

반복 제동에 의한 마찰계수와 온도분포에 미치는 영향

Effect on coefficient of brake and distribution of temperature on the braking of recycling

최경진*
Choi, Kyung Jin

이찬우**
Lee, Chan Woo

이시우***
Lee, Si-Woo

ABSTRACT

In braking system of rolling stock, braking is vary important parameter for safety of train. also, to ensure against reliability and evaluation technology is vary important.

This study is obtained to test experimental distribution of temperature on the surface of brake disk by braking effect of continuous and repetition.

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 제동시스템에서 제동 작용은 열차의 안전을 위하여 매우 중요한 요소이다. 또한, 제동시스템의 신뢰성을 확보하고 평가하는 기술도 매우 중요하다. 기계 제동에서 제동 시에 나타나는 마찰열에 대하여 온도분포와 마찰계수의 관계를 규명하고 성능을 평가하는 기술은 실차시험을 시행하는 것이 가장 이상적이지만, 실내에서 실물 제동시험기에서 다양한 시험조건으로 평가하여 나타난 제반 결과를 분석하여 독자적 기술로 응용할 수 있어야 한다.

본 연구는 KTX 고속열차에서 제동에 영향을 미치는 중에서 연속 및 반복 제동에 의하여 나타나는 제동 디스크 마찰면의 온도분포를 실측하였다. 적외선 열화상 카메라로 제동 디스크 마찰면을 측정하고 동시에 평균 및 순간마찰계수와와의 관계를 분석하였다. KTX 고속열차의 비상제동은 속도 300 km/h 에서 3,300 m 이내로 유지하기 위해서 기계 제동을 동시에 사용해야 하므로 반복 제동에 의한 열반점(hot spot)을 예방하기 위한 연구의 목적이 있다.

2. 디스크 브레이크 이론

제동력은 제륵자가 차륵을 누르는 힘 또는 라이닝이 디스크를 누르는 힘으로 제동통에서 발생하는 압력을 제동 레바에 의하여 그 힘이 증대되어 브레이크 슈에 가해진 유효한 전 브레이크 슈의 압력과 마찰계수를 곱한 값으로 얻어진다.

높은 제동력을 얻기 위해서는 제동통 압력을 높이면 되지만 제동통의 크기 및 압력에는 일정한 한도 내로 설계되어 있으므로 제동통과 제륵자 간에 지렛대 원리를 이용한 기계 제동장치로 제동력을 높이고 있다. 즉 기계 제동장치에서 제동통 피스톤에 발생한 힘과 브레이크 슈에 작용하는 전 압력과와의 비를 제동배율(L)이라 말하며, 기계 제동장치 자체의 마찰 손실, 완해 스프링 및 리턴

* 책임저자 : 한국철도기술연구원 연구원, 정회원

**한국철도기술연구원 연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

스프링 등의 반력을 무시한 값이다. 따라서 제동배율은 제동통의 피스톤 행정과 차륜, 브레이크 슈 간의 간격과의 비라고 할 수 있다. 기계 제동장치를 통하여 힘을 전달하는 경우에 기구 각부분의 마찰과 제동통 피스톤 완해 스프링, 대차에 붙여진 리턴 스프링 등의 저항력 때문에 제동통에서 발생된 힘의 일부가 감쇠되고, 브레이크 슈가 차륜의 중심고를 벗어나서 붙여질 경우에는 법선 이외의 분력이 생겨 브레이크 슈를 누르는 힘이 감소된다. 따라서 제동통의 피스톤 압력과 실제로 브레이크 슈가 차륜을 누르는 힘과의 비를 기계 제동기구의 전달 효율이라 한다. 이 전달 효율은 제동통의 압력, 제동시의 차량 속도 등에 따라 변화하는데 일반적으로 차륜 답면 제동방식의 차량은 80~90%, 디스크 제동방식은 90%를 적용한다. 이상으로 제동력은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$B = P \cdot L \cdot \eta \cdot f_m \text{ (kg)}$$

여기서, B : 제동력(kg), P : 전제동통 피스톤 압력(kg), L : 제동 배율, η : 제동전달 효율, f_m : 평균 마찰계수이다.

차축 디스크에 라이닝을 사용하는 디스크 제동방식의 제동력 계산 원리는 다음과 같다.

$$F_b = \text{패드압부력}(P) \cdot \text{패드마찰계수}(f) \\ \leq \text{축하중}(W) \cdot \text{점착계수}(\mu) \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

여기서, R_1 은 Wheel 반경, R_2 는 브레이크 작용반경이다. 그림 1은 KTX의 디스크브레이크의 작동원리를 나타낸 그림이다.

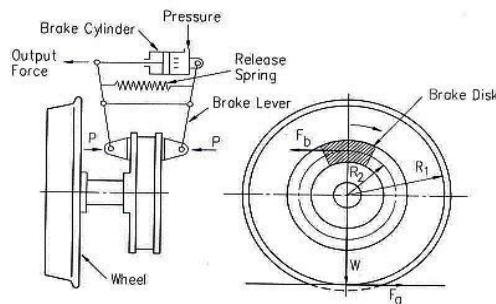


그림 1 디스크 브레이크의 제동 원리

3. 시험 조건

연속 제동시험 조건은 두 조건으로 시행하였다. 첫 번째 시험의 조건은 디스크 초기온도가 50℃ 이하에서 초기제동을 시작하였다. 제동 초속도는 그림 2 (a)와 같이 속도 160km/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. 두 번째 시험은 그림 2 (b)와 같이 제동 초속도를 이전 시험보다 속도를 올린 170km/h, 180km/h에서 시행되었다. 시험에 사용된 다이내모의 250km/h까지의 제한 속도를 가지고 있으나, 장비의 노후관계와 안전 문제로 인해 최고 속도 180km/h에서 시행하였다. 온도 측정은 디스크의 안쪽과 바깥쪽 4곳과 라이닝에는 2곳에서 열전대를 설치하여 측정하였고, 디스크 표면온도는 적외선 열화상카메라로 측정하였다. 적외선 열화상카메라의 시험 조건은 방사를 0.89로 하였고, 거리1.5m 떨어진 거리에서 촬영하였다.

앞으로 열전대(thermocouple)를 약자 T.C, 적외선 열화상카메라(infrared camera)를 I.R 카메라로 나타내었다.

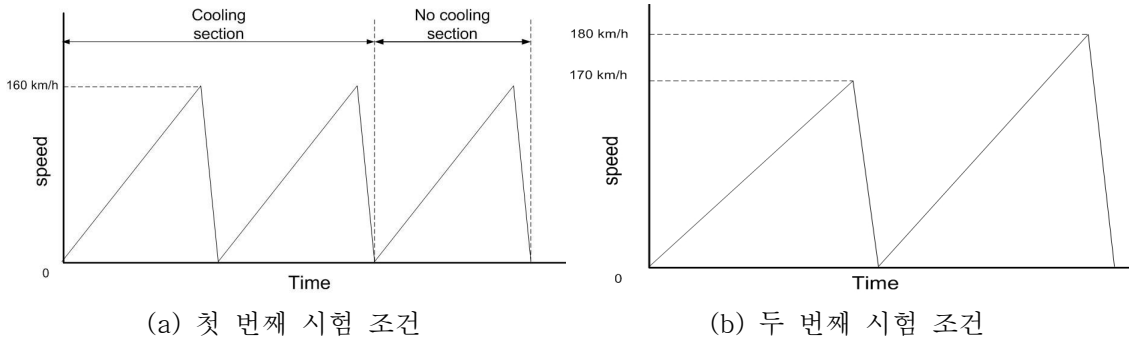


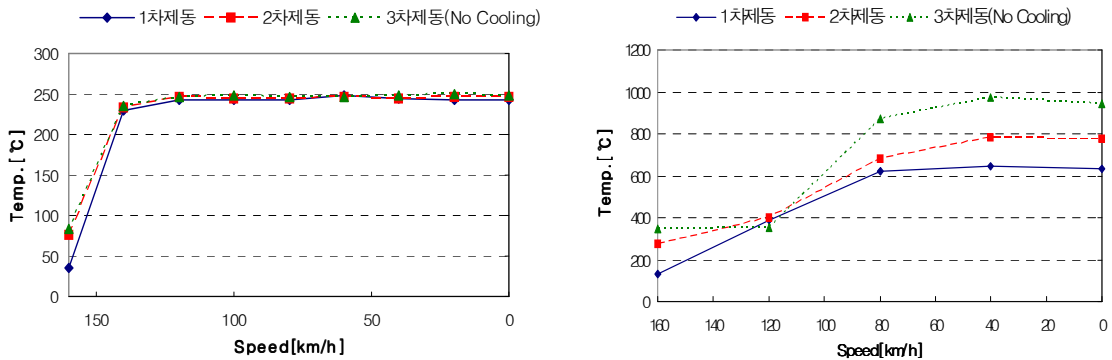
그림 2 제동 시험 조건

4. 시험 결과 및 고찰

그림 3 (a)는 T.C로 측정된 디스크의 온도 변화이다. 1~3차 제동을 보면 140km/h 이전 구간에서 온도 변화가 크게 상승하다가 이후 구간에서는 온도 변화가 거의 없는 일정하게 나타난다.

이는 시험에 사용된 시편이 KTX 고속용 디스크라 160km/h의 제동 초속도에서 큰 온도 변화를 보이지 않는 것으로 사료된다.

그러나 그림 3 (b)에서 나타난 라이닝의 경우는 디스크의 경우와 대조적으로 각 제동에서 속도 120km/h 구간 이후로 큰 온도 변화를 보이고 있다. 2차 제동과 3차 비냉각 제동에서 80km/h에서는 190℃, 40km/h에서는 194℃의 온도차를 보이고 있다. 이러한 결과로 KTX용 디스크와 라이닝의 마찰에 의해서 발생하는 열이 디스크보다는 라이닝에 더 많은 영향을 받고 있음을 알 수가 있다.



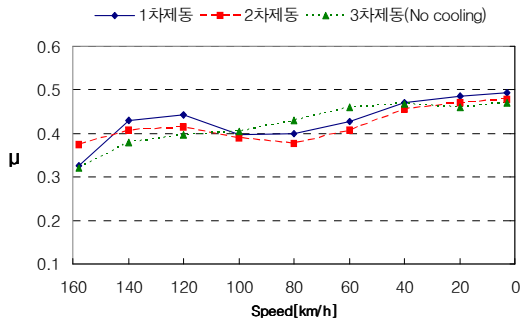
(a) 디스크 온도변화

(b) 라이닝 온도변화

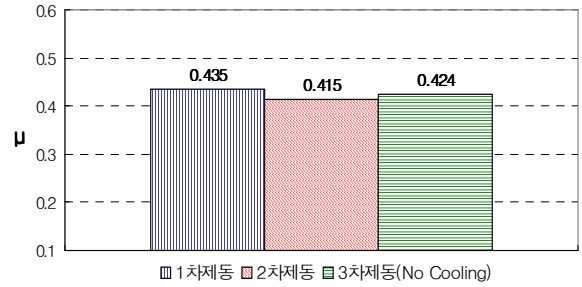
그림 3 KTX용 시편 온도변화(T.C 측정)

그림 4는 디스크와 라이닝의 마찰계수를 나타내고 있다. 연속 제동함에 따라 마찰계수가 3차 제동에서 일부 구간을 제외한 나머지 구간에서는 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 이런 현상은 디스크와 라이닝의 마찰에 의해 발생하는 열에너지의 영향을 받고 있음을 알 수가 있다.

3차 제동에서 속도 100~40km/h의 구간에서 1, 2차 제동보다 마찰계수가 높게 나타나는데, 이는 시스템에 오류로 인한 잘못 취득된 데이터로 사료된다.



(a) 순간 마찰계수



(b) 평균마찰계수

그림 4 디스크와 라이닝 마찰계수(KTX용)

그림 5는 각 제동 시에 I.R 카메라로 디스크 표면의 온도를 측정하여 나타낸 것이다.

그림 6은 T.C에서 측정된 라이닝의 최고 온도와 I.R 카메라에서 측정된 디스크의 최고온도를 각 제동별로 비교한 것이다.

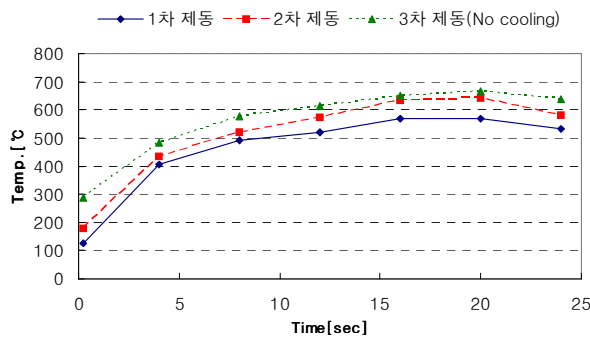


그림 5 I.R 카메라의 디스크 온도변화

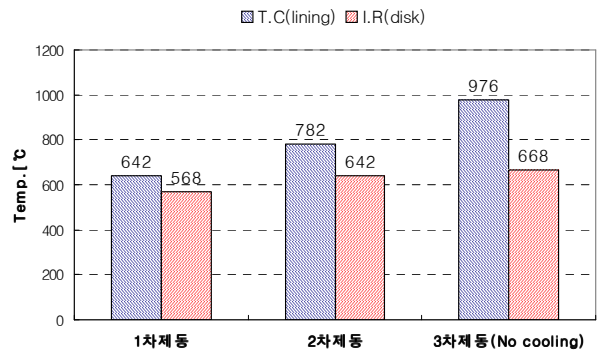
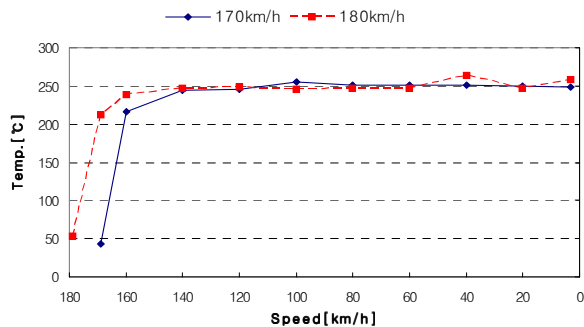
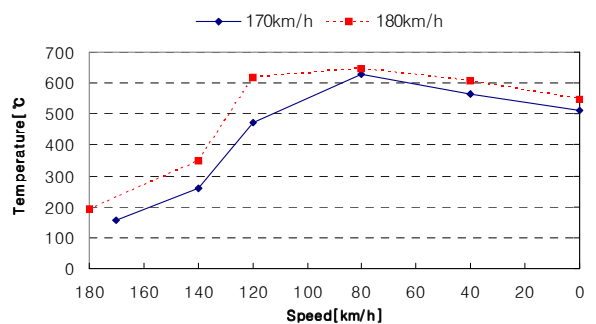


그림 6 T.C와 I.R 카메라 온도차

그림 7은 디스크와 라이닝의 온도 변화를 나타내고 있다. 그림 7 (a)를 보면 제동 초속도 160km/h에서 연속제동 시험했던 결과와 같이 속도 140km/h 이전 구간에서 온도 변화가 크게 보이다가 이후 구간에서는 온도 변화가 보이지 않고 있다. 1차 제동과 2차 제동의 온도 차이가 크게 나타나지 않는다. 그에 반해 1차, 2차 연속 제동에서 라이닝의 온도변화는 속도 140km/h에서 상승하기 시작해서 속도 80km/h 이후 구간에서 일정하게 낮아지는 것을 알 수가 있다.



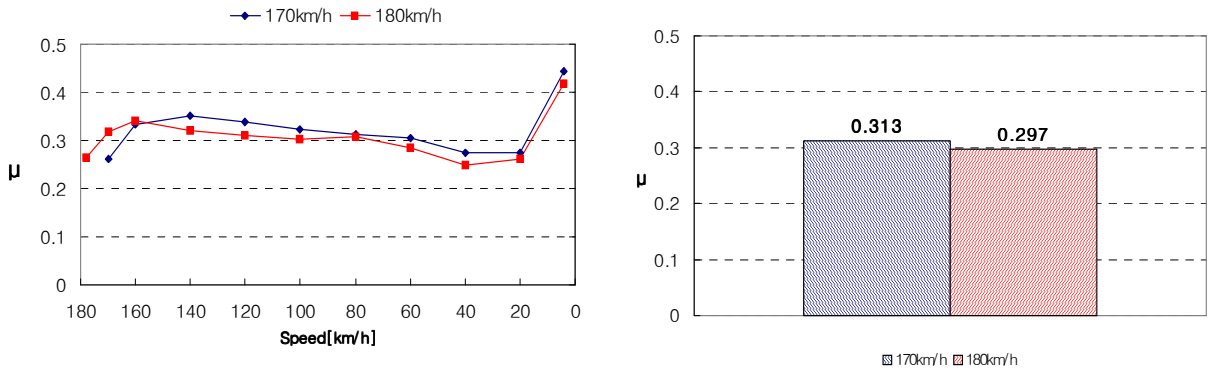
(a) 디스크 온도변화



(b) 라이닝 온도변화

그림 7 KTX용 시편의 온도변화(T.C 측정)

그림 8은 디스크와 라이닝의 마찰계수를 나타내고 있다. 제동 초속도 180km/h인 2차 제동의 마찰계수가 낮게 나타난다. 이는 디스크 부분에서는 각 제동에서 온도차가 나타나지 않고, 라이닝 부분에 각 제동에 온도차가 나타났다. 그 결과 디스크와 라이닝의 마찰계수는 디스크 부분보다는 라이닝 부분에서 마찰열에 영향을 받음을 알 수 있다.



(a) 순간 마찰계수

(b) 평균 마찰계수

그림 8 디스크와 라이닝 마찰계수(KTX용)

I.R 카메라로 측정된 디스크 표면의 온도 변화는 그림 9에 나타난다. I.R 카메라에서 측정된 온도 변화는 T.C에서 측정된 온도 변화와 비슷하게 나타나고 있다. 2차 제동은 1차 제동에 속도가 10km/h를 더 높고, 연속 제동한 것에 비해 온도차는 크게 나타나지는 않고 있다.

그림 10은 T.C에서 측정된 라이닝의 최고 온도와 I.R 카메라에서 측정된 디스크의 최고온도를 각 제동별로 비교한 것이다.

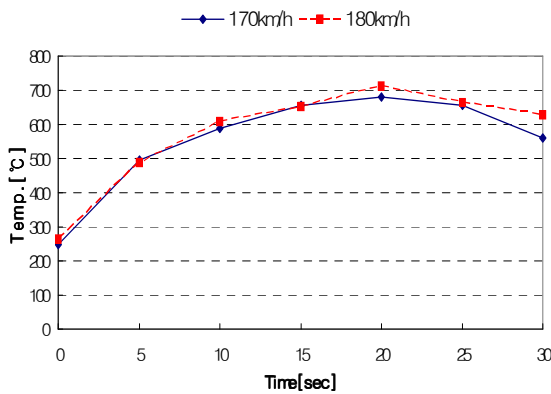


그림 9 I.R 카메라 디스크 온도 변화

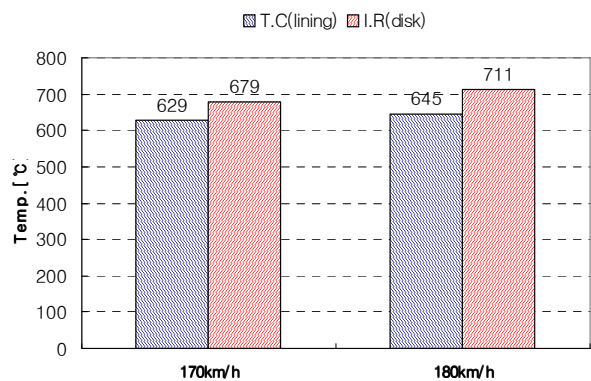
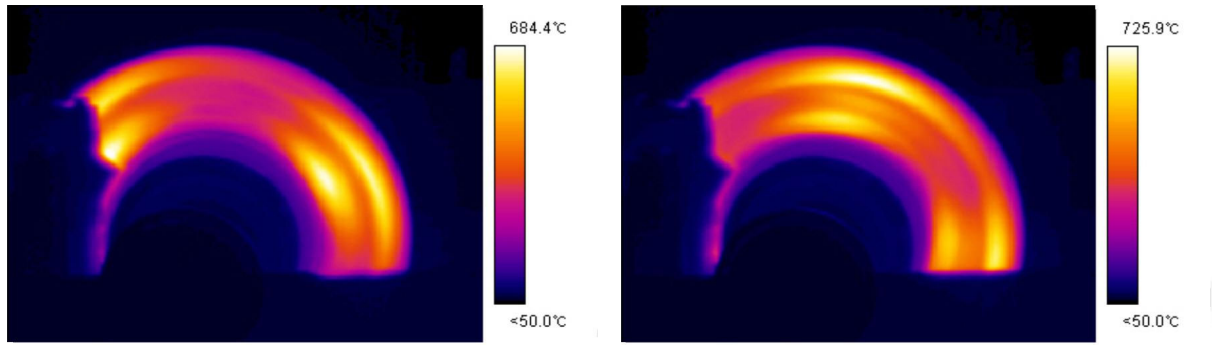


그림 10 T.C와 I.R 카메라 온도차

그림 11은 두 번째 시험 조건으로 디스크가 최고 온도일 때 I.R 카메라로 촬영된 것이다. 그림에서 오른쪽 바에 나타난 것이 온도를 색으로 표현한 것이다. 밝은색 부분이 디스크와 라이닝이 마찰로 인해 고온 부분인 것을 알 수 있다.



(a) 170km/h 제동

(b) 180km/h 제동

그림 11 제동 시 디스크 온도분포

5. 결 론

KTX용 디스크와 라이닝으로 연속제동 시험을 두 조건에 의해서 시행하였다.

KTX용 디스크가 고속용 디스크라 제동초속도 160, 170, 180km/h에서 큰 온도변화를 보이지 않고 있고, 마찰에 의해서 발생하는 마찰열에너지가 디스크 내부로 흡수되는 열에너지보다는 외부로 방출되는 열에너지가 높다는 것을 알 수가 있다. 또한 디스크와 라이닝에서 발생된 마찰열에너지가 디스크보다는 라이닝에 더 많은 영향을 주고 있음을 알 수가 있다.

디스크와 라이닝의 마찰로 인해 발생하는 열에너지가 높아질수록 마찰계수가 낮아지고 있다. 마찰계수는 연속제동에서 제동초기 온도에 의한 영향으로 제동 성능에 영향을 미치는 것을 알 수가 있다. 제동 디스크보다 라이닝의 온도변화가 마찰에 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

참고문헌

1. 차량 성능향상 핵심기술 개발보고서 (2005), 한국철도기술연구원
2. 최경진, 권석진, 이성철, 정진현, 1996, “철도차량에서 제동압부력이 제동마찰재의 마찰특성에 미치는 영향”, 대한기계학회 추계학술대회논문집, pp. 298 ~ 302.
3. An experimental investigation of hot spots in railway disc brakes, S. Panier, P. Dufrenoy and. D. Weichert, Wear Volume 256, Issues 7-8, April 2004, pp.764 ~ 773
4. 신유정, 최경진, 2005, “고속철도 제동제어 시험평가기술 방법에 대한 연구”, 한국철도학회춘계 학술대회논문집, pp. 250 ~ 256.