

# 디스크 브레이크와 패드의 마찰열에 의한 열적거동에 관한 연구

한승철  
영남이공대학교 자동차과 교수

## A Study on the Thermal Behaviors of Disk Brake and Pad by Friction Heat

Seung-chul Han  
Professor, Department of Automobiles, Yeungnam University College

**요약** 본 논문은 자동차 제동성능에 대한 운전자의 요구에 따라 브레이크 디스크 튜닝이 많이 이루어지고 있어, 자동차에 사용되고 있는 순정 디스크와 튜닝제품으로 나오고 있는 디스크의 열적거동을 FEM해석을 통해 분석하였다. 순정 디스크 모델링 및 튜닝 디스크 Model-1, Model-2, Model-3로 모델링을 하고 디스크 회전속도를 1000rpm으로 설정하여 해석을 실시하였다. 브레이크를 작동하면 디스크와 패드 접촉에 의해 발생하는 작동시 온도와 디스크 정지 후 마찰면의 온도, 열 변형 등 디스크 표면의 열적거동에 대하여 분석하였다. 브레이크 작동시(0-4.5초) 온도는 순정 디스크보다 튜닝 디스크가 34℃ 높게 나타났고, 디스크 정지 후(40.5초) 온도는 튜닝 디스크가 18℃ 낮게 분석되었으며, 디스크 열에 의한 변형은 튜닝 디스크가 0.3mm 정도 많이 변형되었다. 순정 디스크와 튜닝 디스크의 열적거동에 따른 페이드 현상 등을 줄일 수 있는 효과는 있으나, 튜닝 디스크의 홀 가공 및 디스크 면 가공에 따른 열적거동에는 크게 변화가 없음을 관찰할 수 있었다.

**주제어** : 브레이크 디스크, 유한요소법, 순정 디스크, 튜닝 디스크, 열 변형

**Abstract** This paper analyzes the thermal behaviors of genuine discs used in automobiles and discs coming out of tuning products through FEM analysis. Modeling with genuine disk modeling and tuning disks Model-1, Model-2, Model-3 and analyzing the disk rotation speed was set to 1000rpm. When the brake is operated, the thermal behavior of the disk surface, such as the operating temperature caused by the disk and pad contact, the friction surface temperature after the disk stop, and the thermal deformation, were analyzed. When the brake was activated (0-4.5 seconds), the tuning disk showed 34℃ higher than the original disk, and after the disk stopped (40.5 seconds), the tuning disk was analyzed 18℃ lower, deformation due to the disk heat was deformed by 0.3mm for the tuning disk. Although there is an effect to reduce the fading phenomenon due to the thermal behavior of the pure disk and the tuning disk, it can be observed that there is no significant change in the thermal behavior due to the hole processing and the disk surface processing of the tuning disk.

**Key Words** : Brake Disc, Finite Element Method, Genuine Disc, Tuning Disk, Thermal Deformation

\*This study was supported by the Yeungnam University College Research Grants in 2016

\*Corresponding Author : Seung-Chel Han(schan67@ync.ac.kr)

Received October 30, 2019

Accepted December 20, 2019

Revised November 20, 2019

Published December 28, 2019

## 1. 서론

최근 자동차 제동성능에 대한 운전자의 요구에 따라 브레이크 디스크 튜닝이 많이 이루어지고 있다. Fig.1과 같이 자동차에 사용되고 있는 순정 디스크를 튜닝 디스크로 교환 하는 운전자가 늘어나고 있는 추세이다[1].

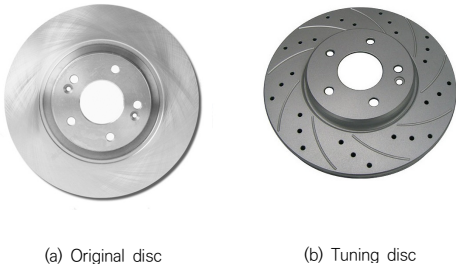


Fig. 1. Tuning discs and original discs

자동차의 브레이크 장치는 자동차가 제동을 시작하게 되면 엔진에 의해 발생된 회전 운동을 구동장치를 통해 운동에너지로 바꾸어 브레이크 디스크와 패드의 마찰운동으로 인한 열에너지를 대기 중에 방출함으로써 차량이 감속 또는 정지하게 된다[1-3].

브레이크 디스크의 부적절한 변경은 자동차의 제동성능 저하 및 과도한 온도 상승으로 인한 열 변형을 일으키며, 결국 소음과 진동의 원인이 된다. 따라서 본 연구는 유한요소 프로그램을 이용하여 순정 디스크와 튜닝 디스크의 열적 거동 특성을 연구하였다[4-6].

Han[1]은 브레이크 구조 형상별 내구성 해석을 통해 대형자동차 디스크 내부의 등가응력과 열 및 진동에 의한 변형을 연구하였다. 본 논문에서는 ANSYS Workbench를 사용하여 디스크와 패드의 접촉면에서 발생하는 열 변형 불안정성 문제를 열하중과 기계적 하중을 동시에 고려하여 해석을 하였다. 특히 디스크와 패드가 직접 접촉하는 3차원 모델을 구성하여 디스크와 패드의 마찰면 온도, 열 확산냉각, 열 변형을 관찰함으로써 디스크에서 일어나는 열적거동의 발생 원인을 수치해석방법으로 분석하였다[7-10].

## 2. 본문

### 2.1 디스크 해석 모델

Solid works를 이용하여 3D 형상모델링을 수행한 벤트레이티드 브레이크 디스크 모델을 이용하여 유한요소

해석 프로그램인 ANSYS Workbench Program을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 3D 형상모델의 경우 자동차의 제동이 일어나는 동안 브레이크 디스크와 패드 사이에 발생하는 마찰열을 대기 증으로 방출하여 디스크에 열 변형을 최대한 줄이기 위하여 실제 자동차에 사용하는 순정 브레이크 디스크와 같은 48개의 벤트레이티드 디스크를 모델링하여 유한요소 해석을 수행하였다. FEM에 사용한 순정 디스크는 원주 상으로 7.2도 간격으로 48개의 벤트 홀을 갖는 축대칭 구조로 형상모델을 수행하였다[11]. 또한 튜닝 디스크 실사를 통해 원주 상으로 9도 간격으로 48개의 벤트 홀을 갖는 축대칭 구조로 형상모델을 하였다. Table 1에 서와 같이 4개의 Model에 Hole가공과 디스크 Face를 사선과 카오스형태로 형상 가공하여 브레이크 작동시 디스크와 패드에서 일어나는 열적 거동과 제동 후 열적 거동을 확인하고자하였다.

Table 1. The name of vent and face hole, disc face pattern of the four models

Name	Vent	Face hole	Disc face pattern
Genuine	48	0	None
Model-1	48	0	None
Model-2	48	24	Oblique line(6)
Model-3	48	30	Chaos line(18)

Fig. 2는 Table 1과 같이 순정 디스크와 튜닝 디스크 각 모델에 대하여 브레이크 디스크와 패드의 마찰열에 의한 디스크의 변형 해석을 수행하기 위해 유한요소 모델을 모두 사면체 요소(tetra mesh)로 구성하였다 [12-14].

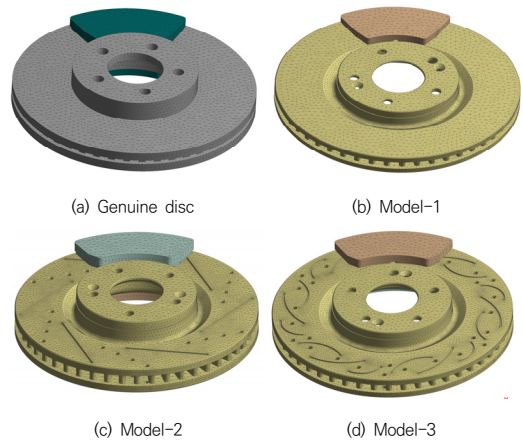


Fig. 2. Finite element mesh model

### 2.2 해석 방법 및 경계조건

자동차가 주행 중 브레이크를 밟으면 유압이 발생하여 제동에 필요한 모든 운동에너지는 패드와 디스크의 마찰 운동이 열에너지로 변환된다고 가정 하였다[8]. 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 Ma[6]는 디스크 브레이크와 패드의 접촉을 고려한 벤틸레이티드 디스크 브레이크의 열적 거동에 관한 연구를 통해 디스크 표면에 접촉하고 있는 브레이크 패드에 가해지는 유압을 마스터실린더로부터 작용하여 제동마찰력이 1MPa이며, 주행하는 자동차의 디스크와 패드사이에는 주변의 대기와 접촉하면서 공기에 의한 강제대류에 의해 냉각되며, 브레이크 디스크와 패드사이의 마찰면의 복사열은 없다고 설정하였다. 브레이크 디스크와 패드에서 공기와의 접촉하여 공기냉각을 고려할 때 열전달 계수는 자동차의 주행속도, 반복제동 회수, 디스크 주변의 공기 속도 등에 영향을 받지만 본 연구의 수치해석에서는 평균값 보다 약간 높은 50W/m<sup>2</sup>K, 브레이크 디스크와 패드의 주변 온도를 상온 조건인 20°C로 정해 대류에 의한 냉각효과를 고려하였다[11].

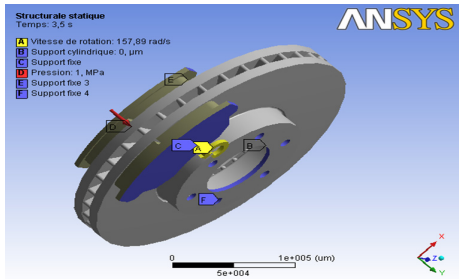


Fig. 3. Boundary conditions for disk and pads

이번 연구에서는 브레이크 디스크에 Table 1과 같이 Model 4개 모두 동일하게 벤틸레이티드는 단순화된 3차원 형상의 디스크로 열전달 계수는 같다고 가정하였으며, 디스크 면은 Model-1의 경우 디스크 면에 홀 및 패턴을 가공하지 않았고, Model-2에는 규칙적으로 24개의 홀과 1mm로 6개의 Oblique line을 형상 가공하였다. Model-3은 불규칙 모양의 30개의 홀과 깊이 1mm로 18개의 Chaos line을 형상 가공하여 FEM해석을 수행하였다. 브레이크 디스크 열에너지 변화를 알아보기 위한 유한요소 해석에 사용한 재질은 순정 디스크에 사용한 주철재료를 사용하고, 패드는 비석면 계통의 복합재료를 사용하였으며, 디스크 및 패드 재질의 기계적 특성은 Table 2과 같다[11].

Table 2. Material property for a disk brake and pad

Material Property	Disk brake	Pad
Elastic modulus(GPa)	125	820
Poisson's ratio	0.25	0.25
Density(kg/m <sup>3</sup> )	7100	3660
Coefficient of thermal expansion(1/K)	1.2e-5	3e-5
Thermal conductivity(W/m·K)	54	1.01
Specific heat(J/kg·K)	586	1034

### 2.3 유한요소해석 결과

FEM해석은 반경 305mm 타이어를 장착한 자동차가 115km/h(디스크 1000rpm)속도로 주행 중으로 가정하고, Jung[15]는 브레이크 디스크 로터 다이아모 시험을 통해 브레이크 운용 중 최대 온도가 650°C발생하는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 제동마찰력을 1MPa으로 가압하므로 디스크와 패드의 초기 제동 온도를 500°C으로 설정하여 해석을 진행하였으며, 과도 열 해석의 결과 값을 구조해석을 통하여 해석결과를 분석하였다[16]. Fig. 4은 디스크가 1000rpm 회전하고 있을 때 브레이크가 작동하여 브레이크 디스크 회전이 끝나는 4.5초 동안과 디스크 정지 후 40.5초 동안 브레이크 디스크와 패드에 작용하는 상대마찰의해 발생하는 온도 분포를 나타내었다.

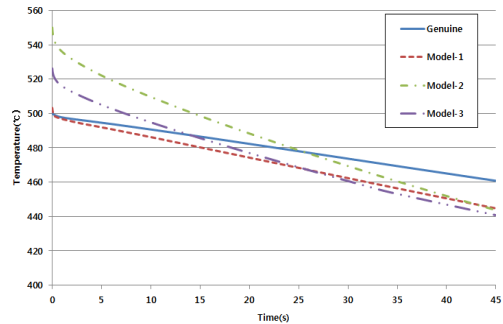


Fig. 4. Graph of temperature variation of disk.

Fig. 5, Fig. 6은 순정 디스크와 튜닝 디스크가 브레이크 작동 시 일어나는 열적거동에 대하여 유한요소 해석을 실시하였다

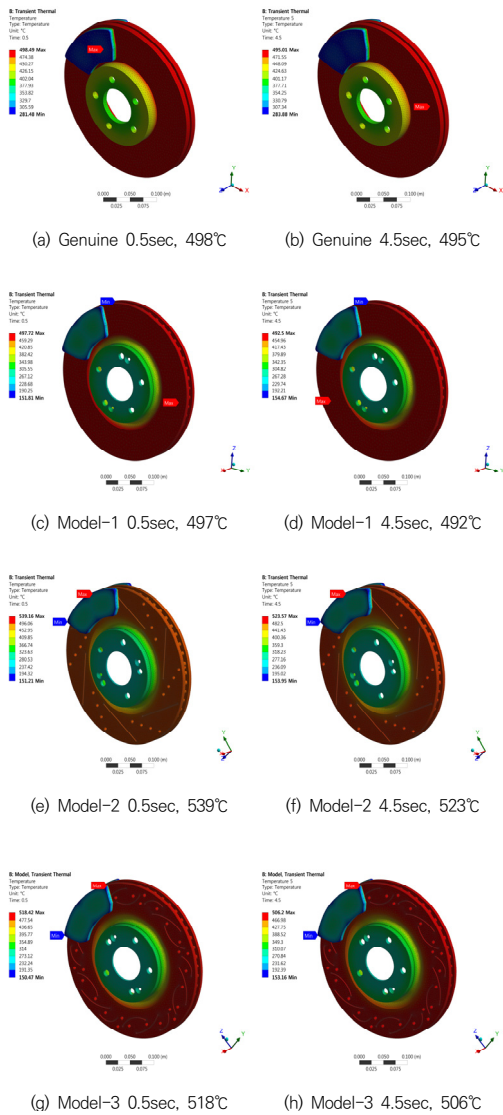


Fig. 5. Brake operating time and temperature

Fig. 5는 디스크가 1000rpm으로 회전하는 디스크에 브레이크 패드를 통해 디스크에 압력을 가하면 브레이크 작동시간 0.5초 및 4.5초 동안에 온도 분포를 나타내었다. (a)와 같이 순정 디스크는 498°C, (c)의 튜닝 디스크 Model-1은 497°C의 열이 발생하였다. 디스크 면에 형상가공이 되어있는 Model-2는 539°C, Model-3은 518°C로 디스크 면 형상가공으로 인한 가공 면 주변온도가 상승하는 것으로 나타났다. 브레이크 제동이 일어나는 시간(4.5초) 동안 발생하는 디스크 온도분포는 4개 디스크 모두 내경방향으로 온도가 낮고 회전반경 방향인 디스크의 외경이 온도가 높게 나타났다.

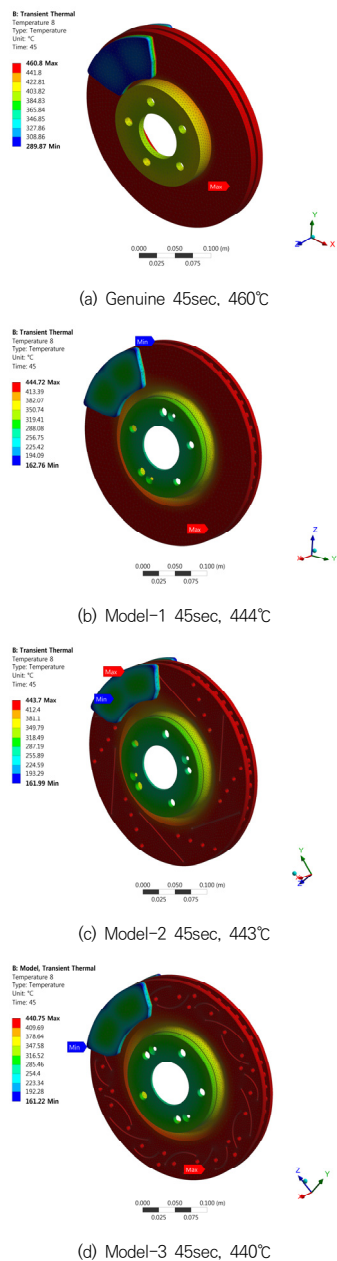
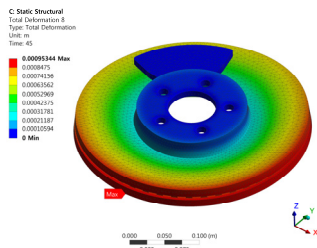


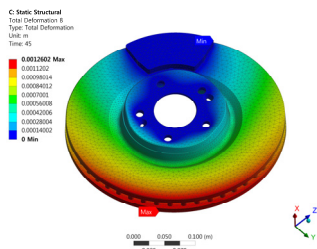
Fig. 6. Temperature graph after brake stop

Fig. 6은 브레이크 작동이 끝난 4.5초 이후 디스크의 회전이 정지된 40.5초 동안 디스크의 열 확산냉각을 분석하였다. 디스크 면을 가공하지 않은 순정 디스크 경우 시작온도 500°C에서 460°C로 감소되었으며, 디스크 면을 가공하지 않은 튜닝 디스크 Model-1은 444°C로 감소되었다. 같은 형태의 순정 디스크에 비해 16°C의 온도가 더 내려갔으며, Model-2는 443°C, Model-3 440°C

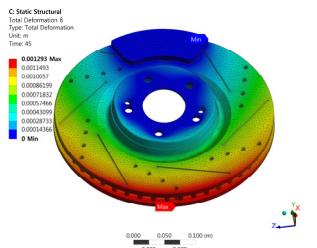
로 최대 20℃정도 열 확산냉각이 좋게 나타났다. 이것은 디스크 표면에서 발생한 마찰열이 전도되지 않고 대기와의 접촉으로 인하여 열이 확산냉각이 일어나므로 순정 디스크의 벤틸레이티드의 형상이 튜닝 디스크에 비해 좁게 설계된 점을 고려하더라도 튜닝 디스크가 반복적 브레이크 작동에서는 순정디스크에 비하여 페이드현상 및 저터현상이 감소 될 수 있다. 하지만 튜닝 디스크 면의 홀 가공 및 면 형상가공이 열 확산냉각에 미미한 영향을 주는 것을 알 수 있다.



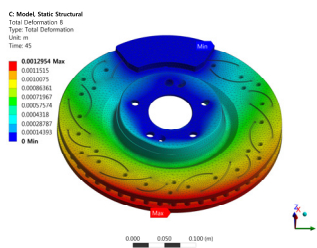
(a) Genuine disc Deformation 0.95mm



(b) Model-1 Deformation 1.26mm



(c) Model-2 Deformation 1.29mm



(d) Model-3 Deformation 1.29mm

Fig. 7. Thermal deformation of brake disk

Fig. 7은 브레이크 작동 40.5초 후 디스크와 패드의 마찰열에 의해 발생하는 열 변형 분포를 유한요소해석의 결과를 통하여 분석하였다. 벤틸레이티드 공간이 적은 Fig. 7, (a)의 순정 디스크의 경우 0.9mm의 변형을 보이고 있으나, 튜닝 디스크의 Model-1은 1.26mm, Model-2, 3은 1.29mm로 나타났다. 상대적으로 벤틸레이티드 공간이 큰 튜닝 디스크에서 순정에 비해 다소 높게 열 변형이 일어났다. 하지만 튜닝 디스크 Model-2와 Model-3은 디스크 면에 홀 가공 및 면 형상가공을 하였으나, 열 변형은 크게 일어나지 않았다. 열응력의 발생은 디스크와 패드의 상호 마찰운동으로 인한 열 유입과 열 유속으로 인한 높은 온도에서 발생하는 복합적인 결과로서 디스크의 두께 변화에 따라 달라질 수 있음을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 연구에서는 ANSYS Workbench 이용하여 순정 디스크와 튜닝 디스크에서 브레이크 작동으로 디스크와 패드의 마찰로 발생하는 열적거동을 FEM해석을 통하여 분석하였다. 해석 결과 브레이크 작동시간 0.5초에 순정 디스크는 498℃, 튜닝 디스크 Model-1은 497℃의 열이 발생하였으나, 튜닝 디스크 Model-2는 539℃와 Model-3은 518℃로 디스크면 형상가공으로 인한 가공면 주변온도가 상승하는 것으로 나타났다. 브레이크 제동이 일어나는 시간(4.5초) 동안 발생하는 디스크 온도분포는 4개 디스크 모두 반경방향으로 디스크의 외경이 높고 내경 쪽이 낮게 나타났다. 하지만 브레이크 디스크와 패드의 브레이크 작동(4.5초) 이후 40.5초 동안 디스크의 열전도는 디스크 면을 가공하지 않은 순정 디스크 경우 460℃로 나타났으며, Mode 1, 2, 3은 442℃로 디스크 온도가 18℃ 정도 내려갔다. 이것은 디스크 표면에서 발생한 마찰열이 전도되지 않고 대기와의 접촉으로 인하여 열이 확산냉각이 일어나므로 순정 디스크의 벤틸레이티드의 형상이 튜닝 디스크에 비해 좁게 설계되어 열 확산냉각이 적게 일어나는 것이다. 디스크 브레이크에 발생하는 열 변형은 디스크의 정지 후 40.5초 동안 변형 량을 분석한 결과 디스크 회전방향의 외경 끝부분에서 가장 크게 일어났으며, 순정 디스크의 열 변형은 0.95mm, 튜닝 디스크의 Mode 1, 2, 3의 열 변형은 1.26-1.29mm의 변형이 일어났다. 브레이크 제동시간에 따른 온도분포 해석을 통하여 디스크 불균형 온도분포로 인해 디스크의 일시적인 열 변형이 발생되고 이로 인한 진동이 일어나

는 열적 저터현상의 원인임을 알 수 있었다. 또한 튜닝 디스크가 순정 디스크에 비해 반복적 브레이크 작동시 열 확산냉각이 좋아 페이드현상이 적게 발생할 수 있으나, 디스크에 홀 가공 및 디스크 면 형상가공에 따른 열적 거동이 크지 않은 것으로 확인되었다.

## REFERENCES

- [1] M. S. Han & J. U. Cho. (2013). Durability Analysis by Shape of Brake Disk Structure. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 22(1), 36-44.
- [2] K. W. Park, J. H. Nam, J. Y. Kang, Y. S. Kim, J. B. Lee & B. J. Ryu. (2017). Investigation of Heat Fluid Analysis in Ventilated Disc Brake with Respect to Structure Geometry. *Korean Society of Mechanical Technology*, 19(1), 134-140.
- [3] I. H. Baek. (2012). A Study on Thermal Behavior and Stress Characteristics of Discs under Braking Conditions for Automobiles. *Journal of the KSTLE*, 28(5), 246-251.
- [4] J. W. Nam, H. S. Ryou & S. W. Cho. (2017). Study for Characteristic of Frictional Heat Transfer in Rotating Brake System. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 18(10), 817-822.
- [5] S. M. Kim. (2009). A Study on Thermal Analysis in Ventilated Disk Brake by FEM. *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, 18(5), 544-549.
- [6] J. B. Ma & B. G. Lee. (2014). Thermal Behavior of Ventilated Disc Brakes Considering Contact Between Disc and Pad. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 23(3), 259-265.
- [7] V. T. V. S. Ramachandra Rao, H. Ramasubrananian, and K. N. Seetharamu. (1989). Analysis of Temperature Field in Brake Disc for Fade Assessment. *Wearme Stoffuebertrag*, 24(1), 9-17.
- [8] T. I. Yeo. (1998). Finite Element Analysis of Thermoelastic Contact Stability with Sliding Friction. *Trans. of the KSME(A)*, 22(7), 1106-1113.
- [9] J. D. Rainbolt. (1975) Effects of Disk Material Selection on Disk Brake Rotor Configuration. *SAE 750733*, 1973-1814.
- [10] A. E. Anderson & R. A. Knapp. (1989). Hot Spotting in Automotive Friction Systems. *Int. Conf. on Wear of Materials*, 2, 673-680.
- [11] S. C. Han & B. G. Lee. (2018). A Study on Convergence Contact Behavior of Friction Heat and Pad on Disk Brake. *Journal of the Korea Convergence Society*, 9(1), 283-289.
- [12] Y. Jimbo, T. Mibe, K. Akiyama, H. Matsui, M. Yoshida & A. Ozawa. (1990). Development of High Thermal Conductivity Cast Iron for Brake Disk Rotors. *SAE 750733*, 22-28.
- [13] M. S. Oh, B. G. Lee & J. B. Ma. (2014). Finite Element Analysis for Thermal Behavior of Ventilated Disc Brakes using Disk brake-Pad contact Mode. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 23(3), 259-265.
- [14] J. U. Cho & M. S. Han. (2010). Structural and Thermal Analysis of Disk Brake. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 19(2), 211-215.
- [15] T. K. Jung, B. W. Cha, Y. H. Hong, C. M. Kim, Y. H. Hong & C. D. Cho. (2016). An Experimental Study for Machined Patterns of Friction Surface on Disc Brake Rotor in Performance Aspect. *Transactions of KSAE*, 24(4), 471-479.
- [16] S. P. Jung, T. W. Park & W. S. Chung. (2011). Analysis of Hot Judder of Disc Brakes for Automotives by Using Finite Element Method. *Korean Society of Mechanical Engineers*, 35(4), 425-431.

한 승 철(Seung-Chul Han)

[정회원]



- 2000년 2월 : 영남대학교 기계공학과 (기계공학석사)
- 2007년 2월 : 영남대학교 기계공학과 (기계공학박사)
- 2007년 4월 ~ 현재 : 영남이공대학교 자동차과 교수
- 관심분야 : 자동차, 생산공학, 자동차새

시구조해석

· E-Mail : schan67@ync.ac.kr