

벤틸레이티드 디스크 브레이크에서 공냉효과가 열변형 거동에 미치는 영향에 관한 수치적 연구

조승현 · 이일권 · 김청균
홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Numerical Study on the Thermal Distortions of Ventilated Disk Brakes Due to Air Cooling Effects

Seung Hyun Cho · Il-Kwon Lee · Chung Kyun Kim
Tribology Research Center, Hongik University

Abstract - A coupled thermal-mechanical analysis has been presented for the thermal distortions of the ventilated disk brakes during 15 braking operations. The FEM results show that the bendings and distortions of the disk toward the left side are decreased, but the sinusoidal distortion of the disk rubbing surface along the arc length of the vent hole is highly increased by increasing the convective air cooling effects, which is heavily related to the squeal, wear and micro-thermal crackings at the rubbing surfaces due to uneven dissipation rates of friction heatings.

Key Words : ventilated disk brake, pad, thermoelastic wear, frictional heating, braking mode, thermal distortion, tribology

1. 서론

접촉식 제동 시스템(contact type braking system)은 주행중인 차량의 운동 에너지를 디스크와 패드 사이에서 기계적인 마찰열 에너지로 안정되게 변환시킴으로써 자동차를 정지시켜주는 핵심 안전장치이다. 접촉식 제동장치를 사용하고 있는 자동차나 철도차량의 제동 안전성은 디스크와 패드 사이의 마찰/마멸 특성변화에 크게 의존한다. 특히 운반차량의 고속, 고출력화 추구는 마찰열에

의한 벤틸레이티드 디스크의 열변형 거동이 브레이크의 마멸, 소음과 진동, 수명에 중대한 영향을 미치기 때문에 그 동안 많은 연구를 진행해 왔다.

디스크와 패드식의 미끄럼 마찰에 의한 마멸, 열변형 발생 등으로 인한 소음과 진동은 필연적으로 발생하고[1,2], 브레이크의 고속 제동은 계면의 마찰조건에 따라서 열탄성 마멸이나 열크랙[3,4]이 발생되면서 자동차의 주행 안전성에 심각한 영향을 주고 있다. 이러한 문제점을 규명하고 해결하기 위한 실험

적 연구가 많이 수행되었고, 최근에는 해석용 프로그램의 획기적인 발달로 실제의 현상과 대단히 유사한 브레이크 제동모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 기법[5,6]이 많이 도입되고 있다.

주행중인 자동차의 제동장치에 걸리는 마찰 토크는 열의 형태로 발열된 후에 벤틸레이티드 디스크와 패드의 소재 내부 또는 대기중에 노출된 벤틸레이티드 디스크-패드 표면과 접촉하는 공기에 의하여 냉각된다. 정상적으로 작동하는 브레이크에서 마찰열 에너지는 디스크와 패드 사이의 미끄럼 마찰면에 고르게 발생되었다가 소산되나, 표면 거칠기와 파형, 회전축과 디스크의 회전 불균형, 패드와 디스크 접촉면의 불균일한 마찰에 의해 발생한 비정상적인 마찰열이 국부적으로 발생되거나 또는 생성된 열이 고르게 소산되지 않으므로 마찰열이 국부적으로 축적하게 되고, 그 결과로 적열점(hot spot) 발생[7,8]에 따른 열적 불안정성(thermoelastic instability)[9-11] 현상에 의하여 제동성능은 극도로 약화되게 된다. 이러한 열적저더(thermal judder) 현상의 발생은 미끄럼 마찰조건이 불안정해지면서 제동거리를 증가시키므로 마찰열 거동 데이터는 브레이크 설계시 고려해야될 전형적인 트라이볼로지적 문제가 된다. 즉, 마찰열 발생에 따른 열적해석, 방열에 관련된 공기의 유동해석, 내마멸 특성에 관한 연구를 수행하기 위한 데이터는 트라이볼로지적 미끄럼 마찰연구에서 그 해결책을 찾아야 한다.

본 연구에서는 자동차나 철도차량에서 접촉식 제동 시스템으로 널리 사용하는 벤틸레이티드 디스크 브레이크에 대한 마찰열 접촉 거동 문제를 열하중과 기계적 하중을 동시에

적용한 상태에서 비선형 유한요소법으로 해석하고자 한다. 이 때에 디스크의 열변형 거동량을 소재내의 전도에 의한 냉각효과보다는 벤트홀(vent hole)을 통하여 대기중으로 방열되기 때문에 발생하는 열변형 거동문제를 고찰하였다.

2. 수치적 연구

2-1. 해석조건

본 연구에서 벤트홀을 중심으로 공기에 의한 냉각효과를 고찰하기 위한 열적거동 해석은 비선형 유한요소 프로그램인 MARC[12]를 사용하여 해석하였다. Fig. 1은 벤틸레이티드 디스크에서 발생하는 마찰열 접촉거동 문제를 해석하기 위한 유한요소 모델을 제시하고 있다. 디스크 마찰면에서의 열변형 거동 해석을 수행하기 위한 디스크 브레이크의 물성치와 유한요소해석 조건은 Table 1에서 주어지고, 벤틸레이티드 디스크 해석에 사용한 유한요소와 절점의 개수는 756과 1293이다.

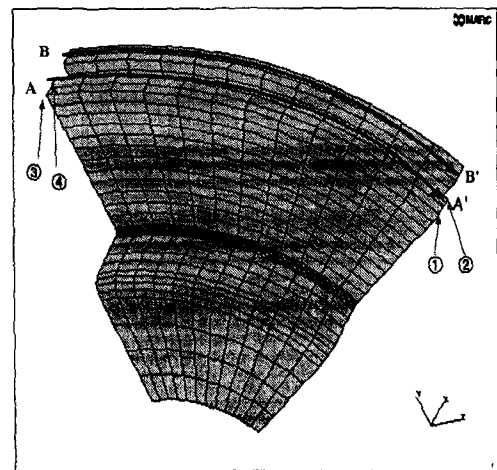


Fig. 1 Simulation model of a ventilated disk with a finite element meshes

Table 1. Material properties and simulation conditions for a ventilated disk brake

Material properties and simulation conditions	Values
• Elastic modulus, N/mm^2	1.25×10^6
• Poisson's ratio	0.25
• Mass density, kg/m^3	7,100
• Coefficient of thermal expansion, $mm/mm \cdot K$	12×10^{-6}
• Thermal conductivity, $W/m \cdot K$	54
• Heat transfer coefficient, $W/m^2 \cdot K$	0, 25, 50
• Specific heat, $J/kg \cdot K$	585
• Initial disk temperature, $^{\circ}C$	65
• Initial braking speed, km/h	97

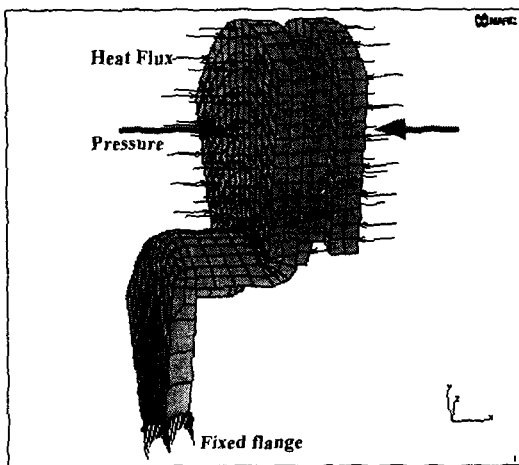


Fig. 2 Boundary conditions for a disk-pad disk model

Fig. 2는 벤틸레이티드 디스크와 패드에 가해진 기계적인 제동력, 마찰계면에서 발생된 마찰열, 대기중으로의 방열에 관련된 경계조건을 표시한 것으로 제동성능 해석에서 대단히 중요하다. 벤틸레이티드 디스크와 패드의 마찰계면에 가해진 제동력은 15KN이고, 벤트홀을 포함한 디스크와 패드는 자동차가 이동함에 따라서 유동하는 주변의 공기에 의하여 냉각되며, 마찰면에서의 복사열은 없다고 가정한다. 또한, Fig. 2에서 플랜지의

중심은 고정된 것으로 가정하였는데, 이것은 벤틸레이티드 디스크 브레이크를 축대칭 모델로 회전축을 고정하기 때문이다. 디스크와 패드의 마찰표면에서는 마찰열이 균일하게 발생되었다가 냉각하며, 벤트홀을 포함하여 대기중으로 노출된 디스크 표면에서는 소재 내로 전도된 마찰열 에너지가 유동중인 주변의 공기에 의해 방열된다고 가정한다.

접촉식 제동장치에서 발생된 마찰열의 산출은 자동차의 주행속도, 반복 제동회수, 디스크 주변의 공기속도 유동장 등에 크게 의존하기 때문에 그 동안 일정한 대류 열전달 계수로 디스크의 열변형 거동 특성 문제를 해석한 것은 무리가 있었다. 따라서 본 연구에서는 디스크의 마찰표면과 벤트홀에서의 대류 열전달 계수를 0, 25, $50W/m^2K$ 로 변화시켜 가면서 디스크 브레이크의 방열효과를 공기와 직접 접촉하는 디스크 표면과 벤트홀 내부에 적용함으로써 벤틸레이티드 디스크의 열변형 거동 해석에서 보다 향상된 설계 데이터를 얻고자 한다.

2-2. 마찰열과 제동모드

접촉식 제동 시스템에서 발생된 마찰열은 자동차의 주행속도에 크게 의존하는데, Fig. 3은 벤틸레이티드 디스크 브레이크에 1회의 제동을 실시하였을 경우 제동 마찰면에서 발생된 열량을 보여주고 있다. 여기서 벤틸레이티드 디스크와 패드의 접촉면적을 기준으로 볼 때 미끄럼 접촉 운동면의 1/6에서는 마찰열이 발생하고, 나머지 5/6에서는 디스크와 패드가 미끄럼 마찰접촉 운동을 하지 않기 때문에 생성된 열이 냉각하게 된다.

브레이크의 제동성능에 대한 신뢰성을 확

보하기 위하여 사용한 제동모드는 Fig. 4에서 제시한 것처럼 일본의 JASO 기준을 참고로 해석하였다. 즉, 97km/h로 주행중인 자동차를 정지시키기 위하여 디스크와 패드 사이에 마찰 제동력을 가하는데, 초기 4.13sec에서는 감속(기계적 제동력이 작용하는 발열 구간), 다음 25초까지는 가속(생성된 마찰열의 방열구간), 다음 30초까지는 정상속도로 주행하면서 1회의 접촉제동 사이클이 완료된다. 브레이크 성능시험에서는 1회와 동일한 제동조건을 15회 반복하여 디스크 브레이크에 적용함으로써 제동 시스템의 안전성을 확보하도록 한다.

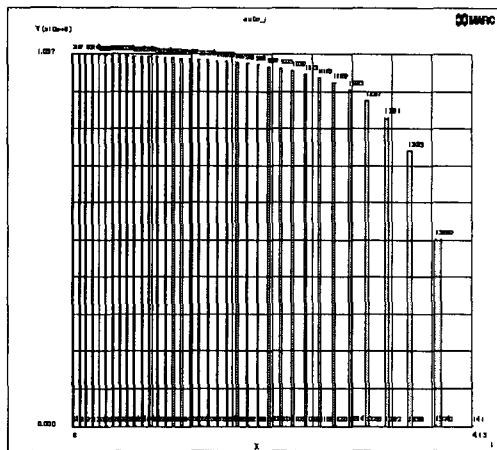


Fig. 3 Braking energy

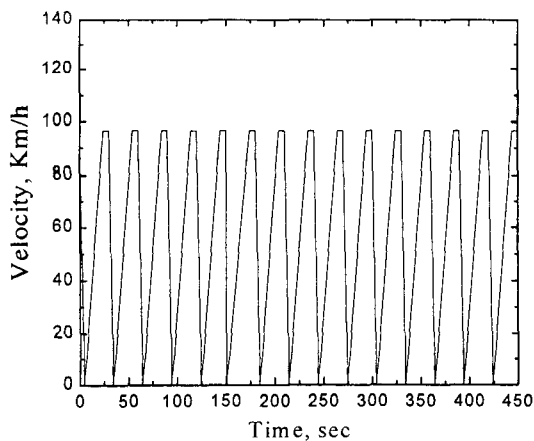


Fig. 4 Repeated braking mode

3. 해석결과 및 토의

자동차가 97km/h의 정속도로 주행하다가 벤틸레이티드 디스크-패드식 브레이크에 의하여 5.89m/s^2 의 감속도로 제동한다고 가정할 경우, 발생된 마찰열 에너지의 약 88.5%는 벤틸레이티드 디스크로 전달되고, 나머지 11.5%는 마찰재로 전달되어 소산된다. 본 연구에서는 벤틸레이티드 디스크의 열변형 거동 문제를 고찰하기 위하여 디스크에서의 열변형 거동량을 기계적 하중과 열하중을 동시에 고려하여 유한요소법으로 해석하였다.

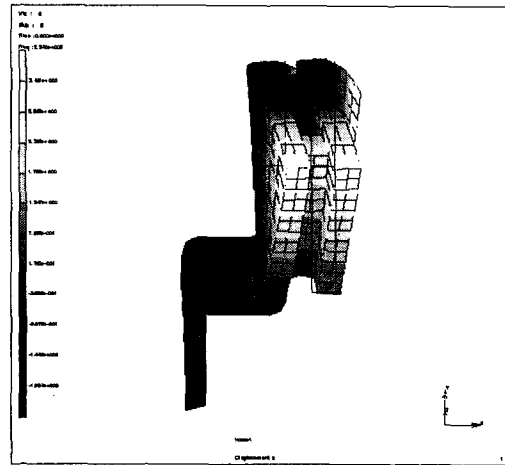
패드와 직접 미끄럼 마찰 접촉운동을 하는 벤틸레이티드 디스크 림(disk rim)의 열변형 거동 문제를 공기의 유동에 의한 냉각효과와 연계하여 해석하였다. 접촉 제동식 브레이크의 마찰면에 제동력이 가해지면서 발생된 마찰열은 접촉계면의 디스크와 패드의 소재 내부로 전도되고, 주변의 공기와 접촉하는 디스크와 패드의 외피, 벤트홀의 내면을 따라서 공기의 대류에 의한 방열이 진행된다. 마찰계면에서 발생된 마찰열과 방열효과는 제동조건, 브레이크의 소재 특성, 설계조건에 따라서 달라지고, 그 결과는 제동회수에 따른 온도분포가 서로 다르게 나타난다.

Fig. 5는 모달 해석(modal analysis)을 통해 벤틸레이티드 디스크의 변형된 열거동 형상을 보여주고 있다. Fig. 5에서 제시한 것처럼 주파수 해석모드를 증가시키면 원주방향으로 발생된 뒤틀림 변형거동은 벤트홀의 원주 A→A'와 B→B'를 따라서 뒤틀림 변형이 크게 진행된 결과를 분명하게 보여주고 있다. 이것은 패드와 접촉하는 디스크의 마찰면에서는 발생된 열의 불균일한 소산에 의하

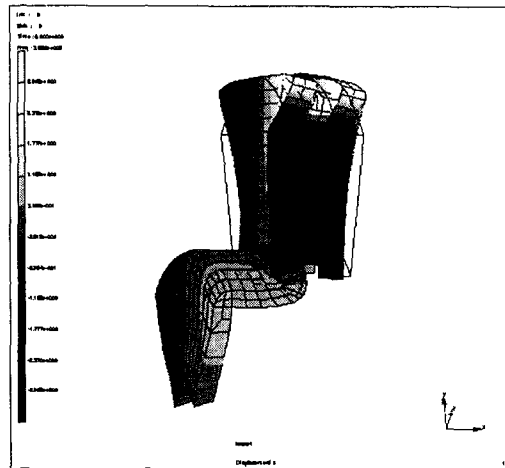
여 원주방향으로 정현형상의 뒤틀림 거동 (sinusoidal distortions)이 발생되고 있음을 알 수 있다. 이러한 뒤틀림 파형(distorted waviness)의 발생은 패드와 디스크간의 불균일 접촉을 조장함으로써 국부적인 접촉면 압의 증가로 인한 마찰열의 재축적, 열변형 뒤틀림의 심화, 열탄성 마멸(thermoelastic wear)의 발생이라는 열탄성 불안정성이 반복하게 된다. 이러한 열변형 거동의 문제점으로 제시된 결과는 디스크 마찰면에서의 적열점 현상(hot spot), 열탄성 마멸, 열크랙(thermal crack), 스켈과 진동의 발생이 가시적으로 나타나고, 브레이크 제동 성능 측면에서는 제동거리의 증가와 극단적인 브레이크 파손이라는 안전성에 중대한 영향을 미치게 된다.

Fig. 6은 브레이크가 15회 반복 제동을 한 이후에 벤트홀 주변 왼쪽 디스크 림의 외주면 둘레에 대한 열변형 뒤틀림 현상 데이터를 보여주고 있다. 여기서 왼쪽 디스크 림 A'의 ①과 ② 및 A의 ③과 ④는 디스크 림의 축방향, 즉 디스크의 폭 방향을 표시한 것으로 벤트홀의 공기에 의한 냉각효과를 알아보기 위하여 제시한 열변형 결과이다. 이들 결과에 의하면 ①에서 ②로의 열이동율과 ③에서④로의 열이동율이 서로 다름으로 인하여 변형거동이 달라졌기 때문에 뒤틀어진 현상이 발생되었음을 보여주는데, 이것은 벤트홀의 공냉효과에 따른 결과이다.

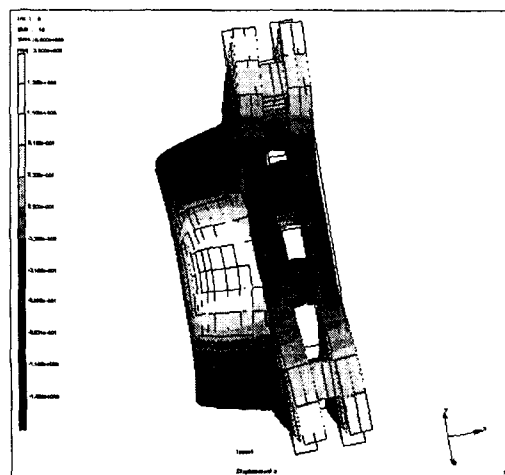
Fig. 7은 15회의 마찰제동을 하고 난 이후에 공기의 냉각효과를 검증하기 위하여 대류 열전달 계수가 25와 50W/m²K인 경우를 공냉효과가 없는 경우와 비교하여 고찰하였다. 이들의 해석결과에 의하면 디스크의 왼쪽 디스크 림보다는 오른쪽 디스크 림에서



(a) 8th frequency profile



(b) 9th frequency profile



(c) 10th frequency profile

Fig. 5 Distorted profiles of the ventilated disk

보다 큰 열변형 거동이 발생하였고, 공기에 의한 대류 열전달 계수가 증가될수록 축방향의 매크로 열변형 거동량은 완화되지만 Fig. 1에서 왼쪽 디스크 림은 외주 원호를 따라서 표시한 A→A'와 오른쪽 디스크 림은 B→B'를 따라서 표시한 원주방향의 뒤틀림 형상이 크게 증가되는 현상을 보여주고 있다. 즉, 축방향의 매크로 진동(macro-vibration)은 완화되지만, 벤틸레이티드 디스크의 벤트홀을 따라서 진행된 원주방향의 뒤틀림 변형거동은 대류에 의한 냉각효과 때문에 국부적인 전도와 대류의 냉각효과 불균형이 발생되면서 열변형이 크게 발생되어 스켈(squeal)을 일으키는 원인으로 작용하게 된다. 이들의 계산결과에 의하면 축방향 변위와 외주부의 원호를 따라서 발생된 뒤틀림 과형(distorted waviness)이 왼쪽 디스크 림보다는 오른쪽 디스크 림에서 크게 발생되고 있음을 알 수 있다. 이것은 왼쪽 디스크 마찰면에서 발생된 마찰열은 벤트홀로의 대류 냉각효과를 포

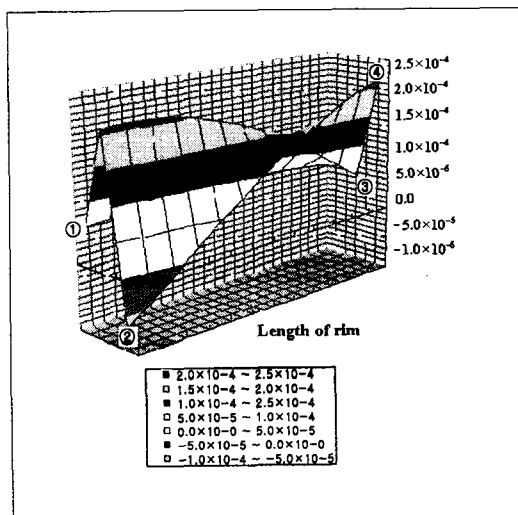
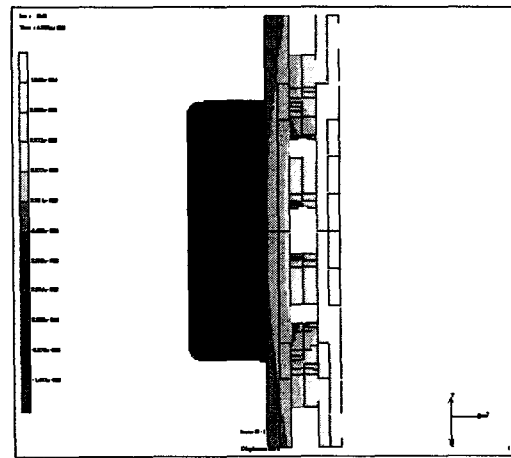
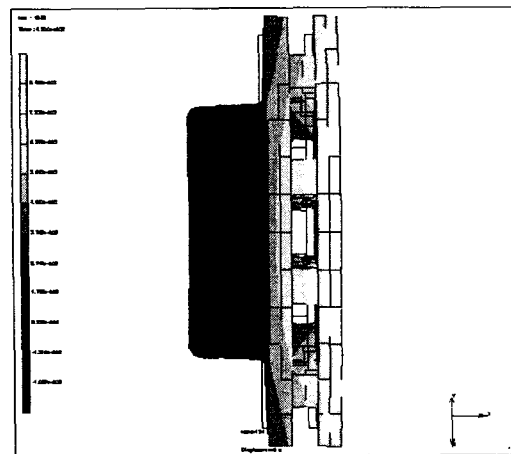


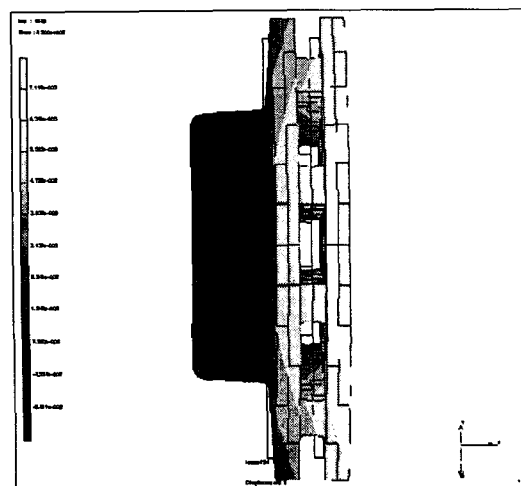
Fig. 6 Thermal distortions along the arc length of the inner side of the ventilated disk after 15 braking period



(a) $h=0W/m^2K$



(b) $h=25W/m^2K$



(c) $h=50W/m^2K$

Fig. 7 Thermal distortions of the ventilated disk after 15 braking periods

함하여 해트부와 플랜지부로 용이하게 전도되므로 열유동이 원활하게 일어나는 반면에 오른쪽 디스크 림은 상대적으로 전도에 의한 열용량이 작기 때문에 브레이크 설치상 불리한 설계가 되었기 때문에 일어나는 현상이다.

여기서 Fig. 7(a)는 주행중인 디스크에 공기의 냉각효과를 고려하지 않은 경우이고, Fig. 7(b)는 주행중인 자동차의 대류효과 $h=25W/m^2K$ 을 고려한 것으로 디스크가 약간 오른쪽으로 열변형이 약간 발생되었음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 7(c)에서는 대류에 의한 냉각효과를 Fig. 7(b)에 비하여 2배 증가시킨 $h=50W/m^2K$ 인 경우로 Fig. 7(b)와는 달리 축방향의 열변형량은 크게 줄어들지만 디스크 림의 국부적인 열적 뒤틀림 현상은 오히려 증대되고 있다.

4. 결 론

벤틸레이티드 디스크 브레이크에서의 열변형 거동 특성을 벤트홀의 방열효과를 고려하여 비선형 유한요소법으로 해석하였다.

공기와 접촉하는 디스크의 외부표면과 벤트홀 내부에 공기의 유동에 따른 냉각효과를 증가하면, 축방향으로의 열변형 거동이 크게 완화되면서 매크로 진동도 양호해지지만, 디스크의 벤트홀을 중심으로 원주방향의 열변형 뒤틀림 현상은 심하게 발생되어 스켈과 마멸은 오히려 증가되는 현상을 나타낸다. 이것은 매크로 진동과 연계가 큰 해트부 뿐만 아니라 벤트홀의 최적화 설계도 대단히 중요함을 강조하는 데이터이다.

참고 문헌

- [1] Matsui, H., Murakami, H., Nakanishi, H., and Tsuda, Y., "Analysis of Disc Brake Squeal," SAE 920553, pp.15-24, 1992.
- [2] Nack, W. V. and Joshi, A. M., "Friction Induced Vibration: Brake Moan," SAE 951095, pp.1967-1973, 1995.
- [3] Rainbolt, J. D., "Effects of Disk Material Selection on Disk Brake Rotor Configuration," SAE 750733, pp.1973-1814, 1975.
- [4] Jimbo, Y., Mibe, T., Akiyama, K., Matsui, H., Yoshida, M., and Ozawa, A., "Development of High Thermal Conductivity Cast Iron for Brake Disk Rotors," SAE 900002, pp.22-28, 1990.
- [5] Kim, C. K., "Finite Element Analysis of Temperature Distribution and Thermally Caused Deformation in Ventilated Disk Brakes," 95' Korea-USA Tribology Symposium, pp.251-258, Oct. 1995.
- [6] Floquet A., and Dubourg, M. C., "Realistic Braking Operation Simulation of Ventilated Disk Brakes," J. of Tribology, Vol. 118, pp.466-472, 1996.
- [7] Anderson, A. E., and Knapp, R. A., "Hot Spotting in Automotive Friction Systems," Intl. Conf. on Wear of Materials, Vol. 2, pp.673-680, 1989.
- [8] Bryant, M. D. and Jau-Wen Lin, "Photoelastic Visualization of Contact Phenomena Between Real Tribological Surfaces, With and Without Sliding," Wear, Vol. 170, pp.267-279, 1993.
- [9] Dow, T. A., "Thermoelastic Effects in Brakes," Wear, Vol. 59, pp.213-221, 1980.
- [10] Lee, K. J., and Barber, J. R., "An Experimental Investigation of Frictionally-Excited Thermoelastic Instability in Automotive Disk Brakes Under a Drag Brake Application," J. of Tribology, Vol. 116, pp.409-414, 1994.
- [11] Lu, Chin-Tu, and Bryant, M. D., "Thermoelastic Evolution of Contact Area and Mound Temperatures in Carbon Graphite Electrical Brushes," Wear, Vol. 174, pp.137-146, 1994.
- [12] MARC Program Capabilities, MARC Analysis Research Corp., Palo Alto, CA, 1998.