

열차 제어의 연속 제동시 마찰특성과 온도분포

The Frictional Characteristic and Distribution of Temperature in The Continuous Braking Effort on The Train Control

이시우*

최경진**

Lee, Si-Woo

Choi, Kyung-Jin

ABSTRACT

During braking at a train, thermal energy is generated due to the frictions between disk and lining and wheel and shoe. In general, the braking transfers the kinetic energy into thermal energy. Therefore, the frictional characteristics are varied according to the braking force, the thermal resistance, and the thermostable, etc.

Using a Dynamo testing we have studied the frictional characteristics and the thermal distribution to investigate a stable speed and to improve the testing method through comparing and analysing in the measurement of the thermocouple temperature and infrared camera.

1. 서 론

철도차량은 고효율성, 저공해, 안전성 및 계획적 수송 측면에서 많은 장점을 지니고 있다. 철도 수송 시스템은 우리 나라에서도 고속전철의 도입 뿐만 아니라 기존선의 고속화로 철도차량의 고속화에 따른 기술개발의 필요성이 요구되고 있다.

철도차량의 고속화가 진행되면 이와 병행하여 차량의 제동성능 또한 향상되어야만 속도향상에 대비한 안전성이 확보된다고 할 수 있고, 철도차량은 승객과 화물의 안전수송을 최우선으로 하기 때문에 필요에 따라서 감속 또는 정지시키는 제동작용 역할은 매우 중요하다.

디스크(disk)와 라이닝(lining) 또는 차륜(wheel)과 제륜자(shoe)의 마찰에 의해 열에너지가 발생하며, 실질적으로 제동 작용 시 라이닝과 제륜자에 가해지는 압력에 의해 열차가 정지한다고 할 수 있다.

일반적으로 제동 마찰재는 차량의 운동에너지를 열에너지로 전환시키는 작용을 하며, 적절한 제동 압력과 내열성, 내마모성 등의 마찰변수에 따라 마찰 특성이 달라지게 된다.

* 책임저자 : 한국철도기술연구원 연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

본 연구는 연속 제동 운전구간에서 열차의 최적 속도제어와 안전한 제한속도를 유지하기 위하여 디스크와 라이닝, 차륜과 제륜자의 마찰에 의해 발생하는 열에너지로 인한 마찰특성과 온도분포를 실물 다이내모(dynamo) 제동시험을 통하여 고찰하고자 한다.

2. 제 동 력

철도차량의 기계 제동 기본원리는 차량의 운동에너지를 제동장치의 마찰에 의해 열에너지로 변환시켜 속도를 제어하는 것이다.

철도차량의 기계 제동은 그림 1과 같이 제동통(brake cylinder)의 공기압력 증가에 의해서 제동 압부력(brake pressure)이 라이닝을 디스크(brake disk)에 차륜을 제륜자에 압착시켜 발생하는 마찰력에 의해 작용된다. 이 마찰력을 제동력이라고 하며, 식(1)과 같이 나타낸다.

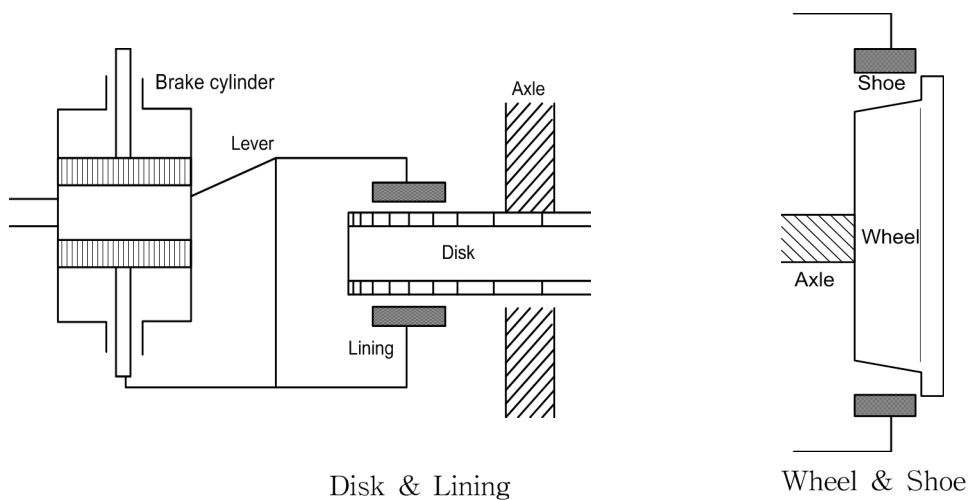


그림1. Mechanism of braking

$$F = p \cdot f_m \quad (1)$$

여기서 F 는 제동력, p 는 제동 압부력, f_m 은 평균마찰계수이다.

$$p = \frac{p_c \cdot \pi d^2 \cdot \eta \cdot r}{4} \quad (2)$$

제동 압부력인 p 는 식(2)와 같이 나타내고, P_c 는 제동통 공기압력(kg/cm^2), d 는 제동통의 직경(cm), η 는 제동효율(%), r 는 제동레바 비이다.

또한, 디스크와 라이닝은 사이의 평균마찰계수 f_m 은 차륜 반경과 제동작용 반경에 따른 관성모멘트 위치를 적용하며 식(3)과 같고, 차륜과 제륜자는 식(3)에서 차륜 반경인 R_w 와 제동작용 반경인 R_b 를 제외한 식(4)와 같다.

$$f_m = k \cdot \frac{W \cdot \Delta V}{p \cdot B' \cdot g \cdot T} \cdot \frac{R_w}{R_b} \quad (3)$$

$$f_m = k \cdot \frac{W \cdot \Delta V}{p \cdot B' \cdot g \cdot T} \quad (4)$$

여기에서 W 는 관성중량(kg), ΔV 는 속도변화량(m/h), k 는 시험기 보정상수, B' 는 제동배율, g 는 중력가속도(m/h²), T 는 토크(kg·m), R_w 는 차륜반경(m), R_b 는 제동작용 반경(m),이다.

3. 연속제동 시험

3.1 시험 장치

철도 차량용 제동 다이내모시험기(brake dynamo tester)는 그림 2와 같으며 공압 제동시스템으로 구성되어 있다. 디스크 제동과 차륜의 단면 제동시험과 온도측정을 할 수 있다. 그림 3은 제동다이내모시험기의 시험을 위한 전체 개략도이다. 제동 다이내모시험기 각종 출력 데이터를 PC를 통하여 받을 수 있도록 되어 있다.



그림 2. Brake dynamo tester

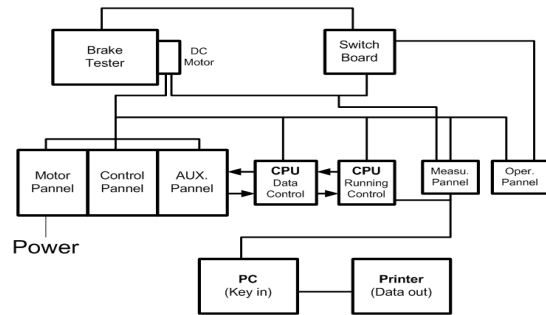


그림 3. Schematic diagram for brake dynamo test

3.2 시험 조건과 방법

연속 제동시험 조건은 디스크 초기온도가 50℃이하에서 초기제동을 시작하였다. 제동 초속도는 그림 4와 같이 속도 150km/h에서 제동을 하여 정지할 때까지를 기준을 1회로 하여 연속 3회 제동을 하였다. 초기제동과 연속제동이 끝난 후 곧바로 가동하였고, 2회인 연속제동까지는 디스크나 차륜 위쪽에 위치한 열차 진행방향과 속도에서의 풍량을 고려한 냉각 팬에서 발생하는 바람을 이용하여 냉각시키는 상태에서 실시하였고, 마지막 제동에는 냉각 팬을 사용하지 않는 비냉각 제동을 실시하였다. 제동 압부력은 1690kg의 양압으로 시험하였다.

온도 측정은 디스크의 안쪽과 바깥쪽 4곳과 라이닝에는 2곳에서 열전대를 설치하여 측정하였다.

온도 분포도는 적외선 열화상카메라인 ThermaCAM S-40으로 측정하였다. 그림 5의 적외선 열화상카메라는 피사체로부터 복사되어지는 적외선 에너지를 검출하여 열분포도를 측정, 온도를 표시할 수 있는 장비이다.

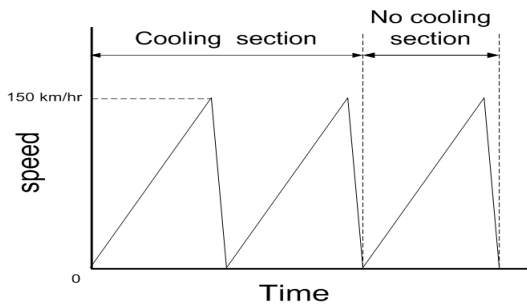


그림 4. Condition of braking test



그림 5. ThermoCAM S-40

4. 온도 변화

이와 같은 시험조건에 연속제동 운전하여 디스크와 라이닝, 차륜과 제륜자의 마찰에 의해 발생 되는 열에너지로 인한 온도 변화를 알아보았다.

제동 디스크와 라이닝의 온도변화는 그림 6과 7에 나타내고 있다. 초기제동에서 연속제동, 연속 제동에서 냉각 팬을 작동하지 않는 비냉각제동 이후에 온도가 높아지는 것을 알 수가 있다. 디스크의 경우 초기제동과 연속제동을 보면 속도 100km/h구간에서는 80℃정도의 차이가 발생하고, 이 구간 이하의 속도에서는 증가율이 작아지는 것을 알 수가 있다. 이러한 경향은 속도가 낮아지면서 마찰에 의해 발생하는 열이 최대치로 도달하여 온도 증가폭이 줄고 디스크와 라이닝사이의 마찰속도도 줄어들어 온도증가율이 감소하기 때문이다.

그림 6과 7에서 제동 디스크의 온도 변화율이 라이닝 온도 변화율보다 높게 나타나고 있음을 알 수가 있다. 이것은 라이닝보다 디스크의 열흡수율이 보다 높기 때문이다. 금속계의 디스크보다 라이닝은 수지계의 비금속계로 열흡수율이 매우 낮은 재료특성이기 때문이다. 그림 8은 제륜자의 온도 변화를 나타낸 것이다.

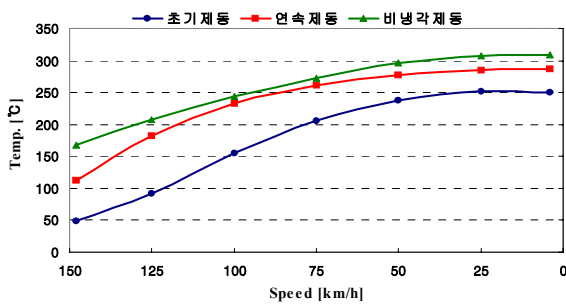


그림 6. Temperature of brake disk

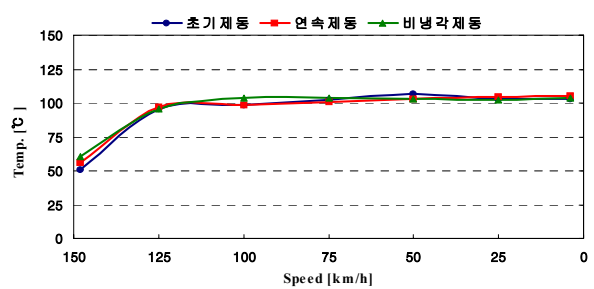


그림 7. Temperature of brake lining

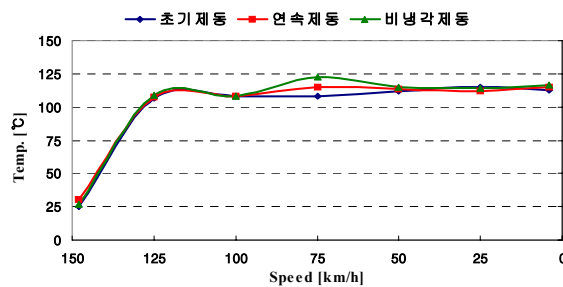
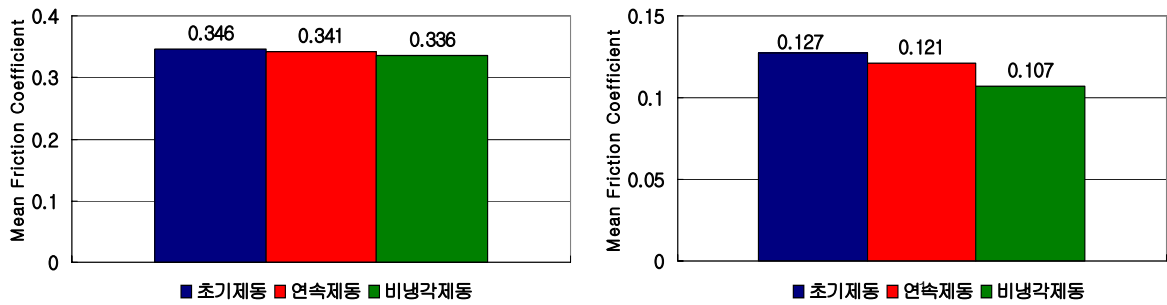


그림 8. Temperature of brake shoe

5. 마찰 특성

그림 9는 각 제동에 따른 평균 마찰계수를 나타낸 것이다. 연속 제동함에 따라 마찰계수가 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 이런 현상은 디스크와 라이닝, 차륜과 제륜자의 마찰에 의해 발생하는 열에너지의 영향을 받고 있음을 알 수가 있다. 그러나, 그림에서 나타낸 차는 예상되었던 10%미만 값의 변화를 나타내고 있다.



Brake disk & lining

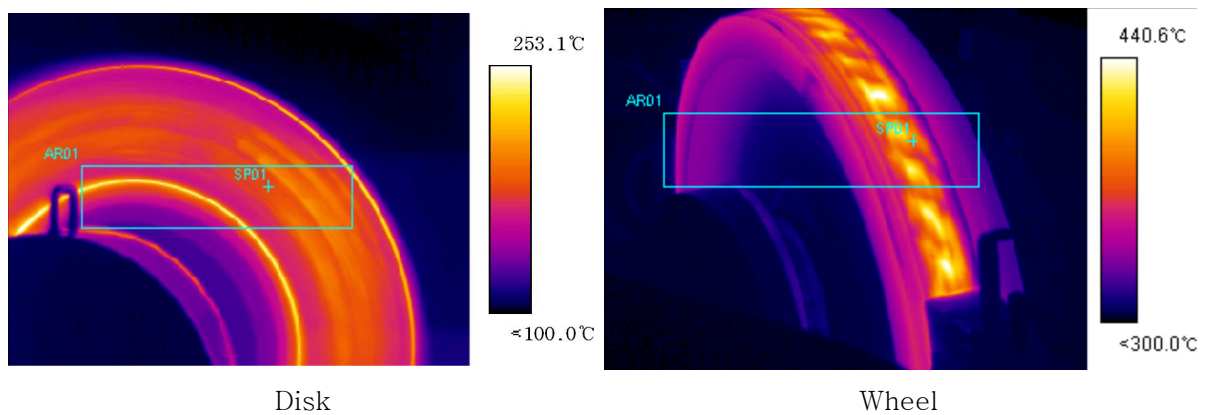
Brake wheel & shoe

그림 9. Mean Friction coefficient

6. 온도 분포

디스크와 차륜의 온도분포는 적외선 열화상카메라로 촬영하여 분석하였다. 그림 10은 디스크와 차륜의 온도분포를 나타낸 그림이다. 디스크와 라이닝, 차륜과 제륜자의 접촉면인 밝은색 부분으로 온도가 높은 것을 알 수가 있다.

디스크에 설치된 열전대 측정 온도보다 적외선 열화상카메라에서 측정된 온도보다 높은 온도수치를 나타내는데, 이는 디스크에 설치된 열전대는 디스크 내부에 설치되어 있고, 적외선 열화상카메라로 측정된 온도는 마찰이 일어나는 디스크 표면으로부터 온도를 측정하였기 때문이다.



Disk

Wheel

그림 10. Temperature distribution of disk & wheel surface

7. 결 론

철도차량의 연속제동에 의해 디스크와 라이닝, 차륜과 제륜자에서 발생하는 마찰에너지는 열에너지로 전환이 된다. 냉각효과 저하에 의한 연속제동의 영향으로 인한 온도, 마찰계수, 온도분포 등을 검토한 결과 열에너지의 변화에 따라 마찰특성에 영향을 미치고 있음을 알 수가 있다.

연속제동을 할수록 온도가 높게 증가하는 것을 알 수가 있다. 그러나, 온도가 무한대로 증가하는 것이 아니라 속도 100km/h 이하에서는 증가폭이 감소한다.

디스크와 라이닝의 온도차이는 열흡수율에 때문이다. 금속계의 제동 디스크가 비금속계인 라이닝보다 열 흡수율이 높기 때문이다.

디스크와 라이닝, 차륜과 제륜자의 마찰로 인해 발생하는 열에너지가 높아질수록 마찰계수가 낮아지는 것을 알 수가 있다. 이것으로 마찰계수는 온도 변화에 영향을 받아 제동 성능에 영향을 미치는 것을 알 수가 있다.

본 제동 다이내모시험기는 수동 제어이기에 초속도와 연속 제동모드 조작이 어려워 향후 고속 제동 다이내모는 자동제어 기법을 도입할 필요가 있다고 사료된다.

후 기

본 연구는 철도기술연구원의 기본연구사업으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 최경진, 권석진, 이성철, 정진현, 1996, “철도차량에서 제동압부력이 제동마찰계의 마찰특성에 미치는 영향”, 대한기계학회 추계학술대회논문집, pp. 298~302.
2. 권석진, 강부병, 이희성, 최경진, 1998, “제동중량의 변화에 따른 비석면 라이닝의 마찰특성”, 대한기계학회 추계학술대회논문집, pp. 59~62.
3. 신유정, 최경진, 2005, “고속철도 제동제어 시험평가기술 방법에 대한 연구”, 한국철도학회춘계학술대회논문집, pp. 250~256.