

실차 주행시험을 통한 디스크-패드 마찰계수 측정방법

Measuring methods for friction coefficient of disc-pad through running test

목진용* 김영국** 김석원** 박찬경** 김기환**
Mok, Jin Yong Kim, Young Guk Kim, Seog Won Park, Chan Kyoung Kim, Ki Hwan

ABSTRACT

To stop the train safely within the limited traveling distance and reduce its speed to the desired speed, it is necessary to guarantee the correct braking force. Presently, most trains have electric propulsion system and have adopted combined electrical and mechanical(friction) braking system. The friction coefficient between brake disc and pad is an important parameter in determining the mechanical braking force. In general, friction coefficient data of braking material have been taken through the dynamo-test in a laboratory.

This study have suggested two methodologies that can measure friction coefficient of braking material on the train's actual operating condition. The first is the direct method; measure the brake force and the clamping force applied on the mechanical brake by using strain gauges installed at the brake disk, and then calculate it. The second method is the indirect method; obtain the friction coefficient by using the train load and the equivalent brake force which is deducted the longitudinal force, such as resistance to motion, gradient resistance and curved resistance, from the inertia force applied to the train.

1. 서 론

철도차량은 기계, 전기□전자, 제어, 통신 등 공학 기술과 시스템 기술이 종합적으로 결합된 결정체로서 각 시스템의 성능은 안전성과 신뢰성 확보가 필연적으로 요구된다. 특히 철도의 고속화에도 불구하고 일정한 거리 이내에서 열차를 안전하게 정지시키거나 필요한 속도로 감속시켜야 하는 제동성능은 매우 중요한 항목이므로 제동 시스템은 설계단계부터 철저한 성능 검증이 필요하다. 또한 제동성능의 검증을 위해서는 제동시스템에서 작용하는 실제 제동력의 측정은 매우 중요하다[1-2]. 일반적으로 철도차량용 제동장치의 제동력은 제동력을 직접적으로 측정하는 것이 아니라 차량이 제동 작용을 발휘할 때에

* 책임저자, 정회원, 한국철도기술연구원, 차세대 고속철도기술개발사업단

E-mail : jymok@krri.re.kr

TEL : (031)460-5622 FAX : (031)460-5649

** 한국철도기술연구원, 차세대 고속철도기술개발사업단

걸리는 제동시간, 제동거리, 열차의 속도 등을 측정하고 이를 이용하여 제동력을 간접적인 계산을 통해 산출하는 방법을 사용해 왔다. 기계 제동력의 경우 다이내모 시험을 통해 디스크 패드나 슈의 마찰계수 특성을 구하고 이를 제동 실린더에 의해 발생하는 기계 제동장치의 압부력에 곱한 값으로 제동력을 추정하였다[3-5]. 그러나 이 방법들은 철도차량이 실제로 주행하는 조건에서 제동력을 직접 측정한 것이 아니기 때문에 이 값을 철도차량의 정확한 실제 제동력이라고 단정하기에는 다소 모호한 점이 있다.

본 논문에서는 철도차량에 사용되는 기계 제동장치 중 하나인 디스크 제동장치에 작용하는 제동력을 측정할 수 있는 2가지 방법을 제안하였다. 하나는 디스크 제동장치에 스트레인 게이지를 부착하여 작동되는 제동력을 직접 측정하는 방법이다. 다른 두 번째 방법은 제동 동작중인 차량의 관성력을 측정한 후 전후 방향의 작용력을 보상하여 제동력을 계산으로 구하는 간접적인 방법이다.

2. 철도차량의 디스크 제동장치에 작용하는 제동력 측정

본 연구에 활용된 한국형 고속열차(HSR-350x)는 총 7량 1편성으로 구성되어 있으며, 차량은 대차에 장착된 전기제동장치(회생제동, 저항제동용 전동기), 와전류 제동장치 및 기계 제동장치(답면, 휠디스크 및 디스크) 등이 조합되어 제동력을 발휘한다. 전체 제동력은 각 제동장치들이 열차의 운행속도에 따른 제동력의 조합, 즉 설정된 제동패턴(상용제동 혹은 비상제동)에 따라 요구 제동력을 만족할 수 있도록 각 제동장치별 제동력을 블렌딩(blending)하면서 제동력을 발휘하도록 구성되어 있다[1,2].

한국형 고속열차에는 객차대차 총 4대에 디스크 제동장치가 설치되어 있으며 이 디스크 제동장치는 다른 제동장치와는 달리 열차의 모든 속도대역에서 제동력을 발휘하도록 설계되어 있어 이 제동장치의 제동력을 정확하게 측정할 필요가 있다.

본 논문에서 한국형 고속열차의 디스크 제동장치의 제동력을 직접법과 간접법으로 구하였는데 전자는 디스크 제동장치에 스트레인 게이지를 장착하여 제동력을 측정하는 방법이며, 후자는 열차에 작용하는 관성력을 측정하고 이를 통해 디스크 제동장치의 제동력을 계산으로 추정하는 방법이다.

2.1 스트레인 게이지를 이용한 제동력 측정방법 - 직접법

Fig. 1은 디스크 제동장치의 제동실린더, 패드 어셈블리와 센서 장착 위치를 나타낸 것으로 기관사에 의해 제동작용이 명령되면 제동실린더의 압력이 캘리퍼를 통해 전달되어 패드에 압부력으로 작용한다. 제동력(마찰력)은 행거와 힌지 서포터를 통해 대차 프레임으로 힘이 전달되도록 설계되어 있기 때문에 행거와 힌지 서포터에서 작용력을 측정하면 디스크 제동장치의 실제 제동력을 측정할 수 있다. 그러나 디스크 제동장치가 대차에 조립된 상태에서 행거의 작용력은 쉽게 측정할 수 있으나 힌지 서포터는 힘을 측정하기 어려운 구조이므로 힌지 서포터의 작용력은 캘리퍼에서 측정한 굽힘 모멘트로서 계산하였다. Table 1은 센서의 장착 위치와 측정되는 힘의 특성을 나타낸 것이며, Fig. 2는 캘리퍼에 작용하는 힘을 측정하기 위해 실제 제동장치 캘리퍼에 스트레인 게이지를 설치한 모습이다.

2.2 측정된 관성력을 이용한 제동력 추정방법 - 간접법

주행 중이던 철도차량에 제동력이 작용하면 차량은 감속하게 되며, 이때 차량에 작용하는 진행방향에 대한 힘들의 관계는 뉴턴(Newton)의 운동방정식을 적용하면 식(1)과 같이 표시할 수 있다. 또한 차량에 작용하는 전체 제동력은 식(2)와 같이 여러 종류의 제동력의 합으로 표시할 수 있다.

$$F_T = m(1+\alpha)a = -F_{braking} - R_r - R_y - R_c \quad \text{--- (1)}$$

$$F_{braking} = F_{b(elec)} + F_{b(disc)} + F_{b(wdisc)} + F_{b(tread)} \quad \text{--- (2)}$$

여기서, F_T 는 차량 관성력, m 은 차량 질량, $F_{braking}$ 은 차량 전체 제동력, $F_{b(elec)}$ 는 전기 제동장치의 제동력, $F_{b(disc)}$ 는 디스크 제동장치의 제동력, $F_{b(wdisc)}$ 는 휠디스크 제동장치의 제동력, $F_{b(tread)}$ 는 답면 제동장치의 제동력, a 는 감속도, α 는 회전상당계수, R_r 은 열차의 주행저항, R_g 는 구배저항, R_c 는 곡선저항 성분을 각각 나타낸다.

Fig. 3은 차량 관성력으로 디스크 제동장치의 제동력을 계산하는 흐름도이다.

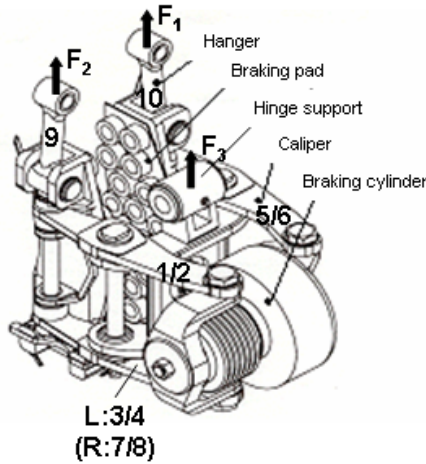


Fig. 1. Disc brake unit assembly and sensor installation points

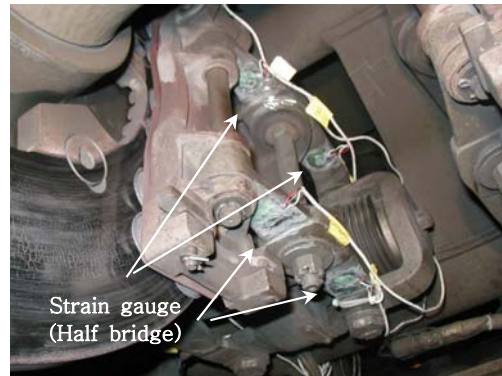


Fig. 2. Sensors and installation view for Caliper

Table 2. Sensor installation positions and measuring forces

Installation position		Measuring strain	Measuring force	Sensor type	
Caliper	Left Upper	1	Bending	Friction	Strain gauge(H)
		2	Shear	Clamping	Strain gauge(H)
	Left Lower	3	Bending	Friction	Strain gauge(H)
		4	Shear	Clamping	Sensitized caliper(F)
	Right Upper	5	Bending	Friction	Strain gauge(H)
		6	Shear	Clamping	Strain gauge(H)
	Right Lower	7	Bending	Friction	Strain gauge(H)
		8	Shear	Clamping	Strain gauge(H)
Hanger	Left	9	Axial	Friction	Sensitized hanger(F)
	Right	10	Axial	Friction	Strain gauge(H)

* Sensor type:
(H) : Half Bridge, (F) : Full Bridge

2.3 시험 계측시스템

한국형 고속열차에는 열차의 성능검증을 위해 네트워크를 기반으로 하는 종합계측시스템이 설치되어 있다. Fig. 4는 본 연구에서 디스크 브레이크 제동력을 측정, 평가한 절차를 나타낸 것이며 Fig. 5는 본 연구에 활용된 한국형 고속열차의 종합계측시스템의 구성도이다. Fig. 5에서 보인 바와 같이 열차에 설치된 압력센서, 펄스발생기, 스트레인 게이지 등 센서 신호와 제동/견인, PWM 신호 등 차량신호가 종합계측시스템으로 입력되며, 이 입력 신호로부터 열차의 주행속도, 주행거리(위치), 제동/견인 여부, 각 제동장치의 작동여부 등을 확인하여 입력신호와 함께 저장된다.

3. 디스크 제동장치의 제동력 측정 결과 및 고찰

한국형 고속열차의 시운전 시험은 KTX 영업선로에서 영업열차의 지장이 없는 범위에서 실시되어야 하기 때문에 제동성능 시험을 수행하는 데에 많은 제약이 따른다. 따라서 디스크 제동장치의 제동력을 측정하기 위한 시험은 시운전 시험측정이 가능한 몇 개 열차 주행속도 대역으로 구분하여 수행하였다.

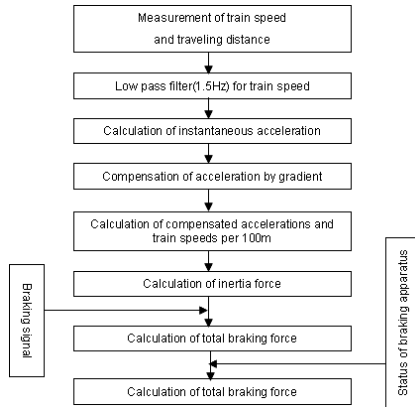


Fig. 4. Flow chart of estimation for braking force

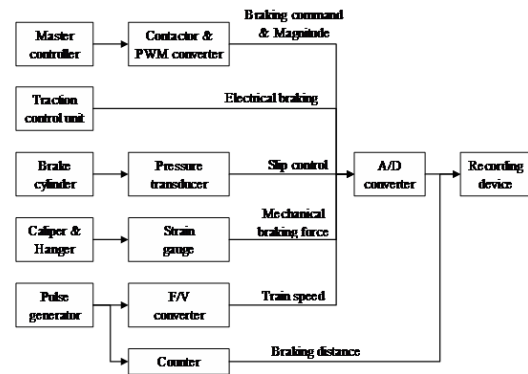


Fig. 5. Schematic diagram of measuring system

Fig. 6은 직접법으로 디스크 제동장치의 제동력을 측정 한 예로서, 200 km/h에서 175 km/h까지 제동한 경우이다. 그림에서 기호(-□-)는 디스크 제동장치의 제동력으로 행거의 작용력과 캘리퍼에서 측정 한 굽힘 하중의 전체 합력이며, 실선 및 점선들은 행거의 작용력과 캘리퍼에서 측정 한 굽힘 하중을 나타낸다. 그림에서 보인 바와 같이 캘리퍼를 통하여 전달되는 힌지 서포터의 작용력은 행거의 전달력 보다 그 크기가 매우 작다. 이는 디스크 제동장치의 제동력을 측정 할 경우 행거의 전달력만을 고려해도 충분하다는 것을 말해 준다. Fig. 7은 제동실린더의 압력으로부터 패드에 작용하는 압부력을 캘리퍼의 전달력으로 측정 한 결과(실선)와 제동실린더 압력을 사용하여 계산한 이론값(점선)을 나타낸 것으로서 패드에 작용하는 압부력은 이론값과 측정값의 오차는 1.6 % 이내로 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 직접적으로 하중을 측정하지 않고 제동 실린더 압력을 측정하여 계산한 것을 디스크 제동장치의 압부력으로 사용해도 좋다는 것을 의미한다.

Fig. 8은 간접법으로 디스크 제동장치의 제동력을 추정 한 예로서, 다른 제동장치는 차단하고 디스크 제동장치만 작동시킨 상태에서 측정 한 결과이다. Fig. 8(a)의 상단 그래프에서 측정 된 열차 주행속도로 열차가 300 km/h에서 180 km/h로 제동되고 있음을 보여주고 있으며, 하단 그래프는 측정 주행속도를 미분해서 얻어진 순간 가속도로서 열차의 관성력을 계산하는 데 사용된다. 이 순간가속도로부터 열차의 관성력을 구할 수 있으며, 식(1)에 의해 차륜과 레일 사이에 작용하는 디스크 제동장치의 제동력을 추정 한 결과가 Fig. 8(b) 이다.

Fig. 9는 직접법과 간접법으로 측정 된 제동력으로부터 구해진 디스크 제동장치에 사용 된 제동 패드의 마찰계수를 나타낸 것이다. 그림에서 기호 □와 기호 ■은 간접법과 직접법으로 실제 측정 한 제동패드의 마찰계수를, 실선과 점선은 이들을 이용하여 회귀 분석한 간접법과 직접법에 대한 결과들을 나타낸다. 직접법의 경우는 주행속도가 260 km/h 이하 범위에서, 간접법의 경우는 주행속도가 80 km/h 이상의 범위에서 제동시험을 수행하였다. 그림에서 보는 바와 같이 마찰계수는 간접법의 경우는 0.37 ~ 0.31 이고 직접법의 경우는 0.39 ~ 0.29로 직접법의 경우가 간접법에 비해 저속에서는 5.4 %가 높고 고속

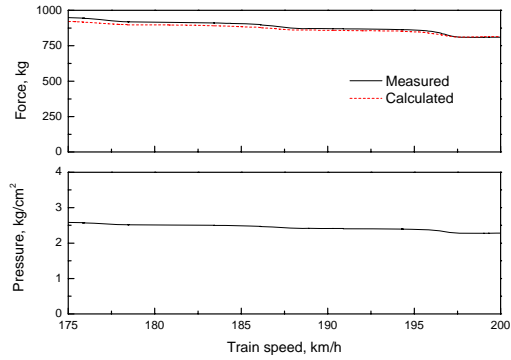
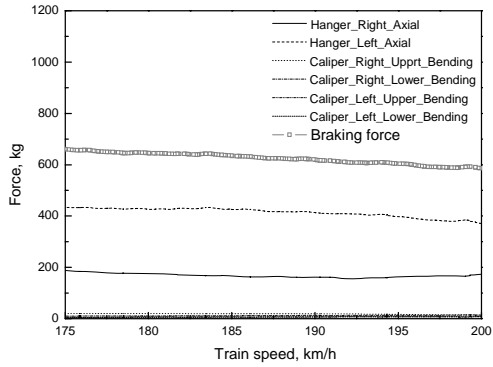
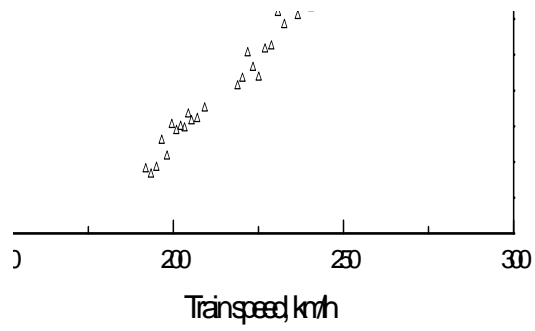
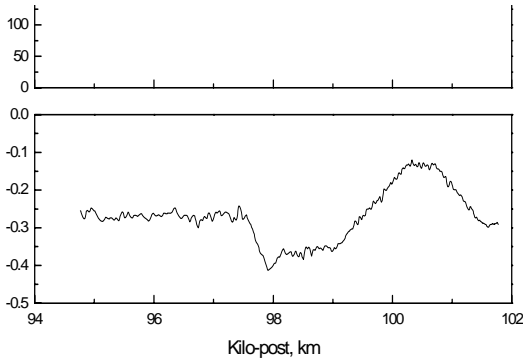


Fig. 6. An example of braking force by direct method Fig. 7. Brake cylinder pressure and clapping force



(a)

(b)

Fig. 8. A example of braking force by indirect method, (a) measured train speed and acceleration, (b) brake force

에서는 6.5 %가 낮지만, 두 경우 모두 마찰계수는 국제규격인 UIC 541-3[6]에서 요구하는 범위 내에 존재하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 열차의 속도가 201 km/h부터 93 km/h로 제동작용에 의해 감속되는 경우 Fig. 9에 나타난 직접법과 간접법에 의해 얻어진 마찰계수를 이용하여 해석한 제동거리와 실제 시험에 의해 측정된 제동거리를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 각 경우에 대해 직접법과 간접법으로 얻은 마찰계수를 사용한 제동거리 해석결과(직접법: 2,587m, 간접법: 2,577m)가 측정값(2,573m)과 거의 유사한 경향을 가지며, 직접법과 간접법의 제동거리 해석 오차는 각각 0.5 %와 0.2 %에 불과하므로 본 논문에 제안한 직접법과 간접법에 의한 제동력과 마찰계수의 측정방법은 매우 타당한 방법임을 입증하고 있다.

4. 결론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 철도차량에 사용되는 기계 제동장치중의 하나인 디스크 제동장치에 작용하는 제동력을 측정할 수 있는 직접법과 간접법 등 2가지 방법을 제안하였다.

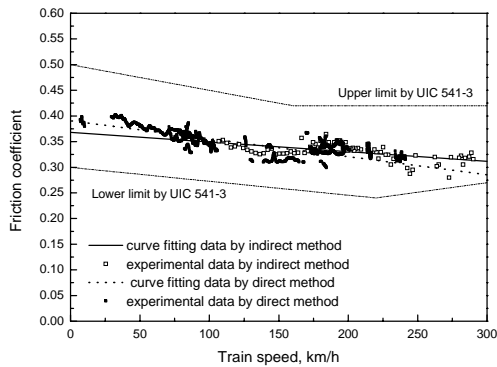


Fig. 9. Friction coefficient of disc

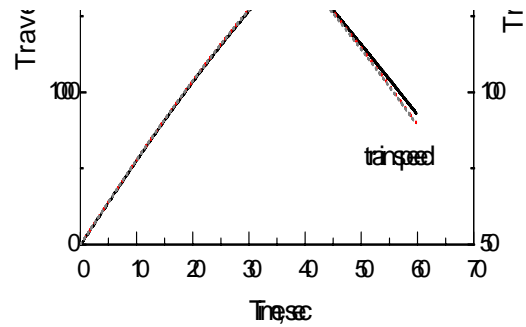


Fig. 10. Comparisons between measured and simulation results

- (2) 제안한 방법을 시험운행 중인 한국형 고속열차의 디스크 제동장치에 실제로 작용하는 제동력을 측정하고 이 측정 제동력으로부터 디스크 제동장치 패드와 디스크 사이의 마찰계수를 구하였다. 제안한 방법으로 획득한 결과를 활용한 해석 결과가 측정 결과와 거의 유사한 경향을 가지므로 제안한 2가지 방법 모두 디스크 제동장치의 패드 마찰계수를 측정하는 데 사용할 수 있다.
- (3) 실제 시험을 통해서 얻어진 디스크와 패드 사이의 마찰계수는 고속철도 차량의 제동성능 예측과 제동 시스템 설계에 기초 자료로 활용될 수 있다.

후 기

본 연구는 국토해양부의 미래철도 기술개발사업인 차세대 고속철도 기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 관계 기관의 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김영국 등, (2006.), “가속도/감속도를 이용한 열차 견인력/제동력 추정방법에 대한 고찰,” 한국철도학회논문집, 제9권, 제6호, 한국철도학회, pp. 682-688.
2. 김영국 등, (2007), “고속철도 차량의 제동성능 해석에 대한 실험적 검증,” 한국센서학회논문집, 제16권, 제1호, 한국센서, pp. 68-76.
3. Uchida, S., et al., (1993), “Brake Control for Speedup of Shinkansen EMU based on the Effective Use of Adhesion (Japanese)”, RTRI Report, Vol. 7, No. 3, pp. 41-48.
4. 김석원 등, (2006), “한국형 고속열차의 디스크-패드 마찰계수 측정에 관한 연구,” 한국철도학회논문집, 제9권, 제6호, 한국철도학회, pp. 677-681.
5. 김기열, 김상호, 김유신, 이범주, 김석원, “고속 철도 차량용 소결 마찰재료 개발,” 춘계학술대회 논문집, pp. 315-321, 한국철도학회, 2004.
6. International Union of Railways, (2005), UIC Code 541-05.