

## 회전을 고려한 브레이크 디스크의 마찰열전달 연구

남지우, 유흥선, 조성욱\*  
중앙대학교 기계공학부

### Study for Characteristic of Frictional Heat Transfer in Rotating Brake System

Jiwoo Nam, Hong Sun Ryou, Seong Wook Cho\*  
School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

**요약** 제동 장치는 기계장치의 사용자나 시스템의 안전관점에서 가장 중요한 요소 중 하나이며, 작동 조건 내에서 신뢰성 있는 제동력이 유지 되어야 한다. 일반적으로 브레이크는 운동에너지를 마찰을 통해 열에너지로 변환하여 회전하는 기계장치를 제동한다. 운동에너지가 열에너지로 전환되는 과정에서 고온의 열이 발생하여 기계적 거동에 영향을 준다. 마찰열은 브레이크 시스템의 열팽창 및 마찰계수 변화 등에 영향을 주고 제어되지 않는 고온은 브레이크 성능을 저하시킨다. 따라서 브레이크의 발열을 예측하고 이를 제어하는 것은 중요하다. 마찰열을 예측하기 위한 다양한 수치해석 연구들이 수행되었지만, 계산의 효율 및 재원의 한계로 수치해석의 경계조건을 다양한 형태로 가정하여 마찰열 예측 연구를 수행하였다. 가정된 마찰열 거동은 실제 열전달 온도 분포 경향과 차이가 있고 이를 이용한 냉각 효과나 열응력 수치해석 결과의 신뢰성이 부족하다. 이러한 한계점을 극복하고 마찰열 예측 시뮬레이션 절차를 정립하기 위하여 본 연구에서는 열-구조 결합 요소를 사용하여 브레이크 시스템의 마찰열 발생을 직접적으로 모사하는 시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문은 Finite Element Method(FEM)을 이용하여 브레이크 작동에 따른 마찰열 발생을 모사하고 열분포 특성을 분석하기 위해 브레이크 모델을 대상으로 열-구조 연성요소를 적용한 수치해석 연구를 수행하였다. 이 연구는 마찰열 직접 모사의 필요성을 제안하고 시뮬레이션에 필요한 정보를 제공할 수 있다 판단된다.

**Abstract** The braking system is one of the most important components in vehicles and machines. It must exert a reliable braking force when they are brought to a halt. Generally, frictional heat is generated by converting kinetic energy into heat energy through friction. As the kinetic energy is converted into heat energy, high temperature heat is generated which affects the mechanical behavior of the braking system. Frictional heat affects the thermal expansion and friction coefficient of the brake system. If the temperature is not controlled, the brake performance will be decreased. Therefore, it is important to predict and control the heat generation of the brake. Various numerical analysis studies have been carried out to predict the frictional heat, but they assumed the existence of boundary conditions in the numerical analysis to simulate the frictional heat, because the simulation of frictional heat is difficult and time consuming. The results were based on the assumption that the frictional heat is different from the actual temperature distribution in a rotating brake system. Therefore, the reliability of the cooling effect or thermal stress using the results of these studies is insufficient. In order to overcome these limitations and establish a simulation procedure to predict the frictional heat, this study directly simulates the frictional heat generation by using a thermal-structure coupling element. In this study, we analyzed the thermo-mechanical behavior of a brake model, in order to investigate the thermal characteristics of brake systems by using the Finite Element method (FEM). This study suggests the necessity to directly simulate the frictional heating and it is hoped that it can provide the necessary information for simulations.

**Keywords** : Brake, Disc, FEM, Frictional Heat, Pad

본 논문은 국민안전처 소방안전 및 119구조·구급기술연구개발사업(MPSS-소방안전-2012-64)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Seong Wook Cho(Chung-Ang Univ.)

Tel: +82-2-820-5313 email: scho@cau.ac.kr

Received July 18, 2017

Revised September 26, 2017

Accepted October 13, 2017

Published October 31, 2017

## 1. 서론

제동 장치는 자동차와 기계장치의 운동 상태를 제어하는 장치를 의미하며, 일반적으로 마찰로 운동에너지를 열에너지로 변환하여 운동하는 기계장치를 제동한다. 산업의 발전에 따라 자동차 및 기계장치는 지속적으로 고출력 및 고속화 되고, 이를 제동하기 위한 브레이크는 점점 더 가혹한 열-기계적 환경에 노출되어 왔다. 이에 따라 제동 과정에서 발생하는 마찰열이 브레이크 시스템의 안전성을 위협할 만큼 높은 고온이 발생하여 때때로 시스템의 안전성을 위협한다. 마찰에 의해 허용된 값 이상의 온도 상승은 디스크와 패드 접촉면의 마찰계수, 디스크 및 패드의 열 변형, 마멸 및 열 크랙 등의 문제를 발생시켜 제동능력을 저하시킨다. 따라서 마찰열은 브레이크를 설계할 때 중요하게 고려하는 인자중 하나이다.

이를 위하여 운동에너지가 열에너지로 변환되는 과정에서 발생하는 마찰열을 예측하기 위한 다양한 연구들이 수행되었다. 초기에는 마찰열을 예측하기 위한 이론적 연구들이 수행되었고[1,2], 컴퓨터의 발달로 다양한 수치해석 연구들이 수행되었다.

Dufrenoy와 Gao는 브레이크 시스템의 열마모를 분석하기 위해 열-기계 연성 수치모델을 개발하였고[3, 4], 향후 Gao는 피로 파괴를 분석하기 위해 유한요소법을 활용한 연구를 수행하였다[5]. Yevtushenko, Choi는 브레이크의 마찰열 특성을 계산하기 위해 과도해석을 수행하였고[6-8], 최근에는 브레이크 시스템의 냉각효과를 분석하기 위한 연구들이 수행되었다[9].

마찰열을 예측하기 위한 다양한 FEM 연구들이 수행되었음에도 불구하고, FEM에 숙련된 엔지니어들에게도 브레이크 시스템의 열-기계적 거동을 함께 계산하는 수치해석은 상당히 어렵다. 이로 인해 브레이크 시스템의 열전달 및 냉각 효과를 예측하는 시뮬레이션 연구에서 해석 절차를 간소화 하기 위해 마찰열을 초기 온도 조건이나, 열 유속 경계조건으로 가정하여 수행했다[10-12]. 또한 Hwang[13] Lee[14]연구에서는 운동에너지가 열에너지로 변환하는 과정을 Limpert의 이론식을 적용하여 연구를 수행했지만, 표면에 균일하게 적용하여 디스크의 회전 효과를 고려 할 수 없다. Hwang[9]의 연구에서와 같이 브레이크 디스크 제동 과정에서 실험으로 측정된 온도 데이터는 디스크 표면에 고르게 열 유속을 받지 않고 회전을 동반하며 패드와 접촉 부분에서 열에너

지를 전달 받는다. 따라서 제동 중 브레이크 시스템의 온도 분포를 정확하게 계산하기 위해서는 회전을 고려하여 열-기계적 거동을 온전히 모사하는 연구가 필요하다.

이를 위하여 본 연구에서는 ANSYS 15.0을 사용하여 디스크와 패드의 접촉해석을 수행하고 여기서 발생하는 마찰열의 열전달을 열-구조 연성 요소를 사용하여 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 첫 번째로 열-구조 연성 해석의 필요성을 확인하기 위해 이전 연구들이 마찰열 모사를 위해 사용했던 가정을 적용하여 열전달 해석을 수행하였고, 열-구조 연성 요소를 사용한 수치해석 결과를 비교 분석 하였다. 또한 회전을 고려한 마찰열 특성을 분석하기 위해 과도해석을 수행하였으며, 디스크의 온도 분포 특성을 분석하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 수치 모델

수치해석 결과와 실험[9]결과 비교를 위하여 Hwang [9]의 연구에서 사용한 브레이크 시스템과 유사한 재원을 사용하였다. Table 1은 본 연구에서 사용한 열, 기계 물성과 브레이크 시스템의 형상 정보를 나타낸다.

Table 1. Material properties and dimension of brake disc and pad.

Spec.	disk	Pad
Inner radius (mm)	81.5	85
Outer radius (mm)	128	125
Thickness (mm)	10	10
Density ( $kg/m^3$ )	7031	2595
Specific heat ( $J/kgK$ )	495	1465
Thermal conductivity ( $W/km$ )	56.72	1.212
Young's Modulus(GPa)	125	1.5
Poisson's ratio	0.29	0.25
Thermal expansion coefficient	$1 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-5}$

Table 1의 형상정보를 바탕으로 Fig. 1과 같이 수치모델을 생성하였으며, 패드는 디스크의  $0^\circ \sim 60^\circ$  구간에 접촉한다. 요소는 ANSYS에서 제공하는 Solid 226을 사용하였으며, 위 요소는 기본적으로 구조 자유도를 가지고 있고 열 자유도를 추가 할 수 있다.

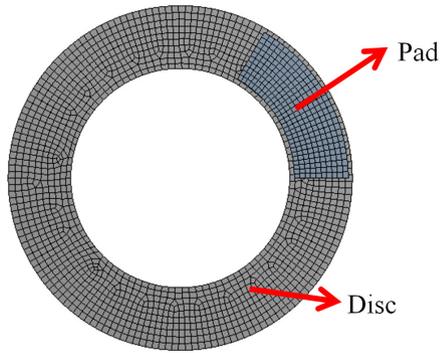


Fig. 1. 3D thermal-structure coupling numerical model.

따라서 위 요소는 열-기계 자유도를 동시에 계산할 뿐만 아니라 time step 마다 열팽창 계산이 가능하다. 물성과 동일하게 열-구조 연성해석은 열과 구조 경계조건이 필요하다. 또한 운동에너지가 마찰을 통해 열에너지로 변화하는 과정을 모사하기 위해서는 열에너지 변환률 및 마찰열 분배율을 계산해야한다. 첫째로 마찰열을 계산하기 위해 널리 사용되는 식은 식(1)과 같다[9].

$$q(x,y,t) = \mu P(x,y)v(t) = \mu P(x,y)\omega(t)r \quad (1)$$

$q$ 는 마찰열,  $\mu$ 는 접촉면 사이의 마찰계수,  $\omega$ 는 브레이크 디스크의 각속도이고  $r$ 은 디스크 반지름이다. 마찰로 인해 발생한 열량은 디스크와 패드에 분배되어 전달된다. 발생한 열량은 유한요소법 접촉해석에서 contact면과 target면에 분배되는데 그 비율은 식 (2)로 계산한다.

$$\gamma_c = \frac{q_c}{q} = \frac{q_c}{q_c + q_t} = \frac{1}{1 + \left( \frac{\rho_t c_t k_t}{\rho_c c_c k_c} \right)} \quad (2)$$

여기서  $\rho_c$ 는 contact면 모델의 밀도,  $c_c$ 는 비열,  $k_c$ 는 열전도 계수이다. Table 1의 물성 정보를 이용하여 0.1325의 분배율을 적용하였고, 운동에너지의 열에너지 변환률은 95%로 가정했다.

본 연구에서는 패드를 contact면으로 지정하고 접촉해석을 수행했다. 접촉해석에서 접촉하는 두 물체 중 상대적으로 강성이 낮은 물체에 contact면을 지정한다. 접촉 알고리즘은 수렴성이 좋은 augmented lagrangian method를 적용했다.

수치해석의 효율을 고려하여 1/2 대칭 모델을 사용하였다. 대부분의 이론식들은 패드에 균일 압력이 작용한다는 가정에서 유도 되었으며, 본 연구에서도 패드에 균일 압력 2.38MPa를 적용하여 수치해석을 수행하였다. 회전 속도는 100kph (87.6rad/s)로 가정하여 수치해석을 수행하였으며 3cycle의 회전을 수행하고 해석 결과를 비교하였다. 열적 경계조건으로 초기 온도는 22℃를 적용하고, 디스크의 바깥면과 패드 윗면에 대류 조건을 적용하였으며 열전달 계수는  $1 \text{ W/m}^2\text{K}$  이다.

마찰열 직접적 모사의 필요성을 제안하기 위하여 Table 2와 같이 이전의 연구에서 사용했던 경계조건을 가정하여 수행된 열전달 해석 결과와 비교 하였다. Case 1은 디스크와 패드가 접촉하는 면에 열유속 경계조건을 입력하고 case 2는 마찰되는 디스크 면에 열 유속 경계조건을 적용하였다. Case 3은 마찰열을 직접 모사했다.

Table 2. The information of boundary conditions.

Case	Boundary condition	Heat source
1	Pad	Heat Flux
2	Disk	Heat Flux
3	Rotation	Frictional Heat

### 3. 해석 결과

#### 3.1 해석 결과 비교

Table 2와 같이 가정된 2종류의 경계조건과 열-구조 요소를 이용해 직접적 모사를 수행하였다. Fig. 2는 계산된 디스크 부분의 온도를 보여준다.

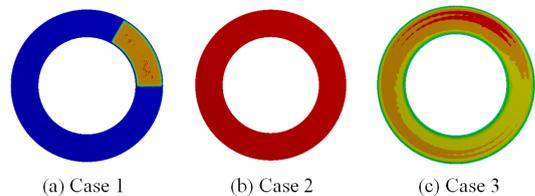


Fig. 2. Distribution of temperature on Disc each case.

Case 1은 패드의 접촉면에 열 유속 경계조건을 적용하였기 때문에 접촉면 주변으로 열전도가 일어나는 것을 확인했다. Case 2는 마찰이 일어나는 디스크 면에 열 유속 경계조건을 적용하여 전체 온도분포가 균일함을 확인

했다. Case 3는 디스크가 회전하여 발생하는 마찰력이 식(1)을 통해 계산되어 열전달이 일어난다. 디스크와 패드의 마찰이 마찰열을 발생시키고 패드와의 접촉면에서 온도가 상승한다. 하지만 디스크가 회전하기 때문에 접촉부분을 벗어나면 디스크 내에서 주변으로 열전도가 일어나고 디스크 면에서 대류 경계조건으로 인해 열손실이 일어난다. 다시 패드 접촉면이 회전하여 돌아 왔을 때 온도가 상승한다.

Fig. 3은 패드의 접촉면 온도분포 결과를 보여준다. Case 1, 2의 패드는 접촉면에 열 유속 경계조건을 적용했기 때문에 동일한 온도분포를 특성을 확인했다. Case 1에서 마찰력은 속도에 비례하기 때문에 회전 반경이 큰 바깥쪽에서 가장 큰 마찰열이 발생하여 바깥 부분이 온도가 높고, 디스크와 달리 마찰열이 동일한 부분에 지속적으로 전달되기 때문에 일반적으로 디스크보다 높은 온도 분포를 보인다. 실제 운행 조건에서 패드에 가해지는 압력은 균일하지 않게 작용하므로 패드의 온도 분포 경향은 달라 질 수 있으나, 디스크의 회전으로 인해 발생하는 온도 특성은 동일하게 나타난다.



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3  
Fig. 3. Distribution of temperature on Pad each case.

결과적으로 가정된 마찰열 경계조건을 적용한 case 1, 2의 온도 분포 특성은 case 3과 확연히 다르며, 마찰열을 가정하여 모사한 결과는 실제 온도 분포를 예측하기에 부적절하고 이를 활용해 분석한 열응력이나 대류 효과 결과는 반드시 오류를 포함한다.

따라서 계동장치의 마찰열을 정확히 계산하기 위해서 열-구조 연성 요소를 사용하여 회전 조건을 적용한 시뮬레이션을 수행하여 온도 분포를 계산해야 한다.

### 3.2 회전 디스크 온도 분포 특성

디스크가 회전하여 발생하는 마찰열은 패드와 디스크에 전달된다. 회전효과를 고려하지 않은 Case 1, 2의 온도 분포와 case 3의 온도분포 차이를 3.1절에서 설명했다. Fig. 4는 회전으로 발생하는 온도분포 특성을 보여주

는 그래프이다. 온도 데이터는 회전방향으로 디스크가 온데 위치의 온도 정보를 나타낸다.

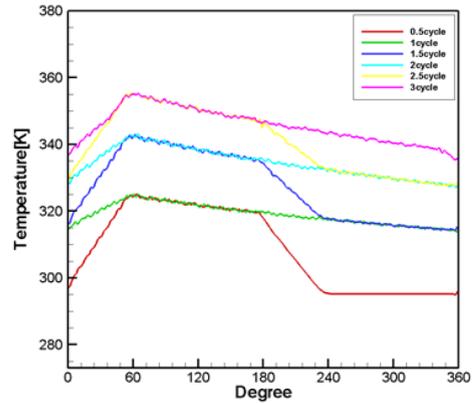


Fig. 4. Temperature on disk surface each cycle.

패드에는 0°에서 60°까지 모델링 되어 있기 때문에 0°에서 60° 구간까지는 디스크가 회전하는 동안 지속적으로 마찰열이 유입되어 온도가 상승하고 마찰이 끝나는 60° 이후에는 주변으로의 열전도와 대류에 의한 냉각효과로 온도가 지속적으로 하강한다. 초기 0.5cycle에서 마찰의 영향을 받지 않은 영역은 초기 온도 22℃를 유지하고 마찰로 인해 열이 유입된 구간은 온도가 상승했다.

또한 디스크는 1cycle이 완전히 회전하기 전 디스크 내의 최고 온도는 동일하고 마찰열 유입이 끝나는 60° 이후 구간에서는 같은 cycle 내에서 온도 분포가 균일함을 확인 했다. 이 현상은 패드와의 접촉면 이외 영역은 동일한 마찰열이 유입될 뿐만아니라 같은 시간동안 주변으로 열이 전도되는 양이 동일하고 대류로 손실되는 열량이 동일했기 때문으로 판단된다. 각 회전 구간의 최고 온도는 회전이 늘어남에 따라 상승하지만 상승폭은 점점 감소 하는 경향이 나타난다. 이는 Hwang[9]의 실험결과와 유사한 특성을 보이며 실험에서 측정된 온도 구간 내의 값이다. 실험에서 측정된 3cycle에서의 최고 온도는 약 140℃ 이고 최저 온도는 80℃이다. 즉 중간에서의 온도는 110℃로 유추가 가능하고 초기 온도가 40℃임을 고려하면 본 연구의 수치해석에서 계산된 디스크 중심 온도와 오차가 거의 없음을 확인 했다. 결과적으로 본 연구에서 제시한 수치해석 절차와 결과는 타당하다고 판단했다.

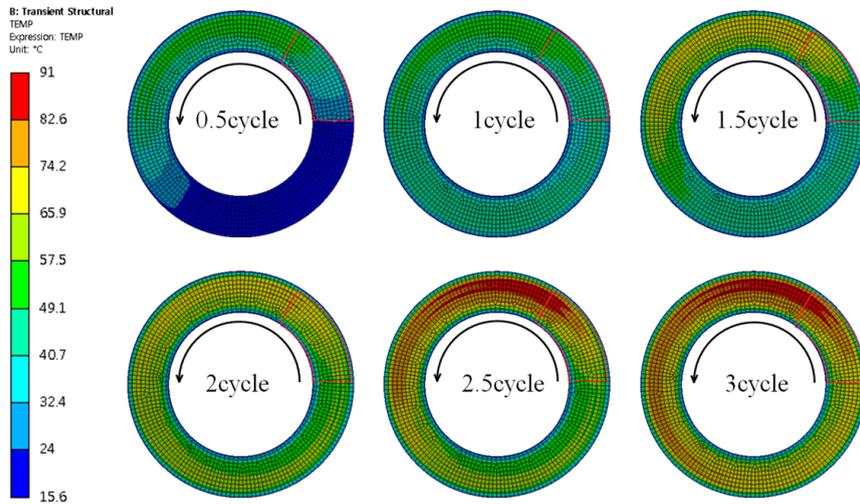


Fig. 5. Contour of temperature on surface of disc every 0.5 cycles.

상승폭은 대류로 인한 손실과 마찰열 유입 및 열전도가 평형을 이루는 구간에서 최고온도 상승폭이 고정되어 정상상태에 도달한다. Fig. 5는 각 cycle에서의 디스크 온도 분포를 보여준다.

산하기 위해서는 회전을 고려한 시뮬레이션 필요성을 확인 하였고, 이 연구는 향후 브레이크 시스템의 열적특성 분석에 기여 한다고 판단한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 브레이크 구동 시 발생하는 마찰열 발생 시뮬레이션 연구를 수행하였다.

1. 마찰열을 모사하기 위해 마찰열 유입을 열 유속 경계조건으로 가정하여 수행된 연구의 온도 분포는 회전을 고려하여 열-구조 연성 요소를 적용한 온도 분포 결과와 다른 것을 확인 했다. 따라서 가정된 조건으로 계산된 온도 분포를 기반으로 계산한 브레이크 시스템의 열응력 및 냉각 효과 분석은 재고 되어야 한다.
2. 회전을 고려한 브레이크 마찰열 수치해석 절차를 제안하고 이를 실험과 비교 분석 하였다. 본 연구에서 계산된 온도 결과는 실험 값과 유사하고 사이클에 따른 온도 상승 특성과 온도 분포 특성도 실험과 유사함을 확인 했다.

결론적으로 브레이크의 마찰열 온도분포를 정확히 계

#### References

- [1] Z. Olesiak, Y. Pyryev, A. Yevtushenko, "Determination of temperature and wear during braking", *Wear*, vol. 210, no. 1, pp. 120-126, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00086-0)
- [2] A. J. Day, T. P. Newcomb, "The dissipation of frictional energy from the interface of an annular disc brake", *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, part D: transport engineering*, vol. 198, no. 3, pp. 201-209, 1984.
- [3] P. Dufrenoy, "Two-/three-dimensional hybrid model of the thermomechanical behaviour of disc brakes", *Proc of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 218, no. 1, pp. 17-30, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1243/095440904322804402>
- [4] C. H. Gao and X. Z. Lin, "Transient temperature field analysis of a brake in a non-axisymmetric three-dimensional model", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 129, pp. 513-517, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00622-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00622-2)
- [5] C. H. Gao, J. M. Huang, X. Z. Lin, X. S. Tang, "Stress analysis of thermal fatigue fracture of brake disks based on thermomechanical coupling", *Journal of tribology*, vol. 129, no. 3, pp. 536-543, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2736437>
- [6] A. A. Yevtushenko, P. Grzes, "The FEM-modeling of the frictional heating phenomenon in the pad/disc

tribosystem (a review)", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 58, no. 3, pp. 207-226, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/10407782.2010.497312>

- [7] J. H. Choi and I. Lee, "Transient thermoelastic analysis of disk brake in frictional contact", *Journal of Thermal Stresses*, vol. 26, pp. 223-244, 2003.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/1016713855891>
- [8] J. H. Choi and I. Lee, "Finite element analysis of transient thermoelastic behaviors in disk brake", *Wear*, vol. 257, no. 1, pp. 47-58, 2004.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2003.07.008>
- [9] P. Hwang, X. Wu, "Investigation of temperature and thermal stress in ventilated disc brake based on 3D thermo-mechanical coupling model", *Journal of mechanical science and technology*, vol. 24, no. 1, pp. 81-84, 2010.
- [10] J. U. Cho, M. S. Han, "Structural and Thermal Analysis of Disk Brake", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, vol. 19, no. 2, pp. 211-215, 2010.
- [11] C. Kang, G. Choi, "Thermal Fluid Flow and Deformation Analysis of Medium Commercial Vehicle Ventilated Brake Disc in Braking", *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, vol. 22, no. 7, pp. 63-69, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.7467/KSAE.2014.22.7.063>
- [12] J. B. Ma, B. G. Lee, "Thermal Behavior of Ventilated Disc Brakes Considering Contact Between Disc and Pad", *Journal of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, vol. 23, no. 3, pp. 259-265, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.7735/ksmte.2014.23.3.259>
- [13] C. K. Kim, J. T. Hwang, "Tribological Analysis on The Contact Behaviors of Disc Brake Due to Frictional Heating", *Journal of KSTLE*, vol. 15, no. 2, pp. 199-205, 1999.
- [14] T. H. Lee, K. K. Lee, S. J. Jeong, "Optimal Design for the Thermal Deformation of Disk Brake by using Design of Experiments and Finite Element Analysis", *Trans. of the KSME(A)*, vol. 25, no. 12, pp. 1960-1965, 2001.

---

**유 흥 선(Hong Sun Ryou)**

[정회원]



- 1977년 2월 : 서울대학교 항공공학과 학사졸업
- 1979년 2월 : 서울대학교 항공공학과 석사졸업
- 1988년 7월: Imperial College 항공공학 박사 졸업
- 1996년 3월 ~ 현재 : 중앙대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

전산유체역학, 유체역학

---

**조 성 욱(Seong Wook Cho)**

[정회원]



- 1979년 2월 : 서울대학교 항공공학과 학사졸업
- 1981년 2월 : 한국과학기술원 기계공학 석사 졸업
- 1991년 2월 : M.I.T 기계공학 박사 졸업
- 1993년 3월 ~ 현재 : 중앙대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

유한요소법, 열전달, 고체역학

---

**남 지 우(Jiwoo Nam)**

[정회원]



- 2013년 2월 : 중앙대학교 기계공학부 학사졸업
- 2013년 3월 : 중앙대학교 기계공학과 석박통합과정

<관심분야>

유한요소법, 열전달, 고체역학