

## 한국형고속열차의 디스크-패드 마찰계수 측정에 관한 연구

### A Study on the Measurement of Disc-Pad Friction Coefficient for HSR-350x

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

Seog-Won Kim · Young-Guk Kim · Chan-Kyeong Park · 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 the train safely at its pre-decided position, it is necessary to combine the various brakes properly. The Korean high speed train (HSR-350x) has adopted a combined electrical and mechanical (friction) braking system. In this study, the measuring method that can obtain the disc braking forces and friction coefficient between disc and pad during on-line test of HSR-350x has been suggested and verified through the comparison of the results obtained from this method and those of the results of the dynamo-tests.

**Keywords** : HSR-350x, Disc brake, Friction coefficient, Braking force, Clapping force

#### 1. 서론

철도차량은 여러 가지 기술의 종합체로서 안전성, 정시성, 신뢰성 등이 요구되는 운송수단으로 고속화의 요구에 부응하여 국내에서도 2004년 4월 KTX의 상업운행이 시작됨에 따라 프랑스, 독일, 일본, 스페인에 이어 세계 5번째 고속철도 운행국가가 되었다. 철도차량의 운행속도가 증가함에 따라 주어진 거리 이내에서 차량을 안전하게 정지시키거나 원하는 속도로 감속하여야 하는 제동성능은 매우 중요한 항목 중의 하나이며, 주행 중인 열차의 충분한 제동력을 확보하기 위하여 제동시스템의 설계에 대한 성능검증이 필요하다[1-3].

본 논문에서는 국가에서 전략적으로 추진한 선도기술개발(G7)사업 중의 하나인 고속선철기술개발사업에서 개발된 최고운행속도 350km/h의 한국형고속열차에 대하여 본선 시운전 시험항목 중의 하나인 제동성능시험 수행 과정에서 기계제동력을 결정하는 디스크와 패드사이의 마찰계수를 측정하기 위하여 사용한 계측시스템, 사용 센서 및 측정 결과에 대하여 연구하였다.

종래에 철도의 제동장치에 대한 제동력 측정 방법으로 제동력을 직접적으로 측정하는 방법을 사용하는 것이 아니라 제동시간, 제동거리, 속도 등을 측정하고 이를 이용하여 제동력을 간접적으로 계산하는 방법을 사용하여 왔으며[4], 기계제동력의 경우에는 다이내모시험을 통한 마찰계수의 특성을 구하고[5] 이를 단순히 제동실린더의 압력에 따른 패드와 디스크 사이의 압부력을 곱한 값으로 제동력을 추정하였다. 이는 열차의 실제 주행환경에 따른 영향을 충분히 반영하지 못하므로 실제 차량에서의 정확한 제동력을 보장하기는 힘들다.

따라서 본 연구에서는 간접적인 제동력의 측정방법을 극복하고자 한국형고속열차의 본선 시운전 시험 과정에서 제동 중에 작용하는 압부력과 캘리퍼와 행거 등에 작용하는 하중을 직접 측정하여 철도 차량의 실제 운용 상황에서의 기계제동장치에 의한 제동력과 디스크와 패드 사이의 마찰계수를 구하였다.

#### 2. 제동시스템 및 시험계측시스템 구성

##### 2.1 제동시스템 구성

한국형고속열차 시제열차(HSR-350x)의 편성은 Fig. 1에 서와 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

<sup>†</sup> 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단  
E-mail : swkim@krii.re.kr

TEL : (031)460-5611 FAX : (031)460-5649

\* 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단

\*\* 아주대학교, 기계공학과

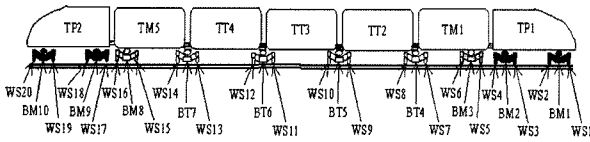


Fig. 1. Configuration of Korean high speed train(HSR 350x)

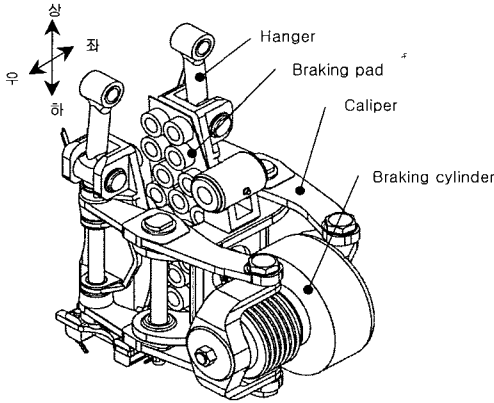


Fig. 2. Disc braking assembly

4대(BM1, BM2, BM9, BM10), 동력객차 대차 2대(BM3, BM8), 객차대차 4대(BT4~BT7)로 총 10대이며, 이들은 각각 2개의 윤축에 의해 지지되고 있다[6,7]. 각 대차에는 Table 1과 같이 전기제동장치(회생제동, 저항제동), 와전류제동장치 및 기계제동장치(답면, 휠디스크 및 디스크) 등이 동력대차(BM)와 객차대차(BT)에 따라 설치되어 있으며, 전체 제동력은 각 제동장치들이 운행 속도에 따른 제동력의 조합, 즉 설정된 제동패턴(상용제동 혹은 비상제동)에 따라 각 제동장치 별로 블렌딩(blending)을 하면서 필요한 제동력을 발휘하도록 구성되어 있다[4,7,8].

2.2 기계제동력 측정 센서 및 계측시스템

지금까지의 기계제동력을 측정하는 방법은 주행 중인 열차를 기계제동만을 체결하여 정지 시까지의 제동거리를 측정하여 제동력을 환산하거나 제동실린더의 압력을 측정하여 압부력(실린더 작용력)만을 계산하고 이 압부력과 다이내모 시험기 등에서 측정된 마찰계수를 이용하여 제동력을 산정하였다[4,5]. 이는 실제 패드에 작용하는 압부력의 손실 및 운용 환경 등 실제 열차에서의 상황과는 다르기 때문에 이에 대한 정확한 측정을 수행할 필요가 있다. 이를 위하여 한국형고속열차의 시운전 과정에서 디스크 제동장치에 작용하는 압부력과 마찰력을 측정하여 실제 열차가 운행하는 과정에서의 디스크와 패드 사이의 마찰계수를 구하였다. Fig. 2는 디스크 제동장치의 제동실린더 및 패드 어셈블리를 나타내며 기관사에 의

Table. 1. Braking apparatuses per each bogie

No. of bogie	BM	BM	BM	BT	BT	BT	BT	BM	BM	BM	Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
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	12

Table 2. Sensor installation positions and measuring forces

Installation position	Measuring strain	Measuring force	Sensor type	
Caliper	Left Upper	Bending	Friction	Strain gauge(Half Bridge)
		Shear	Clamping	Strain gauge(Half Bridge)
	Left Lower	Bending	Friction	Strain gauge(Half Bridge)
		Shear	Clamping	Sensorized caliper (Full Bridge)
	Right Upper	Bending	Friction	Strain gauge(Half Bridge)
		Shear	Clamping	Strain gauge(Half Bridge)
Right Lower	Bending	Friction	Strain gauge(Half Bridge)	
	Shear	Clamping	Strain gauge(Half Bridge)	
Hanger	Left	Axial	Friction	Sensorized hanger (Full Bridge)
		Axial	Friction	Strain gauge(Half Bridge)

하여 제동이 인가되면 제동실린더의 압력이 캘리퍼를 통하여 전달되어 패드에 압부력으로 작용하며 행거가 실제의 마찰력(제동력)을 부담하도록 되어있다.

열차가 주행하는 상태에서 디스크 제동장치에서 발생하는 제동력을 직접적으로 측정하기 위해 Fig. 2의 캘리퍼와 행거에 Table 2와 같이 별도의 센서를 장착하여 제작한 캘리퍼와 행거 및 캘리퍼와 행거 부위에 스트레인게이지를 설치하고 압부력과 마찰력을 직접 측정하였으며, 샘플링 주파수는 500 Hz로 하였다.

센서화하여 제작된 캘리퍼와 행거 및 스트레인게이지를 차량에 설치한 모습은 Fig. 3과 같다. 스트레인게이지는 제동실린더에서 캘리퍼를 통해 패드에 작용하는 압부력을 구하기 위하여 캘리퍼에서 전달력을 측정하도록 설치하였으며, 행거를 통해 전달되는 마찰력은 행거에서 축하중을 측정하도록 설치하였다. 또한 캘리퍼를 통하여 전달되는 마찰력은 캘리퍼에 설치된 스트레인게이지를 통하여 굽힘하중을 측정하도록 하였다.

별도의 센서화된 캘리퍼와 행거에는 6-와이어 풀브리지 스트레인게이지를 설치하였으며, 온도, 먼지, 습기 등의 외부 환

정에 대한 보호를 위하여 금속판 및 금속 주름판으로 밀봉을 하였다. 이들은 차량에 설치하기 전에 하중 방향에 따라 단계

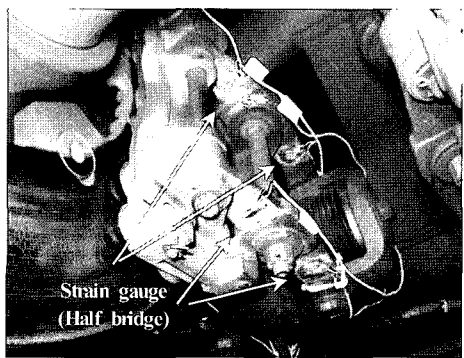
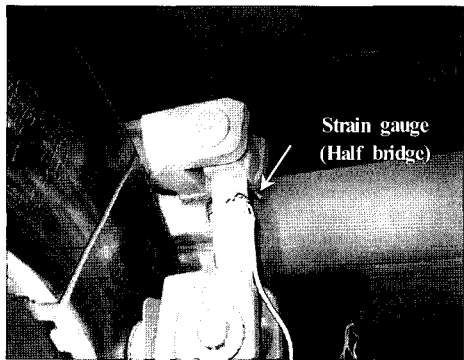
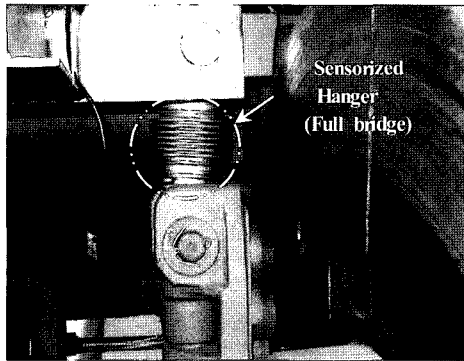


Fig. 3. Sensors and installation views

적인 정적 하중을 가하여 보정(Calibration)을 하였으며[8], 별도 제작된 센서 이외의 스트레인게이지는 캘리퍼와 행거가 차량에 설치된 이후에 하프 브리지로 스트레인게이지를 설치하여 Fig. 4와 같은 별도의 방법을 통해 차량에서 1차 보정하였고, 보다 정확한 보정을 위하여 캘리퍼와 행거에 대한 구조 해석을 수행하여 Fig. 5와 같이 스트레인게이지 설치 부위에서의 하중에 대한 스트레인 값을 구하여 최종 보정을 수행하였으며, 최종 보정 결과는 Fig. 6과 같다.

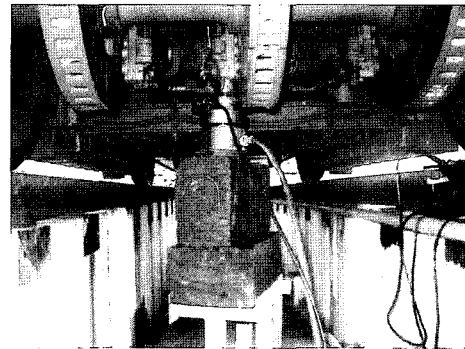


Fig. 4. Strain gauge calibration view

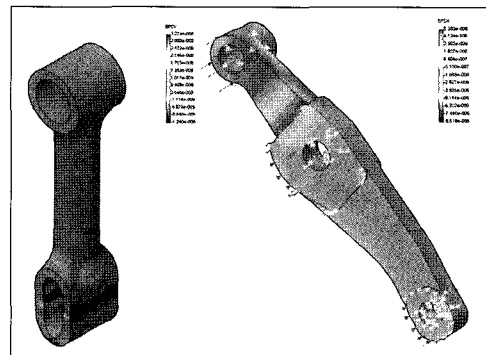


Fig. 5. Strain analysis result

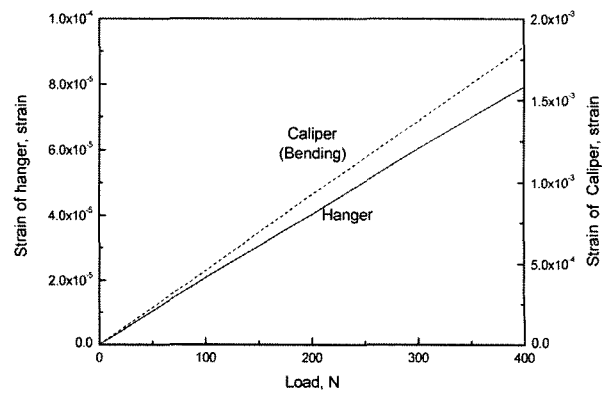


Fig. 6. Relations between load and strain

### 3. 실험 결과 및 고찰

한국형 고속열차의 본선 시운전 시험은 KTX 영업선로에서 영업열차 사이에서 수행되고 있어 영업열차의 지장이 없는 범위에서 각종 시험을 수행하고 있다. 따라서 마찰계수 측정을 위한 제동시험은 최고속도에서 정지시까지 수행이 어렵기 때문에 250km/h 이하의 속도에서 정지까지 몇 개의 속도 대역으로 구분하여 수행하였다.

Fig. 7은 200km/h에서 175km/h까지 제동이 작용하는 경우에 행거에 작용하는 축하중과 캘리퍼에 작용하는 굽힘하중을 측정된 것으로 이들 하중의 총합이 디스크 제동장치의 제동력으로 작용하게 된다. Fig. 7에서와 같이 캘리퍼를 통하여 전달되는 제동력은 행거를 통하여 전달되는 제동력보다 그 크기가 매우 작으므로 대부분의 제동력은 행거를 통하여 전달됨을 알 수 있다. 따라서 디스크 제동장치에서 제동력을 측정할 경우 행거를 통하여 전달되는 축하중만 고려해도 충분한 것으로 판단되며, 좌우 행거에 작용하는 제동력의 차이가 발생하고 있는데 이는 제동실린더 및 패드 어셈블리가 연결 핀 사이의 간극, 패드의 불균일 접촉 등으로 인한 디스크제동장치 어셈블리의 불평형이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 8은 제동실린더의 압력에 따른 패드에 작용하는 압부력을 캘리퍼의 전단력으로 측정된 결과(실선)와 제동실린더 압력을 사용하여 계산한 이론치(점선)를 나타낸 것으로 패드에 작용하는 압부력은 이론치와 측정치의 오차는 1.6% 이내로 잘 일치하고 있다.

Fig. 9는 계측된 압부력과 제동력을 이용하여 측정된 디스크와 패드 사이의 마찰계수를 나타낸 것이다. 그림에서  $\square$ 은 실제 계측데이터를, 실선은 계측 데이터를 이용하여 회귀분석한 결과를, 점선은 UIC(International Union of Railways, 국제철도연맹) Leaflet 541-3에서 요구하고 있는 고속철도 차량에 대한 마찰계수의 범위를 나타낸 것이다[9]. 계측 데이터는 앞에서 설명한 바와 같이 KTX 운행패턴과 같이 시운전 시험을 수행함에 따라 250km/h 이상의 고속 영역에 대한 계측 데이터를 확보하지 못하였다. 그림에서 보는 바와 같이 계측된 마찰계수는 UIC에서 요구하는 범위 내에 존재하고 있음을 알 수 있으며, 300km/h 속도에서는 마찰계수가 약 0.3 정도이고 주행속도가 낮아짐에 따라 증가하여 고속철도 차량의 정지시에는 약 0.4까지 증가한다. 이는 다이내모 시험기를 이용하여 측정된 마찰계수 0.32~0.45와 약 10%의 차이가 있음을 알 수 있으며[5], 열차의 실제 운영 환경과 다이내모에서의 시험 환경과의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 따라서, 기존의 방법에 따라 다이내모 시험기에 의한 결과를 이용하여 기계제동력을 산정하면 실제 운행 상황에서의 크기보다 높게

산정하게 되기 때문에 실제 운행 상태에서의 제동거리 보다 짧은 제동거리를 제시할 수 있는 위험성이 있다. 열차 전체 편성에서 전체 제동력 중에서 기계제동력이 차지하는 비율에 따라 다소 차이가 있으나, 일반적으로 기계제동력이 전체 제동력의 50% 이상을 담당하고 있어 최소 5% 이상 짧은 것으로 산정하게 되어 열차 안전 확보 측면에서 제동장치 설계시에 세심한 주의가 필요한 것으로 판단된다.

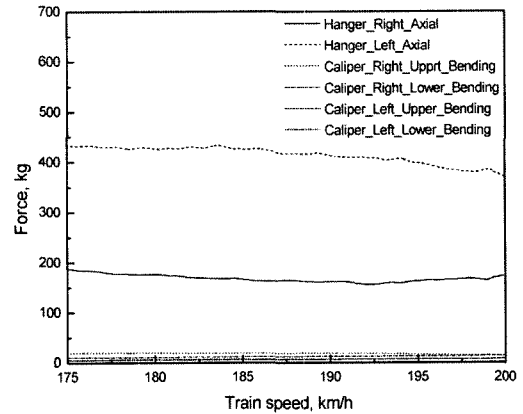


Fig. 7. Measured forces at hanger and caliper

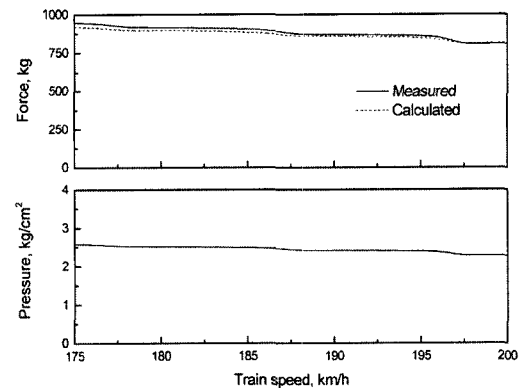


Fig. 8. Brake cylinder pressure and clapping force

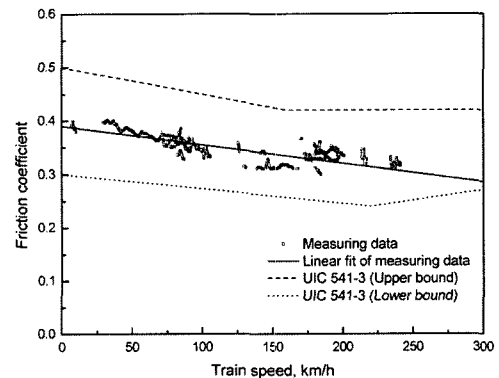


Fig. 9. Measured result of disc-pad friction coefficient

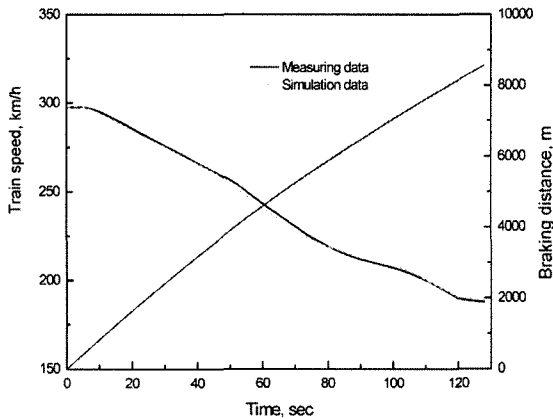


Fig. 10. Comparison between measured data and simulation results of train speed and braking distance

Fig. 10은 한국형 고속열차의 시운전 시험 과정에서 300 km/h ~ 180km/h 사이의 속도에서 전기제동은 차단하고 디스크 제동 100% 만을 투입하여 측정된 제동거리와 속도변화 곡선 및 제동성능해석 프로그램으로, 동일한 열차 조건에서 Fig. 9의 마찰계수를 사용하여 계산한 속도변화 곡선과 제동거리를 비교한 것이다. 이를 살펴보면 시뮬레이션 값과 실제 측정된 값은 제동거리와 속도의 오차가 각각 0.1%와 1.2% 이내로 거의 동일함을 알 수 있다. 이는 캘리퍼와 행거에 센서를 설치하여 마찰계수를 측정하는 방법과 그 측정 결과가 타당하다는 사실을 입증하는 것이다.

#### 4. 결론

선도기술개발사업(G7)으로 개발된 한국형고속열차는 경부 고속철도 영업선에서 각종 성능확인 및 신뢰성 시험을 수행하고 있다. 제동성능시험 과정에서 제동성능의 주요성능인 디스크제동장치의 디스크와 패드 사이의 마찰계수를 측정하기 위하여 캘리퍼와 행거 부위에 별도로 제작된 센서화 캘리퍼와 행거 및 스트레인게이지를 설치하여 열차의 시운전 시험 운행 과정에서 작용하는 압부력과 제동력을 측정하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 측정된 압부력은 제동실린더에 작용하는 압력으로 계산한 이론치와 거의 일치하며, 캘리퍼를 통하여 전달되는

제동력은 무시할 정도이기 때문에 디스크 제동장치의 제동력은 행거에 작용하는 축하중 만을 측정하여도 충분하다고 판단된다.

- (2) 측정된 압부력과 제동력을 이용하여 계산한 디스크와 패드사이의 마찰계수는 UIC에서 요구하는 범위를 만족하며, 디나모 시험기를 통해 측정된 결과와 비교하면 약 10 %의 차이가 있다. 이는 열차의 실제 운용 환경의 영향으로 인해 차이가 발생한 것으로 판단된다.
- (3) 본 연구에서 구한 마찰계수를 이용한 시뮬레이션 결과와 디스크 제동장치만을 사용한 열차의 제동시험 결과를 비교하면 시간에 따른 속도 변화와 제동거리는 차이가 없이 일치함을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 내용은 건설교통부에서 시행하는 고속철도기술개발사업의 기술결과임을 밝힌다.

#### 참 고 문 헌

1. 이남진, 강철구 (2002), “동적 모델에 의한 고속전철의 제동력 시뮬레이션,” 제어·자동화·시스템공학논문지, 제8권, 제1호, pp.46-53.
2. S. Yasunobu, S. Miyamoto, and H. Ihara (1983), “Fuzzy control for automatic train operation system,” IFAC Control in Transportation System, pp.23-39.
3. International Standard IEC 1133, IEC, 1992.
4. 제동시스템 개발 (1996-2001), 고속전철기술개발사업 연차보고서, 건교부/산자부/과기부.
5. 김기열, 김상호, 김유신, 이법주, 김석원 (2004), “고속 철도 차량용 소결 마찰재료 개발,” 춘계학술대회 논문집, 한국철도학회, pp. 315-321.
6. 고속전철시스템 기본사양 (1998), 한국철도기술연구원.
7. G7 고속전철 기술개발사업 Control System Specification (2001), (주)로템.
8. 김석원, 김영국, 박태원 (2004), “한국형 고속전철의 디스크 제동력 측정 방법에 관한 연구”, 한국센서학회지, 제13권, 제3호, 한국센서학회, pp.214-251.
9. UIC Leaflet 541-3 (2004), Brakes-Disc brakes and their application-General conditions for the approval of brake pads, 5th edition.