

전동열차 운행에너지를 최소화 하는 운전모드 결정

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

김용현*
Kim, Yong Hyun

김동환**
Kim, Dong Hwan

김치태***
Kim, Chi Tae

ABSTRACT

.Decision of operation performance mode to minimize the energy consumption of urban rail vehicle
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 station 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 Dolgogee-Sukgye section of Seoul Metropolitan Subway Line 6.

1. 서 론

철도차량은 현재까지 개발된 육상교통수단 중에서 가장 대량의 수송수단이다. 특히 전동열차는 타교통수단에 비해 도심구간 및 근교의 고밀도 수송수요를 위한 대량 수송성, 안전성 및 환경친화성이 뛰어난 특징을 가지고 있어 세계 주요 대도시 등에 집중 건설 및 운용되고 있다. 그러나 고정된 역간거리를 정해진 운전 시분내 주행하는데 있어 에너지 절감에 관한 운행방식과 사례검토가 미비한 상태를 개선하기 위하여 본 논문에서는 역행시(Powering)의 가속도(acceleration) 및 감속도를 얼마나, 어떤 모드(mode)로 주행 시 소비되는 에너지를 절감할 수 있는지에 대한 분석을 한다. 여기서 결정된 운행 에너지 최소화를 만족하는 주행패턴은 추후 자동운전모드에서 목표 궤적이 되어 이를 추종하는 제어기의 설계의 근간이 된다. 이와 같은 연구목적 달성을 위해 전동열차 특성을 파악하고 전동열차의 주행에너지 모델을 구현하고 이를 실노선의 주행결과와 같은 조건

* 서울특별시 도시철도공사, 사원, 정회원

** 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 교수, 정회원

*** 한국철도공사 기술개발실 차장, 정회원

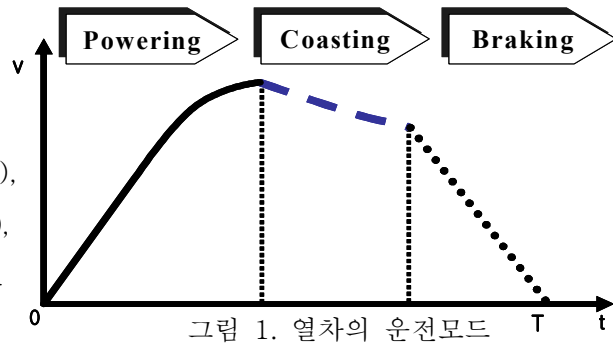
에서 Matlab을 통한 시뮬레이션 하여 구현된 모델의 정확성을 검증한다.

또한 가상선로에서 역행시 가속도(acceleration) 및 제동 스텝(brake-step)를 변화시켜 전동열차 주행 에너지를 최소화 하는 주행패턴을 찾고, 도시철도 6호선 돌곶이-석계구간 및 동묘-신당구간의 실제 운행 데이터를 적용하여 주행에너지를 절감 시키는 주행패턴을 제시하였다.

2. 전동열차의 주행

2.1 전동열차의 운전모드

전동열차 운전모드는 그림 1과 같이 역행 운전모드(powering driving Mode), 타행 운전모드(coasting driving Mode), 제동 운전모드(braking driving Mode)로 되는 운전바탕에 에서 운전하게 된다.



2.2 전동열차의 주행 에너지

전동열차는 가선으로부터 공급받는 전기적 에너지를 견인전동기에 공급하고 견인 전동기는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환시켜 열차를 가속하게 된다. 이때 소비되는 에너지는 전동열차가 주행시 소비하는 에너지의 대부분을 차지하며 역행시의 에너지 소비를 줄이는 것이 전동열차의 주행에너지를 절감하는 관건이 된다.

역행시 소비에너지는 전동열차의 가속도와 최고속도에 의해 좌우되는데 정차역수가 많고 운전 시분이 짧아 역행 운전모드와 제동 운전모드를 수시로 반복해야 하는 전동열차 특성상 가속도는 전동열차가 낼 수 있는 최고 가속도를 이용하여 운전하게 된다. 따라서 고정된 역간거리와 정해진 운전시분을 만족하는 범위에서 최고속도를 낮추어 운전하는 것이 주행시 소비에너지를 절감하는 주요한 방법이 된다. 한편 역행 운전모드를 짧은 시간에 적용하면 주행에너지는 적게 소모되지만 운행속도가 낮아져 정해진 운전시분을 만족할 수 없고 제동 운전모드를 빨리 적용하면 정해진 거리를 만족 할 수 없으므로 고정된 역간거리와 정해진 운전시분을 만족하는 타행 운전모드의 시작점과 제동 운전모드의 시작점을 결정하는 것이 운행 에너지를 절감을 결정하는 중요한 변수가 된다.

본 논문에서는 역행시 소비되는 에너지와 제동시 회생되는 에너지를 다루게 되는데 열차의 주행에 따른 전체 소비 에너지 J [kwh]는 식(1)과 같이 표현되며, J_p 는 역행시 소비된 에너지이고 J_{rq} 는 회생 제동시 회생된 에너지이다.

$$J = J_p - J_{rq} \quad (1)$$

$$J_p = \int_T^0 F_+(t)v(t)dt \quad (2)$$

2.2 시뮬레이션을 위한 Matlab 모델

2.2.1 역행(powering) 모델

그림 2는 Matlab으로 구현한 시뮬링크메인 블록 다이어그램(simulink block diagram)이다.

견인력은 전동열차 성능곡선에 나타나는 동륜주(wheel rim)에서의 견인력[kgf]을 사용하며 역행시간을 정해주면 주어진 시간 동안 전동열차 시스템에 속도에 따른 인버터제어모드별로 견인력을 산출하여 하여 입력한다. 전동열차 최대견인력은 0~35km/h일 때가 가속도 3.0km/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.

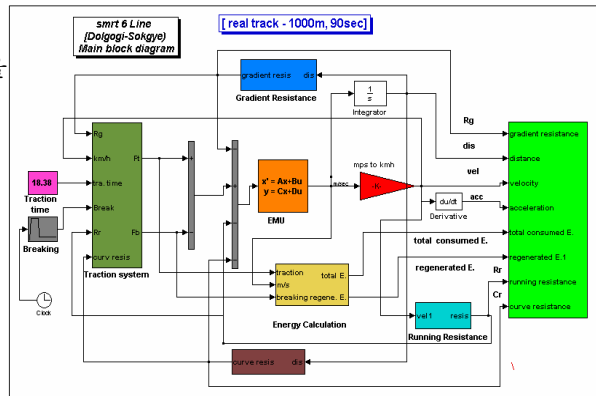


그림 2. Main block diagram of Matlab

2.2.2 제동(braking) 모델

제동은 그림 3과 같이 공기제동과 회생제동이 병용으로 일괄교차제어방식에 따라 혼합 사용되며 제동시 요구되는 감속도 만큼 회생제동이 먼저 사용되고 그 부족분을 T-car의 공기 제동이 그래도 부족하면 M-car의 공기제동이 추가로 사용된다. 주간제어기를 조작하여 상용제동 1스텝에서 7스텝까지와 비상제동을 사용한다. 제동시 감속도는 그림 4와 같이 상용 최대제동(7스텝)시 3.5km/h/s이며 비상제동시 4.5km/h/s이다.

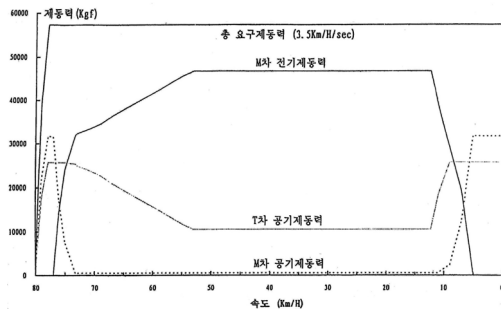


그림 3. Cross blending (7 step, fully loaded)

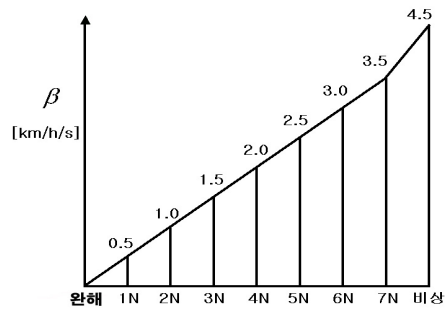


그림 4. Deceleration of braking step

2.2.3 에너지 산출(Consumed energy calculation) 모델

역행에너지의 계산은 식[2]과 같이 열차를 견인하는데 공급된 견인력 $F_+(t)$ 와 열차의 속도 V 와의 곱을 적분함으로써 구할 수 있고, 회생에너지는 전체 제동력에서 공기 제동력을 제외하고 인버터 제어모드에 의한 속도에 따른 회생제동력 $F_-(t)$ 와 열차의 속도 $V(t)$ 의 곱을 적분하여 역행시 공급된 에너지에서 빼주어야 한다. 회생에너지 J_{rq} [kWh]는 아래의 식(3)으로 구할 수 있다.

$$J_{rq} = \int_0^{t_1} 1V_1dt + \int_{t_1}^{t_2} 2V_2dt + \int_{t_2}^{t_3} 3V_3dt + \int_{t_3}^{t_4} 4V_4dt + \int_{t_4}^{t_5} 5V_5dt \quad (3)$$

2.3. 시뮬레이션 결과

2.3.1 시뮬레이션 진행방법

시뮬레이션을 실행하기 전에 Matlab으로 구현한 시뮬레이션 모델을 실노선 주행결과와 비교하여 구현한 모델이 정확한지를 확인한 다음, 표 1과 같이 가상 선로상(ideal track)에서 역행시의 가속도 및 제동 스텝별(brake-step)로 감속도를 변화 시킨후, 어떤 모드로 주행시 소비되는 에너지를 절감할 수 있는지에 대하여 분석을 한다.

표 1. Case study of simulation

가속도	Case 1	Case2	Case3	Case 4	Case 5
2.0	3step	4step	5step	6step	7step
2.5	3step	4step	5step	6step	7step
3.0	3step	4step	5step	6step	7step
3.3	3step	4step	5step	6step	7step
3.5	3step	4step	5step	6step	7step
4.0	3step	4step	5step	6step	7step

2.3.2 실노선 대상으로 시뮬레이션 모델 검증

실주행결과는 6호선의 돌곶이-석계역 및 동묘-신당구간에서 실제로 로딩한 속도그래프이며 실주행 결과와 같은 조건을 주어 시뮬레이션의 정확성을 검증한다. 먼저 그림 5,6의 돌곶이-석계 구간을 비교해 보면 주행결과가 거의 동일함을 알수 있다. 실주행결과의 속도그래프에서는 역행시간을 약 18sec, 타행속도 58.0km/h, 타행운전을 계속하여 70sec에서의 속도에서 약48km/h로 나타난 반면 시뮬레이션에서는 역행시간 약18sec, 타행속도 58.42km/h, 타행운전을 계속하여 70sec에서의 속도에서 약46km/h로 약간의 차이가 있다. 또한 역간구간이 약간 짧은 동묘-신당 구간 역시 그림 7,8과 같이 주행결과와 시뮬레이션을 비교한 결과 약간의 오차는 있으나 이 차이는 실주행시 전차선 전압, 차륜경 조건, 승객하중 등에 따라 다소 차이를 보일 수 있을 것으로 추정된다.

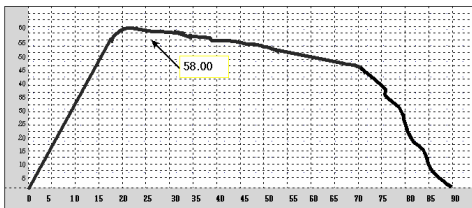


그림 5. Experimental data of speed profile

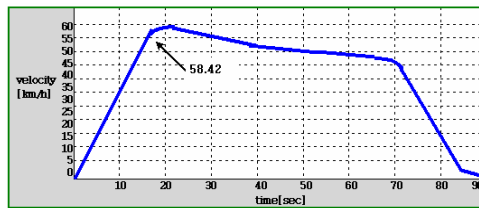


그림 6. Simulation Result of speed profile

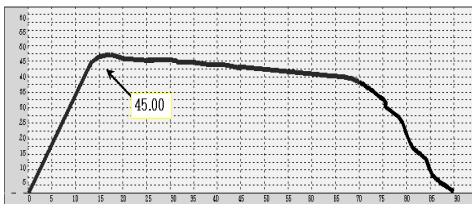


그림 7. Experimental data of speed profile

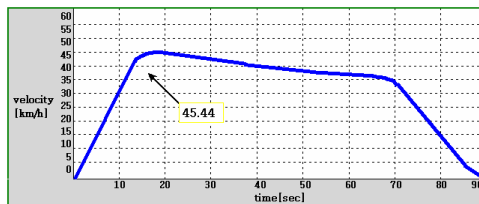


그림 8. Simulation Result of speed profile

표 2는 석계-돌곶이, 동묘-신당구간에서 실제로 시운전 전동열차를 이용하여 실측한 결과와 시뮬레이션한 결과를 비교한 결과 상당한 신뢰성이 있음을 알 수 있다.

표2. Simulation result compared with experimental data

구분	석계-돌곶이		동묘-신당	
	Simulation	실측 실험	Simulation	실측 실험
Maximum Speed [km/h]	58.42	58.00	45.44	45.00
Consumed powering energy[kwh]	11.98	12.0	9.75	10.0
Regenerated energy[kwh]	5.02	5.0	4.73	5.0
Total consumed energy [kwh]	6.96	7.0	5.02	5.0

2.3.4 가속도 및 제동스텝별 시뮬레이션 결과

도시철도 평균 역간거리 1000m, 평균 운전시분인 90sec, 구배, 곡선저항 0, 최고속도한계 80km/h 조건에서의 시뮬레이션 주행한 결과, 표 3과 같이 가속도가 낮은 2.0에서는 정해진 운전시분을 만족하기 위하여 역행시 최고 속도를 높임으로서 주행 에너지 소비가 많고 가속도가 높은 3.5km/h/s와 4.0km/h/s에서는 역행 운전모드시의 에너지 소비는 큰 차이는 없으나 제동 운전모드시의 회생 제동력으로 더 오랜 시간 제동 운전모드를 유지해 회생 에너지가 큰 가속도 3.5km/h/s일 경우가 주행 에너지 절감에 가장 효과가 큰 것을 수 있다.

또한 가속도 3.0km/h/s일 경우를 보면 제동 스텝별로는 제동력이 약한 3스텝 제동을 사용할 경우 제동시간이 길어 회생 에너지가 많아짐을 볼 수 있다.

그러나 3스텝 제동의 경우 총 주행 에너지가 5스텝 제동 보다 많이 소모된다.

이것은 낮은 감속도의 제동을 사용하면 역행시 최고 속도와 제동을 시작하는 속도가 높아야 하고 전동기 특성영역이나 정출력 영역에 속하게 되어 정토크 영역보다 회생 제동력이 훨씬 약해져 회생 에너지가 적어지기 때문이다.

또한 5스텝 제동과 6,7스텝 제동을 비교하면 7스텝 제동을 사용하면 회생제동 부담을 이상의 제동이 가해짐에 따라 회생

가속도	Energy	3STEP	4STEP	5STEP	6STEP	7STEP
2.0	total.En	6.05	5.16	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	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	total.En	5.56	5.35	5.21	5.32	5.49
	Con.En	13.08	11.11	10.06	9.83	9.45
	Reg.En	7.52	5.76	4.83	4.51	3.96
3.3	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	total.En	5.36	5.17	5.15	5.19	5.29
	Con.En	12.14	10.44	9.68	9.43	8.91
	Reg.En	6.78	5.27	4.53	4.24	3.62
4.0	total.En	5.37	5.18	5.17	5.19	5.31
	Con.En	12.00	10.33	9.64	9.34	8.87
	Reg.En	6.63	5.15	4.47	4.15	3.56

표 3. simulation result

에너지는 더 이상 증가 하지 않고 요구되는 제동력의 부족분을 공기제동이 담당 하여 5스텝 제동시 회생된 에너지로 인한 주행에너지 효과가 제동 7스텝을 사용하여 역행 에너지를 절감한 경우보다 주행에너지 절감효과가 큰 것을 알 수 있다.

그림 9는 시뮬레이션을 이용하여 6호선 전동열차 운행 에너지 최소화를 만족하는 주행패턴을 찾기 위하여 역행시(Powering)의 가속도(acceleration) 및 감속도(braking)를 변화 시킨 결과, 역행시에는 가속도 3.5km/h/s일 때, 감속도 일 때는 제동 5스텝 사용시 주행 에너지를 최소화 시킬 수 있다.

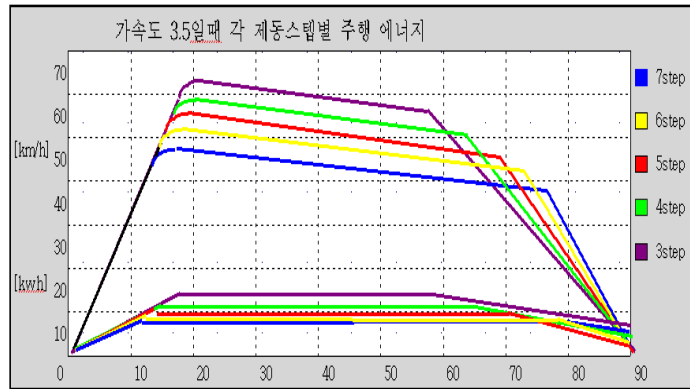


그림 9. 가속도 3.5일때 각 제동스텝별

4. 결론

본 논문에서는 6호선 전동열차 주행 에너지 소비를 최소화 시키기 위하여 역행시(Powering)의 가속도(acceleration) 및 감속도를 얼마나, 어떤 모드(mode)로 주행시 소비되는 에너지를 최소화 하는 운행패턴에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 현재 적용되고 있는 3.0km/h/s 가속도를 약3.5km/h/s정도로 향상 시킬 경우 총 주행 에너지 소비를 절감 시킬 수 있다. 그러나 추진성능 향상을 위해서는 기동 토크 증가, 견인 전동기 전류치 증가, VVVF 인버터 출력전류 증가, IGBT 냉각용량 증가 등 여러 가지 제반 연구가 필요하다.

둘째, 전동열차 회생 제동력은 기관사가 요구하는 상용제동력을 만족하지 못하므로 회생 제동력 한계내에서 감속도가 높은 제동 5스텝을 적용하여야 주행 에너지 소비를 최소화 시킬 수 있다.

셋째, 본 논문에서 제시한 주행에너지 최소화를 만족하는 주행모델은 추후 자동 및 무인운전 모드에서 목표궤적이 되어 이를 추종하는 제어기의 설계에 적용하면 보다 최적화되고 주행에너지 절감효과를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. P.G Howleat and P.J Pudney, "Energy-Efficient Train Control" , Springer, 1995, pp. 1 ~ 24
2. C.S Chang and S.S Sim, "Optimising train movements through coast control Using genetic Algorithms(GA)" , IEE proc. Electr. power.Vol. 144, 1997, pp.65 ~ 73
3. 杉本 健, "車兩の回生電力と電力設備", Railway Research Review, 56(7), 1999, pp. 30 ~ 31
4. S.H Han et al.(1999), "An Optimising Automatic Train Operation(ATO) Control Using Genetic Algorithms" Proc. of the IEEE Region 10 Conference-Vol.1, 1999
5. 산업자원부(1998), "전동차 추진장치 기술개발" , pp. 2-21 ~ 2-34
6. 도시철도, "6호선 인버터제어 전기동차 운전지침서", 1999, pp. II-3-1 ~ II-3-8
7. 김치태, "전동열차 주행에너지 소비를 최소화하는 최적운전" , 철도기술대학원, 2001
8. 도시철도, MELCO 전장품 6호선 교육용 교재 및 6호선 VVVF 전동차 시운전 보고서, 2000