

시운전시험을 통한 고속철도 차량의 제동 특성에 관한 연구

A study on the Characteristics of Braking for High Speed Train through On-line Test

김석원* · 김영국** · 박찬경** · 목진용**

S. W. Kim, Y. G. Kim, C. K. Park and J. Y. Mok

Key Words : Korean High Speed Train (KHST, 한국형 고속전철), On-Line Test (시운전 시험), Accelerometer (가속도계), Blending curve(브렌딩 곡선), Braking system(제동장치)

ABSTRACT

In general, the braking system of high speed train has an important role for the safety of the train. To stop safely train at its pre-decided position, it is necessary to combine properly the various brakes. The prototype of Korean high speed train (KHST) has been designed, fabricated and tested by the domestic researchers. It has adopted a combined electrical brakes, such as rheostatic brake, regenerative brake and eddy current brake, and mechanical brakes composed of disc brake, wheel disc brake and tread brake. In this paper, the performances and control algorithms of braking system have been reviewed by the experimental method.

1. 서 론

철도차량은 여러 가지 기술의 종합체로서 안전성, 정시성, 신뢰성 등이 요구되는 운송수단으로 시험을 통한 요구성능에 대한 만족 여부를 확인하여야 한다. 특히, 제동 성능은 다른 성능과 비교하여 인적, 물적인 손상을 초래할 수 있는 중요한 성능이라 할 수 있다. 이러한 제동 성능 중에서 가장 중요한 항목은 주행 중인 열차를 원하는 위치에 멈추게 하는 것이다. 필요한 제동거리의 확보를 위해 검토되어야 하는 사항은 주행 중인 열차의 제동시 충분한 제동력의 확보이며, 이를 위해 제동시스템의 설계에 대한 성능검증이 필요하다^{[1]-[3]}.

본 내용에서는 국가에서 전략적으로 추진한 선도기술개발(G7)사업 중의 하나인 고속전철기술개발사업에서 개발된 최고운행속도 350 km/h의 한국형 고속전철시스템에 대하여 본선시운전 시험항목중의 하나인 제동성능시험 수행을 위한 전반적인 시험계획 방법,

측정 결과의 분석을 통한 제동특성에 대하여 살펴보았다.

제동성능은 요구되는 제동거리에 대한 평가가 우선적으로 수행되어야 하며, 제동 과정에서 각 장치의 정상적인 작동 및 차량의 거동에 미치는 영향 등을 검토하여야 한다. 요구 제동거리의 만족 여부는 단순히 제동 체결 후 정지까지의 주행거리로 평가되므로 여기에서는 제동 과정에서 각 장치의 작동 및 차량의 거동에 대하여 살펴보았다. 고속철도 차량의 제동장치는 전기제동, 외전류제동 및 기계제동의 조합으로 구성되며, 이들 각각이 정상적인 성능을 발휘하여야 정상적인 제동이 가능하다. 특히, 제동 과정에서 활주가 발생할 경우 차륜 손상을 초래하여 차량 주행에 치명적인 영향을 미칠 수 있으므로 활주방지 기능의 정상적인 작동 여부를 확인하였으며, 제동 과정에서 각 제동장치의 투입 시점의 차이로 인한 제동력의 변화가 차량 감속도의 변화(저크)에 미치는 영향을 파악하였다.

또한, 제동이 체결됨에 따라 일정속도로 주행하는 경우에 비하여 대차와 차체의 진동이 상대적으로 크게 발생함을 확인하였으며, 이에 대한 평가 및 검토가 필요함을 확인하였다.

* 한국철도기술연구원

E-mail : swkim@krii.re.kr

Tel. (031)460-5611, Fax (031)460-5649

** 한국철도기술연구원

2. 제동시스템 및 시험계측시스템 구성

2.1 제동시스템 구성

G7 고속전철 시제열차(HSR 350x)는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 7량 1편성이며, 동력차 2량(TP1, TP2), 동력객차 2량(TM1, TM5) 및 객차 3량(TT2, TT3, TT4)으로 구성되어 있다. 또한, 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 윤축에 의해 지지되고 있다^{[4], [5]}.

철도차량의 제동시스템은 전기제동장치와 기계제동장치로 구분되고, 전기제동에는 회생제동, 저항제동과 와전류 제동장치 등이 있으며, 기계제동은 공압을 이용한 제동으로 디스크제동, 답면제동과 휠디스크 제동장치 등이 있다. 철도차량에 사용되는 제동시스템은 철도차량의 종류와 운행속도에 따라 차이가 있다. 일반적으로 철도차량의 운행속도에 따라 제동시스템이 결정되어야 하며, 전기철도는 전기제동장치와 기계제동장치를 혼합하여 제동시스템을 구성할 수 있지만, 비전기철도는 기계제동만으로 제동시스템을 구성하여야 한다^{[4], [7]}.

경부고속철도 차량(KTX)은 300 km/h로 운행하는 전기철도로 제동시스템은 전기제동장치로 회생제동과 저항제동장치를, 기계제동장치로는 디스크제동과 답면제동장치를 사용하여 구성되어 있으나, HSR 350x는 운행속도가 350 km/h로 개발되었기 때문에 제동력

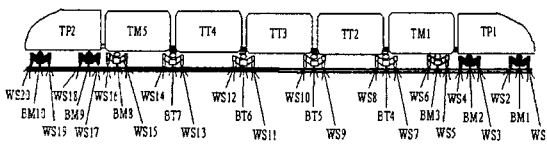


Fig. 1. Configuration of Korean high speed train(HSR350x)

Table. 1. Braking apparatuses per each bogie

대차번호	B M 1	B M 2	B M 3	B T 4	B T 5	B T 6	B T 7	B M 8	B M 9	B M 10	합계
기계제동	답면제동	4	4						4	4	16
	휠디스크제동			2				2			4
	디스크제동				6	6	6	6			24
와전류제동				1	1	1	1				4
전기제동(회생/저항)	2	2	2					2	2	2	12

확보를 위하여 KTX에서 사용되는 제동시스템에 와전류제동과 휠디스크 제동장치를 추가하여 제동시스템을 구성하였으며, 이들 제동장치들은 표 1에서 보는 바와 같이 각 대차에 설치되어 있다. 동력 대차에는 전기제동과 답면제동장치가, 동력객차 대차에는 전기제동과 휠디스크 제동장치가 객차대차에는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 디스크제동과 와전류 제동장치가 장착되어 있다.

전체 제동력은 앞에서 설명한 각 제동장치들의 특성 및 효율을 고려하여 운행속도에 따른 제동력의 조합, 즉 설정된 제동패턴에 따라 각 제동장치별로 블렌딩(Blending)하여 전체제동력을 확보하도록 구성되어 있다. 전체 제동력은 상용제동과 비상제동의 제동 방법에 따라 차이가 있으며, 상용제동과 비상제동에 따라 속도별로 각 제동장치에 대해 설정된 제동력의 블렌딩 패턴은 Fig. 3과 같이 정의된다.

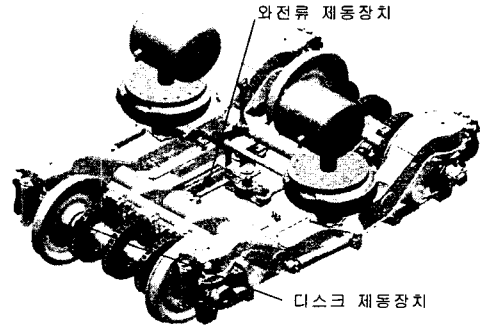


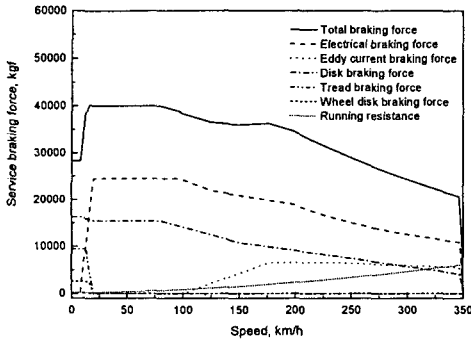
Fig. 2. Articulated trailer bogie(ATB) and braking apparatuses

2.2 제동성능 계측시스템

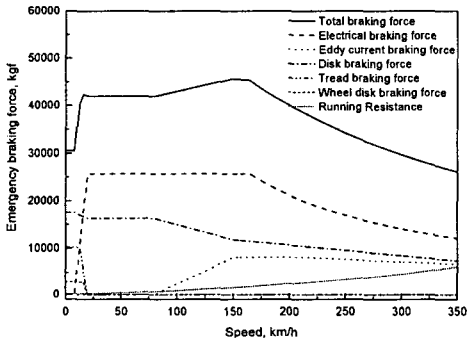
철도차량의 제동성능을 확인하기 위한 시험항목은 제동거리, 제동시간 등 제동과 관련된 기본사항과 제동시스템을 구성하는 각 제동 구성품의 개별성능을 확인하기 위한 사항으로 구성된다. 이들 항목을 종합적으로 확인하기 위하여 개발열차에 설치된 제동시험 계측시스템의 구성도는 Fig. 4와 같다. 제동시스템의 종합적인 확인을 위해 제동 압력, 제동력, 저크, 마찰 계의 온도 등을 측정할 필요가 있으며, 이를 위해 압력계, 스트레인게이지, 가속도계, 온도측정용 비접촉 센서 및 Thermocouple 등의 센서를 개발차량에 설치하였다.

또한, 개발차량에서 제동시스템으로 전달되는 제동 지령신호 및 제동력 크기 신호(PWM % 신호)를 측정하기 위하여 주간제어기(Master Controller)에서 출

력되는 신호를 Cab Cubicle 위치에서 인출하도록 하였다. 제동성능의 평가를 위한 세부 측정항목에 따른 측정 센서의 설치 위치는 Table 2와 같다.



(a)



(b)

Fig. 3. Blending curve for braking, (a) Service braking, (b) Emergency braking

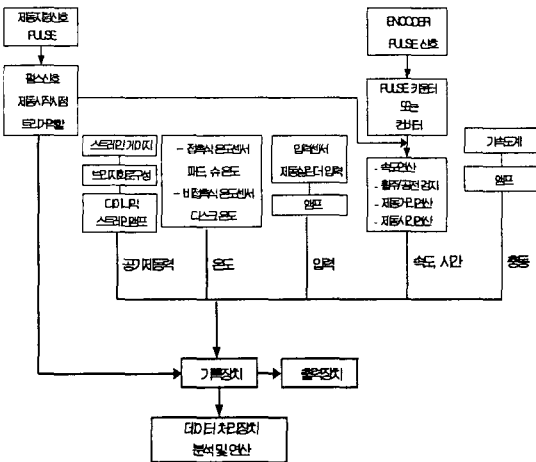


Fig. 4. Measuring configuration for braking performance

제동거리, 제동시간 등은 제동지령신호와 윤축에 설치된 속도센서의 펄스를 이용하여 측정할 수 있으며, 제동장치의 온도 및 가속도 등도 범용 센서를 이용하여 측정이 가능하다. 또한 각 제동장치의 제동력을 측정하기 위하여 별도의 센서를 설치하거나, 제어기에서의 신호를 인출하는 방법을 사용하였다.

대차 및 차체의 진동가속도 측정을 위하여 진동성능 측정을 위하여 설치된 가속도계의 신호를 공유하였으며, 차량의 진행방향 가속도를 측정하기 위하여 차량의 중앙부에 Fig. 5와 같이 가속도계를 설치하였다.

이들 측정신호는 제동성능 측정을 위한 계측모듈들과 연결된다. 이 계측모듈들은 한국형 고속전철 차량의 주요성능을 동시에 측정하기 위한 본선 시운전 시험계측시스템의 일부로 구성되어 있으며, 각 계측 모듈에서 측정된 데이터가 네트워크(Network)를 통해 별도로 구성된 제동성능 모니터링 모듈로 전송되어 시운전시험 중에 온라인으로 계측된 데이터와 이를 이용하여 계산되는 제동거리, 제동시간 등과 함께 온라인으로 모니터링 하도록 구성되었다. Fig. 6은 시운전시험 계측시스템의 설치 모습이며, Fig. 7은 제동성능 모니터링 모듈의 측정화면을 나타내고 있다.

또한, 계측된 데이터는 각 계측 모듈에 저장되며, 이 저장된 데이터는 시운전 시험 후에 시운전시험의 결과분석에 사용된다.

Table. 2 Installation positions of sensors according to measuring items for braking performance

측정항목	설치위치	수량
제동지령	Cab Cubicle	1
제동 PWM	Cab Cubicle	1
차축속도	WS41,42,51,52	4
제동실린더압력	4, 5, 8, 9번 대차	4
압부력	4, 5, 8번 대차	3
제동력	4, 5, 8번 대차	3
디스크 온도	4, 5, 8번 대차	3
패드온도	4, 5, 8번 대차	3
와전류제동력	5번대차	1
전기제동력	모터블록 제어기 신호	6
진행가속도	TP1, TP2 및 TT3의 차체바닥	3

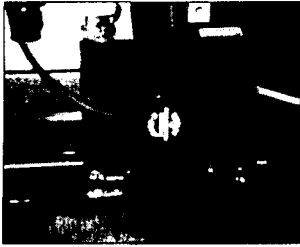


Fig. 5. Installation of Accelerometer



Fig. 6. Measuring modules

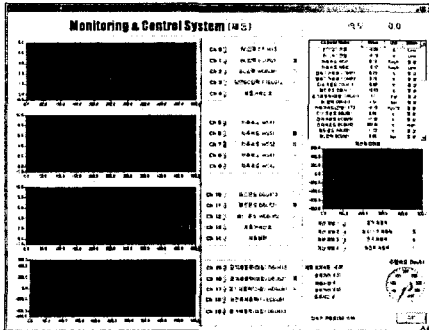


Fig. 7. Display for braking monitoring

3. 시운전 시험을 통한 제동 특성 분석

3.1 활주방지장치의 작동

철도차량을 정지시키기 위한 제동력은 휠과 레일사이의 점착력 한계 이내이어야 한다. 만일 제동력의 크기가 점착력의 최대 크기를 초과할 경우 활주가 발생하며, 이는 제동거리의 확보가 불가능

할 뿐만 아니라 휠과 레일의 손상을 초래하게 되어 운행에 막대한 지장을 초래한다. 그러나, 휠과 레일 사이의 최대 점착력은 레일의 조건 및 수직하중의 크기에 따라 달라지므로 언제든 발생할 가능성을 가지고 있어, 활주방지를 위한 제어 기능과 장치를 장착하고 있다.

HSR 305x의 경우에는 활주 발생여부의 판단을 인접하는 2개의 대차 축, 4개 차축에서의 상대속도를 비교하여 일정한 값 이상이면 활주로 판단하여 활주방지장치를 작동하도록 구성되어 있다.

Fig. 8 및 Fig. 9는 활주가 발생하는 경우 활주방지장치에 의한 제동실린더 압력의 변화를 나타낸 것이다. 시운전시험계측 및 분석 결과 해당차축의 속도가 비교하는 차축 속도와의 차이가 기준치보다 낮을 경우 신속히 제동실린더의 압력을 감소시켜 제동을 완해함을 확인할 수 있다. 또한, 실린더 압력을 증가시킬 때 해당 차축의 속도가 여전히 주변 차축의 속도에 비하여 낮을 경우 즉, 재점착이 이루어지지 않을 경우에는 여전히 활주 상태로 인지하여 활주를 방지하기 위하여 제동실린더 압력을 감압이 이루어지며 활주방지 기능이 정상적으로 이루어짐을 확인하였다.

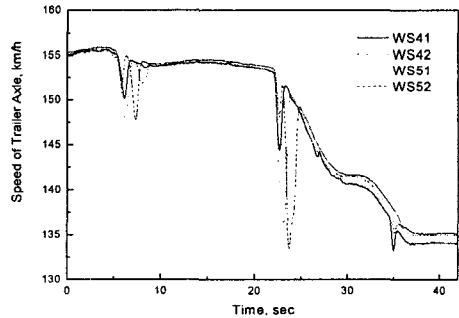


Fig. 8. Speed of Trailer Axle

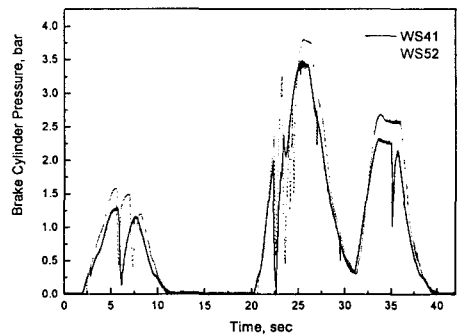


Fig. 9. Brake cylinder Pressure

3.2 제동장치별 제동력 및 감속도

차량 전체의 제동을 담당하고 있는 각 제동장치는 제동장치의 특성에 따라 투입되는 속도 범위 및 크기가 서로 다르므로 이들이 초기 설정된 블랜딩 곡선에 따라 제대로 작동됨을 확인하였다. Fig. 10은 제동이 투입되었을 경우 차량의 속도 및 기관사에 의한 제동 지령값을 나타낸 것으로 정지 시까지 73%의 상용제동을 투입한 시험 결과이다.

기관사의 지령에 의한 각 제동장치의 제동력은 Fig. 11과 같다. 전기제동, 디스크제동, 휠디스크제동 및 답면제동에 대한 제동력의 크기는 각각 13,000 kgf, 10,600 kgf, 5,260 kgf 및 1,600 kgf로서 전체 제동력은 28,860 kgf가 된다. 이는 초기 블랜딩 곡선에서 설정한 전체 제동력의 약 72%로서 제동 지령치와 일치함을 알 수 있다.

Fig. 12는 제동 과정에서 차량의 진행방향 감속도를 나타낸 것으로 정지 시까지 제동력의 크기가 연속적으로 변화하므로 감속도의 변화가 발생하는 것을 알 수 있다. 제동 과정에서 승객의 승차감을 고려하여 일정한 감속도를 유지하고 급격한 감속도의 변화를 피하는 것이 바람직하다. 그러나, 각 제동장치의 투입시점이 다름에 따라 급격한 감속도의 변화를 완전히 피할 수는 없으므로 보다 완만한 변화가 이루어지도록 전체 제동력의 변화가 이루어지도록 하여야 한다. 감속도의 변화 크기는 승차감에 영향을 미칠 정도로 크지는 않으나, 기계 제동이 투입되는 시점에 Over Shoot에 따른 영향이 상대적으로 크게 나타남을 확인 할 수 있으며, 이에 대한 보완이 필요한 것으로 판단된다.

3.3 제동 과정에서의 진동가속도

제동 과정에서 제동력의 투입에 따른 대차 및 차체의 진동가속도에 미치는 영향을 검토하였다. Fig. 13은 정속으로 주행하다가 제동을 체결하여 정지할 때까지의 주행속도이며, Fig. 14 및 Fig. 15는 대차 및 차체에서의 횡방향 진동가속도를 측정 한 결과이다.

대차 및 차체의 진동가속도는 정속 주행 구간에 비하여 상대적으로 큰 값을 나타내고 있으며, 제동이 투입되는 초기에는 짧은 시간동안이긴 하지만 큰 진동가속도를 나타내고 있다. 이는 차량이 정지할 때까지 지속되고 있다. 따라서, 대차 부위에 제동으로 인한 외부력이 작용하는 경우에 대한 동역학적인 관점에서의 검토가 필요한 것으로 판단된다.

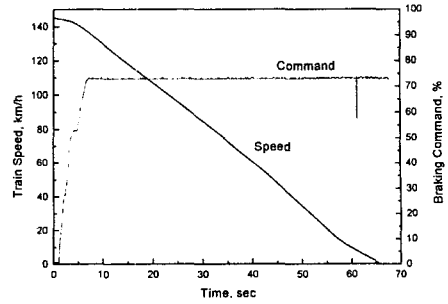


Fig. 10. Speed and Braking Command

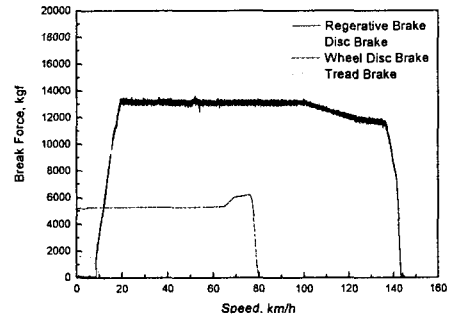


Fig. 11. Braking Force

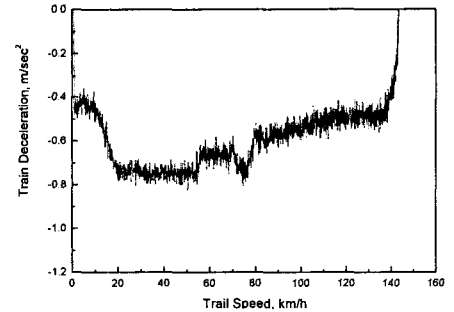


Fig. 12. Train Deceleration

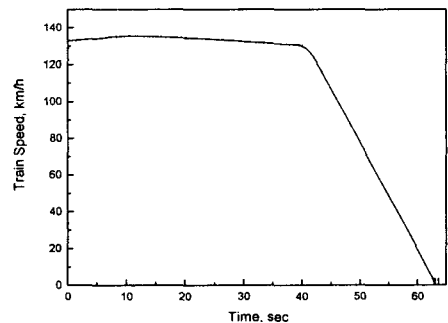


Fig. 13. Train Speed

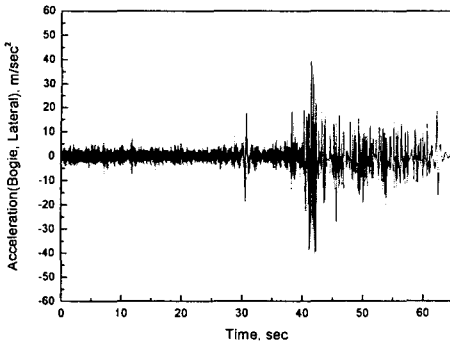


Fig. 14. Lateral acceleration at Bogie

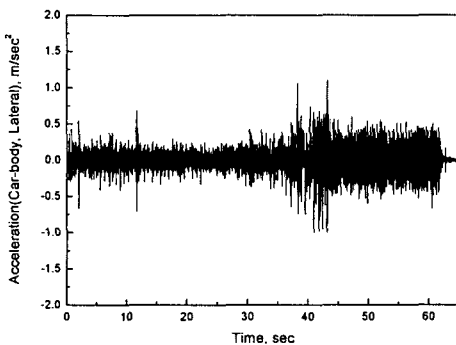


Fig. 15. Lateral acceleration at Car-body

4. 결론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 제동특성과 관련한 성능을 파악하기 위해 설치된 계측시스템을 정상적으로 작동됨을 시운전 시험을 통해 확인할 수 있었다.

(2) 시운전 시험을 통해 활주방지를 위한 제어장치 및 제어 알고리즘이 정상적으로 작동함을 입증하였다.

(3) 제동장치의 제동력을 설치된 센서를 통해 직접 측정하였으며, 측정된 제동력이 블렌딩 곡선에

서 설정된 제동력과 잘 일치함을 알 수 있었다.

또한, 승객의 승차감에 영향을 주는 제동에 따른 감속도를 측정하여 검토한 결과, 큰 문제는 없는 것으로 판단되지만, 기제동이 시작되는 시점에서 감속도의 Over-shoot가 일어나므로 이에 대한 보완이 필요하다.

(4) 제동과정에서 발생한 대차 및 차체의 진동 가속도가 정속 주행구간에 비해 상당히 큼을 실제의 시운전 시험을 통해 확인할 수 있었다.

(5) 향후 보다 다양한 운행속도에서의 제동성능 시험을 통해 보다 신뢰성 있는 계측데이터가 필요하며, 이를 통해 한국형 고속철도 차량에 대한 제동장치의 성능을 종합적으로 평가해야 할 것이다.

후 기

본 내용은 건설교통부에서 시행하는 고속철도기술개발사업의 기술결과임을 밝힌다.

참 고 문 헌

- [1] 이남진 등, “동적 모델에 의한 고속전철의 제동력 시뮬레이션”, 제어·자동화·시스템공학논문지, 8권, 1호, 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 시제차량 기본사양, 한국생산기술연구원, 2001
- [6] G7 고속전철 기술개발사업 Control System Specification, (주)로템, 2001
- [7] 제동시스템 개발, 고속전철기술개발사업 연차보고서, 건교부/산자부/과기부, 1996-2001