

## 디스크 브레이크의 적열점에 관한 3차원 시뮬레이션

이일권 · 조승현 · 김청균  
홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

### Three-dimensional Simulation of Hot spots in Disk Brakes

Il Kwon Lee · Seung Hyun Cho · Chung Kyun Kim  
*Tribology Research Center, Hongik University*

**ABSTRACT** - Hot spot behaviors on the disk-pad contact surface during a braking operation have been analyzed for a ventilated disk brake using the finite element method. Hot spots which were studied using a coupled thermal-mechanical analysis technique are influenced by all of the mechanical, thermal, elastic and plastic processes that are involved in braking cycles, but their temperature gradients are most affected by rubbing speeds, braking forces, and design parameters between the disk and the pad. Undesirable hot spots that are generated by local thermoelastic instabilities are intended to be removed by optimized design parameters and material properties. In this study, a three-dimensional numerical method for the demonstration of hot spot behaviors has been applied to the rubbing surfaces between the disk and the pad.

**Key Words:** Hot Spots, Distortion, Disk, Pads, Thermoelastic Instability

#### 1. 서 론

고속화와 고출력화를 추구하는 자동차에서 제동 시스템에 대한 안전성 확보, 제동거리 단축, 브레이크의 수명연장 등은 디스크와 마찰재 패드의 내마멸성 향상, 소음과 진동을 줄이면서 열용량 향상을 위한 최적화 설계에 대한 연구를 수행함으로써 해결될 수 있다. 접촉식 제동장치에서 미끄럼 마찰에 의한 마멸, 열변형 발생[1,2] 등으로 인한 소음과 진동의 발생은 필연적이고, 특히 고속용

브레이크에서는 마찰 조건에 따라서 열탄성 마멸이나 열크랙[3-5]이 발생하면서 자동차의 주행 안전성에 심각한 영향을 주고 있다. 이러한 문제점을 규명하고 해결하기 위한 실험적 연구가 많이 수행되었고, 최근에는 해석용 프로그램의 획기적인 발달로 실제적 현상과 유사한 브레이크 제동 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 기법[6,7]이 많이 도입되고 있다.

정상적으로 작동하는 브레이크 시스템에서 마찰열 에너지는 디스크와 패드 사이의 미끄

럼 마찰면에서 고르게 발생되었다가 균일하게 잘 소산되나, 표면 거칠기 및 파형, 회전축과 디스크 로터의 회전 불균형, 패드와 디스크 접촉면의 불균일한 마찰에 의해 발생된 비정상적인 마찰열이 국부적으로 발생되거나, 또는 생성된 열이 고르게 소산되지 않으므로 인하여 마찰열이 국부적으로 축적하게 되고, 그 결과로 적열점(hot spot) 발생에 따른 열적 불안정성(thermoelastic instability) 현상[8-11]에 의하여 제동 기능은 극도로 약화되게 된다.

본 연구에서는 접촉식 제동 시스템으로 널리 사용하는 디스크-패드 브레이크에서 디스크 표면에서 발생하는 적열점(Hot spot) 문제를 열하중과 기계적 하중을 동시에 고려하여 비선형 유한요소해석 프로그램 MARC [12]를 사용하여 해석하였다. 여기서는 특히 디스크의 마찰면 온도, 열변형 거동량, 접촉 열응력을 관찰함으로써 적열점을 발생하는 메커니즘을 예측하고자 한다.

## 2. 수치적 연구

### 2-1. 유한 요소 메쉬 및 해석 조건

Fig. 1은 본 논문에서 디스크 브레이크에서 발생하는 마찰열 접촉 거동 문제를 해석하기 위해 사용한 디스크-패드 모델이며, 해석에 필요한 유한 요소 모델링과 디스크와 마찰재 패드에 가해진 기계적인 제동력, 마찰 계면에서 발생된 마찰열, 대기중으로의 방열에 관련된 경계 조건은 Fig. 2에서 보여 주고 있다. 디스크의 양쪽에 접촉하고 있는

패드의 뒷면에 가해진 제동력은 15kN이고, 디스크나 패드는 주변의 공기와 접촉하면서 냉각되며, 마찰면에서의 복사열은 없다고 가정하였다. 또한, 디스크와 패드의 마찰 표면에서는 마찰열이 균일하게 발생되고 냉각된다고 가정하였다. 디스크-패드 모델의 냉각을 고려할 때 대류 열전달 계수는 자동차의 주행 속도, 반복 제동 회수, 디스크 주변의 공기 속도 유동장 등에 영향을 받지만 본 해석에서는 평균값보다 약간 높은  $40\text{W/m}^2\text{K}$ 로 고정하여 방열 효과를 나타내었다.

한편 디스크와 패드의 유한 요소 개수는 각각 756, 1293이고, 절점의 개수는 각각 999, 1111이며, 해석에 사용한 디스크와 패드의 물리적, 열적 특성은 Table 1에 각각 나타내었다.

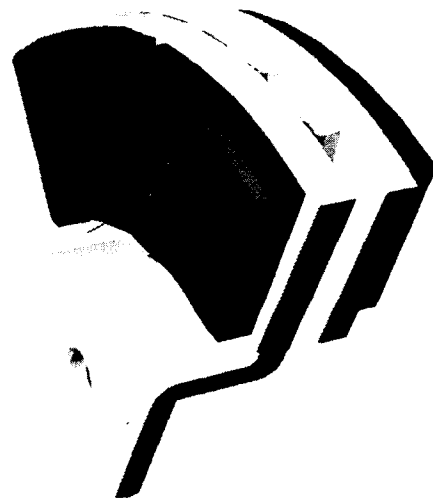


Fig. 1 Simulation model of a ventilated disk pad brake

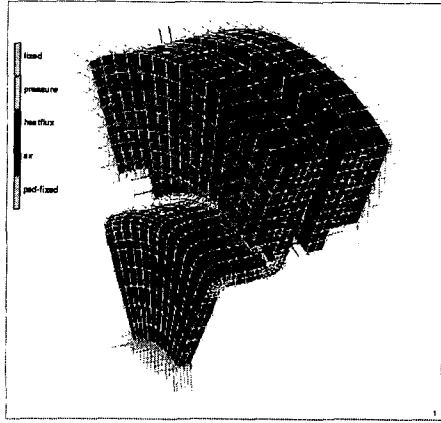


Fig. 2 Boundary conditions for a disk-pad model with a finite element mesh

Table 1. Physical and thermal properties of the disk and pads

Material Properties	Disk	Pad
Young's modulus, MPa	125	820
Poisson's ratio	0.25	0.25
Mass density, kg/m <sup>3</sup>	7100	3660
Thermal expansion coefficient, $\mu\text{m/m}\cdot\text{K}$	12	20
Thermal conductivity, W/m $\cdot\text{K}$	54	1.01
Specific heat, J/kg $\cdot\text{K}$	586	1034

### 2-2. 마찰열과 제동 모드

Fig. 3은 브레이크의 제동 성능에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 본 연구에서 사용한 제동 모드로서 SAE에서 제시하고 있는 것과 같다. 즉, 97km/h로 주행중인 자동차가 디스크-패드의 브레이킹을 통해 완전히 멈춘 다음 다시 초기속도까지 재가속하고, 이

후 정속 주행을 하는 것을 1회의 접촉제동 사이클로 한다. 1회 제동에서 소요되는 시간은 총 35sec이고, 이러한 제동 사이클을 8회 반복하여 디스크 브레이크에 적용한 결과이다.

Fig. 4는 해석에 사용된 입력 열량으로서 위에서 설명한 제동 모드에서 97km/h로 주행중인 자동차가 제동하는 동안 접촉식 제동 시스템에서 발생된 마찰열을 제동 시간에 대하여 계산된 결과이다.

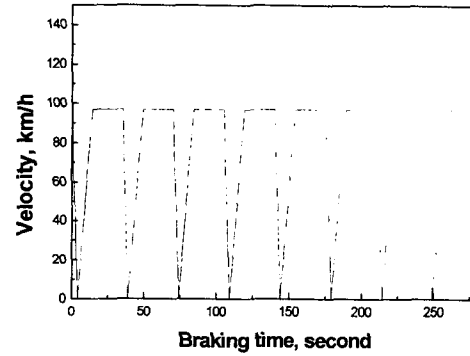


Fig. 3 Repeated braking mode

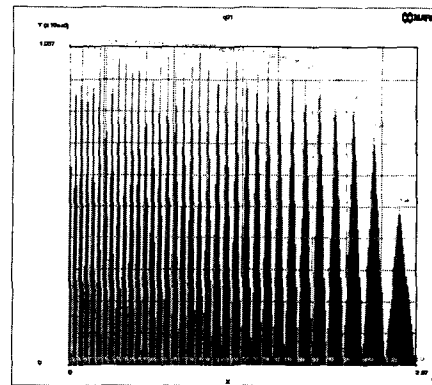


Fig. 4 Braking energy

여기서 디스크와 패드의 접촉 면적을 기준으로 볼 때 미끄럼 접촉 운동면의 1/6에서는 마찰열이 발생하는 구간이고, 나머지 5/6에서는 디스크와 패드가 상대 접촉운동을 하지 않는 방열(냉각) 구간으로 생성된 열이 소산하게 된다. Fig. 4에서 색칠이 된 부분의 면적의 합이 자동차가 제동하는 디스크-패드 브레이크에서 발생한 열량을 나타낸다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3-1. 온도 분포

브레이크 제동시 디스크의 마찰 표면에서 발생하는 미소 적열점은 패드와 상호간 마찰운동을 하고 있는 디스크 표면을 가열하고 냉각하는 반복 작용 때문에 디스크 표면의 국부를 마르텐사이트와 같은 침상 조직으로 만들기도 한다. 이때 발생하는 적열점은 브레이크의 안전성과 제동 성능에 심각한 문제점을 발생시킬 수 있는데, 순간적으로 발생하는 온도는 속도가 1m/s인 경우에도 750℃ 이상으로 발생하기도 한다. 이와 같은 순간 온도의 상승은 주로 디스크와 패드의 불균일한 접촉면으로 인하여 접촉 제동시 디스크 표면에서 발생하는 불균일한 접촉 압력에 의존한다. 마찰 속도가 증가할수록 대부분의 유기질 재질은 부드러워지거나 검게되어 마찰력을 약하게 하고, 조기에 마멸 현상이 진행되면서 국부적인 소재의 탈락을 가져온다. 마찰식 브레이크에서는 주로 열적 버클링이나 열적 뒤틀림이 발생하며, 이것이 적열점의 원인이 되기도 한다.

Fig. 5는 초기 속도 97km/h로 자동차가 8회에 걸쳐 반복 제동을 한 후 디스크와 패드에서 발생한 온도 분포를 보여 주고 있는 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 디스크에서 발생한 최고 온도는 320℃이고, 패드에서는 디스크와 접촉하는 면에서 88℃가 발생하였다. 충분한 가열 시간과 방열 시간이 지난 후 온도 분포가 디스크 전체로 고르게 분포하고 있는 것을 알 수 있다.

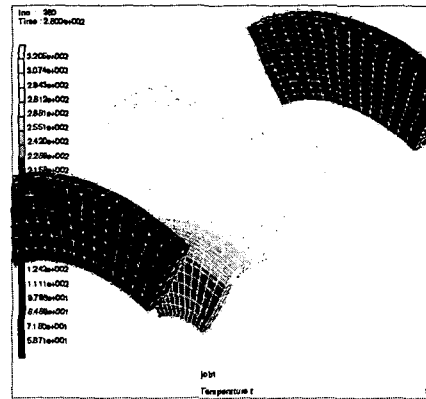
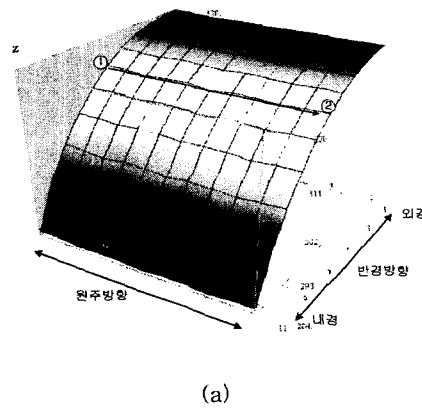
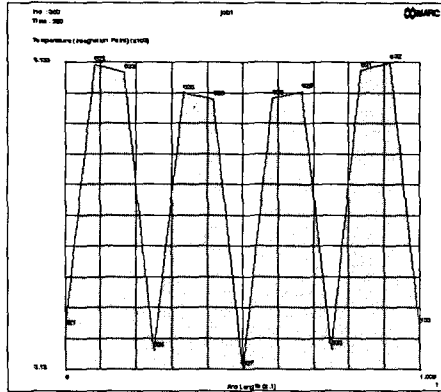


Fig. 5 Temperature distributions of the disk and pads after braking





(b) Curve of temperature along ①→② in Fig. 6(a)  
 Fig. 6 Temperature distribution on surface of disk after braking

Fig. 6(a), (b)는 디스크 마찰 표면에서 발생한 온도 분포도를 보여 주고 있다. Fig. 6(a)에서 반경 방향의 온도 분포는 디스크의 외경쪽이 320℃로 높고, 내경쪽이 293℃로 낮다. 이것은 외경쪽은 디스크 표면에서 발생한 온도가 더 이상 전도되지 않고, 플랜지와 연결된 내경쪽으로 전도가 발생하기 때문이다. Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)에서 표시한 ①→② 방향으로 발생한 원주 방향의 온도 분포를 나타낸 것으로서 크기는 작지만 정현과 형태를 나타내는 것을 알 수 있는데, 온도가 낮게 발생한 부분은 벤트홀이 있는 곳으로서 공기에 의한 방열 작용으로 온도가 낮게 발생하였다. 이와 같이 정현과 형태로 발생한 표면 온도가 디스크 마찰면의 원주 방향으로 균일하게 분포하기 때문에 마찰 제동력이 증가할수록 온도가 높은 곳에서 적열점 현상을 유발하여 열팽창과 국부적인 용융

이나 디스크 표면에서 원주 방향으로 마멸을 일으키는 스크래칭 현상의 원인이 된다.

### 3-2. 거동량 해석

Fig. 7은 제동 후 디스크 브레이크에서 발생한 열변형 현상을 보여주는 그림으로서 디스크는 반경 방향뿐만 아니라 원주 방향으로 심하게 열적 뒤틀림이 발생한다. 그러나 디스크 표면에서 발생하는 적열점은 원주 방향으로 발생한 열거동에 반경 방향으로 발생한 열거동에 비하여 더 많은 영향을 받는다. 본 논문에서 사용하는 유한요소법에서는 디스크와 패드의 접촉면이 완벽하게 균일하고, 패드의 양쪽에서 15KN의 압축력이 작용한다고 가정하였으나 마찰열의 의한 열변형으로 디스크의 접촉면에서 작용하는 압력은 불균해진다. 디스크의 양쪽에 접촉하고 있는 패드의 경우 가운데 부분으로 휘어서 가운데 부분에서 디스크와 접촉을 심하게 하는 것을 알 수 있는데, 디스크가 패드와의 상대 접촉 마찰 운동을 할 경우 이와 같이 접촉이 상대적으로 크게 발생하는 부분에서 접촉 면압이 크게 증가하여 적열점과 마멸이 발생할 가능성이 높다.

패드와 상대 마찰 운동을 하는 디스크 표면에서 발생한 열변형 분포는 Fig. 8에서 보여주고 있다. 반경 방향으로는 디스크의 내경쪽에서 최대 0.344mm에서 최소 0.258mm가 발생하였고, 외경쪽에서 최대 0.312mm에서 최소 0.235mm가 발생하여 외경쪽에서 내경쪽보다 열변형이 작게 발생하였다. 이것은 벤트홀에서 공기에 의한 방열 작용이 디스크의 외경쪽에서 잘 발생하기 때문이다. 또한

반경 방향으로의 열변형은 그림에서 알 수 있는 바와 같이 디스크 표면의 가운데 부분에서 0.35mm로 가장 크게 발생한다.

이와 같은 디스크 표면에서 발생한 열변형 분포는 패드에서 발생한 열변형 역시 가운데

부분에서 가장 크게 발생하였기 때문에 가운데 부분에서 마찰열의 국부적인 축적→ 열변형 거동 발생→ 국부적인 접촉 면압 증대→ 마멸 입자의 발생으로 적열점 현상으로 발전할 수 있고 국부적인 용융이나 열저터와 스킨의 원인이 되기도 한다.

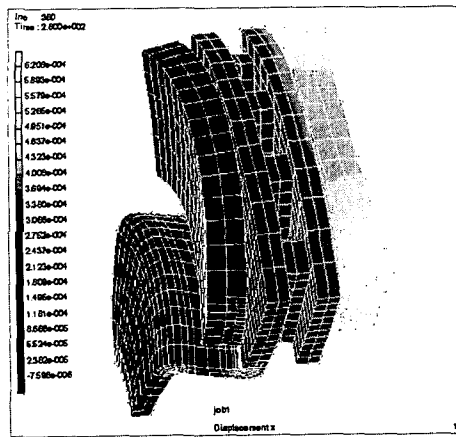


Fig. 7 Distortions of the disk-pads model after braking

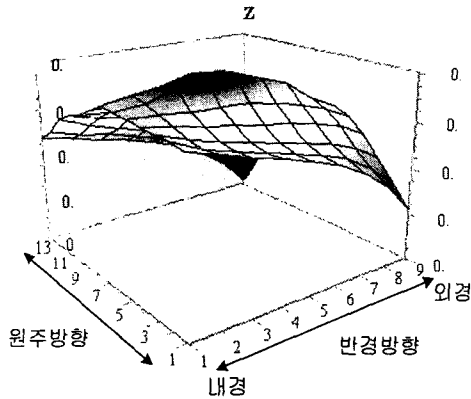


Fig. 8 Displacement distribution on the rubbing surface of the disk after braking

### 3-3. 응력 해석

Fig. 9는 초기 속도 97km/h로 주행중인 자동차가 8회에 걸쳐 반복 제동을 한 후 디스크에서 발생한 응력 분포를 보여 주고 있는 그림으로서 디스크 표면에서 상당히 불균일하게 응력이 분포하고 있음을 알 수 있다. 브레이크 제동시 디스크의 플랜지에서 가장 높은 응력이 발생하는데, 그 이유는 패드와의 상대 마찰 운동에 의하여 발생한 대단히 높은 마찰열에 의하여 디스크의 뒤틀림과 같은 기계적 원인이 플랜지에 가장 많이 영향을 미치기 때문이다. 디스크에서의 열응력이 온도차에 가장 크게 영향을 받고 했을 때 공기의 유입이 자유롭지 못해서 플랜지에서 국부적인 온도차가 크기 때문이다.

또한, 위의 거동 해석에서 설명한 바와 같이 패드와의 상대 마찰 운동에서 패드가 원주 방향으로 휘고, 디스크의 표면에서도 가운데 부분에서 열팽창이 크게 발생하면서 디스크와 패드의 가운데 부분이 접촉을 심하게 하면서 그림에서 보여주는 바와 같이 디스크의 가운데 부분 위치 A에서 75.5KPa의 상대적으로 응력이 높게 발생하였다. 브레이크 제동시 이와 같은 위치에서 상대 마찰 운동에 의한 마멸과 적열점이 발생하여 에너지

를 낮춤으로써 응력을 완하시키게 된다.

Fig. 10은 Fig. 9에서 디스크의 표면의 응력 분포를 3차원 그림으로 표현한 그림으로서 응력의 분포가 대단히 불균일한 것을 보여준다. 그림에서 나타낸 것과 같이 디스크의 가운데 부분에서 발생한 응력이 75.6KPa로서 같은 원주상의 최저 응력 21.8KPa의 3.47배이고, 플랜지와 가까운 위치에서 발생한

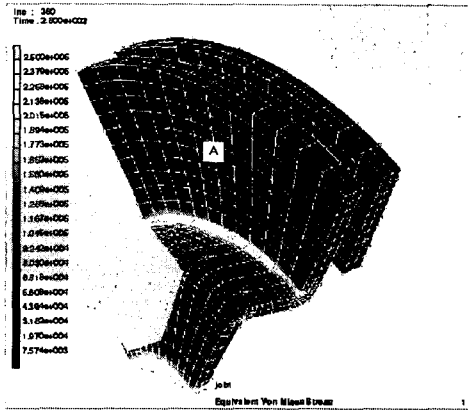


Fig. 9 von Mises stress distribution of disk after braking

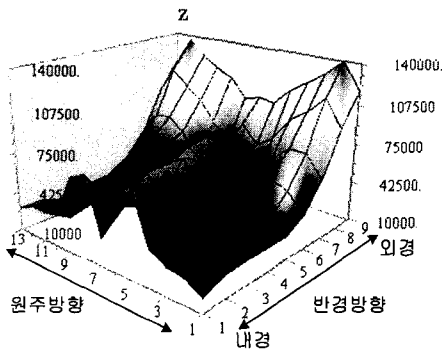


Fig. 10 von Mises stress on surface of

disk after braking

응력은 184KPa로서 같은 반경상의 최저 응력 25.9KPa의 7.1배가 높다. 적열점은 국부적인 면압의 증가로 발생하기 때문에 이와 같은 디스크 표면에서의 불균일한 응력은 직접적인 적열점 발생의 원인이라고 할 수 있다.

#### 4. 결론

유한요소법을 이용한 3차원 시뮬레이션을 통해서 디스크 브레이크의 표면에서 발생하는 적열점 현상의 원인에 대하여 고찰함으로써 마찰열의 국부적인 축적→ 열변형 거동 발생→ 국부적인 접촉 면압 증대→ 마멸 입자의 발생이라는 적열점의 사이클을 확인하였다. 수치적 해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 브레이크 제동시 디스크 표면에서 발생하는 마찰열이 불균일하게 분포함으로써 디스크 표면에서 원주 방향으로 정현파 형태로 분포하여 패드와의 상대 마찰 운동에 의한 디스크에서 발생하는 원주 방향의 스크래칭과 적열점이 발생한다.

(2) 디스크와 패드의 열거동으로 인하여 접촉면이 불균일해 지는데, 디스크와 패드의 접촉면 가운데 부분에서 상대적으로 큰 열팽창이 발생한다. 이와 같은 열팽창이 크게 발생한 위치에서 가속한 접촉을 하게 되어 상대 마찰 운동시 적열점과 마멸이 발생하게 된다.

(3) 브레이크 제동시 디스크에서 발생하는

밴딩과 비틀림 뿐만 아니라 디스크 표면에서  
의 불균일한 열팽창으로 인하여 응력 분포는  
대단히 불균일한데 이와 같은 불균일한 응력  
분포는 적열점 발생의 직접적인 원인이 된  
다. 따라서 디스크 표면에서 적열점의 발생  
을 예방하기 위해서는 디스크 표면에서 온도  
분포를 가능한 균일하게 하고, 접촉 압력의  
증가를 둔화시킬 필요가 있다. 이와 같이 하  
기 위해서 브레이크 제동시 디스크에서 발생  
하는 마찰열을 신속히 방열시킴으로써 디스  
크의 열거동과 온도를 낮게 해야만 한다.

#### 참고 문헌

- [1] Yeo, T. I., "Finite Element Analysis of Thermoelastic Contact Stability with Sliding Friction," J. of KSME, Series A, Vol. 22, No. 7, pp.1185-1192, 1998.
- [2] Chung K. Kim, Boo Yong Sung, "Thermal Behavior Analysis of Disk Brake System During Quick Braking," J. of KSME, Series A, Vol. 22, 1998.
- [3] Rainbolt, J. D., "Effects of Disk Material Selection on Disk Brake Rotor Configuration," SAE 750733, pp.1973-1814, 1975.
- [4] Anderson, A. E., and Knapp, R. A., "Hot Spotting in Automotive Friction Systems," Intl. Conf. on Wear of Materials, Vol. 2, pp.673-680, 1989.
- [5] Jimbo, Y., Mibe, T., Akiyama, K., Matsui, H., Yoshida, M., and Ozawa, A., "Development of High Thermal Conductivity Cast Iron for Brake Disk Rotors," SAE 900002, pp.22-28, 1990.
- [6] Kim, C. K., "Finite Element Analysis of Temperature Distribution and Thermally Caused Deformation in Ventilated Disk Brakes," 95' Korea-USA Tribology Symposium, pp.251-258, Oct. 1995.
- [7] Floquet A., and Dubourg, M. C., "Realistic Braking Operation Simulation of Ventilated Disk Brakes," J. of Tribology, Vol. 118, pp.466-472, 1996.
- [8] Burton, R. A., "Thermal Deformation in Frictionally Heated Contact," Wear, Vol. 59, pp.1-20, 1980.
- [9] Dow, T. A., "Thermoelastic Effects in Brakes," Wear, Vol. 59, pp.213-221, 1980.
- [10] Lee, K. J., and Barber, J. R., "An Experimental Investigation of Frictionally-Excited Thermoelastic Instability in Automotive Disk Brakes Under a Drag Brake Application," J. of Tribology, Vol. 116, pp.409-414, 1994.
- [11] Lu, Chin-Tu, and Bryant, M. D., "Thermoelastic Evolution of Contact Area and Mound Temperatures in Carbon Graphite Electrical Brushes," Wear, Vol. 174, pp.137-146, 1994.
- [12] MARC Program Capabilities, MARC Analysis Research Corp., Palo Alto, CA, Sept. 1996.