

## 한국형 고속전철 열차성능해석 프로그램

### Train Performance Simulation Program for Korea High Speed Railway System

이태형<sup>1</sup>, 박춘수<sup>2</sup>, 신중린<sup>3</sup>

Tae-Hyung Lee, Choon-Soo Park, Joong-Rin Shin

**Keywords :** Train Performance Simulation(열차성능해석 시뮬레이션), Traction Performance(견인성능), Braking Performance(제동성능), Korea Train eXpress (경부고속철도차량), Korea High Speed Train(한국형 고속전철),

#### Abstract

This paper presents development of train performance simulation(TPS) program to analyze traction performance, braking performance and energy consumption for Korea high speed railway system. The conventional TPS program have some inconveniences such as DOS-based platform, user interface and limited function. The simulation technique model using scenario menu, various analysis function and object-oriented design/programming is presented. This simulation result have been compared with Alstom's for the Seoul-Pusan High Speed Rail Project.

#### 1. 서 론

철도에 관한 기술이 발달한 선진국에서는 철도 시스템을 새로이 건설하거나 기존 시스템의 설계를 변경하는 경우 사전에 그 시스템이 운전되는 상황을 모의해서 성능을 평가할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 개발해왔다.

열차성능해석 시뮬레이션(TPS, train performance simulation)은 한 편성의 열차가 일정 선로구간을 주행하는 데에 따른 시간별 위치, 속도, 전력소비 등의 제반 성능을 분석하는 작업이다. 이는 일반적으로 주어진 선로조건 하에서 열차의 성능이 적합한 지 여부를 판단하거나 선로 형상을 설계함에 있어서 열차의 성능과 관련하여 선로 설계의 적합 여부를 검토하는 목적으로 사용된다[1,2,3].

경부고속철도사업 계약으로 프랑스로부터 기술 이전

<sup>1</sup> 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

<sup>2</sup> 정회원, 한국철도기술연구원, 책임연구원

<sup>3</sup> 비회원, 건국대학교 전기공학과, 교수

된 열차성능해석 시뮬레이션 프로그램은 도스(DOS) 기반이어서 사용자 인터페이스(user interface)에 불편한 점이 있고 기능이 제한되어 있어 사용자의 필요에 따라 프로그램을 활용하는데 어려움이 있다[4]. 특히, 이 프로그램은 자세한 부분까지 공개가 되지 않아 향후 고속전철 시스템의 신규 건설이나 설계를 변경하는 경우 필수적으로 수행되어야 하는 성능해석에 활용하는 데에 어려움이 많을 것으로 예상된다.

따라서, 최고속도 350 km/h급의 한국형 고속전철 시스템 개발이라는 목표로 시작된 고속전철기술개발 사업을 통해서 기존 프로그램의 문제점을 보완한 열차성능해석 시뮬레이션 프로그램을 독자적으로 개발하였다. 기존 프로그램 환경이 도스(DOS)임에 반해 개발된 프로그램은 윈도우(windows) 환경으로 개발하여 메모리 제약, 주변장치와의 인터페이스(Interface), 사용자 인터페이스(User interface) 등의 문제점을 해결하였다. 특히, 시나리오(Scenario) 대화상자만으로 시뮬레이션 상황을 검토할 수 있고, 제어, 열차, 선로 데이터 입력 대화상자를 통해 한 화면에

서 오류 없이 데이터를 입력하거나 수정, 검토할 수 있다. 한편, 주행저항을 고려한 가감속 거리/시간, 가감속도 계산과 균형속도 계산 및 계산 결과 화면 출력 기능을 추가하여 차량의 견인 및 제동 성능 분석을 좀 더 면밀히 수행할 수 있다. 개발된 프로그램을 이용하여 한국형 고속전철의 열차성능해석을 수행하였고 [5,6,7], 그 결과로 견인/제동성능 등에 대한 기본사양을 제시하였다[8,9]. 이 기본사양을 바탕으로 개발된 시제차량은 7량 1편성으로, 성능 검증과 안정화를 위해 경부고속철도 시험선에서 시운전 시험 중에 있다.

본 논문에서는 한국형 고속전철 차량의 견인/제동성능, 소비에너지 해석을 위해 개발된 열차성능해석 시뮬레이션 프로그램에 대하여 소개하고 기존 프로그램과 비교를 통해 개발 프로그램의 성능을 검증하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 열차성능해석 알고리즘

열차성능해석은 식(1)과 같은 차량 운동방정식을 시간(또는 거리, 속도)의 함수로 위치, 주행 속도, 사용 전력 등에 대해 계산하는 것이다. 단일 열차의 주행을 모의하기 위해 입력으로 열차 중량, 추진 시스템 특성(속도에 대한 견인력/제동력과 효율 곡선), 열차 저항, 차량 수 및 길이, 보조 전기 부하 등과 같은 차량 데이터와 선로의 구배, 곡선 반경, 속도제한, 역 위치 등의 주행 선로 데이터와 정차 역, 정차 시간 및 정차 패턴과 같은 운영 데이터가 사용되며, 주행 거리, 속도, 시간 및 사용된 추진 및 제동력, 유효 및 무효 전력량 등의 프로파일이 출력된다.[1,2,3]

$$\frac{dS}{dt} = V \tag{1}$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{(T - R_r - R_c \pm R_g)}{(1 + \chi)W}$$

여기서,

- T : 견인력/제동력, N
- R<sub>r</sub> : 주행저항, N
- R<sub>c</sub> : 곡선저항, N
- R<sub>g</sub> : 구배저항, N
- χ : 관성계수
- W : 열차중량, kg

식(1)의 차량 운동방정식에서 견인력/제동력은 차량 시스템의 추진시스템과 제동시스템에 의해 속도별로 주어지는 값이며, 주행저항은 열차가 평탄한 직선선로를 주행할 때 발생하는 저항으로서 여러 가지 원인에 의해 발생되지만 일반적으로 식(2)와 같이 Davis Formula를 이용하여 속도의 함수로 표현할 수 있다.

$$R_r = a + bV + cV^2 \tag{2}$$

여기서,

a, b, c : 상수

V : 속도, km/h

곡선저항은 열차가 곡선을 주행할 때 발생하는 것으로 식(3)과 같이 표현된다.

$$R_c = \frac{K}{R} \tag{3}$$

여기서,

K : 상수

R : 곡선반경, m

구배저항은 식(4)와 같이 표현되며, 열차가 구배를 올라가거나 내려갈 때 중력에 의해 작용되는 저항을 말하며, 올라갈 때는 열차를 감속시키는 저항으로 작용하나 내려갈 때는 오히려 가속시키는 힘으로 작용한다.

$$R_g = W \cdot g \cdot G \tag{4}$$

여기서,

g : 중력가속도, m/s<sup>2</sup>

G : 구배, ‰

열차성능해석 프로그램의 핵심은 전방향 및 후방향 궤적 계산이다. 전방향 계산에서는 열차의 운동 방정식이 양의 시간이나 전방향의 거리 단위로 적분되는 반면에 후방향 계산에서는 음의 시간이나 후방향 거리 단위로 적분된다. 궤적 계산의 예를 Fig. 1에 보았다. Fig. 1에서 A위치부터 B위치로 이동하기 위해서는 최소 궤적이 사용된다는 가정 하에 다음과 같은 단계를 거쳐야 한다.

[단계 1]

최대 추진력을 사용하여 A위치로부터 C위치까지의 전방향궤적을 만들며, 이때 보다 낮은 속도제한의 시작인 C위치까지 최대 속도 제한을 유지한다.

[단계 2]

C위치로부터 최대 제동력으로 제동하여 F위치까지 후방향 궤적을 생성한다. F위치는 이전의 전방향 궤적과 후방향 궤적의 교차점으로 결정된다.

[단계 3]

C위치로부터 보다 높은 속도 제한을 갖는 D위치까지 전방향 궤적을 만든다.

[단계 4]

D위치로부터 보다 낮은 속도 제한을 갖는 B위치까지 최대 추진력을 사용하여 전방향 궤적을 만든다.

[단계 5]

최대 제동력을 사용하여 B위치로부터 E위치까지 후방향 궤적을 만든다. E위치는 후방향 궤적과 이전의 전방향 궤적의 교차점이다.

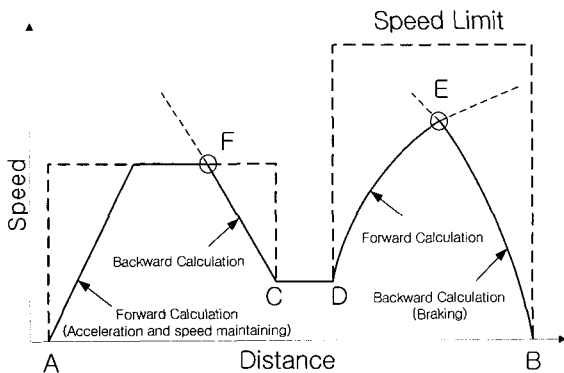


Fig. 1 Calculation method of TPS

열차주행시 휠림(wheel rim)에서 사용되는 전력 및 에너지는 다음 식(5) ~ 식(7)과 같이 계산한다.

$$P = F \times V \tag{5}$$

$$E = F \times L \tag{6}$$

$$E = P \times T \tag{7}$$

여기서,

P : 전력, kW

F : force, kN

E : 에너지, kJ

V : 속도, m/s

T : 주행시간, s

L : 주행거리, m

2.2 프로그램 구성

개발된 프로그램의 초기화면은 Fig. 2와 같으며 사용자의 데이터 입력작업을 최소화할 수 있도록 구성하였다. 전체 시뮬레이션을 제어할 수 있는 시나리오 다이어그램을 사용하였고, 열차성능해석 결과를 여러 가지 형태로 볼 수 있도록 구성하였다.

주 메뉴는 시나리오(Scenario), 데이터(Data), 실행(Run), 출력(Output) 4개로 구성하였다.

개발된 열차주행시뮬레이션 프로그램은 급전계통해석 모듈과 합성하기 위해 객체지향 설계 및 프로그래밍기법을 적용하여 개발되었으며[10], 주요 클래스 구성은 Fig. 3과 같이 MFC(Microsoft foundation class)에서 기본적으로 작성하여 주는 CMainFrame 하부에 8개의 클래스가 있다. 이 클래스들은 메뉴 처리, 다이어그램을 통한 파일 입출력 및 시뮬레이션 결과 그래프 표시 등을 담당하는 멤버함수와 멤버변수를 가지고 있다. CSimTraindoc에는 tpsControlData, tpsTrainData, tpsTrackData 3개의 클래스로 구성되며 시뮬레이션에서 사용되는 주요 변수와 데이터가 저장되는 멤버함수와 멤버변수가 있다. 실제 시뮬레이션은 TpsMainCode를 호출하여 수행되도록 구성하였다.



Fig. 2 Main dialogue of TPS

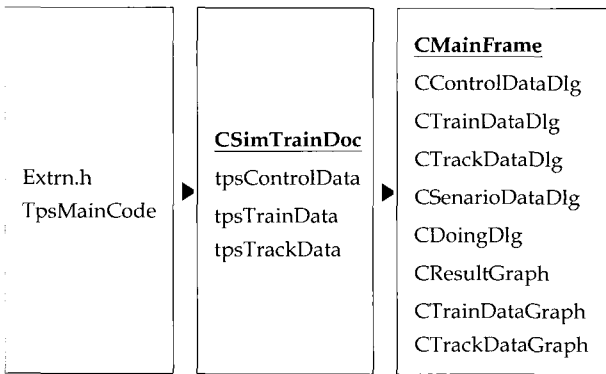


Fig. 3 Major class configuration

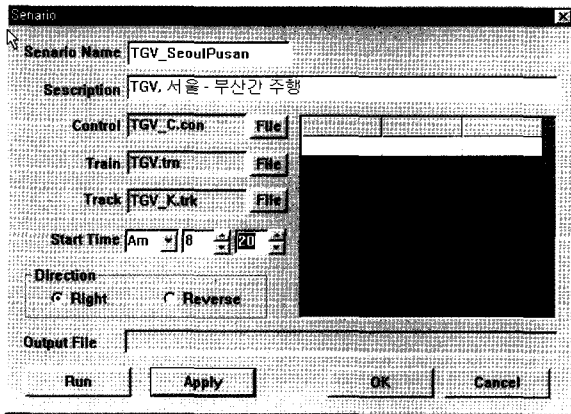


Fig. 4 Scenario dialog

시나리오 메뉴에서는 시나리오 이름(Scenario name), 시나리오 설명(Description), 제어데이터(Control), 열차데이터(Train), 선로데이터(Track), 출발시간(Start time), 주행방향(Direction), 시뮬레이션 출력파일명(Output file), 정차역 및 정차시간 변경 등을 본 메뉴 선택시 나타나는 Fig. 4와 같은 시나리오 대화상자를 통해서 입력 및 수정, 변경할 수 있으며, 하나의 시나리오에 대한 간략한 시뮬레이션 상황을 한눈에 볼 수 있다.

데이터 메뉴는 제어 데이터(Control data), 열차 데이터(Train data), 선로 데이터(Track data) 세 개의 하부메뉴로 구성하였으며, 하부메뉴 선택시 생성되는 대화상자는 Fig. 5와 같으며, 데이터 입력 대화상자를 통해 데이터를 새로이 작성하거나 변경할 수 있도록 하였다. 또한, 파일로부터 읽어 들여 수정할 수 있도록 구성하였다. 일반적으로, 열차성능해석을 수행하기 위해 사용되는 제어 데이터, 열차 데이터, 선로 데이터를 입력하는 데에 많은 시간이 소요되는데, 본 프

로그램에서는 user interface를 강화시켜 하나의 대화상자에서 입력 오류 없이 데이터를 입력시킬 수 있도록 MFC의 Grid control 기능을 사용하여 구현하였다.

시나리오와 데이터 입력이 완료되면 Fig. 6과 같이 시나리오 메뉴의 Run 버튼을 클릭하거나, 주 메뉴의 하부 메뉴인 실행버튼을 클릭하면 시뮬레이션이 수행된다.

시뮬레이션이 실행되면, 현재 시뮬레이션하는 시나리오의 이름, 열차의 이름, 선로의 이름 및 시뮬레

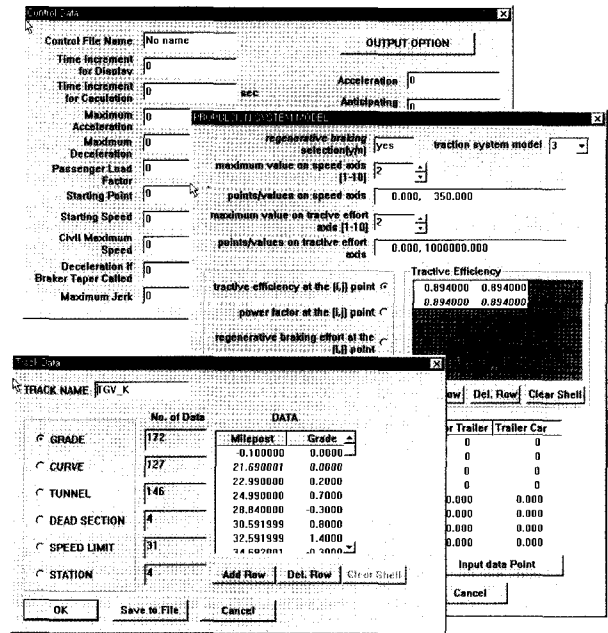


Fig. 5 Data input dialog

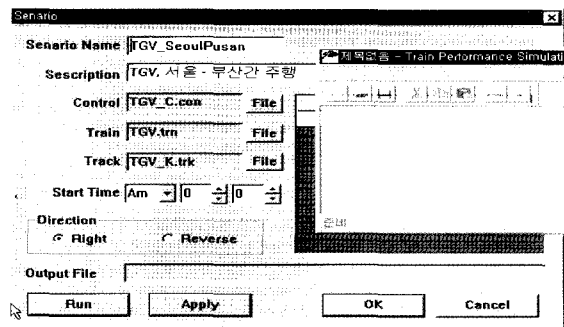


Fig. 6 Run dialog

션 시간이 표시되고, 정차역을 따라 현재 시뮬레이션하는 상황을 화면에 표시하여 사용자가 시뮬레이션의 진행정도를 파악할 수 있다.

시뮬레이션이 종료되면 출력 메뉴의 하부 메뉴인 그래프(Graph) 버튼을 선택하여 시뮬레이션 결과를 그래프로 표시하여 시뮬레이션 결과를 분석할 수 있다. 그래프는 Fig. 7, Fig. 8과 같이 시뮬레이션 결과를 시간에 대한 속도, 거리, 에너지, 가속도/감속도 등을 표시하며, 그래프는 상호 비교할 수 있도록 한 화면에 여러 그래프를 그릴 수 있다. 또한 Fig. 9와 같이 정차역을 기준으로 주행 거리, 주행 시간, 주행 속도 등을 요약하여 결과를 비교 및 분석할 수 있다.

**2.3 프로그램 검증**

개발된 프로그램을 검증하기 위하여 경부고속철도사업 계약에 의해 수행된 Core System 교육 중 열차성능해석에 관련된 교육 자료에 제시된 결과와 비교하였다. Table. 1은 성능해석에 사용된 경부고속철도차량(KTX, Korea Train eXpress)의 기본 데이터이다.

Fig. 10은 KTX열차의 견인곡선으로 200 km/h 이상의 고속 영역에서 점착력 한계에 근접하고 있으며 차륜 출력은 1,130 kW 전동기 12대로 13,560 kW임을 볼 수 있다. Fig. 11은 KTX열차의 제동성능이며 전기제동과 기계제동으로 구분하여 표시하였다.

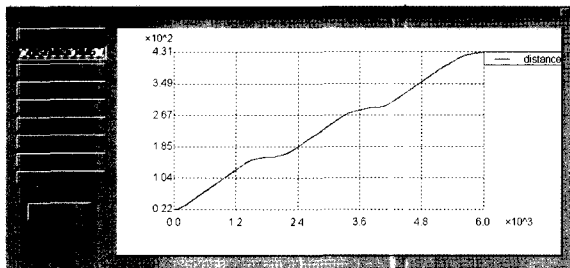
	Distance [Km]	Time [Min.]	Speed [Km/h]	Input Energy [Kwh]	Regen. Energy [Kwh]
NAMSEOUL-DAEJEON	137.29	33.44	246.34	4813.21	428.95
DAEJEON-DAEGU	127.04	34.17	223.10	4246.83	661.28
DAEGU-PUSAN	144.62	37.01	234.46	4950.78	747.25
SUMMARY	408.96	107.62	228.01	14010.83	1837.48

**Fig. 9 Simulation result summary**

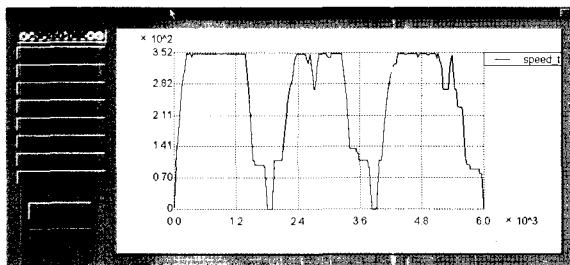
**Table 1. Main specification of KTX**

Contents	Value	Contents	Value
Formation	2P+2M+16T	Gear ratio	2.1894
Weight	768.5, t	Efficiency	0.975
Length	400.0, m	Traction Motor	1,130, kw
Wheel Dia	0.885, m	Maximum speed	300[km/h]

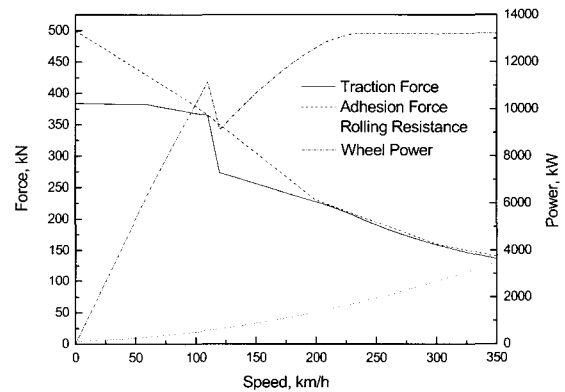
Rolling resistance :  $458+6.15V+0.0856 V^2$  [daN]



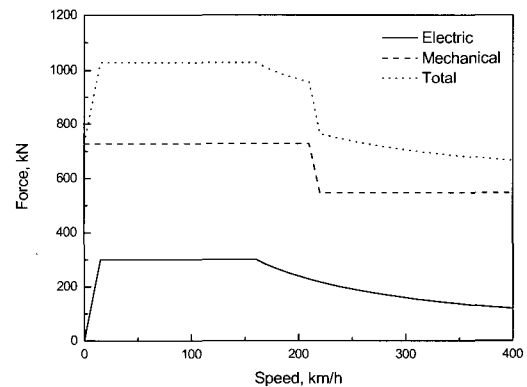
**Fig. 7 Simulation result graph(distance vs time)**



**Fig. 8 Simulation result graph(speed vs time)**



**Fig. 10 Traction Curve of KTX**



**Fig. 11 Braking Curve of KTX**

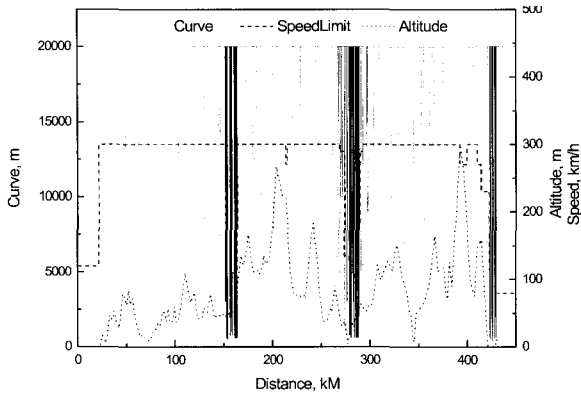


Fig. 12 Curve, Speed limit and Gradient of Seoul-Pusan high speed line

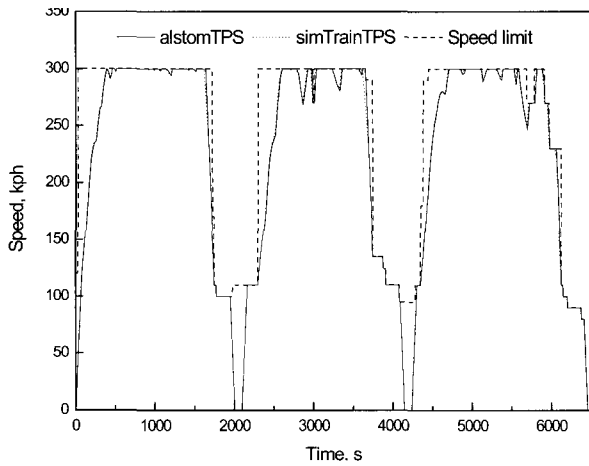


Fig. 13 Speed curve

Fig. 12는 경부고속철도 구간(남서울-부산, 408.96 km)의 곡선반경, 속도제한과 구배를 보여 주고 있다. 해석구간은 남서울에서 출발하여 대전과 대구에서 각각 90초간 정차한 후 부산에 도착하는 운행 패턴을 사용하였다. Table. 1, Fig. 10 ~ 12의 데이터를 경부 고속철도 계약자인 Alstom에서 사용하는 TPS(이하 alstomTPS)와 개발된 TPS(이하 simTrainTPS)에 입력하여 그 결과를 비교하였다. Fig. 13은 alstomTPS와 simTrainTPS의 속도 곡선을 비교한 것으로 유사한 결과를 보이고 있다. Fig. 14는 주행시 소요되는 견인력/제동력을 곡선을 표시한 것으로 정차역에서 출발시 열차를 최고속도로 가속시키기 위해 견인력이 소요되고 정차역 진입시 열차를 정지시키기 위해 제동력이 작용되는 것을 볼 수 있으며, 전체적으로 alstomTPS 결과와 유사한 추이를 보이고 있다. Fig. 15는 가속도

곡선을 보여주는 것으로 alstomTPS의 최대가속도는  $0.477 \text{ m/s}^2$ , simTrainTPS의 최대가속도는  $0.480 \text{ m/s}^2$ , 최대감속도는 동일하게  $-0.5 \text{ m/s}^2$ 이었다.

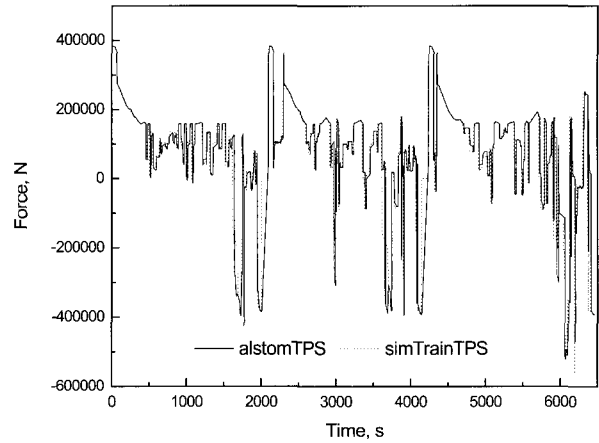


Fig. 14 Traction/Braking Curve

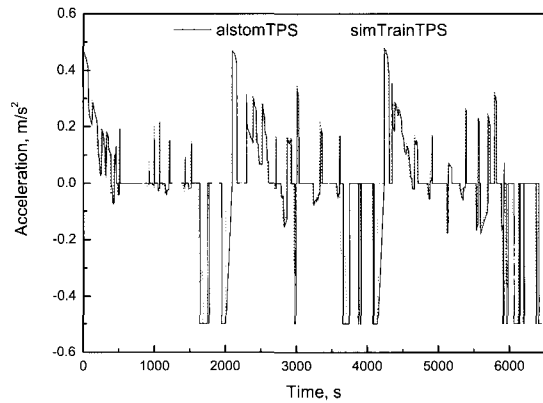


Fig. 15 Acceleration Curve

Table. 2 Simulation Result Summary

Contents	AlstomTPS	simTrainTPS	Error(%)
Time, s	6368.43	6454.80	1.36
Speed, km/h	234.49	228.08	2.73
Input Energy, kwh	12746.18	12747.81	0.01
Regeneration Energy, kwh	2581.14	2570.52	0.41

Table. 2는 alstomTPS와 simTrainTPS의 결과를 비교 요약한 것으로 주행 시간, 주행 속도, 입력 에너지,

회생 에너지의 주요 지표에 대한 오차가 3% 이내인 것을 확인할 수 있다. 오차의 원인은 alstomTPS에서 데이터를 추출하는 과정에서의 차이와 각 프로그램에서 역행 개시점이나 제동 개시점의 차이, 전방향 궤적과 후방향 궤적 교차점의 차이로 생각된다. 한편, Table. 2의 지표 이외에 가감속 시간 및 거리가 열차 성능해석에 자주 사용되는데, alstomTPS에서는 제공되는 않는 기능이기 때문에 데이터를 얻을 수 없어서, 『경부고속철도 차량 등 핵심기자재 공급계약서

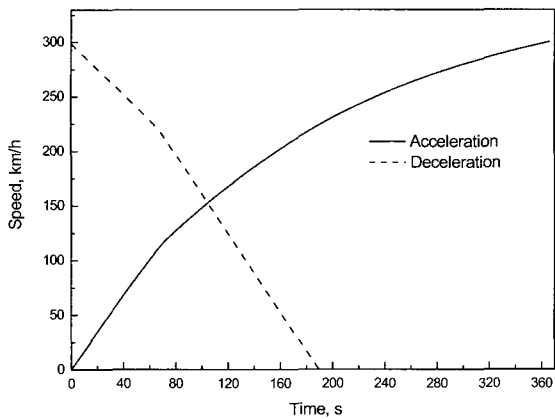


Fig. 16 Acceleration/deceleration time

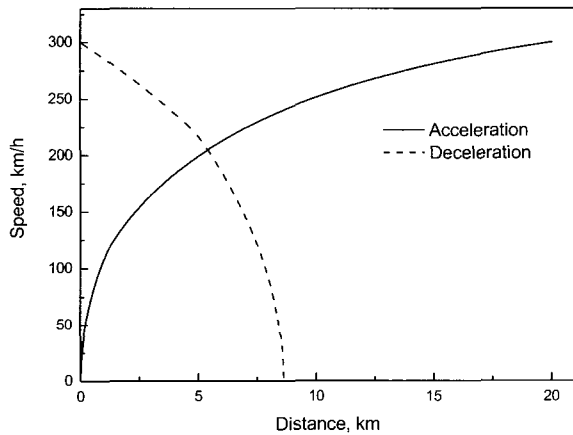


Fig. 17 Acceleration/deceleration distance

Table. 3 Acceleration/Deceleration time, distance

Contents	Contract	simTrainTPS
200kph Acceleration time, distance	160 s 5 km	157 s, 5.04 km
300kph Acceleration time, distance	365 s 20 km	365 s 20.02 km
300kph Deceleration time, distance	NA	190 s, 8.62 km

해설』에 제시된 설계데이터[11]와 simTrainTPS의 결과를 비교하였다. 그 결과를 Fig. 16, Fig. 17에 보였으며, 비교결과를 Table. 3에 정리하였다. 결과적으로 simTrainTPS의 적정성을 입증할 수 있었다.

### 3. 결론

본 논문에서는 먼저 350km/h급 한국형 고속전철 기술개발사업을 통해 개발된 열차성능해석 프로그램에 대하여 소개하였으며, 그 특징을 요약하면 다음과 같다. 사용자의 편의를 위해 시나리오 메뉴를 통해 제어 데이터, 차량 데이터, 선로 데이터를 일괄 선택이 가능하며, 데이터 입력 메뉴를 통해 한 화면에서 직접 데이터의 수정 및 변경이 가능하다. 또한, 시뮬레이션 결과를 한 화면에 다수의 그래프로 표현하여 결과 분석을 간편하게 할 수 있다. 주행저항을 고려한 가감속 거리/시간, 가감속도 계산과 균형속도 계산 및 계산 결과 화면 출력 기능을 추가하였다. 개발된 프로그램은 향후 급전계통 해석 모듈과 통합하기 위해 객체지향적 설계 및 프로그래밍기법을 적용하여 개발하였다.

한편 개발된 프로그램의 타당성을 검증하기 위해 경부고속철도 계약자인 alstom에서 사용한 TPS를 이용하여 KTX열차와 남서울-부산의 경부고속철도 구간을 대상으로 하여 속도곡선, 견인력/제동력 곡선, 가속도 곡선 및 주행 거리, 주행 시간, 주행 속도, 입력 에너지, 회생 에너지 등에 대해 비교하였으며, 그 결과 오차 3% 이내의 유사한 결과를 보임을 확인하였다. 이 오차는 alstomTPS에서 데이터를 추출하는 과정에서의 차이와 각 프로그램에서 역행 개시점과 제동 개시점의 차이, 전방향 궤적과 후방향 궤적 교차점의 차이로

생각된다.최고 속도에서의 가감속 시간, 거리도 경부 고속철도 계약서에서 제시하는 설계값과 유사함을 보여 전체적으로 프로그램의 적정성을 입증하였다.

본 프로그램을 활용하여 고속전철 차량의 주행/제동 성능 예측/평가에 이용하여 새로운 노선 건설이나 차량 도입 시에 성능 평가자료로 활용할 수 있을 것이며 향후 급전계통 해석모델에 추가하여 다중열차 운행상황을 고려한 급전계통 해석과 경제운전에 활용할 수 있을 것이라 생각된다.

본 연구에서 제시한 시뮬레이션 결과는 시운전시험 중에 있는 시제차량의 계측결과와 비교하여 검토될 예정이다.

본 연구는 건설교통부에서 시행한 고속철도기술 개발사업의 기술개발 결과임을 밝힌다.

## 참 고 문 헌

1. C.J.Goodman, "Train Performance and simulation", The Institution of Electrical Engineers, 1997
2. Paul Martin, "Train Performance and simulation", Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, 1999
3. Paul Martin, "Train Performance and simulation", The Institution of Electrical Engineers, 1997
4. Train Performance Simulation 교육자료, GEC Alstom, 1996
5. 이태형 외, "급전계통을 고려한 열차주행 시뮬레이션 프로그램 개발", 대한전기학회 하계학술대회 연구기관특별 Session 논문집, p33~p35, 2001
6. 이태형 외, "고속전철시스템 성능해석을 위한 열차주행 시뮬레이션 S/W 개발(2)", 대한전기학회 하계학술대회논문집B, p1381~p1383, 2000
7. 이태형 외, "고속전철 시스템 성능해석을 위한 열차 주행시뮬레이션 S/W 개발", 대한전기학회 하계학술대회 산학연 협동 특별 Session 논문집, p82-p84, 1999
8. 신형섭 외, "고속전철 시스템엔지니어링 기술개발" 2차년도 연차보고서, 건설교통부 외, 1998. 10
9. 신형섭 외, "고속전철 시스템엔지니어링 기술개발" 1차년도 연차보고서, 건설교통부 외, 1997. 11
10. Object-Oriented Analysis & Design With C++, Rational, ver 3.5
11. 경부고속철도 차량 등 핵심기자재 공급계약서 해설, 한국고속철도건설공단, 1995