

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

이대희  
인제대학교 전자IT기계자동차공학부 교수

2017년 3월 9일

## ABSTRACT(초록)

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 35.2% lower than those without them.

Key Words : Disc Brake(디스크 브레이크), Semi-Cylindrical Groove(반 실린더형 홈), Liquid Crystal(액정), Local Heat Transfer Coefficient(국소열전달계수), Uniform Heat Flux Boundary Condition (등열유속 경계조건), Finite Element Numerical Analysis(유한요소 수치해석)

## 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 수행되어지고 있다.<sup>(1)-(3)</sup>

브레이크 제동 시 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.<sup>(4)</sup>

제동시의 브레이크 시스템의 열 발산 능력은 브레이크의 성능과 수명에 많은 영향을 미치고 있으므로, 디스크 브레이크 설계 시 하중에 의한 응력의 초과를 고려한 설계와 더불어 마찰열을 냉각시키기 위한 형상의 설계가 중요하다.<sup>(5)</sup>

본 연구에서는 기존의 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 열 방출을 증가시키기 위해 반 실린더형 홈을 유로 내에 설치하여 실험 및 해석을 수행하였다.<sup>(6)</sup>

벤틸레이티드 브레이크 디스크 유로 내의 국소 열전달을 측정하기 위해서 액정을 이용한 열전달 측정 기법을 도입하여 국소열전달을 측정하였다.<sup>(7)</sup>

특히, 기존의 연구들이 브레이크 디스크 내의 열전달계수를 일정한 상수 값으로 주는 것을 대체하여 본 실험을 통하여 얻은 국소 열전달계수 값을 적용하여 벤트 홀 부분의 형상의 변화에 따른 온도 및 내부 에너지를 유한요소해석법을 통하여 구하였다.<sup>(8)</sup>

## 2. 본론

### 2.1 열전달 측정 실험 장치

본 실험에 사용된 풍동은 개방형 아음속 풍동으로 15kW의 가변형 D.C 모터를 사용하여 구동한다. 풍동으로 유입된 공기가 확대부(diffuser)와 정류실(setting chamber)을 거쳐서 수축부를 통과

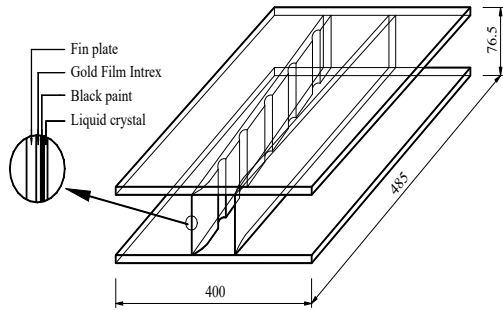


Fig. 1 Schematic diagram of the test section

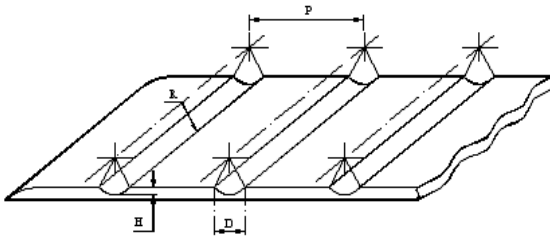


Fig. 2 Schematic diagram of the fin plate with semi-cylindrical grooves

하여 가속되고 시험부로 공기가 유입된다. 풍동의 몸체는 철판으로 제작되었으며, 시험부는 투명한 아크릴과 스티로폼을 이용하여 제작되어 유동가시화와 액정의 칼라변화를 비디오카메라로 촬영할 수 있도록 제작되었다.

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. 스티로폼 판에 반실린더형 홈을 설치하고 그 위에 골드 필름(gold film)을 부착시키고 검정 페인트와 액정(Liquid crystal)을 도포하였다. 반실린더형 홈은 Fig.2에 보여진 것처럼 홈의 깊이, 피치와 폭을 조절하여 설치되었다.

## 2.2 실험 조건

본 연구에서는 디스크 브레이크를 모사한 fin plate 표면에 낮은 불확실도를 갖는 국소 열전달 계수를 측정하기 위하여 Intrex를 이용하여 등열유속 경계조건을 형성하여 실험하였다.<sup>(9)-(11)</sup>

공기가 풍동의 실험부에 설치된 시험부를 지나

갈 때 반 실린더형 홈이 설치된 평판에서 나타나는 액정의 변화를 이용하여 국소 열전달의 측정하였다.

홈의 피치와 폭의 비(P/D)가 열전달에 미치는 영향을 연구하기 위하여, P/D=3, 5, 7로 변화시켜 실험하였다.

## 2.3 실험 해석

본 연구에서는 Lee등에 의하여 사용된 측정기법을 사용하였는데, 액정의 칼라를 인식하여 표면 온도를 측정하는 방법으로 도금된 Intrex를 전기적으로 가열시킴으로써 벽면에 균일한 열유속 조건을 형성할 수 있으며 열유속은 Intrex를 지나가는 전류를 바꿈으로써 조절할 수 있다.<sup>(9)</sup> 이때 일정한 열유속 조건하에서 Intrex 표면상의 특정한 칼라(등온선)는 열전달 계수로 나타내어지며, 열유속이 바뀔 때 칼라의 위치도 바뀐다. 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 벽면온도,  $T_\infty$ 는 자유흐름의 온도, 그리고,  $q_v''$ 는 Intrex의 정미 열유속으로 Intrex의 전체 열유속으로부터 전도와 복사에 의한 열 손실을 뺀 값이다.

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

여기서  $f$ 는 Intrex에서 국소적인 전기가열과 평균가열의 비로서 Intrex의 금코팅의 균일도를 나타낸다. Lee등에 의하면 Intrex의 크기를 작게 하고 Intrex가 감겨져 있는 roll의 중간부분을 취할 경우  $f$ 의 값은 0.98이상이 된다.  $I$ 는 전류의 세기,  $V$ 는 전압의 세기,  $A$ 는 Intrex의 단면적을 나타낸다. 국소 열전달계수 값을 구하고, Nusselt 수를 다음과 같이 정의하였다.<sup>(12)</sup>

$$Nu = \frac{hd_h}{k} \quad (3)$$

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

## 2.4 실험 결과 분석

Figs. 3~5는 레이놀즈 수가 20,000에서 반 실린더형 홈이 표면에 p/d=3, 5, 7로 설치된 경우와

평판인 경우의 비교 실험 결과이다. 홈이 설치되지 않은 경우는 유입 부분에서 가장 큰 Nu수를 가진 후 급격히 감소하여  $X/d_h = 1$ 인 지점에서 최소값을 나타내고 있지만, 홈이 설치된 경우는 Nu수의 증가와 감소의 반복을 나타내는데 이것은 유체가 흘러가면서 발달된 경계층이 홈의 영향으로 파괴되어 vortex를 발생시키고, 이 유체가 다시 홈을 빠져나와서 평판 위로 흐르던 유체와 혼합되어 평판에 부딪치는 것을 반복해서 나타나

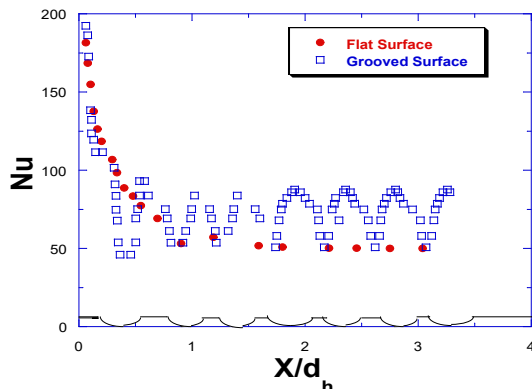


Fig. 3 Comparison of the local Nusselt Number between flat surface and grooved surface for  $P/D=3$

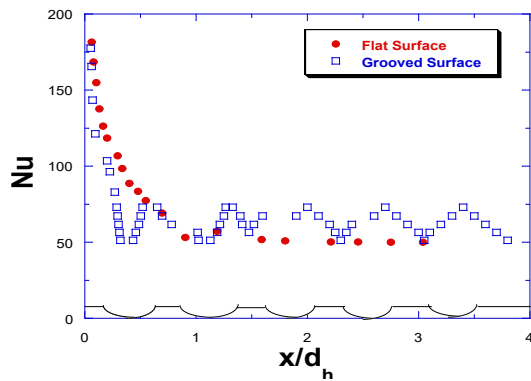


Fig. 4 Comparison of the local Nusselt Number between flat surface and grooved surface for  $P/D=5$

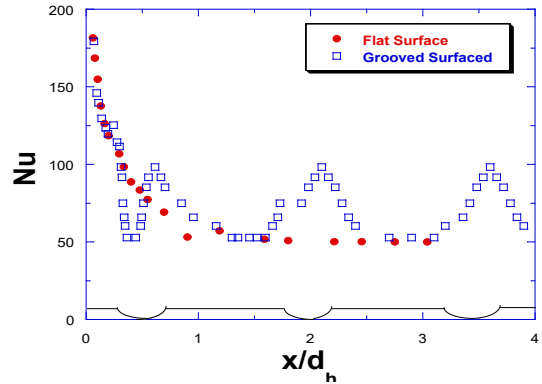


Fig. 5 Comparison of the local Nusselt Number between flat surface and grooved surface for  $P/D=7$

는 현상으로 판단된다. 이 결과 홈이 설치된 경우가 홈이 설치되지 않은 경우보다 높은 Nu수를 가지게 된다. 특히  $P/D=3$ 인 경우의 Nu수가 flat surface인 경우와 비교하여 최대 92.8%,  $P/D=5$ 와 7인 경우도 각각 82%와 68% 증가하였다.

실험 결과는  $P/D$ 의 값이 작을수록, 즉 홈이 촘촘히 설치된 경우가 높은 열전달계수 값을 가지는 경향을 나타냄을 보여준다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 디스크 브레이크 모델

벤틸레이티드 디스크 브레이크의 열방출 성능을 개선하기 위해 반 실린더형 홈(semi-cylindrical grooves)을 가진 개량형 벤틸레이티드 디스크를 제안하였고, 그 개략도는 Fig. 6에 나타내었다.

본 연구에 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.

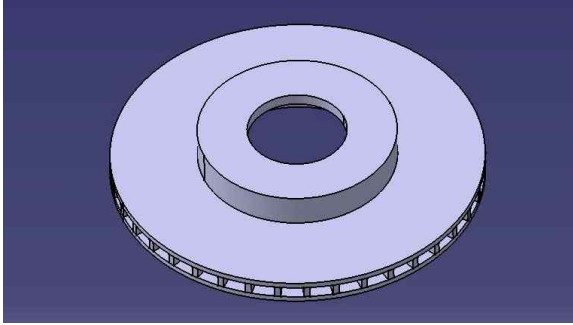


Fig. 6 (a) Schematic View of Ventilated disc brake

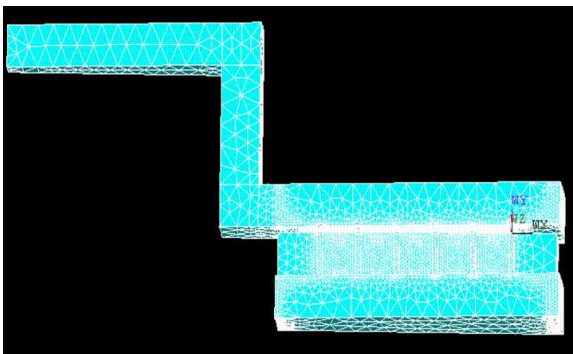


Fig. 6 (b) Finite element model of ventilated disc brake

유한요소 해석 시 사용한 디스크 브레이크는 원주상에서 11.25도 간격으로 대칭을 이루고 있고, 다시 이것의 1/2 대칭을 이루므로, 실제 해석은 이 부분을 ANSYS를 이용하여 해석을 수행하였고, 각 모델의 격자는 비교를 위해서 같은 크기로 요소 분할하였다. 사용된 모델의 형상은 Fig.6에 나타내었다.

### 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.<sup>(2),(6)</sup>

마찰에 의한 열유속은 다음 식과 같다.

$$q = \frac{a\gamma(m + \frac{I}{r^2})[2V_1 - a(t_2 - t_1)]}{10\pi(R_o^2 - R_i^2)} \quad (4)$$

$I$ 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,  $\gamma$ 는 열분배율로 아래와 같다.

$$\gamma = \frac{q_d}{q_d + q_p} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_p c_p k_p}{\rho_d c_d k_d}\right)^{1/2}} \quad (5)$$

여기서,  $\rho$ 는 밀도,  $c$ 는 비열,  $k$ 는 열전도계수 값이며, 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.

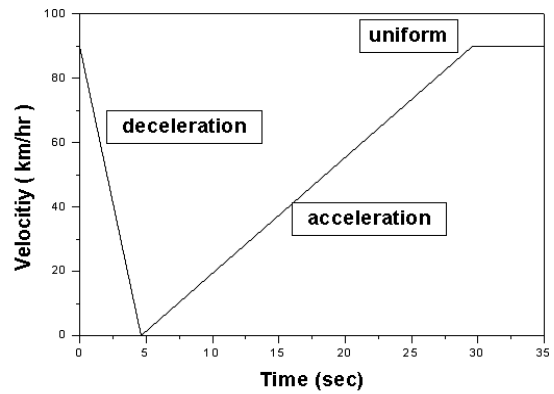


Fig. 7 Velocity for a braking condition

Table 1 Material properties for a disc brake

Elastic modulus, MPa	1.25x10 <sup>5</sup>
Poisson's ratio	0.25
Density, kg/m <sup>3</sup>	7100
Coefficient of thermal expansion, 1/K	12x10 <sup>-6</sup>
Thermal conductivity, W/m·K	54
Specific heat, J/kg·K	586

적용된 디스크 브레이크의 재질의 특성은 Table. 1에 나타내었다.

벤트 홀 부분에 적용되는 열전달계수는 실험에서 얻어진 결과를 이용하여 평균 열전달계수가 아닌 국소 열전달계수 값을 가지고 유한요소해석에 적용하였다.

### 3.3 수치해석 결과 분석

1회 제동 시 벤트 홀의 온도 변화 그래프를 Figs. 8~10에 나타내었다. 유입부와 중간부 출구부로 나누어서 보면, 유입부는 패드가 닿지 않는 부분을 포함하게 되므로, 중간부와 출구부에 비해서 낮은 온도를 형성하고 있고, 홈이 설치된 경우 홈의 영향으로 열전달계수 값이 증가되어, 이 영향으로 전체적으로 온도가 낮아지는 경향을 나타내었다. 특히 출구부에서는 홈이 없는 경우보다 온도 변화가 최대 8% 낮게 나타났는데, 이것은 출구부의 높은 온도와 홈에 의해서 상승된 열전달계수가 작용하여 다른 부분보다 높은 열전달을 하기 때문인 것으로 보인다.

Figures 11~13에 보여진 10회 제동시의 결과를 보면 1회 제동시보다 홈이 설치된 경우의 온도가 급격히 낮아짐을 보여주고 있다. 이것은 홈에 의해서 상승된 대류 열전달계수의 영향이 누적되어서 나타나는 결과로 보여 진다.

홈이 설치된 경우는 홈이 설치되지 않은 경우와 비교하여 유입부, 중간부와 출구부 온도가 각각 최대 30.2%, 32.5%, 35.2% 낮아지고, 세 부분의 같은 시간대의 온도차는 홈이 설치되지 않은 경우는 최대 온도차가 51.5°C이지만, 홈이 설치된 경우는 최대 온도차가 40.7°C로 디스크 브레이크 전체적으로 온도가 균일하게 형성됨을 보여 준다.

이런 결과는 최대 온도를 낮춰서 디스크 브레이크의 재질의 변화를 방지하고, 각 부분의 온도차가 줄어 온도 차에 의한 뒤틀림 현상을 방지하고 열크랙 현상을 완화 시킬 수 있는 결과로 판단된다.

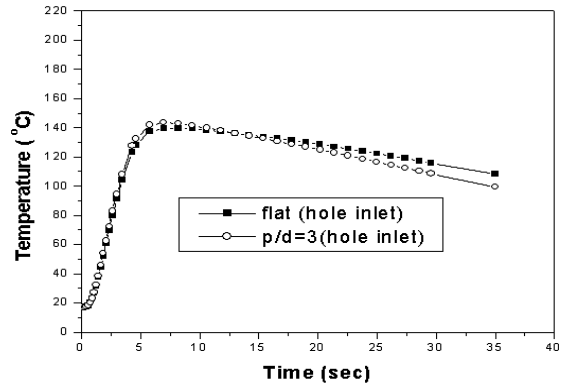


Fig. 8 Temperature distribution at inlet of vent hole (1 time)

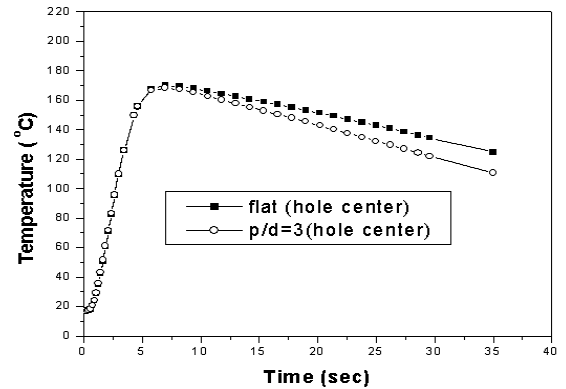


Fig. 9 Temperature distribution at center of vent hole (1 time)

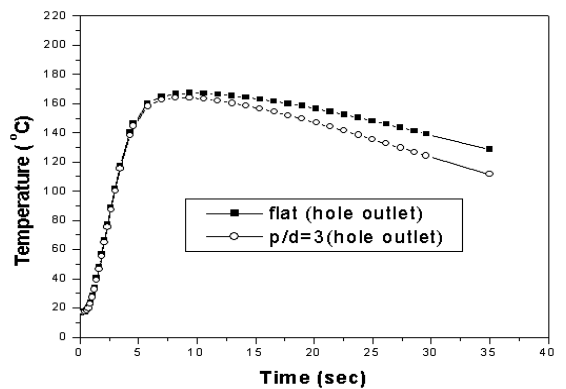


Fig. 10 Temperature distribution at outlet of vent hole (1 time)

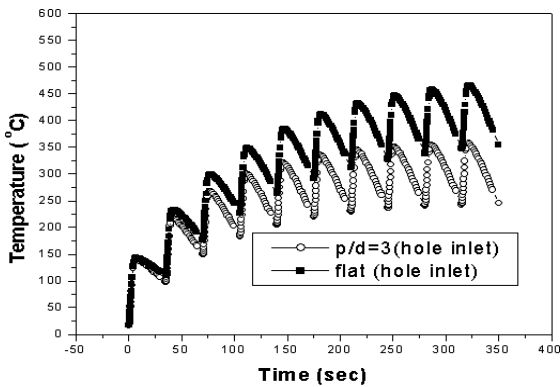


Fig. 11 Temperature distribution at inlet of vent hole (10 times)

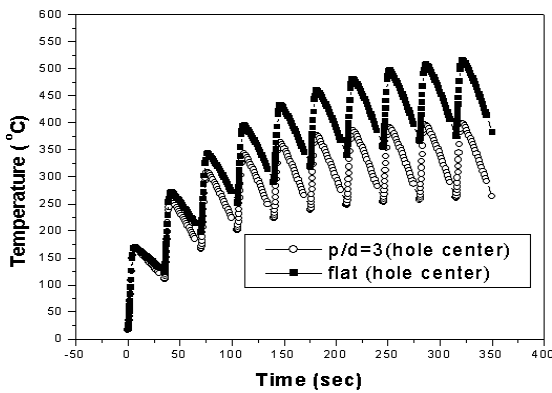


Fig. 12 Temperature distribution at center of vent hole (10 times)

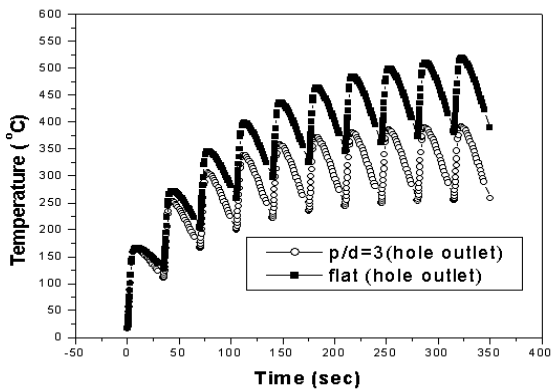


Fig. 13 Temperature distribution at outlet of vent hole (10 times)

#### 4. 결론

본 연구에서는 반실린더형 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 반실린더형 홈이 설치된 경우가 설치되지 않은 경우에 비해서 최대 온도가 약 35.2% 감소되는 경향이 나타났다.

(3) 유로의 입구, 중간, 출구부에서의 온도차가 홈이 설치된 경우가 홈이 설치되지 않은 경우보다 작아지는 경향을 나타내어 디스크 브레이크 전체적으로 온도가 균일하게 형성된다.

이같은 결과로 디스크 브레이크 유로에 반 실린더형 홈을 설치한 경우 열적 성능 향상 및 온도의 균일도를 가져와서 열저더 현상의 감소와 디스크 브레이크의 성능이 향상되어진다.

#### 참고문헌

- (1) Kim, C.K. and Sung, B.Y., 1998, Thermal Behavior Analysis of Disc Brake System During Quick Braking, Transaction of KSME, Vol. 22, No. 6, pp. 1106~1113.
- (2) Lee, S.K., Sung, B.Y. and Ha, S.K., 2000, Optimal Design of Ventilated Disc Brake Rotor, Transaction of KSME, Vol. 24, No. 3, pp. 593~602.
- (3) Yun, Y.H., Jang, B.C. and Lee, S.C., 2003, "Active Handling Control of the Differentila Brake System Using Fuzzy controller, Journal of KSPE, Vol. 20, No. 5, pp. 82~91.
- (4) Day, A.J. and Ashi, A.B., 1991, "Heat Flow and Temperatures In Friction Material During Braking, Proceedings of Institute of Mechanical Engineering, Vol. 2, pp. 1~7.
- (5) 김청균, 이일권, 1999, 디스크 브레이크 마찰 열 접촉저동에 관한 트라이볼로지적 연구, 대한기계학회논문집, 제23권, 제10호, pp.1845~1852.
- (6) Limpert R., 1992, Brake Design and Safety, SAE, Vol. 13, pp. 111~143.
- (7) Floquet, A. and Dubourg, M.C., 1994,

- Nonaxisymmetric effects for three dimensional of brake, ASME journal of Tribology, Vol. 116, pp. 401~408
- (8) Floquet, A. and Dubourg, M.C., 1996, Realistic Braking Operation Simulation of Ventilated Disk Brakes, ASME Journal of Tribology, Vol. 118, pp. 466~472.
- (9) 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.
- (10) 정영석, 이대회, 이준식, 1998, 표면조도를 가지는 볼록한 면에 충돌하는 제트에 의한 열전달 계수 측정, 대한기계학회논문집, 제22권, 제3호, pp. 373~385.
- (11) Baughn, J.W. and Yan, X., 1991, Liquid Crystal Methods in Experimental Heat Transfer, Proceedings of 32nd Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute, Vol. 1, pp. 15~40.
- (12) 배대석, 김은필, 김택영, 박성영, 엄용균, 이대회, 임경빈, 2016, 알기쉬운 열전달, 4판, 맥그로힐에듀케이션코리아, 서울, pp. 271~299.