

한국형 고속전철의 디스크 제동력 측정 방법에 관한 연구

김석원[†] · 김영국 · 박태원*

A Study on the Measuring Method of Disc Braking Force for HSR 350x

Seog-Won Kim[†], Young-Guk Kim, and Tae-Won Park*

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. Korean high speed train (HSR 350x) has adopted a combined electric and mechanic (friction) braking system. Electric 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, the measuring method that can take a measurement of the braking forces for disc brake and wheel disc brake has been suggested and we have verified that this method is valid through on-line test of HSR 350x.

Key Words : HSR 350x, mechanical brake, electric brake, disc brake, blending curve

1. 서 론

철도차량은 여러 가지 기술의 종합체로서 안전성, 정시성, 신뢰성 등이 요구되는 운송수단이므로 여러 가지의 성능들을 갖고 있다. 특히, 제동 성능은 다른 성능과 비교하여 인적, 물적인 손상을 초래할 수 있는 중요한 성능이라 할 수 있다. 이러한 제동 성능 중에서 가장 중요한 항목은 주행중인 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 필요하다¹⁻³⁾.

본 내용에서는 국가에서 전략적으로 추진한 선도기술개발(G7)사업 중의 하나인 고속전철기술개발사업에서 개발된 최고운행속도 350 km/h의 한국형 고속전철 시스템에 대하여 본선시운전 시험항목중의 하나인 제동성능시험 수행을 위한 전반적인 시험계측 방법, 특히 기계제동력 측정을 위하여 구성한 계측기, 사용센서 및 측정 결과에 대하여 기술한다.

지금까지는 철도의 제동장치에 대한 제동력 측정 방

법으로 제동력을 직접적으로 측정하는 방법을 사용하고 이를 이용하여 제동력을 간접적으로 계산하는 방법을 사용하여 왔다. 이 간접적인 방법으로 계산된 제동력은 사용된 변수들의 정확도에 따라 결정되기 때문에 철도에 작용하는 실제의 제동력이라고 보장할 수가 없다. 본 연구에서는 간접적인 제동력 측정방법의 단점을 극복하기 위해 G7 개발열차가 본선 시운전시험 과정에서 제동 중일 때 작용하는 압부력과 그 때의 제동력을 직접적인 방법으로 동시에 측정하는 방법론을 제시하였고, 측정된 압부력과 제동력을 이용하여 제동 과정에서 발생하는 패드와 제동디스크 사이의 마찰계수 변화의 경향을 파악하였다.

2. 제동시스템 및 시험계측 시스템 구성

2.1. 제동시스템 구성

G7 고속전철 시제열차(HSR 350x)는 그림 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

한국철도기술연구원(Korea Railroad Research Institute)
*이주대학교 기계공학과(Ajou University Mechanical Department)

[†]Corresponding author: swkim@krii.re.kr

(Received : March 15, 2004, Accepted : April 5, 2004)

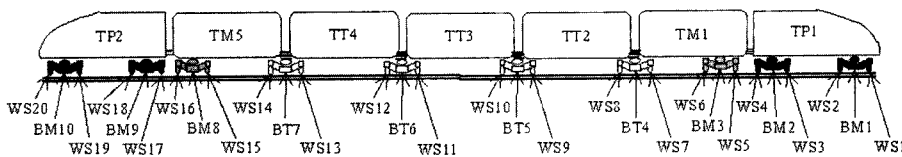


그림 1. 한국형 고속철도차량(HSR 350x) 편성배치
 Fig. 1. Configuration of Korean high speed train(HSR 350x).

운속에 의해 지지되고 있다^{4,5)}.
 철도차량의 제동시스템은 전기제동장치와 기계제동장치로 구분되고, 전기제동에는 회생제동, 저항제동과 외전류 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 있다. HSR 350x는 운행속도가 350 km/h로 개발되었기 때문에 KTX에서 사용되는 제동시스템에 외전류 제동과 휠디스크 제동장치를 추가하여 제동시스템을 구성하였으며, 이들 제동장치들은 표 1에서 보는 바와 같이 각 대차에 설치되어 있다. 동력 대차에는 전기제동과 답면제동장치가, 동력 객차 대차에는 전기제동과 휠디스크 제동장치가 객차 대차에는 그림 2에서 보는 바와 같이 디스크제동과 외전류 제동장치가 장착되어 있다.

운행중인 열차가 원하는 위치에 정지하기 위해 필요한 전체 제동력은 앞에서 설명한 각 제동장치들의 운행속도에 따른 제동력의 조합, 즉 설정된 제동패턴에

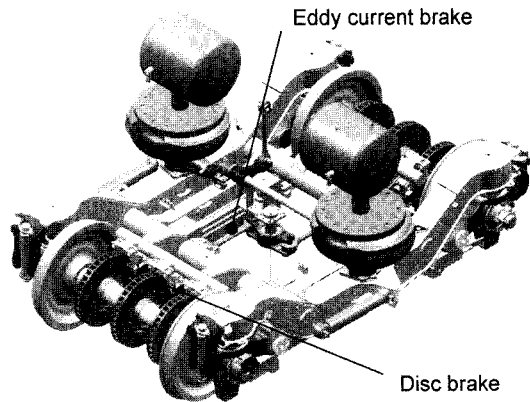


그림 2. 객차대차와 제동장치
 Fig. 2. Articulated trailer bogie(ATB) and braking apparatuses.

따라 각 제동장치별로 블렌딩(blending)하여 전체제동력을 확보하도록 구성되어 있다. 열차의 제동을 위해 필요한 전체 제동력은 상용제동과 비상제동의 제동방법에 따라 차이가 있으며, 상용제동과 비상제동에 따라 속도별로 각 제동장치에 대해 설정된 제동력의 제동 블렌딩 패턴은 그림 3과 같이 정의된다. 그림 3에서 보는 바와 같이 각 제동장치가 작동되는 열차속도 범위가 차이가 있으나, 모든 열차속도에서 필요한 제동력을 확보하도록 서로 연계되어 있다. 예를 들면, 전체 제동력의 큰 부분을 차지하는 전기제동은 약 20 km/h 이하에서는 특성상 제동력을 발휘할 수 없기 때문에 저

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 quantity
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 (regenerating/rheostatic)		2	2	2					2	2	2	12

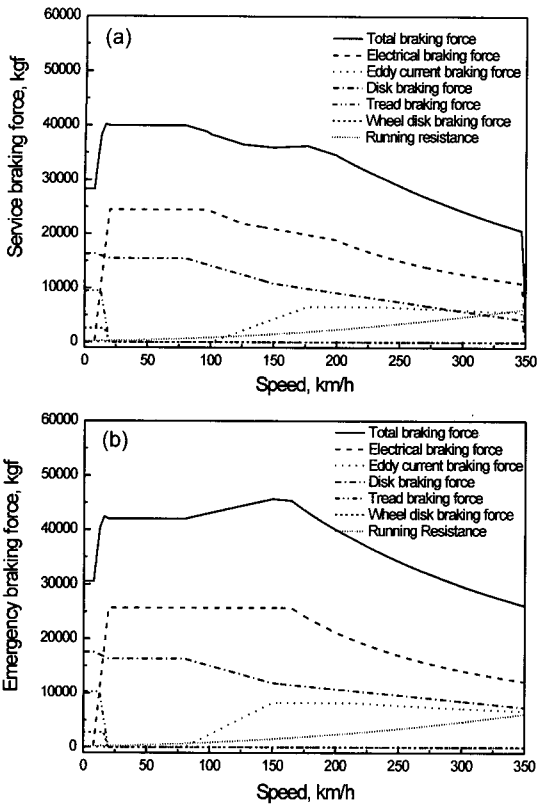


그림 3. 제동 블렌딩 곡선; (a) 상용제동, (b) 비상제동
 Fig. 3. Blending curve for braking; (a) service braking and (b) emergency braking.

속에서는 휠디스크제동과 답면제동을 사용하여 부족한 제동력을 보완하도록 되어 있다. 또한, 와전류제동은 저속에서는 제동력의 크기가 급격히 떨어져 제동효율이 나빠기 때문에 고속에서만 작동되도록 설계되어 있다.

2.2. 제동성능 계측시스템 구성

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 측정시스템의 구성도는 그림 4와 같다. 그림 4에서 보는 바와 같이 제동시스템의 종합적인 성능을 확인하기 위해 제동 압력, 제동력, 저크, 마찰재의 온도 등을 측정하기 위한 압력계, 스트레인게이지, 가속도계, 온도측정용 비접촉센서 및 열전대(thermocouple) 등의 센서를 개발차량에 설치하였다. 또한, 개발차량에서 제동시스템으로 전달되는 제동지령신호 및 제동력 크기 신호(PWM % 신호)를 측정하기 위한 센서도 설치하였다. 제동성능의 평가를 위한 세부 측정항목에 따른 측정 센서의 설치 위치는 표 2와 같다. 제동거리, 제동시간 등은 제동지령신호와 윤축에 설치된 속도센서의 펄스를 이용하여 측정할 수 있으며, 제동장치의 온도 및 가속도 등도 범용 센서를 이용하여 측정이 가능하다. 또한 필요한 전체 제동력을 직접적으로 측정하는 것이 어렵기 때문에 현재는 열차의 주행속도 곡선 즉, 제동거리와

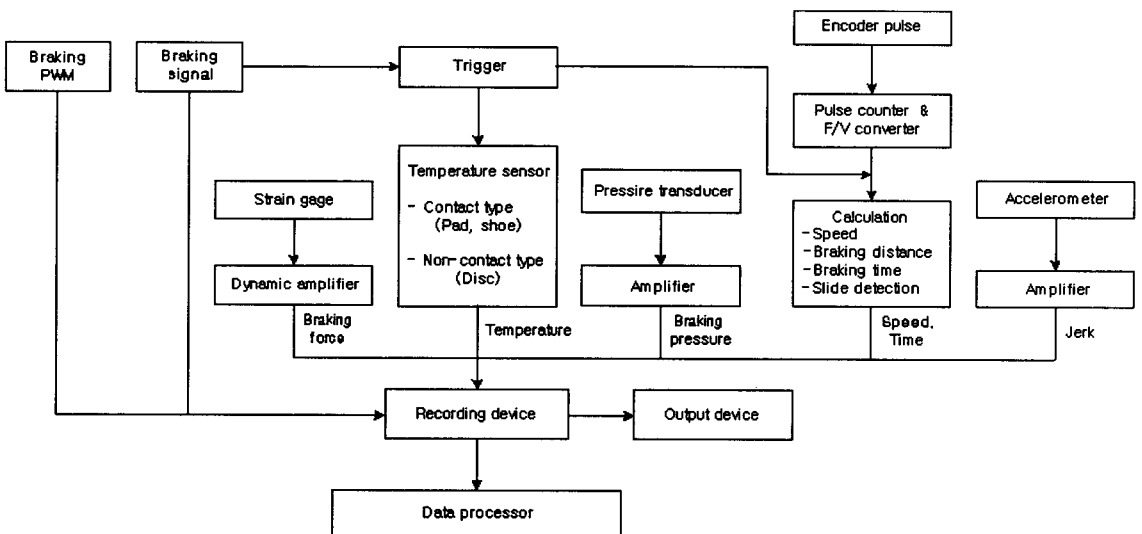


그림 4. 제동성능 측정 구성도
 Fig. 4. Measuring configuration for braking performance.

표 2. 제동성능 측정항목에 따른 센서설치위치

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

Measuring items	Sensor position	Quantity
Braking signal	Cab Cubicle	1
Braking PWM	Cab Cubicle	1
Vehicle speed	WS41,42,51,52	4
Pressure of braking cylinder	BT4, BT5, BM8, BM9	4
Clapping force	BT4, BT5, BM8	3
Braking force	BT4, BT5, BM8	3
Temp. of disc	BT4, BT5, BM8	3
Temp. of pad	BT4, BT5, BM8	3
Braking force for eddy current brake	BT4, BT5, BM8	1
Logitudinal acceleration	Floor of TP1, TP2 and TT3	3

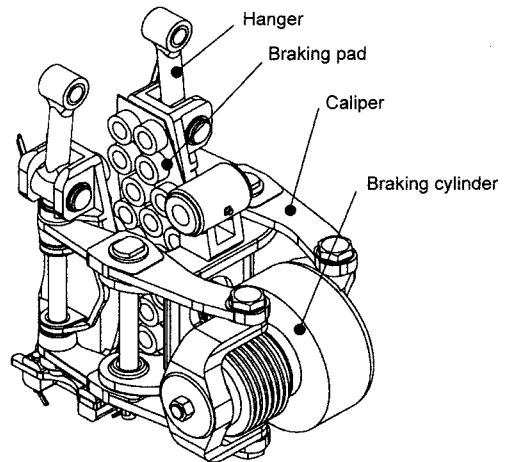


그림 5. 디스크 제동장치

Fig. 5. Disc braking apparatus.

열차속도를 이용하여 추정된 것을 사용하고 있으나 정확한 제동성능의 평가를 위해서는 직접 센서를 사용하여 각 제동장치의 개별 제동력을 측정하여야 한다.

앞에서 설명한 바와 같이 HSR 350x는 전기제동, 와전류 제동 및 기계제동의 3가지 제동시스템으로 구성되어 있어 이들 각각에 대한 제동력을 별도로 측정하여야 할 필요성이 있다. 전기제동력은 전압, 전류를 이용하는 방법과 동력전달축에 스트레인이게지를 설치하여 토오크를 측정하였으며, 와전류 제동력은 와전류 제동 프레임에 작용하는 흡인력과 제동력을 측정하도록 계측장치를 구성하였다. 본 연구에서는 디스크제동과 휠디스크 제동에 대한 기계제동력 측정방법이 주목적이므로 다른 제동장치의 제동력 측정방법에 대한 설명은 제외시켰다.

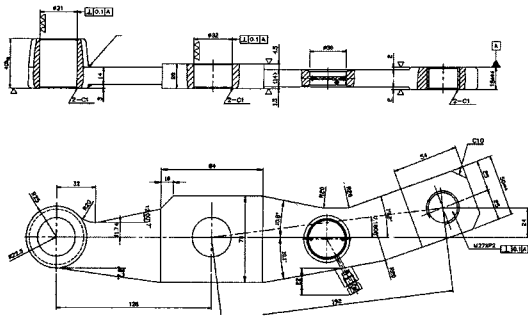
2.3. 기계 제동력 측정 센서 및 계측시스템

지금까지의 기계 제동력을 측정하는 방법은 주행중인 열차를 기계제동만으로 정지시킬 때의 제동거리를 측정하여 제동력을 추정하거나 제동실린더의 압력을 측정하여 압부력(실린더 작용력)만을 계산하고 이 압부력과 시험실에서 측정된 마찰계수를 이용하여 제동력을 산정하였다. 그림 5는 HSR 350x의 디스크 제동장치를 나타내며, 디스크제동과 휠디스크 제동장치에서 발생하는 제동력을 열차가 주행하면서 직접적으로 측정하기 위해 캘리퍼와 행거에 작용하는 하중을 직접 측정하도록 별도의 센서를 제작하여 개발열차에 설치하고 압부력과 제동력을 직접 측정하였다. 제동력과 압

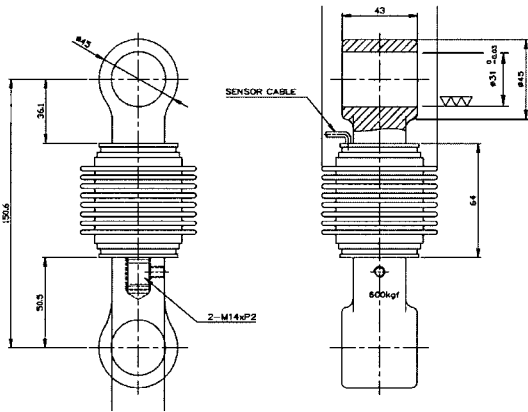
부력을 측정하기 위한 센서를 설치하기 위해 그림 6과 같이 별도의 캘리퍼와 행거를 제작하였으며, 이 캘리퍼와 행거에 스트레인이게지를 설치하여 작용하는 하중을 측정하도록 구성하였다. 그림 6은 별도의 캘리퍼와 행거의 제작도면 및 실제 개발열차에 설치된 모습이다.

기계제동력을 측정하기 위한 별도의 캘리퍼와 행거들은 표 2에 나타낸 바와 같이 4번, 5번 및 8번 대차에 설치되었으며, 4번과 5번 대차에서는 디스크에 대한 압부력과 제동력을, 8번 대차에서는 휠디스크에 대한 압부력과 제동력을 측정하는 데에 사용되었다. 센서는 그림 7과 같이 6-와이어 폴브리지 스트레인 게이지를 설치하였으며, 온도, 먼지, 습기 등의 외부 환경에 보호하기 위하여 금속판 및 금속 주름판으로 밀봉을 하였다. 실제 차량에 설치하기 전에 하중 방향에 따라 단계적인 정적 하중을 가하여 보정을 하였으며, 그림 8은 그 보정 결과 예로 5번대차에 설치된 디스크 제동장치의 캘리퍼와 행거에 대한 것으로 4번과 8번 대차에 설치된 캘리퍼와 행거도 거의 유사한 형태의 보정결과를 갖기 때문에 본 논문에서는 설명을 생략한다. 캘리퍼와 행거에 설치된 센서는 제동성능 측정을 위한 계측모듈들과 연결된다. 이 계측모듈들은 한국형 고속전철 본선 시운전시험 계측시스템의 일부로 구성되어 있으며, 각 계측 모듈에서 측정된 데이터가 네트워크(network)를 통해 별도로 구성된 제동성능 모니터링 모듈로 전송되어 시운전시험 중에 온라인으로 계측된 데이터와 이를 이용해 계산된 제동초속도, 제동거리, 제동시간 등과 함께 온라인으로 모니터링 하도록 구성되었다.

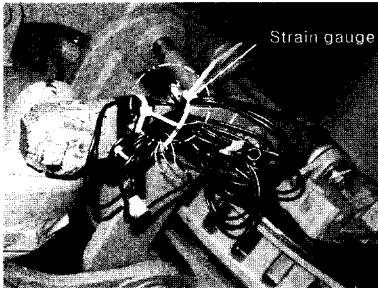
그림 9는 시운전시험 계측시스템의 설치 모습이며, 그림 10은 제동성능 모니터링 모듈의 측정화면을 나타



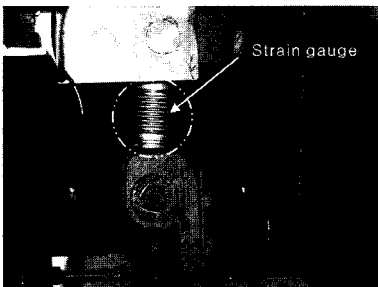
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 6. 제작도면 및 차량 설치모습; (a)(c) 캘리퍼, (b)(d) 행거
Fig. 6. Drawings and installation view; (a)(b) caliper and (c)(d) hanger.

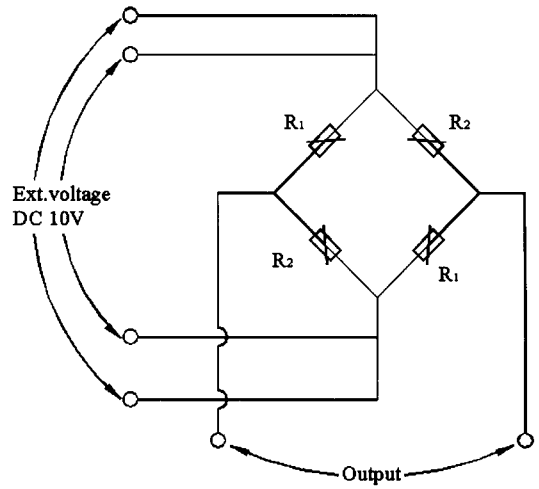
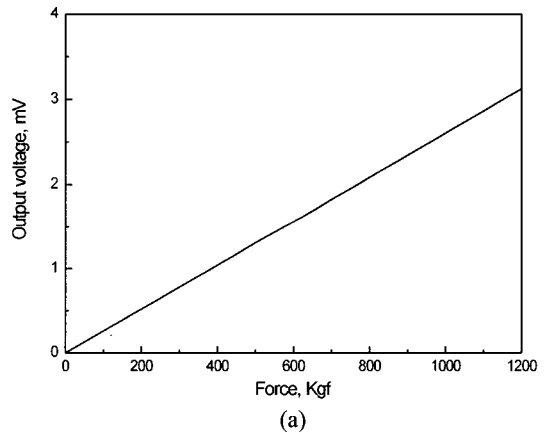
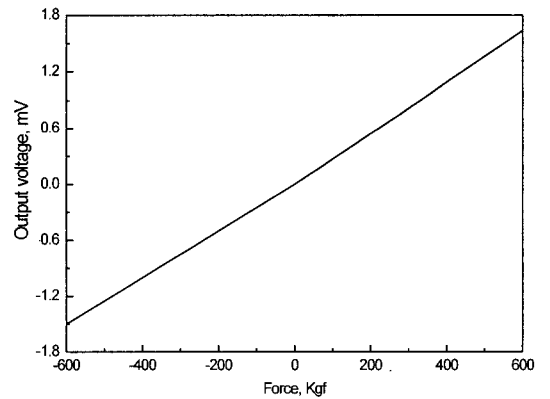


그림 7. 6-와이어 풀브리지 스트레인 게이지
Fig. 7. 6-wire full bridge strain gauge.



(a)



(b)

그림 8. 하중 - 출력전압 관계; (a) 캘리퍼, (b) 행거
Fig. 8. Relations force and output voltage (a) for caliper and (b) for hanger.

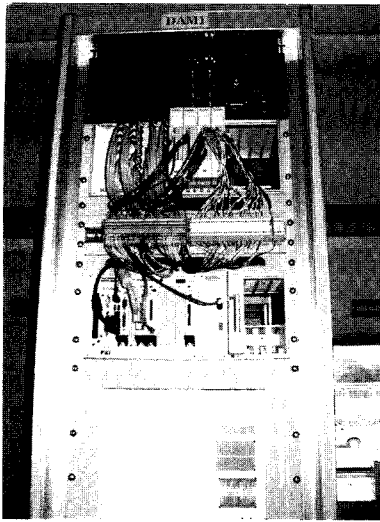


그림 9. 계측 모듈
Fig. 9. Measuring modules.

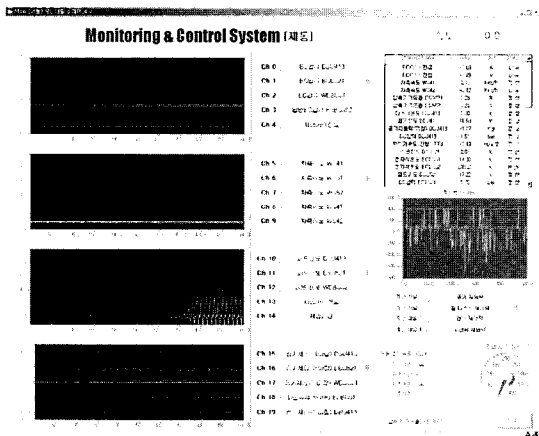


그림 10. 제동 모니터링 화면
Fig. 10. Display for braking monitoring.

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

3. 기계제동력 계측 결과

한국형 고속전철에 대한 본선 시운전시험은 최고속도 305 km/h까지 진행된 상태로 별도의 캘리퍼와 행거를 장착된 스트레인을 이용한 디스크 제동장치의 기계제동력을 문제없이 측정할 수 있었다.

기계제동력 특성을 검증하기 위하여 170 km/h 속도로 주행하던 고속철도 차량이 정지할 때까지의 제동실

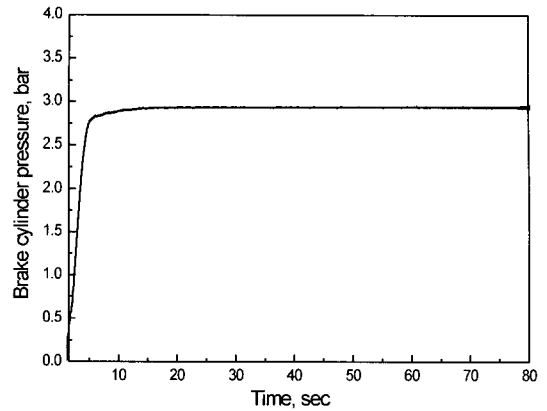


그림 11. 제동실린더의 제동압력
Fig. 11. Braking pressure of braking cylinder.

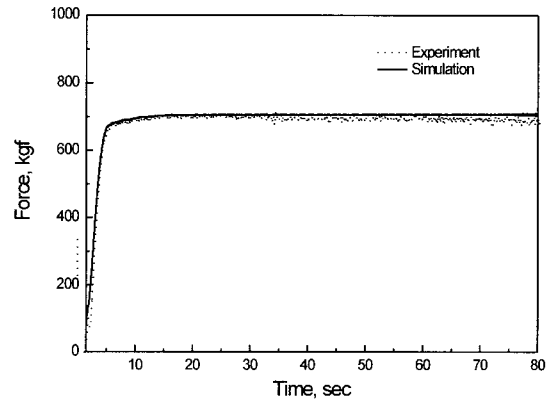


그림 12. 캘리퍼에 작용하는 압부력
Fig. 12. Clapping force applied to caliper.

린더 압력, 캘리퍼 압부력 및 디스크 제동력을 측정하였다. 그림 11은 170 km/h 속도에서 정지할 때까지의 제동실린더 압력을 나타낸 것으로 2.8 bar의 압력이 작용하고 있음을 알 수 있다. 그림 12는 캘리퍼의 걸리는 압부력을 나타낸 것으로 실선은 그림 11에 나타낸 제동실린더의 제동압력을 사용하여 계산된 압부력의 이론치이며, 점선은 별도로 설치된 캘리퍼를 통해 직접 측정된 압부력의 측정치이다. 그림 12에서 보는 바와 같이 캘리퍼에 걸리는 압부력의 이론치와 측정치가 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 13은 1개 디스크의 한쪽 면에 작용하는 제동력을 나타낸 것이며, 이 제동력은 270~400 kgf 범위로 열차의 주행속도가 줄어들에 따라 제동력이 증가한다.

이는 동일한 압부력이 작용해도 낮은 주행속도에서 마찰계수가 크기 때문이다. 실제 고속철도 차량의 주행과정에서 측정된 압부력과 제동력을 이용하여 계산된

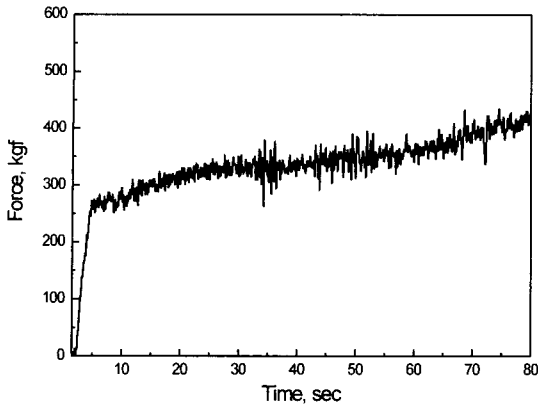


그림 13. 디스크 1개당 작용 제동력
Fig. 13. Braking force per a side of disk.

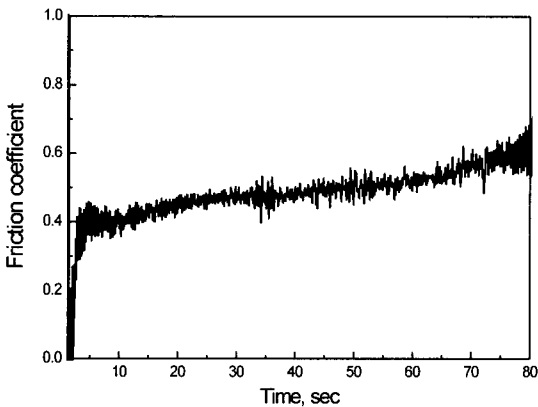


그림 14. 실제 마찰계수
Fig. 14. Actual friction coefficient.

마찰계수 곡선이 그림 14이다. 170 km/h 속도에서는 마찰계수가 약 0.4 정도이며, 주행속도가 낮아짐에 따라 증가하여 고속철도 차량의 정지시에는 약 0.6까지 증가함을 알 수 있다. 이는 실험실에서 다이노모 시험기를 이용하여 측정된 160 km/h 속도에서의 마찰계수 0.39~0.4와 거의 일치한다^[8]. 이는 별도의 캘리퍼와 행거에 설치된 스트레인 게이지를 이용하여 디스크 제동 장치의 제동력을 측정하는 방법이 고속철도 차량이 주행시 제동력 측정에 적용되어도 좋다는 사실을 입증하는 것이다.

4. 결 론

한국형 고속전철의 제동시스템에 대한 성능을 확인하기 위하여 개발열차에 각종 센서와 계측시스템을 설치하여 제동거리, 제동시간 등 제동성능에 대한 시험을

경부고속철도 시운전시험 구간에서 수행중이다.

제동성능의 주요성능인 기계제동력을 고속차량 주행 중에 온라인으로 직접 측정하기 위하여 별도로 설계된 캘리퍼와 행거에 스트레인게이지를 부착한 별도의 센서를 제작하여 차량에 설치하여 작용하는 압부력과 제동력을 측정하였다. 측정된 캘리퍼에 작용하는 압부력은 제동실린더에 작용하는 압력에 의한 계산된 이론치와 거의 일치하며 압력변화에 따른 추종성이 양호함을 알 수 있었다. 또한, 이들로부터 측정된 압부력과 제동력을 이용하여 제동 디스크와 패드 사이의 마찰계수를 계산하였다. 이 계산된 마찰계수는 실험실에서 다이노모 시험기를 통해 측정된 마찰계수와 비교하여 차이가 없음을 알 수 있었다. 따라서, 별도로 스트레인게이지가 장착된 캘리퍼와 행거를 이용하여 디스크 제동 장치의 기계 제동력을 직접적으로 측정하는 것이 가능하게 되었으며, 디스크와 패드 사이에 작용하는 마찰계수도 고속철도 차량의 주행 상태에서 측정된 압부력과 제동력으로 실제 주행상태에서의 마찰계수를 확인할 수 있게 되었다.

후 기

본 내용은 건설교통부에서 시행하는 고속철도기술개발사업의 기술결과임을 밝힌다.

참고 문헌

- [1] 이남진, 강철구, “동적 모델에 의한 고속전철의 제동력 시뮬레이션”, *제어·자동화·시스템공학논문집*, 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 시제차량 기본사양, 한국생산기술연구원, 2001.
- [6] G7 고속전철 기술개발사업 Control System Specification, (주)로템, 2001.
- [7] 제동시스템 개발, 고속전철기술개발사업 연차보고서, 건교부/산자부/과기부, 1996-2001.
- [8] 김기열, 조정환, “고속 전철용 소결 마찰재료 개발”, *추계학술대회 논문집*, 한국소음진동공학회, pp. 779-786, 2002.



김 석 원

- 1964년 12월 10일생
- 1987년 2월 서울대학교 조선공학과 졸업 (학사)
- 1989년 2월 동 대학원 조선공학과 석사학위 취득(석사)
- 1987년 2월 ~ 1994년 2월 대우조선 선임연구원
- 1994년 3월 ~ 1997년 2월 삼성중공업 선임연구원
- 1997년 3월 ~ 현재 한국철도기술연구원 선임연구원
- 주관심분야 : 철도차량 제동시스템, 철도차량 시험 평가, 각종 센서 및 인터페이스



김 영 국

- 1961년 3월 23일생
- 1984년 2월 아주대학교 기계공학과 졸업 (학사)
- 1986년 8월 한국과학기술원 생산공학과 석사학위 취득(석사)
- 2003년 8월 아주대학교 기계공학과 대학원 박사학위 취득(박사)
- 1986년 6월 ~ 1996년 3월 대우중공업 중앙연구소 선임연구원
- 1996년 4월 ~ 1997년 12월 한국고속철도건설공단 차량연구실 선임연구원
- 1997년 12월 ~ 현재 한국철도기술연구원 책임연구원
- 주관심분야 : 철도차량 동역학, 철도차량 승차감, 철도차량 시험평가, 각종 센서 및 인터페이스



박 태 원

- 1955년 5월 1일생
- 1977년 2월 서울대학교 기계설계학과 졸업 (학사)
- 1982년 2월 University of Iowa 기계공학과 석사학위 취득(석사)
- 1985년 2월 동대학원 기계공학과 박사학위 취득(박사) 졸업
- 1983년 3월 ~ 1990년 2월 Computer Aided Design Software Inc. Director
- 1986년 1월 ~ 1987년 7월 University of Iowa Guest lecturer
- 1990년 3월 ~ 현재 아주대학교 기계 및 산업공학부 교수