

고속철도 차량의 제동성능해석 및 검증 Braking Performance Analysis and Inspection of High Speed Train

이성호† · 김영국* · 김석원* · 박진배**

Sung Ho Lee, Young Kuk Kim, Seog Won Kim, Jin Bae Park

Key Words : electrical brakes(전기제동), mechanical brakes(기계제동), high-speed train(고속열차), train resistance(주행저항)

ABSTRACT

In general, the braking system of 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 combine properly the various brakes. Generally high speed train has adopted a combined electrical and mechanical (friction) braking system. Electrical brakes are consist of rheostatic brake, regenerative brake and eddy current brake and mechanical brakes are composed of disc brake, wheel disc brake and tread brake. In this paper, we introduce braking performance analysis and inspection though simulation and research to reduce braking distance.

1. 서론

철도차량의 속도 증가 기술의 발전으로 현재 300 km/h의 속도로 주행하는 고속 전철의 시대가 보편화되었다. 고속 철도는 여러 가지 기술의 종합체로 각 시스템의 성능 확보를 통한 안정성과 신뢰성 확보가 필요하다. 특히 열차 운행의 치명적인 손상을 초래할 수 있는 제동 성능은 다른 성능과 비교하여 그 중요성이 더 높다고 할 수 있다. 제동 시스템의 근본적인 목적은 주행 중인 열차를 제동 시 원하는 위치에 정확하게 멈출 수 있는 제동 거리를 확보하는 것이다. 이를 만족시키는 제동제어 시스템의 설계는 제동 투입지령 후 실제 제동력이 투입될 때까지 소요되는 시간인 공주시간의 최대한 단축, 차륜과 레일간의 유효한 최대접착력의 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 고려되어야 한다. 현재 안전하고 정확한 위치에 열차 제동 제어시스템을 구축하는 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 고속열차 사용되는 제동 시스템의 성능을 예측하기 위해 열차 제동성능 해석 프로그램을 개발하고, 개발된 해석 프로그램을 국가의 전략적인 사업으로 추진되어 국내 기술로 설계/제작된 최고운행속도 350 km/h급의 한국형 고속열차(HSR-350x)에 적용하여 제동성능 해석결과와 시운전 시험을 통해 얻어진 측정결과와의 비교·검증을 통해 개발된 프로그램을 실제로 적용할 수 있도록 하고자 한다.

2. 고속철도 제동시스템

2.1 제동시스템의 종류와 구성

제동시스템은 요구되는 제동 거리를 확보 하는 것이 우선적이며 이를 만족하기 위한 제동 장치로 구성되어야 한다. 고속전철의 제동 장치 종류는 전기 제동과 기계 제동의 조합으로 구성되어 있으며 이들이 각각 정상적인 기능을 발휘해야 정확한 제동 거리를 확보할 수 있다. 전기제동은 제동 시 동력대차(Motor bogie)에 설치된 전동기가 발전기의 역할을 함에 따라 발생하는 잉여에너지를 가선으로 보내어 다른 열차의 추진에 사용하도록 하는 회생 제동, 잉여 에너지를 차량에 설치된 주저항기에서 열로 발산시켜 제동력을 발생시키는 저항 제동 등으로 이들은 비접촉 제동 방식이다. 기계 제동은 기계적인 마찰력을 이용하는 제동 방식으로 디스크 제동, 휠-디스크제동, 답면 제동으로 세분화된다.

Fig. 1은 HSR-350x(7량 1편성)의 열차편성을 나타낸 것

† 연세대학교 대학원 전기전자공학과
E-mail : sshlee@krii.re.kr
Tel: (031)460-5603, Fax: (031)460-5640
* 한국철도기술연구원
** 연세대학교 전기전자공학과 교수

으로 동력차 2량(TP1, TP2), 동력객차 2량(TM1, TM5) 및 객차 3량(TT2, TT3, TT4)으로 구성되어 있으며, 대차는 동력 대차 4대(BM1, BM2, BM9, BM10), 동력객차 동력 대차 2대(BM3, BM8), 객차 대차 4대(BT4~BT7)로 총 10대로 이들은 2개의 운축에 의해 지지되어 있다.

HSR-350x에 설치된 제동장치는 Table 1에서 보는 바와 같으며, 동력 대차에는 전기제동과 담면 제동장치, 동력객차 대차에는 전기제동과 휠디스크 제동장치가, 객차 대차에는 디스크 제동장치가 장착되어 있다.

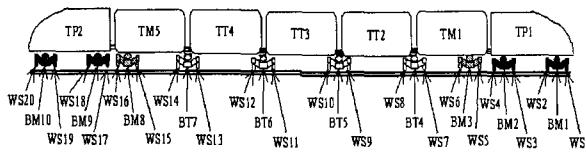


Fig. 1. Configuration of Korean high speed train

Table 1. Braking apparatuses per each bogie

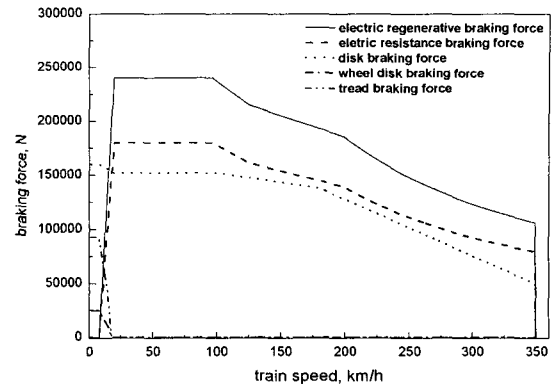
Bogie Number	BM 1	BM 2	BM 3	BT 4	BT 5	BT 6	BT 7	BM 8	BM 9	BM 10	total
Tread	4	4							4	4	16
Wheel disk			2					2			4
Disk			6	6	6	6					24
Electrical	2	2	2					2	2	2	12

2.2 고속철도의 제동 방식

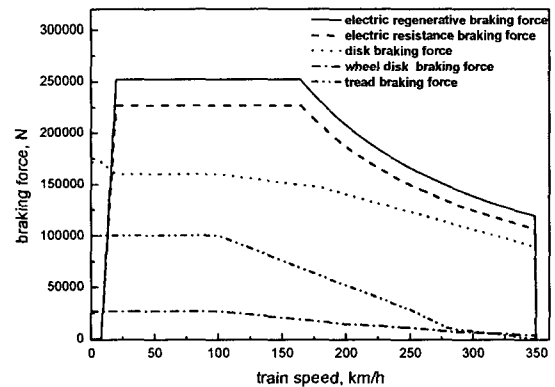
전체 제동력은 앞에서 설명한 각 제동 장치들의 특성 및 효율을 고려하여 운행 속도에 따른 제동력의 조합, 즉 설정된 제동 패턴에 따라 각 제동 장치별로 블렌딩(Blending)하여 전체 제동력을 확보하도록 구성되어 있다. 또한 전체 제동력은 상용 제동과 비상 제동의 제동 방법에 따라 속도별로 각 제동 장치에 대해 설정된 제동력을 분담하게 된다.

Fig 2는 HSR-350x에 대한 제동 모드별 열차 속도에 대한 제동 장치별 제동력 곡선을 나타내고 있다. 일반적으로 고속에서는 전기 제동이 상대적으로 전체 제동력의 많은 부분을 차지하며 저속에서는 공기제동이 많은 부분을 차지한다. 또한 제동 체결 시 사용되는 제동의 우선순위는 고속에서 저속으로 회생 제동(저항 제동), 디스크 제동, 휠-디스크 제동, 담면 제동의 순서로 제동력을 분담한다.

제동 과정에서 차량 전체의 필요제동력을 각 제동장치로 배분하기 위한 제동 블렌딩 제어장치(BBCU)는 제동과정에서 일부분의 제동장치의 고장으로 원하는 제동력 달성이 어려운 경우에는 회생 제동(저항 제동), 디스크 제동, 휠디스크 제동, 담면 제동의 순서로 보상이 필요한 제동력을 추가로 적용 가능하도록 한다.



(a)



(b)

Fig. 2. Braking force

(a) Service braking, (b) Emergency braking

3. 제동성능 해석 및 검증

3.1 제동거리 계산

운행 중인 열차의 제동 시에 열차의 진행방향에 작용하는 운동방정식은 뉴턴(Newton)의 제2법칙에 의해 성립되며, 이 운동방정식으로부터 식 (1)과 같이 열차의 진행방향에 대한 감속도(a)를 구할 수 있다.

$$a = \frac{F_b + R_r}{m} \quad (1)$$

여기서, m 은 열차질량, F_b 는 전체 제동력, R_r 은 주행저항을 나타낸다. 전체 제동력과 열차저항은 각각 식 (2)와 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$F_b = F_{brake} + F_{brake} \quad (2)$$

$$R_r = R_m \pm mg \sin \theta \quad (3)$$

여기서, F_{bract} 은 전기제동력, F_{brame} 는 기계 제동력을 나타내며, R_m 은 주행저항, θ 는 선로의 구배(+: 상구배, -: 하구배), g 는 중력가속도를 나타낸다.

Fig. 3은 경부고속철도의 일부 구간(KP28 ~ KP145)에서의 선로구배를 보여 주고 있으며, 이 구간에서는 구배가 -15 ~ 18 %이므로 구배저항이 열차의 운행에 영향을 줄 것으로 예상할 수 있다. 또한, 일반적으로 열차의 주행저항은 식 (4)와 같이 2차 함수로 표현되고 계수 a, b, c 는 실제의 시운전 시험을 통해 얻어지며, HSR-350x에 대해 실험을 통해 얻어진 주행저항은 Fig. 4와 같다.

$$R_r = a + bv(t) + cv(t)^2 \quad (4)$$

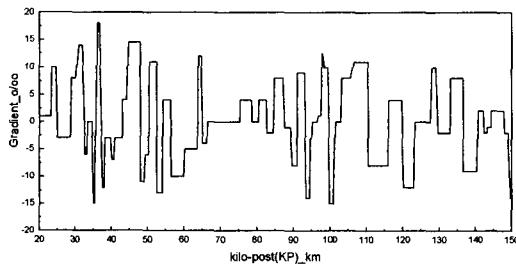


Fig. 3 Gradient in test section

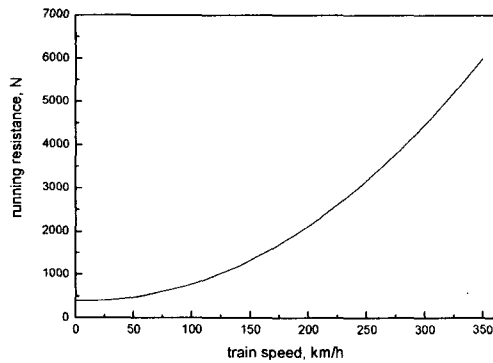


Fig. 4 Running resistance for HSR-350x

또한, 가속도-속도, 속도-거리와의 관계는 식 (5)와 식 (6)으로 표현 할 수 있다.

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (5)$$

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (6)$$

Fig. 5는 운행 중인 열차의 제동 시에 제동거리와 제동 시간을 계산하는 흐름도이다. 식 (2)와 식 (3)을 통해 얻어진 제동력과 주행저항으로부터 식 (1)에서 열차의 진행방향의 가속도를 구한 후에 식 (5), 식 (6)를 이용한 적분을 통해 속도와 거리를 계산하게 된다.

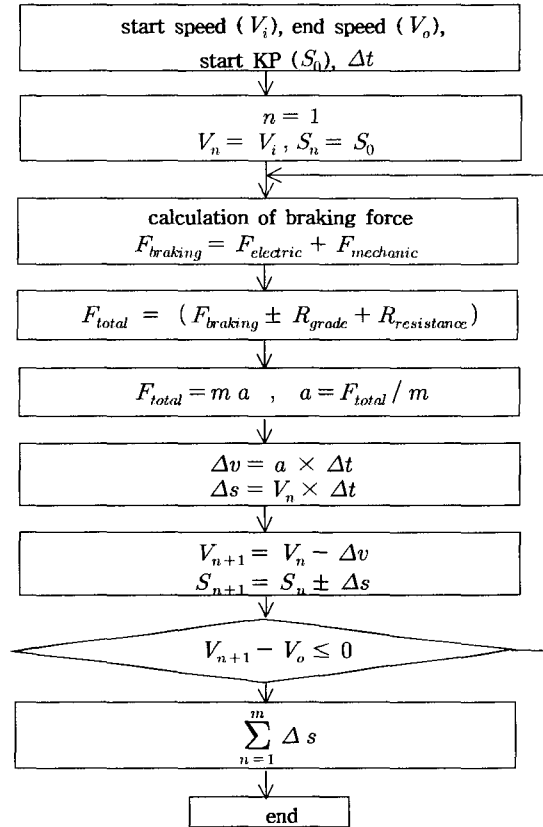


Fig. 5 Flowchart of calculation of braking distance

3.2 시운전시험 결과와 비교 검토

제동성능 해석 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 현재 고속선에서 시운전 중인 HSR-350x의 본선 시험 결과와 프로그램의 simulation을 통해 계산된 제동 거리를 비교하였다.

HSR-350x에 설치된 제동성능 계측시스템은 주 제어간으로부터 제동지령 신호와 제동크기 신호(PWM)를 저장하며, 차륜에 설치된 펄스 발생기로부터 발생된 펄스 신호는 주파수/전압 변환기(F/V converter)와 카운터(counter)를 거쳐 열차의 주행 속도와 이동 거리로 환산되어 저장된다. HSR-350x의 계측 시스템에서 제동 성능관련 측정과정은 Fig. 6과 같다.

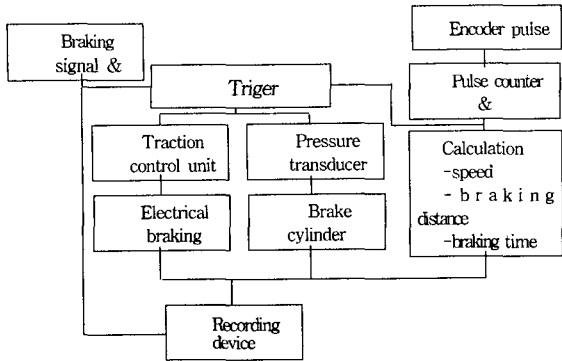


Fig. 6 Measuring diagram for braking performance

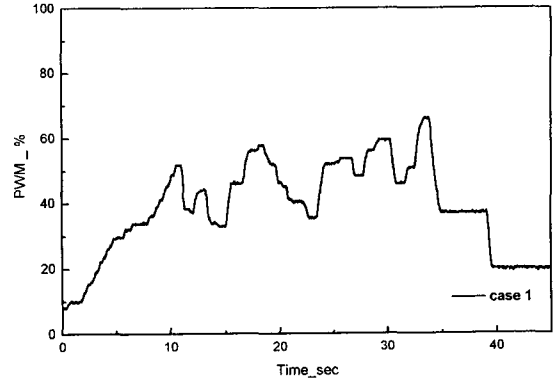
Table 2에서 보인 바와 같이 시험을 통한 12 case의 서로 다른 제동 형태의 측정결과를 적용하여 다양한 제동조건에서 프로그램의 검증을 실시하였다. Table 2에서 각각의 case마다 열차 주행속도, 제동 구간, 제동 지령치 및 사용 제동 장치가 차이를 갖고 있음을 알 수 있다.

한 예로서 Fig. 7은 case 1의 경우에 PWM 신호, 제동력 및 제동장치를 나낸 것으로 Fig. 7 (a)에서 보는 바와 같이 제동력의 크기 신호인 PWM 신호는 0 - 70 (%) 사이에서 변화하고 있으며, 사용된 제동장치는 Fig. 7 (b)에서 전기제동, 디스크제동, 휠 디스크 제동, 담면 제동 등이 작동하고 있음을 알 수 있고, 이때 제동거리는 Fig. 7 (c)와 같이 681.9 m(제동시간 45.0 sec)이었다.

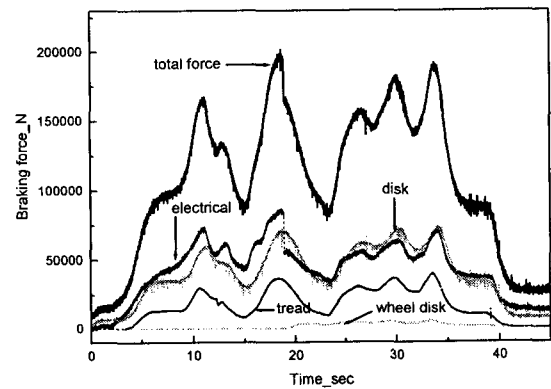
Table. 2 Case of On-line braking test

Case	Braking speed section (km/h)	PWM (%)	Applied braking installation
1	80 - 0	0-70	Electrical, Disk, Wheel disk, Tread
2	100 - 0	100	Disk, Wheel disk, Tread
3	200 - 80	50	Electrical, Wheel disk, Tread
4	200 - 90	100	Disk, Wheel disk, Tread
5	200 - 90	100	Disk, Wheel disk, Tread
6	200 -100	100	Disk, Tread
7	270 - 80	0-70	Electrical, Disk
8	300 - 100	100	Electrical, Disk
9	300 - 180	100	Disk
10	300 - 180	100	Disk, Tread
11	300 - 190	100	Electrical, Disk, Tread
12	300 - 200	100	Electrical, Disk

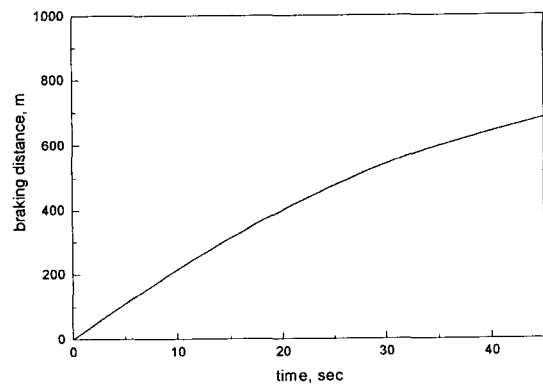
Fig. 8은 각 case에 대한 제동 시험 결과와 동일 조건에서 제동성능해석 프로그램을 실행하여 얻어진 제동 거리를 비교한 것이며, Fig. 9는 두 경우의 제동거리에 대한 오차를 나타낸 것이다. Fig. 9에서 알 수 있는 바와 같이 $\pm 1\%$ 미만으로 제동 시험 결과와 동일 조건에서 시뮬레이션 결과가 거의 일치하므로 제동성능 해석 프로그램의 알고리즘이 타당하다고 판단된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Braking force of on-line test (80km/h-0km/h)
(a) PWM, (b)Braking force, (c) braking distance

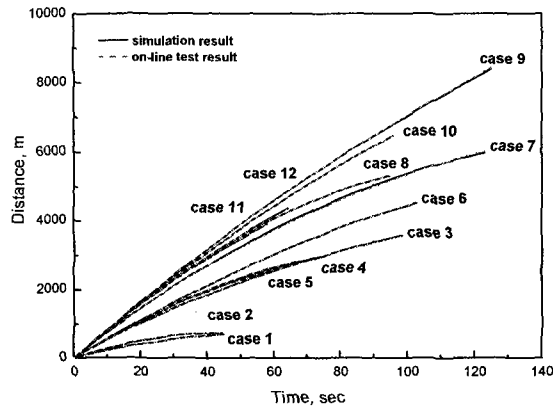


Fig. 8 Comparison of simulation & on-line test result for braking distance

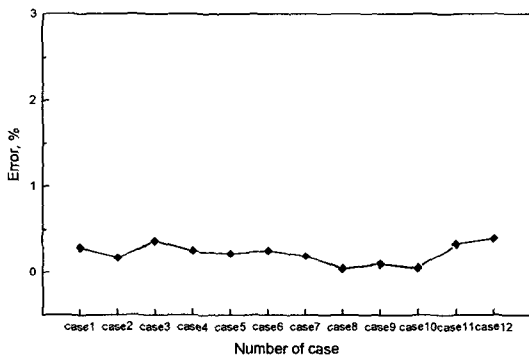


Fig. 9 Errors of simulation & on-line test result

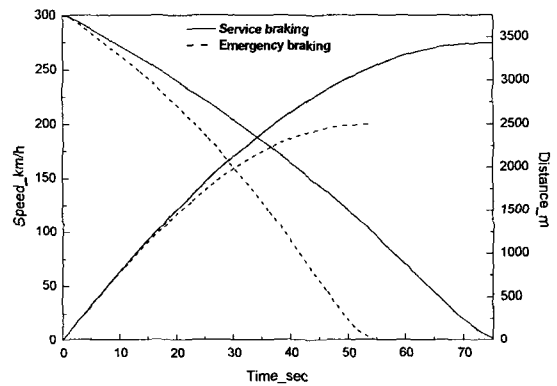
3.3 성능해석 프로그램을 통한 제동거리 예측

앞 절에서 HSR-350x에 대한 제동 시험 결과와 simulation 결과의 비교를 통하여 제동 성능해석 프로그램의 타당성을 검증하였으며 이를 바탕으로 열차의 제동 시 제동 모드(상용, 비상), 제동장치(전기제동, 기계 제동) 등의 상태 변화에 따른 제동거리에 대하여 예측하였다.

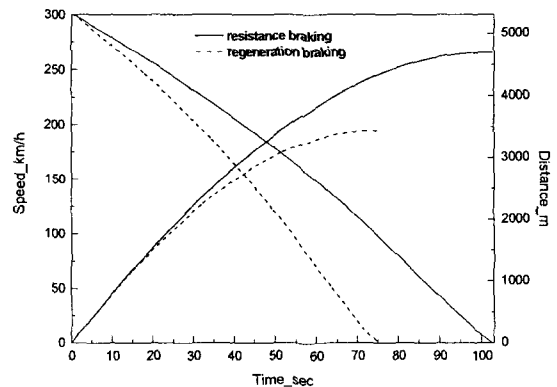
Fig. 10은 제동 모드(상용, 비상)와 전기제동 장치(회생, 저항)의 차이에 따른 열차 주행속도와 제동거리를 비교한 것이다. Fig.10 (a)는 기계제동은 정상, 전기제동은 회생 제동 하에서 상용제동과 비상제동일 때에 열차 주행속도와 제동거리를 나타낸 것으로 비상제동의 경우가 상용제동에 비해 제동거리가 27 %가 짧다. Fig.10 (b)는 상용제동에서 기계제동은 정상인 상태에서 회생제동과 전기제동일 때에 열차 주행속도와 제동거리를 나타낸 것으로 회생제동의 경우가 저항제동에 비해 제동거리가 26 %가 짧음을 알 수

있다.

Fig. 11은 제동 장치의 일부가 고장이 발생한 경우로 Fig. 11 (a)는 전기 제동장치가, Fig. 11 (b)는 기계 제동장치가 고장인 경우의 제동거리를 비교한 것이다. Fig. 11 (a)에서 보는 바와 같이 전기 제동장치가 정상인 경우에 비교하여 제동장치의 고장 수량에 따라 제동거리가 각각 8.1%, 17.1%, 25.3% 증가하였으며, Fig. 11 (b)에서 보는 바와 같이 기계 제동장치는 디스크, 휠디스크, 담면의 순서로 각 제동 장치별 하나씩 고장인 조건에서 기계 제동장치가 정상인 경우에 비해 제동거리가 각각 3.2%, 1.2%, 0.3% 증가하였다. 이상을 통해 전기제동 장치의 고장 유무에 따라 제동 거리는 증가 폭이 크다는 것을 알 수 있다.

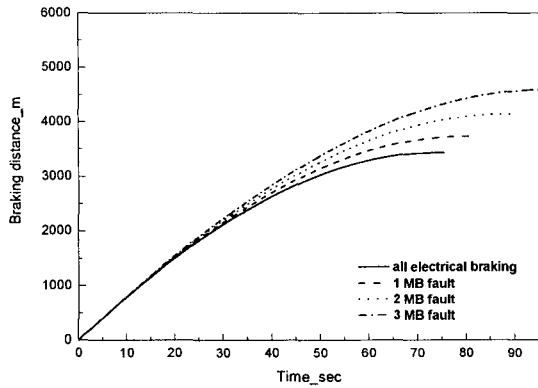


(a)

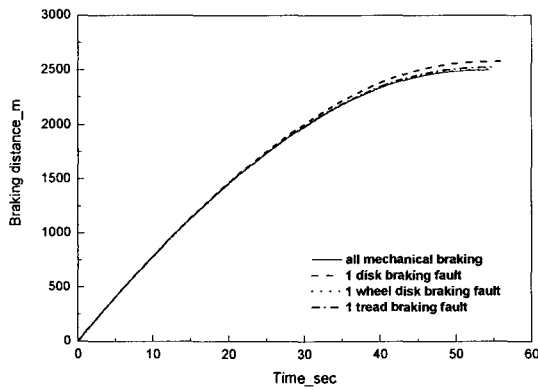


(b)

Fig. 10 Comparison of braking performance, (a)service and emergency (b) regenerative and resistive brake



(a)



(b)

Fig. 11 Comparison of braking distance in the case of fault

(a) Electrical braking (b) Mechanical braking

4. 결론

이상의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 다양한 조건(제동 모드, 사용하는 제동장치 종류, 제동장치 고장유무, 선로 구배 유무 등)에서 철도차량의 제동 성능을 해석할 수 있는 제동성능 해석 프로그램을 개발하였다.

(2) 제동성능 해석 프로그램을 한국형 고속열차에 적용하여 해석 결과와 제동시험 결과의 비교를 통해 검증하였으며, 제동거리에 대한 제동시험 결과와 제동해석 결과가 잘 일치함을 알 수 있었다.

(3) 개발된 제동성능 해석 프로그램을 이용하여 제동모드(상용-제동), 제동장치 상태 변화에 따른 제동성능(제동거리, 제동시간 등)을 예측하였다. 기계 제동장치에 비해

전기 제동장치가 고장 시에 제동거리에 큰 영향을 줄 수 있음을 예측 결과에서 확인하였다.

(4) 본 연구의 결과는 고속열차 뿐만 아니라 다른 철도차량의 제동성능의 예측에 활용하는 것이 가능하리라 판단된다.

후 기

본 내용은 건설교통부에서 시행하는 고속철도기술개발사업의 기술결과임을 밝힌다

참고문헌

- (1) 김영국 등, 2005, "한국형 고속열차의 주행저항 평가", 한국철도학회 논문집 제 8권 5호
- (2) 김석원 등, 2004, "한국형 고속전철의 디스크 제동력 측정 방법에 관한 연구", 한국선사학회지 제 13권 3호
- (3) 이남진 등, "동적 모델에 의한 고속전철의 제동력 시뮬레이션", 제어·자동화·시스템공학논문지, 8권, 1호, pp.46-53, 2002.
- (4) S. Yasunobu, S. Miyamoto and H. Ihara, "Fuzzy control for automatic train operation system", IFAC Control in Transportation System, pp 23-39, 1983.
- (5) 제동시스템 개발, 고속전철기술개발사업 연차보고서, 건교부/산자부/과기부, 1996-2001