

전동열차 주행결과와 시뮬레이션 분석을 통한 최적주행 연구

A Study on the Optimal Driving by Analysis on EMU Running Result and Simulation

김 치 태* · 김 동 환† · 한 성 호**
(Chi Tae Kim · Dong Hwan Kim · Seong-Ho Han)

Abstract - As people are getting concerned to Environment recently, researches on the environmentally-friendly and effective railway system have been conducted in every aspects. Especially as it became known that the pattern of train driving causes the difference in energy consumption, the researches on the train driving to minimize the energy consumption are gaining a lot of interest. The main study showed the optimal driving to minimize energy consumption while driving after analyzing real driving data measured by EMU of Bundang-line real driving, determining the impact on energy consumption due to train driving pattern changes, executing a variety of simulation on real driving patterns by Matlab Simulink and finally driving between stations by given driving times.

Key Words : Optimal driving, Powering, Coasting, Braking, Regenerated braking, Consumed energy per unit weight

1. 서 론

철도는 타 교통수단에 비해 대단히 효율적이고 환경친화적인 교통시스템이며, 전 세계적으로 철도시스템에 대한 연구가 경쟁적으로 진행되고 있다. 또한 최근 에너지에 대한 관심이 높아지면서 열차 운행시 소비되는 에너지를 절감하기 위한 각종 에너지 저장장치 개발 등에 대한 연구도 활발해지고 있다. 열차운행 중 제동시 발생하는 회생에너지를 저장하기 위하여 차량에 저장장치를 탑재하거나, 선로변에 저장시스템을 설치하는 경우 저장효과는 확실 할 수 있으나 시스템 구축에 많은 비용과 시간이 투입되므로 열차의 주행 패턴 변화를 통한 에너지 절감 방법에 대해 많은 연구가 진행되고 있다.[1-5]

특히, 열차의 운행 중 계측된 데이터를 분석하여 역행시간과 역행시 소비된 에너지, 제동시간과 제동시 회생된 에너지, 운전시분과 주행에너지의 관계를 파악한 연구도 있었고, 회생제동을 사용하는 전동열차의 특성을 분석하여 최대 제동력(7단 제동)을 사용할 경우 오히려 회생제동 이외에 공기제동이 추가되어야 하므로 회생제동이 최대(5~6단 제동)가 되는 제동력을 사용하는 것이 열차의 주행에너지를 최소화한다는 연구도 있었다. [1]

그러나 아직까지 열차의 실제 주행결과를 컴퓨터로 시뮬레이션하여 기관사들에 의한 실제 주행과 이론적인 최적주행의 비교를 통해 정해진 역간거리와 운전시분을 만족하면서 에너지 소비를 최소화하는 최적주행에 대한 연구는 미미

한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 교류 25,000V의 전원으로 VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 인버터제어 전동열차를 운행하고 있는 분당선 수내-서현역 구간에서 실제 주행시 측정된 데이터를 분석하고 이와 동일한 조건에서 매텔랩 시뮬링크를 이용하여 시뮬레이션을 수행하여 에너지소비를 최소화하는 최적주행을 제시하였다.

2. 최적주행

열차를 운전하는데 있어 최적주행이라 하면 정시성, 승차감 향상, 안전성 향상 및 에너지절감 등 여러 가지 조건을 모두 만족하는 주행을 말하며, 정시확보는 승객과의 약속을 지키는 것은 물론 수송력 향상과 차량 운영효율 향상 등 운영측면에서도 대단히 중요한 의미를 지니게 된다. 승차감은 선로의 불규칙성, 급출발 및 급제동 등에 따라 나빠질 수 있으며, 안전성은 천재지변, 시스템 장애, 인적 오류 등으로 인한 위험으로부터 얼마나 안전하가를 나타내는 가장 기본적인 중요한 사항이다.[6]

열차의 소비에너지는 대체로 운전시분과 반비례하는 경향을 나타내는데, 이것은 운행속도와 관련된 것으로 운전시분을 늘리면 운행속도를 낮추게 되어 에너지는 절감할 수 있으나 수송효율이 저하되어 열차운영 측면에서 보면 오히려 비효율적인 결과를 가져오게 되므로 승무원과 차량 등 철도 운영 전반을 고려한 최적의 운전시분이 결정되어야 하고 이렇게 결정된 운전시분에 대하여 에너지소비를 최소화하는 최적의 주행패턴을 결정하게 된다.[1]

그림 1과 같이 만약 가상의 최적주행 곡선이 시간 T와 단위질량당 주행에너지 E/M의 단조감소 함수로 정의한다면 주행에너지를 열차의 총질량으로 나눈 단위질량당 주행에너지로 x축을 표시하고, 운행시간을 y축으로 표시하여 열차의 가상 최적주행을 곡선 A로 나타낼 수 있을 것이다.

* 주저자, 정회원 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원
철도차량시스템공학과 박사과정

† 교신저자, 비회원 : 서울과학기술대학교 기계시스템디자인
공학과 교수

E-mail : dhkim@seoultech.ac.kr

** 정 회 원 : 한국철도기술연구원 신소재틸팅열차연구단 단장
접수일자 : 2012년 7월 8일

최종완료 : 2012년 7월 31일

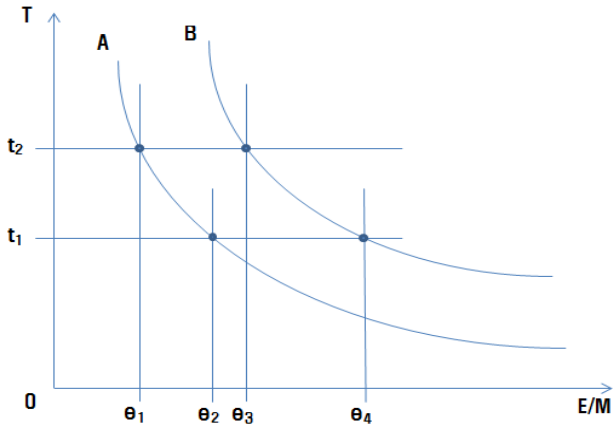


그림 1 이상적인 최적운전 곡선
Fig. 1 A Virtual Optimal Driving Curve

곡선 A가 에너지소비를 최소화하는 최적주행 열차들의 집합이라고 하면 실제로 존재하는 열차들은 곡선의 A의 우측·상단 부분에 존재하는 곡선 B가 될 것이다.

역간 운전시분이 t_1 라고 하면 단위질량당 주행에너지를 가장 적게 사용한 최적주행 열차는 좌표평면상의 점 (e_2, t_1) 이 될 것이고 t_2 가 역간 운전시분이라고 가정하면 최적주행 열차는 점 (e_1, t_2) 가 될 것이다. t_2 선상에 있는 점 (e_3, t_2) 는 점 (e_1, t_2) 와 비교할 때 동일한 시간에 도착하면서도 점 (e_3, t_2) 가 점 (e_1, t_2) 보다 $e_3 - e_1$ 만큼 주행에너지를 더 많이 소비한 열차가 되며, 점 (e_1, t_2) 의 우측에 있는 열차들은 속도 프로파일을 변경하면 주행에너지를 절감할 수 있는 개선의 여지가 있는 점들이 된다. 따라서, 곡선 A와 곡선 B의 차이가 클수록 자동화에 의한 주행 시간 단축 및 주행에너지 절감 효과가 클 것을 예상할 수 있다.

3. 전동열차 주행데이터 분석

실제 영업 운영을 하고 있는 전동열차에 계측장비를 설치하여 역행시간, 타행시간, 제동시간과 승객하중 및 주행에너지를 측정하였고 수내-서현역 구간에 대해 분석을 시행하였다. 수내-서현역 구간의 역간거리는 1,090m이고, 계획된 운전시분은 90초이며, 16회 측정을 실시하였다.

먼저 계획 운전시분인 90초 이내로 주행한 열차는 16개 열차 중 12개 열차로 이중에서 단위중량당 주행에너지가 가장 적은 열차는 5번 열차가 되었다. 표 1에서 주행에너지만을 살펴보면 6번 열차가 7.033kWh로 가장 적은 에너지를 사용하였지만 총중량을 보면 5번 열차보다 승객하중이 25톤이나 적어, 단위중량당 주행에너지(kWh/kg)는 29.0으로 5번 열차의 26.9보다 2.1이 많이 사용되어 계획운전시분 90초 이내에 운전하면서 가장 에너지를 적게 사용한 열차는 5번 열차임을 알 수 있었다. 또한, 이때의 운전패턴을 살펴보면 역행시간은 20.3초, 제동시간은 27.1초로 다른 열차들 보다 역행시간과 제동시간이 짧아 타행운전시분이 가장 긴 것을 알 수 있었다.

표 1 데이터 분석 및 분석(수내~서현)

Table 1 Data of Measurement and Analysis(Su-Nae~Sue-Hyun)

| 열차 번호 | 가속 시간 [sec] | 제동 시간 [sec] | 주행 시간 [sec] | 총 주행 에너지 [kWh] | 열차 중량 [ton] | 단위 중량당 에너지 [kWh/kg] |
|-------|-------------|-------------|-------------|----------------|-------------|---------------------|
| 5 | 20.3 | 27.1 | 90.0 | 7.184 | 267.21 | 26.9 |
| 6 | 21.3 | 28.0 | 89.0 | 7.033 | 242.31 | 29.0 |
| 7 | 25.6 | 32.7 | 89.0 | 8.102 | 236.91 | 34.2 |
| 8 | 23.1 | 28.7 | 87.2 | 8.038 | 263.48 | 30.5 |
| 9 | 29.7 | 39.4 | 87.0 | 9.741 | 261.80 | 37.2 |
| 10 | 34.4 | 42.7 | 87.0 | 9.679 | 242.49 | 39.9 |
| 11 | 26.7 | 34.3 | 86.7 | 8.106 | 251.56 | 32.2 |
| 12 | 27.9 | 31.6 | 86.0 | 7.967 | 250.78 | 31.8 |
| 13 | 29.9 | 35.3 | 86.0 | 8.662 | 240.99 | 35.9 |
| 14 | 24.8 | 27.7 | 85.9 | 8.100 | 227.25 | 35.6 |
| 15 | 32.5 | 36.4 | 85.3 | 9.602 | 250.74 | 38.3 |
| 16 | 29.6 | 28.4 | 81.0 | 9.089 | 237.84 | 38.2 |

그림 2에서 세로 보조선은 동일한 단위중량당 주행에너지를 사용하면서도 운행시분이 서로 다른 2번과 12번 열차를 비교하기 위하여 사용하였고, 가로보조선은 운행시간은 비슷하지만 단위중량당 주행에너지가 서로 다른 8번, 9번, 10번 열차를 비교하기 위해 사용한 것이다. 즉, 표 1에서 보는 바와 같이 역간을 빨리 운전하면 운전시분이 짧아져 대체로 에너지 소비가 증가하지만, 기관사의 운전패턴에 따라 같은 양의 에너지를 사용하면서도 역간을 빨리 운전할 수도 있으며, 같은 시간에 역간을 운전하면서도 에너지를 적게 사용할 수 있는 운전패턴이 있음을 알 수 있다.

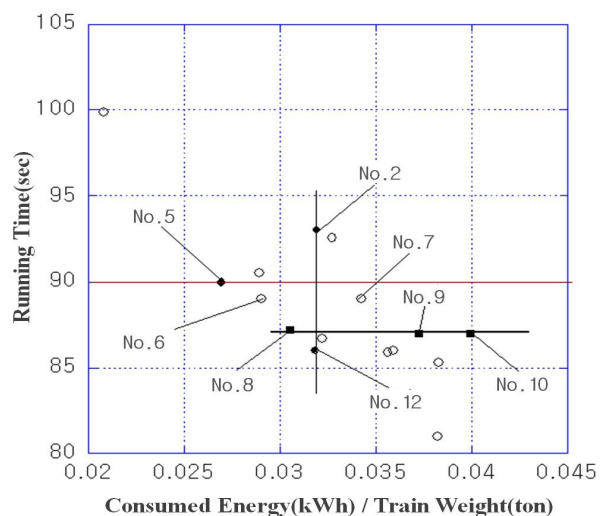


그림 2 단위중량당 주행에너지와 주행시간(수내~서현)
Fig. 2 Consumed Energy per Unit Weight and Running Time(Su-Nae~Sue-Hyun)

4. 최적주행 시뮬레이션

지금까지 열차의 운행 특성에 따른 최적주행 이론과 실제 영업운행을 하고 있는 전동열차에서 계측한 데이터를 분석하여 에너지절감 최적주행 패턴에 대해 살펴보았다. 그러나 수도권 전동열차 모든 구간의 최적주행패턴을 찾기 위해서 노선별로 모든 열차를 계측하고 분석할 수는 없기 때문에 매티랩 시뮬링크를 이용한 시뮬레이션을 통해 구간별 최적주행을 위한 속도프로파일을 제시하고자 한다.

4.1 매티랩을 이용한 시뮬레이션

매티랩 시뮬링크를 이용하여 VVVF 전동열차의 특성을 반영한 주행 시뮬레이션 프로그램을 작성하였다. 열차의 속도는 식(1)과 같이 열차가 이동한 거리 x 를 이동에 소요된 시간 t 로 미분하여 나타내고, 열차시스템에 가해진 힘에서 주행저항 $[R(v(t))]$, 구배저항 $[G(t)]$, 곡선저항 $[C(t)]$ 을 뺀 나머지 힘은 식(2)와 같이 열차를 가속시키며, 열차를 가속시키던 힘의 공급이 중단되면 하고 타행으로 운행을 하면서 각종 저항에 의해 점점 속도가 감소하다가 역에 접근하게 되면 제동을 적용하여 열차는 정지하게 된다. 이때 식(3)과 같이 가속시에 투입된 에너지(J_+)와 제동시에 회생되는 에너지(J_-)를 계산하여 열차가 소비한 주행에너지(J_{total})를 산출하게 된다.

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

$$m\dot{x} = F(t) - R(v(t)) - G(t) - C(t) \tag{2}$$

$$J_{total} = J_+ - J_- = \int_0^t F_+(t)v(t)dt - \int_0^t F_-(t)v(t)dt \tag{3}$$

그림 3은 매티랩 시뮬링크로 작성한 시뮬레이션 프로그램의 메인블럭 다이어그램으로 가속력과 제동력이 열차시스템(EMU)에 입력되고 열차의 속도가 출력되면 속도를 적분하여 이동한 거리를 계산하고, 이동한 거리에 따른 각종 저항력을 계산하여 다시 열차시스템에 입력한다. 이때 에너지계산블럭 다이어그램에서 역행시 투입된 에너지와 제동시 회생되는 에너지를 계산하여 매티랩 프로그램의 워크스페이스에 저장하게 된다.

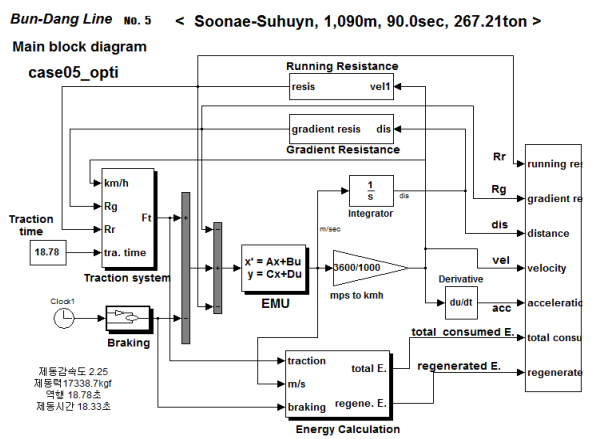


그림 3 매티랩 시뮬링크 메인블럭 다이어그램

Fig. 3 Main block diagram of Matlab Simulink

열차시스템(EMU)은 식(4)와 같은 상태방정식으로 표현되며, 여기서 M 은 열차의 질량을, u 는 열차시스템에 가해진 힘을 말한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= y & \dot{x}_2 &= y \\ \dot{x}_1 &= \dot{x}_2 & \dot{x}_2 &= y = \frac{u}{M} \end{aligned} \tag{4}$$

이때, 상태행렬은 $A=[0 \ 1 ; 0 \ 0]$, 입력행렬 $B=[0 ; 1/M]$, 출력행렬 $C=[1 \ 0]$ 이다.

4.2 시뮬레이션 검증

역행시 소비되는 에너지는 역행시간과 밀접한 상관관계를 가지고 있으며, 일반적으로 기관사들은 역행시 최대가속력을 사용하여 운전하기 때문에 대체로 비슷한 가속도를 나타내나, 회생에너지는 제동시간뿐만 아니라 적용되는 제동력에 따라서도 영향을 받기 때문에 제동시간에 따른 회생에너지 비교로 시뮬레이션 프로그램을 검증하기는 적절치 않은 것으로 판단되어, 시뮬레이션 프로그램의 검증은 실제 열차의 주행데이터인 열차중량, 운행시간, 역행시간과 동일한 조건에서 시뮬레이션을 수행하여 역행시 소비된 에너지와 제동시 회생된 에너지의 합계를 통해 열차의 주행에너지를 실제 에너지 소비량과 비교하였다.

수내 - 서현구간에서 운행한 열차 중 운행에 소요된 시간이 계획된 운전시분을 만족하면서 에너지 소비가 가장 적은 5번, 6번 열차를 대상으로 동일한 운전시분과 역행시분 및 승객하중을 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 표 2와 같이 5번 열차는 실제 주행에너지 7.184kWh, 시뮬레이션 주행에너지는 7.218kWh로 오차율 0.47%, 6번 열차는 실제 주행에너지 7.033kWh, 시뮬레이션 주행에너지 7.172kWh로 오차율 1.98%로 나타나, 오차율이 ±2.0% 이내로 비교적 시뮬레이션 프로그램의 정확도가 높은 것으로 판단되었다.

표 2 주행에너지 비교

Table 2 Comparison of Consumed Energy

| 열차 번호 | 열차 중량 [ton] | 주행 시간 [sec] | 가속 시간 [sec] | 주행 에너지 측정치 [kWh] | 주행 에너지 모의해석 [kWh] | 에너지비교 | |
|-------|-------------|-------------|-------------|------------------|-------------------|----------|---------|
| | | | | | | 차이 [kWh] | 오차율 [%] |
| 5 | 267.21 | 90.00 | 20.30 | 7.184 | 7.218 | 0.034 | 0.47 |
| 6 | 242.31 | 89.00 | 21.30 | 7.033 | 7.172 | 0.139 | 1.98 |

4.3 열차별 최적주행

주행에너지를 최소화하는 최적주행은 역행시에는 최대가속도로 가속하고, 제동시에는 최대 회생제동력에 해당하는 5단 ~ 6단 제동을 적용하는 주행패턴이 된다. 하지만 제동시 실제로는 여유제동력 확보와 기관사 개인별 제동감각의 차이로 인해 4단(감속도 2.0km/h/s)과 5단(감속도 2.5km/h/s)의 평균인 감속도 2.25km/h/s에 해당하는 제동력을 수동운전에 의한 최대제동력으로 적용하여 5번, 6번 열차에 대해

각각 동일한 승객하중, 역간거리, 운전시분을 만족하면서 주행에너지 소비가 최소화되는 주행패턴을 표 3에 나타내었다.

만약 기관사들에 의한 수동운전이 아닌 컴퓨터 시스템에 의한 자동으로 운전할 경우 제동시 최대 회생제동력에 가까운 감속도를 적용하여 열차를 운행한다면 역행시 최고속도를 더 낮출 수 있게 되어 주행에너지 절감 효과가 더 커질 것으로 예상된다.

표 3 최적주행 시뮬레이션 결과

Table 3 Simulation Results for Optimal Driving

| 열차 번호 | 열차 중량 [ton] | 주행 시간 [sec] | 최고 속도 [km/h] | 제동 속도 [km/h] | 주행 에너지 [kWh] | 단위 중량당 주행 에너지 [kWh/kg] | 절감률 [%] |
|-------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|---------|
| 5 | 267.21 | 90.00 | 59.39 | 41.87 | 6.866 | 25.7 | 4.88 |
| 6 | 242.31 | 89.00 | 60.62 | 40.69 | 6.724 | 27.8 | 6.25 |

표 3에서 보는 바와 같이 최대가속과 수동운전에 의한 최대제동력을 이용하여 에너지소비가 최소화되는 최적주행에 의한 시뮬레이션 결과를 표 2의 실제주행 시뮬레이션 결과와 비교하여 보면 주행패턴에 있어 역행시간과 제동시간이 짧아졌고, 이에 따라 주행에너지 소비도 줄어 5번 열차는 7.218kWh에서 6.866kWh로 감소하여 4.88%, 6번 열차는 7.172kWh에서 6.724kWh로 줄어 6.25%의 에너지 절감율을 보이고 있다.

또한 주행에너지를 열차의 중량으로 나눈 단위중량당 소비에너지를 보면, 5번 열차는 25.7, 6번 열차는 27.8로 5번 열차가 가장 효율적으로 운행한 열차가 된다.

그림 4는 열차중량과 운행시간이 각각 다른 5번, 6번 열차의 실제 운행데이터(운전시분, 역행시분, 승객하중)를 이용하여 시뮬레이션을 통해 추정한 속도프로파일과 본 연구에서 제시한 최적주행에 의한 속도프로파일을 비교한 것으로, 먼저 90.0초에 운행한 5번 열차는 59.39km/h에서 타행을 시작하여 41.87km/h에서 제동을 사용하였고, 이에 따라 최고속도는 2.76km/h 낮아졌고 주행에너지 소비도 0.355kWh 줄어든 것을 알 수 있다. 6번 열차의 주행에너지 소비도 0.448kWh 줄어 들었는데 이때의 속도프로파일을 보면, 6번 열차는 89.0초 동안 최고속도 60.62km/h, 제동시작 속도는 41.87km/h로 나타났다.

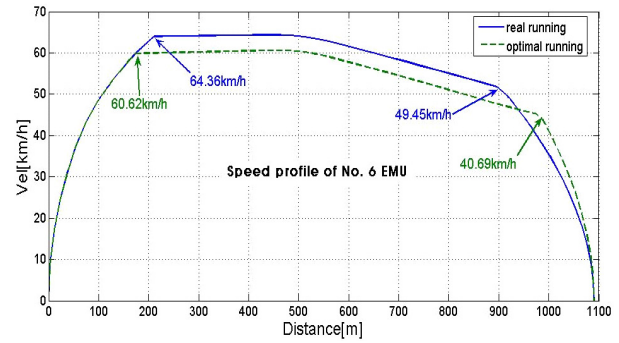
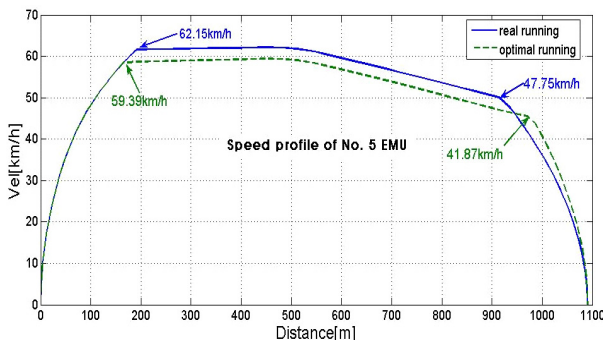


그림 4 최적주행 속도프로파일

Fig. 4 Speed Profile of Optimal Driving

5. 결 론

본 연구에서는 실제로 영업운전을 하고 있는 전동열차의 운행데이터와 소비전력 측정결과를 분석하고 매텔랩 시뮬링 프로그램을 이용하여 작성된 시뮬레이션 프로그램으로 실제 운행데이터와 같은 조건에서 시뮬레이션을 수행하여 분당선 수내-서현역 구간의 운행시분에 따른 최적주행을 위한 속도프로파일을 찾을 수 있었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실제 기관사들의 주행패턴과 비교하여 역행시 최대가속도와 제동시 수동운전에 의한 최대제동력인 4~5단 제동(감속도 2.25km/h/s)을 사용하여 열차의 최고속도를 낮추면 주행에너지를 더욱 절감할 수 있음을 증명하였다.
- 2) 기관사들의 수동운전보다 컴퓨터에 의한 자동운전을 통해 제동 감속도를 최대 회생제동력에 의한 감속도(2.5~3.0km/h/s)에 근접하게 높이면 이론적인 최적주행이 되어 에너지절감 효과는 극대화 될 것이다.
- 3) 분당선 수내-서현역 구간에서 운전시분(89초, 90초)을 만족하는 수동운전에 의한 최적주행 속도 프로파일 - 최고속도(타행시작 속도)와 제동시작 속도를 제시하였다.
- 4) 실제 기관사들의 속도프로파일과 시뮬레이션에 의한 최적주행을 비교해 보면 약 4.8%~6.2%의 주행에너지 절감 효과가 있는 것으로 나타났다.

향후 최적주행에 의한 주행에너지 절감 효과를 극대화하기 위해서는 운행시분과 역간거리를 만족하는 속도프로파일을 자동으로 시뮬레이션하여 최적의 속도프로파일을 제시하는 프로그램 개발이 필요하며, 특정구간만이 아니라 전동열차가 운행하는 전 구간에 대해 최적주행을 제시하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] 김 치태, 김 동환, 한 성호, "전동열차의 주행에너지 소비를 절감하는 운전모드 해석", 한국자동차공학회 논문집, 제13권, 제1호, pp.174~183, 2005.
 [2] 탁 길훈, 김 동환, 김 치태, "최적제어를 이용한 도시철도 차량 자동주행 연구", 한국자동차공학회 논문집, 제15권, 제1호, pp.29~37, 2007.

- [3] 김 용현, 김 동환, 김 치태, “전동열차 운행에너지를 최소화하는 운전모드 결정”, 한국자동차공학회 논문집, 제 15권, 제1호, pp.38~48, 2007.
- [4] C. T. Kim, D. H. Kim, G. H. Kang, (2006) The Optimal Driving Strategy of Electric Multiple Unit, World Congress on Railway Research
- [5] P.G. Howlett and P.J. Pudney, “Energy- Efficient Train Control”, Springer, 1995
- [6] Seong-Ho Han et al., (1999) An Optimal Automatic Train Operation (ATO) Control Using Genetic Algorithms(GA), Proceedings of the 1999 IEEE Region 10 Conference - Vol. 1
- [7] H. S. Hwang, (1994) Control Strategy for Optimal Compromise between Trip Time and Energy Consumption in a High Speed Railway, IEEE Trans. on System Man and Cybernetics, Part A: System and Humans, Vol. 28, Issue 6, Nov.

저 자 소 개



김 치 태 (金 致 泰)

2000년 2월 서울과학기술대학교 기계설계학과 졸업. 2002년 2월 철도기술대학원 철도차량공학과 졸업. 2003년 3월 ~ 현재 철도전문대학원 철도차량시스템공학과 박사과정.

1992년 1월 ~ 현재 한국철도공사 재직.

Tel : 042-615-3311

E-mail : chiti91@korail.com



김 동 환 (金 東 煥)

1986년 서울대 기계설계학과 졸업.

1988년 서울대 대학원 기계설계학과 석사 졸업. 1995년 6월 미국 Georgia institute of Technology 박사.

1998년 ~ 현재 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 교수 재직.

TEL : 02-970-6362

E-mail : dhkim@seoultech.ac.kr



한 성 호 (韓 成 浩)

1991년 2월 숭실대학교 전기공학과 졸업.

1993년 2월 숭실대학교 대학원 전기공학과 석사 졸업. 1996년 3월 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사 졸업.

1996년 7월 ~ 현재 한국철도기술연구원 신소재틸팅열차연구단 단장 재직.

Tel : 031-460-5660

E-mail : shhan@krri.re.kr