한국 철도학회논문집
제10권 제2호 2007년 / PP.153~160

견인/제동/타행 성능 해석 프로그램 개발 및 검증

Development and Verification of the Analysis Program for Traction/Braking/Coasting Performance

김영국† · 김석원* · 목진용* · 김기환* · 김영모* · 박태원**
Young-Guk Kim · Seog-Won Kim · Jin-Yong Mok · Ki-Hwan Kim · Young-Mo Kim · Tae-Won Park

Abstract

To start or stop the train safely within the limited traveling distance, it is necessary to guarantee the proper traction or braking force. Presently, most trains are run by the electrical power and have adopted a combined electrical and mechanical(friction) braking system. In order to design a good traction or a brake system, it is essential for designers to predict the traction or brake performance. In this paper, the traction/coasting/braking performances analysis program has been developed and verified by comparing the simulation results with on-line test results of the Korean high speed train(HSR-350); Both results match very well. Consequently, the designers can predict the traction/coasting/braking performances of trains by using the proposed program under various operating conditions.

Keywords : Braking, Coasting, Gradient resistance, Korean high speed train(HSR-350x), Resistance, Traction, Travel distance
제동, 타행, 구배저항, 한국형 고속열차, 주행저항, 견인, 주행거리

1. 서 론

철도기술의 비약적인 발전으로 인해 300km/h 이상의 주행속도로 운행하는 고속철도가 세계적으로 보편화됨에 따라 한동안 침체했던 철도 교통은 다시 활성화되고 있다. 철도기술을 더욱 발전시키기 위해서는 기계, 전기, 전자, 제어, 통신 등의 기술들이 종합적으로 결합된 철도차량뿐만 아니라 전력 공급장치, 각종 신호장치, 선로 등의 주변시설에 대한 안정된 성능확보가 필수적이다.

철도차량의 성능은 주행성능(견인성능, 제동성능), 대차주행성능, 차체진동성능, HVAC 성능 등에 의해 결정된다. 특히 열차의 안전한 출발과 제동, 정속 주행을 가능하게 하는 견인성능과 제동성능은 매우 중요한 항목으로 철도차량의 개발 시에 견인 시스템 및 제동 시스템에 대한 효율적인 설계 및 철저한 성능의 검증이 필요하다[1-5].

일반적으로 견인성능과 제동성능은 열차가 견인이나 제동시에 발생한 주행거리, 주행시간, 발생 에너지, 져크(가・감속도의 변화율), 견인 및 제동장치의 온도 변화 등에 의해 평가된다. 이러한 평가 요소들은 견인이나 제동신호 투입 후 실제의 작용력이 발생하기까지 소요되는 공주시간, 차륜과 레일간의 유효한 점착력, 곡선, 구배, 터널 등의 선로조건과 열차 운행조건 등 다양한 조건에 의해 영향을 받게 된다. 이렇듯 철도차량의 견인성능과 제동성능은 복잡하기 때문에 견인시스템 및 제동시스템은 공주시간의 최소화, 최대점착력의 활용, 열차속도에 대한 작용력(견인력 또는 제동력)의 효과적인 분배, 제공된 작용력의 변화에 따라 발생하는 져크가 승객에게 미치는 영향 등을 종합적으로 고려하여 설계하여야 한다. 따라서, 철도차량의 견인시스템과 제동시스템을

† 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단
E-mail : ygkim@krri.re.kr
TEL : (031)460-5612 / FAX : (031)460-5649
* 한국철도기술연구원
** 아주대학교

효율적으로 설계하려면 견인성능과 제동성능을 예측할 수 있는 해석 프로그램이 반드시 필요하며, 이를 이용하여 다양한 조건에 대한 견인시스템과 제동시스템의 성능을 예측하여 그 결과를 설계에 반영하여야 한다. 그러나, 견인시스템과 제동시스템의 성능을 예측하기 위한 해석 프로그램은 이들 장치의 설계자가 임의로 작성하여 해석 프로그램의 성능을 검증하지 않은 상태에서 사용하는 경우가 대부분이기 때문에 해석 프로그램을 이용하여 해석된 견인/제동 시스템의 성능이 시험을 통한 획득된 실제의 성능과 잘 일치하지 않는다는 문제점이 있다. 또한, 이들 해석 프로그램은 견인 또는 제동과 같이 단일 주행모드에 대해서만 해석할 수 있을 뿐 견인/제동, 견인/타행, 타행/제동, 견인/제동/타행과 같이 혼합된 주행모드에서는 해석할 수가 없으며, 다양한 선로조건에 대해 고려되어 있지 않다.

본 논문에서는 단일 주행모드뿐만 아니라 혼합 주행모드에서 견인, 제동 및 타행을 포함한 철도차량의 주행성능을 예측할 수 있는 해석 프로그램을 개발하였으며, 이 해석 프로그램을 현재 시험운행중인 한국형 고속열차(HSR-350x)에 적용하여 해석결과가 시험결과와 일치하는지를 검토함으로서 해석 프로그램의 타당성을 입증하였다.

2. 철도차량의 견인/제동/타행 성능해석 프로그램 개발

2.1 철도차량의 견인시스템 및 제동시스템

최근의 주된 관심사항인 환경문제와 에너지 문제를 해결하기 위해 철도의 전철화는 세계적인 추세이며, 국내의 경우에도 경부선을 비롯한 여러 노선에서 전철화가 추진되고 있다. 이에 따라 최근에 새롭게 운행되는 대부분의 철도차량은 주동력원으로 전기를 사용하는 Fig. 1과 같은 견인장치를 채택하고 있다. 이러한 견인장치는 견인 시에는 모터로 작동하여 열차를 추진시키며, 제동 시에는 발전기로 작동하여 열차를 제동시키는 전기제동장치의 역할을 한다. 제동 시 견인장치에 의해 발생된 잉여 전기에너지의 사용방법에 따라 전기제동장치는 회생제동과 저항제동으로 구분된다. 이 외에 전기제동장치로는 와전류 제동이 있으며, 대차에 설치된 전자석을 이용하여 레일과 전자석의 자기력을 이용하여 제동하는 방식이다. 기계 제동은 기계적인 마찰력을 이용하는 제동 방식으로 디스크 제동, 휠-디스크제동 및 답면 제동으로 세분화시킬 수 있다.

철도차량의 견인장치와 제동장치에 의해 발생된 견인력과 제동력은 열차 진행방향에 대한 차륜과 레일 사이에서 힘으로 작용하며, 철도차량에서 요구되는 가・감속도 이내에서 열차를 안전하게 출발 및 정지할 수 있는 성능이 확보되도록 철도차량의 견인시스템과 제동시스템이 구성되어 있다.

2.2 견인/제동/타행 성능해석

열차 운행 시에 철도차량의 진행방향에 대한 운동방정식은 뉴톤(Newton)의 제2법칙으로부터 견인, 제동, 타행 시에 대해 식(1)~식(3)과 같이 얻을 수 있으며, 이로부터 열차의 진행방향에 대한 가・감속도를 식(4)와 같이 구할 수 있다[3-5].

□ 견인시

$$F_T = m(1+\alpha)a = F_{traction} - R_r - R_g - R_c \quad (1)$$

□ 제동시

$$F_T = m(1+\alpha)a = -F_{braking} - R_r - R_g - R_c \quad (2)$$

□ 타행시

$$F_T = m(1+\alpha)a = -R_r - R_g - R_c \quad (3)$$

$$a = \frac{F_T}{m(1+\alpha)} \quad (4)$$

여기서, F_T는 열차의 관성력, m은 열차 질량, $F_{traction}$는 열차의 견인력, $F_{braking}$는 열차의 제동력, a는 열차의 가・감속도, α는 회전상당계수, R_r은 열차의 주행저항, R_g는 구배저항, R_c는 곡선저항을 각각 나타낸다.

또한, 열차의 주행속도 및 주행거리는 가・감속도-속도, 속도-거리와의 관계로 부터 얻어진 식 (5), 식(6)을 적분하여 구할 수 있다.

$$dv = a \times dt \quad (5)$$

$$ds = v \times dt \quad (6)$$

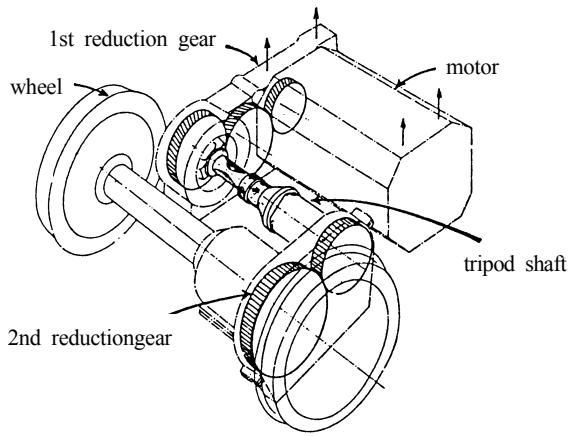


Fig. 1. Traction system of electric train.

여기서, v는 열차의 주행속도, s는 주행거리를 나타내고 있다.

그리고, 견인장치와 제동장치에서 발생하는 에너지는 에너지-힘과의 관계식인 식(7), 식(8)을 적분하여 구할 수 있다.

$$dE_{traction} = F_{traction} \times ds \quad (7)$$

$$dE_{braking} = F_{braking} \times ds \quad (8)$$

여기서, $E_{traction}$는 견인장치에서 발생하는 에너지, $E_{braking}$는 제동장치에서 발생하는 에너지를 각각 나타낸다.

2.3 철도차량의 견인/제동/타행 성능해석 프로그램 개발

앞 절에서 설명한 성능해석 내용을 바탕으로 Labview를 사용하여 Fig. 2와 같은 철도차량의 견인/제동/타행성능을 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였다. Fig. 3은 철도차량의 견인/제동/타행성능에서 가장 중요한 열차의 주행거리 및 주행시간을 계산하는 흐름도를 나타낸 것으로 미소시간 동안의 가·감속도를 구하고 이를 이용하여 속도 변화량과 열차의 주행거리 및 주행시간을 구한 후 이를 최종 속도까지 적분하여 전체 주행거리를 구하게 된다. Fig. 4는 성능해석 프로그램에 사용되는 입출력을 나타낸 것이다. 출력 항목으로는 주행거리와 주행시간뿐만 아니라 가·감속도, 가·감속도 변화율, 각 장치에서 발휘하는 작용력 및 에너지 등으로 시간에 대한 열차속도와 함께 출력할 수 있도록 되어 있으며, 입력 항목으로는 차량무게, 선로구배, 주행저항, 견인력/제동력 선도 등의 해석을 위해 필요한 기초 데이터와 주행상태(견인/제동/타행)의 선택, 각 장치들의 On/Off 상태 확인, 마스콘에서 전해지는 작용력 크기 선택 등의 선택 스위치 신호가 필요하다. 또한, 제동성능 해석 시에는 상용제동과 비상제동을 구분하여 해석할 수 있도록 제동 조작상태 스위치 신호가 입력항목으로 필요하다.

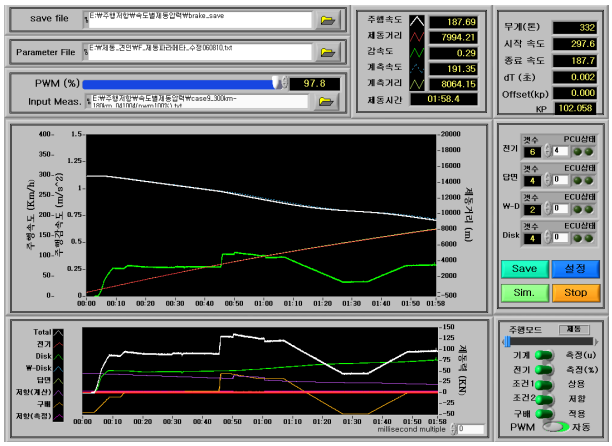


Fig. 2. Analysis program for traction/braking/coasting performance

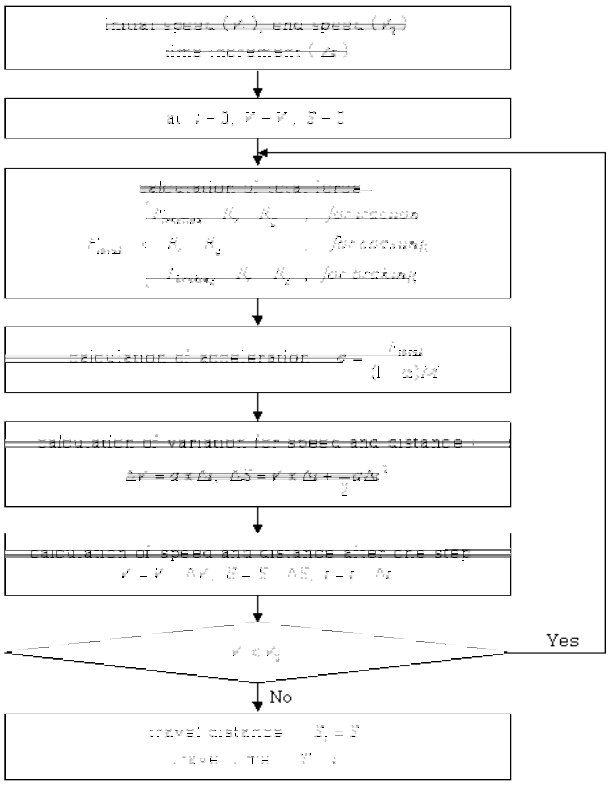


Fig. 3. Flowchart of calculation of travel distance and time

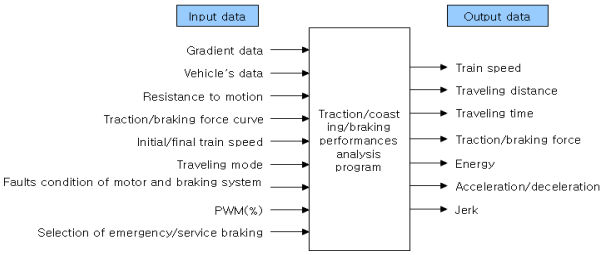


Fig. 4. Input and output data of analysis program

3. 견인/제동/타행 성능해석 프로그램의 검증

본 연구에서 개발한 철도차량의 견인/제동/타행성능 해석 프로그램 검증은 현재 시운전중인 한국형 고속열차에 대한 성능 해석결과와 시험결과가 잘 일치하는지를 확인하는 것이다. 이 해석 프로그램의 검증을 위한 입력 데이터로 한국형 고속열차의 차량 데이터와 실제 시험구간의 선로 데이터, 각 장치의 특성 데이터 및 열차 운행 정보 등이며, 세부적인 자료로는 구배저항, 한국형 고속열차의 주행저항, 기계제동장치의 마찰계수, 전기모터와 감속기로 구성된 견인시스템의 동력전달율, 제동실린더 작동압력, 인버터 출력, 열차중량 등이 필요하다.

3.1 한국형 고속열차의 견인시스템 및 제동시스템

한국형 고속열차는 시제열차로 동력차 2량, 동력객차 2량 및 객차 3량 등 총 7량으로 편성되어 있으며, 동력차, 동력객차 및 객차는 동력 대차, 동력객차 대차 및 객차대차에 의해 지지되어 있다[7, 8]. 동력대차에는 Fig. 1과 같은 견인장치와 답면 제동장치가, 동력객차 대차에는 동력대차와 동일한 형태의 견인장치와 휠디스크 제동장치가, 객차 대차에는 디스크 제동장치가 설치되어 있다. Table 1은 한국형 고속열차에 설치되어 있는 견인장치와 제동장치의 전체 개수를 나타낸 것이며, 견인전동기는 앞에서 설명한 바와 같이 견인 시는 열차를 추진시키고 제동 시는 열차를 감속시키는 역할을 하게 된다. Fig. 5는 12개의 견인전동기가 발휘하는 견인력을 열차의 주행속도에 대해 나타낸 견인력 선도로 이 힘에 의해 한국형 고속열차가 추진하게 된다. Fig. 6은 기계제동장치와 전기제동장치가 조합되어 발휘되는 제동력을 비상제동과 상용제동으로 구분하여 열차의 주행속도에 대해 나타낸 제동력 선도로 이 힘에 의해 한국형 고속열차가 감속이나 정지하게 된다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 차량에서 요구되는 감속도 내에서 열차를 안전하게 출발 및 정지할 수 있는 성능이 확보되도록 제동장치들이 적절히 조합되어 전체 시스템이 구성되어 있음을 확인할 수 있다[3, 4].

3.2 견인/제동/타행 성능해석 프로그램에 대한 시험적 검증

3.2.1 시험계측 시스템

Fig. 7은 본 연구에 사용된 계측시스템의 구성도이며, Fig. 8은 계측시스템이 한국형 고속열차에 실제 설치된 모습이다. 열차에 설치된 압력센서, 펄스발생기 등의 센서 신호와 제동/견인, PWM 등의 차량신호가 계측시스템으로 입력되며, 이 입력 신호로부터 열차의 주행속도, 이동거리, 제동/견인 여부, 각 제동장치의 작동여부 등을 확인하여 입력 신호와 함께 저장된다[5, 9]. 해석 프로그램의 검증을 위해 시운전 시험에서 획득해야 하는 입력 자료와 해석결과를 실험적으로 검증하기 위해 필요한 실제의 시험 데이터는 이 계측 시스템을 통해 획득되었다.

Table 1. Total number of traction and braking apparatuses

Apparatus name		Total no.
Mechanical brake	Tread	16
	Wheel disc	4
	Disc	24
Traction motor(or electric brake)		12

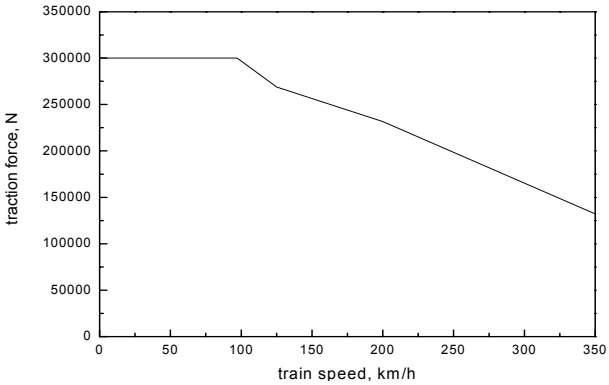
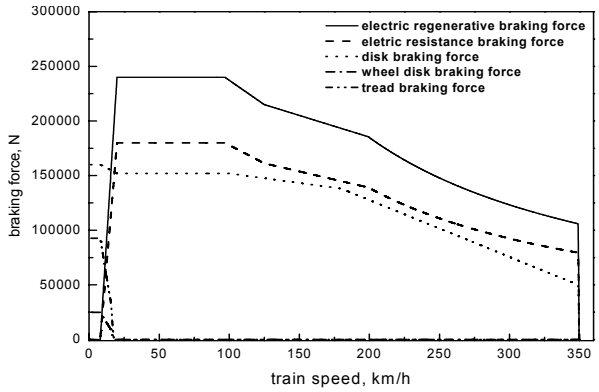
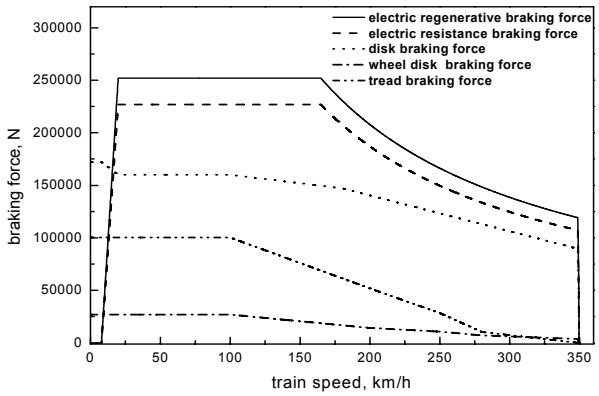


Fig. 5. Traction force curve



(a)



(b)

Fig. 6. Braking force curve, (a) service brake, (b) emergency brake

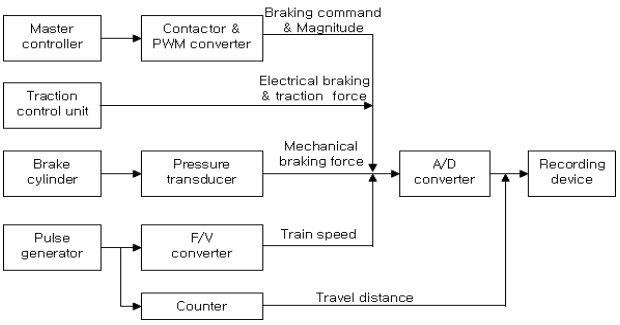


Fig. 7. Schematic diagram of measuring system

Fig. 8. Experimental set-up of measurement system

3.2.2 성능해석을 위한 입력 자료

앞 절에서 설명한 성능해석을 위해 필요한 상세한 입력 자료 중 구배저항은 선로 설계 데이터를 통해, 열차중량 및 차량 특성에 대한 자료는 실제측정과 한국형 고속열차의 시운전 시험을 통해 획득하였다.

한국형 고속열차의 시운전은 경부고속 철도 선로에서 KTX와 동일 운행조건으로 수행되고 있으며, 견인/제동/타행 성능해석을 위한 시험 데이터는 경부 고속선 광명(KP22)～신탄진(KP145) 구간에서 획득하였다. 이 구간의 선로는 최소 곡률반경이 7000m인 11개의 곡선과 Fig. 9의 상단 그림에서 보는 바와 같이 －15～18‰의 구배와 21개의 터널이 설치되어 있다. 이 선로특성에 의해 구배저항과 곡선저항이 결정되는 데, 구배저항은 Fig. 9의 하단 그림과 같이 구해지며, 곡선저항은 일반적으로 곡률반경이 200m 이하인 경우에만 작용하기 때문에 최소 곡률반경이 7000m인 시험구간에서는 무시할 수 있다. 주행저항은 차량특성과 선로특성에 의해 결정되며, 이 구간에서 타행시험을 통해 Fig. 10과 같이 개활지와 터널로 구분하여 구하였다[6].

또한, 마찰계수 및 동력전달율은 주행저항과 동일 시험구간에서 시운전시험을 통해 계측된 데이터로부터 구하였다. 기계제동장치의 마찰계수와 견인 시스템의 동력전달율은 전기 제동장치를 작동하지 않은 상태에서의 제동시험과 정지상태에서 출발하는 견인시험을 통해 구하였으며, 그 결과는 Fig. 11과 같다. 여기서 동력전달율이란 실제 측정된 견인력과 고속 철도차량 설계데이터[7, 8]인 견인력 선도의 견인력의 비를 말한다.

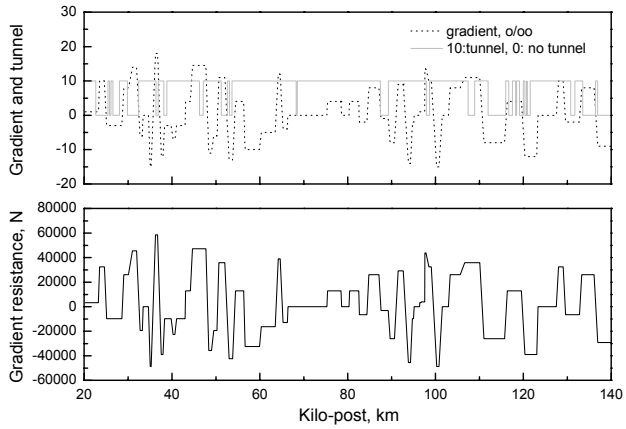


Fig. 9. Gradients, tunnel signal and gradient resistance

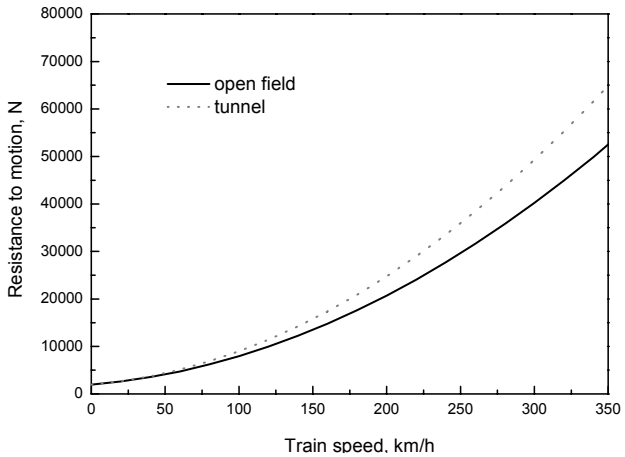


Fig. 10. Resistance to motion

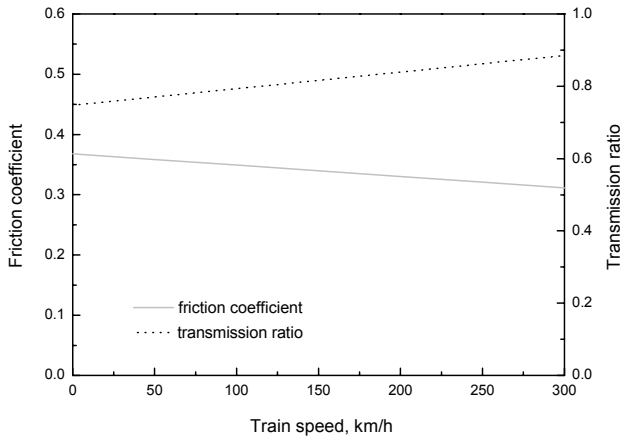


Fig. 11. Disc pad friction coefficient and transmission ratio of traction system

3.2.3 성능해석에 대한 검증

견인/제동/타행 성능 해석프로그램의 성능입증을 위해 Table 2와 같은 5가지 경우를 예제로 선정하여 고속선 광

명~신탄진 구간에서 한국형 고속열차로 성능시험을 실시하였다. 또한, 이와는 별도로 성능시험과 동일한 조건에서 성능해석을 하여 실시하여 두 결과가 잘 일치하는 지를 검토였다. Case 1은 운전모드가 견인, Case 2와 Case 3은 제동, Case 4는 타행하는 경우이며, Case 5는 운전모드가 견인/타행/제동이 순차적으로 변화하는 하는 경우이다. 운전모드가 제동인 경우에서 Case 2는 기계제동만을 사용하였고 Case 3은 기계제동과 전기제동을 함께 사용하였다. Fig. 12는 Case 5에 대한 운전모드 제어신호와 PWM 신호 및 그에 따른 열차의 주행속도를 측정한 결과로 운전모드가 변화하는 과정을 알 수 있다. 견인신호가 5V, 제동신호가 0V인 경우는 운전모드가 견인모드를, 견인신호가 0V, 제동신호가 5V인 경우는 제동모드를, 견인신호가 0V, 제동신호가 0V인 경우는 타행모드를 말한다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 Case 5의 운전모드는 견인→타행→제동→타행→제동의 순서로 변화되고 있다. 이때, PWM 신호는 0~100% 범위에서 변화하고 있으며, 이 PWM 신호 변화 비율에 따라 견인력이나 제동력이 발생하게 되는 데 Fig. 5와 Fig. 6에 나타낸 견인력과 제동력은 PWM 100%에 해당하는 값이다.

Fig. 13은 Table 2의 5가지 경우에 대해 시험결과와 해석결과를 비교한 것이며, Fig. 14는 5가지 경우에 대해 제동거리와 열차속도에 대한 시험 결과와 해석 결과의 오차를 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 각 경우에 대한 해석결과와 계측 결과가 잘 일치하고 있다. 이를 좀 더 상세히 살펴보면 Fig. 14 하단의 그림에서 보는 바와 같이 시험 결과와 해석 결과의 주행속도 차이는 2.3~8.0km/h로 Case 2(주행속도가 111km/h 변화)가 가장 작고 Case 3(주행속도가 304km/h 변화)이 가장 큼을 알 수 있다. 또한, 시험 결과와 해석 결과의 주행거리 차이는 30~349m로 이 차이를 시험결과의 최대 주행거리로 나눈 주행거리 오차로 환산하면 Fig. 14 상단의 그림에서 보는 바와 같이 0.3~1.8%에 해당하며, Case 1(17,320m 주행에 대해 309m 오차)의 오차가 가장 크다. 이러한 오차는 성능 해석 시에 입력되는 구배저항 오차, 계측장치의 정도, 거리환산 누적 오차 등 여러 원인이 복합적으로 결합되어 나타난 것으로 추측되지만, 그 크기는 무시해도 좋을 정도로 작은 값이다. 이는 성능해석을 위한 입력 자료의 획득방법, 데이터 및 성능해석 프로그램이 타당함을 입증하는 것이기 때문에 본 견인/제동/타행 성능해석프로그램을 이용하여 다양한 조건에서 철도차량의 주행성능을 예측하고 이 예측 결과를 견인시스템과 제동시스템의 설계에 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 2. Cases for estimation studies

Case	Train speed(km/h)	Running condition		PWM(%)
1	0→303	Traction		100
2	298→187	Braking	Disk	100
3	304→0		All	100
4	0→300	Coasting		0
5	178→253→124	Traction/coasting/braking		0－100

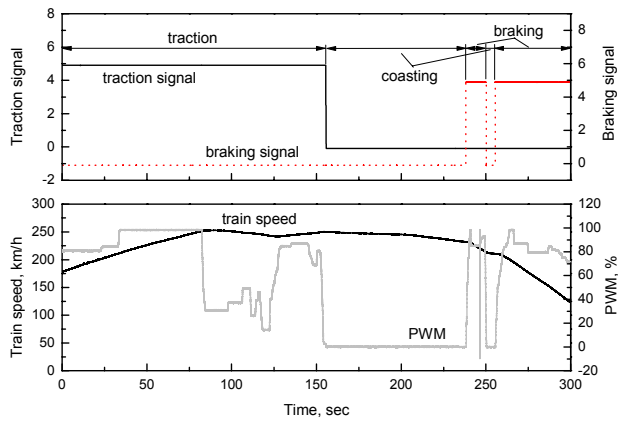
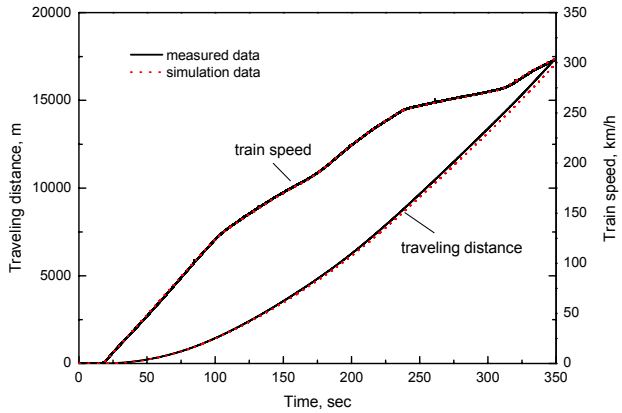
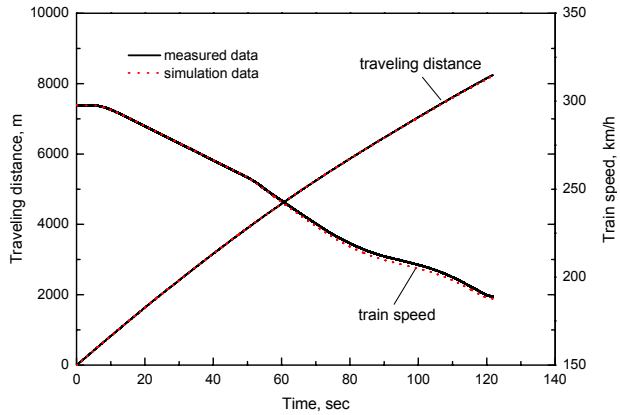


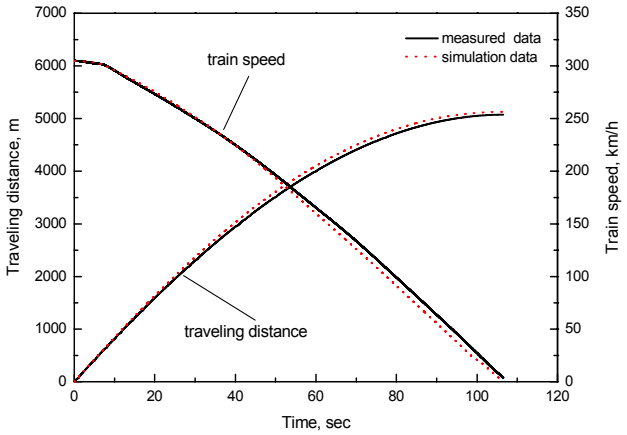
Fig. 12. Control signals, PWM and train speed for Case 5



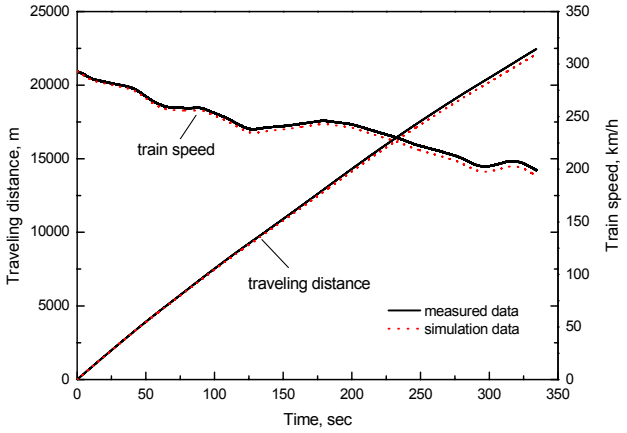
(a)



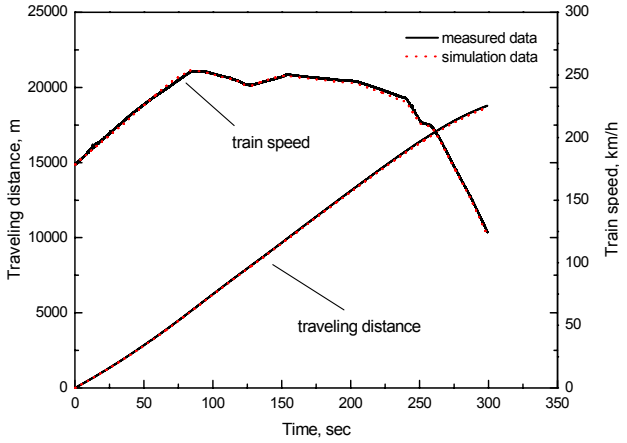
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 13. Comparisons between measured and simulation results, (a) case1, (b) case2, (c) case3, (d) case4, (e) case5

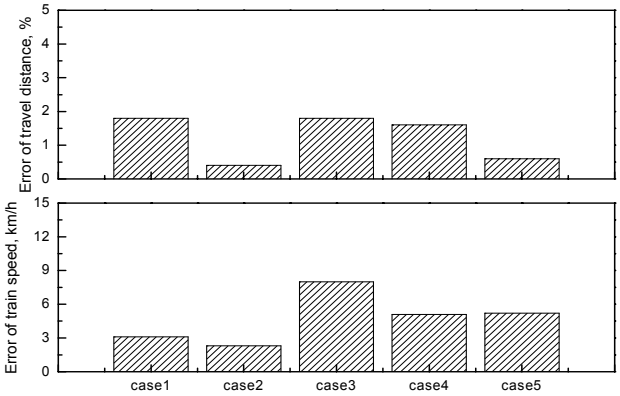


Fig. 14. Errors between measured and simulation results

5. 결 론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 철도차량의 견인/제동/타행 성능을 하나의 프로그램으로 예측할 수 있는 프로그램을 개발하여 한국형 고속열차의 시험결과와 해석결과의 비교 분석을 통한 검증 작업을 수행하였다.

(2) 한국형 고속열차의 견인/제동/타행 성능 시험조건과 해석조건을 일치시키기 위해 필요한 해석 프로그램의 입력 정보를 선로 노선 설계 데이터 및 실제의 시운전 시험을 통해 구하였다.

(3) 성능해석 프로그램 검증에 사용한 5가지 경우에 대해 해석결과와 시험결과를 비교하였고 운전모드에 상관없이 두 결과가 잘 일치함을 확인하였다.

(4) 검증된 성능 해석 프로그램을 이용하여 일부 입력 정보의 교환만으로 다양한 조건 예를 들면, 철도차량의 형태, 제동장치와 견인장치의 고장여부, 선로조건의 변화 등의 변경에 관계없이 견인/제동/타행 성능을 예측할 수 있다.

(5) 본 프로그램은 견인/제동/타행 성능으로 일반적으로 사용하는 주행거리와 주행시간뿐만 아니라 가·감속도, 가·감속도 변화율, 각 장치에서 발휘하는 작용력 및 에너지 등 여러 항목의 성능을 예측할 수 있다.

후 기

본 연구는 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

◉ 참고문헌

1. 김영국, 박찬경, 김석원, 박태원, “시운전 시험을 통한 한국형고속전철 차체진동 특성의 분석 및 평가,” 한국철도학회논문집, 제6권, 제4호, 한국철도학회, pp.332-338, 2003.
2. 김영국, 김석원, 김기환, 목진용, “가속도/감속도를 이용한 열차견인력/제동력 추정방법에 대한 고찰,” 한국철도학회논문집, 제9권, 제6호, 한국철도학회, pp.682-688, 2006.
3. 김석원, 김영국, 박찬경, 박태원, “한국형 고속열차의 디스크-패드 마찰계수 측정에 관한 연구,” 한국철도학회논문집, 제9권, 제6호, 한국철도학회, pp.677-681, 2006.
4. 김영국, 김석원, 박찬경, 이성호, 박태원, “고속철도 차량의 제동성능 해석에 대한 실험적 검증,” 한국센서학회논문집, 제16권, 제1호, 한국센서, pp.68-76, 2007.
5. Internation Standard IEC 1133, IEC, 1992.
6. 김영국, 권혁빈, 김석원, 박태원, “한국형 고속열차의 주행저항 평가,” 한국철도학회논문집, 제8권, 제5호, 한국철도학회, pp.332-338, 2005.
7. G7 고속전철 시제차량 기본사양, 한국철도기술연구원, 1998.
8. G7 고속전철 기술개발사업 Control System Specification, (주)로템, 2001.
9. 김석원, 김영국, 백광선, 김진환, 한영재, “고속철도 시운전시험 및 평가용 측정시스템 개발 (I)-하드웨어”, 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.168-173, 2002

(2007년 2월 27일 논문접수, 2007년 4월 17일 심사완료)