

히트 파이프를 장착한 디스크브레이크의 냉각 성능에 관한 연구

김무근† · 고성규* · 이문완**

(원고접수일 : 2008년 3월 28일, 심사완료일 : 2008년 5월 14일)

A Study for the Cooling Performance of a Brake with Heat Pipes

Moo-Geun Kim† · Sung-Kyu Ko* · Moon-Wan Lee**

Abstract : During braking operation, the surfaces of disk have severe contact conditions and high frictional heat would be generated between disk and pad surfaces. The heat makes high temperature gradient on disk surfaces and results in thermal deformation. To enhance the frictional heat dissipation, heat pipes are embedded in the ventilated type disk along the radial direction. The temperatures of the inner vent type disk and the brake disk with heat pipes are compared at the same operating conditions. By comparison a brake disk with heat pipes has higher cooling performance than the inner vent type disk.

Key words : Disk brake(디스크브레이크), Heat pipe(히트파이프), Cooling performance(냉각 성능), Inner vent type(이너벤트타입)

1. 서 론

1.1 연구 배경

차량의 급격한 증가와 더불어 교통사고의 지속적인 증가는 자동차의 제동시스템 즉, 브레이크 계통에 대한 중요성을 크게 인식시키는 계기가 되고 있다. 차량에서 브레이크는 차량의 안전보장이라는 기본적인 기능과 더불어 승객의 승차감 향상을 위해 지속적인 연구가 수행되고 있는 핵심 부품이다. 따라서 최근의 연구 경향은 브레이크 고유의 제동 기능 향상과 더불어 고성능화, 고기능화 즉, 가혹

한 제동조건에서의 시스템 안정성 확보, 디스크-패드의 수명연장 및 소음 진동의 감소에 집중되고 있다^[1].

디스크 브레이크는 디스크와 패드사이의 마찰력을 이용하여 움직이는 차량의 운동 속도를 가능한 빠른 시간 내에 감소시키거나 정지시키는데 그 목적이 있다. 제동 시 디스크와 패드의 접촉에 의해 발생하는 마찰열은 디스크 표면에 급격한 온도 구배를 발생시키고 이로 인하여 디스크에 Hot-Judder 현상이 발생한다^{[2]-[4]}. Hot-Judder 현상은 마찰로 인한 디스크의 열변형이 디스크 형상의 왜곡을 초래하는 것으로 마찰 시 디스크면의 수

* 교신저자(인제대학교 기계자동차공학부, E-mail: mechkmg@inje.ac.kr, Tel: 055)320-3184)

* 인제대학교 대학원 기계공학과

** (주)정우산기

직 방향으로 하중변화가 발생하여 진동이 유발되는 것을 말한다. 따라서 디스크 온도증가를 억제하거나 열변형 패턴을 조정함으로써 진동의 유발을 줄이거나 방지하려는 많은 연구와 시도가 있었다^{{5},{6}}

본 연구에서는 Hot-Judder 현상을 억제하는 한 가지방법으로서 기존의 이너벤트 타입의 디스크에 히트파이프를 장착하여 제동 시 발생되는 마찰열을 보다 효과적으로 방출함으로써 디스크의 온도상승을 억제하고자 한다.

1.2 연구내용 및 방법

본 연구에서는 차량 제동 시 이너벤트 타입 디스크와 히트파이프가 장착된 디스크 표면의 온도 변화를 디스크 회전수와 패드의 제동압력에 따라 측정하고, 방열성능에 대하여 비교 검토하고자 한다. 실험 과정에서 켈리퍼에 가해지는 유압, 디스크 회전수와 관성, 디스크 주변 공기의 유속 등을 조절하기 위하여 시중에 판매되고 있는 브레이크 다이나모를 사용하였으며 또한 각각 디스크의 형태에 맞는 켈리퍼를 제작하여 실험 장치를 구성하였다.

회전하는 디스크의 표면온도를 효과적으로 측정하기 위하여 비접촉식 온도계인 열화상 카메라를 사용하였으며 제동 압력에 따라 디스크의 회전 속도를 저속, 중속 및 고속으로 조절하여 디스크 표면의 순간 최고온도와 제동 후 온도변화를 측정하고 비교 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

21 실험장치

본 논문에서는 실제 차량의 운행조건과 동등한 관성(inertia), 제동압력, 회전수(rpm) 및 외부 유체 속도 등의 조건을 만족시키기 위하여 시중에 판매되고 있는 브레이크 다이나모를 사용하였으며, 열화상카메라(TH5104)를 사용하여 제동 시 디스크브레이크에서 발생되는 마찰열에 의한 디스크 표면 온도를 측정하였다.

Fig. 1은 브레이크 다이나모와 디스크 브레이크

의 설치 형태 및 열화상 카메라와 냉각 송풍기의 위치를 보여주고 있다.

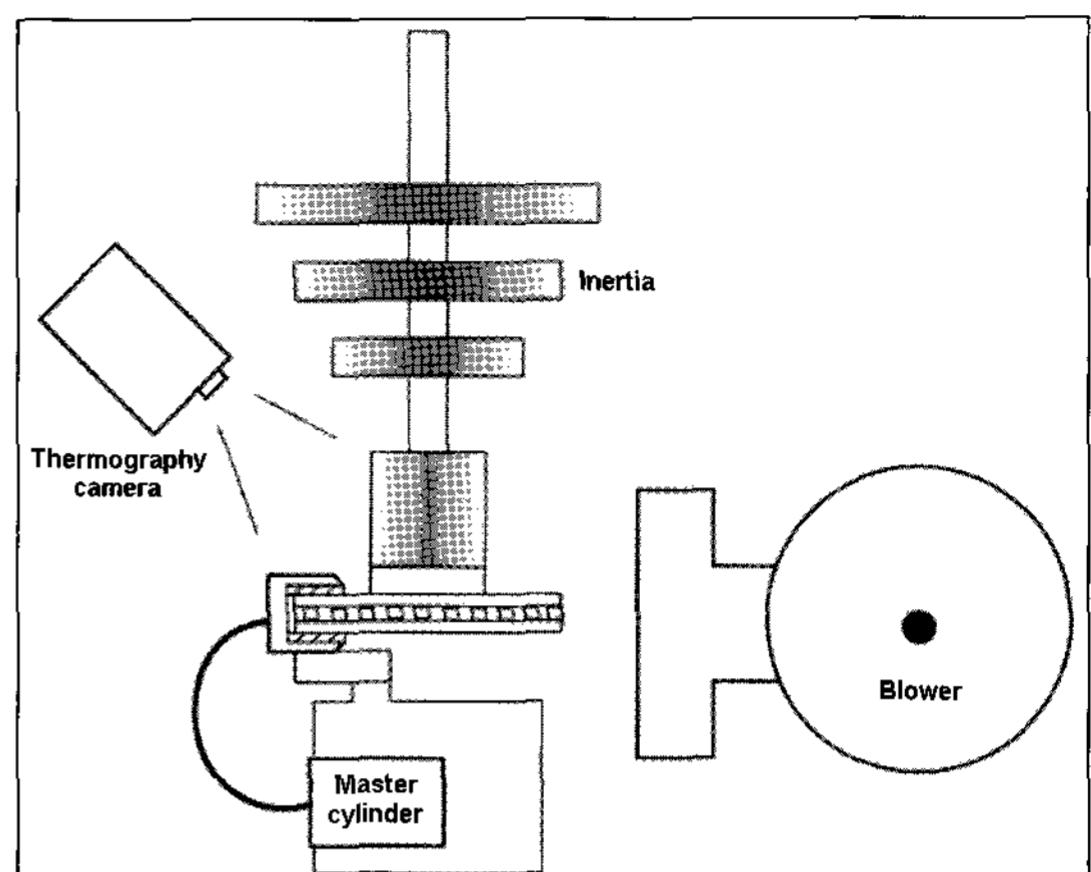
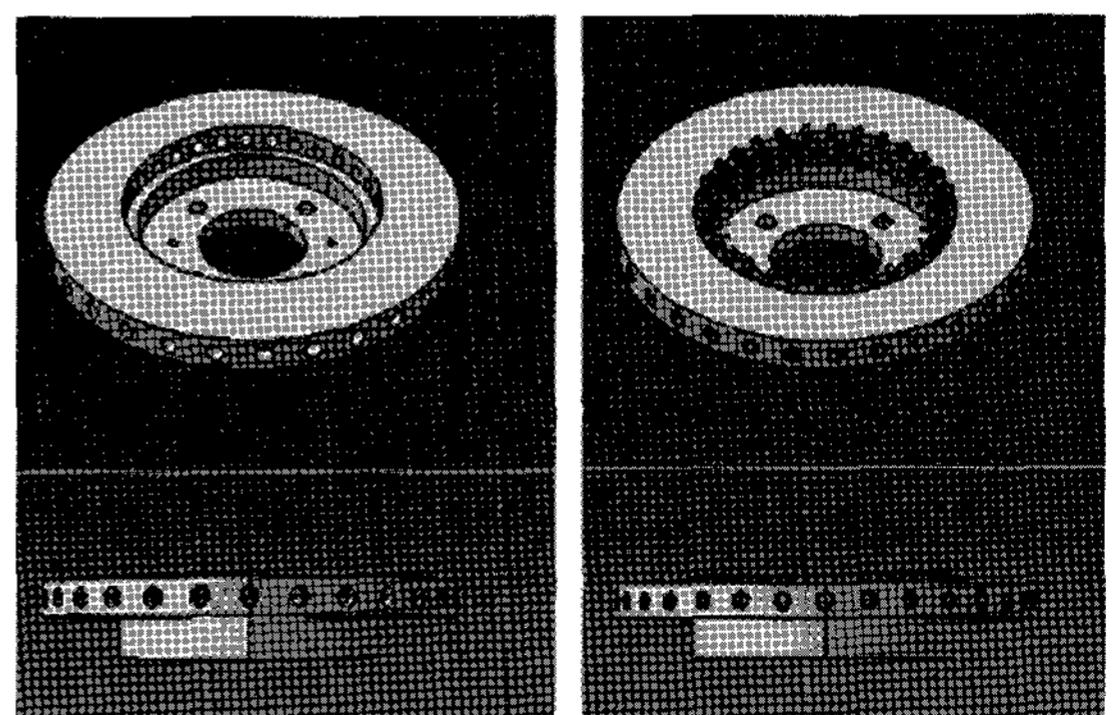


Fig. 1 Schematic diagrams of experimental apparatus

Table 1 Physical and thermal properties of the disk

Properties	Value
Thermal conductivity	54 W/m · K
Specific heat	586 J/kg · K
Density	7100 kg/m ³



(a) inner-vent (b) heat-pipe

Fig. 2 Simulation model of disks

실험에 사용한 디스크 브레이크는 주철제로 주문 제작하였으며, 지름 0.9mm인 환기 구멍이 원주를 따라 반경방향으로 30개 있다. 히트파이프는 30개의 환기 구멍에 삽입되어 있으며, 히트파이프의 열 전달 능력을 증가시키기 위하여 디스크 아래쪽에 높

이와 폭이 3mm이고, 길이가 10mm인 알루미늄 휠을 부착하였다.

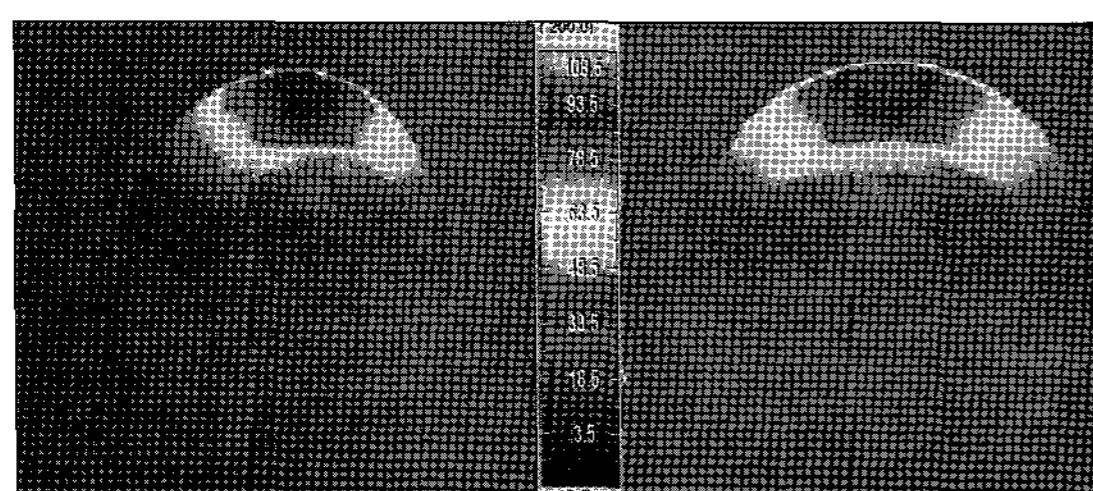
Fig. 2에서는 실험에 사용한 이너벤트 타입 디스크와 히트파이프 타입 디스크를 설계 프로그램인 CATIA를 이용해 모델링한 것이다.

Table 1은 실험에 사용된 주철제 디스크 재질에 대한 물리적 상태량 값을 나타내고 있다.

2.2 온도보정

열화상카메라를 이용하여 측정한 온도를 간접적으로 보정하기 위하여 열화상 이미지에 의한 온도와 열전대를 이용하여 측정한 온도를 비교하였다. 온도보정 시스템에는 K타입 열전대와 백금저항온도계 및 항온조가 사용되었다. K타입 열전대의 온도보정 시 표준온도계로 사용되는 백금저항온도계는 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 의 정확도를 갖는다.

실험에 사용된 열화상카메라는 일반적으로 사용되는 열화상카메라의 이미지가 대략적인 열의 분포만을 나타내어 주는 것과는 달리 프로그램을 이용하여 가로와 세로 방향의 좌표를 지정함으로써 원하는 지점의 온도를 정확하게 나타내어 줄 수 있기 때문에 열전대가 측정하는 위치와 동일한 지점의 온도를 나타낼 수 있다. 열화상 카메라는 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 혹은 $\pm 2\%$ 의 정확도를 가지고 있으며, 실험에서 측정하고자 하는 온도범위는 상온에서 550°C 사이이다.



(a) 30 degree

(b) 90 degree

Fig. 3 Thermal images photographed in directions

Fig. 3은 열이 가해진 상태에서의 디스크 측면 (a) 30도 방향과 정면 (b) 90도 방향에서 열화상 카메라로 촬영한 것으로 그림에서 보는 바와 같이

온도와 온도분포는 거의 정확하게 일치하였다.

2.3 경계조건

본 실험에서는 실제 차량의 제동 상태를 구현하기 위하여 디스크 주변 대기상태와 관성을 다음과 같이 정하였다. 차량이 시속 40km의 속도로 운전하고 있다고 가정하여 브레이크 다이나모에 장착된 디스크에 송풍기를 사용하여 온도 22°C 공기를 유속 11m/s로 공급하였다. 또한 실제 준중형 승용차량이 제동 시 나타내는 관성 조건을 만족시키기 위하여 실제 차량 관성의 1/4인 $5.9\text{kgf} \cdot \text{m/s}$ 크기의 관성을 주었다.

경계조건을 바탕으로 각각의 디스크에 대하여 켈리퍼로부터 패드에 가해지는 압력을 1.47MPa과 2.94MPa로 변화시키면서 각각의 압력에 대해 회전수를 900, 1200 및 1500rpm(저속, 중속 및 고속)으로 조절하여 제동 시 발생되는 마찰열에 의한 디스크 표면의 온도를 측정하였다.

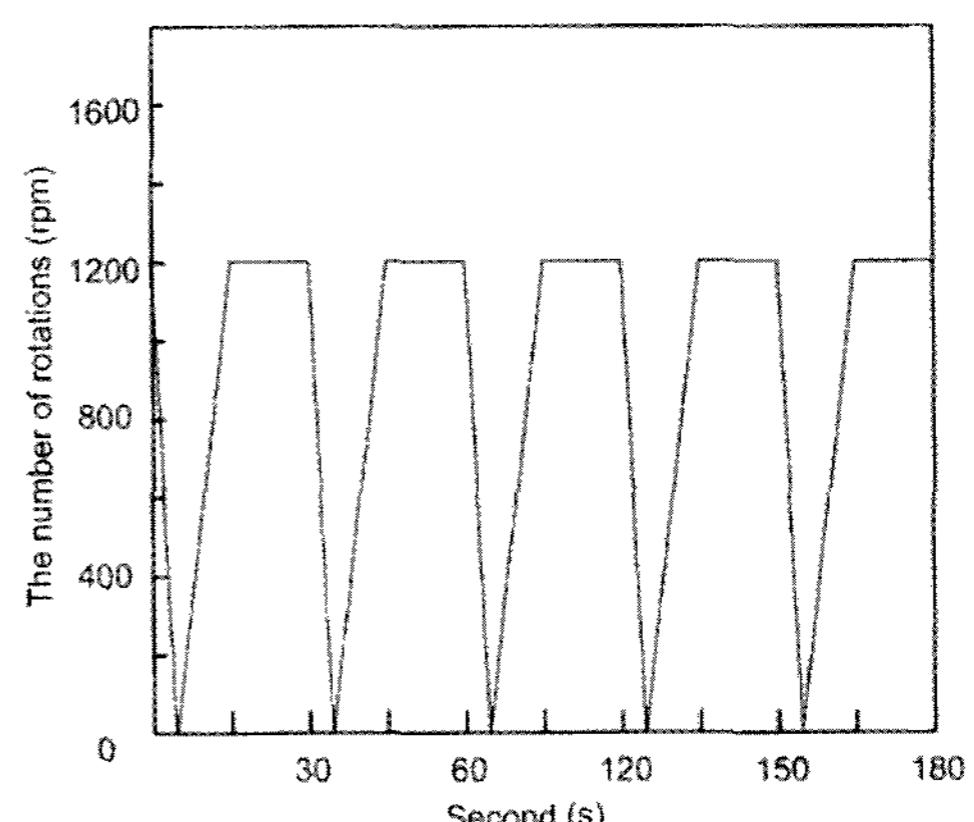


Fig. 4 Braking mode in a cycle

또한 Fig. 4은 본 논문에서 반복 제동 시 디스크의 표면온도를 측정하기 위해 편성한 반복제동 사이클로써 초기 1200rpm으로 주행 중인 자동차가 완전히 정지한 다음 다시 초기 회전수까지 재 가속하고 이후 정속주행을 하는 것을 1회 접촉 제동 사이클로 한다. 1회 제동에서 소요되는 총시간은 30초이며, 사이클을 6회 반복하여 제동 시마다 온도를 측정하였다.

2.4 알루미늄 흰의 효과

디스크 내부의 원주방향으로 부착한 알루미늄 흰은 환기구멍에 삽입된 히트파이프를 고정시키는 역할 뿐만 아니라 히트 파이프의 열방출 효과를 증대시키기 위한 것이다. 알루미늄 흰의 효과를 알아보기 위하여 이너벤트 타입과 흰붙이 타입 및 흰붙이 히트파이프 타입의 3가지 디스크에 대하여 1200rpm 회전 속도에서 제동 압력을 각각 1.47MPa과 2.94MPa로 바꾸면서 온도를 측정하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 제동압력과 회전수에 따른 온도 변화

Fig. 5부터 Fig. 7은 제동 압력이 1.47MPa일 때 회전속도를 900, 1200 및 1500rpm으로 증가시키면서 촬영한 디스크 표면온도이다.

사진의 좌측은 이너벤트 타입 디스크에 대한 온도를 나타내고 우측은 히트파이프 타입 디스크의 온도를 나타낸다.

그림으로부터 이너벤트 타입의 디스크는 회전속도 증가에 따라 온도 변화가 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 반면 히트파이프가 장착된 디스크의 경우는 회전속도가 큰 경우에 냉각이 더 잘되고 있음을 알 수 있으며, 이것은 히트파이프가 원심력에 의하여 열매체 전달량 증가로 방열능력이 증가하는 것으로 판단된다.

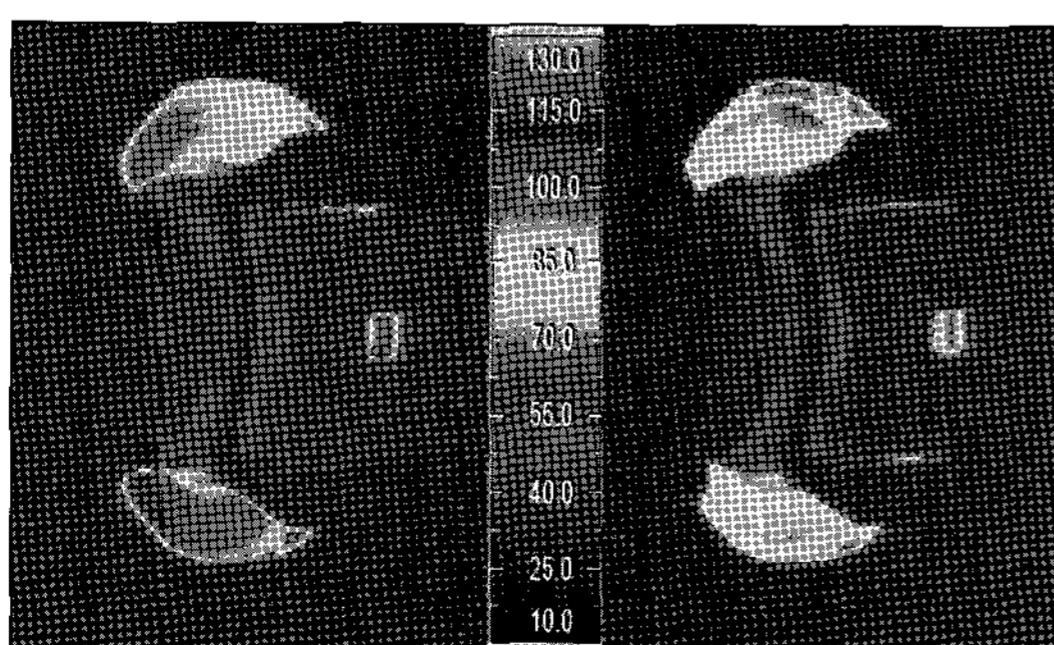


Fig. 5 Surface temperature distribution of disk for $P_{ba}=1.47\text{MPa}$, $N=900\text{rpm}$

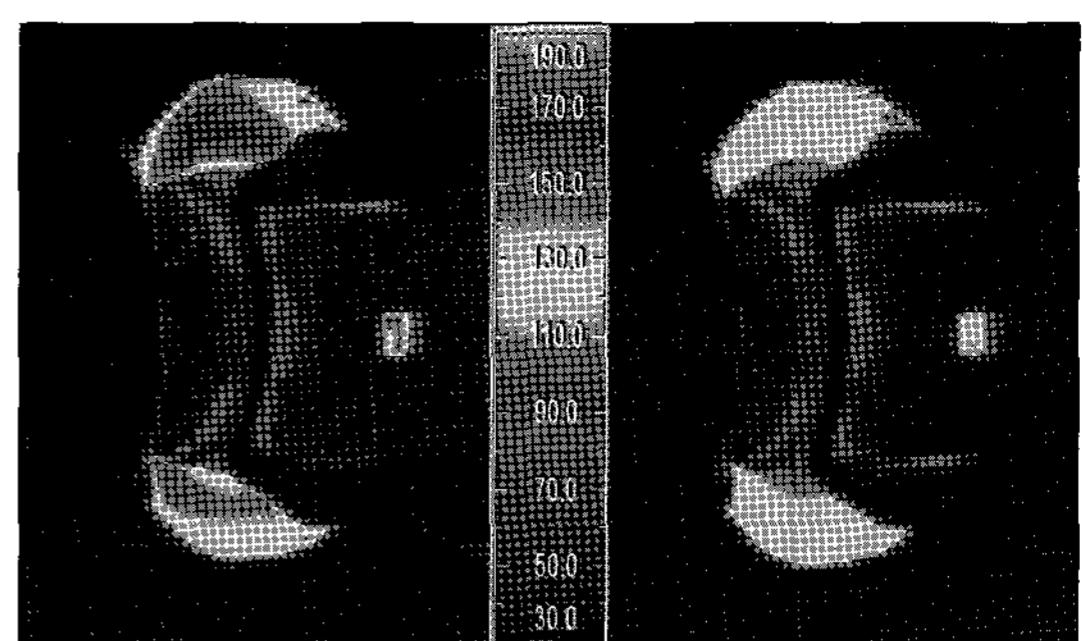


Fig. 6 Surface temperature distribution of disk for $P_{ba}=1.47\text{MPa}$, $N=1200\text{rpm}$

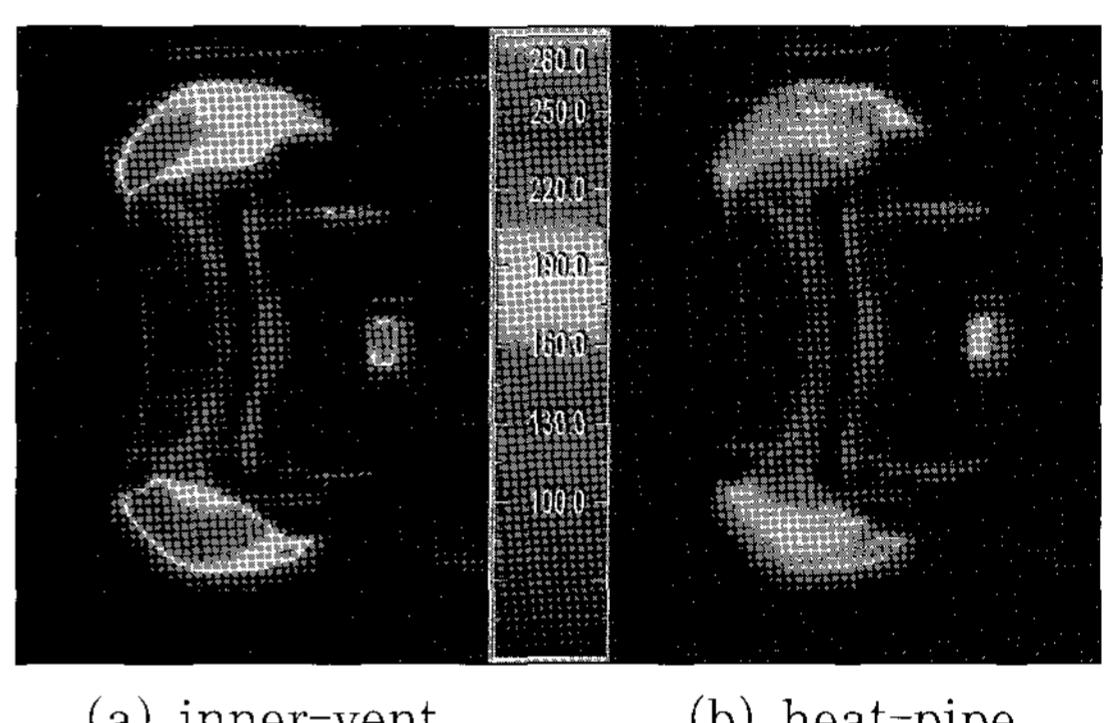


Fig. 7 Surface temperature distribution of disk for $P_{ba}=1.47\text{MPa}$, $N=1500\text{rpm}$

더욱이 이너벤트 타입의 디스크에 비하여 디스크 표면의 온도분포도 매우 균일함을 알 수 있다. 이것은 히트파이프가 가지고 있는 신속한 열전달 특성과 함께 증발부, 응축부의 균일한 온도분포 특성 때문으로 여겨진다.

Fig. 8은 다양한 운전 조건에서 제동할 때 디스크 표면의 최고 온도를 나타내고 있다.

회전수가 증가할수록 두 가지 타입의 디스크의 최고온도 차이가 커졌으며, 이는 히트파이프 타입 디스크가 이너벤트 타입 디스크 보다 제동 시 발생되는 열량에 따라 일정한 비율로 보다 더 빠르게 열을 소산시킴을 알 수 있다.

Fig. 9부터 Fig. 11은 제동압력이 2.94MPa일 때 회전속도 900, 1200 및 1500rpm에 대하여 이너벤트 타입 디스크와 히트파이프 타입 디스크의 온도분포를 각각 나타내고 있다.

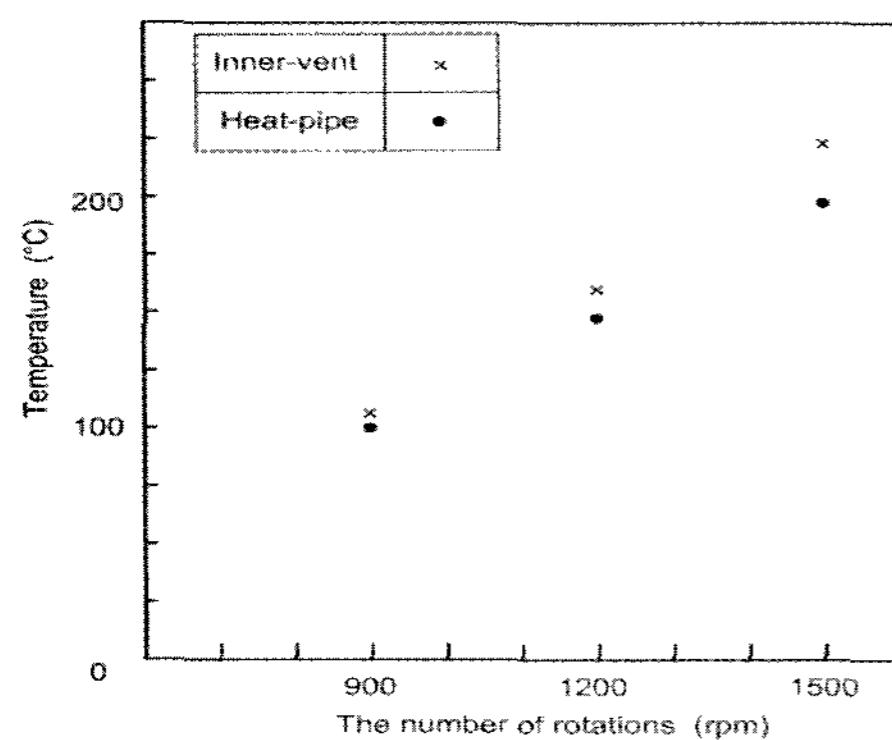


Fig. 8 The highest temperature of disk at $N=900$, 1200 , 1500 rpm for $P_{ba}=1.47$ MPa

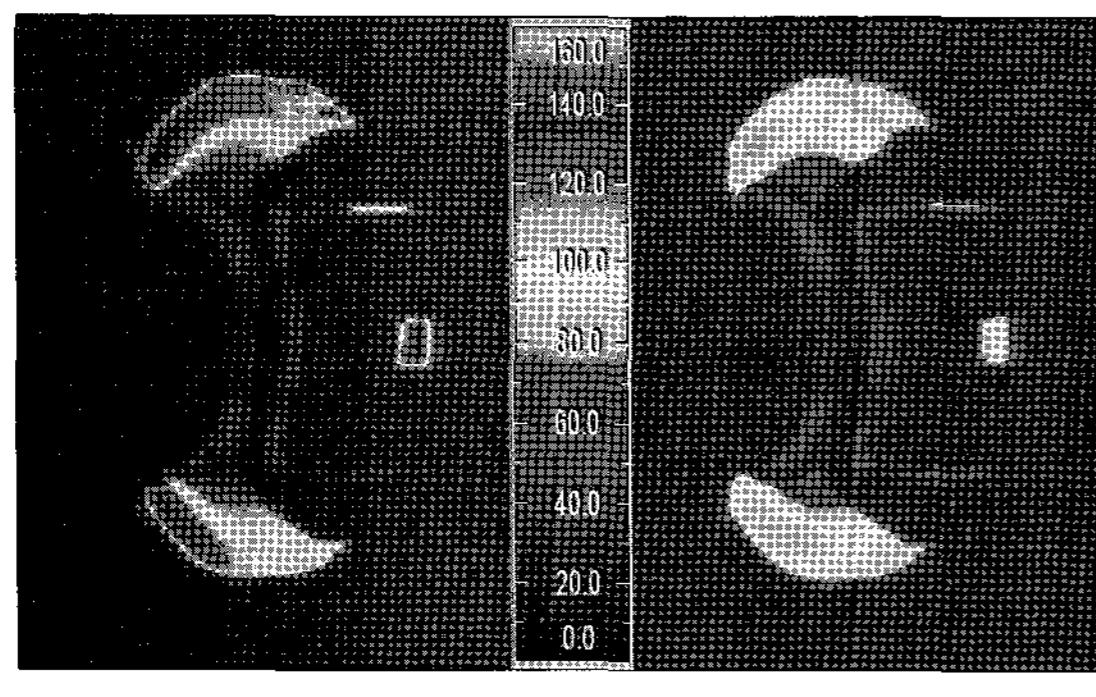


Fig. 9 Surface temperature distribution of disk for $P_{ba}=2.94$ MPa, $N=900$ rpm

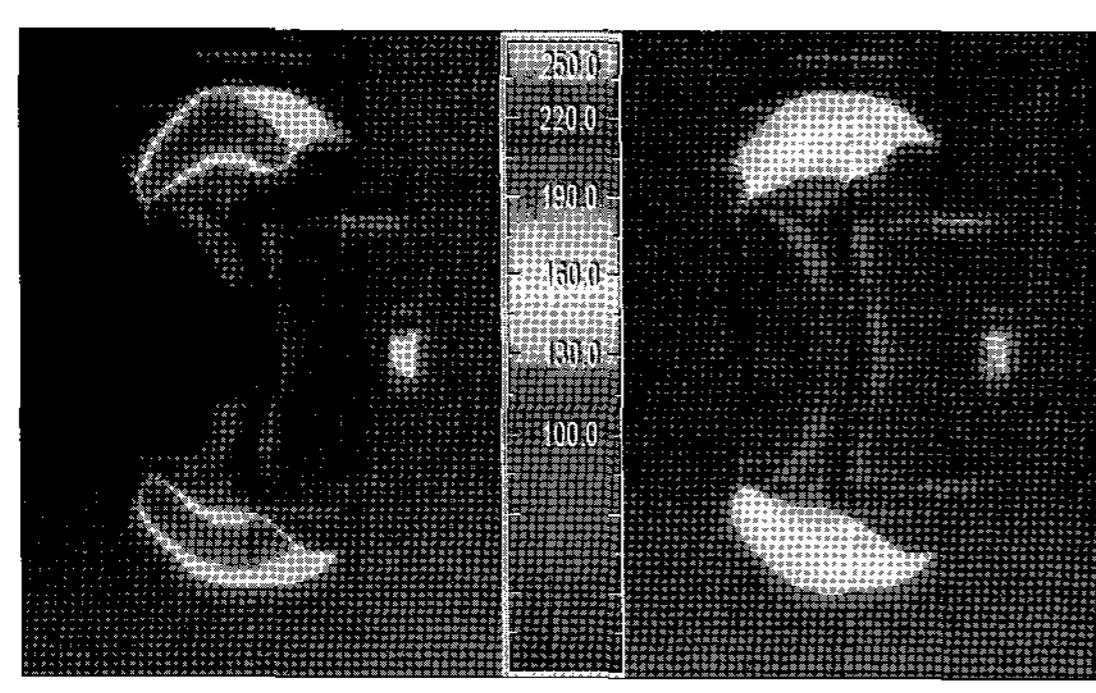


Fig. 10 Surface temperature distribution of disk for $P_{ba}=2.94$ MPa, $N=1200$ rpm

제동압력이 1.47MPa일 때와 비교하면 전체적인 온도는 상승하였지만, 제동압력이 1.47MPa일 때와 같이 제동속도가 증가할수록 제동 시 발생되는 열량이 증가하여 보다 높은 온도를 나타내었으며, 히트파이프가 장착된 디스크가 제동 시 더 낮은 온도를 나타내었다.

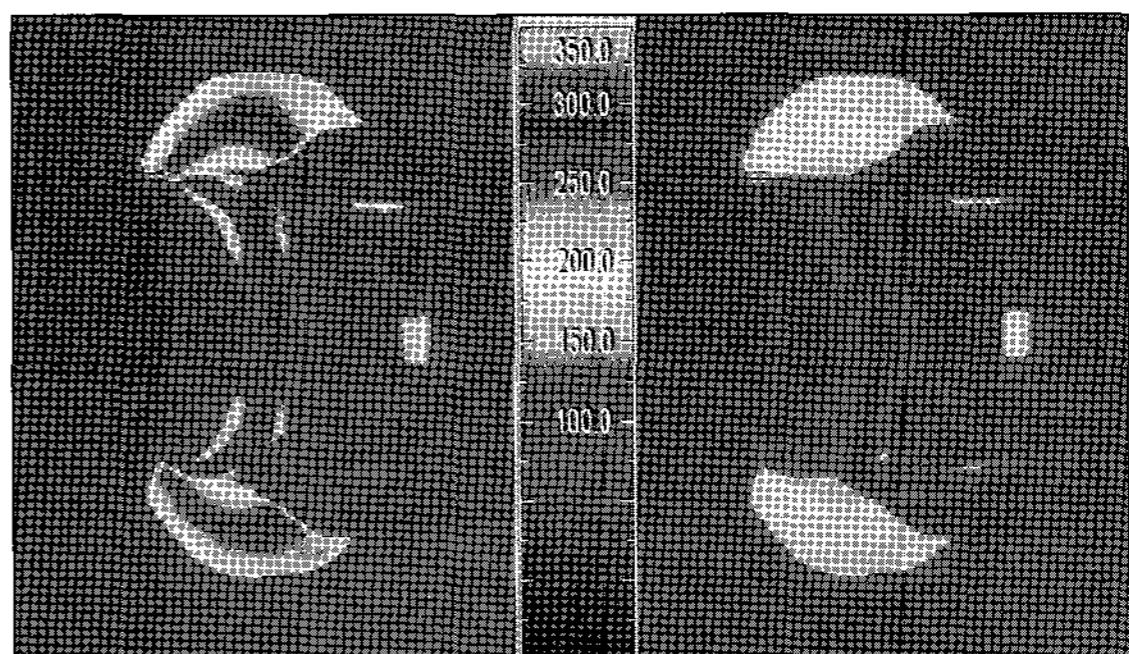


Fig. 11 Surface temperature distribution of disk for $P_{ba}=2.94$ MPa, $N=1500$ rpm

3.2 알루미늄 흰의 효과

알루미늄 흰은 앞서 말한 바와 같이 히트파이프를 고정하고, 방열 효과를 증대시키기 위한 것으로 알루미늄 흰과 히트파이프의 접촉저항을 줄이기 위하여 thermal grease를 코팅한 후 체결하였다.

또한 디스크가 회전할 때 냉각 흰과 다른 부품 사이에 간섭이 일어나지 않는 범위에서 흰의 최대 크기를 결정하였다. 이와 같은 흰의 냉각효과를 비교 확인하기 위하여 이너벤트 타입과 흰붙이 타입 및 흰붙이 히트파이프 타입의 3가지 디스크에 대하여 제동 압력을 1.47, 2.94MPa로 바꾸어 측정하였으며, Fig. 12와 Fig. 13, 그리고, Table 2에 실험 결과를 나타내었다.

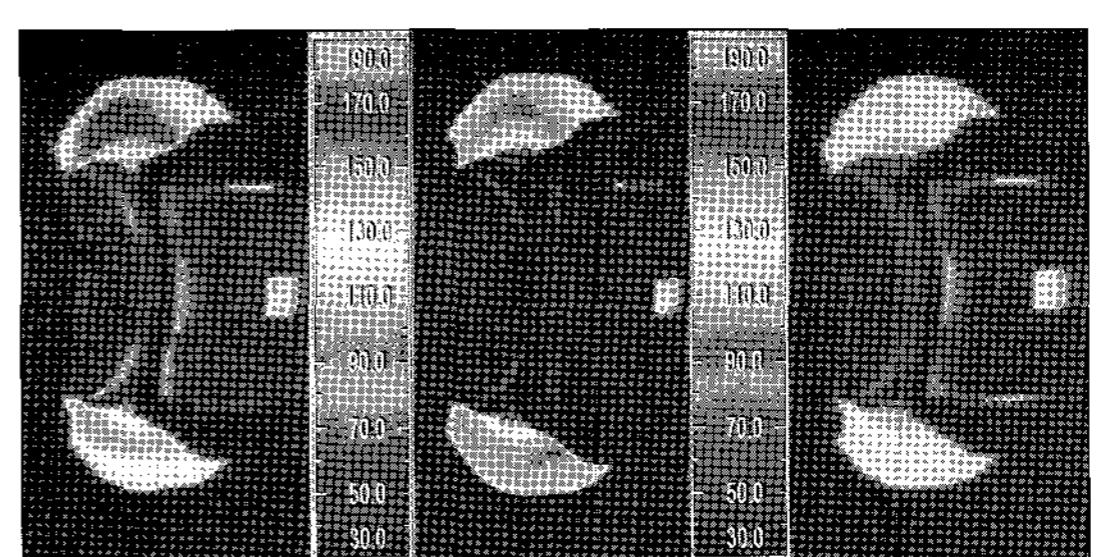
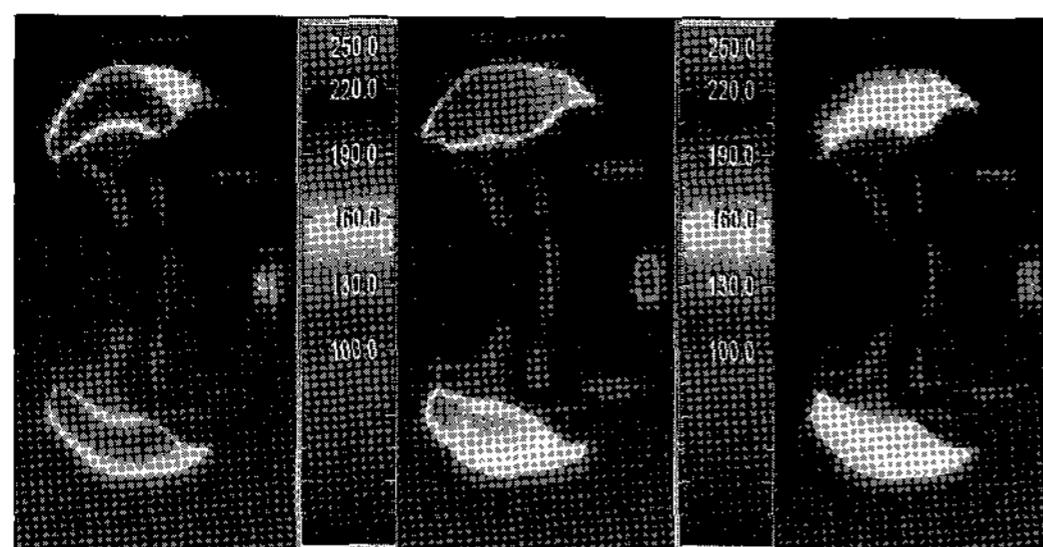


Fig. 12 Comparison of brake disk temperature for different types at $P_{ba}=1.47$ MPa, $N=1200$ rpm



(a) inner-vent (b) fin (c) fin and heat-pipe

Fig. 13 Comparison of brake disk temperature for different types at $P_{ba}=2.94\text{MPa}$, $N=1200\text{rpm}$

Table 2 Highest temperature for 3 types of disk

Pressure (MPa)	inner-vent	fin	heat-pipe
1.47	167°C	157°C	146°C
2.94	221°C	198°C	168°C

그림에서 보듯이 두 가지의 제동 압력 조건에서 가장 온도가 낮은 디스크는 흰불이히트파이프 타입 디스크였으며 이너벤트 타입 디스크의 온도가 가장 높았다.

이너벤트 타입과 흰불이 타입 디스크의 최고온도 차이보다 흰불이 타입 디스크와 흰불이히트파이프 타입 디스크의 최고온도 차이가 더 커졌으며, 이는 알루미늄 흰만 장착했을 때보다 히트파이프와 알루미늄 흰을 같이 장착하면 보다 더 큰 효과를 볼 수 있음을 의미한다.

3.3 반복 제동 시 온도변화

Fig. 4에 주어진 반복제동 사이클을 이용하여 이너벤트 타입과 히트파이프 타입 디스크에 대하여 6회 반복 제동하였으며, 매회 제동 시마다 열화상 카메라로 촬영한 결과가 Fig. 14에 정리되어 있다. 제동 사이클 횟수가 증가 할수록 디스크 표면 온도는 상승하며 그 값이 이너벤트 타입 디스크가 히트파이프 타입 디스크보다 높음을 육안으로 확인할 수 있다.

Fig. 15는 제동 단계에 대한 두 가지 타입 디스크 표면의 최고온도를 보여주고 있다. 이 그래프에서 두 가지 타입의 디스크 모두 사이클 횟수가 더

해질수록 온도상승 폭이 줄어들었으며, 또한 각각의 사이클에 대한 두 타입의 디스크 표면 최고온도 차이의 변화도 없었다.

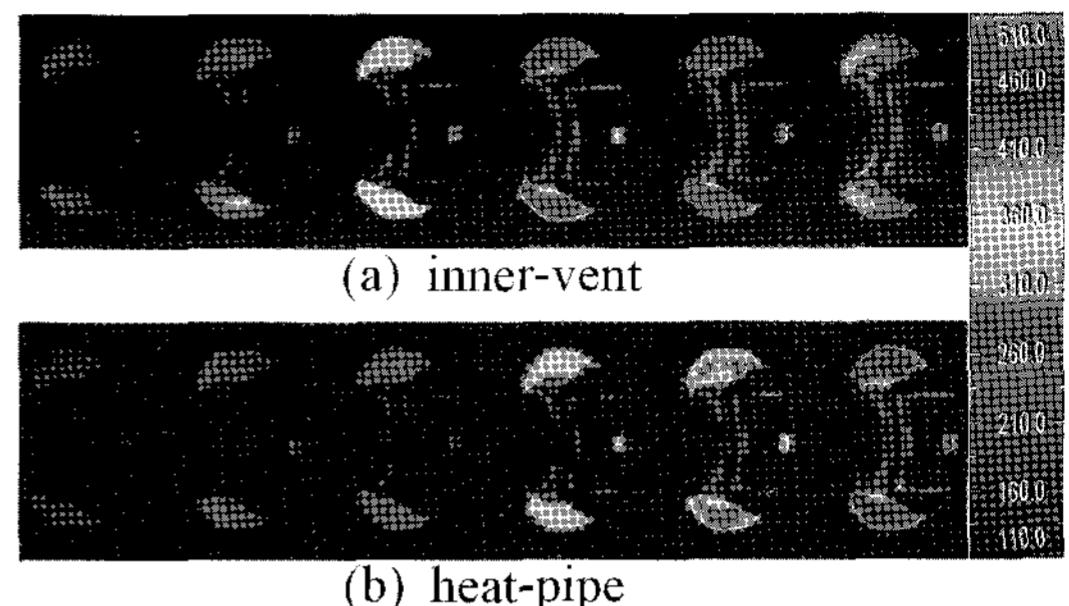


Fig. 14 Temperature of disk at every braking steps

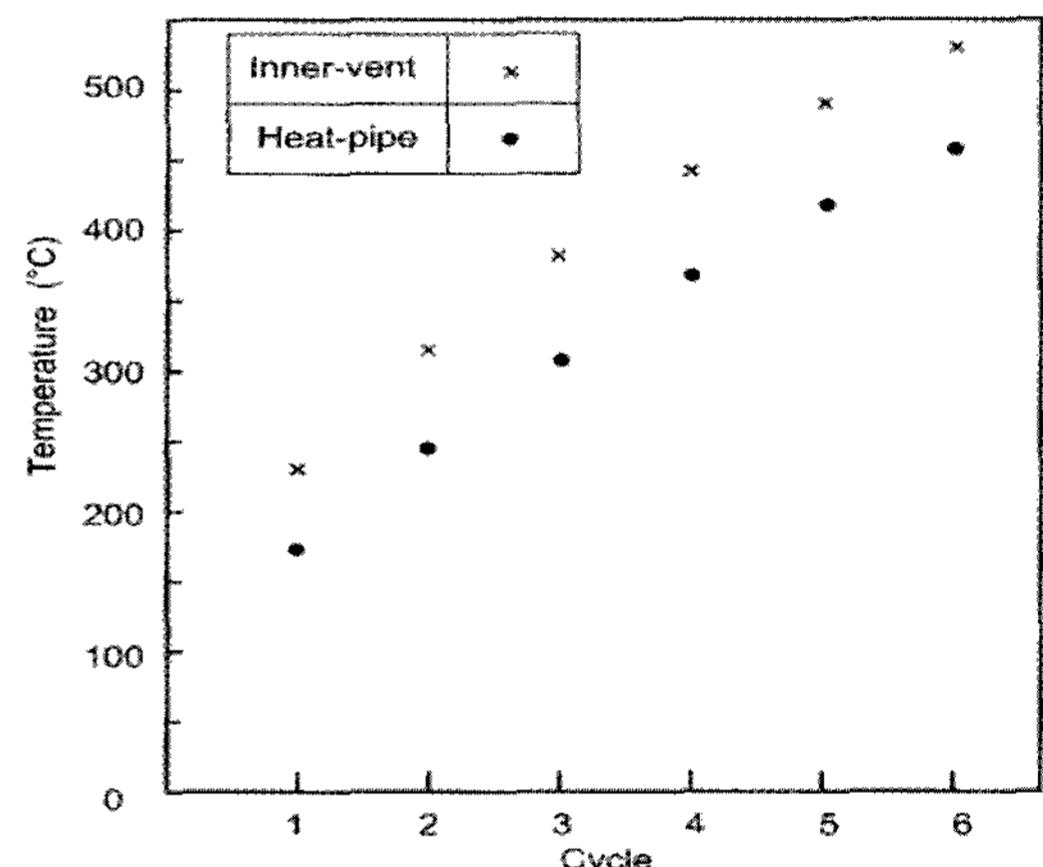


Fig. 15 The highest temperature of disk surface at braking steps in a cycle

4. 결 론

1) 비접촉식 온도계인 열화상 카메라를 사용하여 디스크 제동압력과 회전속도에 따른 표면 온도를 측정할 수 있었으며 이너벤트 타입과 히트파이프 타입의 열적 성능을 비교하였다.

2) 이너벤트타입 디스크는 회전속도 증가에 따라 온도 변화가 그다지 크지 않고, 분포도 불균일한 반면에 히트파이프 디스크는 회전속도가 클수록 냉각이 더 잘되고 온도분포도 균일함을 알 수 있었다.

3) 회전속도가 증가할수록 이너벤트 타입과 히트파이프 타입 디스크의 표면 최고온도 차이가 증가

하였다.

4) 방열휀만 설치한 경우보다 히트파이프를 동시에 장착한 경우에 디스크 표면온도가 더욱 감소하였다.

5) 제동 사이클 횟수가 증가 할수록 디스크 표면온도는 상승하였고, 온도 증가율은 감소하였다. 히트파이프 타입 디스크는 이너벤트 타입 디스크보다 표면 최고온도가 약 70°C 정도 낮았다.

후 기

본 논문은 2005년 인제대학교 학술연구조성비 보조에 의하여 수행하였습니다. 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Yeo. T. I, "Finite Element Analysis of Thermoelastic Contact Stability with Sliding Friction", J. of KSME. Series A. 22, No. 7, pp. 1185-1192, 1998.
- [2] H. Cho, M. Kim and C. Cho, "Analysis of The Cause for Judder Vibration of Automotive Disk Brake", KSAE 2005 fall conference, pp. 1056~1061, 2005.
- [3] K. Lee and B. D. Palph, "Condition of Frictional Contact in Disk and Their Effect on Brake Judder", SAE 980598.
- [4] A. Vries and M. Wagner, "The Brake Judder Phenomenon", SAE Technical Paper Series, SAE 920554 (SP-914), pp. 25-33, 1992.
- [5] Rainbolt. J. D, "Effect of Disk Material Selection on Disk Brake Rotor Configuration", SAE 750733, pp. 1973-1814, 1975.
- [6] Floquet. A and Dubourg. M. C, "Realistic Operation Simulation of Ventilated Disk Brakes", J. of Tribology. 118, pp. 466-472, 1996.

저 자 소 개



김무근(金茂根)

1959년생, 1981년 서울대학교 기계공학과 졸업(학사), 1984년 서울대학교 기계공학과 졸업(석사), 1991년 서울대학교 기계공학과 졸업(박사), 1985년 ~ 1987년 한국과학기술연구소 근무, 1992년~현재 인제대학교 기계자동차공학부 정교수



고성규(高成奎)

1981년생, 2007년 인제대학교 기계공학과 졸업(학사), 2007년~현재 인제대학교 기계공학과 재학(석사)



이문완(李文玩)

1979년생, 2005년 인제대학교 기계공학과 졸업(학사), 2007년 인제대학교 기계공학과 졸업(석사), 2007년~현재 (주)정우산기 기술팀 팀원