1999년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1999. 7.19-21

도시철도 열차성능시뮬레이션 프로그램 개발

안 태기, 김 명룡, 한 성호, 백 종현, 온 정근, 박 현준
한국철도기술연구원

Development of Train Performance Simulator Program for EMU

An Tae ki, Kim Myoung yong, Han Seong ho, Baek Jong Hyen, Ohn Jeung geun, Park Hyun Jun
Korea Railroad Research Institute

Abstract - The TPS accepts as input, vehicle parameters, control parameters, station parameters and right-of-way profile. Outputs of TPS program include velocity, elapsed time and power profiles.
This paper represents how to develop the TPS program. The TPS program simulates the operation of a single train under the input conditions.

1. 서 론

노선을 따라 운행하는 열차는 트랙정보, 차량조건, 운전조건 등에 따라 여러 가지 형태의 운행이 가능하다. 이러한 다양한 조건을 이용하여 주어진 사양을 만족하는 최적화된 운행형태를 찾아내는 것은 쉬운 일이 아니다. 특히 실제 구성된 열차를 이용하여 이러한 실험을 직접 한다는 것은 사실상 불가능하다.

열차성능시뮬레이터(TPS: Train Performance Simulator)는 다양한 조건에서의 열차운행을 컴퓨터를 이용하여 짧은 시간 내에 실험함으로써 여러 가지 운행형태로 운행한 결과를 쉽게 얻을 수 있다. 또한 차량 각부의 적정용량 산정 및 노선의 전기적 용량 및 수송 용량 등의 산정에 기본적인 자료를 제공한다. 그리고, TPS는 열차의 자동운전에 관련된 열차자동운전(ATO: Automatic Train Operation)장치 및 열차자동제어(A Automatic Train Control)장치 등의 기본기술로 사용수 있다. 선진국의 열차제조업체에서는 이미 이러한 TPS시스템이 상당히 발전되어 있으며 이러한 기술을 여러 분야에 이용하고 있다. 그러나, 국내에서는 아직까지 이러한 개발사례와 이용사례가 부족한 실정이다. 앞으로 선진 철도기술을 따라잡기 위해서는 이러한 기본기술이 필수적이며 많은 연구가 진행되어야 하는 부분이다.

현재 개발된 열차성능시뮬레이터 프로그램은 주어진 구간에 대해 열차의 운행을 컴퓨터를 이용하여 짧은 시간 내에 쉽게 할 수 있도록 구성하였으며, 다양한 입력정보를 사용하여 여러 가지 운행형태에 따른 주행결과를 사용자가 쉽게 확인할 수 있도록 구성하였다. 또한 열차성능시뮬레이터 프로그램의 사용자 인터페이스 부분을 웹브라우저 기술 등을 도입하여 보다 향상된 기능을 가지게 하였으며, 사용자가 보다 쉽게 데이터의 입력이나 출력결과를 확인 할 수 있도록 하였다.

2. 본 론

2.1 열차주행관계식

열차운행에 대한 기본적인 수식은 식(1), (2)와 같다.

$$v=\frac{dx}{dt} \tag{1}$$

$$a=\frac{dv}{dt}=\frac{dv}{dx}v \tag{2}$$

식(1)과 (2)는 직선운동에서의 위치, 속도 및 가속도에 대한 관계식을 나타낸 것이며, 가속도가 일정할 때 시간에 대한 속도 함수 $v(t)$와 거리 함수 $x(t)$는 식(3), (4)와 같다.

$$v(t)=at+v_0 \tag{3}$$

$$x(t)=\frac{1}{2}at^2+v_0t+x_0 \tag{4}$$

식(3)과 (4)를 이용하여 현재위치에서의 열차의 주행거리와 속도를 구하기 위해서는 가속도 값이 필요하다. 열차가 현재 상태에서 낼 수 있는 가속도는 열차의 견인력과 열차저항에 관계되며, 유효 견인력을 동적질량(dynamic mass)으로 나눈 값이다. 식(5)와 (6)은 가속도 및 유효견인력에 대한 식이다. 여기서 동적 질량은 실제 질량에 관성 질량을 포함한 것이며, 유효견인력은 열차저항을 고려한 견인력이다.

$$a=\frac{F_E}{m} \quad [\mathrm{m/s^2}] \tag{5}$$

F_E : 유효견인력 [kN]
m : 동적질량 [tons]

$$F_E=F_M-R_T \quad [\mathrm{kN}] \tag{6}$$

F_M : 모터견인력 [kN]
R_T : 열차저항 [kN]

2.2 열차저항

열차저항은 열차가 진행하는 경우 그 진행을 방해하는 힘이다. 열차저항은 많은 인자가 관계되며, 실제적으로 매우 복잡하다. 열차저항에 영향을 미치는 가장 큰 요소로는 지형에 따른 저항, 주행에 의해 발생되는 마찰 저항 등이 있다. 여기에서는 이러한 열차 저항을 크게 곡선저항, 구배저항, 주행저항의 세가지 저항으로 나누어 적용한다. 곡선저항은 차량이 곡선로에 들어갔을 때 생기는 마찰저항을 고려한 것이며, 구배저항은 열차가 구배를 오르거나 내려올 때 생기는 중력에 의한 가감속을 나타낸다. 주행저항은 열차가 직선 평탄선로를 달릴 때 생기는 저항이며, 이 저항은 차량의 형상 및 단면적, 노선의 상태, 기후의 상태, 바퀴의 형태(고무바퀴, 쇠바퀴 등) 등에 따라 달라진다. 열차저항 R_T는 곡선저항, 구배저항, 주행저항을 합한 것으로 식(7)과 같이 표현되며, 각 저항은 식(8), (9), (10)와 같이 표현된다.

$$R_T=R_C+R_G+R_R \quad [\mathrm{kN}] \tag{7}$$

R_C : 곡선저항 [kN]
R_G : 구배저항 [kN]
R_R : 주행저항 [kN]

$$R_C = \frac{800}{R} \times m \times \frac{9.81}{1000} \quad (8)$$

R : 곡선반지름 [m]

$$R_G = g \times m \times 9.81/1000 \quad (9)$$

g : 구배 [o/oo]

$$R_R = \begin{cases} [(1.65+0.0247v)w_m + (0.78+0.0028v)w_t \\ \quad + \{0.028+0.0078(n-1)\}v^2] \times 9.81/1000 \\ \quad : \text{지상구간} \\ (1.867+0.0359v+0.000745v^2) \times 9.81/1000 \\ \quad : \text{지하구간} \end{cases} \quad (10)$$

w_m:동력차 질량 [tons]
w_t :부수차 질량 [tons]

2.3 에너지 관계식

열차가 운행할 때 에너지의 소비에 따라 크게 세가지의 운행모드를 갖게 된다. 열차의 추진을 위한 역행모드, 제동을 위한 제동모드, 관성에 의해 진행되는 타행모드가 있다. 역행모드에서는 가선에서 에너지를 공급받아 전동기에서 에너지를 소비하고, 제동모드에서는 전동기에서 에너지를 발생하여 가선으로 되돌려 준다. 타행모드에서는 에너지와 관계없이 순수하게 지형과 속도에 따른 열차저항에 따라 열차의 진행이 이루어진다. 타행모드에서는 에너지의 소비나 생산이 이루어지지 않는다.

역행시 전동기에서 소비되는 에너지, 전력, 전압, 전류에 대한 관계식은 식(11), (12), (13), (14)와 같다.

$$W_M = \frac{P_M n t}{\eta_i \cdot 1000 \cdot 3600} \quad [\text{kWh}] \quad (11)$$

P_M : 전동기 소비전력(W)
n : 전동기 수
t : 지속시간(sec)
η_i : 인버터 효율

$$P_M = \frac{T_e m/n \cdot v \cdot 9.81}{\eta_g \eta_m \cos\theta_m} \quad [\text{W}] \quad (12)$$

T_e: 견인력 [kg/ton]
m : 질량 [ton]
v : 속도[km/h]
η_g : 기어 효율
η_m : 전동기 효율
$\cos\theta_m$: 전동기 역율

$$V_{M,P} = \begin{cases} \dfrac{V_{dc,M} \cdot v \cdot \sqrt{6}}{v_s \cdot \pi} & : v < v_s \\ V_{dc,M} \cdot \dfrac{\sqrt{6}}{\pi} & : v \geq v_s \end{cases} \quad (13)$$

$V_{dc,M}$: 가선전압 [V]
v : 현재속도 [km/h]
v_s : 정토크영역 [km/h]

$$I_{M,P} = \frac{P_M}{\sqrt{3} V_{M,P}} \quad [\text{A}] \quad (14)$$

제동시 전동기에서 회생되는 에너지, 전력, 전압, 전류에 대한 관계식은 식(15), (16), (17), (18)과 같다.

$$W_R = \frac{P_R n \eta_i t}{1000 \cdot 3600} \quad [\text{kWh}] \quad (15)$$

P_R : 전동기 회생전력(W)

$$P_R = \frac{B_e m v \cdot 9.81 \cdot \eta_g \eta_m}{n \cos\theta_m} \quad [\text{W}] \quad (16)$$

B_e : 제동력 [kg/ton]

$$V_{M,R} = \begin{cases} \dfrac{V_{dc,R} \cdot v \cdot \sqrt{6}}{v_f \cdot \pi} & : v < v_f \\ V_{dc,R} \cdot \dfrac{\sqrt{6}}{\pi} & : v \geq v_f \end{cases} \quad (17)$$

$V_{dc,R}$: 회생전압 [V]
v_f : V/F영역 [km/h]

$$I_{M,R} = \frac{P_R}{\sqrt{3} V_{M,R}} \quad [\text{A}] \quad (18)$$

그리고, 역행과 제동시 RMS(root mean square) 전류값은 식(19)와 같다.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \Sigma i^2 \Delta t} \quad [\text{A}] \quad (19)$$

i : 역행 또는 제동시 순시전류값

2.4 열차성능시뮬레이터

열차성능시뮬레이터 프로그램은 노선데이터, 역정보데이터, 차량데이터, 제한속도데이터 등의 입력데이터를 이용하여, 정해진 운행알고리즘에 의해 시뮬레이션을 수행하고, 결과값을 문서형식 또는 그래프형식으로 출력한다. 이때 결과값은 속도 및 주행거리, 주행시간, 소비/회생에너지 등이다. 그림 1은 데이터입력, 시뮬레이션 수행, 데이터출력 등에 대한 열차성능시뮬레이터의 구조 및 관련된 내용의 블록 다이어그램이다.

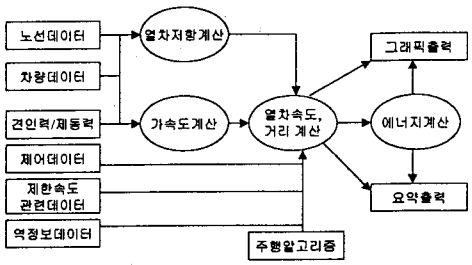

그림 1. 열차성능시뮬레이터의 구조

열차성능시뮬레이터는 입력데이터를 받아 현재 위치에서의 열차저항, 유효견인력, 가속도 등을 계산한다. 구해진 가속도는 사용자에 의해 입력된 최대가속도와 비교하여 최대가속도 범위내에서 결정되어야 하며, 또한 가속도의 변화율을 제한하고 있는 저크율의 범위내에서 결정되어야 한다. 이렇게 결정된 가속도에 의해 현재 열차의 속도 및 주행거리 및 주행시간을 계산한다. 현재 위치에서의 제동거리와 다음 정차역까지 남은 거리를 비교하여 제동여부를 결정한다. 또한 다음 제한속도가 현재 제한속도보다 낮은 경우, 현재위치에서의 제동거리와 다음 제한속도의 위치까지 남은거리를 비교하여 제동여부를 결정한다. 제동모드일 경우 저크율을 고려하여 사용자가 입력한 최대감속도를 이용하여 속도, 주행거리 및 주행시간을 계산한다. 각 역구간사이에서의 속도, 주행거

리 및 주행시간이 결정되면, 결정된 가속도와 속도 등을 이용하여 에너지 계산을 수행한다. 이러한 과정은 도착역까지 반복적으로 수행된다. 사용자는 결과값을 요약문서 및 그래프형식으로 확인할 수 있으며, 프린터장치를 통하여 출력할 수 있다. 그림 2는 이러한 과정에 대한 흐름도를 나타낸 것이다.

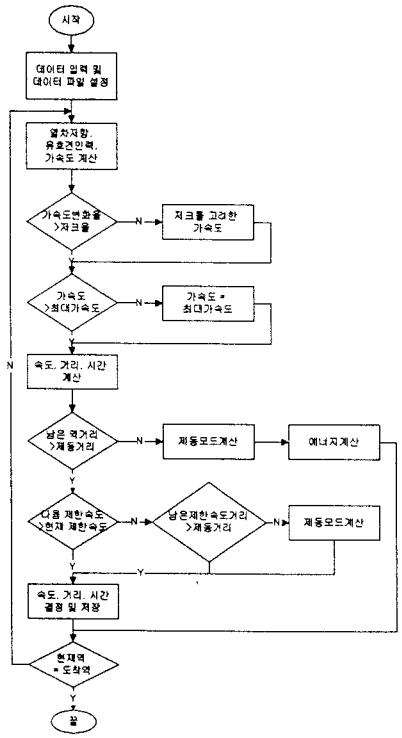

그림 2. 열차성능시뮬레이터 흐름도

2.5 프로그램 개발 및 시뮬레이션 결과

이상과 같은 수식 및 알고리즘에 의하여 개발된 열차성능시뮬레이터 프로그램은 사용자의 편의성을 고려하여 사용자 인터페이스 기능을 향상시켰다. 데이터 입력부분은 그래픽으로 표현된 차량, 역, 노선 등의 객체를 이용하여 사용자가 쉽게 데이터를 입력할 수 있도록 구성하였으며, 데이터 출력부분은 웹브라우저 형태를 적용하여 사용자가 출력 데이터를 여러 형태로 확인할 수 있게 구성하였다. 또한 출발역과 도착역을 사용자가 임의대로 설정할 수 있게 하였으며, 정확한 계산을 하기 위하여 계산스텝을 사용자가 설정할 수 있도록 구성하였다. 그림 3은 개발된 열차성능시뮬레이터 프로그램의 입력부분과 그래픽출력부분, 요약문서출력부분을 포함한 전체화면을 나타낸 것이다. 그림 3에 표현된 3개의 자식윈도우에서 상단에 위치한 화면은 사용자가 차량 또는 역을 마우스에 의해 선택하면 해당정보를 확인 또는 변경할 수 있다. 중간에 위치한 화면은 사용자가 확인하고자 하는 출력값에 대해 그래픽화면으로 표현해주고 있으며, 하단에 위치한 화면은 HTML형식으로 구성된 요약문서를 표현해주고 있다.

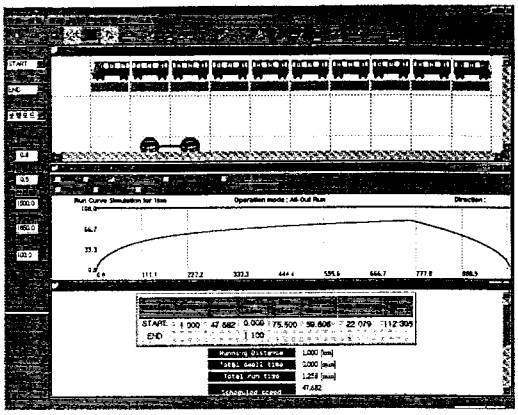

그림 3. 열차성능시뮬레이터 프로그램 전체화면

시뮬레이터의 계산결과를 검증하는 방법은 실제 운행된 결과를 이용하여 비교 검토하는 방법과 기존에 사용된 신뢰성을 가진 철도차량회사의 시뮬레이션 결과와 비교 검토하는 방법이 있다. 본 프로그램의 결과를 검증한 방법은 후자의 방법으로 GEC ALSTHOM에서 서울시 4호선에 제안한 시뮬레이션결과를 이용하여 비교검토하였다. 그림 4는 개발된 프로그램의 수행결과를 GEC ALSTHOM 시뮬레이션 결과와 비교하여 나타낸 것으로 거의 같은 결과를 보여주고 있다.

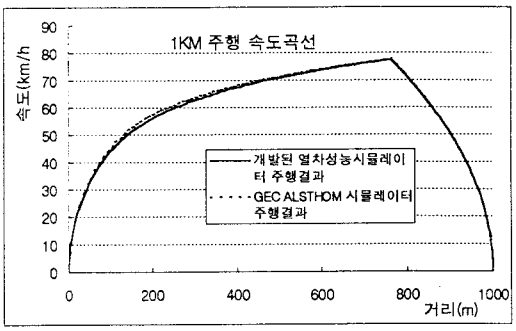

그림 4. 주행 시뮬레이션 결과

3. 결 론

현재 개발된 열차성능시뮬레이터 프로그램은 사용자의 편의성을 최대한 고려하여 사용자가 쉽게 사용할 수 있고, 정확한 결과를 출력할 수 있도록 구현되었다. 또한 이 프로그램은 철도차량을 설계 또는 개발할 때 그리고, 노선을 설정할 때 가장 기본적인 프로그램으로써 그 활용방안은 대단히 광범위하다고 할 수 있다. 앞으로 이 프로그램과 연계하여 다중 열차 운전 시뮬레이터와 전력망구성 시뮬레이터 등을 개발하여 국내 철도 노선의 신설, 철도차량의 개발 등에 적극 이용할 수 있도록 연구가 지속적으로 이루어져야 한다.

[참 고 문 헌]

[1] 안태기외 3명, "열차성능시뮬레이터 프로그램 개발", 대한전기학회학술대회논문집, A권, 1998

[2] 한국고속철도건설공단, "차량 및 운전성능 프로그램 개발연구", 1994.2.

[3] GEC Alsthom, "Proposal Criteria and Requirement of DC 1500V / AC 25KV Dual Voltage 1991.8.