

# FEM을 이용한 벤틸레이티드 디스크 브레이크 열응력 해석에 관한 연구

김성모\*

(논문접수일 2009. 8. 31, 심사완료일 2009. 9. 30)

## A Study on Thermal Analysis in Ventilated Disk Brake by FEM

Sung Mo Kim\*

### Abstract

Thermal brake judder caused by the high friction heat of the brake disk. Hot thermal judder makes serious problems such as to be unstability to drivers or to decrease braking force of automobile. Because thermal judder vibration makes high vibration occurrence and thermal deformation of brake disk. Therefore it is necessary to reduce or eliminate thermal judder phenomenon by understanding and investigation. This paper introduces the thermal deformation arising from friction heat generation in braking and proposes the FEM analysis to predict the distribution of temperature and thermal deformation. the results of the FEM analysis show the deformed shape and temperature distribution of the disk brake. The optimization is performed to minimize the thermal judder of ventilated disc brake that is induced by the thermal deformation of the disk brake.

**Key Words** : Ventilated Disc Brake(벤틸레이티드 디스크), FEM(유한요소법), Thermal deformation(열변형), Heat transfer(열전달), Thermal Judder(열적 저터)

## 1. 서론

최근 친환경, 고연비, 하이브리드(Hybrid) 자동차 기술의 개발과 함께 급격하게 증가하는 자동차와 더불어 교통사고로 인한 인명피해는 지속적으로 증가하고 있다. 날로 증가하는 교통사고로 인하여 자동차의 안전장치인 제동 시스템,

즉 브레이크 계통에 대한 중요성이 대두 되고 있다. 자동차의 엔진이 고출력화, 경량화, 고속화 추세에 따라서 제동장치는 더욱 가혹하게 되는 현상을 보이고 있다. 따라서 최근 고성능 제동시스템 개발에 많은 연구가 이루어지고 있다. 일반적으로 자동차의 제동장치는 자동차가 제동을 시작하게 되면 엔진에 의해 발생된 운동에너지를 마찰에 의한 열에너

\* 현대 자동차(주) (ksmmaria@hyundai.com)  
주소: 156-807 서울시 동작구 대방동 70-1번지

지 형태로 대기 중에 방출함으로 차량이 감속 또는 정지하게 된다<sup>(1)</sup>. 이 과정에서 디스크 브레이크는 디스크와 패드 사이의 마찰력을 이용하여 움직이는 장치의 운동속도를 가능한 빠른 시간내에 감소시키거나 정지시키는데 그 목적이 있다. 일반적인 제동시스템의 구성은 Fig. 1에 나타내었다. 정상적으로 주행되는 브레이크 시스템에서의 제동과 주행을 반복하게 되며, 제동이 반복해서 일어날 때 마다 디스크 브레이크와 패드는 마찰에 의한 열 발생과 전도와 대류에 의한 방열 과정을 반복하게 된다.

자동차가 이동할 때 발생된 운동에너지는 대부분 마찰열의 형태로 디스크 브레이크에 전달되어 결과적으로 디스크와 패드의 접촉면 사이의 온도를 급격하게 상승시키게 된다. 이와 같은 디스크와 패드 사이의 마찰은 디스크 브레이크의 마찰면에서의 마멸, 열크랙 및 열변형 등의 열적문제를 유발시키고 브레이크의 제동력을 불균일하게 변화시킬 뿐만 아니라 디스크에 미소한 진동과 소음을 발생시키는 원인이 되고 브레이크 시스템의 수명단축이나 고장을 일으키는 원인으로 작용한다<sup>(2)</sup>.

위와 같은 열적 요인에 의해 발생되는 저주파수(약 100~1,000Hz) 장체 진동구간을 열적 저더(Judder)라고 하며, 일반적으로 브레이크의 가공공차(Manufacturing tolerance)에 관련된 노크(Knock), 저속 또는 낮은 제동력에서 주로 발생하는 스틱 슬립(Stick slip) 현상에 관련된 100Hz 이하의 저주파 그로운(Groan) 등도 저더를 발생시키는 원인이 된다<sup>(3)</sup>. 저더가 일어나는 저주파수 영역은 운전중 운전자가 손이나 발에서 감지할 수 있을 정도의 진동영역으로 이는 운전자에게 심리적 불안감을 야기시킬 수도 있다.

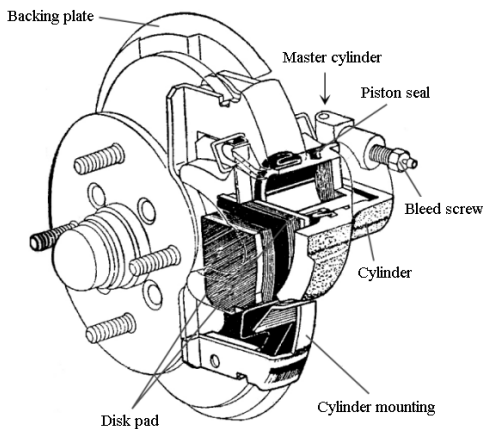


Fig. 1 Schematic of diagram disk brake assembly

브레이크는 자동차가 탄생되면서 같이 개발된 핵심구성품으로 가장 간단한 솔리드 디스크 브레이크, 드럼 브레이크, 벤틸레이티드 디스크 브레이크, ABS(Antilock brake system) 등 다양하게 개발되었다. 최근의 브레이크는 가능한 제동력을 짧게 하면서 마찰제동에 의한 진동과 소음을 없애고, 고마찰을 유지하면서 마찰열 발생량은 극도로 줄이고, 마찰표면의 마멸량 발생을 억제하여 내구성과 안전성을 확보하는 기술이 중요하다. 여기에 브레이크 마찰특성상 불가피하게 메탈소재를 사용할지라도 새로운 경량소재를 적용하고, 최적 설계 기술개발에 의해 차량의 경량화와 연비를 개선하기 위한 모든 연구역량을 집중하는 것이 현재의 기술개발 추세이다<sup>(4)</sup>.

그 동안 디스크 브레이크의 설계는 경험에 의존해 왔고, 제시되는 문제점의 대부분은 수많은 시행착오를 거쳐서 해결되었다. 많은 부분의 브레이크 원형 제작과 실제 적용을 통한 실험적 연구를 통하여 브레이크 성능을 개선하려는 노력을 해왔기 때문에 개발 기간이 오래 걸리고 적기에 향상된 제품을 생산할 수 없다는 문제점들이 제기 되었다.

이와 같은 디스크 브레이크 개발상의 문제점을 개선시키기 위한 방안으로 선진국에서는 80년대 중반 이후에 이미 컴퓨터와 프로그램을 이용한 수치해석 기법을 도입하여 디스크 브레이크의 최적설계에 적용하였다<sup>(5,6)</sup>. 국내에서도 디스크 브레이크 시스템의 열 변형과 마멸, 열 크랙 등에 관한 연구를 활발히 진행하고 있으며, 열에 의해 유발되는 문제들을 해결하기 위한 많은 연구와 실험들이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 기술개발 기간을 단축하면서 우수한 브레이크 제품을 생산하기 위한 방법의 하나로 열탄성 불안정성 문제를 기계적 하중과 열응력을 고려하여 Solidworks로 모델링한 후 유한요소 프로그램 ANSYS Workbench를 사용하여, 차량에서 발생하는 열응력으로 인한 저더 현상을 고찰하기 위하여 열응력, 온도분포, 연변형을 고찰하였다.

## 2. 브레이크 디스크의 열변형 해석

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>(7-9)</sup>.

마찰에 의한 열 유속(Heat flux)은 다음식과 같다.

$$q = \frac{\alpha \gamma (m + \frac{I_r}{r^2}) [2V_1 - a(t_2 - t_1)]}{10\pi(R_0^2 - R_i^2)} \quad (1)$$

여기서,  $t$  : 시간(Time),  $I_r$  는 바퀴의 회전관성 모멘트,  $V_1$  차량의 초기 속도,  $a$ 는 차량의 감속비,  $r$  타이어의 반경,  $R_0$ 는 패드의 외측 둘레원의 반경,  $R_i$ 는 패드의 내측 둘레원의 반경,  $m$ 은 차량 질량을 나타낸다. 여기서,  $\gamma$ 는 열분배율로써 다음 식과 같다.

$$\gamma = \frac{q_R}{q_R + q_p} = \frac{1}{1 + (\frac{\rho_p c_p k_p}{\rho_R c_R k_R})^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

- $q_R$  : 디스크로의 열 유입량(W/m<sup>2</sup>)
- $q_p$  : 패드로의 열 유입량(W/m<sup>2</sup>)
- $R_b$  : 열 저항에 의한 패드로의 열전달
- $R_R$  : 열 저항에 의한 디스크로의 열전달
- $\rho_R$  : 디스크의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho_p$  : 패드의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)
- $c_R$  : 디스크의 비열(J/kg·K)
- $c_p$  : 패드의 비열(J/kg·K)
- $k_R$  : 디스크의 열 전도율(W/m·K)
- $k_p$  : 패드의 열 전도율(W/m·K)

브레이크 디스크 열에너지에 대한 유한요소해석에 사용한 디스크의 재질은 주철이고 패드는 비석면 계통의 복합재료를 사용하였으며 디스크 재질의 기계적 특성은 Table 1과 같다. 본 연구에서는 차량의 제동 시에 디스크와 패드의 마찰부분을 중심으로 고온이 발생하고 디스크 표면을 통한 대류 열전달을 통해서 대기 중으로 방출됨으로 벤트 홀 부분의 냉각현상이 나타나기 때문에 벤트 홀 부분과 나머지 디스크

부분의 열전달 계수는 각각 다르게 적용하여 해석을 수행하였다.

### 3. 디스크 브레이크 3차원 유한요소 모델링

브레이크 디스크의 제원은 차종마다 조금씩 차이가 있으나 본 연구에서는 현대자동차의 쏘나타 모델에 사용되는 벤트레이티드 디스크 브레이크를 사용하였다.

Fig. 2는 원주방향으로 50개의 벤트홀의 구조를 가진 벤트레이티드 디스크를 실측하여 Solidworks 를 이용하여 3차원 모델링한 형상을 나타내었다. 유한요소 해석을 위 나타내었 브레이크의 유한요소 모델은 ANSYS 프로그램 자체에서 제공되는 자동격자 생성기를 통하여 사면체(Tetrahedron) 고차 요소로 전체 디스크 브레이크를 균등 나요소격자(Mesh)로 구성하였다. 실제 해석모델은 디스크 브레이크 형상이 좌우대칭 구조이므로 원 모델링한은 디스크 브레이크의 축대

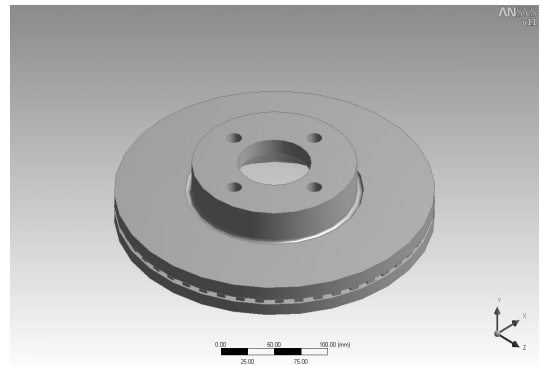


Fig. 2 ANSYS model of disk brake

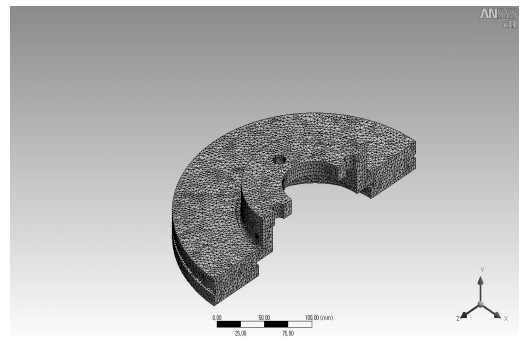


Fig. 3 FE model of axisymmetric disk brake

Table 1 Material properties for a disk brake

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

칭 모델을 이용하여 해석을 수행했을 A, 해석에 사용된 모델은 Fig. 3에 나타내었다.

### 3.1 경계 조건

주행중 브레이크 제동시 패드에 의해 디스크면에서는 강제대류에 의한 냉각만 존재할 뿐 복사에 의한 냉각은 없다고 가정하였다. 또한 제동시 발생하는 마찰 에너지에 의해 디스크 브레이크의 온도가 500°C가 되었다고 가정하였다. 일반적인 디스크 브레이크의 재료는 주철재이므로 물성치는 Table 1에 나타내었다.

그리고 열과 관련된 재료의 물성치는 일정하다고 가정하였다. 한편 대류 열전달 계수는 외부 공기의 온도와 접촉하는 디스크 브레이크의 회전속도 등에 따라 달라지게 된다. 하지만 본 연구에서 유한요소 해석에서는 가장 일반적으로 사용되고 있는 벤트레이티드 디스크 브레이크의 대류 열전달 계수를 일반 대기상태의 보다 주행중에 공기와 접촉을 고려하여 약간 높은 40W/m<sup>2</sup>k, 외부온도를 23°C로 정해 강제대류에 의한 냉각 효과를 나타내었다. Moon, Gortyshov<sup>(10,11)</sup>에 따르면 어떠한 표면이든 그 표면에 작은 홈을 형성할 경우 대류 열전달 효과는 2배 이상 상승된다고 하였지만 본 연구에서는 일반 브레이크 디스크의 형상에 상관없이 대류 열전달 계수가 같다고 가정하고 유한요소해석을 수행하였다.

## 4. 유한요소 해석 결과 및 고찰

주행시 초기 브레이크 제동시 디스크 브레이크와 패드사이의 마찰열에 의한 디스크 브레이크에 발생하는 초기 온도를 500°C로 가정한 상태에서의 유한요소해석의 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 유한요소 해석에 사용된 반실리더 형 홈

(Semi-cylindrical groove)을 가진 벤트레이티드 디스크의 요소(Elements)는 91,599개, 절점(Node)은 147,379개이며 요소는 사면체 고차요소를 사용하였다. 유한요소해석 결과를 보면 제동이 시작되는 초기상태의 온도 500°C에서 주행중에 공기와의 강제대류의 영향으로 패드와의 마찰이 일어나지 않는 중앙부의 온도가 최저온도 376°C로 많은 대류에 의한 많은 냉각효과를 얻을 수 있었다. 즉 온도분포를 유입부와 중앙부, 출구부로 나누어서 보면 유입부는 패드가 닿지 않는 부분을 포함하게 되므로 출구부에 비해서 낮은 온도를 형성하고 있고, 홈이 설치된 경우 홈의 영향으로 열전달 계수값이 증가하여 이 영향으로 디스크 브레이크의 전체적인 온도가 낮아지는 경향을 나타내었다.

일반적으로 주행하는 자동차가 제동을 시작하여 감속, 가속, 등속의 제동구간을 갖는 제동을 하였을 경우에 발생하는 마찰열에 의한 디스크와 패드 사이의 열속(Heat flux)은 FMVSS 105-75(브레이크 다이노마 시험규격)의 제 2 페이드 시험중에서 감속 구간만을 고려하기로 한다.

즉 97km/h 속도로 주행중인 자동차가 0.6g로 4.578초 동안 감속하여 정지상태로 도달한다. 제동시 패드와 브레이크 사이에 발생하는 마찰은 모두 열에너지로 변환된다고 가정한다. 브레이크 다이노마 시험 규격에 따라 실제 제동 후 4.578초 후에 디스크 브레이크에서 발생하는 열에너지를 수행한 결과가 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 6은 단일 제동구간에 발생하는 디스크 브레이크의 모델의 온도 분포를 예측한 결과이다. 강제대류 조건하에서 20분후의 온도분포를 확인할 수 있는데 이는 디스크 표면에서 최대 온도와 최소 온도의 차이가 커짐을 볼 수 있는데 고속 주행중에 강제대류 효과로 인하여 급격한 온도 상승을 방지

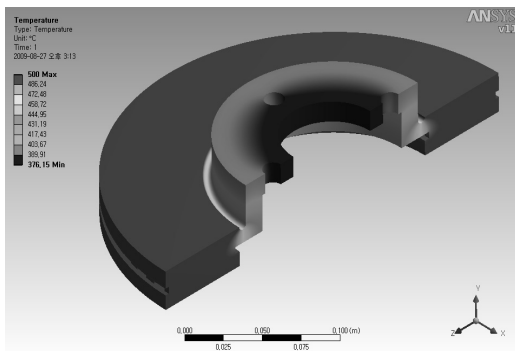


Fig. 4 Temperature distribution of ventilated disk brake

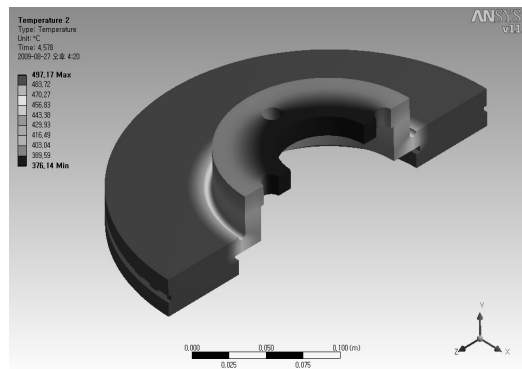


Fig. 5 Temperature distribution of ventilated disk brake

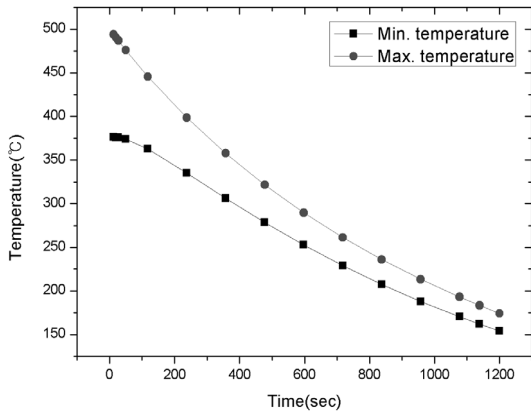


Fig. 6 Temperature variation of ventilated disk brake

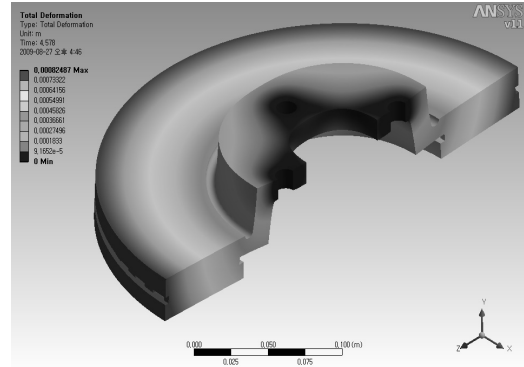


Fig. 8 Thermal deformation of braking(t=4.578 sec)

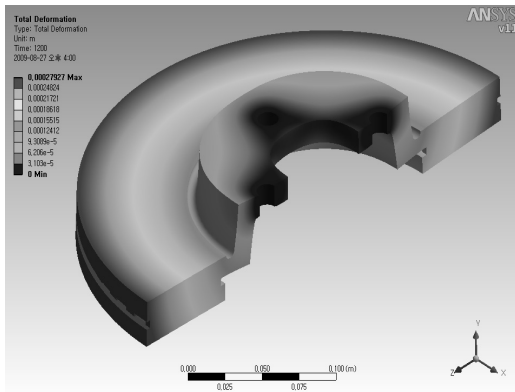


Fig. 7 Thermal deformation of initial braking

할 수 있는 냉각 효과를 가지고 있는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 벤트레이티드 디스크가 일반 디스크에 비해 마찰 열로 인한 열변형이 적어 저터와 같은 현상을 줄일 수 있음 보여준다.

Fig. 7은 브레이크 제동 초기상태의 열변형 결과의 그림이고, Fig. 8은 브레이크 제동시간에 따른 열변형을 나타내었다. 제동이 시작된 초기에는 패드와 접촉부분에서 열변형이 집중되지만, 제동이 진행되면서 패드접촉 부분의 변형이 줄어들고 중앙의 고정부의 열변형이 증가하는 것을 관찰 할 수 있다. 이러한 해석 결과는 제동이 시작되면 디스크와 패드 사이에서 발생하는 마찰열이 어느 정도의 시간이 경과함에 따라 브레이크 디스크 전체에 열전달 되어 온도차를 감소시키는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 제동시 패드와 디스크의 상호 마찰작용에 의해

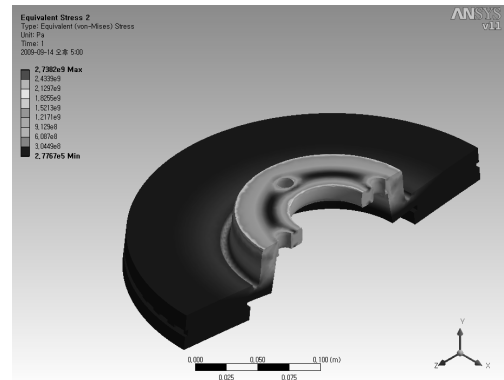


Fig. 9 Von-mises stress of braking(t=4.578sec)

발생되는 디스크의 Von-mises 응력분포를 예측하였다. 응력의 발생은 마찰열에 의한 온도 발생과 압력작용의 복합적인 결과로서 발생하는데, 감속이 완료된 시점과 단일제동구간이 끝나는 등속구간 시점을 예측한 결과 최대 2730MPa의 응력이 발생하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 자동차의 제동시 브레이크 패드와 디스크의 마찰에 의해 발생하는 열온도 및 열변형을 유한요소 프로그램인 ANSYS를 사용하여 해석하였다. 해석결과 일반 디스크 브레이크와 벤트레이티드 브레이크의 대류 열전달 계수가 같다고 가정하였음에도 불구하고 열변형이나 온도분포가 벤트레이티드 디스크 브레이크가 낮은 것을 해석을 통하여 확인하였다. 실제적인 강제대류조건을 적용하였다면 온

도나 열변형의 결과는 훨씬 우수할 것으로 판단된다.

또한 3차원 유한요소 해석을 통해 열간 저터현상을 예측하는 것이 가능하다. 즉 열변형 해석을 통하여 브레이크 디스크의 최적 설계가 저터현상을 방지하는 제품설계가 될 것이다. 이를 위해 중요한 설계변수로 디스크 재질, 벤트홀 형상 및 브레이크 디스크의 구조를 변경하여 열변형을 줄이는 최적 설계 기법을 얻고 이를 3차원 유한 요소 해석을 통해 검증함으로써 열간 저터를 방지하는 제품설계의 최적화 기법의 기초 기술을 확보할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 일정한 대류 열전달계수와 특정 현상에 관한 연구를 수행하였지만 앞으로 다양한 형상 변화에 따른 대류열전달 계수를 적용할 필요가 있다.

### 참 고 문 헌

- (1) Ramachandra Rao, V. T. V. S., Ramasubramanian, H., and Seetharamu, K. N., 1989, "Analysis of Temperature Field in Brake Disc for Fade Assessment," *Wearme Stoffuebertrag*, Vol. 24, No. 1, pp. 9~17.
- (2) Vres, A. and Wagner, M. 1992, "The Brake Judder Phenomenon," *SAE Technical Paper Series*, SAE920554 (SP-914), pp. 25~33.
- (3) Dweib, A. H. and D'Souza, A. F. 1990, "Selfexcited Vibrations Induced by Dry Friction, Part 1:Experimental Study," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 137, No. 2, pp. 163~175.
- (4) Kim, C. K., Lee, B. K., and Kim, H. G. 2006, "Experimental Study of Braking Friction and Wear Characteristics of Disk Brake," *Journal of the KSTLE*, Vol. 22, No. 3, pp. 149~154.
- (5) Kim, C. K., 1995, "Finite Element Analysis of Temperature Distribution and Thermally Caused Deformation in Ventilated Disk Brakes," *95' Korea-USA Tribology Symposium*, pp. 251~258.
- (6) Floquet, A. and Dubourg, M. C., 1996, "Realistic Braking Operation Simulation of Ventilated Disk Brakes," *Journal of Tribology*, Vol. 118, pp. 466~472.
- (7) 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.
- (8) Limpert, R., 1992, "Brake Design and Safety," *SAE*, Warrendale, pp. 111~143.
- (9) Kim, S. T., Kim, J. H., and Kim, J. S., 2005, "A Study on the Temperature Distribution of Disc Brake System Considering the Material Property of the Disc Brake Piston," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, VOL. 14, No. 6, pp. 45~51.
- (10) Moon, H. K., O'Connell, T., and Glezer, B., 1999, "Channel Height Effect on Heat Transfer and Friction in a Dimpled Passage," *Journal of ASME*, Vol. 122, No. 2, pp. 308~313.
- (11) Gortyshov, Y. F., Popov I. A., Amirkhanov, R. D., and Gulitsky, K. E., 1998, "Studies of Hydrodynamics and Heat Exchange in Channels with Various Types of Intensifiers," *Heat Transfer, Proceedings of 11th IHTC*. VOL. 6, pp. 83~88.