

< 논문 >

반 실린더형 홈을 가진 벤틸레이티드 디스크 브레이크에서의 국소열전달 측정 및 수치 해석

이대희[†] · 박성봉* · 임창을** · 김흥섭*** · 이관수***

(2006년 2월 21일 접수, 2006년 4월 26일 심사완료)

Local Heat Transfer Measurements and Numerical Analysis in the Ventilated Disc Brake with Semi-Cylindrical Grooves

Dae Hee Lee, Sung Bong Park, Chang Yul Lim, Heung Seop Kim and Kwan Soo Lee

Key Words: Semi-Cylindrical Groove(반실린더형 홈), Disc Brake(디스크 브레이크), Thermal Judder(열적 저더), Local Heat Transfer Coefficient(국소열전달계수), Finite Element (유한 요소), Maximum Temperature(최대 온도)

Abstract

A ventilated disc brake having semi-cylindrical grooves has been proposed to improve the thermal judder by way of heat transfer enhancement. The local heat transfer coefficients were measured in the flow passage of disc brake. These measured local heat transfer data were utilized to do the finite element numerical analysis which predicts the maximum temperatures on the disc brake. The results show that the maximum temperatures on the disc surface with semi-cylindrical grooves are approximately 35.2% lower than those without them.

기호설명

P : 홈의 피치(mm)
 D : 홈의 폭(mm)
 h : 열전달 계수($W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$)
 q_v'' : Inrex의 정미 열유속(W/m^2)
 T_w : 벽면 온도($^\circ\text{C}$)
 T_∞ : 자유흐름의 온도($^\circ\text{C}$)
 q_{rad}'' : 복사에 의한 정미 열유속(W/m^2)
 q_{cond}'' : 전도에 의한 정미 열유속(W/m^2)
 f : Intrex의 코팅 균일도

Nu : Nusselt number
 k : 열전도계수($W/m\text{ }^\circ\text{C}$)
 d_h : 수력 직경
 a : 차량의 감가속비
 I_r : 바퀴의 회전 관성 모멘트
 m : 차량의 질량(kg)
 R_o : 패드의 외측 둘레원의 반경
 R_i : 패드의 내측 둘레원의 반경
 T_{LC} : 액정 온도($^\circ\text{C}$)
 X : 입구로부터 유체흐름 방향으로 거리(m)

1. 서론

현대 사회는 자동차의 급격한 증가와 더불어 교통사고의 증가가 큰 사회적 문제로 나타났다. 즉, 자동차의 고속화 추세에 따른 제동시스템, 즉 브레이크 계통에 대한 중요성이 부각되어지고 있으며, 제동거리를 대폭 단축시키는 연구들이 수 행되어지고 있다.

[†] 책임저자, 회원, 인제대학교 기계자동차공학부

E-mail : mechdhl@inje.ac.kr

TEL : (055)320-3185 FAX : (055)320-1234

* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 인제대학교 대학원 기계공학과

*** 회원, 인제대학교 기계자동차공학부

**** 회원, 한양대학교 기계공학과

브레이크 제동시 브레이크 패드와 디스크의 접촉면 사이에 마찰 및 온도의 급상승이 야기되어지며, 이것은 브레이크의 디스크 두께변화를 발생시켜서, 디스크의 마멸, 열 크랙, 여러 가지 열적 저터 현상을 일으킨다. 이 결과로 나타나는 소음과 진동은 결국 브레이크 시스템의 수명을 단축시키거나 고장으로 이어지게 되어 차량의 안정성에 큰 영향을 주게 된다.

제동시의 브레이크 시스템의 열 발산 능력은 브레이크의 성능과 수명에 많은 영향을 미치고 있으므로, 디스크 브레이크 설계시 하중에 의한 응력의 초과를 고려한 설계와 더불어 마찰열을 냉각시키기 위한 것이 중요하므로 이에 대한 많은 연구들이 진행되어지고 있다.

Barber^(1,3)와 Lee 등⁽²⁾은 브레이크의 열해석 및 열변형 해석의 이론적 방법을 제안하였고, Hartsock 등⁽⁴⁾은 임계속도를 결정하는 파라미터 선정에 대한 연구를 진행하였다. Floquet 등⁽⁵⁾은 축대칭으로 운동하는 3차원 브레이크 모델에 비대칭, 비정상 상태의 열 유속 조건에 대한 분석을 수행하였고, Zagodzki 등⁽⁶⁾과 Yi 등⁽⁷⁾은 열탄성 그리고 열전도 문제에 대해 유한요소방법을 적용하여 각각 고유치 및 고유모드에 해당하는 임계속도와 TEI를 기존의 이론해와 비교하였다. 또한 여태인⁽⁸⁾은 열전달 문제와 열탄성 문제를 연계하여 디스크 표면의 과도기적 온도를 수치적으로 묘사한 결과 시스템이 불안정해지는 임계속도를 구하고, 패드의 크기, 물성치 등이 열탄성 불안정성에 미치는 영향 등을 연구했다. Floquet 등⁽⁹⁾은 3차원 유한 요소 모델의 불안정성을 보완하기 위해서 움직이는 축대칭 부분(hub caps)은 3-D FEM으로, 반복적인 비축대칭 부분은 FFT-FEM을 이용한 해석을 수행하여 런닝 타임과 계산 용량을 줄였다.

본 연구에서는 기존의 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 열 방출을 증가시키기 위해 반 실린더형 홈을 유로 내에 설치하여 액정을 이용한 열전달 측정기법을 도입하여 국소열전달 계수 측정 실험을 수행하고 이 결과를 바탕으로 유로부에 평균 열전달계수를 적용하던 기존의 수치해석과 달리 실제의 국소열전달 계수 값을 적용하여 3차원 FFT-FEM 모델을 이용한 수치해석을 수행하여 디스크 브레이크의 온도 해석을 하였다.

2. 국소 열전달 측정 실험

2.1 실험 장치

본 실험에 사용된 풍동은 개방형 아음속 풍동으로 15kW의 가변형 D.C 모터를 사용하여 구동한다. 풍동으로 유입된 공기가 확대부(diffuser)와 정류실(settling chamber)을 거쳐서 수축부를 통과하여 가속되고 시험부로 공기가 유입된다. 유입되는 유체의 온도를 측정하기 위하여 지름이 0.02 cm인 Chromega-Alomega (K-type) 열전대를 사용하였다. 실험에 사용된 열전대는 데이터수집시스템 (STRAWBERRY TREE/DATA Shuttle 12-bit A/D Board & PentiumIV/PC)에 연결되어 있으며, 오차가 ± 0.01 °C인 항온조 (NESLAB/ RTE-221D) 내에서 백금온도센서에 대하여 보정하였다. 시험부는 투명한 아크릴과 스티로폼을 이용하여 제작되어 유동가시화와 액정의 칼라변화를 비디오카메라로 촬영할 수 있도록 제작되었다.

2.1.1 시험부(Test section)

풍동 내에서 열전달 및 유체유동 측정을 용이하게 하기 위해서 핀과 디스크 부분의 크기를 실물 크기의 10배 확대한 실험 모델을 제작하였다. 투명 아크릴 판을 이용하여 상하 평판을 제작하고 좌우 평판은 스티로폼을 이용하여 Fig. 1과 같이 제작하였다. 스티로폼을 선택한 것은 열전도율이 매우 낮아서 평판에서의 전도에 의한 열손실을 최소화 할 수 있기 때문이다.

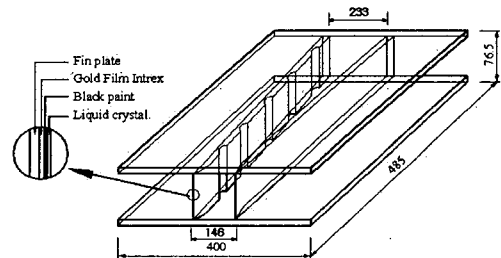


Fig. 1 Schematic diagram of the test section

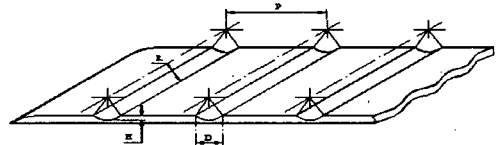


Fig. 2 Schematic diagram of the fin plate with semi-cylindrical grooves

스치로폼 판에 반실린더형 홈을 설치하고 그 위에 Gold Film Intrex(두께 0.13mm의 투명한 폴리 에스터 필름에 얇은 금코팅을 함)를 부착 시키고 검정 페인트와 액정(liquid crystal)을 도포하였다. 부착된 Gold Film Intrex의 양단에 접착력이 있는 구리포일 전극을 부착시키고 전선을 연결하여 직 류 전류를 흘려보내면, Gold Film Intrex 표면에 일정한 두께로 매우 얇게 코팅된 금박 막의 저항 으로 인하여 등열 유속 경계조건이 형성된다.

실제의 디스크 브레이크는 원형이기 때문에 유 로는 입구가 출구보다 작아지게 된다. 따라서 시 험부의 유로는 점점 확장되는 형태를 가지고 있 고, Fig. 1은 이러한 형상을 보여주고 있다.

실험모델은 두께가 10mm이고, 상하 plate의 크 기는 400×485mm 이고, 좌우 plate의 크기는 485×76.5mm 이다. 상하 plate의 간격은 76.5mm이고, 좌우 plate의 간격은 입구 쪽에서는 146mm이고 출 구에서는 233mm가 된다.

Fig. 2는 반 실린더 형 홈의 표면형상을 나타내 었다. 첫 번째 홈은 유로 입구로부터 26mm되는 지점에서 설치되어졌다. H는 groove의 깊이를 나 타내며, P는 groove의 피치를 나타낸다. 또한, D 는 groove의 폭을 나타낸다. Groove의 깊이와 폭 의 비는 일정하게 유지하고, groove의 피치와 폭 의 비는 P/D=3.0, 5.0, 7.0으로 변화시켰다.

2.2 실험 해석

본 연구에서는 액정을 이용한 디지털영상처리 기법을 이용한 측정기법을 사용하였다.⁽¹⁰⁾ 사용한 액정(R35C1W)은 미세캡슐형태로 대략 1℃의 온 도구간에 걸쳐서 전체 칼라 스펙트럼이 나타난 다. 이 액정의 칼라를 디지털영상처리장치를 이 용하여 촬영하고 분석하여 표면 온도를 측정하는 방법이다. 시험부에서 원하는 지점의 온도를 측 정하기 위해서는 Gold Film Intrex에 공급되는 직 류 전류를 조절한다. 이렇게 조절된 열유속에 따 라서 나타나는 칼라의 위치도 변화된다. 원하는 지점에 칼라가 도달할 때까지 전류를 조절하고 정상 상태가 될 때까지 기다린 후 온도를 측정하 고 이 값이 열전달 계수로 나타내어진다. 특정한 칼라 위치에서의 국소 열전달계수는 다음 식으로 계산된다.

$$h = \frac{q_v''}{T_w - T_\infty} \quad (1)$$

여기서, T_w 는 액정에 의해서 측정되는 벽면온 도, T_∞ 는 자유흐름의 온도, 그리고, q_v'' 는 Intrex 의 정미 열유속으로 Intrex의 전체 열유속으로부터 전도와 복사에 의한 열 손실을 뺀 값이다.

$$q_v'' = \frac{fIV}{A} - q_{rad}'' - q_{cond}'' \quad (2)$$

$$q_{rad}'' = \epsilon\sigma[(T_w + 273.15)^4 - (T_\infty + 273.15)^4] \quad (3)$$

여기서 f 는 Intrex에서 국소적인 전기가열과 평 균가열의 비로서 Intrex의 금코팅의 균일도를 나 타내고, ϵ 은 실험 표면에 코팅된 검정 페인트와 액정의 방사율, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수를 나 타낸다. 실험 모델 벽에서의 전도 열손실 q_{cond}'' 는 표면에서의 전체 가열에 비하여 매우 작기 때문 에 0으로 가정하였다. Lee^(11,12) 등에 의하면 Intrex 의 크기를 작게 하고 Intrex가 감겨져 있는 roll의 중간부분을 취할 경우 f 의 값은 0.98이상 이 된다. I 는 전류의 세기, V 는 전압의 세기, A 는 Intrex의 단면적을 나타낸다. 국소 열전달계수 값을 구하 고, Nu 수를 다음과 같이 정의하였다.

$$Nu = \frac{hd_h}{k} \quad (4)$$

여기서 d_h 는 덕트입구 형상에 따른 수력직경, k 는 공기의 열전도계수이다.

2.3 실험 결과

Figs. 3~5는 레이놀즈 수가 20000에서 반 실린 터형 홈이 표면에 P/D = 3, 5, 7로 설치된 경우와 평판인 경우의 비교 실험 결과이다.

홈이 설치되지 않은 경우는 유입 부분에서 가 장 큰 Nu수를 가진 후 급격히 감소하여 $X/d_h = 1$ 인 지점에서 최소값을 나타내고 있지만, 홈이 설치된 경우는 Nu 수의 증가와 감소의 반 복을 나타내는데 이것은 유체가 흘러가면서 발달 된 경계층이 홈의 영향으로 파괴되어 vortex를 발 생시키고, 이 유체가 다시 홈을 빠져나와서 평판 위로 흐르던 유체와 혼합되어 평판에 부딪치는 것 을 반복해서 나타나는 현상으로 판단된다.

이 결과 홈이 설치된 경우가 홈이 설치되지 않 은 경우보다 높은 Nu수를 가지게 된다. 특히 P/D=3인 경우의 Nu수가 flat surface인 경우와 비 교하여 최대 92.8%, P/D=5와 7인 경우도 각각 82%와 68% 증가하였다.

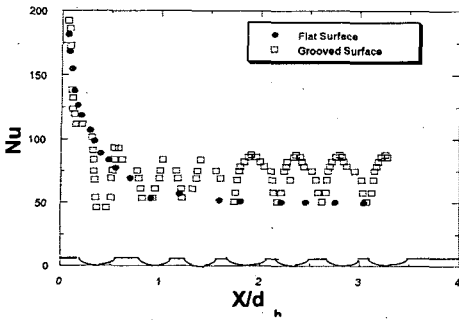


Fig. 3 Comparison of the local Nusselt Number between flat surface and grooved surface for P/D=3

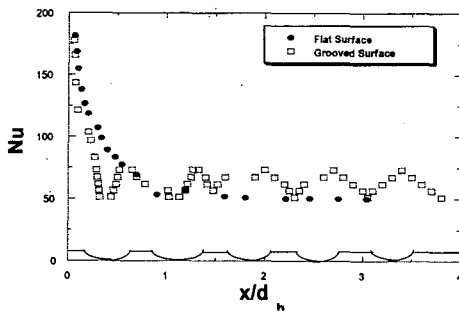


Fig. 4 Comparison of the local Nusselt Number between flat surface and grooved surface for P/D=5

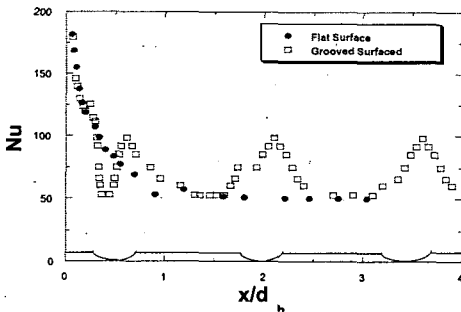


Fig. 5 Comparison of the local Nusselt Number between flat surface and grooved surface for P/D=7

이와 같은 실험 결과는 P/D의 값이 작을수록, 즉 홈이 촘촘히 설치된 경우가 높은 열전달계수 값을 가지는 경향을 나타냄을 보여준다.

본 연구의 국소 열전달 측정 실험에 대한 불확실도는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Nusselt number uncertainty analysis

X_i	Value	δX_i	$\left(\frac{\delta X_i}{X_i} \frac{\partial N}{\partial X_i} \right) \times 100(\%)$
ϵ	0.9	0.05	2.0
f	1.0	0.02	2.62
q_{cond}	0 (W/m ²)	22.17	0.89
I	3.79	0.01	0.46
V	34.88	0.125	0.64
A	0.0576(m ²)	0.0005	0.09
T_{LC}	35.5(°C)	0.25	2.89
T_{∞}	21.6(°C)	0.15	0.59
L	0.485(m)	0.008	0.1
Total Nu uncertainty		$\delta Nu / Nu = 3.97\%$	

3. 수치해석

3.1 디스크 브레이크 모델

본 연구에서는 벤틸레이티드 디스크 브레이크의 열방출 성능을 개선하기 위해 반실린더형 홈(semi-cylindrical grooves)을 가진 개량형 벤틸레이티드 디스크를 제안하였고, 기존의 벤틸레이티드 디스크 브레이크와의 온도 분포 비교를 통해 상호 성능을 분석하였다.

사용된 모델은 반 실린더형 홈을 가진 디스크 브레이크와 홈이 없는 경우의 열특성을 규명하기 위해서 유한요소 해석법을 이용하여 수행하였으며, 모델의 벤트 홀의 수는 일반 벤틸레이티드 디스크 브레이크와 같이 32개를 사용하여 모델링하였다.

유한요소 해석에서 사용한 디스크 브레이크의 형상은 Fig. 6에 나타내었다. 디스크 브레이크는 원주상에서 11.25도 간격으로 대칭을 이루고 있고, 다시 이것의 1/2 대칭을 이루므로, 실제 해석은 이 부분을 ANSYS 자동 격자 생성기능을 이용하여 모델링하였다. 반실린더형 홈이 있는 디스크 브레이크와 홈이 없는 디스크 브레이크의 요소와 절점 수는 각각 10,989, 68,824개 및 11,059, 75,122개이며 요소는 10절점 사면체 고차 요소를 사용하였다.

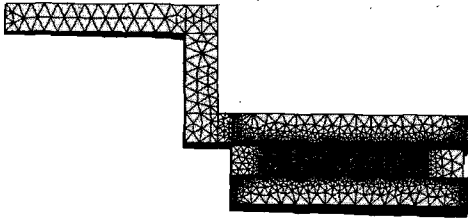


Fig. 6(a) Finite element model of ventilated disc brake

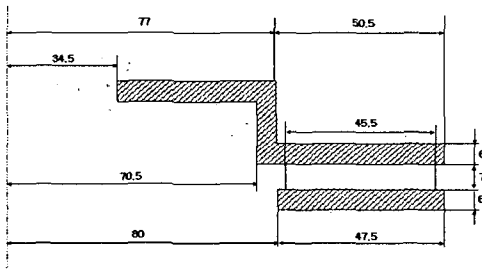


Fig. 6(b) Cross section of ventilated disc brake

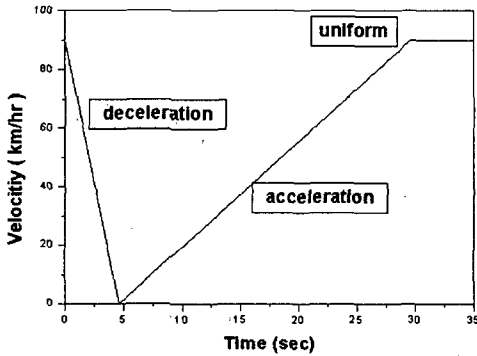


Fig. 7 Velocity for a braking condition

3.2 해석 조건

자동차가 제동하게 될 때 운동에너지는 패드와 디스크의 마찰에너지 뿐만 아니라 자동차 바퀴와 지면과의 마찰, 공기 저항에 의한 손실 등 많은 요인에 의해 기타 에너지로 변환되어진다. 그러나 자동차 바퀴와 지면의 마찰은 무시할 정도로 작다고 가정하고 또한 기타 요인에 의한 에너지 손실도 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정한다면 주행 중인 운동에너지가 모두 패드와 디스크의 마찰 에너지로 변환된다고 가정할 수 있다.^(13,14)

Table 2 Material properties for a disc brake

Elastic modulus, MPa	1.25E5
Poisson's ratio	0.25
Density, kg/m ³	7100
Coefficient of thermal expansion, 1/K	12E-6
Thermal conductivity, W/m · K	54
Specific heat, J/kg · K	586

마찰에 의한 열유속은 다음 식과 같다.

$$q'' = \frac{a\gamma(m + \frac{I_r}{r^2})[2V_1 - a(t_2 - t_1)]}{10\pi(R_o^2 - R_i^2)} \quad (5)$$

I_r 는 바퀴의 회전관성 모멘트, V_1 은 차량의 초기 속도, a 는 차량의 감가속비, r 은 타이어의 반경, R_o 는 pad의 외측 둘레원의 반경, R_i 는 패드의 내측 둘레원의 반경, m 은 차량 질량을 나타낸다. 여기서, γ 는 열분배율로써 다음 식과 같다.

$$\gamma = \frac{q_d''}{q_d'' + q_p''} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_p c_p k_p}{\rho_d c_d k_d}\right)^{1/2}} \quad (6)$$

여기서, ρ 는 밀도, c 는 비열, k 는 열전도계수값이며, 첨자 d 는 디스크 브레이크, p 는 패드의 물성치를 의미한다.

열입력 조건은 Fig. 7에 보여 지는 것과 같이 90km로 주행하던 차량이 감속을 하고 다시 가속을 반복하는 제동조건을 적용하여 계산하였다.

적용된 디스크 브레이크와 패드의 재질은 주철과 비석면 계통의 복합재료를 각각 적용하였다.

Table 2은 유한요소 해석시 적용된 디스크 브레이크의 물리적 특성이다.

반 실린더 형 홈이 있는 벤트 홀 부분에 적용되는 열전달계수는 실험에서 얻어진 결과를 이용하여 평균 열전달계수가 아닌 국소 열전달계수 값을 가지고 유한요소해석에 적용하였다.

3.3 해석 결과

1회 제동시 벤트 홀의 온도 변화 그래프를 Figs. 8~10에 나타내었다. 유입부(입구에서 5mm 지점), 중앙부(입구로부터 23mm 지점)와 출구부(입구로부터 40mm 지점)로 나누어서 보면, 유입부는 패드가 닿지 않는 부분을 포함하게 되므로, 중앙부

와 출구부에 비해서 낮은 온도를 형성하고 있고, 홈이 설치된 경우 홈의 영향으로 열전달계수 값이 증가되어, 이 영향으로 디스크 브레이크의 전체적인 온도가 낮아지는 경향을 나타내었다. 홈이 없는 경우보다 유로에서의 온도 변화가 최대 4% 낮게 나타났는데, 홈의 영향으로 상승된 열전달계수가 작용하여 높은 열전달을 하기 때문이다.

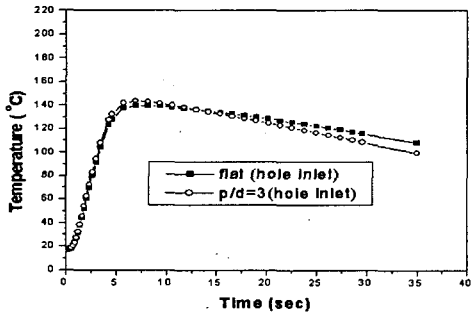


Fig. 8 Temperature distribution at inlet of vent hole (1cycle)

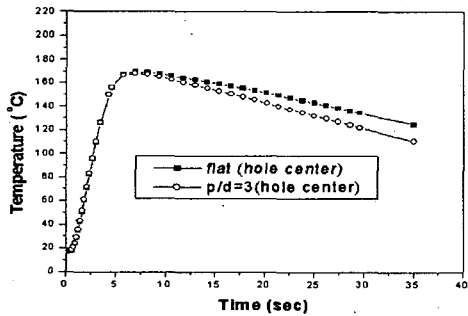


Fig. 9 Temperature distribution at center of vent hole (1cycle)

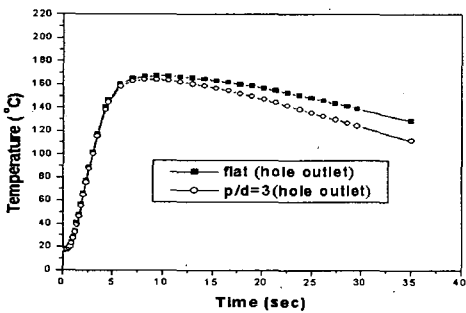


Fig. 10 Temperature distribution at outlet of vent hole (1cycle)

Figs. 11~13에 보여지는 결과는 디스크 브레이크의 10회 반복 작동시의 결과이다. 1회 작동시보다 홈이 설치된 경우와 홈이 없는 경우의 온도차가 급격히 나고 있음을 보여준다. 이것은 반실린더 형 홈에 의해서 상승된 대류 열전달계수의 영향과 높은 온도에 의해서 열전달량이 급격히 차이가 나는 결과로 보여진다. 홈이 설치된 경우는 홈이 없는 경우와 비교하여 유입부, 중앙부와 출구부 온도가 각각 최대 17.2%, 18.2%,

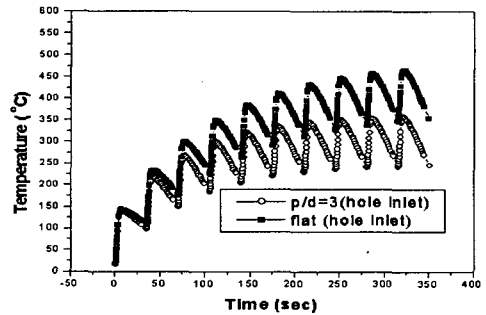


Fig. 11 Temperature distribution at inlet of vent hole (10cycles)

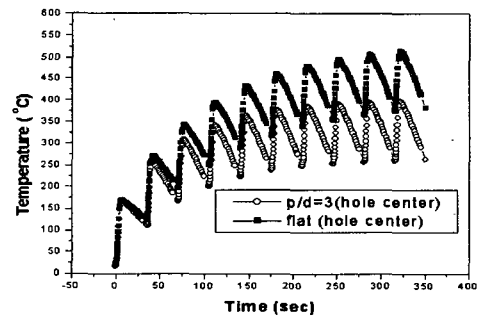


Fig. 12 Temperature distribution at center of vent hole (10cycles)

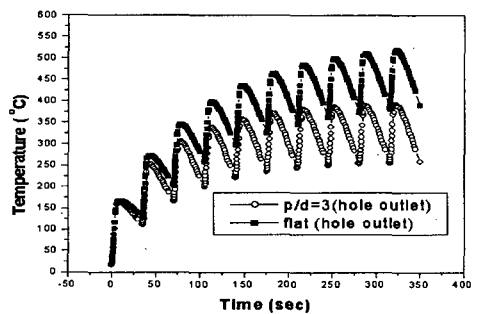


Fig. 13 Temperature distribution at outlet of vent hole (10cycles)

19.7% 감소되어진다. 홈에 의한 열전달계수의 값은 유입부가 높지만 디스크의 온도는 중앙부와 출구부의 온도가 높아 실제적인 열전달량은 중앙부와 출구부가 유입부보다 더 촉진된 결과로 보여진다. 이 결과는 반실린더형 홈을 가진 디스크 브레이크의 최대 온도가 낮아짐으로써 재질의 변화를 방지하고, 열적 저더 현상 및 열크랙 현상을 완화 시킬 수 있다는 결과로 분석된다.

4. 결 론

본 연구에서는 반 실린더형 홈을 가진 디스크 브레이크 유로 내에서의 열전달 측정 및 수치 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유로 내에 홈의 피치와 폭의 비(P/D)가 작을수록 열전달계수 값이 증가되는 경향이 나타났다. P/D=3, 5, 7인 경우가 홈이 설치되지 않은 경우에 비해서 열전달계수값이 각각 최대 98%, 82%, 68% 증가하였다.

(2) 3차원 유한요소 해석을 이용한 수치해석 결과에서는 반 실린더형 홈이 설치된 경우가 설치되지 않은 경우에 비해서 최대 온도가 약 19.7% 감소되는 경향이 나타났다.

이와 같은 결과로 디스크 브레이크 유로에 반 실린더형 홈을 설치한 경우 열적 성능 향상 및 재질의 변화 방지 효과를 가져와서 열저더 현상의 감소와 디스크 브레이크의 성능이 향상되어질 것으로 기대되어진다.

후 기

본 연구는 2003~2004년도 한국과학재단의 목적 기초연구(과제번호: R05-2003-000-12389-0)에 의하여 수행되었으며 재단의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Barber, J. R., 1989, "Thermoelastic Instabilities in the Sliding of Conforming Solids," *Proc. Roy. Soc. Series A312*, pp. 381~394.
- (2) Lee, K. and Barber, J. R., 1993, "Frictionally Excited Thermoelastic Instability in Automotive Disk Brakes," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 115, pp. 607~614.
- (3) Barber J. R., 1994, "An Experimental Investigation of Frictionally-Excited Thermo-Elastic Instability in Automotive Disk Brakes Under a Drag Brake Application," *Journal of Tribology*, Vol. 116, pp. 409~417.
- (4) Dale L. Hartsock and James W. Fash, 2000, "Effect of Pad/caliper Stiffness, Pad Thickness, and Pad Length on Thermoelastic Instability in Disc Brake," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 122, pp. 511~518.
- (5) Floquet, A. and Dubourg, M. C., 1996, "Realistic Braking Operation Simulation of Ventilated Disk Brakes," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 118, pp. 466~472.
- (6) Du, shuqin, Zagrodzki, P., Barber, J. R. and Hulbert, G. M., 1997, "Finite Element Analysis of Frictionally Excited Thermoelastic Instability," *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 20, No. 2, pp. 185~201.
- (7) Yun-Bo Yi. and Barber, J. R., 2000, "Eigenvalue Solution of Thermoelastic Instability Problems Using Fourier Reduction," *Proc. R. Soc. Lond (A)*, Vol. 456, pp. 2799~2821.
- (8) Yeo, T. I., 1998, "Finite Element Analysis of Thermoelastic Contact Stability with Sliding Friction," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 22, No. 7, pp. 1185~1192.
- (9) Floquet, A. and Dubourg, M. C., 1994, "Nonaxisymmetric Effects for Three Dimensional Analysis of Brake," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 116, pp. 401~408.
- (10) Lee, D. H., Chung, Y. S. and Kim, D. S., 1997, "Turbulent Flow and Heat Transfer Measurement on a Curved Surface with a Fully Developed Round Impinging Jet," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 18, pp. 160~169.
- (11) Chung, Y. S., Lee, D. H. and Lee, J. S., 1998, "Heat Transfer Coefficient Measurement by a Jet Impinging on a Rib-Roughened Convex Surface," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 22, No. 3, pp. 373~385.
- (12) Baughn, J. W. and Yan, X., 1991, "Liquid Crystal Methods in Experimental Heat Transfer," *Proceedings, 32nd Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute*, pp. 15~40.
- (13) Lee, S. K., Sung, B. Y. and Ha, S. K., 2000, "Optimal Design of Ventilated Disc Brake Rotor," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 24, No. 3, pp. 593~602.
- (14) Limpert, R., 1992, "Brake Design and Safety," *SAE, Warrendale*, pp. 111~143.