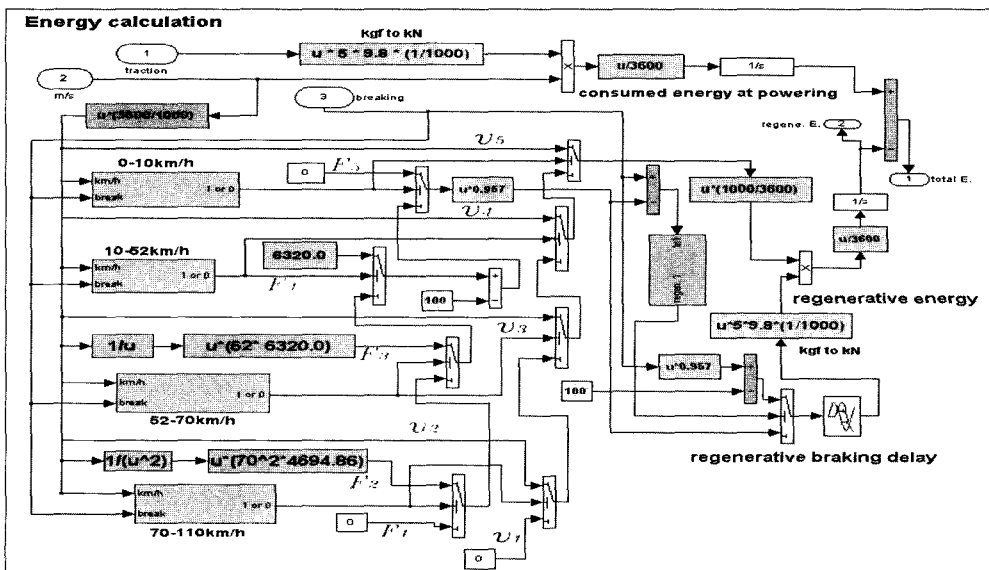


Fig. 5 Block diagram of energy calculation

여 시뮬레이션을 실행한 후 최적의 운전패턴을 찾는다.

5.1.2 시뮬레이션 입력 파라미터 선정

시뮬레이션을 위한 입력 파라미터는 Table 1과 같으며 승객의 하중은 승객의 이용수가 적은 시간대를 가정하여 총 10 ton으로 하였다.

Table 1 Input parameters for simulation

Weight of motor car : W_M (5car)	192.5ton
Weight of train control car : W_{Tc} (2car)	65.6ton
Weight of trailer car : W_T (2acr)	53.0ton
Weight of trailer car with SIV : W_{T1} (1car)	31.7ton
Weight of passengers : W_P (10car)	10ton
Spring coefficient : k	700000
Damping coefficient : b	203000
Expected friction coefficient : μ	0.176
Inertia coefficient of M-car : I_M	0.14
Inertia coefficient of T-car : I_T	0.06
Running resistance at 35km/h : R_{35}	1423.9 kgf
Max. traction force at 0~35km/h : F_T	34488.8 kgf
Max. traction force at 35~60km/h : F_P	16094.8 kgf
Max. traction force at 65~110km/h : F_M	4788.8 kgf
Maximum braking force : F_B	37151.8 kgf
Maximum regenerative braking force : F_{Rg}	31600.0 kgf

5.2 실 노선 대상으로 시뮬레이션 모델 검증

Fig. 6의 실 주행결과와 일산선 마두 - 정발산 역간에서 운전한 차량에서 출력한 속도그래프이며 실 주행 결과와 같은 조건을 주어 시뮬레이션의 정확성을 검증한다. 실 주행 결과의 운행조건은 주행거리 931 m, 운행시분은 여유운전시분이 발생하여 100 sec, 운행방향은 수서에서 대화방면이고 승객하중은 총 10 ton으로 입력하였다.

Fig. 6과 Fig. 7을 비교해 보면 약간의 차이가 있으나 이 차이는 실 주행시의 전차선 전압, 승객의 하중, 열차의 속도를 측정하는 휠(wheel)의 마모 등에 따라 다소 차이를 보일 수 있을 것으로 추측된다. 그러나 본 논문에서 제시한 차량 동적모델, 추정 파라미터 및 타행 시점 계산 등을 토대로 한 주행 시뮬레

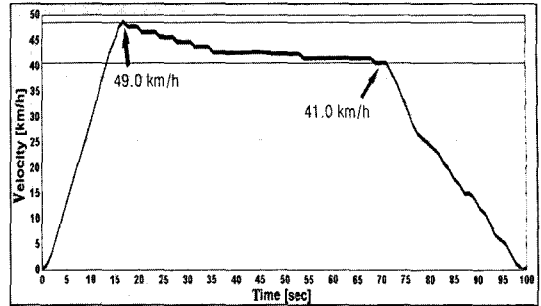


Fig. 6 Experimental data of speed profile of Madu-Jeongbalsan stations

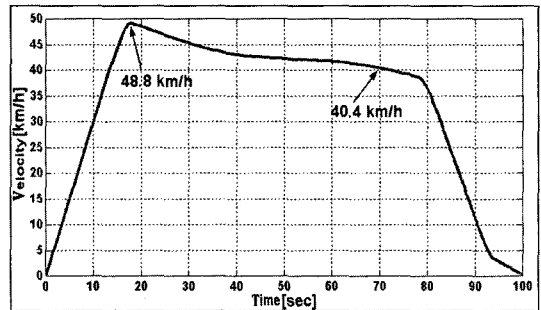


Fig. 7 Simulation result of speed profile of Madu-Jeongbalsan stations

이션 모델의 신뢰성이 상당히 높음을 알 수 있다.

5.3 실 노선에서의 시뮬레이션 결과

다음으로 시뮬레이션 모델을 이용하여 각 운전 모드에 따른 주행에너지의 변화를 계산한다.

5.3.1 모드A : 계획운전시분내 운전

마두-정발산역간 실주행 조건은 Table 2와 같다. 실제 마두역 홈에는 800R의 곡선이 29m 존재하나 곡선저항 값이 매우 작기 때문에 0 (zero)으로 간주한다. Table 3의 모드A를 보면 마두 - 정발산역간 931m를 계획운전시분인 90 sec에 주행한 경우, 비교적 역간 거리가 짧음에 비해 운전시분이 길어 최고속도를 전반적으로 많이 높이지 않아도 됨을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 3스텝 제동을 사용할 경우 제동시간이 길어져 9.5 kWh로 회생에너지가 많은 반면 정해진 운전시분을 만족하기 위해 역행시의 최고속도를 많이 높여 17.8 kWh로 주행에너지 소비가 큰 것을 알 수 있고 모드A의 case2와 case3는 역행 운전모드시의 에너지 소비는 0.8 kWh로 큰 차이

Table 2 Track conditions of Madu - Jeongbalsan stations

Distance [m]	Scheduled time [sec]	Speed limit [km/h]	Passenger loads [ton]
931	90	80	10
Gradient [%]			
0-175m	175-485m	485-825m	825-1031m
5	4.7	-3	2.9

Table 3 Simulation results of Mode A (Case1 ~ Case3)

Mode A	Case1	Case2	Case3
Maximum speed [km/h]	61.3	54.4	52.8
Consumed powering energy [kWh]	17.8	13.8	13.0
Applied braking step	3	5	7
Starting velocity of braking [km/h]	56.1	45.8	43.6
Regenerated energy [kWh]	9.5	6.1	4.7
Total consumed energy [kWh]	8.3	7.8	8.4

가 없으나 제동 운전모드 시 유사한 회생제동력으로 더 오랜 시간 제동 운전모드를 유지해 회생에너지가 1.4 kWh나 더 큰 case2의 5스텝 제동을 사용한 경우가 주행에너지 절감 효과가 큰 것을 알 수 있다.

지금까지는 제동 시 열차가 가진 최대의 제동력을 사용하면 역행 운전모드에서의 최고속도를 낮출 수 있게 되어 주행에너지를 절감할 수 있다고 여겨져 왔으나 제동 시 에너지를 회생하는 전동열차는 역행 운전모드에서 최고속도를 다소 높더라도 회생제동 한계를 벗어나는 최대제동력-7스텝 제동을 사용하는 것보다 7스텝 제동과 회생제동력이 유사한 5스텝 제동을 사용함으로써 제동시간이 길어져 회생에너지가 많아지므로 5스텝 제동을 사용하는 것이 더 많은 주행에너지 절감 효과를 가져온다는 것을 알 수 있다.

5.3.2 모드B : 여유운전시분 이용

모드B는 계획운전시분 90 sec에 승객의 승하차시간 단축으로 인해 여유 운전시분 10 sec가 늘어난 경우의 시뮬레이션이다. Table 4의 시뮬레이션 결과를 보면 운전시분 10 sec가 더 늘어남에 따라 모드A의 경우 보다 전반적으로 주행에너지의 소비가 줄었고 역시 회생제동 분담율 내에서 감속도가 높은 5스텝 제동을 사용한 경우가 6.7 kWh로 주행에너지 소비가 가장 적은 것을 알 수 있다.

Table 4 Simulation results of Mode B (Case1 ~ Case3)

Mode B	Case1	Case2	Case3
Maximum speed [km/h]	50.1	47.3	46.7
Consumed powering energy [kWh]	11.7	10.4	10.1
Applied braking step	3	5	7
Starting velocity of braking [km/h]	41.6	36.6	35.3
Regenerated energy [kWh]	4.9	3.6	2.9
Total consumed energy [kWh]	6.8	6.7	7.2

일반적으로 열차를 운전하는 기관사들은 혼잡시간대를 제외하고 승객의 승하차시간 단축으로 한역에서 10~20 sec의 여유운전시분이 발생되면 홈에 정차한 상태로 여유운전시분을 소비한 후 다시운전을 개시하게 되는데 Table 5에서 알 수 있듯이 발생된 여유운전시분을 다음 역까지의 운전시분으로 활용하면 최소 12.0% 이상의 많은 주행에너지 절감할 수 있게 된다.

Table 5 Comparison of consumed energy under different operation conditions

Braking step	Total consumed energy [kWh]		Saving ratio by different time[%]
	Mode A	Mode B	
3 step	8.3	6.8	19.3
5 step	7.8	6.7	14.1
7 step	8.4	7.2	12.0

모드A와 모드B의 시뮬레이션 결과를 비교해 보면 모드A-case2의 제동 5스텝을 사용하면 case1의 제동 3스텝을 사용하는 경우보다 6.4%, case3의 제동 7스텝을 사용하는 경우보다 주행에너지 7.1% 절감하였고, 모드B-case2의 제동 5스텝을 사용한 경우 case1의 3스텝 제동을 사용한 경우보다 1.5%, case3의 7스텝 제동을 사용한 경우보다 6.9%의 주행에너지를 절감한 것을 알 수 있다. 또한 주행시간이 10 sec가 늘어남에 따라 제동 3스텝의 경우 19.3%, 제동 5스텝의 경우 14.1%의 주행에너지를 절감한다는 것을 알 수 있고 제동 7스텝의 경우 12.0% 절감한다는 것을 알 수 있다. 결국 승객의 승하차 단축으로 인한 정차시간의 활용이 실 노선의 주행에서도 주행에너지 절감에 대단히 큰 효과가 있음을 알 수 있다.

5.4 시뮬레이션 결과고찰

회생제동을 사용하는 인버터제어 전기동차는 5스텝 제동과 7스텝 제동에 의한 회생제동력이 같으므로 감속도가 높은 7스텝 제동을 사용하면 제동시간이 짧아져 오히려 회생에너지가 적어지는 결과를 가져와 주행에너지 소비는 5스텝 제동을 사용한 경우가 적어지게 된다. 따라서 인버터제어 전기동차의 최적주행을 위한 제동스텝은 5스텝이 되는데, 단지 5스텝 제동을 사용한다고 해서 최적주행이 되는 것이 아니라 5스텝 제동을 사용할 수 있는 운전모드의 선정 즉, 타행과 제동운전모드의 시작점이 동시에 결정되어야 한다.

또한 실제로 열차를 운전하는 기관사는 홈에 진입하면서 정차 제동을 사용할 경우 유사시의 안전을 대비하여 최대제동력의 약 60%~70%만을 사용한다는 점을 고려하면 5스텝제동의 사용은 열차의 안전을 위해서나 주행에너지 소비를 절감하는 최적주행을 위해서나 가장 적합한 제동 스텝이 될 것이다.

Table 6 Conditions for optimal operation

	Mode A	Mode B
Distance of inter-station [m]	931.0	931.0
Scheduled time [sec]	90.0	100.0
Maximum speed [km/h]	54.4	47.3
Consumed powering energy [kWh]	13.8	10.4
Starting time of braking [sec]	66.9	80.8
Starting velocity of braking [km/h]	45.8	36.6
Regenerated energy [kWh]	6.1	3.6
Total consumed energy [kWh]	7.8	6.7

또한 운행 중 여유운전시분이 발생되면 이를 홈에 정차한 상태로 소비하지 않고 다음 역까지의 운전시분에 활용하면 많은 주행에너지를 절감할 수 있게 된다.

Table 6은 시뮬레이션을 통해 찾은 마두-정발산 역간 최적운전 조건이다. 이 결과에서 알 수 있듯이 여유운전시분을 활용하는 모드B 5스텝 제동이 에너지 소비를 가장 적게 함을 알 수 있고 이 방법이 권장되어야 할 것이다. 기존의 제동 방법인 7스텝으로 하여 제동력을 높여 주행 시간만을 맞추기 위한

노력보다는 5스텝 제동을 이용하여 주행시간이 늘어나는 것을 타행 시점을 조절하는 방법을 채택하는 것이 보다 효과적이다. 물론 주어진 정차시간, 역간 운전시분 등 제반 조건을 모두 만족시키고 에너지 소비를 절감할 수 있는 방법이 있음을 본 모델 및 해석을 통해 확인할 할 수 있다.

6. 결론 및 차후과제

본 논문에서는 전동열차의 주행에너지 소비를 절감하는 최적주행 패턴을 찾기 위해 현재 철도청 일산선에서 운행중인 VVVFin버터제어 전기동차를 모델링하고 Matlab을 통하여 그 모델을 구현하였으며, 다양한 조건하에서 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, VVVFin버터제어 전기동차의 회생제동력은 기관사가 요구하는 상용 최대제동력을 만족하지 못하므로 회생제동력 한계 내에서 감속도가 높은 5스텝 제동을 적용하여야 주행에너지 소비를 최소화할 수 있다.

둘째, 제동 5스텝을 사용하면 상용 최대 제동력-제동 7스텝을 사용하는 경우보다 주행시간이 늘어나므로 정해진 주행시간을 반드시 만족하도록 타행과 제동 운전모드의 시작점을 선정하여야 한다.

셋째, 운행 중 승객의 승하차시간 단축 등으로 여유운전시분이 발생하면 이를 활용하여 계획시분으로 주행할 때보다 역행시의 최고속도를 낮추면 더 많은 주행에너지를 절감할 수 있게 된다.

넷째, 본 논문에서 제시한 모델을 활용하여 주행에너지를 절감하는 운전모드를 되먹임 제어를 통하여 자동적으로 선정하고 이에 따라 무인/자동으로 운전되는 자동운전제어에 관한 연구가 필요하다. 이 결과는 차후 논문에서 제시할 예정이다.

References

- 1) P. G. Howlett and P. J. Pudney, Energy-Efficient Train Control, Springer, London, pp.1-24, 1995.
- 2) E. Khmelnsky, "On an Optimal Control Problem of Train Operation," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.45, No.7, pp.1257-

- 1266, 2000.
- 3) H. S. Hwang, "Control Strategy for Optimal Compromise between Trip Time and Energy Consumption in a High Speed Railway," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.28, No.6, pp.791-802, 1994.
 - 4) S.-H. Han, J.-H. Baek, T.-K. An, S.-G. Lee, H.-J. Park and S.-K. Choi, "Optimal Train Driving Control To Minimize Energy Consumption Using Genetic Algorithms," Proceedings of the ICEE, Vol.3, pp.337-339, 1999.
 - 5) C. S. Chang and S. S. Sim, "Optimising Train Movements through Coast Control using Genetic Algorithms," IEE Proceedings Electric Power Applications, Vol.144, No.1, pp.65-73, 1997.
 - 6) W. Y. Rha, "A Study on Calculation of Engine Torque for Automotive," Transaction of KSAE, Vol.11, No.4, pp.211-219, 2003.
 - 7) E.-K. Lee and J.-H. Choi, "Automatic Train Control System of Light Rail Transit for Rubber Tire," Journal of Korean Society for Railway, Vol.6, No.1, pp.49-57, 2003.
 - 8) 渡邊朝紀, インバータ制御電車をわりやすく, Railway Research Review, Vol.51, No.9, pp.11-15, 1994.
 - 9) Ministry of Commerce, Industry and Energy, Midterm Report of Propulsion System of EMU (Appendix), pp.39-49, 1998.
 - 10) Hyundai Precision & Ind. Co., Ltd., KNR IL-San Line EMU(Instruction), Vol.1, pp.3-16, pp.301-316, 1996.