

고속차량용 디스크 제동 특성 및 제동제어 방법기술에 대한 연구

신유정*(한국철도기술연구원), 최경진(한국철도기술연구원), 곽재호(한국철도기술연구원)

A study on Characteristics of Disc Brake of & Technology of Brake Control System in High Speed Railway

Y. J. Shin (Rolling Stock Research Dept., KRRRI), K. J. Choi (Rolling Stock Research Dept., KRRRI), J. H. Gwak (Rolling Stock Research Dept., KRRRI)

ABSTRACT

Since the braking system of rolling stock is directly linked to its safety, ensuring reliability of braking system and evaluation of performance of it are very important. To develop the performance of braking system, it is required advanced technology and gradually various factors in the field test result.

This study is designed to analyze the air pressure control about braking force in rolling stock, also, by comparing braking force of high speed railway with that of high speed train. This paper suggests to establish a method of computation of braking force form the air pressure control. And The high speed train researches into patterns of braking system such as the train of speed up and introduction of electric and pneumatic braking system.

Key Words : Braking Force(제동력), KTX(Korea Train Express), Disk Brake(디스크 제동), 압부력(Air Pressure Force)

1. 서론

열차가 각 목적지에 안전하게 도착하거나 운행 중 제한적으로 차량의 속도를 제어하기 위한 수단이 필요한데 이러한 기능을 담당하는 것이 제동이다. 정지 시 필요에 따라 정상적인 속도제어로 정지시키는 상용제동과 돌발적인 사태가 발생하여 신속히 열차를 정지시켜야 하는 비상제동이 있다. 열차는 차량을 견인하는 견인력이 필요하지만 목적지점에 확실하고 신속히 정차시켜야하며 또한 정해진 제한속도를 초과하지 않고 운전속도를 조절할 수 있는 제동력이 필요하다. 고속철도에서 제동은 전기 발전 제동 방식인 회생 제동과 저항 제동을 사용하고 기계 제동 방식으로는 동력차의 담면 제동과 객차의 디스크 제동을 사용하고 있다. 이러한 제동 방식은 정상속도에

서의 감속 조건과 비상상황에서의 급제동으로 구분할 수 있으므로 비상상황의 제동거리는 설계 목표에 충실하게 비상제동거리를 충족하여야 한다. 일반적으로 열차가 주행 중에 갖는 운동에너지를 마찰열로 변환하는 마찰제동방식이 널리 사용되고 있다. 기계 제동의 제동통의 원력과 기초 제동장치의 레바 기구의 전달력은 마찰재의 마찰계수에 의해 운동에너지가 마찰열로 변화되는 것으로 열발생은 필연적이다. 기계 제동의 기본원리는 차량의 운동에너지를 제동장치에서 마찰에 의한 열에너지 등으로 변환시켜 차량의 속도를 감소시키는 것이다. 하지만 철도차량에서 사용하는 담면 제동이나 디스크 제동에서 모든 에너지를 열에너지로 소멸시키는 것은 불가능하므로 필연적으로 디스크나 패드의 진동 및 소음이 발생하게 된다.

본 논문에서는 고속열차 접촉제동에서 압부력 제어를 통해 관성력 및 제동력을 제어함으로써 디스크와 패드 사이의 불안정한 진동 및 소음 발생을 감소시키고, 마찰특성을 유지하면서 열적 안정성을 확보하기 위한 방안을 다이나모시험 및 수치해석을 통해 고찰하고자 한다.

2. 디스크 제동력의 이론적 배경

2.1 이론적 배경

제동력은 제륜자가 차륜을 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 제륜자 간에 지렛대 원리를 이용한 기계 제동장치로 제동력을 높이고 있다. 즉 기계 제동장치에서 제동통 피스톤에 발생한 힘과 브레이크 슈에 작용하는 전 압력과 비를 제동 배율(L)이라 말하며, 기계 제동장치 자체의 마찰 손실, 완해 스프링 및 리턴 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 감소되고, 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 담면 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 마찰계수

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 작용반경

3. 고속용 디스크 제동 마찰시험

3.1 다이나모 시험

고속용 디스크 제동 특성 분석을 위해 기존 철도용 실물 제동다이나모에 더블디스크에서 1개의 디스크를 시험기 축에 맞도록 지그를 제작하여 Fig.2와 같이 설치하였다. 패드는 2 세트 4개를 양면 압력으로 실차조건과 같이 하였다.

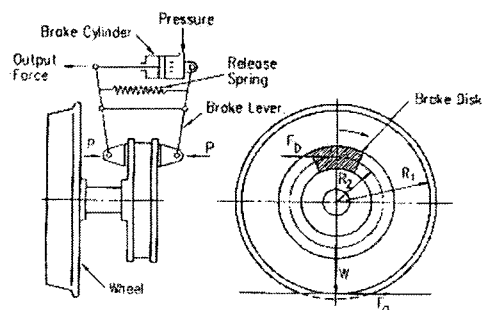


Fig. 1 Operating principle of disc brake in KTX

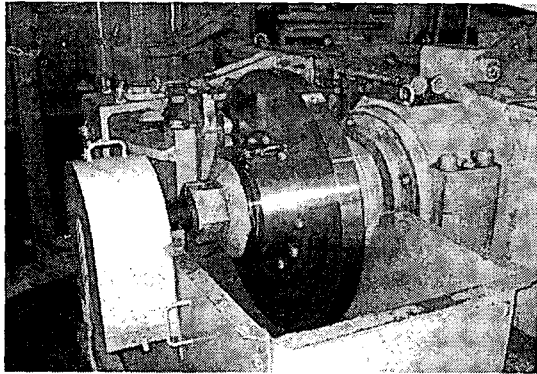


Fig.2 Existing dynamic equipment found Brake disc for KTX

패드와 디스크 사이의 마찰력은 이들 상호 간의 운동에 따라 결정되기 때문에 이론적인 해석이 매우 어렵다. 즉, 진동의 원인이 되는 마찰력이 패드와 디스크의 진동에 의해 결정되는 비선형 시스템이기 때문에 아주 단순한 형태로 모델링하더라도 해를 구하기가 쉽지 않다. 디스크와 패드가 접촉한 상태로 회전하면 접촉면에 마찰력이 작용하게 되고, 이로 인한 변위가 발생하여 표면에 변형이 생기게 된다. 이러한 변형에 의하여 접촉면에 변화가 생기기 때문에 마찰력에 변동이 생기고, 결과적으로 디스크와 패드에서 불안정한 진동이 발생하게 된다. 장비의 노후로 안전한 운전 상태를 고려하여 160km/h까지 시험했으며 압부력은 ALSTOM 사양의 디스크당 4톤으로 실험하였고, 순간 마찰계수는 제동시험 시간 동안 회전속도로부터 다음 식을 이용하여 순간 마찰계수를 구한다.

$$\mu = \frac{F_t}{F_b}$$

F_t 는 제동력[토크](kN), F_b 는 제륜자 압부력(kN), μ 는 순간 마찰계수를 나타낸다.

평균 마찰계수는 제동시험 시간 동안 회전속도로부터 순간 마찰식과 다음 식을 이용하여 평균 마찰계수를 구한다.

$$\mu = \mu(s), \quad \mu_m = \frac{1}{s} \int_0^s \mu(s) ds$$

s 는 실 제동거리(m), μ_m 은 평균 마찰계수

를 나타내고 있다.

3.2 다이내모 시험 결과 분석

고속용 디스크에 대한 다이내모시험 결과는 다음과 같다.

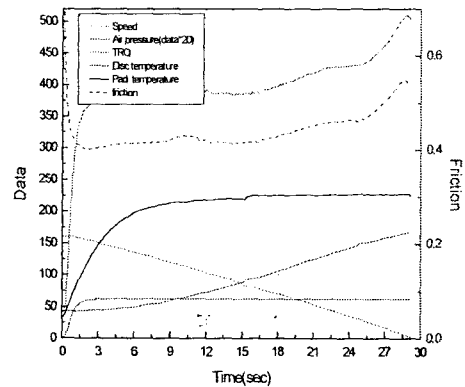


Fig. 3 Brake Test of speed 160km/h(D)

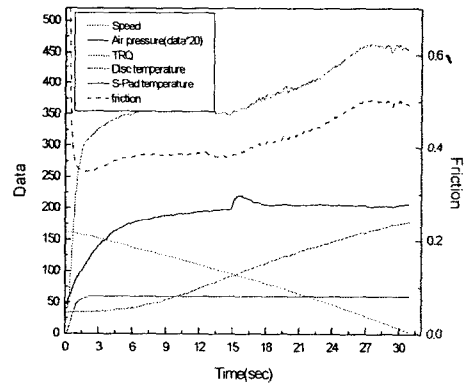


Fig. 4 Brake Test of speed 160km/h(C)

Fig. 3과 Fig. 4는 속도 160km/h에서의 비상 제동 특성시험을 보여주고 있으며, 순간마찰계수는 제동 초속도 160km/h에서 초기 증가한 후 일정하게 유지하다가 정지 직전 약 30km/h 이하에서 0.45에서 0.55까지 급격하게 상승하고 있음을 보여주고 있다.

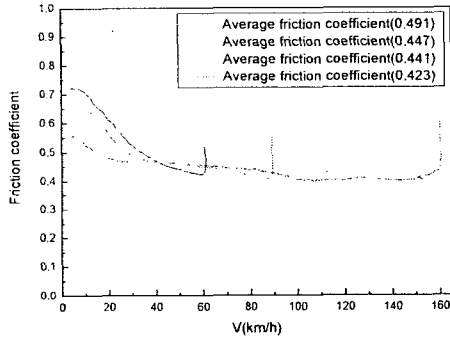


Fig. 5 Comparison of Friction coefficient by speed(D)

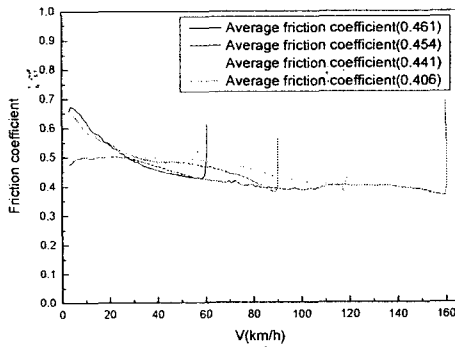


Fig. 6 Comparison of Friction coefficient by speed(C)

Fig. 5 ~ Fig. 6은 제동초속도 160, 120, 90, 60km/h에서 비상제동 시 순간마찰계수를 종합비교 분석한 결과로서 20~30km/h이하에서부터 순간마찰계수가 0.5에서 0.73까지 급격하게 상승하고 있음을 보여주고 있다.

이는 소결마찰재와 단조강의 금속계 마찰특성에서 기인한 순간마찰계수에 대한 영향으로 보이지만 재료적 개선방안의 필요성이 있음을 알 수 있다. 특히, 제동초속도가 160km/h인 경우보다 제동초속도 120, 90, 60kph인 경우의 시험결과를 보면, 약 30km/h이하에서부터 정지 직전까지 순간마찰계수가 급격히 상승하고 있음을 알 수 있다.

3. 2 KTX 제동장치별 제동력 계산

제동력은 캘리퍼 압부력과 패드의 마찰계수

의 곱으로 계산하며, KTX 고속철도의 동력차와 동력 객차의 담면 제동과 객차의 디스크 제동력을 대차당으로 계산하기 위하여 기계제동의 제동력에 영향을 미치는 공기 압력의 수치를 정리한 결과는 Table 1과 같다. 기계제동의 속도와 제동력의 변동의 관계에서 동력 대차의 제동은 제동력 변화 적용속도가 200kph이고 제동력은 200kph이상에서 대차당 20.4KN이다. 객차 제동력의 변환 속도는 같으나, 제동력은 215kph이상에서 34KN으로 적용되고 있다.

Bogie	Exchange of velocity (kph)	Exchange of air pressure (bar)
PC	V<160	3.0 → 3.6
	V>160	1.33 → 1.6
Exchange of velocity(kph)		
TC	V<215	3.6 → 3.8
	V>215	2.9 → 3.05

Braking force			
Before		After	
Unit(KN)	Bogie(KN)	Unit(KN)	Bogie(KN)
4,15/cylinder	16.6	5,1	20.4
1,475/cylinder	5.9	1,875	7.5
160		200	
5.35/disk	42.8	5.64	44.8
4.01/disk	32.1	4.26	34

Table 1 Braking force of 1 bogie set

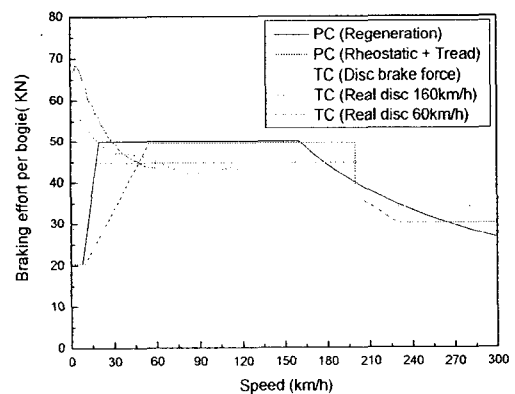


Fig. 7 Brake force by vehicle type

KTX는 단조강에 동계 소결제 패드를 사용하고 있고, 디스크는 축당 4개, 대차당 8개로 하여 마찰면적을 최대화하였다. 객차의 대차당 공기 제동력은 제동 실린더 스프링 반력 1.65kN, 단면적은 412cm², 캘리퍼의 비 0.93과 측정 공기압력 3.8bar, 평균마찰계수 0.35~0.45로 가정하면 35.66~45.84kN으로 계산된다. Fig. 7은 회생제동력과 고속용 디스크 다이나모 시험을 통해 얻은 순간마찰계수 결과값을 속도별로 제동력을 계산하여 표현한 그래프이다. 순간마찰계수가 고속에서보다 저속에서 더 급격하게 상승함에 따라 디스크 제동력도 저속에서 제동할 때 제동력이 많이 상승하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

패드와 디스크 사이의 마찰력은 이들 상호간의 운동에 따라 결정되기 때문에 이론적인 해석이 매우 어렵다. 일정한 압부력을 주고 다이나모 제동시험 시 순간마찰계수에 따른 제동력을 계산한 결과 정지 직전에서의 제동값이 30km/h 속도 이하에서 순간마찰계수가 0.5~0.73까지 급격하게 증가하면서 제동력은 50.9~74.4kN까지 상승된다. 이것은 정지직전의 제동력이 기준값 50kN을 초과하기 때문에 현재 KTX에 발생하는 제동시 소음에 커다란 영향을 미친다고 판단된다. 따라서, 압부력 제어를 통해 제동력의 초과기준치를 제어한다면, 점착력이 낮아져서 제동거리는 약간 길어질 수 있지만 저속구간이기 때문에 커다란 문제가 없을 것으로 생각되며 KTX의 제동시 소음/진동을 줄일 수 있다고 판단된다. 그리고 Disc Pad의 마모측면에서도 유리할 것으로 보인다. 이것은 현재 운용 열차의 제동 소음 및 진동에 미치는 현상과도 일치성을 보여주고 있으므로 객차의 순간 제동에 미치는 마찰계수 영향을 집중하여 검토할 필요가 있다.

참고문헌

1. 김완두, 함동호, 고속전철의 제동장치 기술개발. 대한기계학회지, 제34권, 제6호. pp.446~

453. 1994
2. 김완두, 고속전철의 제동시스템 기술현황. 기계와 재료, 제 6권 3호, pp. 61~68, 1994
3. 최강윤외, 고속철도 시험 및 시운전보고서-차량분야-. pp. 61~63, 2004. 6
4. UIC 541-4 2nd, Brakes with composition brake blocks, 94.1.1
5. 최경진, 이동형, 화차용 브레이크 슈의 제동에 미치는 영향, 추계철도학회 논문집, 2001.10.