주행 중 디스크 온도 변화와 열간 저더 임계속도와의 관계 예측

김 재 민 · 이 민 규 · 김 범 진 · 조 종 두*

인하대학교 대학원 기계공학과

A Prediction of the Relation between the Disc Brake Temperature and the Hot Judder Critical Speed

Jaemin Kim · Mingyu Lee · Bumjin Kim · Chongdu Cho*

Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received 2 January 2012 / Revised 18 June 2012 / Accepted 6 July 2012)

Abstract : In this paper, it was studied how the critical speed which could occur hot judder due to disk temperature. Through the dynamometer experiment, we measured the critical velocity and surface temperature when the hot judder occur on the disk break. Also with the critical velocity theory equation and the temperature change graph of factors which used in the equation, we was induced experiment equation including theory equation and experiment values. And it has compared with the method which approach as lineal. From this, we predicted the change of critical speed which could occur hot judder due to disk temperature. In addition, critical speed graph has compared with actual driving speed and disc temperature at a vehicle test. Therefore it was estimate to possibility of arising hot judder.

Key words : Hot spot phenomenon(열점 현상), Judder vibration(저더 진동), Dynamometer(다이내모미터), Thermo-elastic instability(열탄성 불안정성), Critical speed(임계속도)

Nomenclature

V	: sliding velocity, m/s
$\bar{K}$	: conductivity of material, W/m·°C
J	: mechanical equivalent of heat, J
α	: Coefficient of thermal expansion, 1/°C
E	: Young's Modulus, Gpa
$\bar{k}$	: mechanical equivalent of heat, J
z	: width of pad, mm
μ	: coefficient of friction
T	: temperature, °C

Subscripts

*	: experimental data
L	: critical speed

1. 서 론

최근 자동차의 고성능화가 진행되면서 운전자가 느끼는 주행 및 제동 안정성은 과거 어느 때보다 중요한 이슈가 되고 있다. 그 중에서도 제동 시 발생하는 소음 및 진동 문제는 운전자의 안정성 및 승차감 확보에 있어서 중요한 부분을 차지한다.

자동차 소음 진동 문제는 여러 기준으로 분류 할 수 있지만 발생하는 주파수 대역을 기준으로 크게 세가지로 나누어진다. 주로 소음 문제를 일으키는 고주파수 대역에서의 스켈(Squeal)과 중주파수 대역에서의 그론(Groan), 험(Hum) 등이 있고, 진동 문제를 일으키는 저주파수 대역에서의 저더(Judder)가 있다. 이 중 저더는 10~30Hz 영역에서 발생하는 진동으로 제동 시 운전자에게 직접적인 불쾌감과 제동력 저하 등의 문제를 일으킨다.

*Corresponding author, E-mail: cdcho@inha.ac.kr

저더 진동은 DTV 발생 과정을 기준으로 냉간 저더(Cold Judder)와 열간 저더(Hot Judder)로 구분된다. 냉간 저더는 디스크의 가공형상 및 조립상태의 불량 등으로 인한 초기 DTV에 의해 발생한다. 반면에 열간 저더는 제동 시 디스크와 패드 사이의 열탄성 불안정성(TEI : Thermo - elastic instability)이 발생하여 디스크가 국부적으로 열변형을 일으켜 DTV 변화가 발생한다. 이로 인해 차체에 심한 진동을 발생시키게 된다. 최근 장시간 주행하는 차량들의 잦은 제동으로 인해 열간 저더 현상이 문제 되어 많은 연구가 진행되고 있다.

열간 저더의 경우, 이론적인 접근 방식의 연구로는 디스크와 패드를 반무한 고체에서 일정한 속도로 미끄러지는 반무한 평판이라는 이상적 모델을 이용하여 표면 온도를 계산하였으며, TEI가 발생하는 임계속도를 연구하였다.^{1,2)} 또한, Cho 등은 다이내모미터 실험을 통하여 임계속도와 디스크 온도의 선형적인 관계를 연구하였다.³⁾ Cho 등은 열섬 현상과 브레이크 디스크의 진동 특성인 모드 형상(Mode shape)과의 관계를 연구했다.⁴⁾

본 연구에서는 디스크 온도에 따라 열간 저더가 일어나는 임계속도를 알아보기 위해 다이내모미터 실험을 통하여 디스크 브레이크의 열섬이 발생 할 때의 임계속도와 표면 온도를 측정하였다. 또한 임계속도 이론식과 여기에 사용한 인자들의 온도에 대한 변화 그래프를 이용하여 이론식과 실험값을 모두 포함하는 Semi-experiment 식을 유도 하여, 이를 선형적 접근방식과 비교하였다. 이를 통하여 디스크 온도에 의한 열간 저더 발생 임계속도를 변화를 예측해 보았다. 또한, 본 연구를 통해 얻어진 임계속도 그래프를 실차 테스트에서 구한 주행 속도 및 디스크 온도와 비교하여 실제 주행 시에 열간 저더 발생 가능성에 대해 알아보았다.

2. 이론적 배경

Fig. 1과 같이 반무한 고체(Disc)에 속도 V 로 미끄러지는 반무한 평판을 고려 한 모델을 통하여 두 면 사이의 열탄성 불안정성이 발생하는 임계속도 V_L 을 (1)과 같이 제안하였다.¹⁾

Fig. 1 Disc brake mode

$$V_L = \frac{4\overline{K^2}J^2}{(\mu\alpha E)^2} \cdot \frac{1}{\pi k z} \quad (1)$$

이 식은 열탄성 불안정성으로 인해 열섬을 일으키는 임계속도를 인자들에 대한 방정식으로 표현한 것이다.

(1) 식을 바탕으로 실험에서 측정한 임계속도를 V_L^* 이라 하고, 이 때의 디스크 온도를 T^* 라 하면 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$V_L^* = \frac{4\overline{K^{*2}}J^2}{(\mu\alpha^* E^*)^2} \cdot \frac{1}{\pi k^* z} \quad (2)$$

임계속도 방정식에 표현된 인자들의 온도의 변화에 대한 값을 알고, (1), (2)식을 연립하여 전개하면 디스크 온도에 대한 임계속도 변화 그래프인 $V_L(T)$ 을 얻을 수 있다.

$$V_L(T) \int (T^*, T) = V_L^* = \left[\frac{\alpha^* E^*}{\alpha(T) E(T)} \right]^2 \cdot \left[\frac{\overline{K(T)}}{K^*} \right]^2 \cdot \frac{\overline{k^2}}{k(T)} \quad (3)$$

(3)식으로부터 실험에 의해 측정한 임계속도와 디스크 온도인 V_L^* 과 T^* 를 구하고, 각 인자들의 온도 변화를 안다면 디스크 온도에 대한 임계속도 변화를 예측할 수 있게 된다.

3. 다이내모미터 실험

3.1 장치 구성 및 실험 방법

디스크 브레이크에서 열섬이 발생될 때의 임계속도와 디스크 온도를 측정하기 위해 다이내모미터 실험을 하였다. 다이내모미터의 구성은 동력계,

제동계, 계측 장치로 구성되어 있다. 동력계는 디스크 브레이크에 압력을 가하더라도 일정한 속도를 유지시키기 위해 Mitsubishi사의 HA-LFS-22k 서보 모터와 HC-MFC-J2S 컨트롤러를 사용하였다. 제동계는 시편의 형상 및 캘리퍼를 고정을 위해 자체적으로 지그를 제작하였으며, 유압 실린더를 이용하여 제동 압력을 가하였다. 계측 장치는 디스크 표면의 온도 분포를 확인하기 위해 적외선 열화상 카메라(Infrared camera)를 사용하였다. 실험에 사용된 디스크와 패드는 SUV 차량에 쓰이는 지름 17인치(Inch) 디스크와 패드를 사용하였다.

실험은 다이내모미터에 디스크와 패드를 장착하여 디스크를 일정한 속도로 회전시킨 후, 유압 실린더에 일정한 제동 압력을 가하여 디스크와 패드를 접촉 마찰시키면서 10분간 드래그 테스트를 진행하였다. 압력은 1.5bar와 2.0bar로 가압하여 압력의 변화에 따른 열섬 발생 여부를 측정하였다. 디스크 속도는 1,080rpm부터 60rpm씩 증가시키면서 1,500rpm까지 실험을 하였고 적외선 열화상 카메라로 디스크 표면 온도를 측정하였다.

Photo. 1 Infrared camera

Photo. 2 Chassis dynamometer

열섬의 발생여부는 열화상 카메라로 관측한 화면에서 육안으로 열섬 발생 유무를 식별하였고, 이때의 원주방향의 불균일한 온도 분포가 일어날 경우 열섬이 일어났다고 판단하였다.

3.2 제동 압력과 임계속도와의 관계

Table 1은 앞에서 설명한 다이내모미터 실험의 열섬 발생 유무를 표시한 것이다. 1.5 bar의 실린더 압력을 가한 실험조건에선 열섬이 관찰되지 않았으며, 2.0 bar에서는 1,320rpm 이후부터 열섬 현상이 관측되었다.

Fig. 2는 디스크 회전 속도 1,500rpm에서의 디스크 원주방향의 온도 분포 그래프이다. 1.5bar의 실린더 압력으로 실험 할 때는 원주 방향에서의 온도 변동이 거의 없는 일정한 값을 보여준다. 또한 이때의 디스크 표면 온도도 약 80°C로 측정되었다. 반면, 2.0bar의 압력에서는 원주 방향에서의 온도가 큰 폭의 변화를 보이고 있다. 또한 디스크 표면 온도도 평균 약 165°C를 보여 1.5bar에서의 디스크 표면보다

Table 1 Measurement condition of hot spot

rpm/pressure	15bar	2.0br
1,080 rpm	X	X
1,140 rpm	X	X
1,200 rpm	X	X
1,260 rpm	X	X
1,320 rpm	X	O
1,380 rpm	X	O
1,440 rpm	X	O
1,500 rpm	X	O

(a) 1.5 bar 1,500rpm

(b) 2.0 bar 1,500rpm

Fig. 2 Brake temperature graph at 1,500rpm of angular speed

큰 값을 나타낸다. 이 실험을 통하여 제동 압력의 크기는 디스크 표면온도 상승폭과 열섬 발생과의 관련이 있음을 알 수 있었다.

3.3 디스크 회전속도에 의한 열섬 발생 측정

Fig. 3과 Fig. 4는 디스크 회전 속도가 1,260rpm 부터 1,500rpm까지로 변화할 때 2.0bar 압력을 가했을 때 나타나는 디스크 표면 온도분포와 원주방향 온도 그래프이다. 1,260rpm에서는 디스크 표면온도가 거의 일정하게 유지되었다.

그러나 1,320rpm에서는 열화상 카메라로 촬영한 화면에서 국부적인 열 집중 현상을 관찰 할 수 있었

(a) 1,260rpm

(b) 1,320rpm

(c) 1,380rpm

(d) 1,440rpm

(e) 1,500rpm

(f) Measuring Point of Disc Temperature

Fig. 3 Brake disc temperature distribution (pressure 2bar)

(a) 1,260rpm

(b) 1,320rpm

(c) 1,380rpm

(d) 1,440rpm

(e) 1,500rpm

Fig. 4 Disc temperature graph (pressure 2bar) [Horizon : disc radial angle, Vertical : temperature (10°C/line)]

으며, 원주 방향으로 10°C 이상의 온도 차이가 발생하였다. 디스크 표면 온도는 140°C로 측정되었다.

1,320rpm 이상에서는 디스크 회전 속도가 증가할수록 디스크 표면에서의 열 집중현상이 뚜렷하게 발생하였으며, 1,500rpm에서는 25°C 이상의 온도차이를 보였다.

위 실험을 통하여 디스크에서 열섬 발생을 확인하였으며, 디스크 회전 속도가 커질수록 더욱 명확하게 열섬이 나타났다. 또한, 1,320rpm, 디스크 온도가 140°C에서 열섬이 발생하는 기준 임계속도로 정하였다.

4. 온도에 따른 임계속도 계산

4.1 온도에 따른 디스크 물성 변화

Table 2는 실험에 사용된 17인치 디스크의 100°C

Table 2 Brake disc properties by a temperature

온도 (°C)	Young's Modulus (Gpa)	Thermal Diffusivity (mm ² /s)	Thermal conductivity (W/(m*K))	Coefficient of Thermal Expansion
상온	109.1	15.9	55.1	5.6
100	105.7	13.8	51.0	8.3
200	100.3	11.8	46.4	11.1
300	96.4	10.3	43.1	12.4
400	94.3	9.1	40.5	13.0
500	93.5	7.9	37.9	13.5

Fig. 5 Disc brake properties by a temperature

온도별 탄성계수, 열확산계수, 열전도율, 열팽창계수이다. 이 표의 물성치 값을 사용하여 각 물성치의 온도변화에 따른 그래프를 그려 보았다(Fig. 5). 온도 사이의 값은 선형보간 하였다. 이 그래프는 디스크 물성치 값들이 온도에 의하여 변하는 양상을 보여준다.

4.2 온도에 따른 임계속도 예측

4.2.1 선형으로 접근한 임계속도 예측

Cho 등³⁾은 연구에서 온도에 따른 저터 발생 임계속도가 선형으로 변화한다고 하였다. 여기서 얻은 선형 임계속도 기울기를 평행이동시켜, 실험을 통해서 얻은 임계속도와 그때의 디스크 온도(1,320 rpm, 140°C)를 지나가는 직선을 그렸다, 이를 선형 임계속도로 정하였다(Fig. 6).

4.2.2 이론식을 통한 임계속도 예측

(3)식과 다이내모미터 실험에서 구한 임계속도 및 디스크 온도, 온도에 따른 물성 변화를 활용하여

※ Critical speed : Disk bulk temperature = 1,320 rpm : 140°C

Fig. 6 Linear critical speed graph using Shin's paper

Fig. 7 Critical speed due to a temperature

디스크 온도에 따른 임계속도 변화를 표현한 것이다(Fig. 7).

이론을 바탕으로 구한 임계속도 그래프는 온도의 증가에 따라서 100°C 이전에는 기울기가 급격하게 변하고, 300°C 이후에는 상대적으로 값의 변화가 적은 우하향하는 비선형적인 결과를 보여준다. 또한, 선형 임계속도 그래프와 비교 해 보면 100°C 이전과 300°C 이후에서는 큰 차이를 보이지만 100 ~ 300°C 사이에서는 비슷한 값을 보인다. 이와 같은 결과를 통해서 100 ~ 300°C 사이에서는 임계속도 값의 신뢰도를 보여준다고 판단할 수 있었다.

5. 실차 주행 중 열간저터 발생 여부 예측

5.1 실차 테스트에서 디스크 온도 변화 측정

4.2에서 온도의 변화에 따라 임계속도 값이 변하는 것을 보았다. 여기서 얻은 값을 통하여 실제 자동

차 주행 테스트에서 측정된 데이터를 적용하여 실제 주행 시 브레이크 디스크의 온도 변화를 알아보았다. 또한, 디스크 온도 변화를 임계속도 그래프에 적용하여 주행 중 열간 저터 발생 가능성을 예측해 보았다.

실차 테스트 방식은 실험차량이 기준 도로를 주행하면서 약 110회 정도 제동을 하였다. 테스트 차량의 속도는 제동 전 속도를 50km/h ~ 160km/h에서 일정한 제동압력을 가하여 디스크 온도를 측정하였다. 실험에 장착한 디스크 브레이크는 다이نام로 테스트에 사용한 것과 동일한 모델을 사용하였고, 디스크 온도 측정 방식은 디스크에 열전대를 장착하여 측정했다.

Fig. 8는 실차 주행 중 제동전과 제동 후의 디스크 온도 그래프이다. 제동 전에는 디스크 온도가 하락하고, 제동 후에는 온도가 상승 된다. 또한 차량 속도가 높으면 온도 상승 폭이 커진다. 실차 실험시, 디스크 최대 온도는 약 300°C까지 높아진다.

Fig. 9는 제동 전의 차량 속도와 Fig. 8에서 측정된 디스크 온도그래프를 이용한 제동 시 저터 발생 임계속도를 비교한 그래프이다. 이 그래프에서 임계속도는 제동과 주행에 따라 고,저를 반복되어진다. 그러나 장시간 주행으로 인한 잦은 제동에 의하여 임계속도는 낮아지는 경향을 보여준다. 또한 테스트 말미 고속에서 제동을 할 때 차량 속도가 디스크 임계속도보다 높아지는 구간이 발생하였다. 이는 고속 주행 시에 급 제동은 순간적으로 차량 속도가 디스크 임계속도를 넘어, 열섬으로 인한 열간 저터가 발생 할 수 있는 가능성을 보여준다.

Fig. 8 Disc brake temperature at a vehicle test

Fig. 9 Comparing with critical speed and car velocity at a vehicle test

6. 결 론

본 연구에서는 다이نام로미터를 이용하여 디스크 브레이크에서 열섬이 발생하는 임계속도와 이때의 디스크 표면 온도를 측정하였다. 또한 Dow 등 이 제안한 임계속도식과 실험 임계속도를 이용하여 온도에 대한 임계속도 변화 그래프를 그려 보았으며 Shin의 논문에서 구한 선형 임계속도 변화 기울기를 이용하여 비교 하였다. 그리고 실차 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 다이نام로미터를 이용하여 17인치 디스크 브레이크의 임계속도와 그 때의 디스크 온도를 측정 하였다. 디스크 회전속도가 1,320rpm에서 열섬의 발생이 시작되었고, 이때의 디스크 온도는 140°C였다. 디스크 회전속도와 패드 가압이 열섬 발생에 영향을 준다는 점을 실험을 통하여 알 수 있었다.
- 2) 임계속도식과 실험에서 구한 임계속도 값을 바탕으로 온도에 따른 임계속도를 예측 해 보았다. 임계속도는 온도 상승에 따라 우하향하는 비선형적인 거동을 보여준다.
- 3) 선형으로 접근한 임계속도 예측과 이론식을 통한 임계속도 예측을 서로 비교 하였다. 그 결과 100°C에서 300°C 사이에서는 유사함을 보였기 때문에 이 구간에서 임계속도 예측의 신뢰도가 있을 것으로 판단된다.
- 4) 실차 실험을 통하여 주행 시 열간 저터 발생 가능

성에 대하여 알아보았으며, 장시간 주행시 디스크 온도 상승으로 인하여 열섬 발생 임계속도가 낮아짐을 볼 수 있었다. 이 때 고속에서 급제동에 의하여 임계속도가 차량 속도를 넘어 열간 저터 발생 가능성을 증가하는 것을 알 수 있었다.

References

- 1) T. A. Dow and R. A. Burton, "Thermoelastic Instability of Sliding Contact in the Absence of Wear," *Wear*, Vol.19, pp.315-328, 1972.
- 2) K. J. Lee and J. R Barber, "Frictionally-excited Thermo-elastic Instability in Automotive Disc Brakes," *ASME Journal of Tribology*, Vol.115, pp.607-614, 1993.
- 3) C. D. Cho, D. S. Shin, S. I. Ahn, M. S. Lee and N. K. Lee, Influence of Environments on Automotive Disc Brake Chattering, *KSME Spring Conference Proceedings*, pp.697-702, 1997.
- 4) H. J. Cho, M. G. Kim and C. D. Cho, "A Study of Frictional Contact Vibration Influence on Hot Spot in Automotive Disk Brake," *Transactions of KSAE*, Vol.15, No.1, pp.154-161, 2007.