

## **디스크 브레이크의 마찰열 접촉거동에 관한 트라이볼로지적 연구 – 벤트홀의 방열효과를 중심으로 –**

**김청균 · 황준태**

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

## **Tribological Analysis on the Contact Behaviors of Disk Brakes Due to Frictional Heatings – Cooling Effects By Vent Holes –**

**Chung Kyun Kim and Jun Tae Hwang**

*Tribology Research Center, Hongik University*

**Abstract**—Using a coupled thermal-mechanical analysis, the thermal distortion of the ventilated disk brakes has been investigated based on the air cooling effects 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, thermal crack, thermoelastic wear, friction heating, braking mode, thermal distortion, tribology.

### **1. 서 론**

벤틸레이티드 디스크-패드식 제동 시스템은 차량의 운동 에너지를 디스크와 패드 사이에서 기계적인 마찰열 에너지로 안정되게 변환시킴으로써 자동차를 정지시키는 중요한 역할을 수행한다. 접촉식 제동장치를 사용하고 있는 자동차나 철도차량의 제동 안전성과 효율성은 디스크와 패드 사이의 트라이볼로지적 특성변화에 크게 의존한다. 특히 운반 차량의 고속화와 고출력화 추구는 마찰열에 의한 벤틸레이티드 디스크의 열변형 거동이 브레이크의 마멸, 소음과 진동, 수명에 중대한 영향을 미치기 때문에 그 동안 많은 연구를 진행해 왔다.

벤틸레이티드 디스크와 패드식의 미끄럼 마찰에 의한 마멸, 열변형 발생 등으로 인한 소음과 진동은 필연적으로 발생되고[1-3], 브레이크의 고속제동은 계면

의 마찰조건에 따라서 열탄성 마멸이나 열크랙[4,5]이 발생되면서 자동차의 주행 안전성에 심각한 영향을 주고 있다. 이러한 문제점을 규명하고 해결하기 위한 실험적 연구가 많이 수행되었고, 최근에는 해석용 프로그램의 획기적인 발달로 실제의 현상과 대단히 유사한 브레이크 제동모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 기법[6,7]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 발생된 비정상적인 마찰열이

국부적으로 발생되거나 또는 생성된 열이 고르게 소산되지 않으므로 마찰열이 국부적으로 축적하게 되고, 그 결과로 적열점(hot spot) 발생[8,9]에 따른 열적 불안정성(thermoelastic instability)[10-13] 현상이 발생하게 되면 제동성능이 극도로 약화된다. 이러한 열적저더(thermal judder) 현상의 발생은 미끄럼 마찰 조건이 불안정해지면서 제동거리를 증가시키므로 마찰열 거동 데이터는 브레이크 설계시 고려해야될 전형적인 트라이볼로지적 문제가 된다.

자동차의 고속화와 경량화 추세에서 제동장치는 제동거리의 단축과 수명연장을 추구하고 있기 때문에 디스크와 패드의 내마멸성 향상, 소음과 진동을 줄이면서 열용량 향상을 위한 최적화 설계 등의 트ライ볼로지적 연구를 많이 필요하게 되었다. 브레이크의 경량화와 열용량 증대 방안으로 제시된 벤탈레이티드 디스크 브레이크는 미끄럼 마찰면의 크기를 그대로 유지하면서 대류에 의한 냉각효과를 극대화시켜서 열변형 거동을 가능한 줄여주고, 열탄성 마멸, 소음과 진동을 완화하여 브레이크의 안전성을 확보하면서 수명을 연장시킬 수 있다.

본 연구에서는 자동차의 접촉식 제동 시스템으로 널리 사용하는 벤탈레이티드 디스크 브레이크에 대한 마찰열 접촉거동 문제를 열하중과 기계적 하중을 동시에 적용한 상태에서 공기의 냉각효과를 고려하여 비선형 유한요소 프로그램인 MARC[14]로 해석하고자 한다. 특히 디스크 마찰면의 열변형 거동량을 소재내의 전도에 의한 냉각효과보다는 벤트홀(vent hole)을 통한 대기중으로의 방열효과를 고찰하고자 한다.

## 2. 유한요소 해석

### 2-1. 유한요소 메쉬 및 해석조건

자동차의 벤탈레이티드 디스크에서 발생되는 마찰열 접촉거동 문제를 해석하기 위한 유한요소 모델을 Fig. 1에서 제시하고 있다. 또한, 디스크 마찰면에서의 열변형 거동 해석을 수행하기 위한 브레이크의 물성치와 유한요소해석 조건은 Table 1에서 주어진다.

또한, 미끄럼 마찰 접촉면이나 플랜지의 해트부, 벤트홀의 응력집중 지역에는 메쉬를 더 많이 나누었으며, 사용된 벤탈레이티드 디스크의 유한요소 개수는 976이고, 요소절점은 1630이다.

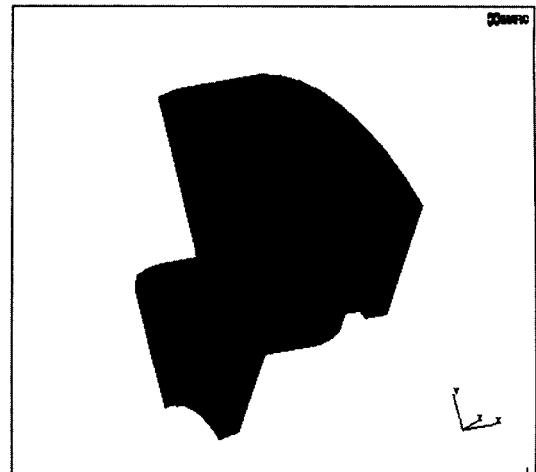


Fig. 1. Simulation model of a ventilated disk with a finite element mesh.

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

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

Fig. 2는 벤탈레이티드 디스크와 패드에 가해진 기계적인 제동력, 마찰계면에서 발생된 마찰열, 대기중으로의 방열에 관련된 경계조건을 표시한 것으로 제동성능 해석에서 중요한 역할을 한다. 벤탈레이티드 디스크와 패드의 마찰계면에 가해진 제동력은 15 KN이고, 벤트홀을 포함한 디스크와 패드는 자동차가 이동함에 따라서 유동하는 주변의 공기에 의하여 균일하게 냉각된다고 가정한다. Fig. 2에서 플래지의 중심은 고정된 것으로 가정하였는데, 이것은 벤탈레이티드 디스크 브레이크를 축대칭 모델로 회전축을 고정하였기 때문이다. 디스크와 패드의 마찰표면에서는 마찰열이 균일하게 발생되었다가 냉각하고, 벤트홀을 포함하여 대기중으로 노출된 디스크 표면에서는 소재내로 전도된 마찰열 에너지가 유동중인 주변의 공기에 의해 방열된다고 가정한다.

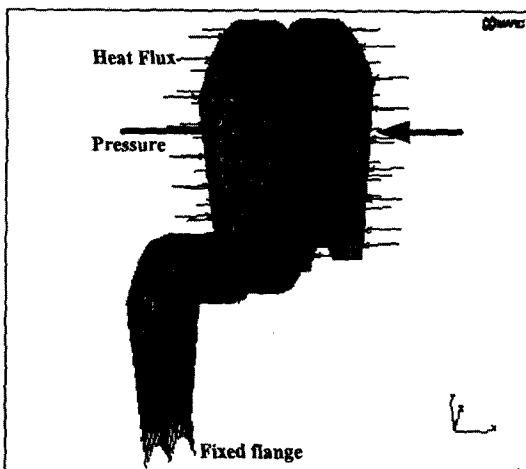


Fig. 2. Boundary conditions for a disk-pad disk model.

벤탈레이티드 디스크-패드식 제동장치에서 발생된 마찰열의 소산율은 레이놀즈 수와 프란틀 수에 의해 결정되고, 초기의 디스크 브레이크는 회전하는 평판으로 가정하였다. 또한 디스크 주변의 공기 유동장은 자동차의 주행 속도에 따라서 자유 유동인 것으로 가정하여 해석하였다. 마찰거동 특성은 디스크 형상에 의해 주어지는 특성길이와 실제 접촉면적, 회전속도, 유동장 속도, 디스크 주변 공기의 물성치 등에 크게 의존하지만, 그 동안 수행되었던 대부분의 디스크 해석에서는 공기에 의한 마찰열 소산율을 평균 주행속도에서의 대류 열전달 계수의 값으로 고정하여 디스크의 열변형 거동 특성 문제를 해석하였는데, 이것은 무리가 있었다. 따라서 본 연구에서는 디스크의 마찰표면과 벤트홀에서의 대류 열전달 계수를 0, 25, 50  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 로 변화시켜 가면서 디스크 브레이크의 방열효과를 공기와 직접 접촉하는 디스크 표면과 벤트홀 내부에 적용하여 벤탈레이티드 디스크의 열변형 거동 해석에서 보다 향상된 설계 데이터를 얻고자 하였다.

## 2-2. 마찰열과 제동모드

벤탈레이티드 디스크-패드식 제동 시스템에서 발생된 마찰열은 자동차의 주행속도에 크게 의존하는데, Fig. 3은 디스크 브레이크에 1회의 마찰 제동력을 가하였을 경우 마찰면에서 발생된 열량을 보여주고 있다. 여기서 벤탈레이티드 디스크와 패드의 접촉면적을 기준으로 볼 때 미끄럼 접촉 운동면의 1/6에서는 마찰열이 발생하고, 나머지 5/6에서는 디스크

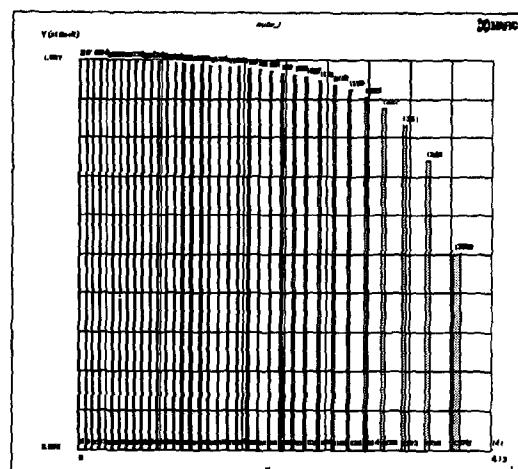


Fig. 3. Braking energy.

와 패드가 실제로 미끄럼 마찰접촉 운동을 하지 않기 때문에 생성된 열이 방열하게 된다.

브레이크의 제동성능에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 사용한 제동모드는 Fig. 4에서 제시한 것처럼 일본의 JASO 기준을 참고로 해석하였다. 즉, 97 km/h로 주행중인 자동차를 정지시키기 위하여 디스크와 패드 사이에 마찰 제동력을 가하는데, 기계적 제동력이 작용하는 발열구간에서는 4.1 sec 동안 감속하였고, 생성된 마찰열 방열구간인 25초까지는 가속하였으며, 다음 30초까지는 정속 주행하여 1회의 접촉 제동 사이클을 완성한다. 브레이크의 제동성능 시험에서는 1회와 동일한 제동조건을 15회 동안 반복하여 벤탈레이티드 디스크 브레이크에 적용함으로써 제동 시스템의 안전성을 확보하였다.

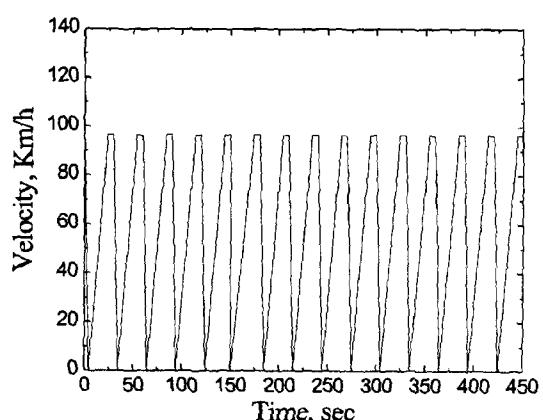


Fig. 4. Repeated braking mode.

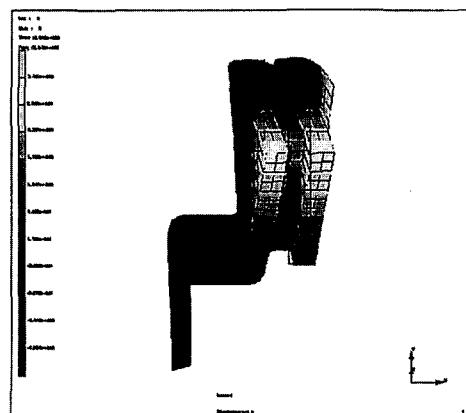
### 3. 열변형 거동해석 결과 및 토의

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

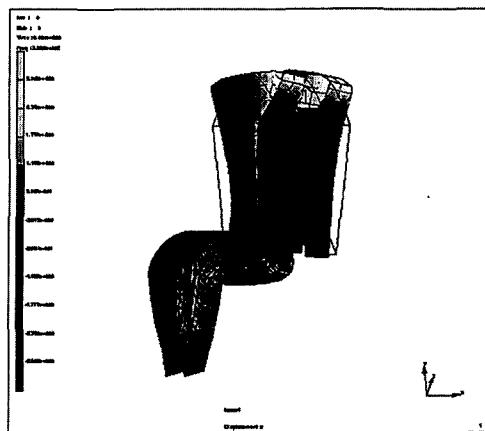
패드와 직접 미끄럼 마찰 접촉운동을 하는 벤틸레이티드 디스크 림(disk rim)의 열변형 거동 문제는 공기의 유동에 의한 냉각효과를 고려하여 해석하였다. 접촉 제동식의 브레이크 마찰면에 제동력이 가해지면서 발생된 마찰열은 접촉계면의 디스크와 패드의 소재내부로 전도되고, 주변의 공기와 접촉하는 디스크와 패드의 외피, 벤트홀의 내면을 따라서 공기의 대류에 의한 방열이 진행된다. 마찰계면에서 발생된 마찰열과 방열효과는 제동조건, 브레이크의 소재 특성, 설계조건에 따라서 달라지고, 그 결과는 제동회수에 따라서 온도분포가 서로 다르게 나타난다.

브레이크가 반복 제동하는 동안에 반경방향과 원주방향으로는 굽힘과 뒤틀림 거동을 반복하는데, 이것은 제동조건, 마찰열 등의 외부조건 뿐만 아니라 재질의 강성도(stiffness), 물성치, 감쇄성(damping)과 같은 디스크의 자체 성질에도 영향을 많이 받는다. 이러한 디스크의 변형 중에 특히 원주방향의 정현형태의 뒤틀림 거동(sinusoidal distortion)이 본 해석에서의 주요 관심사항이다.

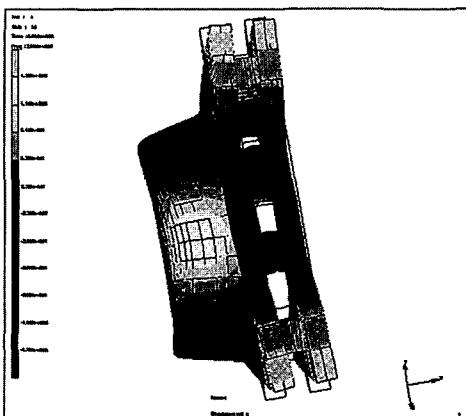
Fig. 5는 모달 해석(modal analysis)을 통해 원주방향으로 뒤틀림 변형거동이 잘 나타난 주파수 모드에 따라서 순차적으로 변하는 벤틸레이티드 디스크 형상을 보여주고 있다. Fig. 5에서 제시한 결과처럼 주파수 모드가 증가되면 원주방향의 벤트홀 원호를 따라서 뒤틀림 변형거동이 분명하게 발생되고 있음을 보여주고 있다. 이것은 패드와 접촉하는 디스크의 마찰면에서 발생된 열의 불균일한 소산에 의하여 축방향으로는 왼쪽으로 굽어지고, 원주방향으로는 정현형태의 뒤틀림 거동이 발생되고 있음을 알 수 있다. 이러한 마찰열에 의하여 발생된 뒤틀림 파형은 패드와 디스크간의 불균일 접촉을 조장함으로써 국부적인 접촉면압의 증가와 이로 인한 마찰열의 재축적, 열변



(a) 8th frequency profile



(b) 9th frequency profile



(c) 10th frequency profile

**Fig. 5. Distorted profiles of the ventilated disk.**

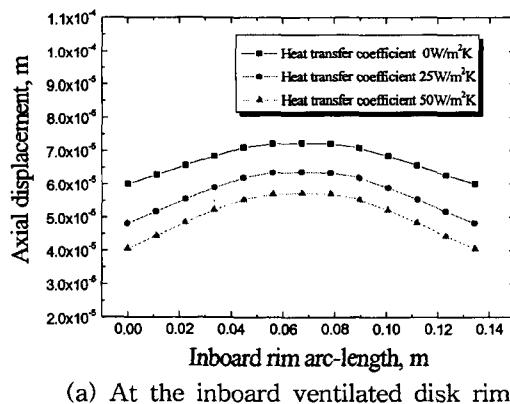
형 뒤틀림의 심화, 열탄성 마멸(thermoelastic wear)의 발생이라는 열탄성 불안정성이 반복하게 된다. 이러

한 열변형 거동의 문제점으로 제시된 결과는 디스크 마찰면에서의 적열점 현상(hot spot), 열탄성 마멸, 열크랙(thermal crack), 스컬과 진동의 발생이라는 가시적인 현상이 나타나고, 브레이크 제동 성능 측면에서는 제동거리의 증가와 극단적인 브레이크 파손이라는 안전성에 중대한 영향을 미치게 된다.

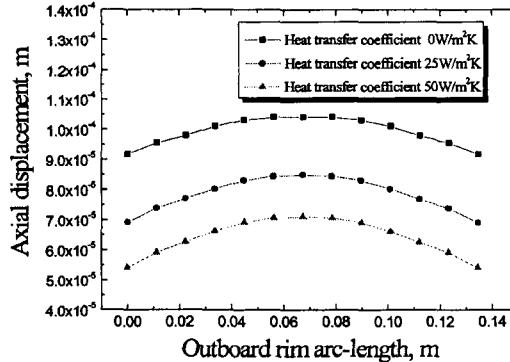
Figs. 6과 7에서는 15회의 브레이크 제동을 한 이후에 디스크 림의 왼쪽과 오른쪽에서 발생되는 축방향(x 방향)과 반경방향(y 방향)의 열변형 거동량을 각각 제시하고 있다. Fig. 6(a)는 왼쪽 디스크 림의 축방향 변형량을 제시한 결과로 공기에 의한 냉각효과가  $0, 25, 50 \text{ W/m}^2\text{K}$ 으로 증가할수록 최대 열변형 거동량은  $0.0723, 0.0636, 0.0572 \text{ mm}$ 로 감소하는 것으로 보아 열거동은 대단히 안정화를 이룬다. 그러나, 디스크 림의 최대와 최소 열변형량 차이를  $0, 25, 50 \text{ W/m}^2\text{K}$ 에 대하여 계산한 결과에 따르면  $0.0123, 0.0154, 0.0166 \text{ mm}$ 로 오히려 증가하고 있음을 알 수

있다. 즉, 벤탈레이티드 디스크에서는 공기에 의한 방열효과가 축방향의 변형량을 완화시키는 측면에서 대단히 긍정적인 효과를 보여주지만, 디스크의 원주 방향인 외주부 원호에 따라서는 대단히 작은 양이기는 하지만 뒤틀어지는 현상이 발생되고 있음을 나타낸다.

Fig. 6(b)의 결과에 의하면 오른쪽 디스크 림의 축방향 열변형 거동도 왼쪽 디스크 림과 유사한 경향을 보여주고 있다. 그러나, 냉각효과가  $h=25 \text{ W/m}^2\text{K}$ 인 경우, 오른쪽 디스크 림에서 발생된 최대 변형량은  $0.0849 \text{ mm}$ 로 왼쪽 림의  $0.0636 \text{ mm}$ 에 비하여  $33.5\%$ 나 증가된 결과를 보여주고 있다. 반면에 열변형량의 최대와 최소값 차이는  $0.0157 \text{ mm}$ 로 왼쪽 디스크 림과 거의 같다. 즉, 디스크의 마찰열 변형 거동량은 왼쪽 디스크 림과 오른쪽 림의 설치 위치에 따라서 대류 열전달의 영향을 다르게 받기 때문에 차이가 크게 나타나지만, 같은 디스크 림의 최대와

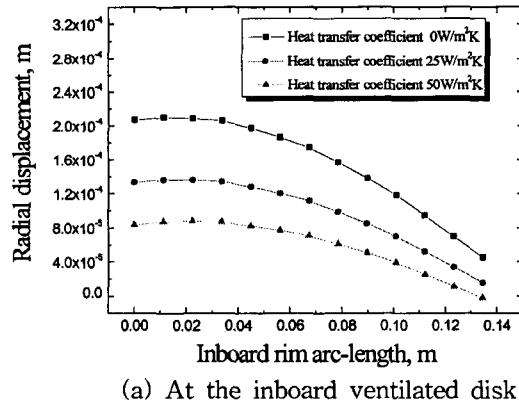


(a) At the inboard ventilated disk rim

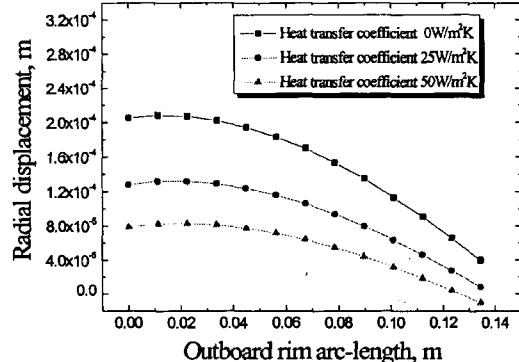


(b) At the outboard ventilated disk rim

Fig. 6. Axial displacement along the arc length of the vent hole after 15 braking periods.



(a) At the inboard ventilated disk



(b) At the outboard ventilated disk

Fig. 7. Radial displacement between the disk-pad rubbing surfaces after 15 braking periods.

최소 변형량에는 별다른 영향을 미치지 못하고 있음을 알 수 있다.

벤탈레이티드 디스크의 축방향 변형 거동량은 공기에 의한 방열효과가 긍정적으로 작용하여 최대 열변형량이 감소하는 경향을 보여주나, 대류 냉각효과를 크게 증가하면 국부적인 열변형량 차이로 외주 원호선을 따라서 발생된 디스크 림의 열뒤틀림 현상은 오히려 증가하는 문제점을 제기하고 있다. 이러한 원주방향의 뒤틀림 현상은 미끄럼 마찰면에서의 국부적인 변형거동으로 적열점의 발생과 열탄성 마멸이나 열크랙의 발생 우려가 높고, 결과적으로 미끄럼 마찰면에서는 소음과 진동이 발생되면서 궁극적으로 브레이크의 제동성능을 크게 약화시키는 원인으로 작용하게 된다.

Fig. 7(a)는 브레이크를 15회 제동하였을 때 왼쪽 디스크 림의 반경방향으로 발생된 열변형 거동량을 나타낸 결과로 디스크와 패드가 마찰하는 접촉면과 평행한  $y$ 방향이기 때문에 디스크의 마멸에는 직접적인 영향을 주지 않는다. 디스크의 공냉효과를  $0, 25, 50 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 로 증가할수록 최대 열변형 거동량은  $0.2, 0.136, 0.088 \text{ mm}$ 로 감소하면서 열거동은 대단히 안정된다. 그러나, 디스크 림의 최대와 최소 열변형량을  $0, 25, 50 \text{ W/m}^2 \text{K}$ 에 대하여 계산하면  $0.165, 0.1205, 0.0901 \text{ mm}$ 로 역시 감소하고 있음을 알 수 있다. 이것은 벤탈레이티드 디스크에서 공기에 의한 방열효과는 반경방향에 대하여 대단히 긍정적으로 작용하여 열변형 거동이 안정된다는 사실이다. Fig. 7(b)는 오른쪽 디스크 림에서 발생된 반경방향의 열변형 거동을 나타낸 것으로 왼쪽 디스크 림과 대단히 유사한 경향을 나타낸다. 그러나, 오른쪽 디스크 림의 최대와 최소 변형량 차이는  $0.169, 0.124, 0.093 \text{ mm}$ 로 왼쪽 디스크 림에 비하여 약간 높다.

이들의 결과에 의하면 디스크와 패드가 마찰 접촉면을 따라서, 즉 반경방향( $y$  방향)에서의 열변형 거동도 축방향 거동과 유사하게 오른쪽 디스크 림에서의 열변형 거동이 왼쪽 디스크 림에 비하여 크게 발생되기 때문에 제동에 따른 마멸, 열크랙 등이 발생될 우려가 매우 높다.

#### 4. 결 론

벤트홀의 방열효과를 고려한 벤탈레이티드 디스크 패드식 마찰면에서의 열변형 거동 특성을 비선형 유

한요소법으로 해석하였다.

냉각 매체인 공기와 접촉하는 디스크의 외부표면과 벤트홀 내부에 공기를 유동시키면 냉각효과의 증가에 따른 축방향으로의 열변형 거동은 크게 완화되면서 매크로 진동도 양호해진다. 그러나, 디스크의 벤트홀을 중심으로 원주방향의 열변형 뒤틀림 변형은 증가되면서 오히려 마멸과 스퀄은 증가시킬 수 있는 현상을 발견할 수 있다. 이것은 매크로 진동과 연계가 큰 해트부 뿐만 아니라 스퀄이나 열크랙의 원인이 되고 있는 벤트홀에 대한 최적화 설계가 대단히 중요하다는 사실을 강조한 결과이다.

#### 후 기

본 논문은 1998년도 한국과학재단의 국제공동연구비 지원(과제번호 985-1000-002-2)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Rhee, S. K., Tsang, P. H. S. and Wang, Y. S., "Friction-Induced Noise and Vibration of Disc Brakes," Intl. Conf. on Wear of Materials, Vol.2, pp.653-656, 1989.
- Matsui, H., Murakami, H., Nakanishi, H. and Tsuda, Y., "Analysis of Disc Brake Squeal," SAE 920553, pp.15-24, 1992.
- Nack, W. V. and Joshi, A. M., "Friction Induced Vibration: Brake Moan," SAE 951095, pp.1967-1973, 1995.
- Rainbolt, J. D., "Effects of Disk Material Selection on Disk Brake Rotor Configuration," SAE 750733, pp.1973-1814, 1975.
- 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.
- 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.
- Floquet A., and Dubourg, M. C., "Realistic Braking Operation Simulation of Ventilated Disk Brakes," J. of Tribology, Vol.118, pp.466-472, 1996.
- 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.
- Bryant, M. D. and Jau-Wen Lin, "Photoelastic Visuali-

- zation of Contact Phenomena Between Real Tribological Surfaces, With and Without Sliding," Wear, Vol.170, pp.267-279, 1993.
10. Burton, R. A., "Thermal Deformation in Frictionally Heated Contact," Wear, Vol.59, pp.1-20, 1980.
  11. Dow, T. A, "Thermoelastic Effects in Brakes," Wear, Vol.59, pp.213-221, 1980.
  12. 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.
  13. 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.
  14. MARC Program Capabilities, MARC Analysis Research Corp., 1998.