

전동열차 운행에너지를 최소화 하는 운전모드 결정

김 용 현^{*1)} · 김 동 환²⁾ · 김 치 태³⁾

도시철도공사¹⁾ · 서울산업대학교²⁾ · 철도공사³⁾

A Study on the Selection of Train Operation Mode Minimizing the Running Energy Consumption

Yong Hyun Kim^{*1)} · Dong Hwan Kim²⁾ · Chi Tae Kim³⁾

¹⁾Department of Seoul Metropolitan Rapid Transit, 50 Shinnae-dong, Chungnang-gu, Seoul 423-090, Korea

²⁾School of Mechanical Design, and Automation Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

³⁾Korail Research & Development Center, KORAIL, 139 Seonsa-ro, Seo-gu, Daejeon 302-701, Korea

(Received 14 March 2006 / Accepted 29 August 2006)

Abstract : this paper analyses how much acceleration and deceleration of urban rail vehicle should be applied and how to choose an operation mode to minimize energy consumption when train runs between stations within the fixed operation time. The decided operation pattern satisfying the minimum energy consumption becomes a target trajectory and a basis for the controller design criteria. To make this goal it grasps the characteristics of urban rail vehicle, realize operation energy model of urban rail vehicle and verify the accuracy of embodied model the Matlab simulation with the same operation result of real route. It searches for operation pattern to minimize operation energy by changing the acceleration and deceleration on the imaginative route and proposes operation pattern minimizing energy consumption by applying real operation data between stations of Seoul Metropolitan Subway Line 6.

Key words : Powering(역행), Coasting(타행), Regenerative braking(회생제동), Consumed energy(역행에너지), Train operation(열차운전), Regenerated energy(회생에너지) Total energy(총 운행에너지)

Nomenclature

v : train velocity, m/s	V_T : velocity in 0 ~ 40 km/h, km/h
α : acceleration, km/h/s	V_P : velocity in 40 ~ 65 km/h, km/h
β : deceleration, km/h/s	V_M : velocity in 65 ~ 100 km/h, km/h
m : mass of train, kgf - s ² /m	F_B : total braking force, kgf
F : traction or braking force, kgf	F_{Rg} : regenerative braking force 65 ~ 5 km/h, kgf
J : total consumed energy, kWh	F_{BP} : regenerative braking force 70 ~ 65 km/h, kgf
F_T : traction force in 0 ~ 40 km/h, kgf	F_{BM} : regenerative braking force 100 ~ 70 km/h, kgf
F_P : traction force in 40 ~ 65 km/h, kgf	R_r : running resistance [kgf/ton]
F_M : traction force in 65 ~ 100 km/h, kgf	τ_{Rg} : ratio of regenerative braking force to the overall braking force [%]

*Corresponding author, E-mail: minaok1002@hanmail.net

1. 서론

전동열차는 타 교통수단에 비해 도심구간 및 근교의 고밀도 수송수요를 위한 대량 수송, 안전성 및 환경친화성이 뛰어난 특징을 가지고 있어 세계 주요 도시 등에 집중 건설 및 운용되고 있다.^{1,2)} 그러나 고정된 역간거리를 정해진 운전 시분 내 운행하는 대용량의 부하이며 시간적으로도 역행력과 제동력의 크기가 급변하기 때문에 전동열차 에너지 효율성 평가는 고려될 가치가 충분하다.³⁾ 현재 우리나라 전동열차의 운전방식은 주로 역행시에는 가속도 3.0km/h/s로 운행하고 제동시에는 주로 제동 7step을 사용하고 있다. 제동모드를 변경시켜 에너지 절감효과를 분석한 연구가 진행되었고⁴⁾ 역행구간에 대한 모드 변경을 포함하여 전 운전구간에 대한 에너지 절감을 위한 모드 선택을 고려할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 어떻게 하면 에너지 절감을 할 수 있는지에 대하여 알아보기 위하여 역행시 (Powering)의 가속도(acceleration) 및 감속도를 얼마나, 어떤 모드(mode)로 주행시 소비되는 에너지를 절감할 수 있는지에 대하여 분석을 하고 또한 제동시 다시 전차선으로 에너지를 반환 시키는 회생제동을 얼마나, 어떻게 사용해야 운행시 소비되는 에너지를 절감할 수 있는지에 대해서도 시뮬레이션을 통해 알아보려고 한다. 여기서 결정된 운행 에너지 최소화 를 만족하는 운전모드는 현재 적용된 수동운전의 “기준운전선도”와 향후 자동운전모드에서의 목표 궤적이 되고 이를 추종하는 제어기의 설계의 근간이 된다. 이와 같은 연구목적 을 달성하기 위해 전동열차 특성을 파악하고 전동열차의 운행 에너지 모델을 구현하고 이를 실제노선의 주행결과와 같은 조건에서 Matlab을 통한 시뮬레이션 하여 구현된 모델의 정확성을 검증한다. 또한 가상선로에서 가속 및 제동 스텝별로 변화시켜 전동열차 운행에너지를 최소화 하는 운전모드를 제시하였다.

2. 열차의 운행

2.1 전동열차 운전

정해진 선로를 주행하는 전동열차의 운전모드는 Fig. 1과 같이 역행운전모드(powering driving Mode), 타행운전모드(coasting driving Mode), 제동운전모드

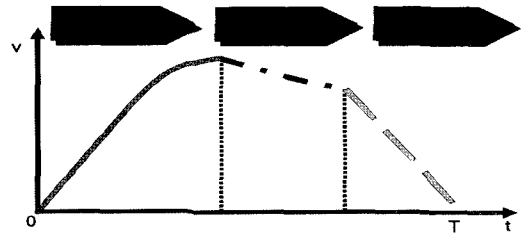


Fig. 1 A powering -coasting - braking speed profile

(braking driving Mode)로 되는 운전바탕에서 운전하게 된다.⁵⁾

2.2 전동열차 에너지 흐름

전동열차의 운행 을 위해서는 Fig. 2와 같이 전차선에서 공급받는 입력에너지[kWh], 궤도상의 일정한 지점까지 견인(traction) 시키고 열차 내 조명, 난방 등으로 소비되는 소모에너지[kWh], 제동시 회생제동에 의해 전차선으로 공급되는 회생에너지[kWh]로 나뉜다.⁶⁾

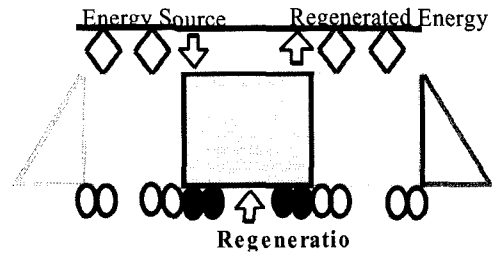


Fig. 2 A diagram of energy flow in electric multiple unit

2.3 운행에너지의 산출

전동열차를 견인하는데 필요한 힘 F 의 경우, 양의 방향의 힘과 음의 방향의 힘으로 구분되는데 $F(t) > 0$ 인 경우는 에너지가 열차에 공급되어 가속을 하는 경우이고, $F(t) < 0$ 인 경우는 제동에 의해 열차에 공급된 에너지가 소비되는 경우이다.²⁾

따라서 열차의 운행에 따른 전체 소비에너지 J (kWh)는 양(+)의 방향의 힘에 의해 계산되는 역행 에너지에서 제동시 회생제동력 $F_-(t)$ 에 의한 회생 에너지를 빼주어야 한다.²⁾

$$J = \int_0^T F_+(t)v(t)dt - \int_T^{T_f} F_-(t)v(t)dt \quad (1)$$

여기서 T 는 역행프로파일 동작시간, T_f 는 제동 프로파일 동작시간이다.

3. 전동열차 모델링

본 논문에서도 전동열차 8량 전체의 한 편성을 하나의 질점의 운동으로 간주하고 Matlab을 이용한 시뮬레이션을 통한 모델링을 구성하였다.

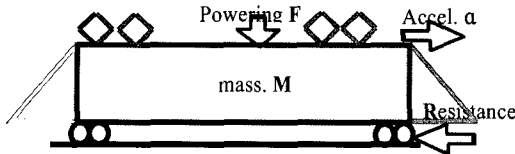


Fig. 3 Freebody diagram of line-6

여기서 M 은 각 차량의 질량의 합을 나타낸다. 힘 F 는 M-car에서 발생하는 동륜주(wheel rim) 견인력이다. 뉴우튼의 운동방정식을 토대로 하여,

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = \dot{x} \quad (2)$$

$$M \ddot{x}(t) = F(t) - R(v(t)) + G(x(t)) \quad (3)$$

t 는 시간, $x(t)$ 는 열차의 위치, $v(t)$ 는 열차의 속도, M 은 열차의 질량, $F(t)$ 는 열차에 가해진 힘, $R(v(t))$ 는 주행저항, 그리고 $G(x(t))$ 는 구배저항을 나타낸다.⁷⁾ 여기서 역행력과 제동력이 동일한 것으로 하고 시스템 출력을 전동열차 속도(X)로 한다.

$$y = \dot{x} \quad (4)$$

다시 미분방정식을 세우면 식 (5)와 같다.

$$M \ddot{x}(t) = F(t) - R_r + G \quad (5)$$

열차의 위치(x)를 x_1 , 열차의 속도(v)를 x_2 라고 미분방정식으로 표현된다.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (6)$$

$$\dot{x}_2 = (1/M)F - \frac{1}{M}R + \frac{G}{M} \quad (7)$$

이 미분방정식을 상태방정식으로 하면 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/M \end{bmatrix} F \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ -R/M + G/M \end{bmatrix} \\ &= Ax + BF + R_f \\ y &= Cx + DF \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $A=[0 \ 1; \ 0 \ 0]$ 상태행렬, $B=[0; \ 1/M]$ 입력행렬, $C=[0 \ 1]$ 출력행렬, $D=[0]$ 입력 백터가 된다.

4. 시뮬레이션을 위한 Matlab 모델

4.1 역행모델(powering)모델

6호선 전동열차의 견인력은 열차성능곡선에 의해 속도에 따른 동륜주(wheel rim)에서의 견인력을 입력으로 사용하며 열차의 속도에 따른 인버터의 제어 모드별로 견인력을 산출한다. 전동열차의 인버터 제어모드에는 정토표역 영역, 정 출력 영역, 전동기 특성영역이 있다.⁸⁾

전동열차의 가속도 3.0 km/h/s 이상을 일정하게 유지하도록 하고 최대 견인력을 갖는⁸⁾ 정토표역 영역($0 \sim 40(\text{km/h})$)에서의 기동견인력(F_T)은,⁶⁾

$$F_T = 28.35\alpha (W_M \times 1.14 + W_T \times 1.06 + W_P) + R_r \quad (9)$$

(kg_f)

으로 계산되며 여기서 W_M 은 M-car의 중량(ton)이고, W_T 는 T-car의 중량(ton), W_P 는 만차시 승객하중(ton), α 는 가속도(km/h/s), R_r 은 주행저항(kg_f)이다. 단위환산계수 28.35 는 km/h 를 m/s 로, ton을 kg_f 로, 중량을 질량으로 바꾸어 준다. 회전 부분에 대한 관성질량보정계수로 M-car는 0.14 를, T-car는 0.06 을 사용한다.⁶⁾ 정 출력 영역($40 \sim 65(\text{km/h})$)에서의 견인력은,

$$F_P = \frac{F_T \times V_T}{V_P} \quad (\text{kg}_f) \quad (10)$$

으로 산출하며 F_P 은 정 출력 영역에서의 견인력(kg_f)이고, V_T 는 정토표역 영역에서의 종단속도(km/h)이고, V_P 는 정 출력 영역의 종단속도(km/h)가 된다.⁶⁾ 전동기특성 영역($65 \sim 100(\text{km/h})$)에서의

견인력은,

$$F_M = \frac{F_P \times V_P^2}{V_M^2} \quad (kg_f) \quad (11)$$

으로 산출하며 F_M 은 전동기특성영역에서의 견인력 (kg_f), V_M 은 열차의 최고 속도(km/h)를 나타낸다.⁶⁾ 전동열차의 견인력은 인버터제어모드영역에 따라 달라지는데 제어모드에 따른 속도의 영역에도 약간의 차이가 생기는데 정토폰크 영역일 때 견인력이 가장 크며 정 출력 영역($40 \sim 65(km/h)$)은 속도에 반비례하고 전동기특성영역($65 \sim 100(km/h)$)에서는 속도의 제곱에 반비례하는 특성이 있다.^{8,9)}

4.2 제동모델

6호선 전동열차를 제동할 경우 제동현들을 조작하여 상용제동 1스텝에서 7스텝까지와 비상제동을 사용하여 제동한다. 제동 7스텝은 $3.5(km/h/s)$ 이며 6스텝은 $3.0(km/h/s)$, 5스텝은 $2.5(km/h/s)$, 4스텝은 $2.0(km/h/s)$, 3스텝은 $1.5(km/h/s)$, 2스텝은 $1.0(km/h/s)$, 1스텝은 $0.5(km/h/s)$ 로 정해진 감속도 (β)에 따른 제동력을 승객의 하중을 고려하는 Load weighting과 승차감 향상을 위한 저크(jerk)제어를 한 후 제동력을 발휘하게 된다.⁸⁾ 제동방식은 공기제동과 회생제동이 병용으로 혼합 사용되는 일괄교차 제어방식^{8,9)}을 쓰고 있다.

제동 7스텝에서는 Fig. 4와 같이 회생제동력을 사용하고 그 부족분을 공기제동이 추가로 사용되는 것을 볼 수 있다. 제동 5스텝에서는 Fig. 5와 같이 회생제동만으로도 제동력을 만족함을 알 수 있다.^{8,9)}

전체제동력 $F_B(kg_f)$ 의 계산은 상용최대 제동시 (7step) 가속도 $3.5(km/h/s)$ 를 얻기 위해 열차속도 $40(km/h)$ 일 때의 주행 저항식(R_r)을 사용하여 식 (12)와 같이 나타낸다.

$$F_B = 28.35\beta(W_M \times 1.14 + W_T \times 1.06 + W_P) - R_r \quad (kg_f) \quad (12)$$

여기서 β 는 감속도 ($km/h/s$)이다.⁹⁾

위의 계산은 견인력을 계산하는 방식과 동일하며 단 제동시에는 주행저항이 속도를 저하시키는 요소로 작용하므로 주행저항을 빼주어야 한다.

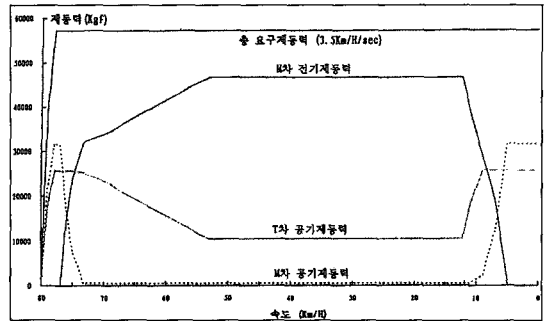


Fig. 4 Cross blending (7 step, fully loaded)

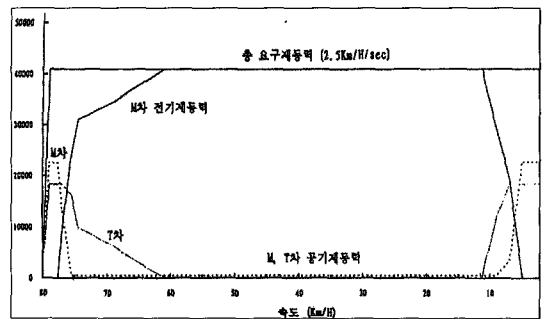


Fig. 5 Cross blending (5 step, fully loaded)

회생제동은 견인력과 같이 인버터제어 모드에 따라 구분되며 정토폰크 영역($65 \sim 5(km/h)$), 정 출력 영역($70 \sim 65(km/h)$), 전동기특성영역($100 \sim 70(km/h)$)으로 구분된다.^{6,8)} 제동력이 가장 큰 정토폰크 영역($65 \sim 5(km/h)$)에서 열차의 최대 회생제동력(F_{Rg})은 식 (13)과 같이 계산된다.

$$F_{Rg} = W_M \times 1000 \times \mu \quad (kg_f) \quad (13)$$

식 (13)에서 F_{Rg} 는 열차 전체의 회생제동력 (kg_f)이며, μ 는 제동시 기대점착계수로 0.16을 사용한다.⁶⁾ 따라서 회생제동 분담률(r_{Rg})은,

$$r_{Rg} = \frac{F_{Rg}}{F_B} \times 100 \quad (\%) \quad (14)$$

가 된다. 여기서 F_B 는 열차 전체의 제동력이다.⁹⁾

정출력 영역($65 \sim 70(km/h)$) 회생제동력(F_{BP})은,

$$F_{BP} = \frac{F_{Rg} \times V_T}{V_P} \quad (kg_f) \quad (15)$$

으로 산출되며 전동기특성 영역($100 \sim 70(km/h)$) 회생제동력(F_{BM})은,

$$F_{BM} = \frac{F_{BP} \times V_P^2}{V_M^2} \quad (kg_f) \quad (16)$$

으로 산출된다.

4.3 주행저항모델

주행저항 R_r 은 식 (17)과 같이 표현된다.⁶⁾

$$R_r = 1.865 + 0.0359 V + 0.000745 V^2 \quad (kg_f/ton) \quad (17)$$

여기서 V 는 열차속도(km/h)이다.

4.4 주행에너지 산출모델

운행에너지의 산출은 식 (1)과 같이 전동열차를 견인하는데 공급된 견인력 $F(t)$ 와 속도 $v(t)$ 와의 곱을 적분함으로써 구할 수 있다.²⁾ 회생에너지는 인버터제어모드에 의한 속도에 따른 회생제동력 $F(t)$

와 열차의 속도 $v(t)$ 의 곱을 적분하여 역행시 공급된 에너지에서 빼주어야 한다.⁴⁾ Fig. 6에서는 역행시 소비되는 역행에너지에서 제동시 생성되는 회생에너지를 빼주어서 총 운행에너지를 Simulink를 사용하여 도식화를 나타내고 있다.

5. 시뮬레이션 검증

5.1 시뮬레이션 주행선로

먼저 기관사에 의해 수동운전으로 주행할 경우와 Matlab을 이용하여 구현한 시뮬레이션을 비교하여 정확한지를 검증한다.

5.2 시뮬레이션 입력 파라메타

Table 2와 같이 전동열차의 관성 질량 보상 계수를 적용하여 열차 전체의 중량을 계산한다.

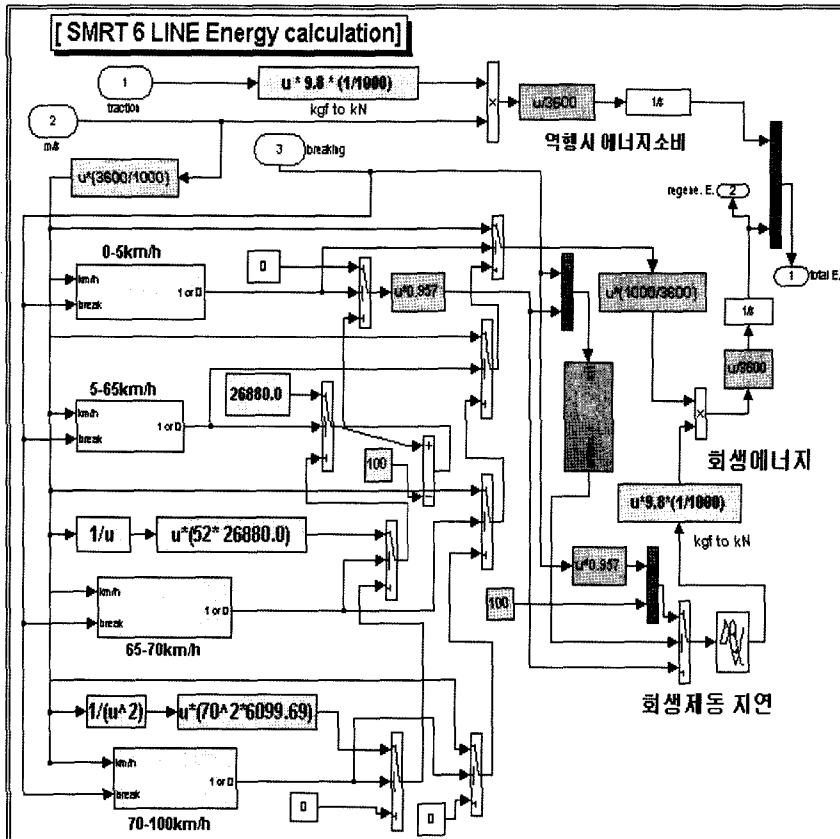


Fig. 6 Block diagram of energy calculation

전동열차 운행에너지를 최소화 하는 운전모드 결정

Table 1 Real simulation conditions

Dolgoji - Seokgye stations				
Inter-station distance [m]	Scheduled time [sec]	Curve	Speed limit [km/h]	Passenger loads[ton]
1000	90	R=567 137m	80	0
Gradient[%]	0-168m	168-548m	548-947m	947-1000m
	-8.0	16.0	-15.5	2.0

Dongmyo - Sindang stations				
Inter-station distance [m]	Scheduled time [sec]	Curve	Speed limit [km/h]	Passenger loads[ton]
625	90	R=10000	80	0
Gradient [%]	0 - 625m			
	3.0			

Table 2 Overall total weight of car

	Tc1,2	M	T1	T2	8량전체
Weight [ton]	30.0	39.0	28.0	28.0	272.0(ton)
Number of car	2	4	1	1	8
Inertia coefficient	0.06	0.14	0.06	0.06	
Inertia weight = (30×2+28×2)×1.06+(39×4)×1.14					300.8
total weight (ton) = (30×2+28×2)×1.06 + (39×4)×1.14 + passenger loads(0)					300.8 (ton)

Table 3 Traction force & braking force

Force	Traction force (kg _f)		Braking force(kg _f)		
			Total braking force (F _B)	Regenerative braking force (F _{Rg})	
	Velocity	M-car	Total	Total	Total
0~40 (km/h)	F _T	7238.7	28954.8	30897.7	26880.0
40~60 (km/h)	F _P	4454.7	17818.3		23236.92
60~100 (km/h)	F _M	1882.1	7528.2		9817.6

5.3 시뮬레이션 및 실차실험 운행속도 비교

실제노선을 대상으로 시뮬레이션과 실차실험간 비교는 6호선 돌곶이 - 석계역 및 동묘 - 신당역간에서 실시하였다. 실차실험은 시운전을 이용하여 운행한 차량에서 출력한 로딩한 속도그래프와 시뮬레이션 한 속도 결과 비교하여 정확성을 검증한다.

운행조건은 운행시분은 90(sec), 제한속도 80 (km/h)이고 시운전하여 시험하였으므로 승객하중은 총 0(ton)으로 입력하였다.

먼저 Fig. 7과 Fig. 8을 비교해 보면 주행결과가 거의 동일함을 알 수 있다. 실주행 결과의 속도그래프에서는 역행시간이 약 18(sec), 타행속도 58.0(km/h), 타행운전을 계속하여 70(sec)에서의 속도가 48.0(km/h)로 나타난 반면, 시뮬레이션에서는 역행시간 약 18(sec), 속도는 58.42(km/h), 타행후 70(sec)에서의 속도는 47.5(km/h)로 운행되어 약간의 차이는 발생되었다. 또한 역간구간이 약간 짧은 동묘 - 신당 구간인 Fig. 9와 Fig. 10을 비교하면 역시 실제 주행속도와 시뮬레이션 간에 약간의 오차는

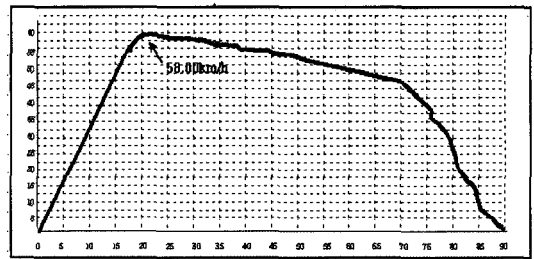


Fig. 7 Experimental data of speed profile of Dolgoji-Seokgye stations

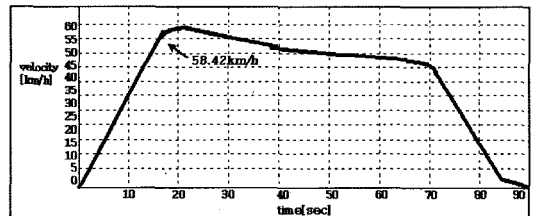


Fig. 8 Simulation result of speed profile of Dolgoji-Seokgye stations

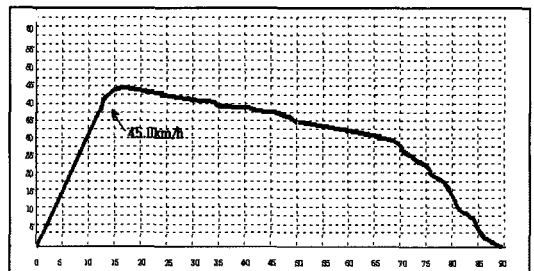


Fig. 9 Experimental data of speed profile of Dongmyo-Sindang stations

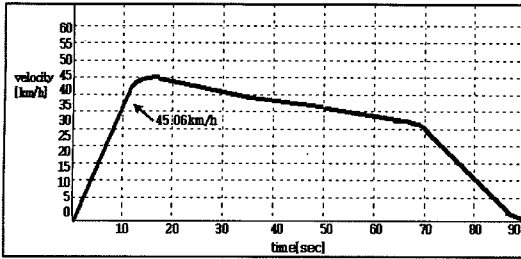


Fig. 10 Simulation result of speed profile of Dongmyo-Sindang stations

있으나 이 차이는 실주행시의 전차선 전압, 다른 열차의 운전모드, 열차의 속도를 측정하는 휠(wheel)의 마모 등에 의한 것으로 추측된다.

5.4 시뮬레이션 및 실차 실험 운행에너지 비교

6호선 전동열차의 경우 역행전력량(kWh) 및 회생전력량(kWh)은 운전실 모니터 화면에 표시되며, 열차종합제어장치(TCMS)에서 운행기록을 다운로드하여 분석할 수 있다.

Table 4는 석계-돌곶이, 동묘-신당 구간에서 실제로 시운전 전동열차를 이용하여 실측한 결과와 시뮬레이션 한 결과를 비교한 결과 돌곶이-석계 구간에서의 시뮬레이션은 $6.96(kWh)$ 이고 실차측정은 $7.0(kWh)$ 로 약 $0.04(kWh)$ 정도 차이가 나고 동묘-신당역 구간에서도 약 $0.04(kWh)$ 정도 차이가 나지만 상당한 신뢰성이 있음을 알 수 있다.

Table 4 Simulation result compared with experimental data

구분	Dolgoji - Seokgye		Dongmyo - Sindang	
	Simulation	실차 실험	Simulation	실차 실험
Consumed powering energy(kWh)	11.98	12.0	9.75	9.8
Regenerated energy(kWh)	5.02	5.0	4.69	4.7
Total consumed energy (kWh)	6.96	7.0	5.06	5.1

6. 시뮬레이션 결과 및 고찰

6.1 시뮬레이션 진행방법

지금까지 시뮬레이션을 실행하기 전에 Matlab으로 구현한 시뮬레이션의 정확성을 검증하였다.

본 논문에서는 역행시(Powering)의 가속도(acceleration) 및 감속도를 얼마나, 어떤 Mode로 운행시 소비되는 에너지를 절감할 수 있는지에 대하여 분석하기 위하여 역간 평균거리 $1(km)$, 평균 운전시분 $90(sec)$ 조건하에서 가상 선로 상에서 역행시의 가속도 및 감속도 제동 스텝 모드별로 변화 시켰다. 구배나 곡선이 없는 이유는 열차의 역행과 제동의 다양한 주행패턴에 따른 주행에너지 소비를 정확히 알아보기 위해서이다. Table 5와 같이 가상선로에서의 운행 Mode는 역행시 가속도가 낮은 $2.0(km/h/s)$ 과 $2.5(km/h/s)$ 상태를 Mode A로 하고, 현재 우리나라 전동열차에 주로 사용되는 가속도 $3.0(km/h/s)$ 상태를 Mode B로 하고 가속도가 높은 $3.3(km/h/s)$ 과 $3.5(km/h/s)$, $4.0(km/h/s)$ 을 Mode C라 하여 각 Mode별에 의한 제동 스텝별로 구분하였다.

Table 5 Case study of simulation

구분	가속도	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
ModeA	2.0	3step	4step	5step	6step	7step
	2.5	3step	4step	5step	6step	7step
ModeB	3.0	3step	4step	5step	6step	7step
ModeC	3.3	3step	4step	5step	6step	7step
	3.5	3step	4step	5step	6step	7step
	4.0	3step	4step	5step	6step	7step

6.2 Mode A : 가속도 낮은 상태에서 운전

Mode A에서는 가속도가 낮은 $2.0(km/h/s)$ 와 $2.5(km/h/s)$ 에서 case 별로 3,4,5,6,7스텝 제동을 적용한 경우로 하여 전동열차 운행에너지를 비교분석한다.

Table 6과 같이 가속도 $2.0(km/h/s)$ 와 $2.5(km/h/s)$ 에서 제동 스텝별로 총 운행에너지 결과를 비교해 보면 가속도 5스텝일 경우 $5.58(kWh)$ 와 $5.28(kWh)$ 로 운행에너지가 가장 적게 소모되는 것으로 분석되었다. 제동 3,4스텝과 제동 5스텝 결과를 비교해 보면 제동 3,4스텝을 사용할 경우에는 타행시점의 속도를 높게 해야만 정해진 역간거리를 $90(sec)$ 내에 운행할 수 있고 이에 따른 제동거리가 길어짐에 따라 회생에너지가 많아지는 것을 볼 수 있다. 하지만 역행시 에너지 소모가 많고 제동시 전

Table 6 Simulation results of Mode A

2.0(km/h/s)	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5
Applied braking step	3	4	5	6	7
Consumed powering energy(kWh)	16.73	12.54	11.44	11.10	10.31
Regenerated energy(kWh)	10.68	6.93	5.86	5.49	4.26
Total consumed energy(kWh)	6.05	5.61	5.58	5.61	6.05
2.5(km/h/s)	CASE6	CASE7	CASE8	CASE9	CASE10
Consumed powering energy(kWh)	15.03	11.53	10.36	10.14	9.75
Regenerated energy(kWh)	9.13	6.14	5.08	4.76	3.93
Total consumed energy(kWh)	5.90	5.39	5.28	5.38	5.82

동기 특성영역(100~70(km/h)), 정 출력 영역(70~65(km/h))에 속하게 되어 회생 제동력이 약해져 회생에너지가 비교적 적게 발생되어지기 때문이다. 또한 제동 6스텝의 경우는 역행시 소비되는 에너지는 적게 소비되나 제동 시간이 긴 제동 5스텝보다 짧아 회생제동이 적게 발생되어 총 운행에너지가 더 많이 소모되고, 제동 7스텝 경우에는 회생 제동 분담률 이상의 제동이 가해짐으로써 회생에너지는 더 이상 증가하지 않고 요구되는 제동력 부족분을 공기제동이 담당하게 되어 5스텝보다 총 운행에너지가 더 많이 소비된다. 따라서 제동 5스텝을 사용할 경우 총 운행 에너지 절감효과가 큰 것을 알 수 있다.

6.3 Mode B : 가속도 3.0(km/h/s)으로 운전

Mode B에서는 현재 우리나라 대부분 전동열차에 적용되는 가속도 3.0(km/h/s)에서 운행에너지를 비교 분석한 결과 제동 5스텝을 사용할 경우 5.23(kWh)로 운행에너지가 가장 적게 소모되는 것으로 나타났다. 또한, 가속도가 낮은 모드 A 보다 가속도가 높은 모드 B(3.0(km/h/s))에서 운행에너지가 절감되었다.

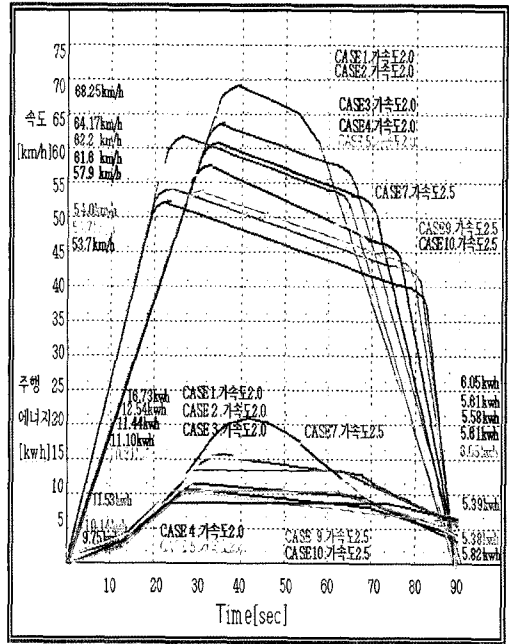


Fig. 11 Simulation results of Mode A

Table 7 Simulation results of Mode B

3.0 (km/h/s)	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5
Applied braking step	3	4	5	6	7
Consumed powering energy(kWh)	13.08	11.11	10.06	9.83	9.45
Regenerated energy (kWh)	7.52	5.76	4.83	4.51	3.91
Total consumed energy(kWh)	5.56	5.35	5.23	5.32	5.54

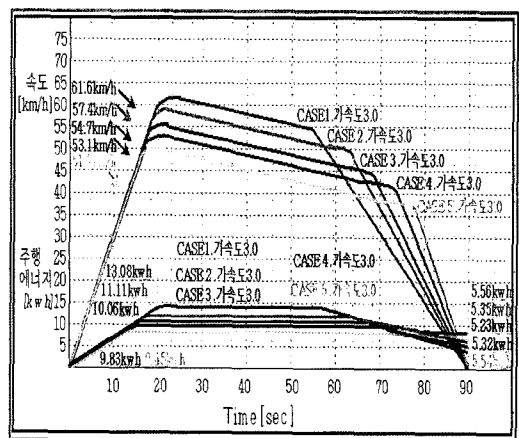


Fig. 12 Simulation results of Mode B

6.4 Mode C : 가속도 높은 상태에서 운전

Mode C에서는 Table 8과 같이 가속도 3.3 ($km/h/s$), 3.5($km/h/s$), 4.0($km/h/s$)일 때에는 제동5스텝을 사용할 경우 5.22(kWh), 5.18(kWh), 5.17(kWh)로 Mode A, B와 마찬가지로 제동 5스텝 일 경우 총 주행 에너지가 가장 적게 소모 되는 것으로 분석 되었다.

가속도가 낮은 Mode A, B 보다 가속도가 높을 경우에 전체적으로 역행 에너지가 적게 소모되고 회생에너지의 경우도 제동시간이 짧지만 주로 제동시작 속도가 정토오크 영역(65~5(km/h))에 해당되어 제동거리에 비하여 회생에너지가 많이 발생된 것이다. 제동 3,4스텝을 사용할 경우에는 타행시점의 속도를 높게 하여 정해진 구간거리를 90(sec)내에 주행할 수 있고 이에 따른 제동 시작 시점과 제동거리가 길고 정토오크 영역에 속하여 회생에너지가 많이 발생되었지만 반면에 역행시 최고 속도를 높임으로서 역행에너지 소비가 많아 총 운행에너지 소비가 많이 발생되었고, 제동 6스텝의 경우는 역행시 소비되는 에너지는 작으나 제동 시간 및 거리가 짧아 회생제동이 적게 발생되었으며, 제동7스텝 경우에는 회생제동 분담률 이상의 제동이 가해짐으로써 회생에너지는 더 이상 증가하지 않고 요구되는 제동력 부족분을 공기제동이 담당하게 되어 총 운

Table 8 Simulation results of Mode C(acceleration 3.0, 3.3)

3.3 ($km/h/s$)	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5
Applied braking step	3	4	5	6	7
Consumed powering energy(kWh)	12.80	10.82	9.95	9.66	9.30
Regenerated energy(kWh)	7.28	5.53	4.73	4.39	3.84
Total consumed energy(kWh)	5.52	5.29	5.22	5.27	5.46
3.5 ($km/h/s$)	CASE6	CASE7	CASE8	CASE9	CASE10
Consumed powering energy(kWh)	12.14	10.44	9.68	9.43	8.91
Regenerated energy(kWh)	6.73	5.23	4.50	4.21	3.58
Total consumed energy(kWh)	5.41	5.21	5.18	5.22	5.33

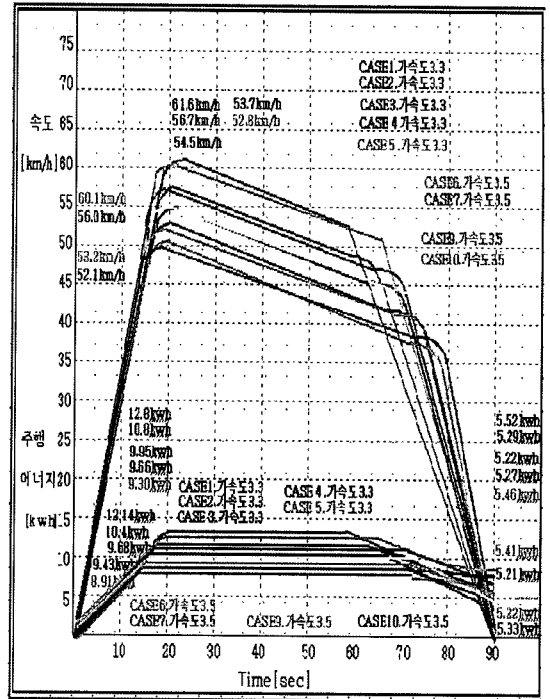


Fig. 13 Simulation results of Mode C (acceleration 3.0, 3.3)

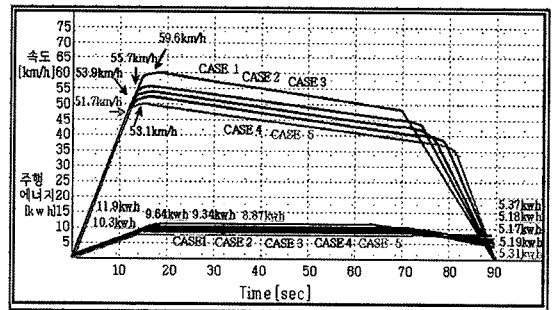


Fig. 14 Simulation results of Mode C (acceleration 4.0)

행에너지가 더 많이 소비된다. 따라서 제동 5스텝을 사용할 경우 총 운행 에너지 절감효과가 큰 것을 알 수 있다.

6.5 시뮬레이션 결과 및 고찰

전동열차 운행에너지를 최소화 하는 운전모드를 찾기 위하여 도시철도 평균 역간거리 1(km), 평균 운전시분인 90(sec) 조건에서의 시뮬레이션 운행한 결과를 Table 9와 같이 각 Mode별로 정리한 결과, 역행시에는 가속도가 높을수록 제동시에는 제동 5스

Table 9 Simulation results of Mode C(acceleration 4.0)

4.0 (km/h/s)	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5
Applied braking step	3	4	5	6	7
Consumed powering energy[kWh]	11.9	10.33	9.64	9.34	8.87
Regenerated energy[kWh]	6.63	5.15	4.47	4.15	3.56
Total consumed energy[kWh]	5.37	5.18	5.17	5.19	5.31

템을 사용하면 총 운행에너지를 최소화 시킬 수 있는 것으로 분석 되었다.

가속도 측면에서 보면 가속도가 낮은 2.0 (km/h/s) 상태에서는 최고속도를 높여야만 정해진 운전시분을 만족하므로 역행 운전 모드시 최고 속도를 높게 하기 위한 역행시간과 높은 속도로 인하여 총 운행에너지가 많이 소비된다. 그러나 가속도가 높을수록 제동 운전 모드시에는 제동거리가 짧아 회생에너지가 적게 발생되나, 역행 운전 모드시 최고속도가 낮고 짧은 시간으로 도 정해진 운전시분을 만족하고 또한 타행구간이 길어져 역행에너지 소비가 적어 운행에너지 절감에 효과가 큰 것을 알 수 있다.

Table 10 Simulation result

가속도	Energy (kWh)	3step	4step	5step	6step	7step
2.0(km/h/s)	Total. En	6.05	5.61	5.58	5.61	6.05
	Con. En	16.73	12.54	11.44	11.10	10.31
	Reg. En	10.68	6.93	5.86	5.49	4.26
2.5(km/h/s)	Total. En	5.90	5.39	5.28	5.38	5.82
	Con. En	15.03	11.53	10.36	10.14	9.75
	Reg. En	9.13	6.14	5.08	4.76	3.93
3.0(km/h/s)	Total. En	5.56	5.35	5.21	5.32	5.54
	Con. En	13.08	11.11	10.06	9.83	9.45
	Reg. En	7.52	5.76	4.83	4.51	3.91
3.3(km/h/s)	Total. En	5.52	5.29	5.22	5.27	5.46
	Con. En	12.80	10.82	9.95	9.66	9.30
	Reg. En	7.28	5.53	4.73	4.39	3.84
3.5(km/h/s)	Total. En	5.41	5.21	5.18	5.22	5.33
	Con. En	12.14	10.44	9.68	9.43	8.91
	Reg. En	6.73	5.23	4.50	4.21	3.58
3.7(km/h/s)	Total. En	5.37	5.18	5.17	5.19	5.31
	Con. En	11.9	10.33	9.64	9.34	8.87
	Reg. En	6.63	5.15	4.47	4.15	3.56

제동측면에서 보면 제동력이 약한 3,4스텝 제동을 사용할 경우에는 제동시간이 길어 회생에너지가 많이 발생되나, 역행 할 경우 최고속도와 제동을 시작하는 속도가 높아야 하므로 정토오크영역 보다는 정출력 영역 또는 전동기특성영역에 해당되어 회생 제동력이 훨씬 약해져 회생에너지가 적게 발생된다. 감속도가 높은 제동 6,7스텝 제동을 사용할 경우에는 역행에너지 소비는 작으나 회생에너지가 적고 제동 5스텝을 사용할 경우에는 역행에너지 소비가 작고 제동거리도 제동6,7스텝 보다 제동거리가 비교적 길고 제동시작속도가 정토오크영역에 해당되어 회생에너지가 많이 발생하여 총 운행에너지 절감효과가 큰 것을 알 수 있다. 그러나 제동 5스텝을 사용한다고 해서 운행에너지가 절감 된다고는 할 수 없고, 5스텝 제동을 사용할 수 있는 타행시점, 제동시점이 동시에 결정되어야 한다. 에너지 절감 측면에서 살펴보면 전동열차 편성수가 적은 서울시 6호선의 경우, 1일 동안 70개 역사를 평균 38개 편성의 전동열차가 12시간(hour)을 운행하는데 있어서 현재 전동열차 운행시 적용하는 역행시 가속도 3.0(km/h/s)와 제동시 7스텝을 사용하였을 경우와 본 논문에서 분석하여 제시한 역행시 가속도 4.0(km/h/s)와 제동시 5스텝을 사용하였을 때 운행 에너지를 비교하면 평균 약 11,810.4(kWh)정도 운행 에너지를 절감 할 수 있다. 이를 비용으로 산출한다면 매우 많은 전동열차 운행에너지 비용절감에 기여할 수 있는 것으로 기대된다. 따라서 제동시에는 회생제동 한계내에서 제동력이 큰 제동 5스텝을 사용하고 역행시 높은 가속도를 사용해야 하나 전동열차의 설계 제작시 인버터, 견인 전동기 추진성능, 중량, 점착력 등 여러 가지 제반 요소를 고려하여 가속도가 결정되어지므로 역행시 가속도는 현재보다 향후 전동열차 기술력 진보로 가속도를 높일 수 있으면 운행에너지가 절감 될 것으로 기대된다.

논문에서의 시뮬레이션은 단일 전동열차의 운행에 따른 결과로 실제 운행할 경우 주변의 많은 다른 열차로 인하여 영향 받아 시뮬레이션 하여 얻은 결과와 실제 운행한 결과는 다소 차이를 보일 것이다.

7. 결론 및 차후과제

본 논문에서는 6호선 전동열차 운행에너지 소비를 최소화하기 위하여 역행시(Powering)의 가속도(acceleration) 및 제동시의 감속도를 얼마나, 어떤 모드(mode)로 운행시 소비되는 에너지를 최소화 하는 운행모드에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 현재 VVVF 인버터제어 전동열차에 적용되고 있는 3.0(km/h/s)보다 가속성능을 향상 시킬 경우 총 운행에너지 소비를 절감할 수 있게 된다. 그러나 추진성능 향상을 위해서는 기동 토크 증가, VVVF 인버터 출력전류 증가, 견인전동기 전류치 증가, IGBT 냉각용량 증가, 전동열차 중량, 점착력 등 여러 가지 제반 연구가 필요할 것이다.

둘째, 회생 제동력 한계 내에서 감속도가 높고 대체적으로 정토크 영역에 해당되는 제동 5스텝을 적용하여야 총 운행에너지 소비를 최소화 시킬 수 있는 것을 확인하였다.

셋째, 본 논문에서 제시한 총 운행에너지 최소화를 만족하는 운전모드는 추후 자동 및 무인운전모드에서 목표궤적이 되어 이를 추종하는 제어기의 설계에 적용하면 보다 최적화되고 운행에너지 절감 효과를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

References

- 1) P. Firpo and S. Savio, "Optimal Control Strategies for Energy Management in Metrorail Transit Systems," Computers in Railways IV -Vol.2, Railway Operations, Operations, pp.91-99, 1994.
- 2) P. G Howlett and P. J. Pudney, Energy-Efficient Train Control, Springer, London, pp.1-24, 1995.
- 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) Chi-Tae Kim, "Optimal Operation for Minimizing Energy Consumption in Electric Multiple Unit," Graduate School of Railroad Seoul National University of Technology, 2002.
- 5) 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.
- 6) Ministry of Commerce, Industry and Energy, Midterm Report of Propulsion System of EMU (Appendix), pp.39-49, 1998.
- 7) W. Y. Rha, "A Study on Calculation of Engine Torque for Automotive," Transactions of KSAE, Vol.11, No.4, pp.211-219, 2003.
- 8) SMRT, MELCO(mitsubishi) Line 6 Teaching Materials, 2000.
- 9) SMRT, Seoul Line 6 EMU(Instruction), pp. II -3-1, II -3-8, 1999.