

고속전철 차량시스템의 주행성능 예측 소프트웨어의 개발

정경렬* • 김상헌** • 박수홍** • 이장용***
(1999년 2월 12일 접수)

Development of High Speed Train Performance Simulation Software

Kyung Ryul Chung, Sang Hun Kim, Soo Hong Park and Chang Yong Lee

Key Words : Train Performance Simulation(열차 주행성능 예측), Travel Time(주행시간), Energy Consumption(에너지소비량),

Abstract

A train performance simulation (TPS) software is a computer program that simulates the operation of a train system over a specified railway route and it is widely used in railroad operation and research applications. Numerical and graphical results from the simulation software, which is developed in this study, provide information on such performance variables as travel time, running speed, energy consumption at a specific time interval and in overall service time as the train moves along the route. Three types of input data are required for a computer simulation: track information, train information, and running conditions. The simulation of train performance starts with several simple mathematical models including train configuration, traction efforts, running resistance, and braking requirements. Based on the basic specifications of Korean High Speed Railway System, this study puts a focus on the estimation and assessment of train performance comparing the specific train configurations of KHST20/11, CPLE20/10, PROP20/10, which are proposed from the previous G7 projects.

1. 서론

국내에 고속전철기술개발사업이 전개된 이후에 고속전철의 기술개발을 위하여 열차의 성능향상에 대한 문제가 강하게 제기되고 있으며 이를 위하여 많은 분야에서 다양한 연구가 수행되고 있다. 고속전철의 기술수준의 향상을 위해서는 차량시스템 및 부품 등의 전체적인 면에서의 성능향상을 꾀할 수 있어야 하며 이를 통하여 주행시간의 최적화를 이룩할 수 있다.

차량분야의 어떤 한가지 분야의 기술 향상만으로는 주행시간을 단축시키는데 한계가 있다. 그러

나 여러가지 기술적 향상을 조합하고 차량의 기술적인 성능뿐만 아니라 경제적인 측면에서도 검토하여 차량 편성안을 정함으로써 경쟁력있는 열차를 제작할 수 있게된다. 즉, 열차의 개발 초기단계에서 주행시간을 포함한 열차의 운영측면에서의 성능을 최적화한다는 것은 매우 중요한 기술이다. 따라서 열차의 주행시간 및 에너지 소모량 등은 여러 가지 조건에 대하여 개발 초기단계에서부터 검토되어야 하며 그 결과에 따라 차량 및 관련 부품의 성능을 결정할 수 있을뿐 아니라 열차의 경제적인 운용에 직접적인 영향을 미치게 된다.

열차 주행 성능 시뮬레이션(Train Performance Simulation, TPS) 혹은 열차 성능 계산(Train Performance Calculation, TPC) 프로그램은 특정 주행선로에서의 편성차량의 운행에 대한 시뮬레이션 프로그램이다. 주행성능을 예측하는 목적은 (a) 주행중 소비에너지의 예측, (b) 열차 운행 비용의 예측, (c) 열차의 운행시간의 결정, (d) 주어진 운행시간 내에 주행할 수 있는 견인력의 결정, (e) 다양한 선로 조건에서의 열차 주행 성능 비교, (f) 승

* 회원, 한국생산기술연구원 수송기기기술개발사업단

E-mail : chungkr@mail.kitech.re.kr

TEL : (0417)560-8251 FAX : (0417)560-8230

** 회원, 산업기술시험원 구조해석팀

*** 한국생산기술연구원 수송기기기술개발사업단

객 당 소요에너지의 결정, (g) 차량의 편성 변경에 따른 최적화 연구의 기초 데이터 확보 등을 들 수 있다.

주행 성능 시뮬레이션 프로그램은 차량 및 선로데이터 형식, 차량 모델의 다양성, 적용 가능성, 소프트웨어 사용환경 등에 따라 매우 다양하며 주행시간의 계산 및 최적화는 기존의 선진국의 고속전철의 개발단계에서 다양하게 사용되어졌다. 현재 세계적으로는 약 27개 정도의 주행성능 예측 프로그램이 개발되어 사용되고 있으며 국내에서는 전혀 개발 및 발표된 사례가 없는 것으로 조사되고 있다. 선진국의 경우 Aerospace Corporation, Association of American Railroads (AAR)의 TOS 프로그램, Canadian National Railways, Carnegie-Mellon University의 TPS 프로그램, Day and Zimmermann, Inc., De-Consult의 DeCRUN, General Motors, General Electric, Louis T. Klaunder and Associates의 TVS 프로그램 및 VIP3 프로그램 등은 잘 알려진 개발회사 및 주행성능 예측 시뮬레이션 프로그램 들이며 이들의 세부사양 및 기능은 연구형태나 방법론에서 매우 다양하여 프로그램의 성능을 상호 비교 평가하기는 어렵다. 대부분의 주행성능 예측 프로그램들은 FORTRAN 언어로 개발되었으며 열차 모델의 기술적 정보나 프로그램 개발자, 사용자뿐 아니라 시뮬레이션 결과들도 대부분 제한적이어서 공개되지 않고 있으며 일부 프로그램은 제품으로 판매되기도 하지만 대부분은 프로젝트 성격으로 결과 데이터만을 보고하고 있는 실정이다.⁽¹⁻³⁾

현재와 같은 차량의 기초 설계가 필요한 개발 초기단계에서는 열차의 주행성능을 예측하고 상세설계의 기초 데이터를 제공할 수 있는 독자적인 주행 성능 예측 프로그램과 같은 기술력의 확보는 필수적인 요소로 작용한다. 또한 차량 정보 및 선로 정보 등을 포함한 데이터베이스 처리의 편의성 및 다양한 편성 열차에의 적용을 고려한 프로그램의 모듈화는 프로그램 개발과정에서 필수적으로 고려되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 개발하고자 하는 고속전철의 다양한 차량편성과 주요 시스템의 변화에 능동적으로 대처하여 활용할 수 있는 독자적인 주행성능 예측 소프트웨어의 개발을 목표로 하였다.

열차 주행성능 예측 프로그램은 적용된 모델로부터 수치계산 및 그래픽 결과들이 제공되며 열차의 선로 주행에 따른 주행시간, 열차 속도, 소비에너지 및 연료등과 같은 열차의 성능을 표현할 수 있는 변수들에 대한 정보를 제공한다. 또한 TPS 프로그램은 주행중 열차의 제동, 견인력, 열차의

주행저항, 선로정보 등과 같은 상세한 정보도 얻을 수 있다.

선로데이터는 미리 기록된 선로 데이터로부터 얻을 수 있다. 차량의 데이터는 제작자로부터 적용차량의 실제 성능특성 데이터를 얻지만 실사용 및 유지 보수상 다소 차이가 날 수 있다. 입력정보의 정확도는 적용 모델의 에너지 사용 등의 해석에서 매우 중요하나 현재 국내에서와 같이 설계 및 시험의 단계에서는 넓게 보아 적용 모델간의 비교 측면에서 어느 정도의 오차를 수용할 수 있다. 운행 시나리오는 열차의 최고 운행속도, 최대가속도, 감속도 등 열차의 주행에 있어서의 차량 제어 인자를 말한다.

개발된 소프트웨어는 고속전철의 주행시간과 에너지 소비량의 계획 및 타당성 조사를 위하여 고안되었다. 개발 초기 단계에서 소프트웨어의 개발에 필요한 기초 지식은 De-Consult의 DeCRUN 프로그램을 참조하였다.⁽⁴⁾ DeCRUN 프로그램은 1980년대 개발된 프로그램으로, 기본 구성 및 활용도 면에서 우리에게 기초적인 지식을 주기에는 충분하지만 고속전철기술개발사업에서는 다양한 차량 편성에 대한 적용이 필요하며 이를 위하여 본 연구에서는 독자적으로 소프트웨어를 개발하여 국내 차량 편성안에 대하여 적용하고 비교 평가할 수 있도록 하였다. 본 소프트웨어는 열차의 특성(열차의 성능과 열차의 구동저항에 바탕을 둔 추진력)과 선로 정렬특성(회전반경, 경사도, 터널 유무, 설계허용속도) 등을 이용하여 임의의 구간 사이의 주행시간과 에너지 소비량을 계산한다. 열차의 속도, 거리 및 요구되어지는 에너지는 일정한 시간간격으로 계산되어진다.

본 연구에서는 개발된 열차 주행 성능 예측 소프트웨어를 이용하여 고속전철기술개발사업에서 추진중인 차량편성 모델들에 대한 주행시간과 열차속도, 소비에너지 등을 비교 분석하였으며 효율적인 차량 편성안을 결정하기 위한 기초 자료를 작성하는데 활용하였다.

2. 열차 주행성능의 예측

열차 주행 성능의 예측을 위해서는 열차의 운행, 차량편성방식, 추진시스템, 주행저항 등의 정보와 더불어 몇 가지 수학적 계산을 수행한다. 열차의 추진력은 차량의 편성방식에 따라 견인전동기의 수량이 정해져 계산될 수 있으며 주어진 시간에서의 전체 파워는 저항, 추진시스템, 제동시스

템의 형태와 성능에 따라 정해진다.

2.1 열차 주행성능의 예측

차량의 주행성능을 예측하기 위해서는 열차와 차량의 편성에 따라 다양한 방법으로 계산될 수 있다. 수학적 계산은 시간, 거리, 속도 등이 상호 연관된 루프를 사용한다. 수학적 계산방식의 기본은 1초 간격의 시간 간격에 기초를 두고 계산을 수행하여 매 시간간격 동안의 주행거리, 열차속도, 소비 에너지 등을 계산하며 주행중 선로조건에 따라 주행거리와 열차의 속도 등이 특정 값을 초과할 수 없는 경우가 발생할 수 있으므로 경우에 따라서는 주행거리 및 열차속도에 의해 계산상의 제한을 두는 경우도 있다.

열차의 초기 기동 가속도는 열차의 최대 추진력과 저항의 상호관계에 의해 계산되며 속도에 따라 허용(최대) 추진력과 주행저항이 변화되기 때문에 매 시간 간격 마다의 속도와 이에 대한 추진력, 주행저항 등이 성능예측의 계산에 기본적인 인자로 작용한다. 열차의 제동 성능은 차량 편성 방식과 적용 제동방식에 따라 다를 수 있으며 대부분의 컴퓨터 시뮬레이션에서는 상용제동을 고려하여 일정한 감속도를 지정하는 경우가 많다.

2.2 열차의 추진시스템

열차의 주행 성능을 좌우하는 것은 열차의 추진시스템이다. 이것은 프로그램에서 필수적인 입력정보이며 고속전철의 개발단계에 있어서도 가장 중요한 설계 변수이다. 열차에 사용되는 추진시스템은 다양하지만 열차의 주행 성능을 예측하는 프로그램에서는 적용되는 견인전동기의 추진력 곡선과 소비에너지가 입력 조건으로 사용되며 차량의 편성 방식에 따라 조절될 수 있다.

열차의 주행 성능 예측을 위해서는 차량에 적용되는 각각의 견인전동기의 성능에 기초를 두고 계산할 수도 있으며 전체 추진시스템의 성능을 직접 적용할 수도 있다. 각각의 견인전동기의 성능을 기초로 하는 경우에 사용되는 견인전동기의 수량 및 성능을 변화시키면서 결과를 예측할 수 있기 때문에 대부분은 이 방법을 택하고 있으며 프로그램에서는 라이브러리 형태의 견인전동기의 정보를 읽어 주행 성능을 예측한다.

2.3 열차의 저항

열차가 주행할 때 주행을 방해하는 힘을 받게 되는데 이를 열차저항이라 하며, 공기저항과 차륜 및 기타 회전부분의 마찰 등에 의한 저항을 합한

주행저항, 경사구간에서의 구배저항, 곡선통과시의 곡선저항 등을 받게 되며 터널통과시에는 터널저항도 받게된다. 이 가운데 주행저항이 열차 주행에 가장 큰 영향을 미친다.

열차의 주행저항은 차량의 질량과 주행중의 공기저항에 의한 원인이 지배적이며 공기저항은 속도에 비례하므로 차량의 추진력과 주행저항은 반비례하는 특성을 보인다. 특히 고속에서는 전두부의 형상이라든지 측면의 요철에 의해 공기저항이 크게 영향을 받기 때문에 속도의 상승에 비례하는 결과를 낳는다. 일반적으로 속도에 따른 열차의 주행저항은 식 (1)을 사용하여 계산한다.⁽⁵⁾

$$R = A + Bv + Cv^2 \quad [\text{kN}] \quad (1)$$

여기서,

R : 열차의 주행저항 [kN]

v : 열차의 속도 [km/h]

A, B : 열차 총 질량에 비례하는 상수

C : 공기역학적인 특성(터널저항 포함)을 나타내는 비례상수

식 (1)에서 A, B, C의 상수는 열차의 주행저항을 표현하는데 있어서 가장 중요한 인자들이며 이들의 값은 차량의 무게 및 형상 등으로부터 직접 계산하는 것이 불가능하다. 대부분의 선진국들의 고속전철에서는 실험시험으로부터도 얻기가 곤란하기 때문에 모의 시험을 통한 근사식을 활용하고 있으며 본 연구에서는 고속전철기술개발사업에서 개발하고자 하는 차량과 가장 유사한 프랑스의 TGV-K 모델의 적용값을 프로그램에 적용하였다.

식 (1)에서 A와 B는 열차의 무게에 직접 관련이 있기 때문에 쉽게 구해질 수 있으며 TGV의 경우 일반적으로 $A = 0.77\sqrt{10nM}$ (n =축수, M =열차의 질량)을 사용하며 $B = 0.008M$ 을 적용한다.

C는 공기역학적인 특성을 말하며 이에 영향을 미치는 인자들로는 차량의 단면적, 전두부 형상, 판토그래프 개수, 부스터차의 개수 등을 들 수 있다. C값의 계산을 위한 적용식은 일반적으로 시험을 통한 근사식을 사용한다. TGV-K에 적용된 C값은 1층 객차의 경우

$$C = 0.02225 + 0.00352 T$$

T : 동력객차를 포함한 객차수

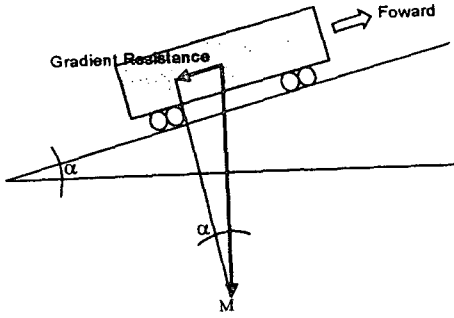


Fig. 1 Gradient Resistance

를 사용하며 2층 객차의 경우

$$C = \{0.00225 + 0.000358(Ck-1)\}XY$$

Ck : 열차당 차량수

X : 차량 최대폭

Y : 차량 최대 높이

를 사용한다.

열차의 저항에는 주행저항 이외에도 구배저항과 곡선저항을 포함한다. 차량의 구배에 의해 발생하는 구배저항은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 구배저항은 $GR = M \cdot \tan \alpha$ 로 표현할 수 있다. 여기서 선로의 구배 α 는 매우 작은 값이므로 선로의 구배를 표시하는 천분율로 표시하면 $s(0/00) = s/1000$ 이 된다. 따라서 열차의 구배저항은 식(2)와 같이 표현할 수 있다. 구배저항은 상구배에서는 +방향의 저항을 받으며 하구배에서는 -방향의 저항을 받는다.⁽⁶⁾

$$\text{구배저항 } GR = M \cdot s / 1000 \quad (2)$$

GR : 구배저항 [kN]

M : 차량의 전체중량 [ton]

s : 구배[m]

차량이 곡선을 통과할 때 차륜과 레일 사이의 마찰이나 대차의 회전으로 인해 곡선부위에서 차량의 주행을 방해하는 힘이 발생하며 이를 곡선저항이라 한다. 이 곡선저항은 곡선 반경이 작을수록 저항은 커진다. 즉, 곡선반경의 크기에 반비례한다. 곡선저항은 궤간에 따라 다소 차이가 있으나 표준궤간에서는 다음 식으로 곡선저항을 표현한다.⁽⁶⁾

$$\text{곡선저항 } CR \approx 800 \cdot M / R \quad (3)$$

CR : 곡선저항 [kN]

R : 곡선반경 [m]

Table 1 Field structure of track information data

From [km]	To [km]	Grad. [0/∞]	Rad. [m]	Tunnel	Speed [kph]
0	0.48	0	0	0	100
0.48	0.86	0	1500	0	150
0.86	1.67	1.5	0	0	250
1.67	2.01	0	7000	0	350
2.01	2.53	1.2	5300	1	350
:	:	:	:	:	:

① "0" of Rad. indicates straight line

2. "0" and "1" of Tunnel indicate open field and tunnel, respectively.

차량의 주행성능 예측에 사용되는 저항의 수식은 대부분 유사한 2차 방정식 형태로 표현되기 때문에 적용하고자 하는 대상 차량 모델의 형태나 구성에 따라 새로운 수식을 만들 수 있다.

3. 열차성능예측 소프트웨어의 개발

3.1 기초 데이터의 구성

본 소프트웨어를 운용하기 위해서는 차량 및 선로에 대한 정보를 입력하여야 한다.

차량과 관련된 정보로는 차량의 편성 즉, 각 차량의 중량과 차량의 수 등의 기본적인 사항들과 운행에 필요한 최대속도, 최대가속도, 최대감속도, 에너지효율, 추진력, 주행저항, 곡선저항, 구배저항, 제동저항 등의 정보를 필요로 한다.

선로에 대한 정보는 기본적으로 섹션과 링크로 구분되며 전체 선로는 이들의 조합으로 구성된다. 선로정보에서는 여러 개의 정거장으로 분리되며 두 정거장 사이의 선로를 섹션으로 정한다. 이 섹션에는 선로의 특성 즉, 최대운행속도, 곡선부의 반지름, 구배, 터널 유무 등에 따라 링크로 나뉘며 각각의 링크는 시작지점과 끝지점의 위치정보가 필요하다. 이러한 선로정보는 하나이상의 데이터 파일로 만들어져 활용한다. 선로정보 데이터 파일의 정보내용은 다음 Table 1과 같다.

3.2 소프트웨어의 구성

본 소프트웨어의 목적은 위에서 언급한 것과 같이 차량의 주행시간 및 소비에너지의 계산이다. 본 소프트웨어에서는 목적에 부합되는 기능 이외에 사용자의 편의를 위하여 GUI 환경을 MS Windows 환경하에서 손쉽게 사용할 수 있도록 하

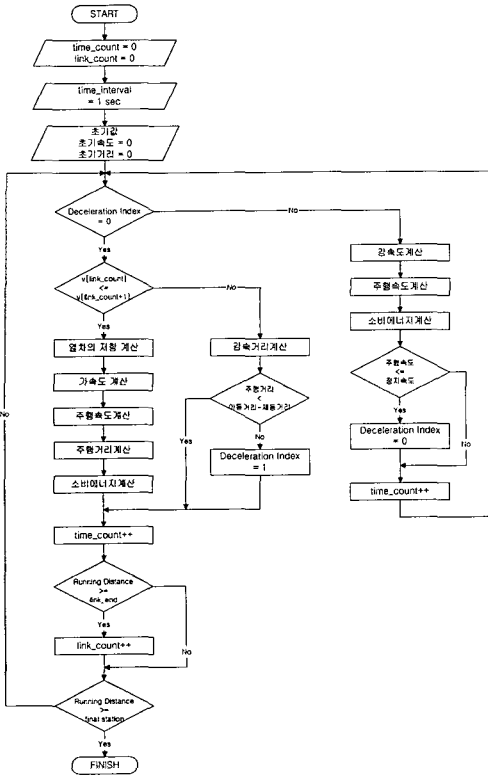


Fig. 2 Flowchart of the simulation software

였다.

소프트웨어의 기본 구성은 차량 및 선로정보 데이터의 취득, 차량의 주행시간 및 소비에너지의 계산, 그리고 결과화면의 도시 등 세 가지 주기능으로 구분된다. 차량 및 선로정보는 차량 편성방식, 최대허용속도, 최대가속도, 최대감속도 등의 주행조건과 운행선로정보에 대한 데이터를 읽어 들일 수 있다.

입력된 차량 및 선로 정보를 가지고 주행시간 및 소비에너지를 계산하게 된다. Fig. 2는 본 소프트웨어의 개략적인 흐름도를 보여주고 있으며 본 소프트웨어의 입력 부분 및 계산 과정들은 차량 편성 및 운행환경의 변화에 따라서도 계산이 가능하도록 모듈화하여 구성하였다.

계산된 결과는 주행시간에 대한 소비에너지, 주행거리, 주행속도, 순간가속도, 선로의 높낮이, 선로의 곡선반경 등에 대한 정보를 한눈에 볼 수 있도록 Fig. 3과 같이 나타내었다. 사용자는 주행시간 및 소비에너지 량을 화면에서 가시적으로 볼 수 있으며 파일로 저장하거나 프린터로 인쇄할 수 있다. 이러한 출력방식은 각각의 환경변화에 대한 영향을 비교 평가하는데 유용하게 사용될 수 있다.

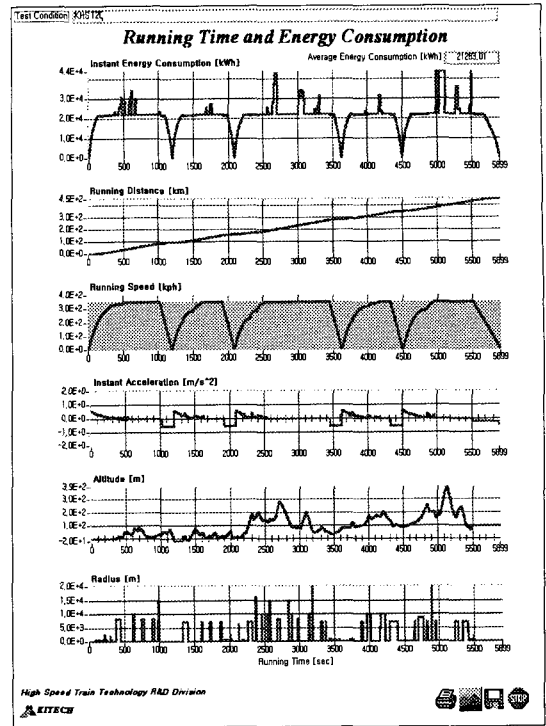


Fig. 3 Predicted results of train performance

4. 고속전철 차량편성안에 대한 적용예

4.1 차량의 편성

본 연구를 통하여 개발된 주행성능 예측 프로그램을 이용하여 현재 고속전철기술개발과제에서 검토되고 있는 KHST20, CPLE20, PROP20, KHST11, CPLE10, PROP10 모델에 대하여 적용하고 각 모델별로 주행성능을 예측, 비교하였다. KHST20과 KHST11 모델은 고속전철기술개발사업의 총괄기술교류회를 중심으로 2차년도 사업에서 작성된 차량시스템 기본 편성안이며 CPLE20, CPLE10은 중편편성을 고려한 차량시스템 편성안이고, PROP20, PROP10 모델은 추진분야에서 추진시스템의 성능향상을 위하여 새로 제안한 차량시스템 편성안이다. 차량편성의 기본사양은 Table 2와 같다. 표에서 KHST11과 PROP10의 차량별 좌석수는 436명이며 장애자용 화장실을 설치하는 경우 각각 432명과 427명으로 준다. 본 연구에서 주행성능의 예측을 위해서는 차량의 설계변경을 고려하여 실제 열차 총질량보다는 축 당 하중을 고려한 열차질량을 사용하여 계산하였다.

Table 2(a) Basic specification of 20 train onfiguration

	KHST 20	CPLE 20	PROP 20
Train Configuraion	2P	4P	2P+2B
	4M	4C	2C
	14T	12T	14T
Seats of trainset	871	856	867
# of shaft[ca]	48	52	52
Load per axle[ton]	17	17	17
Total mass of trainset[ton]	780	806	806
Total mass of trainset according to load per axle[ton]	816	884	884
# of traction motors	16	16	16

Table 2(b) Basic specification of 11 train configuration

	KHST 11	CPLE 10	PROP 10
Train Configuraion	2P	2P	2P
	2M	2C	2C
	7T	6T	6T
Seats of trainset	432/ 439	428	427/ 439
# of axle[ca]	28	26	26
Load per axle[ton]	17	17	17
Total mass of trainset[ton]	458	403	403
Total mass of trainset according to load per axle[ton]	476	442	442
# of traction motors	12	8	8

☞ P : Power Car, B : Booster Car, M: Motorized Car, C : Connecting trailer, T : Trailer

4.2 추진력과 주행저항

주행성능 예측에 이용 가능한 추진력은 소위 ZV-Diagram 이라 불리는 것으로 유도되며 서로 다른 속도 범위에 대하여 식 (4)와 같이 선형 함수의 조합으로 표현된다.⁽³⁾

$$\text{추진력} = A + Bv + C/v + Dv^2 \quad (4)$$

Table 3 은 KHST 에 사용되는 견인전동기 1 대 당 추진력을 구하기 위한 상수값을 속도에 따라 나타내고 있다. 본 연구에 적용된 견인전동기 모델의 경우에 추진력은

$$\text{추진력} = A + B(v - \alpha)$$

의 수식을 사용하였다.

열차의 저항은 2.2 절에서 설명한 것과 같이 주행저항, 터널저항, 구배저항, 곡선저항의 조합으로

Table 3 Propulsion force of a traction motor [kN]

Speed [kph]	A	B	α
0~30	31.25	0	0
30~120	31.25	-0.0902	30
120~200	23.15	-0.043	120
200~250	19.69	-0.0812	200
250~300	15.63	-0.05	250
300~	13.13	-0.0313	300

Table 4 Running resistances for train configurations

	KHST 20	CPLE 20	PROP 20	KHST 11	CPLE 10	PROP 10
Total mass of trainset(M)	816	884	884	476	442	442
# of axle(n)	48	52	52	28	26	26
A	481.9	522.1	522.1	281.1	261.0	261.0
B=0.008M	6.53	7.07	7.07	3.808	3.54	3.54
M Car + Trailer (Tn)	18	16	18	9	8	8
C=0.02225 + 0.00352xTn	0.085 6	0.093 2	0.085 6	0.053 9	0.050 4	0.050 4
T (resistance constant by tunnel)	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3

나타나는데 여기서 주행저항의 값에 가장 크게 영향을 받는 것으로 나타난다. 식 (1)에 나타난 상수 A, B, C 값에 대하여 차량 편성 모델별로 열차저항을 구해보면 Table 4 와 같으며 터널을 통과하는 경우 터널의 저항값은 1.0~1.5 를 적용하는데 본 프로그램에서는 1.3 의 값을 적용하였다. Fig. 4 에서는 차량편성 모델의 추진력곡선과 주행저항곡선을 비교하여 보여주고 있다.

열차의 주행저항과는 별도로 중요한 것이 열차의 제동저항이다. 제동저항은 편성차량에 적용되는 제동장치의 종류나 성능에 따라 다양하며 제동 방식에 있어서도 달라질 수 있다. 그러나 현 단계에서는 정상적인 열차의 주행을 고려하기 때문에 제동은 철도기술연구원에서 제안한 고속전철시스템 기본 사양중 상용제동을 사용하는 것으로 한다. (0.58m/s²의 감속도로 8150m 의 제동거리를 갖는다.)

4.3 선로정보

주행성능 예측에 사용된 선로정보는 기본적으로 3.1 절에서 설명한 기본 선로데이터를 만족하는 입력데이터를 기본으로 하였다.

선로의 구배, 곡선, 터널유무에 대한 정보는 고속전철시스템 기본사양에 제시된 선로정보데이터를 사용하였다. 경부고속전철 선로의 정차역은 Table 5 에 나타내었다. 본 프로그램에서는 서울-천안-대전-대구-부산을 고려하였으며 서울-부산의 거리는 430.64 km 를 사용하였다. 또한 고속선로에서의 주행시간의 비교를 위해서는 실제 고속주행이 이루어 지는 남서울-부산 구간에 대하여 예측 비교하였다. 서울-남서울 구간은 가속 가능한 최고 속도가 약 100~125km/h 로 주행되기 때문에 고속주행의 기능을 충분히 발휘할 수 있는 구간으로 고려하기에는 어렵다.

선로에서의 허용속도는 열차의 주행시간 계산에 매우 중요한 인자로 작용하는데 차량의 최고속

도는 385km/h 를 초과할 수 있도록 설계되지만 실제 선로의 상태에 따라 한계가 결정된다. 열차의 속도한계에 영향을 주는 인자들 중에서 곡선선로에서의 열차의 운행은 승차감 및 안정성과 직결되므로 열차의 운행반경에 따라 주행속도를 낮추어 주어야 한다. Table 6 에서는 곡선 반경의 크기에 따른 허용속도를 보여주고 있다. Table 6 에 나타난 속도한계는 TGTV-K 의 예를 보여주고 있으며 고속전철기술개발과제에서는 곡선반경이 3500m 이상인 경우 속도에 영향을 주지 않는 것으로 설계되므로 주행시간을 단축시킬 수 있는 여유를 가지고 있다.

4.4 주행성능 예측결과

4.1 절에서 설명한 차량 편성안과 4.2 절의 차량 편성별 추진력 및 주행저항, 4.3 절의 선로정보를 바탕으로 주행성능을 예측하였다. 초기 출발시기의 차량 편성별 기동가속도는 Table 7 에서 보여주고 있다. 20 량 편성차량의 경우 열차 총 중량 및 주행저항이 작은 KHST20 의 기동 가속도가 가장 크게 나타나고 있으며 반 편성의 경우 견인전동기의 수가 많은 KHST11 의 기동가속도가 가장 크게 나타나고 있다.

서울-부산 구간에서의 열차의 주행시간 및 평균 소비에너지를 예측한 결과를 Table 8 에서 보여주고 있다. 서울-부산간의 계산결과 주행시간은 106

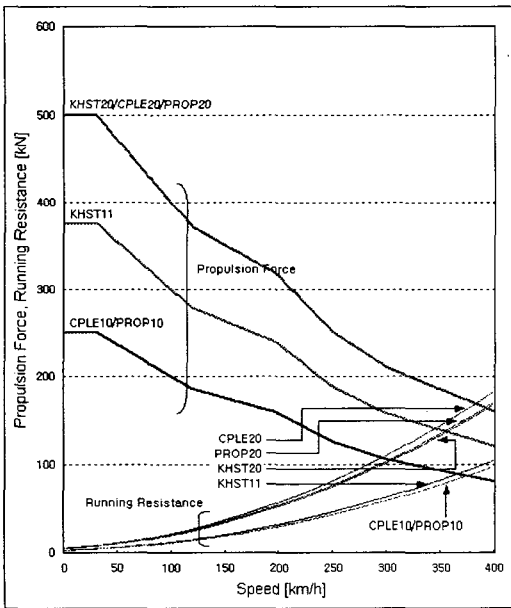


Fig. 4 Propulsion force and running resistance of proposed trainsets

Table 5 Stations

Station	Distance[km]
Seoul	0.0
Nam-Seoul	21.69
Chonan	96.10
Taejon	158.98
Taegu	286.02
Kyongju	349.60
Pusan	430.64

Table 6 Speed limit by curve radius

Curve Radius [m]	Maximum Speed [km/h]
5,000	290
4,000	260
3,000	230
2,000	180
1,000	135
900	130
800	125
700	115
600	110
500	100
400	90

Table 7 Starting acceleration of trainset

Train Configuration	기동가속도 [km/h/s]
KHST20	2.1
CPLE20	1.9
PROP20	1.9
KHST11	2.7
CPLE10 / PROP10	1.9

분~109분 정도로 나타났으며 KHST11이 105분 28초로 주행시간이 가장 짧게 나타나고 CPLE10과 PROP10은 108분 45초로 가장 길게 나타났다.

Fig. 5는 서울-부산 구간에서의 KHST20 차량의 주행시간과 열차속도를 보여주고 있다. 그림에서 검은바탕으로 나타낸 부분은 선로의 해발고도를 나타내는 것이며 실선은 본 소프트웨어를 통하여 예측된 열차의 주행속도를 나타내고 있다. 그림을 보면 해발고도가 급상승하는 부분들에서 주행저항이 커져 주행속도가 떨어지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5에 나타낸 KHST20의 경우와 같이 서울-부산의 주행 구간에서 실제 서울을 출발하여 약 350초가 소요되는 10km 지점까지는 100km/h 미만의 속도로 운행되며, 시속 125km/h를 초과할 수 있는 거리까지의 소요시간은 약 450초로서 운행선로중에 곡선반경이 작은 곡선구간이 많아 실제 고속주행이 불가능하기 때문에 남서울역이 있는 21.69km까지는 중저속의 속도로 운행하여야 하며 이 구간의 주행시간은 약 10분(600초)가 소요되는 것으로 나타났다.

실제 고속선로에서의 주행성능을 계산하기 위해서 실제 고속주행선로로 간주할 수 있는 남서울-부산 구간에서의 주행시간 및 평균소비에너지량을 계산하여 Table 9에 나타내었다. 실제 고속선로 구간으로 간주되는 남서울-부산 구간에서는 예

상했던 바와 같이 주행시간은 서울-부산 구간 보다 약 10분가량이 짧게 나타나 97분~100분의 주행시간을 보였으나 평균 소비에너지량은 오히려 증가하는 것으로 나타났다. 이는 서울-남서울 구간에서의 곡선에 의한 속도 제한이 고려되지 않기 때문인 것으로 판단된다. 결국 고속선로 구간으로 간주되는 남서울-부산 구간에서의 소요시간은 고속전철시스템 기본사양에서 제시하고 있는 100분을 만족할 수 있을 것으로 판단된다.

편성 차량별 주행시간과 열차의 속도곡선을 비교한 결과 20량 차량의 경우와 KHST11의 경우에는 편성 차량에 따라 주행시간은 다르게 나타나고 있으나 속도곡선의 경우에는 거의 유사한 형태를 보이고 있다. 그러나 CPLE10/PROP10 편성의 경우에는 다소 차이를 보이고 있었다. Fig. 6는 KHST20 편성차량의 경우에 주행시간별 열차의 속도를 보여주고 있으며 그림 바탕에는 선로의 출발점을 0으로 하여 선로의 구배에 따른 상대적 높이를 함께 보여주고 있다. Fig. 7은 KHST11 차량의 주행시간과 열차속도를 보여주며 Fig. 8은 CPLE10과 PROP10의 경우를 보여주고 있으며 그림을 보면 구배가 갑자기 높아지는 구간에서 열차의 구배저항이 커지기 때문에 속도가 떨어지는 것을 볼 수 있는데 이때에는 소비에너지의 양도 크게 증가한다. 이러한 현상은 CPLE20과 CPLE10, PROP10의 편성안의 경우에 일부 구간에서 볼 수 있으며 기타 구간에서는 차량을 350km/h까지 속도를 높이기엔 충분한 견인력을 가지고 있는 것으로 나타났다.

차량 편성별 주행시간을 비교한 결과 KHST20과 KHST11이 가장 빠른 것으로 나타났으나 이는 승객수를 고려하지 않은 비교이며 차량별로 승객의 수가 다르기 때문에 상대적으로 비교

Table 8 Train performances in Seoul-Pusan line

Train Configuration	Running Time	Average Energy Consumption [kWh]
KHST20	106 분 37 초	20066.36
CPLE20	108 분 04 초	20212.72
PROP20	107 분 37 초	20124.65
KHST11	105 분 28 초	14059.85
CPLE10	108 분 45 초	10117.00
PROP10	108 분 45 초	10117.00

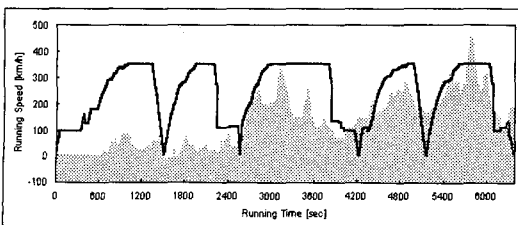


Fig. 5 Running time and speed of KHST20 in Seoul-Pusan line.

Table 9 Train performance in high speed section (Namseoul-Pusan)

Train Configuration	Running Time	Average Energy Consumption [kWh]
KHST20	97 분 53 초	20377.31
CPLE20	99 분 20 초	20529.12
PROP20	98 분 58 초	20423.09
KHST11	96 분 57 초	14664.51
CPLE10	100 분 06 초	10266.29
PROP10	100 분 06 초	10266.29

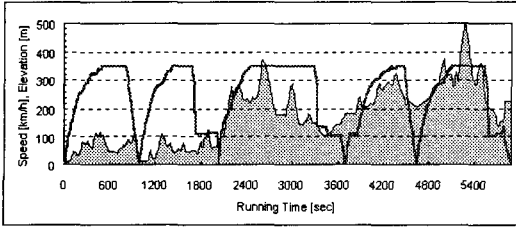


Fig. 6 Running time and speed of KHST20

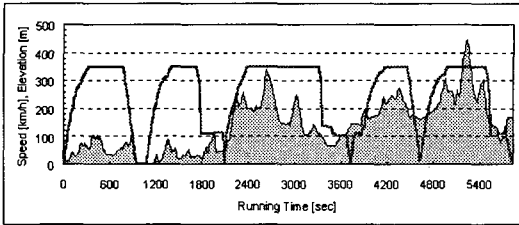


Fig. 7 Running time and speed of KHST11

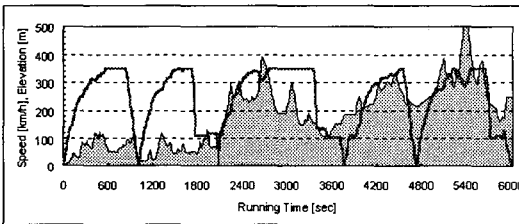


Fig. 8 Running time and speed of CPLE10/PROP10

Table 10 Average energy consumption per a seat

Train Configuration	Average Energy Consumption /seat [kWH]
KHST10	23.4
KHST11	33.95/33.4
CPLE20	23.98
CPLE10	23.99
PROP20	23.56
PROP10	23.99/23.39

하기위해서 좌석 당 평균소비에너지를 계산하여 Table 10에 나타내었다. KHST11과 PROP10은 장애자용 화장실의 유무에 따라 두 가지 값을 갖는다. 표에서 알 수 있듯이 KHST 차량 편성안의 경우에는 20량과 11량의 경우에 좌석 당 평균 소비 에너지의 차이가 크게 나타나고 있으며 CPLE 편성안과 PROP 편성안의 경우에는 20량과 10량의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 고속전철의 열차 성능을 계산하고 차량의 적용 가능성을 검토하기 위하여 열차 주행성능 예측 프로그램을 개발하였으며 이를 이용하여 고속전철기술개발사업에서 추진중인 차량 편성 모델들에 대한 주행시간과 소비에너지 등을 비교 분석하여 효율적인 차량 편성을 위한 기초로 삼고자 하였다.

본 연구에서 개발된 열차 주행성능 예측 프로그램은 차량의 특성, 주행선로의 정보 등을 이용하여 주어진 구간에서의 주행시간, 소비에너지 등을 비롯하여 주행거리별 순간가속도, 사용에너지, 주행속도 등을 파악할 수 있도록 하였다. 또한 차량의 운행환경 및 편성방식에 따라 다양하게 적용할 수 있도록 프로그램을 모듈화 하였으며 이를 위하여 차량정보 및 선로정보 등을 포함한 기초 정보들을 데이터베이스로 처리하여 편의성을 증대시켰다.

본 연구에서 개발된 열차 주행성능 예측 프로그램을 이용하여 KHST20/11, CPLE20/10, PROP20/10 등의 편성안에 대하여 서울-부산, 남서울-부산 구간에서의 주행시간과 평균소비에너지량 등의 주행성능을 비교 평가한 결과 주행시간은 KHST 차량편성안이 가장 짧게 나타났으나 좌석당 평균 소비 에너지량은 KHST 차량의 경우 20량과 11량의 차이가 많이 났으며 CPLE 편성안과 PROP 편성안의 경우에는 20량과 10량의 경우에 좌석당 평균소비에너지량의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 선로정보, 차량정보, 속도한계 등을 고려하여 차량편성별 주행시간과 평균 소비 에너지량, 속도 프로파일 등의 계산 및 차량별 비교에 관점을 두었으며 차량의 기본설계를 위한 기초 데이터로 활용할 수 있는 단계에서의 연구 결과이다. 그러나 향후, 상세한 연구단계에서의 문제의 복잡성을 미루어 볼 때 사용자가 가장 효과적인 변화를 줄 수 있도록 하는 최적화 툴의 개발이 고려되어야 한다. 이를 위해서는 연구개발자의 입장에서 선로의 cant deficiency, tilting motion, 속도에 따른 인체의 영향 등을 고려한 연구가 계속 진행되어야 한다.

참고문헌

- (1) Quetin F, Castel L, Gautier P, and Zheng J.S, 1997, "A New Tool to Optimize the Travel Time Won on

- Tilting Trains Versus Investment,” *WCRR97* Vol.A, pp.67~72.
- (2) Howard S.M, Gill L.C, and Wong P.J, 1983, “Review and Assessment of Train Performance Simulation Models,” *Transportation Research Record* 917, pp.1~6.
- (3) Deutsche Eisenbahn-Consulting GmbH, 1989, “Determination of Running Time and Energy Consumption for Planning and Feasibility Studies.”
- (4) DE-Consult, 1997, *Very High Speed Rail Project*, Final Report Phase1, Vol. 1.
- (5) Peters, 1997, “Drag and Resistance to Motion of a New Generation of Korean High Speed Trains,” Krauss Maffei short term report LA-TB-05/97.
- (6) 伊原一夫, 1997, 철도차량메카즘圖鑑, グランブリ出版.
- (7) 김선호, 1998, “철도시스템의 이해,” 자작아카데미.
- (8) 한국철도기술연구원, 1998, “고속전철시스템 기본사양.”
- (9) 한국생산기술연구원, 1998, “차량시스템 개념설계 및 평가기술개발,” G7 고속전철기술개발사업 2차연도 보고서.
- (10) 한국생산기술연구원, 1998, “차량시스템 편성안 개요,” 차량시스템 엔지니어링기술분야 기술협의회 기술검토자료(차량시스템 017).