

## 열차 제어의 연속 제동시 마찰특성과 온도분포

최경진\*(한국철도기술연구원), 이시우(한국철도기술연구원)

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

K. J. Choi(KRRI), S. W. Lee(KRRI)

#### 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.

**Key Words** : Braking(제동), Disk(디스크), Lining(라이닝), Frictional characteristics(마찰특성), Brake dynamo tester(제동 다이내모시험기), Thermocouple(열전대), Infrared camera(적외선 열화상카메라)

#### 1. 서론

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.

철도차량의 제어는 감속하기 위한 제동장치이다. 디스크(disk)와 라이닝(lining) 또는 차륜(wheel)과 제륜자(shoe)의 마찰에 의해 열에너지가 발생하며,

실질적으로 제동 작용 시 라이닝에 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.

본 연구는 연속 제동 운전구간에서 열차의 최적 속도제어와 안전한 제한속도를 유지하기 위하여 디스크와 라이닝의 마찰에 의해 발생하는 열에너지로 인한 마찰특성과 온도분포를 실물 다이내모(dynamo) 제동시험을 통하여 고찰하고, 온도분포 시험 방법을 보완하여 열전대(thermocouple) 온도 측정과 적외선 열화상카메라(infrared camera) 온도 측정의 특성을 비교 분석하여 시험 방법을 개선하고자 한다.

## 2. 제동력

기계 제동의 기본원리는 차량의 운동에너지를 제동장치에서 마찰에 의한 열에너지로 변환시켜 차량의 속도를 감소시키는 것이다.

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

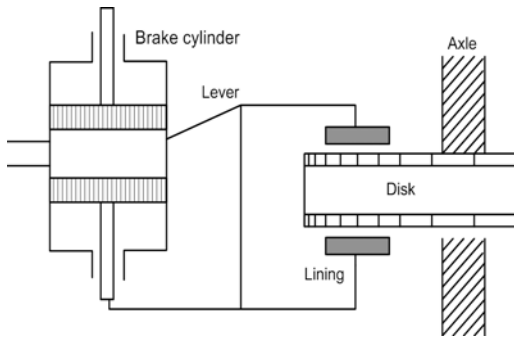


Fig. 1 Mechanism of braking

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

여기에서  $F$ 는 제동력,  $p$ 는 제동 압부력이고,  $f_m$ 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<sup>2</sup>),  $d$ 는 제동통의 직경(cm),  $\eta$ 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 같다.

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

여기에서  $W$ 는 관성중량(kg),  $\Delta V$ 는 속도변화량(m/h),  $k$ 는 시험기 보정상수,  $B'$ 는 제동배율,  $g$ 는 중력가속도(m/h<sup>2</sup>),  $T$ 는 토크(kg·m),  $R_w$ 는 차륜 직경(m),  $R_b$ 는 제동작용 반경(m),이다.

## 3. 연속제동 시험

### 3.1 시험장치

철도차량용 제동 다이내모시험기(brake dynamometer)는 Fig. 2와 같으며 공압 제동시스템으로 구성되어 있다. 디스크 제동과 차륜의 단면 제동시험을 할 수 있고, 슬립링으로 디스크와 차륜의 온도 측정을 할 수 있다. Fig. 3은 제동시험기의 시험을 위한 전체 개략도이다. 제동시험기 각종 출력 데이터를 PC를 통하여 받을 수 있도록 되어 있다.



Fig. 2 Brake dynamometer tester

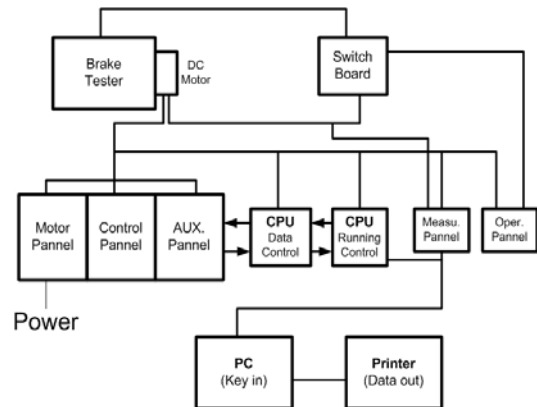


Fig. 3 Schematic diagram for brake dynamometer test

### 3.2 시험조건과 방법

연속 제동시험 조건은 디스크 초기온도가 50°C 이하에서 제동을 시작하였다. 제동 초속도는 Fig. 4에서와 같이 속도 150km/h에서 제동을 하여 정지할 때까지를 기준을 1회로 하여 연속 3회 제동을 하였다. 각 회의 제동이 끝난 후 곧바로 가동하였고, 2회까지는 디스크 위쪽에 위치한 열차 진행방향과 속도에서의 풍량을 고려한 냉각 팬에서 발생되는

바람을 이용하여 냉각시키는 상태에서 실시하였고, 마지막 제동 때에는 냉각 팬을 사용하지 않는 비정상적인 제동을 실시하였다. 제동 압부력은 1690kg의 양압으로 시험하였다.

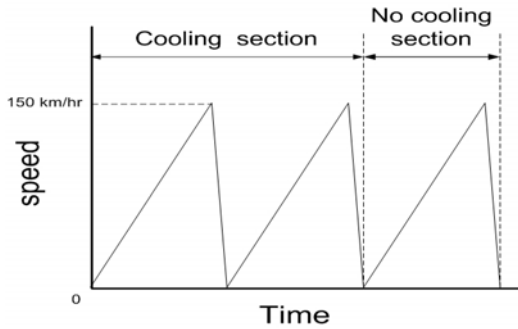


Fig. 4 Condition of braking test

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

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



Fig. 5 ThermaCAM S-40

#### 4. 시험결과 및 고찰

이와 같은 시험조건에 연속 제동운전하여 디스크와 라이닝의 마찰에 의해 발생하는 열에너지로 인한 온도 변화, 마찰계수 변화, 온도분포 등을 알아보았다.

##### 4.1 제동 디스크와 라이닝 온도변화

제동 디스크와 라이닝의 온도변화는 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내고 있다. 초기제동에서 연속제동, 연속제동에서 냉각 팬을 작동하지 않는 비정상적인

연속제동 이후에 온도가 높아지는 것을 알 수가 있는데, 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 최대치로도달하여 온도 증가폭이 줄고 디스크와 라이닝사이의 마찰속도도 줄어들어 온도 증가율이 감소하기 때문이다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 제동 디스크의 온도 변화율이 라이닝 온도 변화율보다 높게 나타나고 있음을 알 수가 있다. 이것은 라이닝보다 디스크의 열흡수율이 보다 높고, 라이닝은 수지계의 비금속계로 열흡수율이 매우 낮은 재료특성에 의한다.

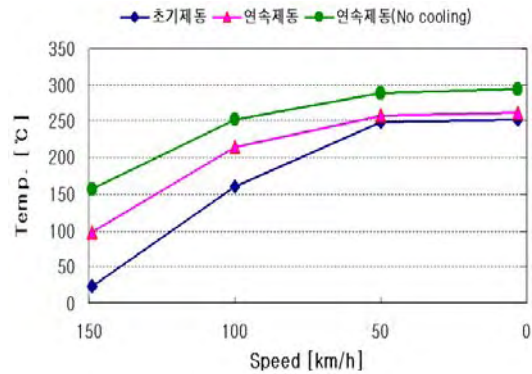


Fig. 6 Temperature of brake disk

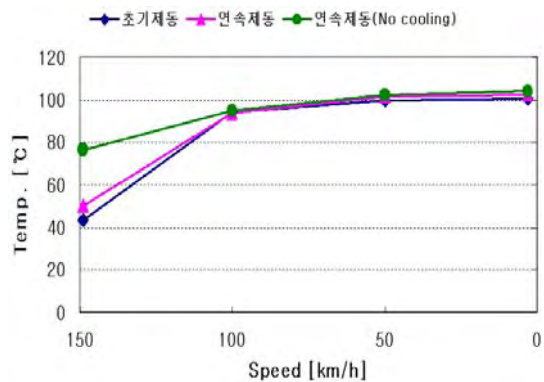


Fig. 7 Temperature of brake lining

##### 4.2 마찰특성

Fig. 8은 각 제동에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 것이다. 연속 제동함에 따라 마찰계수가 낮게 나타나는 것을 알 수 있다.

연속제동은 초기제동보다 마찰계수를 낮아지게 하는 것을 알 수가 있다. 이런 현상은 디스크와 라

이닝의 마찰에 의해 발생하는 열에너지의 영향을 받고 있음을 알 수가 있다. 다만, 그림에서 나타낸 차는 23%만의 변화가 있음을 알 수가 있다.

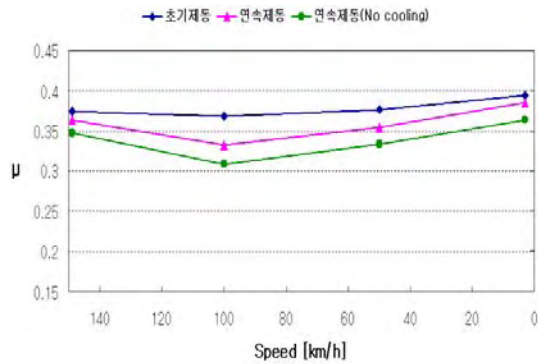


Fig. 8 Friction coefficient

#### 4.3 온도 분포

디스크의 온도분포를 적외선 열화상카메라로 촬영하여 분석하였다. Fig. 9는 디스크의 온도분포를 나타낸 그림이다. 디스크와 라이닝의 접촉면인 밝은색 부분이 온도가 높은 곳이다.

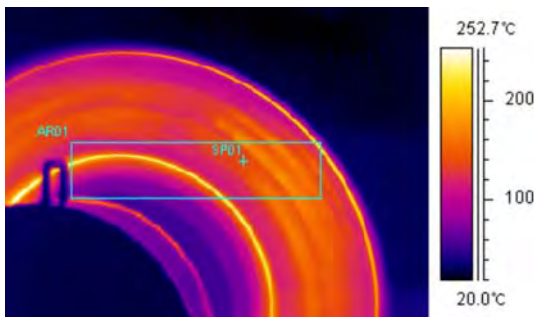


Fig. 9 Temperature distribution of disk surface

Fig. 10은 적외선 열화상카메라에서 촬영된 디스크의 온도 변화를 속도별로 분석한 것이다. 이 그림에서 디스크에 설치된 열전대 측정온도보다 100°C정도 범위로 높은 온도수치를 나타내는 것을 알 수가 있는데, 이는 디스크에 설치된 열전대는 디스크 내부에 설치되어 있고, 적외선 열화상카메라로 측정된 온도는 디스크 표면으로부터 온도를 측정하였기 때문이다. 또한, 마찰표면의 온도분포 중 가장 높은 값을 정리한 결과이다. 열전대 측정온도와 속도 대역별 경향은 일치하고 있다.

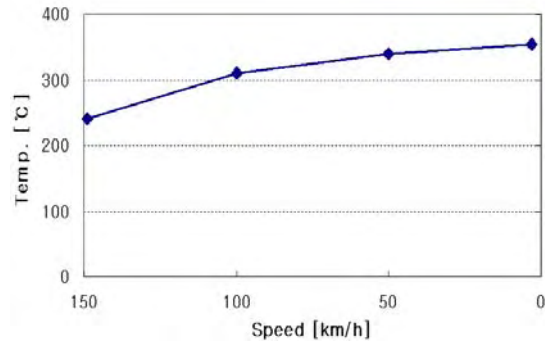


Fig. 10 Temperature of disk surface

#### 4. 결론

철도차량의 연속제동에 의해 디스크와 라이닝에서 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.

특히, 연속제동을 할수록 온도가 높게 증가하는 것을 알 수가 있고, 디스크의 열흡수율이 높아 라이닝보다 높음을 알 수가 있다.

디스크와 라이닝의 마찰로 인해 발생하는 열에너지가 높아질수록 마찰계수가 낮아지는 것을 알 수가 있다. 이것으로 마찰계수는 온도 변화에 영향받아 제동 성능에 영향을 미치는 것을 알 수가 있다.

본 제동 다이내모시험기는 수동 제어이기에 초속도와 연속 제동모드 조장이 어려워 향후 고속제동 다이내모는 자동제어기법을 도입할 필요가 있다.

#### 후기

본 연구는 철도기술연구원의 기본연구사업으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 최경진, 권석진, 이성철, 정진현, 1996, “철도차량에서 제동압부력이 제동마찰재의 마찰특성에 미치는 영향”, 대한기계학회 추계학술대회논문집, pp. 298302.
2. 권석진, 강부병, 이희성, 최경진, 1998, “제동중량의 변화에 따른 비석면 라이닝의 마찰특성”, 대한기계학회 추계학술대회논문집, pp. 5962.
3. 신유정, 최경진, 2005, “고속철도 제동제어 시험평가기술 방법에 대한 연구”, 한국철도학회추계학술대회논문집, pp. 250256.