한국소음진동공학회논문집 제16권 제8호, pp. 886~892, 2006.

디스크 브레이크에서 열섬 현상이 발생되는 원인과 저더진동에 미치는 영향

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

조 호 준† · 조 종 두* · 김 명 구*

Hojoon Cho, Chongdu Cho and Myoung-Gu Kim

(2006년 5월 19일 접수 ; 2006년 6월 23일 심사완료)

Key Words : Hot Spot(열섬), Judder Vibration(저더진동), Mode Shapes(모드 형상), Finite Element Analysis(유한요소해석), Frequency Analysis(주파수 분석)

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. 서 론

일반적으로 회전운동을 하는 기계장치의 제동은 운동에너지를 열에너지로 변환하여 운동에너지를 소멸시킨다. 운동에너지를 열에너지로 변환하기 위해서는 마찰력을 사용하게 되며 이로 인한 마찰진동이 발생한다. 특히 자동차의 제동 장치에서 마찰진동에 의해 많은 진동현상이 발생하고 있다. 운전자의 안전과 직결되는 중요한 장치인 차량의 제동장치는 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 ~ 30 Hz)[1] 진동을 저더진동이라고 한다. 보통 80 ~ 140 km/h 사이에서 크게 나타나며 이 속도는 10 ~ 20 Hz 사이의 저주파 가진대역에 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 열섬(hotspot)을 성장시킨다.[4~8] 열섬의 성장은 마찰진동의 크기를 증가시키게 되어 저더진동을 발생시키는 가진력으로 작용하고 있다.[9]

디스크의 열섬 현상이 저더진동에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 열섬을 만드는 주요 인자를 파악하는 것이 중요하다. 이러한 주요 인자를 파악하고자 디스크의 회전과 압력 변화에 대한 진동 특성을

† 책임저자 ; 정회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : joonbest@paran.com
Tel : (032) 860-7321, Fax : (032) 868-1716
* 정회원, 인하대학교 기계공학과

측정하였다. 또한 열적외선 카메라(infrared camera)을 이용하여 열섬 발생시의 온도를 측정하였다. 10인치 디스크의 모달 실험(modal test)을 수행하여 모드 해석을 수행한 해석치와 보정을 할 수 있도록 하였다. 또한 유한 요소 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

(1)브레이크 디스크 모델링

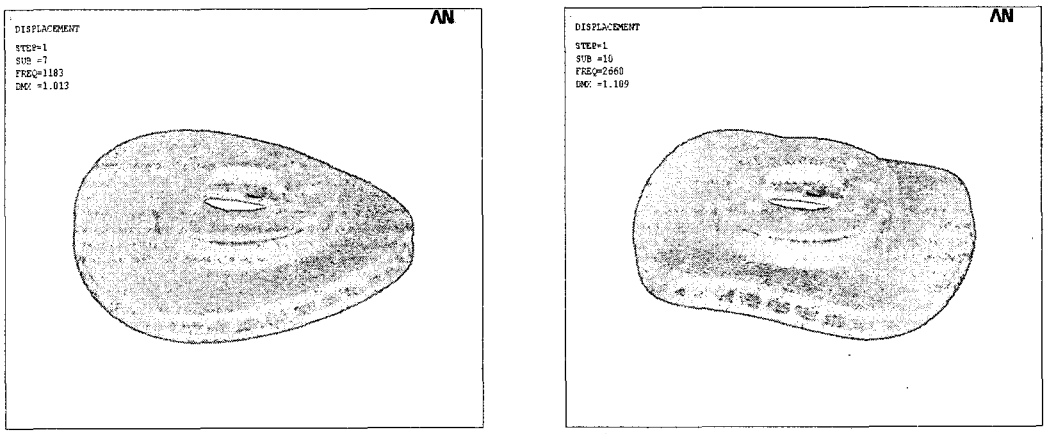
디스크 브레이크의 모드 형상과 고유 주파수를 파악하기 위해 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS 8.0을 사용하였다. 사용된 요소는 Solid 187 (3-D 10-node tetrahedral structural solid)을 사용하였다. 총 요소 수는 28,914개, 총 절점 수는 54,601개이다. 재료의 물성치는 Table 1에 나타내었다.

(2) 브레이크 디스크의 모드 해석 결과

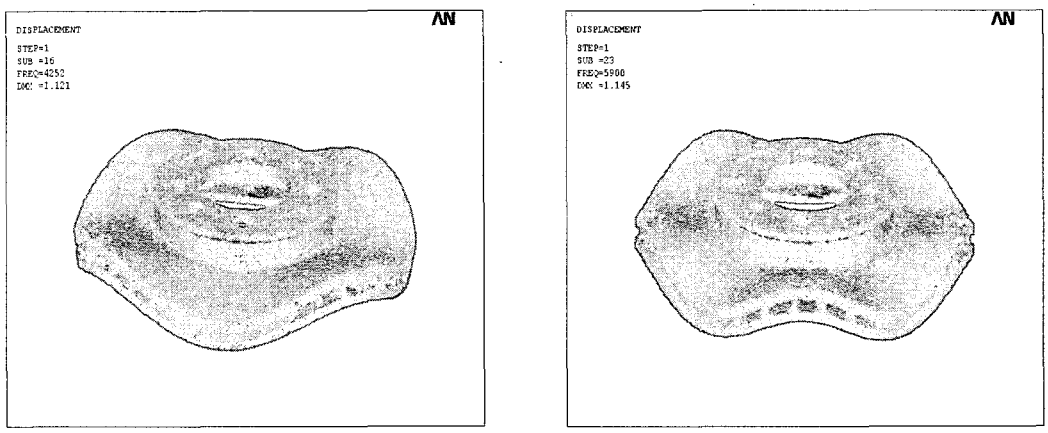
이 실험에서 측정된 열섬과 관련 있는 디스크의

Table 1 Material properties of brake disk

Materials	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density kg/m^3
Cast iron	120	0.25	7200



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



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

Fig. 1 FE analysis results : mode shape of brake disk

주 모드 형상은 Fig. 1과 같다. 1183, 2660, 4252, 5900 Hz는 각각 4, 6, 8, 10개의 열섬을 발생 시킬 수 있는 모드 형상으로 판단할 수 있다.

3. 실험 방법

3.1 브레이크 디스크 모드 실험

(1) 실험 조건

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

(2) 모드 실험

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

3.2 열섬 및 진동 측정

(1)실험 조건

저더진동의 측정 실험은 샤시 다이나모(chassis-dynamo)를 이용하여 회전수는 1200 rpm, 1.5 bar를 제외하고 1200, 1320, 1500 그리고 1800 rpm에서 마스터 실린더(master cylinder)의 작동 압력은 1.5와 2 bar로 주어 측정하였다. 1200 rpm의 회전수에서 1.5 bar의 압력을 주어 실험을 실시해 본 결과 디스크의 진동 모드를 충분히 가진시킬 수 없어 열섬 현상이 나타나지 않았기 때문에 본 회전수에서는 압력별 실험을 수행하지 않았다. 열섬 현상 발생시의 온도 분포 양상을 측정하기 위해 고속 적외선 카메라를 이용하여 촬영하였다. Table 2는 열섬 온도 측정과 진동의 실험 조건표를 나타낸다.

Table 2 Measurement conditions of hot spot and vibration

Pressure/rpm	1200	1320	1500	1800
Idling	✔	✔	✔	✔
1.5 bar	×	✔	✔	✔
2 bar	✔	✔	✔	✔

(2) 열섬 및 진동 측정 실험

초기부터 저더 발생까지의 진동을 측정하여 FFT analyzer로 auto-power spectrum과 cepstrum을 얻어내었다. 주파수 분해능은 1 Hz 간격으로 하였고 주파수 범위는 1 ~ 6000 Hz까지 측정하였다. 또한 열섬 발생시 고속 적외선 카메라를 이용하여 온도분포를 촬영하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 브레이크 디스크 모드 실험 결과

Fig. 2는 브레이크 디스크의 FRF(frequency res-ponse function)이다. 브레이크 디스크에서 열섬 현상과 관계있다고 판단되는 모드의 주파수는 1156 Hz와 2650 Hz 모드 형상은 Fig. 3과 같다. 1156 Hz는 4개, 2650 Hz는 6개의 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	×	-
25th	5,900	×	-

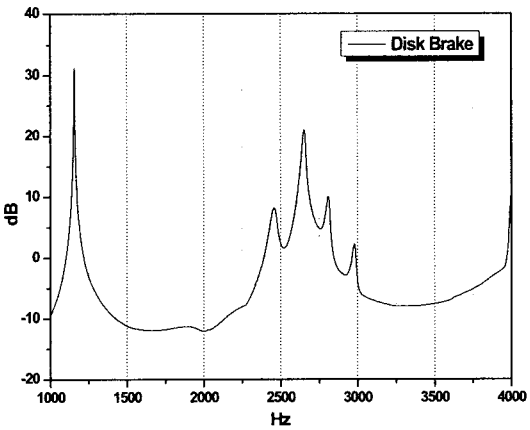
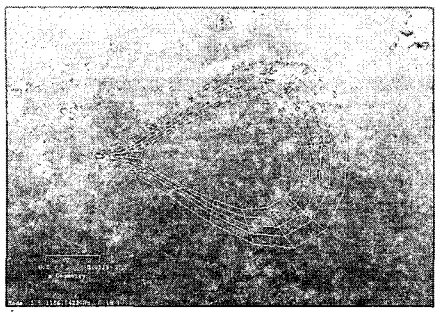
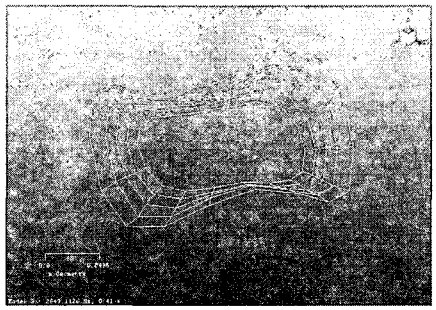


Fig. 2 FRF curve of brake disk



(a) 1156 Hz



(b) 2650 Hz

Fig. 3 Mode shape of brake disk

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

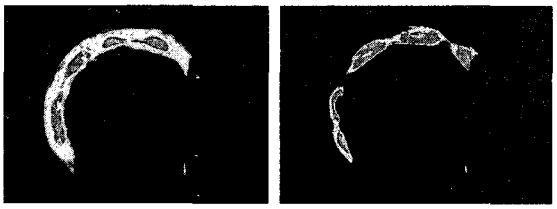


Fig. 5 Hotspots at 1500 rpm (1.5 bar and 2 bar)

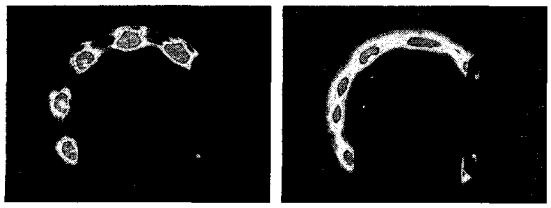
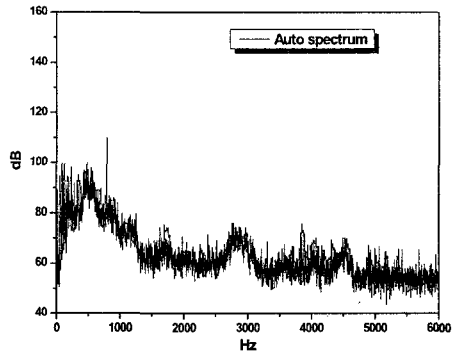


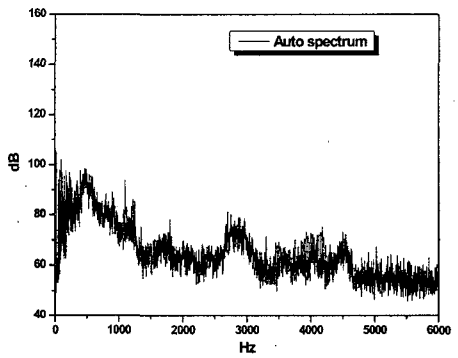
Fig. 6 Hotspots at 1800 rpm (1.5 bar and 2 bar)

4.2 열섬 측정 결과

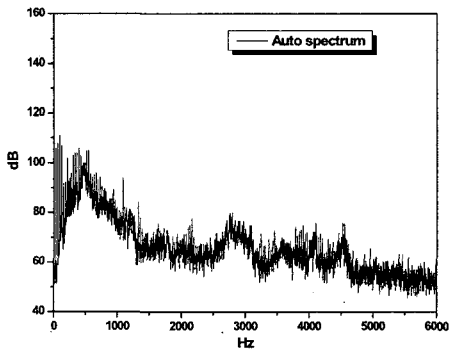
Fig. 4 ~ 6은 회전수와 압력별 열섬 발생시의 열섬을 촬영한 사진이다. 압력에 따른 열섬의 현상은 높은 압력에서 보다 집중적이며 뚜렷한 양상을 보이고 있다. 열섬의 개수는 1320, 1500 rpm(1.5 bar)에서 8개를 보이고 있으며 1500 rpm(2 bar), 1800 rpm에서는 10개의 열섬 현상을 보이고 있다. 압력 변화에 따른 열섬의 발생은 회전수에 의한 발생보다 높은 차이를 보이고 있다. 압력이 높아져 가진력이 강하게



(a) 1320 rpm



(b) 1500 rpm



(c) 1800 rpm

Fig. 7 Auto spectrum at idle condition

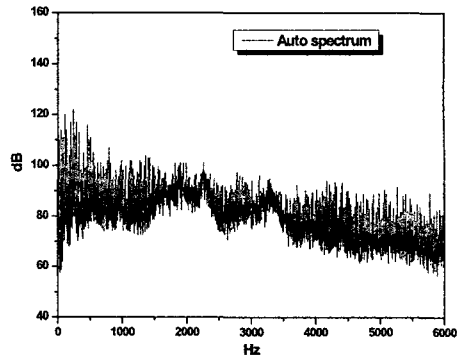
나타날수록 전체적인 랜덤 가진의 형태로 전주파수 영역에서 스펙트럼의 크기가 높아지게 되어 회전수와 압력이 높아질수록 보다 많고 뚜렷한 열섬을 보이고 있다. 회전수가 낮으면서 높은 압력을 가하게 되면 열섬의 수는 높은 회전수에서 낮은 압력으로 가해줄 경우의 개수와 거의 유사하게 나타나고 있다.

4.3 진동 측정 결과

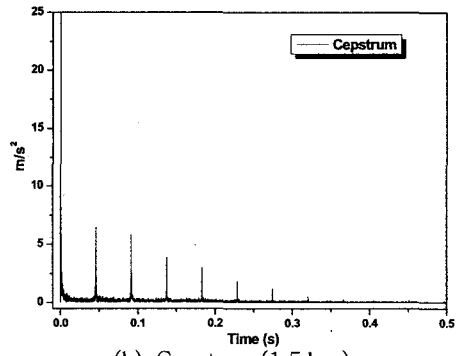
Fig. 7은 회전수에 따른 idle 상태에서의 auto spectrum이다. 주파수 변동량은 디스크의 고유 진동수를 잘 나타내고 있으며 회전 차수 성분의 크기와 주파수를 제외하고 회전수에는 상관없는 양상을 보이고 있다. Fig. 8 ~ 10은 회전수와 압력에 따른 auto spectrum과 cepstrum을 나타낸다. 1320 rpm과 1500 rpm에서 주파수 변동 양상을 볼 때 저주파를 제외하고 2400 Hz 대역의 공진 주파수 크기가 상대적으로 높게 나타나고 있다. 1800 rpm에서는 2400 Hz와 3400 Hz 대역의 공진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

4.4 열섬과 진동 측정 결과 분석

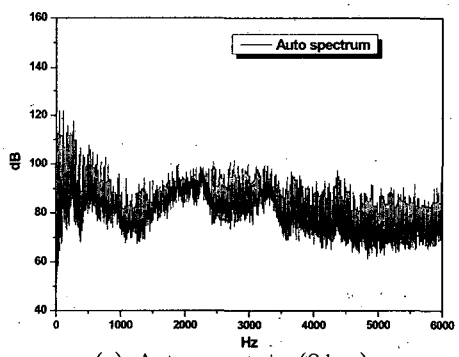
저더진동은 디스크와 패드의 회전 차수 성분과 $1/2f_0$ 분수조화진동 하모닉(sub-harmonic vibration) 성분이 발생시키지만 열섬이 발생되어 하모닉 성분의 크기가 충분히 커지게 되어야 비로서 심각한 저더진동이 발생된다. 열섬은 결과적으로 저더진동 현상을 발생시킬 수 있는 가진력을 제공하는 원인이 된다. 가진력의 크기가 고주파수까지 가진될 수 있는 크기로 높아지면 디스크의 높은 주파수 모드의



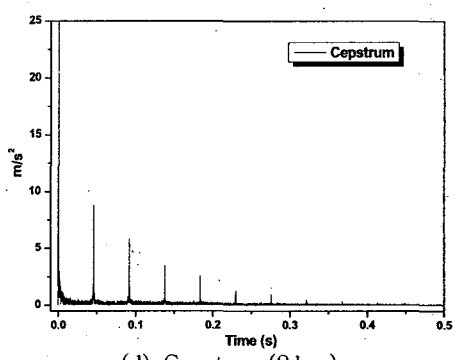
(a) Auto spectrum (1.5 bar)



(b) Cepstrum (1.5 bar)

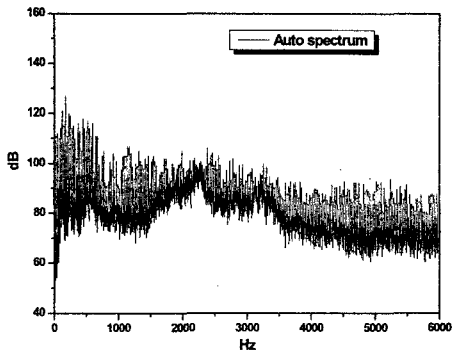


(c) Auto spectrum (2 bar)

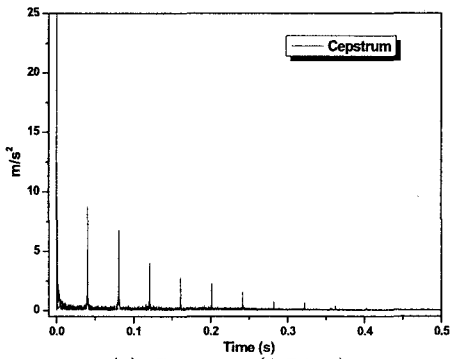


(d) Cepstrum (2 bar)

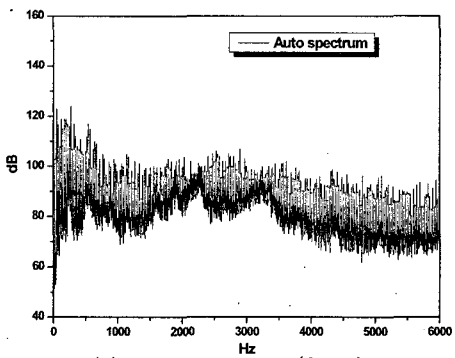
Fig. 8 Auto spectrum and cepstrum at 1320 rpm



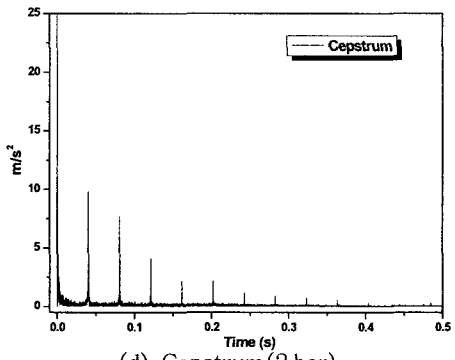
(a) Auto spectrum(1.5 bar)



(b) Cepstrum(1.5 bar)

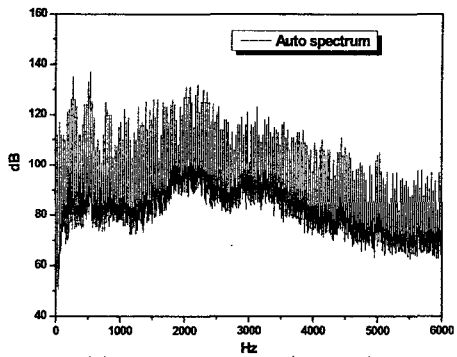


(c) Auto spectrum(2 bar)

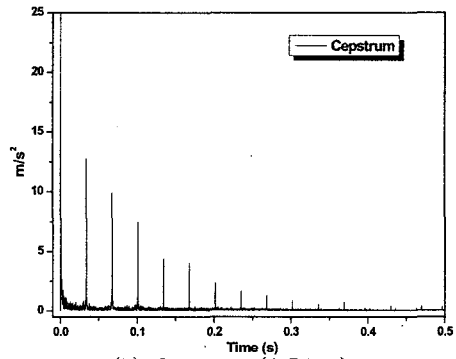


(d) Cepstrum(2 bar)

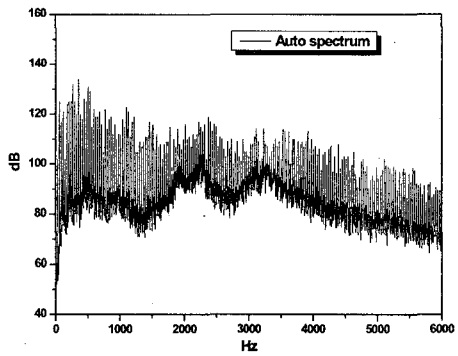
Fig. 9 Auto spectrum and cepstrum at 1500 rpm



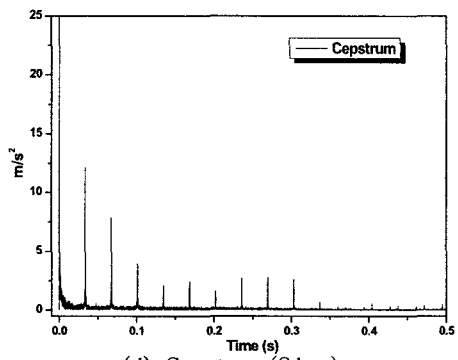
(a) Auto spectrum(1.5 bar)



(b) Cepstrum(1.5 bar)



(c) Auto spectrum(2 bar)



(d) Cepstrum(2 bar)

Fig. 10 Auto spectrum and cepstrum at 1800 rpm

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. 결 론

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

(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 분수조화진동이 차량 조향장치계의 공진 주파수 범위에 들며 열섬의 성장이 이러한 성분의 크기를 증가시키기 때문에 심각한 저더 현상을 발생시킨다.

참 고 문 헌

(1) Lee, K., Suh, K., Kuk, J. and Chyun, I. 2001, "Analytical Study in Brake Judder Reduction of Medium Bus", KSAE, Vol. 9, No. 4, pp. 148 ~ 156.

(2) Mohamed, K. A., 1997, "Brake Judder Analysis : Case Studies", SAE 972027.

(3) Lee, K. and Palph, B. D. 1998, "Condition of Frictional Contact in Disk Brake and Their Effect on Brake Judder", SAE 980598.

(4) Ramachandra Rao, V. T. V. S., Ramasubramanian, H. and Seetharamu, K. N., 1989, "Analysis of Temperature Field in Brake Disk for Fade Assessment", Wearme Stoffuebertrag, Vol. 24, No. 1, pp. 9 ~ 17.

(5) Vries, A. and Wagner, M., 1992, "The Brake Judder Phenomenon", SAE Technical Paper Series, SAE920554 (SP-914), pp. 25 ~ 33.

(6) Dweib, A. H. and D'Souza, A. F., 1990, "Self Excited Vibrations Induced by Dry Friction, Part 1 : Experimental Study", Journal of Sound and Vibration, Vol. 137, No. 2, pp. 163 ~ 175.

(7) Youn, S. and Han, M., 1999, "Study on Brake Judder Caused by Disk Runout and Disk Thickness Variation", KSAE, Vol. 7, No. 2, pp. 378 ~ 386.

(8) Lee, B., Cho, C., Lee, S. and Cho, H. 2004, "Computer Simulation on Mechanical Evaluation of Ceramic Matrix Composite Automobile Brake Disks", PacRim5 Special Issue, Vol. 112, No. 5, pp. S423 ~ S427.

(9) Gassmann, S. and Engel. H. G., 1993, "Excitations and Transfer Mechanism of Brake Judder," SAE 931880.

(10) Cho, H., Kim, M., Maeng, J. and Cho, C. 2005, "Analysis of the Cause for Judder Vibration of Automotive Disk Brake", KSAE 2005 Fall Conference, pp. 1056 ~ 1061.