

## 고속철도 차량의 제동성능 해석에 대한 실험적 검증

김영국<sup>†</sup> · 김석원 · 박찬경 · 이성호 · 박태원\*

### Experimental verification of the brake performance analysis for the high speed train

Young-Guk Kim<sup>†</sup>, Seog-Won Kim, Chan-Kyeong Park, Sung-Ho Lee, and Tae-Won Park\*

#### Abstract

In general, the braking system of a high speed train has an important role for the safety of the train. To stop safely the train at its pre-decided position, it is necessary to properly combine the various brakes. The train has adopted a combined electrical and mechanical (friction) braking systems. In order to design a good brake system, it is essential for designers to predict the brake performance. In this paper, the braking performance analysis program has been developed and verified by comparing the simulation results with the brake test results of HSR-350x; both results match very well. Also, the brake performances of high speed trains can be predicted by using this program under various conditions.

**Key Words :** resistance, traction, brakes, gradient resistance, Korean high speed train (HSR-350x), braking distance, friction coefficient, service brake, emergency brake

## 1. 서 론

철도차량 기술의 비약적인 발전으로 인해 현재 300 km/h의 속도로 주행하는 고속철도 시대가 전 세계적으로 보편화되었다. 철도차량은 기계, 전기, 전자, 제어, 통신 등의 기술과 여러 가지 시스템이 종합적으로 결합된 결정체로 각 시스템의 성능 검증은 통한 안전성과 신뢰합성 확보가 필요하다. 특히 철도차량의 운행속도가 증가함에도 불구하고 주어진 거리 이내에서 열차를 안전하게 정지시키거나 원하는 속도로 감속하여야 하는 제동성능은 매우 중요한 항목으로 제동 시스템의 설계에 대한 철저한 성능검증이 필요하다<sup>1-3)</sup>. 제동성능을 만족시키는 제동 시스템의 설계는 제동 투입지령 후 실제 제동력이 투입될 때까지 소요되는 시간인 공주시간의 최소화, 차륜과 레일간의 유효한 최대점착력의 활용, 전기 제동과 기계 제동의 효율적인 블렌딩, 제동 과정에서 각 제동 장치의 투입 시점의 차이 및 제동력의 크기 변화에 따른 열차 감속도의 변화(저크)가

승차감에 미치는 영향 등이 종합적으로 고려되어야 하며, 이렇듯 다양한 조건에서 설계하려는 제동 시스템의 성능을 예측하여 그 결과가 제동 시스템의 설계에 반영되어야 한다.

본 논문에서는 고속철도의 제동성능을 예측하기 위한 제동성능 해석 프로그램을 개발하여 국가의 전략적인 사업으로 추진되어 국내 기술로 설계/제작된 한국형 고속열차(HSR-350x)에 적용시켜 제동성능 해석결과와 시운전 시험 측정결과와의 비교 분석을 통해 검증하였고, 검증된 제동성능 해석 프로그램을 사용하여 여러 조건에서 고속열차에 대해 제동성능을 예측하고자 한다.

## 2. 고속철도 제동시스템

### 2.1. 제동시스템 종류 및 구성

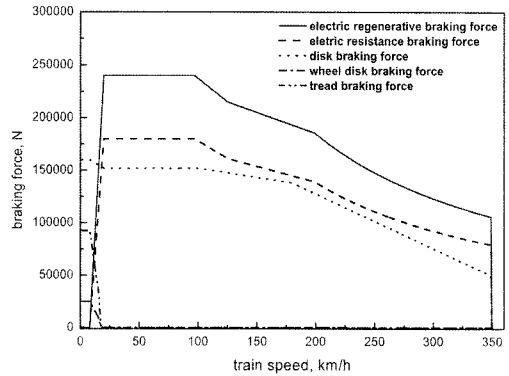
제동시스템은 요구되는 제동 거리를 확보하는 것이 필수적이며 이를 만족하기 위한 제동장치들로 구성되어야 한다. 일반적으로 고속철도 차량의 제동은 전기 제동과 기계 제동으로 분류되어 있으며, 이들을 적절히 조합시켜 원하는 제동거리를 확보하고 있다. 전기 제동은 기계적인 접촉이 없는 비접촉 제동방식으로 회생제동, 저항제동, 와전류 제동 등으로 분류된다. 회생 제동

한국철도기술연구원(Korea Railroad research Institute)  
\*야주대학교 기계공학과(Ajou University Mechanical Department)  
<sup>†</sup>Corresponding author: ygkim@krii.re.kr  
(Received : September 4, 2006, Accepted : November 3, 2006)

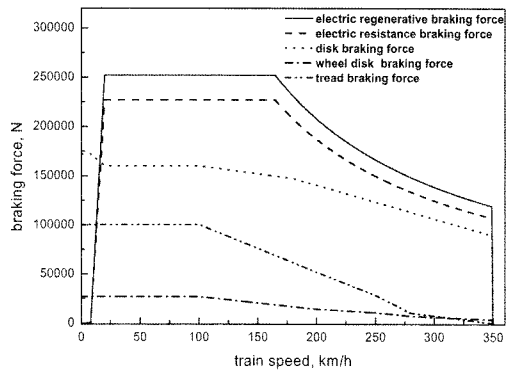
은 동력대차에 설치된 전동기가 제동 시에 발전기의 역할을 하여 잉여 전기에너지를 생산하고 이 전기에너지를 가선으로 보내어 다른 열차의 추진에 사용하도록 하는 방식이며, 저항제동은 생산된 잉여 에너지를 차량에 설치된 주저항기에서 열로 발산시켜 에너지를 소비하는 방식이고 와전류제동은 대차에 설치된 전자석을 이용하여 레일과 전자석의 자기력을 이용하여 제동하는 방식이다. 기계 제동은 기계적인 마찰력을 이용하는 제동 방식으로 디스크 제동, 휠-디스크제동 및 담면 제동으로 세분화시킬 수 있다.

2.2. 한국형 고속열차의 제동시스템 구성

한국형고속열차 시제열차(HSR-350x)<sup>[13]</sup>의 편성은 그림 1과 같이 동력차 2량(TP1, TP2), 동력객차 2량(TM1, TM5) 및 객차 3량(TT2, TT3, TT4) 등 총 7량으로 구성되어 있으며, 대차는 동력차, 동력객차, 객차를 각각 지지하는 동력 대차 4대(BM1, BM2, BM9, BM10), 동력객차 대차 2대(BM3, BM8), 객차대차 4대(BT4~BT7)로 총 10대이며, 이들은 각각 2개의 운축에 의해 지지되고 있다<sup>[4,5]</sup>. 각 대차에는 표 1과 같이 전기제동장치(회생제동, 저항제동), 와전류제동장치 및 기계제동장치(담면, 휠디스크 및 디스크) 등이 동력대차(BM)와 객차대차(BT)에 따라 설치되어 있으며, 전체 제동력은 각 제동장치들이 운행 속도에 따른 제동력의 조합, 즉 그림 2와 같이 설정된 제동패턴(상용제동 혹은 비상제동, 와전류 제동장치 제외)에 따라 각 제동장치별로 블



(a)



(b)

그림 2. 제동력 곡선: (a) 상용제동, (b) 비상제동  
Fig. 2. Braking force curve: (a) service brake, (b) emergency brake.

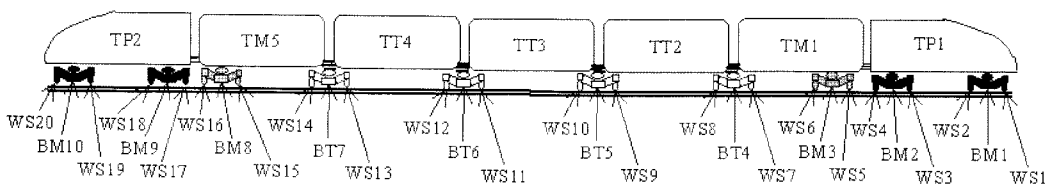


그림 1. 한국형고속열차(HSR 350x) 편성배치  
Fig. 1. Configuration of Korean high speed train(HSR 350x).

표 1. 대차별 제동장치  
Table 1. Braking apparatuses per each bogie

No. of bogie	BM1	BM2	BM3	BT4	BT5	BT6	BT7	BM8	BM9	BM10	Total
Mechanical brake											
Tread	4	4							4	4	16
Wheel disc			2					2			4
Disc				6	6	6	6				24
Eddy current brake				1	1	1	1				4
Electric brake (regenerative/rheostatic)	2	2	2					2	2	2	12

랜딩(blending)을 하면서 필요한 제동력을 발휘하도록 구성되어 있다<sup>[5-6,8]</sup>. 그림 2에서 보는 바와 같이 고속에서는 전기 제동이 상대적으로 전체 제동력의 많은 부분을 차지하고 있으며, 저속에서는 공기제동이 많은 부분을 차지하고 있다. 또한, 동력 대차와 동력객차 대차에는 전기제동장치와 기계제동장치가 설치되어있으며, 상용 제동시에는 전기제동장치가 정상인 경우에 기계제동장치는 사용되지 않도록 블랜딩이 설정되어 있다.

### 3. 제동성능 해석 및 시험적 검증

#### 3.1. 제동성능 해석

운행중인 열차의 제동시 진행방향에 대한 운동방정식은 식 (1)과 같으며, 이로부터 열차의 진행방향 가속도를 식 (2)와 같이 얻을 수 있다.

$$F = m(1+X) \times a = -F_b - R - m(1+X) \times g \sin \theta \quad (1)$$

$$a = \frac{-F_b - R - m(1+X) \times g \sin \theta}{m(1+X)} \quad (2)$$

여기서,  $F$ 는 열차의 작용하는 관성력,  $m$ 은 열차 질량,  $a$ 는 열차의 가속도,  $F_b$ 는 열차의 제동력,  $R$ 은 열차의 주행저항,  $\theta$ 는 선로구배로 +는 상구배, -는 하구배를 나타내며,  $X$ 는 회전장치들에 의해 발생한 상당관성계수로 고속철도의 경우는 0.04를 사용한다<sup>[9]</sup>.

또한, 열차의 주행속도 및 제동거리는 가속도-속도, 속도-거리와의 관계로 부터 얻어진 식 (3)과 식(4)를 적분하여 구할 수 있다.

$$dv = a \times dt \quad (3)$$

$$ds = v \times dt \quad (4)$$

여기서,  $v$ 는 열차의 주행속도,  $s$ 는 제동거리를 나타내고 있다.

그림 3은 운행 중인 열차의 제동 시에 제동거리와 제동시간을 계산하는 흐름도이며, 이 흐름도에 따라 제동거리 및 제동시간을 구할 수 있는 제동성능 해석 프로그램이 그림 4와 같이 작성되었다. 또한, 이 프로그램을 이용하여 열차 감속도, 감속도 변화율, 각 제동장치에 걸리는 제동력 및 제동에너지 등도 구할 수 있다.

#### 3.2. 제동성능 해석에 대한 시험적 검증

제동성능 해석의 검증은 한국형 고속열차에 대한 시운전 시험을 통해 획득된 제동시험 데이터를 이용하여 제동해석 결과와 비교하였다. 제동성능 해석을 위해 필요한 입력 자료는 한국형 고속열차의 차량 데이터와

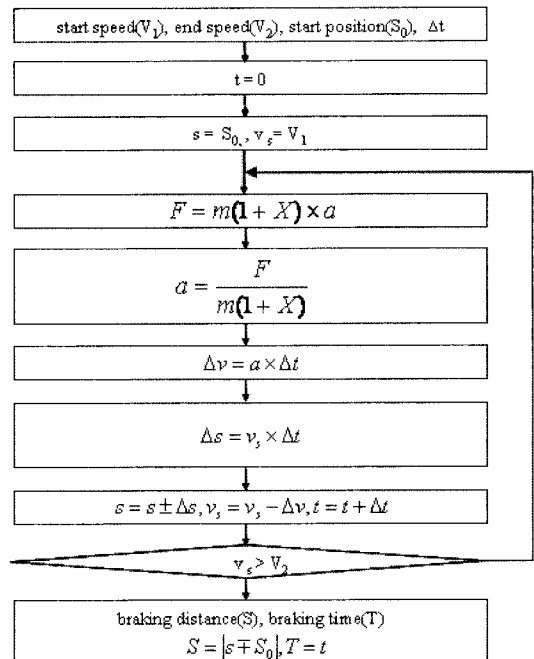


그림 3. 제동거리 및 제동시간 계산 흐름도  
Fig. 3. Flowchart for calculation of braking distance and braking time.

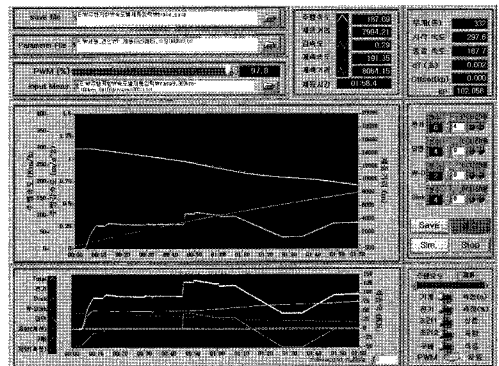


그림 4. 제동성능 해석 프로그램  
Fig. 4. Analysis program of braking performance.

실제 시험구간의 선로 데이터, 제동장치의 특성 데이터 및 열차 운행 정보 등으로 세부내용은 구배저항, 한국형 고속열차의 주행저항<sup>[11]</sup>, 기계제동장치의 마찰계수, 전기모터와 감속기로 구성된 견인시스템의 동력전달율, 제동실린더 작동압력, 인버터 출력, 열차중량 등이다.

이들 중 구배저항은 선로 설계 데이터를 통하여 획득하였으며, 열차중량은 실제로 측정을 하였고, 그 외에 입력 정보는 한국형 고속열차에 대한 시운전 시험을 통하여 획득하였다.

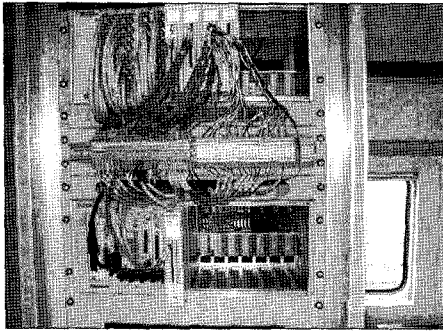


그림 5. 한국형 고속열차에 설치된 계측 시스템  
Fig. 5. Measuring system installed in the Korean high speed train.

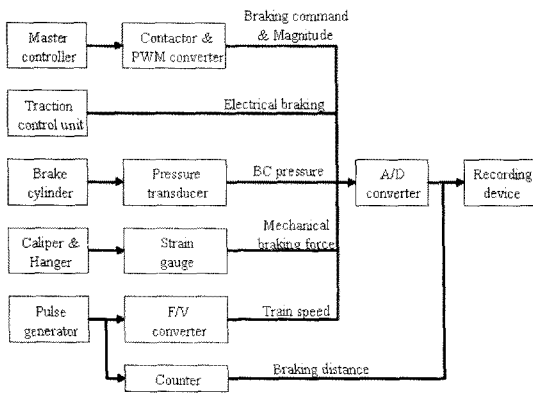


그림 6. 신호 계측 다이어그램  
Fig. 6. Diagram of signal measurement.

3.2.1. 한국형 고속열차 시운전 시험을 위한 시험계측 시스템

그림 5는 한국형 고속열차에 설치되어 있는 네트워크 기반의 시험 계측시스템의 일부를 나타낸 것이며, 시험계측 시스템은 시운전 시험 과정에서 열차 속도, 주행거리, 견인 및 제동 지령 신호, 제동실린더 압력, 스트레인지이지 등 약 400개의 신호를 그림 6에서 보는 바와 같은 과정에 따라 각 신호의 특성에 따라 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz 및 10 kHz의 샘플링 주파수로 동기화하여 측정 및 저장할 수 있도록 되어 있다<sup>[12]</sup>. 제동성능 해석을 위해 시운전 시험을 통해 획득해야 하는 필요한 입력 자료와 제동성능 해석결과를 실험적 검증하기 위한 계측 데이터는 한국형 고속열차의 설치된 계측 시스템으로부터 입수하여 사용하였다.

3.2.2. 제동성능 해석을 위한 입력 자료

(1) 구배저항 및 주행저항

구배저항은 선로 노선 설계 데이터로부터 입수하였

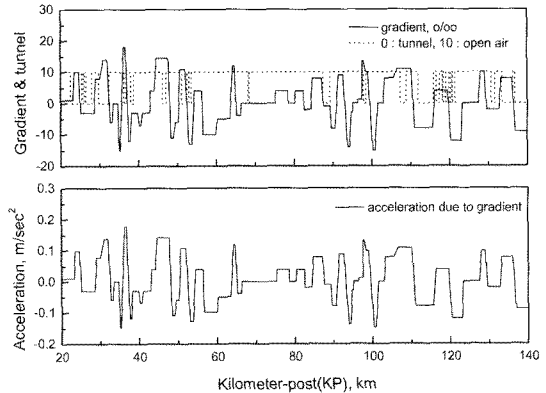


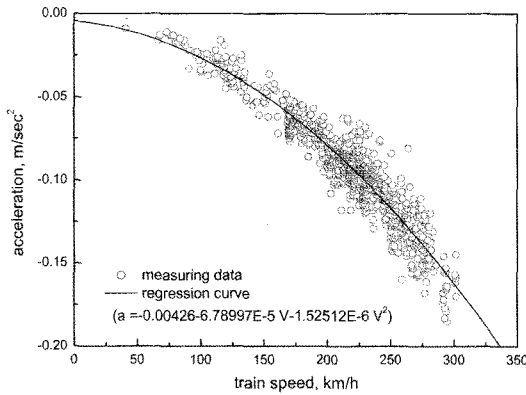
그림 7. 구배, 터널 신호 및 구배 가속도  
Fig. 7. Gradients, tunnel signal and gradient accelerations.

으며, 주행저항은 고속선로에서 타행시험을 통해 계측된 데이터로부터 구하였다. 고속선 KP22~KP145 구간에는 그림 7의 상단 그래프에서 보는 바와 같이 선로 구배는 -15~18%이며, 터널이 21개 설치되어 있다. 선로 구배는 그림 7의 하단 그래프에서 보는 바와 같은 가속도 효과로 열차에 작용되며, 그 크기는 약 -0.15 m/sec<sup>2</sup>~0.18 m/sec<sup>2</sup>로 선로 구배에 따라 다르게 작용된다. 터널의 유무에 따라 주행저항이 다르기 때문에 이 구간에 대한 개활지와 터널에서 주행저항에 의한 열차의 가속도는 그림 8과 같이 주행속도가 300 km/h일 때 약 0.03 m/sec<sup>2</sup>(개활지 -0.13 m/sec<sup>2</sup>, 터널 -0.16 m/sec<sup>2</sup>) 정도 차이를 갖고 있다.

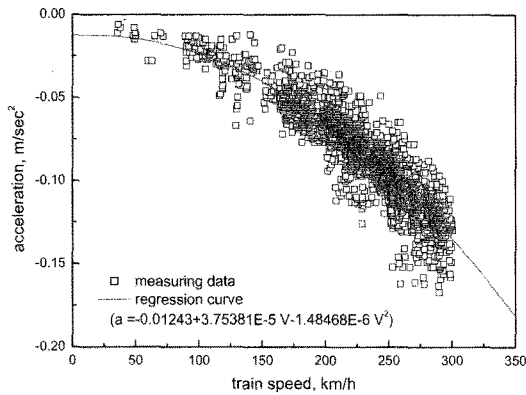
(2) 기계제동장치의 제동 패드 마찰계수 및 견인 시스템의 동력 전달율

마찰계수 및 동력전달율은 주행저항과 같이 고속선로에서 시운전시험을 통해 계측된 데이터로부터 구하였다. 기계제동장치의 마찰계수와 견인 시스템의 동력 전달율은 전기 제동장치를 작동하지 않은 상태에서의 제동시험과 정지 상태에서 출발하는 견인시험을 통해 구할 수 있었다.

한국형 고속철도의 디스크 제동장치와 휠 디스크장치에는 동일한 제동 패드를 사용하기 때문에 디스크 제동장치에서 제동 패드의 마찰계수를 구하여 디스크 제동과 휠 디스크 제동에 사용하였다. 그림 9는 제동 패드의 마찰계수를 구하기 위하여 디스크 제동장치에 스트레인지이지들을 장착한 모습이며, 이 스트레인지이지들로부터 디스크와 제동 패드 사이에 작용하는 수직력과 마찰력을 측정하여 제동 패드의 마찰계수를 계산하였다. 그림 10은 측정된 마찰계수를 나타낸 것으로 제동 패드의 마찰계수는 0.38~0.30이었다. 또한, 답



(a)



(b)

그림 8. 주행저항에 의한 가속도: (a) 터널, (b) 개활지  
Fig. 8. Accelerations by resistance to motion: (a) tunnel, (b) open field.

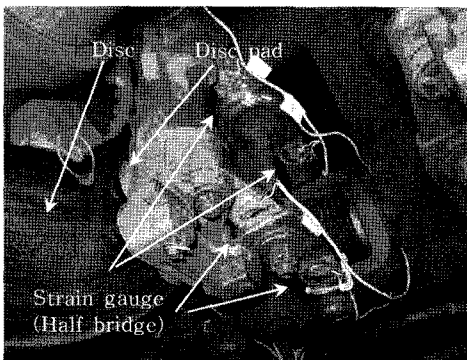


그림 9. 스트레인 게이지 장착 모습  
Fig. 9. View of installed strain gauges.

면 제동장치의 제륜자의 마찰계수는 일반적으로 많이 사용되고 있는 평균 마찰계수 0.25를 적용하였다.

동일한 견인장치가 견인시에는 모터로 작동하여 열

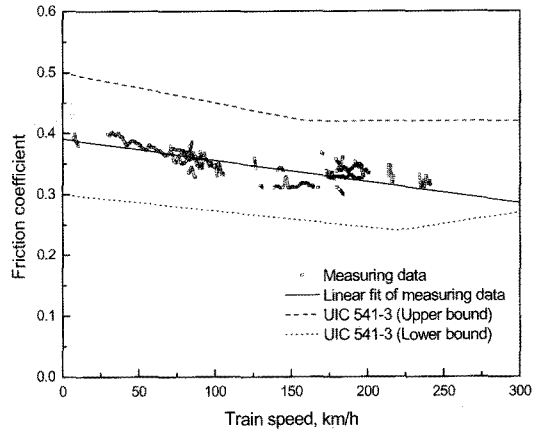


그림 10. 디스크-패드 마찰계수  
Fig. 10. Disc-pad friction coefficient.

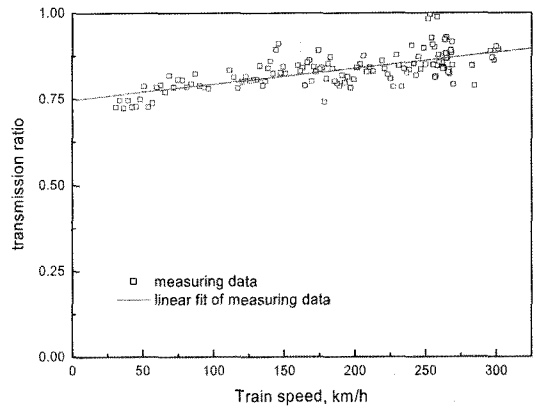


그림 11. 견인 시스템의 전달율  
Fig. 11. Transmission ratio of traction system.

차를 추진시키나 제동시에는 발전기로 작동하여 열차를 제동시키는 전기(회생)제동장치의 역할을 하기 때문에 견인 시스템의 동력전달율은 견인상태에서 구하여 전기 제동장치에 적용하였다. 견인 시스템의 견인력은 열차에 작용하는 가속도를 측정하여 계산한 관성력과 주행 저항, 구배저항을 이용하여 식 (6)으로부터 구할 수 있다. 견인 시스템의 동력전달율은 계산된 견인력과 고속 철도차량 설계데이터<sup>[4,5])</sup>인 견인력 선도의 견인력의 비로 그림 11에 나타난 바와 같이 0.75~0.91 범위이었다.

$$F = m(1+X) \times a = F_t - R - m(1+X) \times g \sin \theta \quad (5)$$

$$F_t = m(1+X) \times a + R + m(1+X) \times g \sin \theta \quad (6)$$

여기서,  $F_t$ 는 열차의 견인력을 나타내고 있다.

표 2. 프로그램 검증을 위한 시험 데이터  
Table 2. Test data for program verification

Case	Train speed, km/h	Applied brakes	PWM, %
1	300 - 180	Disk	100
2	200 - 90	Disk, wheel disk, tread	100
3	300 - 100	Electrical, disk	100
4	80 - 30	Electrical, disk, wheel disk, tread	0 - 70

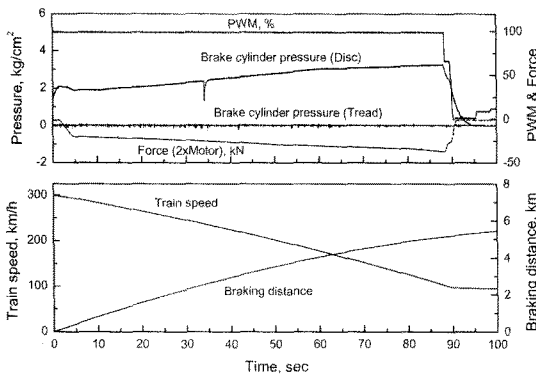


그림 12. Case 4의 제동시험 계측 데이터  
Fig. 12. Measuring data of braking test for case 4.

3.2.3. 제동성능 해석에 대한 실험적 검증

한국형 고속열차에 대해 고속선 광명(KP22)~신탄진(KP145) 구간에서 진행된 표 2와 같은 4가지 경우의 제동성능 시험과 동일한 조건에서 제동성능 해석을 실시하였으며, 제동성능 해석결과가 시험결과와 잘 일치하는 지를 확인하였다. Case 1과 Case 2는 기계제동만을 사용하는 경우이고 Case 3과 Case 4는 전기제동과 기계제동이 동시에 작동하는 경우이다.

그림 12는 Case 3에 대한 시험계측 결과를 나타낸 것으로서 상단 그래프는 디스크 제동장치와 달면제동장치의 제동실린더 압력, 제동 PWM 및 2대의 전동기에서 발휘하는 회생전기제동력을 나타내며, 하단 그래프는 제동거리 및 제동 과정에서의 속도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 300 km/h의 속도에서 100%의 제동이 인가되었으며, 이 때 사용된 제동장치는 전기제동장치와 디스크 제동장치임을 알 수 있다. 전기제동장치는 견인과 제동의 역할을 함께 수행하므로 견인과 구분하기 위하여 제동력은 (-)의 값을 나타내고 있다.

그림 13은 제동성능 해석 결과와 시험 결과를 나타낸 것이다. 그림 13(a)는 Case 1에 대한 제동거리와 열차속도로 그림에서 보는 바와 같이 해석 결과와 시험 결과가 잘 일치하고 있으며, 이는 선로구배의 영향에

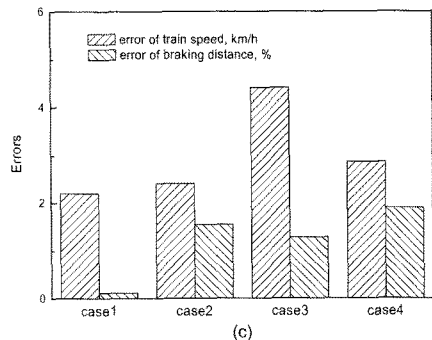
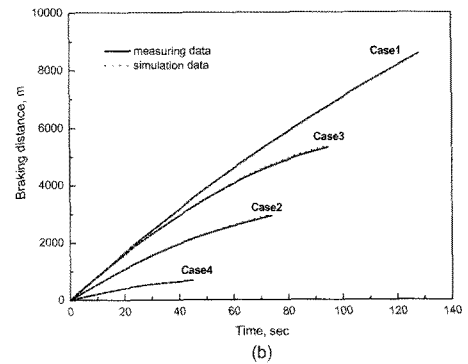
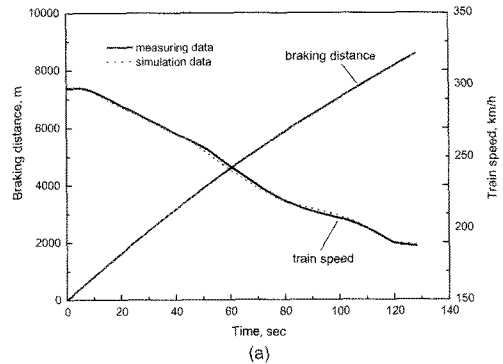


그림 13. 제동성능 해석과 시험결과 비교: (a) Case 1, (b) 4가지 사례에 대한 제동거리, (c) 4가지 사례에 대한 주행속도와 제동거리의 오차

Fig. 13. Comparison between analysis and test results for braking performance: (a) Case 1 (b) braking distances for 4 cases, (c) errors of train speed and braking distance for 4 cases.

의한 영향 및 터널에 의한 영향 등이 제동성능 해석에 잘 반영되고 있음을 말해준다. 그림 13(b)는 4가지 제동사례에 대한 제동거리를 시험 결과와 해석 결과를 나타내고 있으며, 그림 13(c)는 4가지 제동사례에 대해 제동거리와 열차속도에 대한 시험 결과와 해석 결과의 오차를 나타낸 것이다. 각 경우에 대한 해석 결과와 계측 결과는 제동과정에서의 각 순간에서의 열차속도에 대하여 최저 2.2 km/h(Case1)에서 최고 4.4 km/h(Case 3)의 차이를 나타내고 있다. 또한, 제동거리는 각각의

검증사례에 대하여 8 m, 45 m, 67 m, 13 m의 차이로 최대 오차는 Case 4에서 발생하며, 약 1.9%에 불과하다.

따라서, 선로구배 및 터널 등의 선로조건을 고려하여 제동성능 해석을 할 수 있는 프로그램의 타당성이 입증되었다고 판단되며, 이를 이용하여 다양한 형태의 고속철도 차량에 대한 제동성능을 예측하는 것이 가능하다.

3.2.4 고속철도 제동성능 예측

실험적으로 검증된 제동성능 해석 프로그램을 이용하여 다양한 제동조건에 대한 고속차량의 제동성능을 예측할 수 있다.

그림 14는 한국형 고속열차의 제동장치가 일부 고장이 발생하는 경우에 대해 제동성능을 예측한 결과이다. 그림 14(a)는 전기 제동장치가 고장인 경우의 제동거리로 전기제동장치의 고장 수량이 1, 2, 3개가 됨에 따라 제동거리가 정상적인 경우에 비해 7.3%, 15.5%, 27.4%로 증가하고 있으며, 그림 14(b)는 디스크 제동장치가 고장인 경우로 고장 수량이 1, 2개가 됨에 따라 제동거리가 기계 제동장치가 정상인 경우에 비해 8.1%, 16.1% 증가함을 알 수 있다.

그림 15는 표 3과 같은 고속차량의 편성방식에 따른 제동거리를 예측한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이

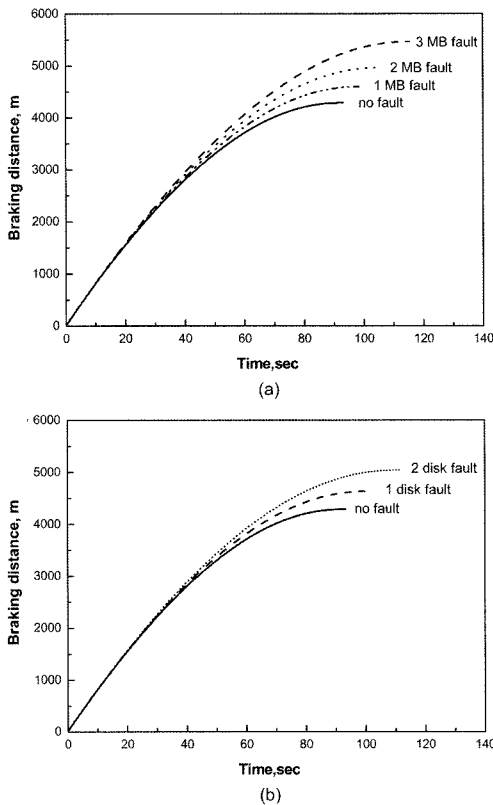


그림 14. 고장시 제동거리 비교: (a) 전기제동, (b) 기계제동  
Fig. 14. Comparison of braking distance in the case of faults: (a) electrical brake, (b) mechanical brake.

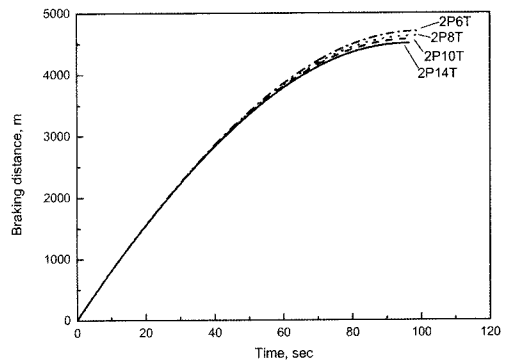


그림 15. 편성에 따른 제동거리 비교  
Fig. 15. Comparison of braking distance according to train-sets.

표 3. 편성차량 데이터  
Table 3. Data of train-sets

Train-sets	No. of power bogies, ea	No. of trailer bogies, ea	Mass, ton	No. of wheel-sets, ea	Motion resistance, daN
2P6T	4	7	364.8	22	$R_8=218.1+2.918 V+0.0420 V^2$
2P8T	4	9	431.1	26	$R_{10}=257.8+3.449 V+0.0485 V^2$
2P10T	4	11	497.4	30	$R_{12}=297.5+3.980 V+0.0550 V^2$
2P14T	4	15	630.1	38	$R_{16}=376.8+5.040 V+0.0680 V^2$

편성에 따른 제동거리는 크게 변화하지 않고 있다. 예를 들면 2P14T(동력차 2량, 객차 14량) 편성차량인 경우에 2P6T(동력차 2량, 객차 6량) 편성차량에 비하여 객차가 8량 증가했음에도 불구하고 제동거리는 약 4.5%가 증가하는 데, 이는 객차 수량의 증가와 함께 객차 대차 수량의 증가에 따른 디스크 제동장치의 수량이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 고속철도의 제동성능을 예측하기 위한 제동성능 해석 프로그램을 개발하여 한국형 고속열차의 제동성능 시험결과와 해석결과의 비교 분석을 통한 검증을 수행하였고, 검증된 제동성능 해석 프로그램으로 고속철도의 제동성능을 여러 조건에서 예측하였다.

(2) 한국형 고속열차의 제동성능 시험조건과 해석조건을 일치시키기 위해 해석 프로그램의 입력 정보 중 선로 구간의 구배저항은 선로 노선 설계 데이터를 통해 입수하였고, 주행저항, 기계제동장치의 마찰계수, 견인 시스템의 동력전달율 등은 실제의 시운전 시험을 통해 구하였다.

(3) 제동 해석 프로그램 검증에 사용한 4가지 경우에 대해 해석결과와 시험결과가 잘 일치하므로 제동해석 프로그램의 타당성이 입증되었다고 판단된다.

(4) 검증된 제동성능 해석 프로그램을 이용하여 한국형 고속열차에 대해 제동장치가 일부 고장인 경우의 제동성능과 고속철도의 열차편성 변경에 따른 제동성능을 예측할 수 있었다.

(5) 제동해석 프로그램은 일부 입력정보의 수정을 통해 동력집중식의 고속철도가 아닌 다른 차종의 철도차량의 제동성능을 예측하는 데 사용할 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 내용은 건설교통부에서 시행하는 고속철도기술개발사업의 기술결과임을 밝힌다.

#### 김 영 국

- 『센서학회지 제13권 제5호』 p. 377 참조
- 현재 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단 책임연구원

#### 참고 문헌

- [1] 이남진, 강철구, “동적 모델에 의한 고속전철의 제동력 시뮬레이션”, 제어·자동화·시스템공학논문지, 제8권, 제1호, pp. 46-53, 2002.
- [2] S. Yasunobu, S. Miyamoto, and H. Ihara, “Fuzzy control for automatic train operation system”, *IFAC Control in Transportation System*, pp. 23-39, 1983.
- [3] International Standard IEC 1133, IEC, 1992.
- [4] 고속전철시스템 기본사양, 한국철도기술연구원, 1998.
- [5] G7 고속전철 기술개발사업 Control System Specification, (주)로템, 2001.
- [6] 제동시스템 개발, 고속전철기술개발사업 연차보고서, 건교부/산자부/과기부, 1996-2001.
- [7] 김기열, 김상호, 김유신, 이범주, 김석원, “고속 철도 차량용 소결 마찰재료 개발”, 한국철도학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 315-321, 2004.
- [8] 김석원, 김영국, 박태원, “한국형 고속전철의 디스크 제동력 측정 방법에 관한 연구”, 센서학회지, 제13권, 제3호, pp. 214-251, 2004.
- [9] Korea TGV consortium, “Prediction technology for trip time and energy”, Technical report K640-0-Z3260-GL+T-046, pp. 10, 1996.
- [10] UIC Leaflet 541-3, Brakes-Disc brakes and their application-General conditions for the approval of brake pads, 5th edition, 2004.
- [11] 김영국, 김석원, 권혁빈, 박태원, “한국형 고속열차의 주행저항 평가”, 한국철도학회논문집, 제8권, 제5호, pp. 332-338, 2005.
- [12] 김석원, 김영국, 백광선, 김진환, 한영재, “고속철도 시운전시험 및 평가용 측정시스템 개발 (I)-하드웨어”, 한국철도학회 추계 학술대회논문집, pp. 168-173, 2002.
- [13] 김영국, 목진용, 김석원, 박관경, 김기환, 박태원, “시운전 시험을 통한 한국형 고속열차의 승차감 변화 추세에 관한 연구”, 센서학회지, 제14권, 제3호, pp. 144-149, 2005.

#### 김 석 원

- 『센서학회지 제13권 제3호』 p. 251 참조
- 현재 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단 책임연구원



**박 찬 경**

- 『센서학회지 제13권 제3호』 p. 251 참조
- 현재 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단 책임연구원

**이 성 호**

- 2003년 2월 동아대학교 공과대학 전자공학 학과 졸업
- 현재 연세대학교 공과대학 전기전자공학과 석사과정 재학
- 현재 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단 연구원
- 주관심분야 : 제동제어, 계측제어

**박 태 원**

- 『센서학회지 제13권 제3호』 p. 251 참조
- 현재 아주대학교 기계 및 산업공학부 교수