

디스크 브레이크에서 열섬 현상이 발생하는 원인과 저더 진동에 미치는 영향

The Origin and Effect of Hot Spot Phenomena on Judder Vibration in Automotive Disk Brake

조호준[†]널조종두* 김명구* 맹주원* 이재한*

Ho-Joon Cho, Chong-Du Cho, Myoung-Gu Kim, Ju-Won Maeng and Jae-Han Lee

Key Words : Hot spot, Judder vibration, Mode shapes, Finite element analysis, Frequency analysis

ABSTRACT

Hot spot phenomenon is caused by non-uniform contact area between brake pad and disk frequent braking. Brake disk deformed by locally concentrated heat increases magnitude of frictional vibration. And this deformation can highly influence the judder vibration. In this experimental study, vibration and hot spot was measured in accordance with rotation of disk and pressure of master cylinder for finding the factors that causes hot spot phenomena. For comparing hot spot aspects with mode shapes of disk, mode shapes were measured by conducting modal test, and analyzed by using finite element analysis. Relation between hot spot phenomenon, and mode shape, pressure of master cylinder and rotation speed of disk respectively, was achieved by hot spot measurement and frequency analysis.

1. 서론

일반적으로 회전운동을 하는 기계 장치의 제동은 운동에너지를 열에너지로 변환하여 운동 에너지를 소멸시킨다. 운동에너지를 열에너지로 변환하기 위해서는 마찰력을 사용하게 되며 이로 인한 마찰진동이 발생한다. 특히 자동차의 제동 장치에서 마찰 진동에 의해 많은 진동 현상이 발생하고 있다. 운전자의 안전과 직결되는 중요한 장치인 차량의 제동 장치는 보다 높고 안정한 성능이 요구되고 있다. 최근 장시간 주행하는 차량들의 잦은 제동으로 인한 열간저더(Hot judder) 현상이 문제시 되고 있다.

브레이크 작동 시에 느껴지는 큰 진폭의 저주파수(10~30Hz)¹⁾ 진동을 저더 진동이라고 한다. 보통 80~140km/h 사이에서 크게 나타나며 이 속도는 10~20Hz 사이의 저주파 가진 대역에 해당한다.^{2,3)} 또한 잦은 제동과 이로 인한 디스크의 진동 현상은 디스크와 패드간의 국부적인 접촉 현상을 발생시키게 된다. 이러한 불균일 마찰은 디스크 내의 국부적인 열 집중 현상을 발생시켜 열

섬(Hotspot)을 성장시킨다.^{4~8)} 열섬의 성장은 마찰 진동의 크기를 증가시키게 되어 저더 진동을 발생시키는 가진력으로 작용하고 있다.⁹⁾

디스크의 열섬 현상이 저더 진동에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 열섬을 만드는 주요 인자를 파악하는 것이 중요하다. 이러한 주요 인자를 파악하고자 디스크의 회전과 압력 변화에 대한 진동 특성을 측정하였다. 또한 열적외선 카메라(Infrared camera)을 이용하여 열섬 발생시의 온도를 측정하였다. 10 인치 디스크의 모달 실험(Modal test)을 수행하여 모드 해석을 수행한 해석치와 보정을 할 수 있도록 하였다. 또한 유한요소 해석(Finite Element Analysis)을 이용하여 디스크의 고유 모드를 확인하였다. 고주파 모드까지 해석을 수행하여 실험에서 발생하는 열섬 현상과의 관계에 대한 연구를 수행하였다.

2. 유한 요소 해석

2.1 브레이크 디스크의 모드 해석

2.1.1 브레이크 디스크 모델링

디스크 브레이크의 모드 형상과 고유 주파수를 파악하기 위해 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS 8.0 을 사용하였다. 사용된 요소는 Solid 187 (3-D 10-node Tetrahedral Structural

[†] 인하대학교 기계공학과
E-mail : chohojoon@hanmail.net
Tel : (032) 860-7321, Fax : (032) 868-1716

* 인하대학교

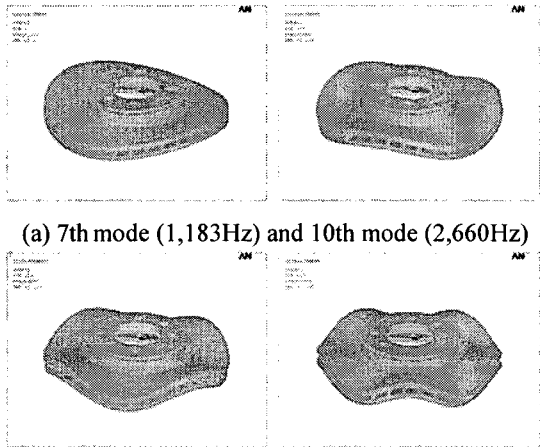
Solid)을 사용하였다. 총 요소 수는 28,914 개, 총 절점 수는 54,601 개이다. 재료의 물성치는 Table 1 에 나타내었다.

Table 1. Material Properties of Brake Disk and Pad

Materials	Young modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density kg/m ³	
Brake Disk	Cast Iron	120	0.25	7200

2.1.2 브레이크 디스크의 모드 해석 결과

본 실험에서 측정된 열섬과 관련 있는 디스크의 주 모드 형상은 Fig. 1 과 같다. 1183, 2660, 4252, 5900 Hz 는 각각 4, 6, 8, 10 개의 열섬을 발생 시킬 수 있는 모드 형상으로 판단할 수 있다.



(a) 7th mode (1,183Hz) and 10th mode (2,660Hz)

(b) 16th mode (4,252Hz) and 25th mode (5,900Hz)

Fig. 1 FE Analysis Results: Mode Shape of Brake Disk

3. 실험 방법

3.1 브레이크 디스크 모드 실험

3.1.1 실험 조건

브레이크 디스크는 총 90 개의 절점으로 나누었다. Random 가진을 주어 각 절점의 진동을 FRF 로 측정하였으며, 구속조건은 free-free 조건의 경계조건으로 실험을 수행하였다. 분석 장비로는 LMS Test.Lab 을 사용하였다.

3.1.2 모드 실험

브레이크 디스크의 강성이 비교적 높아 공진점이 고주파수 구간에 있는 것을 확인하고, 주파수 분해능을 1Hz 간격으로 하였고 주파수 범위는 1~4096Hz 까지 측정하였다.

3.2 열섬 및 진동 측정

3.2.1 실험 조건

저더 진동의 측정 실험은 샤시 다이내모 (Chassis-Dynamo)를 이용하여 회전수는 1200,

1320, 1500, 1800rpm, 마스터 실린더 (Master Cylinder)의 작동 압력은 1.5 와 2bar 로 주어 측정하였다. 또한 이때 발생하는 열섬 현상을 고속 적외선 카메라를 이용하여 촬영하였다.

Table 2. Measurement Conditions of hot spot and vibration

Pressure/rpm	1200	1320	1500	1800
Idling	○	○	○	○
1.5 bar	x	○	○	○
2 bar	○	○	○	○

3.2.2 열섬 및 진동 측정 실험

초기부터 저더 발생까지의 진동을 측정하여 FFT Analyzer 로 Auto-power spectrum 과 Cepstrum 을 얻어내었다. 주파수 분해능은 1Hz 간격으로 하였고 주파수 범위는 1~6000Hz 까지 측정하였다. 또한 열섬 발생시 고속 적외선 카메라를 이용하여 온도분포를 촬영하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 브레이크 디스크 모드 실험 결과

Fig. 2 는 브레이크 디스크의 FRF (Frequency Response Function)이다. 브레이크 디스크에서 열섬 현상과 관계 있다고 판단되는 모드의 주파수는 1156Hz와 2650Hz모드 형상은 Fig. 3 과 같다. 1156Hz는 4 개, 2650Hz는 6 개의 열섬을 생성시킬 수 있는 모드 형상이 발생했다. 또한 브레이크 디스크의 모드 형상은 저더 현상과 열섬의 발생과 상관관계가 있음을 예측할 수 있다.¹⁰⁾

Table 3. Results of FEA and measuring of mode frequency and shape of brake disk

Mode	FE Analysis (Hz)	Experiment (Hz)	Error (%)
7th	1,183	1,156	2.3
10th	2,660	2,650	1.2
16th	4,252	x	-
25th	5,900	x	-

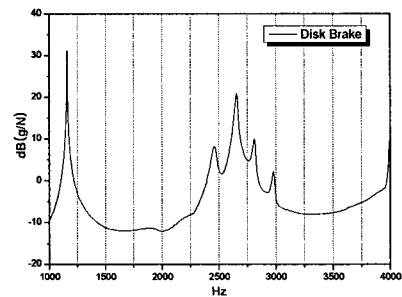


Fig. 2 FRF curve of brake disk

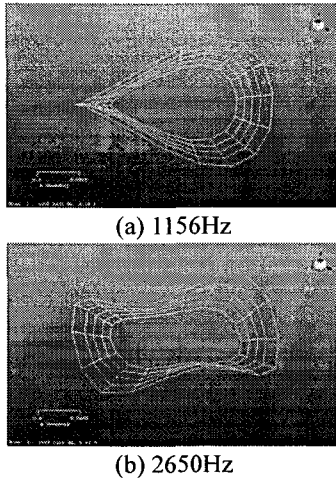


Fig. 3 Mode shape of brake disk

4.2 열섬 측정 결과

Fig. 4~6 은 회전수와 압력별 열섬 발생시의 열섬을 촬영한 사진이다. 압력에 따른 열섬의 현상은 높은 압력에서 보다 집중적이며 뚜렷한 양상을 보이고 있다. 열섬의 개수는 1320, 1500rpm (1.5bar)에서 8 개를 보이고 있으며 1500rpm (2bar), 1800rpm 에서는 10 개의 열섬 현상을 보이고 있다. 압력 변화에 따른 열섬의 발생은 회전수에 의한 발생보다 높은 차이를 보이고 있다. 압력이 높아져 가진력이 강하게 나타날수록 전체적인 랜덤 가진(Random excitation)의 크기가 높아지게 되어 회전수와 압력이 높아질수록 보다 많고 뚜렷한 열섬을 보이고 있다. 회전수가 낮으면서 높은 압력을 가하게 되면 열섬의 수는 높은 회전수에서 낮은 압력으로 가해질 경우의 개수와 거의 유사하게 나타나고 있다.

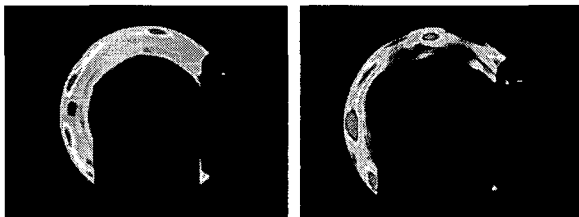


Fig. 4 Hotspots at 1320rpm (1.5bar and 2bar)

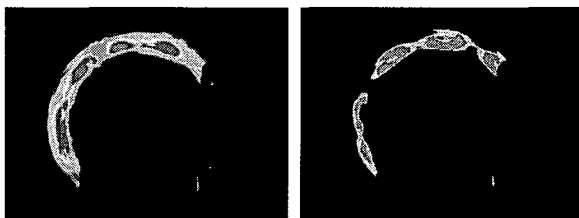


Fig. 5 Hotspots at 1500rpm (1.5bar and 2bar)

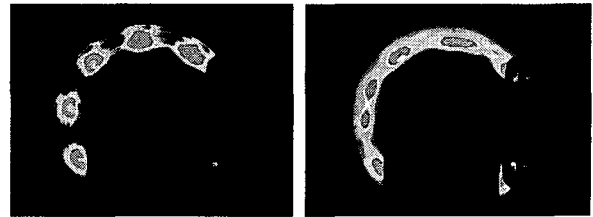
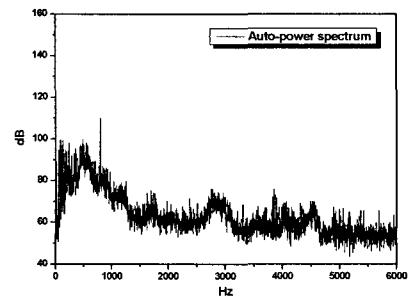


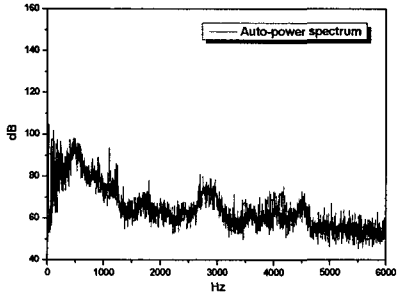
Fig. 6 Hotspots at 1800rpm (1.5bar and 2bar)

4.3 진동 측정 결과

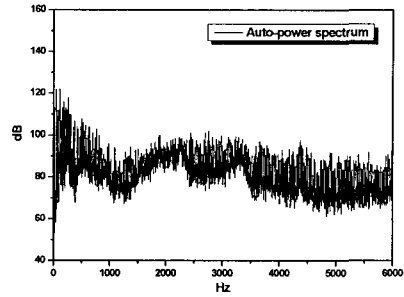
Fig. 7 은 회전수에 따른 idle 상태에서의 Auto-power spectrum이다. 주파수 변동량은 디스크의 고유 진동수를 잘 나타내고 있으며 회전차수 성분의 크기를 제외하고 회전수에는 상관없는 양상을 보이고 있다. Fig. 8~10 은 회전수와 압력에 따른 Auto-spectrum과 Cepstrum을 나타낸다. 1320rpm과 1500rpm에서 주파수 변동 양상을 볼 때 저주파를 제외하고 2400Hz 대역의 공진 주파수 크기가 상대적으로 높게 나타나고 있다. 1800rpm에서는 2400Hz와 3400Hz 대역의 공진 주파수 크기가 모두 높게 나타나고 있으며 열섬 측정 결과를 토대로 판단한다면 3400Hz대역의 가진 효과가 더 높게 나타나고 있다. Idle시의 주파수 변동 양상은 제동시 열섬이 진행되면서 점점 저주파 방향으로 이동한다. 2400Hz 대역의 주파수는 8 개의 열섬을 발생시킬 수 있는 4252Hz의 디스크 모드 주파수와 동일한 주파수로 판단되며 3400Hz의 모드 주파수는 5900Hz의 디스크 모드 주파수와 동일한 주파수로 판단된다. 이는 열섬의 높은 온도에 따른 재질 특성의 변화와 경계 조건 및 접촉 진동에 따른 비선형 때문에 공진 주파수 이동이 발생된 것으로 판단된다 Cepstrum에서 보이고 있는 회전 차수 성분과 $1/2f_0$ 분수 조화진동은 저더 진동을 발생시키는 성분이다. 두 성분은 열섬이 발생되기 전까지는 그 크기가 낮게 나타나게 되나 열섬의 발생과 진행이 지속되면서 높은 피크값을 보인다.



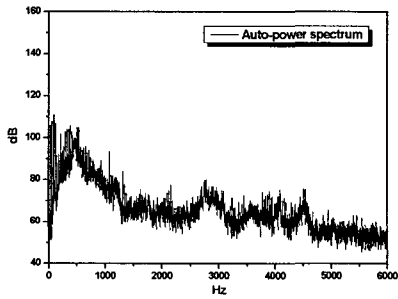
(a) 1320rpm



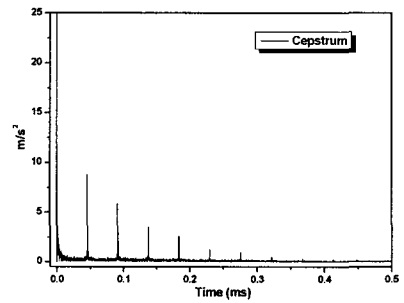
(b) 1500rpm



(c) Auto-power spectrum (2bar)



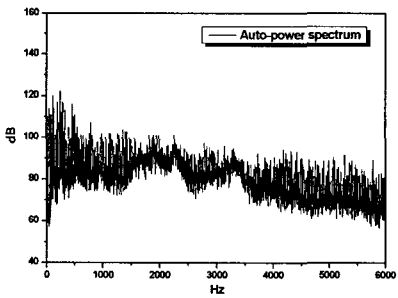
(c) 1800 rpm



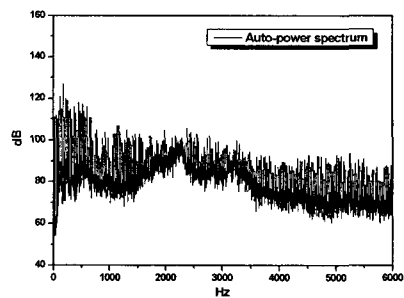
(d) Cepstrum (2bar)

Fig. 7 Auto-power spectrum at idle condition

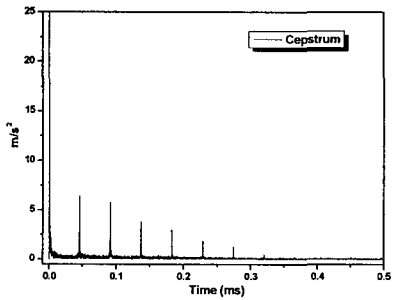
Fig. 8 Auto-power spectrum and cepstrum at 1320rpm



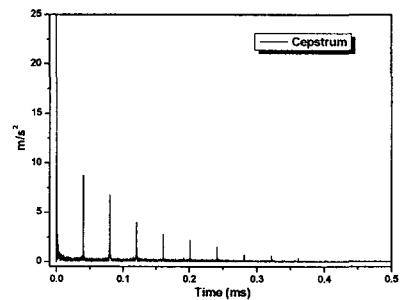
(a) Auto-power spectrum (1.5bar)



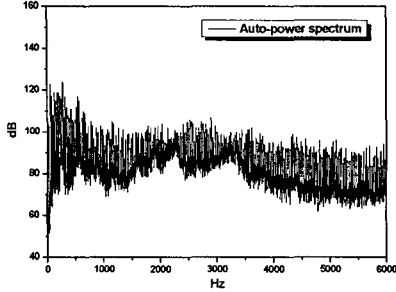
(a) Auto-power spectrum (1.5bar)



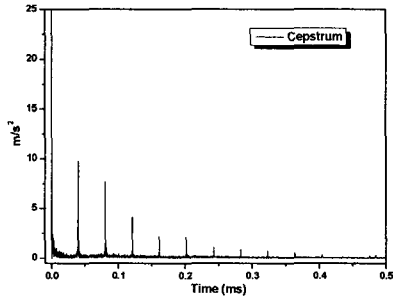
(b) Cepstrum (1.5bar)



(b) Cepstrum (1.5bar)

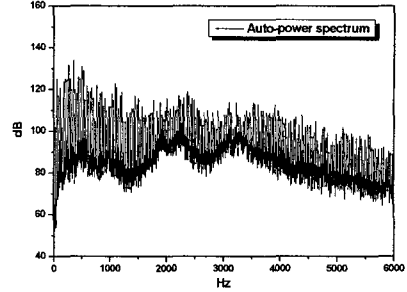


(c) Auto-power spectrum (2bar)

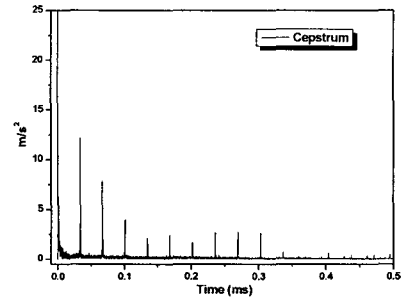


(d) Cepstrum (2bar)

Fig. 9 Auto-power spectrum and cepstrum at 1500rpm

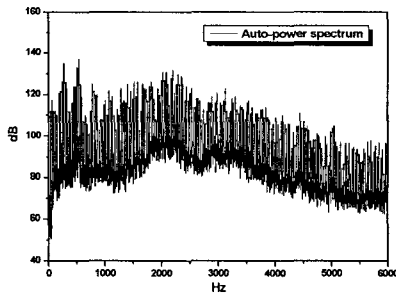


(c) Auto-power spectrum (2bar)

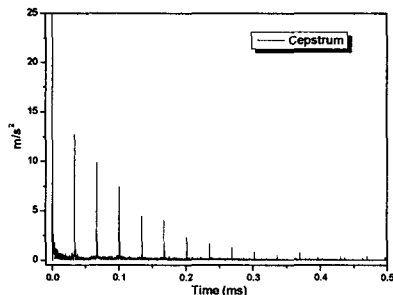


(d) Cepstrum (2bar)

Fig. 10 Auto-power spectrum and cepstrum at 1800rpm



(a) Auto-power spectrum (1.5bar)



(b) Cepstrum (1.5bar)

4.4 열섬과 진동 측정 결과 분석

저더 진동은 디스크와 패드의 회전 차수 성분과 $1/2f_0$ 분수조화진동 하모닉(Sub-harmonic vibration) 성분이 발생시키지만 열섬이 발생되어 하모닉 성분의 크기가 충분히 커지게 되어야 비로써 심각한 저더 진동이 발생된다. 열섬은 결과적으로 저더 진동 현상을 발생시킬 수 있는 가진력을 제공하는 원인이 된다. 가진력의 크기가 고주파수까지 가진될 수 있는 크기로 높아지면 디스크의 높은 주파수 모드의 고유 모드가 발생되어 불균일 접촉면을 발생시키게 된다. 또한 열섬 현상에 의해서 디스크의 재질에 대한 변화가 발생하고 더불어 마찰 접촉의 경계조건이 변화하게 되어 비선형적인 특성으로 디스크의 공진 주파수 이동을 발생시킨다고 판단된다.

5. 결론

1) 저더 현상과 관련된 브레이크 디스크의 주모드는 1110Hz, 2650Hz, 4252Hz, 5900Hz 등이 있으며 각각 4, 6, 8, 10 개의 열섬을 발생시킬 수 있는 모드들이다.

2) 열섬의 수는 디스크의 진동 모드와 관련이 있으며 압력의 크기가 높으면 고주파 대역까지 충분히 크게 가진할 수 있기 때문에 열섬의 개수가 늘어나게 된다.

3) 열섬의 성장에 의해서 디스크 온도가 증가하게 되고 디스크 자체의 물성치가 변화하며 마찰 접촉에 의한 경계 조건의 변화가 발생되어 비선형 현상으로 디스크의 공진 주파수 이동이 발생하는 것으로 판단된다.

4) 회전 차수 성분과 $1/2f_0$ 의 분수 조화 진동이 차량 조향장치계의 공진 주파수 범위에 들며 열섬의 성장이 이러한 성분의 크기를 증가시키기 때문에 심각한 저더 현상을 발생시킨다.

후 기

본 연구는 대학 IT 연구센터 육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음.

참고문헌

- (1) K. Lee, K. Suh, J. Kuk, and I. Chyun, 2001, $\frac{1}{2}$ analytical Study in Brake Judder Reduction of Medium Bus,? KSAE, Vol.9, No. 4, pp.148~156
- (2) K. A. Mohamed, 1997, $\frac{1}{2}$ rake Judder Analysis : Case Studies,? SAE 972027
- (3) K. Lee and B. D. Palph, 1998, $\frac{1}{2}$ ondition of Frictional Contact in disk Brake and Their Effect on Brake Judder,? SAE 980598
- (4) V. T. V. S. Ramachandra Rao, H. Ramasubramanian, and K.N. Seetharamu, 1989, $\frac{1}{2}$ nalysis of Temperature Field in Brake Disk for Fade Assessment? Wearme Stoffuebertrag, Vol. 24, No. 1, pp. 9~17.
- (5) A. Vries, and M. Wagner, 1992, $\frac{1}{2}$ he Brake Judder Phenomenon? SAE Technical Paper Series, SAE920554 (SP-914), pp. 25~33.
- (6) A. H. Dweib and A. F. D Souza, 1990, $\frac{1}{2}$ elf Excited Vibrations Induced by Dry Friction, Part 1: Experimental Study:, Journal of Sound and Vibration, Vol. 137, No. 2, pp.163~175
- (7) Seungwon Youn, and Mancheol Han, 1999, $\frac{1}{2}$ tudy on Brake Judder Caused by Disk Runout and Disk Thickness Variation? KSAE, Vol.7, No. 2, pp.378~386
- (8) Byungha Lee, Chongdu Cho, Sunguk Lee, and Hojoon Cho, 2004, $\frac{1}{2}$ omputer Simulation on Mechanical Evaluation of Ceramic Matrix Composite Automobile Brake Disks? PacRim5 Special Issue, 112[5], pp.S423-S427
- (9) S. Gassmann and H. G. Engel. 1993, $\frac{1}{2}$ xcitations and Transfer Mechanism of Brake Judder,? SAE 931880
- (10) 조호준 등, 2005, 디스크 브레이크에서 저더 진동을 발생시키는 원인 해석,? 추계학술발표회 논문집, 한국자동차공학회, pp. 1056~1061