

디스크 브레이크에서 접촉 마찰 진동이 열섬에 미치는 영향 연구

조 호 준 · 김 명 구 · 조 종 두*

인하대학교 기계공학과

A Study of Frictional Contact Vibration Influence on Hot Spot in Automotive Disk Brake

Hojoon Cho · Myoung-Gu Kim · Chongdu Cho*

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

(Received 20 June 2006 / Accepted 7 August 2006)

Abstract : Hot spot phenomenon that occurs, during judder vibration, is locally concentrated heat due to friction between brake disk and pad. It is important to understand the reason behind hot spot phenomenon, for reduction of judder vibration. In this experimental study, experiments were performed in accordance with rotation speed of brake disk, pressure of master cylinder and pad length for achieving different aspects of hot spot phenomenon. Temperature distribution of hot spot was obtained by using the infrared camera. As the hot spot occurred, vibration was measured and frequency analysis was performed. Finite element analysis of thermal deformation of disk was performed by using temperature distribution that was achieved by experimental results. And mode shapes of disk was analyzed by finite element analysis and compared with experimental results. It was observed that the excitation frequency band of frictional contact and frictional force mainly affects the hot spot phenomenon.

Key words : Hot spot phenomenon(열섬 현상), Judder vibration(저더 진동), Frequency analysis(주파수 분석), Thermal deformation(열적 변형), Mode shape(모드 형상), Finite element analysis(유한요소해석)

1. 서 론

차량의 제동은 브레이크 디스크와 패드 간의 마찰력을 이용하여 운동에너지를 열에너지로 변환한다. 그러므로 디스크와 패드간의 마찰 접촉은 제동시 많은 구조 진동 및 소음 현상을 발생시킨다. 저더 진동(Judder vibration) 현상은 차량의 제동 성능을 악화시킬 뿐만 아니라 운전자의 안전에도 막대한 악영향을 끼친다. 저더 현상은 일반적으로 열간 저더(Hot judder)와 냉간 저더(Cold judder)로 나뉘는데 최근 장시간 주행하는 차량들의 잦은 제동으로 인한 열간 저더 현상이 주로 문제시 되고 있다. 저더

진동의 주파수 범위는(10~30Hz) 차량의 조향 장치(Steering system)의 공진 주파수 대역 범위에 있기 때문에 브레이크 시스템에 저더 진동이 발생되면 순간적으로 조향 장치를 불안정하게 만든다.^{1,2)} 그러므로 저더 진동현상을 제거하거나 감소하기 위해 원인을 규명하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다.

저더 진동은 디스크 내의 열섬(Hot spot)이 발생되어 브레이크 디스크와 패드 간의 불균일 접촉면에 의해 발생된다. 브레이크 디스크와 패드의 마찰에 의한 내부 열이 전체적으로 확산되어 나가기 전에 국부적으로 집중되어 불균일 열변형을 발생하게 된다.³⁻⁶⁾ 그리고 디스크에 국부적인 열집중이 커지면 브레이크 디스크와 패드 간의 마찰이 불균일

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

하게 발생한다. 국부적인 열집중 현상은 브레이크 디스크의 진동 특성인 모드 형상(Mode shape)과 관계가 있다.

브레이크 디스크의 열섬 현상과 접촉 간의 관계를 규명하기 위해 디스크 브레이크의 회전수, 마스터 실린더 압력 그리고 패드 길이에 따른 디스크 표면의 열섬 온도 분포와 진동을 측정하였다. 열 적외선 카메라를 이용하여 디스크 표면의 열섬 온도를 측정하였으며 열섬 발생 시의 진동을 측정하여 주파수 분석(Frequency analysis)을 수행하였다. 패드의 길이에 따른 열섬 양상을 파악하기 위해 패드 면적을 길이 방향으로 감소시켜 실험을 수행하였다. 또한 열섬 발생 시 브레이크 디스크의 열변형을 예측하기 위해 측정된 열섬의 온도 분포를 이용하여 온도에 따른 브레이크 디스크의 열변형 유한요소해석(Thermal deformation finite element analysis)을 수행하였다. 열섬의 발생 양상과 브레이크 디스크의 진동 모드와의 관계 비교를 위하여 실험 결과를 바탕으로 디스크의 진동 모드에 대한 유한요소해석을 수행하였다.

2. 브레이크 디스크의 열변형과 모드 해석

열섬 현상 발생 시 고속 적외선 카메라(Infrared camera)로 측정하여 브레이크 디스크의 온도 데이터를 얻었고 이 데이터를 이용하여 열변형을 해석하였다. 또한 브레이크 디스크의 모드 형상과 모드 주파수를 파악하기 위해 진동 모드의 유한요소해석을 수행하였으며 모달 실험(Modal testing)을 통해서 얻어낸 결과를 바탕으로 유한요소해석을 보정하였다.

2.1 브레이크 디스크의 모델링

브레이크 디스크의 열변형과 진동 모드를 해석하기 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 8.0을 사용하였다. Fig. 1은 브레이크 디스크의 유한요소 모델이며 사용된 요소는 SOLID 187 (3-D 10-node tetrahedral structural element)를 사용하였고 구조 해석 모듈의 선형 열해석을 수행하였다. 열변형 해석에서 경계 조건은 실험에서 측정된 온도인 14.5°C로 주었으며 각 절점에 온도분포를 입력하였다. 구속

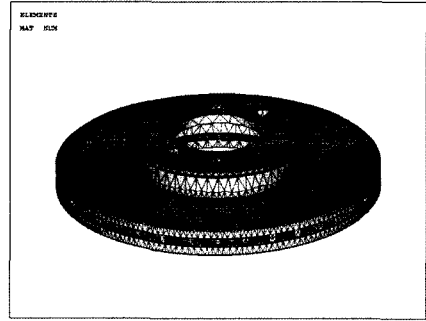


Fig. 1 FE model of brake disk

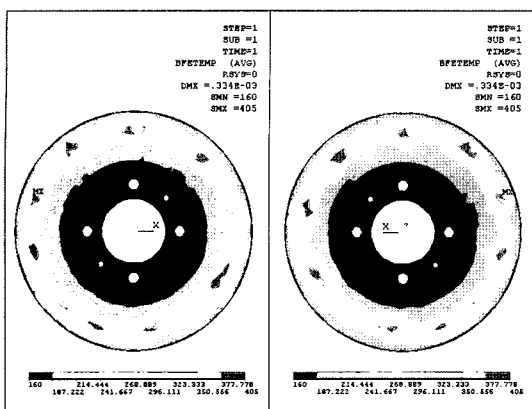
Table 1 Material properties of brake disk and pad

Materials	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density (kg/m ³)	Thermal expansion coefficient(/°C)
Cast iron	120	0.25	7200	1.1×10 ⁻⁵

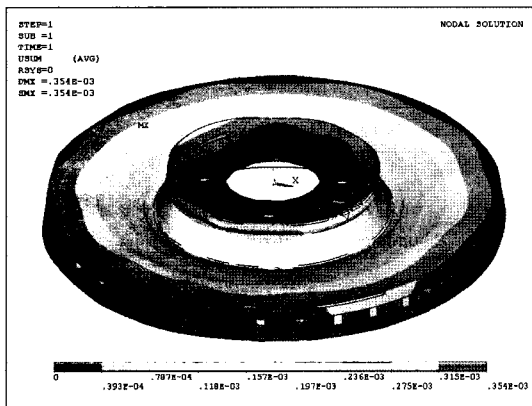
조건은 디스크와 샤시 다이내모(Chassis dynamometer)에 볼트 체결 부위와 샤프트(Shaft)접촉 부위에 완전 구속 조건을 부여하였다. 총 요소의 개수는 28914개이며 절점 수는 54601개를 사용하였다. 브레이크 디스크의 물성치는 Table 1과 같다. 또한 진동 모드 해석에서 경계 조건은 모달 실험 경계 조건과 동일한 free-free 상태로 주었으며 열해석과 동일한 유한요소 모델 및 물성치를 사용하였다.

2.2 브레이크 디스크의 열변형 해석 결과

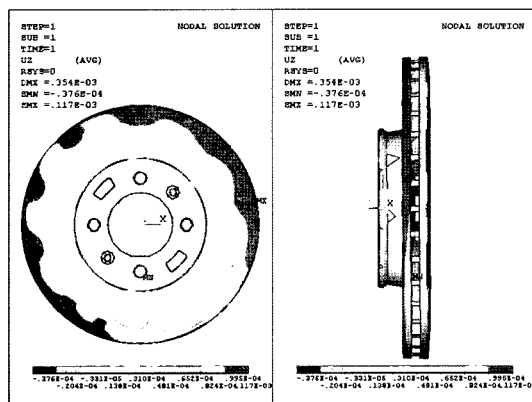
Fig. 2는 디스크의 회전속도가 1800rpm, 마스터 실린더(Master cylinder)의 압력이 2bar시 열섬이 발생될 때 고속 적외선 카메라로 측정된 온도 분포를 해석 프로그램에 입력한 온도분포이다. 1800rpm, 2bar의 결과를 이용한 이유는 열섬의 형태가 다른 회전수와 압력에 의한 결과보다 열섬이 명확하게 나타나고 있으며 디스크 표면의 온도 분포가 국부적으로 높게 나타나고 있기 때문이다. 결속 위치의 온도 데이터는 샤시 다이내모의 구조적인 문제로 정확하게 측정할 수 없었기 때문에 결속 주변 온도를 이용한 평균값으로 온도를 입력하였다. 열변형 해석을 수행 결과는 Fig. 3과 같다. 열팽창에 의해서 발생한 z 방향 변위의 최대 크기는 354μm 이었으며 열섬이 나타난 부근에서 발생되었다. 디스크의 온도 분포에 의한 z방향 변위량의 크기는 패드의 접촉



(a) Top View (b) Bottom view
Fig. 2 Temperature distribution of brake disk (1800rpm, 2bar)



(a) Displacement sum



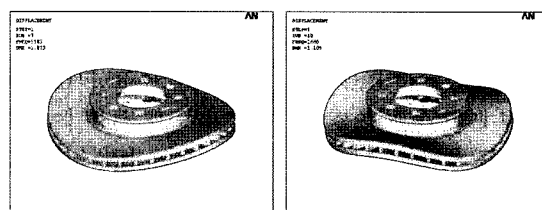
(b) z-direction displacement

Fig. 3 Simulation results of thermal deformation

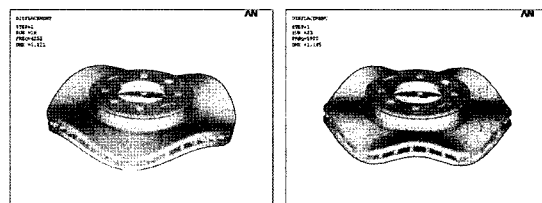
시 불균일 접촉 진동 현상을 발생시키게 되기 때문에 해석의 결과로도 온도의 국부적인 집중이 주는 진동 문제 발생을 예측할 수 있다.

2.3 브레이크 디스크의 모드 해석 결과

디스크 브레이크의 진동 모드 해석 결과는 Fig. 4와 같다. 1183, 2660, 4252 그리고 5900Hz는 각각 4, 6, 8 그리고 10개의 열섬을 발생시킬 수 있는 모드 형상으로 판단할 수 있다. 이는 열섬이 발생하는 위치 및 양상과 디스크의 진동 모드의 형태가 서로 일관성을 보이며 나타나고 있기 때문이다.⁷⁾ 해석 결과는 실험에 의해 얻어낸 브레이크 디스크의 주파수 모드 값을 바탕으로 보정하여 얻어내었다. 충격 모달 실험(Impact modal testing)은 고주파수 모드를 볼 수 없기 때문에 해석을 수행하여 실험에서 보이고 있는 열섬 양상과 주파수를 비교하고자 하였다. 해석 보정은 요소를 다시 구성하고 개수를 증가시켜서 신뢰성을 높였다. Table 2는 유한요소해석과 모달 실험에 의해 얻어낸 결과이다.



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



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

Fig. 4 FE Analysis Results: Mode Shape of Brake Disk

Table 2 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	-

3. 진동 및 열섬 측정 및 분석

3.1 실험 방법 및 조건

저더 진동 측정 실험은 샤시 다이내모를 이용하였으며 브레이크 패드에 진동 센서를 장착하여 수행하였다. 열점의 온도 분포는 고속 적외선 카메라를 이용하여 촬영하였다.

Table 3 Measurement conditions of hot spot and vibration

Pad area/rpm	1500	1800	1980
100%	✓	✓	✓
80%	✗	✓	✓

패드 길이가 100%인 경우, 샤시 다이내모의 회전수는 1500($f_0 = 25\text{Hz}$)과 1800rpm($f_0 = 30\text{Hz}$)에서 실험을 수행하였고 80%인 경우, 1800과 1980rpm($f_0 = 33\text{Hz}$)에서 실험을 수행하였으며 1500rpm에서는 저더가 발생되지 않았다. 마스터 실린더(Master cylinder)의 작동 압력은 1.5와 2bar로 주어 측정하였다. 본 실험 조건은 회전차수 성분인 $f_0(25, 30, 33\text{Hz})$ 와 분수 조화 진동 성분 $1/2f_0$ 가 저더 진동 주파수 범위 내에 있으며 열점 현상이 명확하게 발생하는 조건이다. 또한 샤시 다이내모의 용량과 안전을 고려하였으며 다수의 가실험을 통해 저더 현상이 양호하게 나타나는 조건을 파악하고 상호 비교가 가장 용이한 경우를 선별하여 실험을 수행하였다. 진동 측정 실험에서 주파수는 1Hz 간격으로 1~6000Hz까지 측정하였다.

3.2 실험 결과 및 분석

Fig. 5는 디스크의 회전수 1500rpm, 마스터 실린더 압력이 1.5, 2bar에서 패드 길이가 100%인 경우의 온도 분포를 고속 적외선 카메라를 이용하여 촬영한 결과이다. 1.5bar시 8개의 열점이 발생되었으며 2bar시 10개의 열점이 발생되었다. 또한 열점이 넓게 분포되면서 온도의 집중이 비교적 확산되고 있는 형태를 보였다.

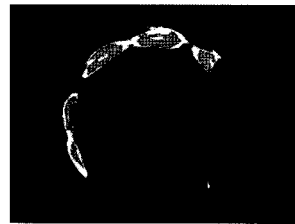
Fig. 6은 디스크의 회전수 1800rpm, 마스터 실린더 압력이 1.5, 2bar에서 패드 길이가 100%인 경우의 온도 분포를 고속 적외선 카메라를 이용하여 촬영한 결과이다. 1.5 및 2bar시 모두 10개의 열점이 발생되었다. 또한 열점과 온도 분포가 비교적 집중되어 명확하게 발생하였다.



Photo. 1 Infrared camera

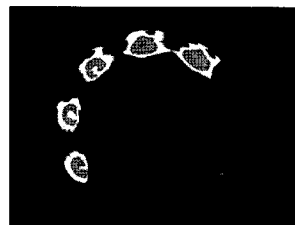


(a) 1.5bar

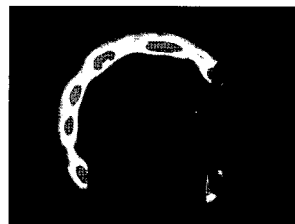


(b) 2bar

Fig. 5 Hotspots at 1500rpm (Pad length: 100%)



(a) 1.5bar



(b) 2 bar

Fig. 6 Hotspots at 1800rpm (Pad length: 100%)

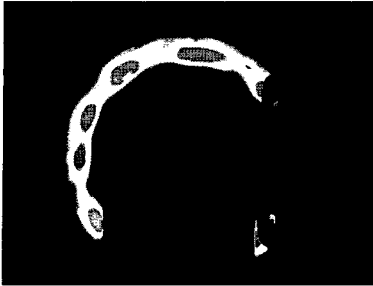


Fig. 7 Hotspots at 1800 rpm (Pad length: 80%, 2bar)

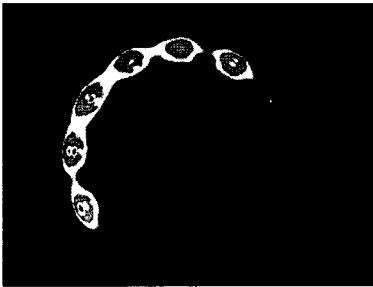
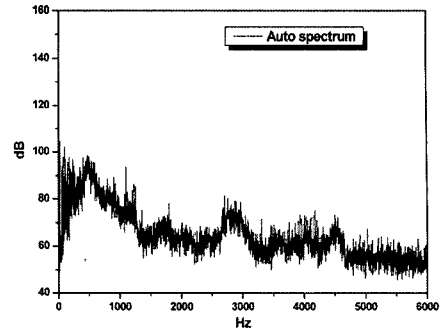


Fig. 8 Hotspots at 1980 rpm (Pad length:80%, 2bar)

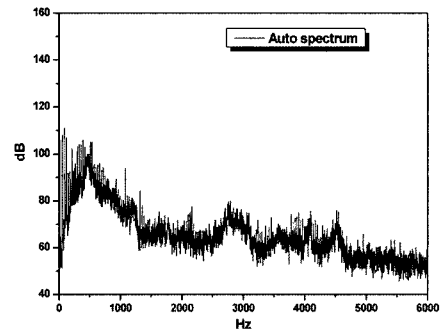
Fig. 7, 8은 디스크의 회전수 1800, 1980rpm, 마스터 실린더 압력이 2bar에서 패드 길이가 80%인 경우의 온도 분포를 고속 적외선 카메라를 이용하여 촬영한 결과이다. 디스크의 회전수가 1500rpm에서는 열섬 현상이 발생되지 않았으며 1800rpm 2bar에서 열섬이 10개 발생되기 시작하였다. 1980rpm 2bar에서는 12개의 열섬이 나타났다. 고주파 진동 모드는 저주파 진동 모드에 비해 상대적으로 낮은 크기의 가진력에 의해서도 잘 발생한다. 패드의 길이가 감소함에 따라서 감소된 패드의 면적이 충분하게 저주파 진동 모드를 가진 시키지 못하여 낮은 회전수에서는 열섬이 발생되지 않으며, 회전수와 압력을 증가시키면 가진되는 주파수 밴드폭(Band width)이 상승되어 디스크의 고주파수 진동 모드를 가진하게 된다.

Fig. 9는 회전수에 따른 Idling 시의 Auto spectrum을 나타낸다. Idling시 주파수 변동(Frequency fluctuation)은 디스크의 회전수에 상관없이 동일하게 나타나고 있는데 이것은 디스크의 공진 주파수와 일치한다.

Fig. 10은 디스크의 회전수 1500rpm, 마스터 실린더의 압력이 2bar에서 패드의 길이가 100%인 경우

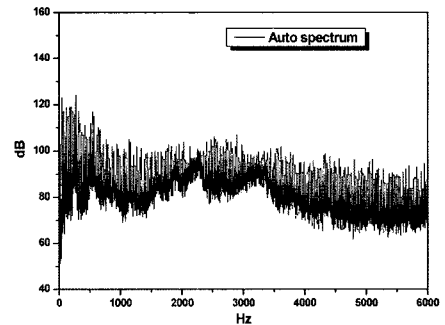


(a) 1500rpm idle

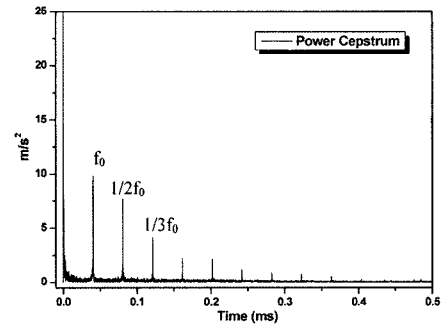


(b) 1800 rpm idle

Fig. 9 Auto spectrum at idle condition

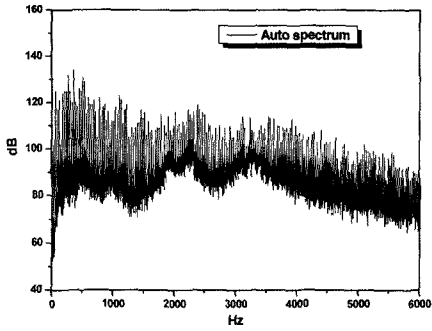


(a) Auto spectrum (2bar)

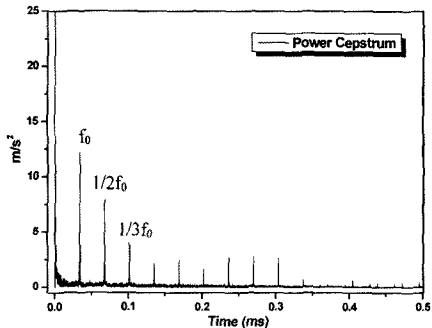


(b) Power cepstrum (2bar)

Fig. 10 Auto spectrum and power cepstrum at 1500rpm (Pad length: 100%)



(a) Auto spectrum (2bar)

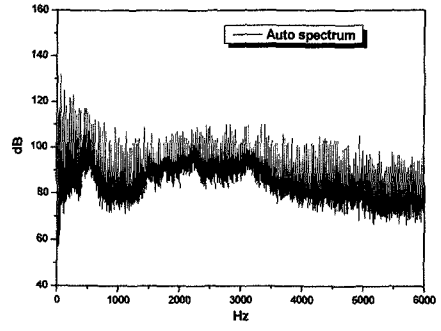


(b) Power cepstrum (2bar)

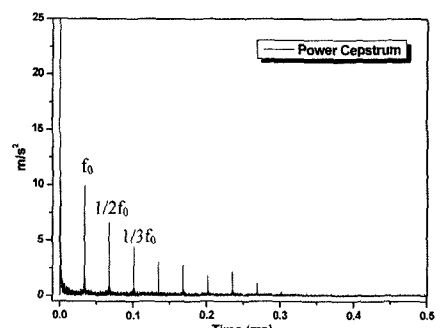
Fig. 11 Auto spectrum and power cepstrum at 1800 rpm (Pad length: 100%)

열섬 발생 시의 Auto spectrum과 Power cepstrum을 나타낸다. Auto spectrum 상에서 Idling시의 주파수와 비교해 보면 2400Hz 부근과 3400Hz 부근의 주파수 변동량이 증가하였다. Fig. 5의 (b)에서 보여준 결과와 함께 비교해 보면 3400Hz의 주파수 변동량은 10개의 열섬을 발생시키는 디스크의 공진 주파수와 연관이 있음을 나타낸다. Power cepstrum에서는 비교적 높은 회전 차수 성분($f_0 = 25\text{Hz}$)과 $1/2f_0$ 분수 조화 진동 성분이 ($1/2f_0 = 12.5\text{Hz}$) 나타났으며 이 두 성분은 저더 진동을 발생시키는 원인이 된다.

Fig. 11은 디스크의 회전수 1800rpm, 마스터 실린더의 압력이 2bar에서 패드의 길이가 100%인 경우 열섬 발생 시의 Auto spectrum과 Power cepstrum을 나타낸다. Auto spectrum 상에서 Idling시의 주파수와 비교해 보면 2400Hz, 3400Hz 부근의 주파수 변동량이 증가하였다. Fig. 6의 (b)에서 보여준 결과와 함께 비교해 보면 2400Hz 및 3400Hz의 주파수 변동량은 8개와 10개의 열섬을 발생시키는 디스크의 공진 주파수와 연관이 있음을 나타낸다. Power cepstrum



(a) Auto spectrum (2bar)



(b) Power cepstrum

Fig. 12 Auto spectrum and power cepstrum at 1800rpm (Pad length: 80%)

에서는 높은 회전 차수 성분 ($f_0 = 30\text{Hz}$)과 $1/2f_0$ 분수 조화 진동 성분이 ($1/2f_0 = 15\text{Hz}$) 나타났다.

Fig. 12, 13은 디스크의 회전수 1800, 1980rpm, 마스터 실린더의 압력이 2bar에서 패드의 길이가 80%인 경우 열섬 발생 시의 Auto spectrum과 Power cepstrum을 나타낸다. Fig. 7에서 보여준 결과와 함께 비교해 보면 3400Hz의 주파수 변동량은 10개의 열섬을 발생시키는 디스크의 공진 주파수와 연관이 있음을 나타낸다. 1980rpm의 경우 디스크의 회전수가 높아져 전체적인 주파수 변동량이 뚜렷하게 나타나고 있지는 않으나 12개의 열섬을 발생시키는 디스크의 공진 주파수를 가진하고 있음을 알 수 있다. 디스크의 회전수 1800rpm인 경우 Power cepstrum에서는 비교적 높은 회전 차수 성분($f_0 = 30\text{Hz}$)과 $1/2f_0$ 분수 조화 진동 성분이 ($1/2f_0 = 15\text{Hz}$) 나타났으며 1980rpm인 경우에도 높은 회전 차수 성분 ($f_0 = 33\text{Hz}$)과 $1/2f_0$ 분수조화진동 성분이 ($1/2f_0 = 16.5\text{Hz}$) 나타났다.

마스터 실린더의 압력을 높여 제동을 시작하면

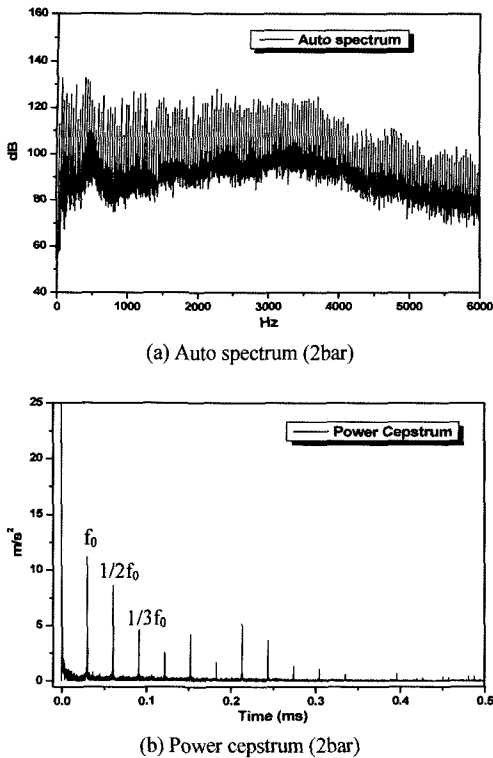


Fig. 13 Auto spectrum and power cepstrum at 1980rpm (Pad length: 80%)

전체적인 주파수의 크기가 증가하게 되며 회전 차수 성분이 상승하게 된다. 제동을 지속적으로 수행하게 되면 점점 주파수 변동량의 양상이 변화하게 되어 저주파 방향으로 이동하게 된다. 열섬 온도 분포 측정 결과와 주파수를 연계하여 분석해 보면 8개의 열섬이 발생될 때 2400Hz 부근, 10개의 열섬이 발생될 때 3400Hz 부근의 주파수 변동량이 증가하게 된다. 열섬을 8개와 10개를 발생시킬 수 있는 디스크의 모드 주파수는 4252Hz와 5900Hz이다. 4252Hz의 모드 주파수는 2400Hz 대역으로, 5900Hz의 모드 주파수는 3400Hz 대역으로 이동하였다고 판단된다. 패드의 길이 방향 감소에 따른 결과는 100%의 패드 및 80%의 패드일 경우를 비교해 보면 패드 길이가 감소할 때 저주파 대역에서 가진력 감소를 보이게 된다. 저주파 모드는 상대적으로 높은 가진력에 의해 나타날 수 있기 때문에 높은 회전수와 압력을 가해 주어야만 열섬이 발생된다. 또한 디스크의 마찰열에 의해 디스크의 온도가 높아지게 되어 디스크의 물성치가 변화하게 되고 접촉 마찰이라는

비선형적인 요소가 디스크의 공진 주파수를 이동시키게 된다.

4. 결론

- 1) 열섬 현상은 디스크의 특정 모드에 의해 발생되며 저주파 모드일수록 높은 크기의 가진력이 필요하다.
- 2) 디스크의 열섬 현상은 열변형을 발생시키고(해석결과 1800rpm 2bar에서 최대 변형량: 354 μ m), 이러한 국부적인 열변형이 국부 마찰을 보다 집중시키게 되며 결과적으로 회전 차수 성분 f_0 와 $1/2f_0$ 분수 조화진동 성분을 증가시켜 저더 진동을 발생시킨다.
- 3) 디스크의 회전수와 패드의 압력, 패드의 길이 및 마찰 면적은 가진력의 크기와 가진 주파수 대역을 변화시키는 작용을 한다.
- 4) 패드의 길이 및 마찰 면적은 낮을수록 열섬 현상이 나타나기 어렵고 발생하는 열섬은 디스크의 높은 주파수 모드로 발생된다.
- 5) 디스크의 온도가 높아짐에 따라 디스크의 물성치가 다소 변화하게 되며 또한 마찰 접촉의 비선형적인 특성으로 인해 디스크의 모드 주파수를 변화시킨다.

References

- 1) K. A. Mohamed, "Brake Judder Analysis : Case Studies," SAE 972027, 1997.
- 2) K. Lee and B. D. Palph, "Condition of Frictional Contact in Disk Brake and Their Effect on Brake Judder," SAE 980598, 1998.
- 3) B. Lee, C. Cho, S. Lee and H. Cho, "Computer Simulation on Mechanical Evaluation of Ceramic Matrix Composite Automobile Brake Disks," PacRim5 Special Issue, Vol.112, No.5, pp.S423-S427, 2004.
- 4) A. Vries and M. Wagner, "The Brake Judder Phenomenon," SAE Technical Paper Series, SAE920554 (SP-914), pp.25-33, 1992.
- 5) S. Youn, and M. Han, "Study on Brake Judder Caused by Disk Runout and Disk Thickness Variation," Transactions of KSAE, Vol.7, No.2, pp.378-386, 1999.

- 6) S. Gassmann and H. G. Engel, "Excitations and Transfer Mechanism of Brake Judder," SAE 931880, 1993.
- 7) H. Cho, M. Kim, J. Maeng and C. Cho, "Analysis of the cause for judder vibration of automotive disk brake," Fall Conference Proceedings, Vol.III, KSAE, pp.1056-1061, 2005.