

디스크 브레이크 마찰표면의 적열점에 관한 수치적 연구

김 청 균[†] · 조 승 현*

(2004년 5월 3일 접수, 2004년 9월 14일 심사완료)

Numerical Study on the Hot Spots of Friction Surface in Disk Brakes

Chung Kyun Kim and Seung Hyun Cho

Key Words: Hot Spot(적열점), Thermal Distortion(열변형), Thermoelastic Wear(열탄성 마멸), Friction(마찰), Wear(마멸)

Abstract

This paper presents the thermally induced hot spot characteristics of rubbing surface in the friction pad disk brake. During the braking period, the rubbing surface with irregular asperities that are strongly engaged in rough surface, wear, and deformed surface due to a friction heating may produce an irregular distorted geometry of the disk surface. The tribological interactions between the disk and the pads are unstable if the contact stress is severe, in which the irregularity develops the contact pressure distribution, leading eventually to localized contact, high temperature and formation of hot spots. The computed results of contact spots that are simulated using a coupled thermal-mechanical analysis present sinusoidal distortions and localized extrusions of the disk surface, which are strongly related to a hot spot in the practical disk brake.

1. 서 론

패드-디스크 브레이크는 운동 에너지를 마찰열의 형태로 마찰면을 통하여 균일하게 방사하여 주행중인 자동차를 가장 효과적으로 정지하도록 한다. 즉, 마찰 접촉방식의 디스크 브레이크는 자동차의 운동 에너지를 모두 마찰 에너지의 형태로 안정적으로 방사시켜야 하기 때문에 열용량과 방열면적을 충분히 확보할 수 있는 브레이크 설계가 중요하다.

현재와 같은 디스크 브레이크는 1902년에 영국의 랭캐스터가 특허를 처음 획득하면서 실용화가 추진되었지만, 여타 제작기술의 미비로 실용화가

지는 많은 어려움을 겪었다. 특히, 제2차 세계대전을 전후하여 수송기계에 대한 수요가 증가하면서 그동안 자동차 제동장치로 널리 사용되던 드럼 브레이크 대신에 항공기의 디스크 브레이크를 사용하기 시작하였다. 초창기의 디스크 방식은 제동력이 작은 뒷바퀴에 설치하였다가 브레이크 기술이 발전하면서 강력한 제동력을 확보할 수 있는 앞바퀴로 이동·설치하였다. 그 결과로 자동차의 제동거리가 단축되면서 자동차의 제동 안전성은 크게 향상되었다.

브레이크는 자동차의 안전성을 보장하는 핵심부품으로 대단히 중요하다는 사실에 이의를 제기하는 사람은 없지만, 실제로는 기술개발에 인색한 측면이 있다. 최근에는 고속으로 주행중인 자동차를 짧은 제동거리에서 정지시킬 수 있는 고속제동 브레이크를 설계하게 되었다. 즉, 디스크와 패드 사이의 마찰접촉 조건이 가혹해지면서 마찰열의 급상승과 불균일한 방사열에 의한 국부적인 열집중 현상이 발생한다. 제동효과 증가를 위해 개발

[†] 책임저자, 회원, 홍익대 기계·시스템디자인공학과
E-mail : cckim@wow.hongik.ac.kr
TEL : (02)320-1623 FAX : (02)323-8793

* 홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

된 고속제동 브레이크에서는 마찰열에 의한 열변형, 적열점 현상, 열탄성 마멸, 열크랙, 저더현상 등과 같은 문제점이 크게 대두되었다.

브레이크에서 불균일한 마찰열 발생과 과도한 열집중 현상, 불균일한 열방사 등은 디스크 마찰평면에서 열크랙^(1~3)이나 열탄성 마멸 등이 발생하면서 자동차의 주행성능이나 제동 안전성을 심각하게 위협하는 요인으로 작용하고 있다.

브레이크의 정상적인 제동력은 미끄럼 마찰 운동면에서 발생하는 마찰열 에너지가 디스크와 패드 사이에서 균일하게 발생하였다가 안정되게 소산되도록 설계되어야 한다. 그러나, 실제의 디스크 마찰면은 표면 거칠기(surface roughness)나 파형(waviness), 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 축적되는 현상이 발생한다. 따라서, 고속으로 회전하는 디스크의 미끄럼 마찰면에는 적열점(hot spot)이 발생하게 되고, 이것은 열탄성 불안정성(thermoelastic instability) 현상^(4,5)으로 연결되면서 자동차의 제동성은 극도로 약화되기 때문에 제동력 불안정성으로 인한 사고가 많아질 수 있다.

디스크 브레이크의 열특성 문제는 복합원인에 관련되어 난해한 점이 많았기 때문에 대부분 실험적 연구가 많았지만, 최근에는 해석용 프로그램의 획기적인 발달로 실제 현상과 유사한 브레이크 제동 모델을 설정하여 시뮬레이션 기법^(6,7)으로 설계하려는 노력도 많이 기울이고 있다.

본 연구에서는 미끄럼 마찰 접촉식의 제동 시스템으로 널리 사용하는 디스크-패드 브레이크에서 디스크 마찰표면에서 발생하는 적열점 거동 문제를 고찰하고자 한다. 브레이크 마찰면에 가해지는 기계적 하중과 마찰열에 의한 열하중을 동시에 고려한 디스크-패드 사이의 미끄럼 마찰 운동은 열적 불균일성과 표면거칠기, 마멸발생 등에 의해 적열점 현상을 발생하는 것으로 추정되기 때문에 이와 같은 현상을 비선형 유한요소 해석 프로그램 MARC⁽⁸⁾로 해석하고자 한다.

2. 해석모델 및 조건

현상을 해석하기 위해 사용한 디스크-패드의 해석 모델을 보여주고 있다. 디스크와 접촉하는 패드의 뒷면에 가해진 제동력은 15kN이고, 디스크나 패드는 주변의 공기와 접촉하면서 냉각되며, 마찰면 공급되는 복사열은 없고, 디스크와 패드 사이의 마찰은 균일하게 발생하였다가 균일하게 냉각된다고 가정한다.

디스크 마찰면에서 발생하는 열적특성을 해석하기 위해 마찰면에는 8개의 절점, 등과라메트릭, 임의의 6면체 요소(arbitrary hexahedral element)를 사용한 Fig. 2의 축대칭 유한요소해석 모델을 사용하였다. Fig. 2의 디스크-패드 모델에서 냉각을 고려할 때, 대류 열전달 계수는 자동차의 주행 속도, 제동 반복회수, 디스크 주변의 공기속도 유동장 등에 의해 영향을 받지만, 해석의 편의성을 위해 평균값보다 약간 높은 40W/m²K로 고정하여 방열효과를 나타내었다. 한편, 브레이크의 제동모드는 일반적으로 SAE에서 제시한 초기속도 97km/h에서 5회의 제동을 반복적으로 수행한 후의 결과를 기초로 마찰면에서의 열변형 뒤틀림과 이에 따른 적열점 현상을 고찰하였다.

또한, 유한요소해석에 사용한 디스크와 패드의 물리적, 열적 특성 데이터를 Table 1에서 제시하고 있다.

자동차에서 실제로 사용한 디스크 마찰표면의 거칠기를 측정하면, Fig. 3(a)에서 보여주는 것처럼 심한 마찰이나 마멸 등에 의해 제동표면은 마멸트랙이 분명하게 나타난다. 그러나, 디스크-패드 접촉모델을 해석한 기존의 연구는 브레이크 마찰표면의 거칠기를 고려하지 않았고, 완전 평면으로

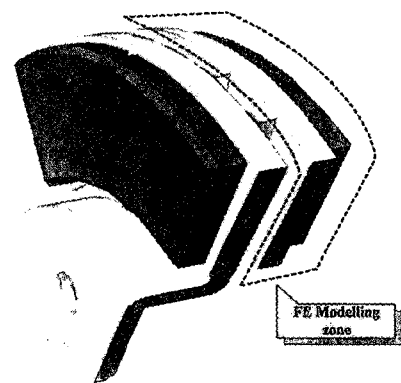


Fig. 1 Simulation model of a ventilated disk brake against the friction pad

Fig. 1은 디스크 마찰표면에서 발생하는 적열점

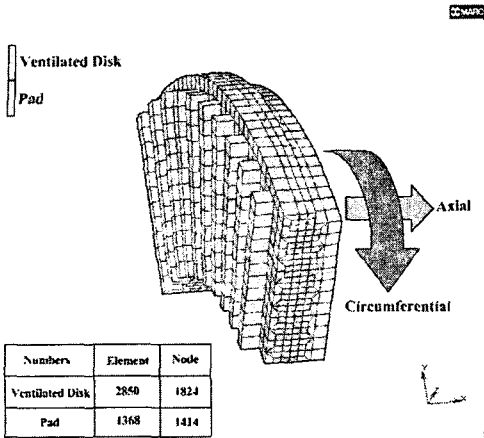


Fig. 2 Boundary conditions for a disk-pad contact model with a finite element mesh

Table 1 Physical and thermal properties of the disk and pads⁽⁶⁾

Material Properties	Disk	Pad
Young's modulus, MPa	125,000	820
Poisson's ratio	0.25	0.25
Mass density, kg/m ³	7,100	3,660
Thermal expansion coefficient, $\mu\text{m/m}\cdot\text{K}$	12	20
Thermal conductivity, W/mK	54	1.01
Specific heat, J/kg·K	586	1034

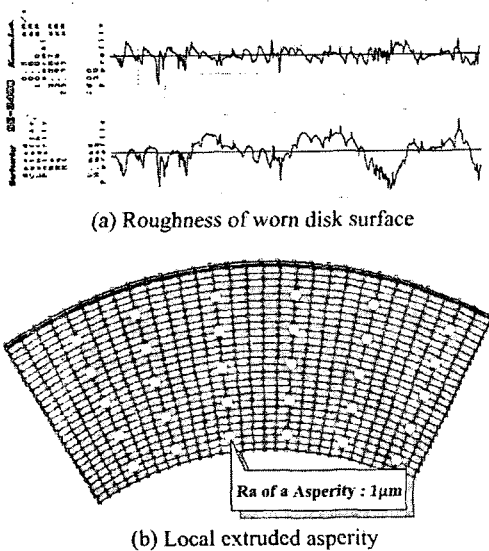


Fig. 3 Surface roughness modelling of a disk with extruded asperities on the rubbing surface

가정하여 해석하였기 때문에 디스크 표면에서 발생하는 국부적인 변위와 응력, 온도분포 등에 대한 해석을 매크로하게 진행한 한계점을 노출하였다.

실제의 디스크 타입 브레이크에서 발생하는 적열점 발생 원인은 Fig. 3(a)에서 보여준 마찰표면의 거칠기 또는 열변형에 의한 국부적인 요철형상이다. 디스크 마찰면이 불균일하게 가공되거나 마멸의 발생, 불균일한 열변형 거동 등에 의해 마찰면에 튀어나온 돌기(asperity)를 중심으로 적열점이 발생하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 Fig. 3(b)에서 표시한 디스크 마찰 표면에 1 μm 정도 돌출한 정점(asperity) 30개가 규칙적으로 배열되어 패드와 상대 접촉운동을 하도록 하였다. 이것은 적열점 발생의 실제모델과 근접한 접촉조건을 구현하도록 하였다.

3. 해석결과 및 토의

3.1 변형거동 해석

Fig. 4는 디스크의 마찰표면에서 발생한 변위량 분포를 매크로하게 보여주고 있다. 패드와 디스크의 마찰작용에 의해 발생된 열은 디스크의 형상과 마찰면의 불균일성에 의해 열적 뒤틀림(thermal distortion)이 발생한다. 특히 마찰열의 집중이 심한 마찰면 가운데 부분에서 볼록하게 튀어나오는 열변형이 발생한다. 디스크의 마찰 표면은 튀어나온 부위를 중심으로 접촉면압이 크게 증가하면서 열탄성 마멸이나 열크랙 등에 직접 관련된 적열점 현상이 발생하게 된다.

Fig. 4에서 디스크의 중심부 ①-②-③-④로 연결되는 사각형의 마찰표면에서 발생한 축방향의 변형거동 분포도를 Fig. 5에서 자세하게 보여주고 있다. Fig. 5(a)에 의하면 디스크 마찰표면의 가운데에서 발생된 최대 변위량은 44.4 μm 이고, 가장자리의 최소 변위량은 13.6 μm 로 약 3.2배 차이가 발생하였다. 이러한 매크로 변형은 정현파를 보여주고 있는데, 특히 반경방향으로 주름형상의 정현파 반복 패턴을 보여주고 있다. 원주방향의 변형 거동량, 즉 ①-④와 ②-③로 발생된 변위량이 반경방향의 변형량, 즉 ①-②와 ③-④ 방향으로 변형된 뒤틀림 거동량에 비하여 크게 나타났다.

특히, Fig. 5(b)는 뒤틀림 변위량이 가장 크게 발생할 우려가 높은 지역(21mm×22mm), 즉

Fig. 4의 ㉠-㉢-㉣-㉤를 마이크로하게 관찰한 것으로 마찰면의 변형거동 특성을 제시하고 있다. 여기서 축방향의 최대 변위량은 원주방향 ㉢ → ㉣를 따라서 $44.4\mu\text{m}$ 가 발생하였다. 반경방향으로 발생한 국부적인 정현파는 변위량이 반경방향으로 4mm 이동할 때마다 약 $5\mu\text{m}$ 의 차이를 두고 산과 골이 형성되는 파형을 보여주는 것으로 보아 마찰면에서 발생된 열변형 거동량은 정현파 주기성을 갖는 것으로 나타났다. 이와 같이 디스크 마찰표면에서 발생한 약 $5\mu\text{m}$ 의 작은 변위량은 결국 마찰표면에서 전반적인 온도상승과 접촉면압 증대에 따른 국부적인 적열점 현상이 발생하고, 중국에는 마멸 발생으로 마찰면의 접촉조건을 바꾸게 된다. 디스크 마찰면의 마멸은 마찰표면의 접촉거동을 불안정하게 하여 적열점 발생과 이에 따른 마멸입자의 생성, 탈락이라는 반복성이 지속된다. 여기에 디스크의 미끄럼 마찰면에서 불안정한 접촉거동 패턴은 소음과 진동을 유발하는 또 다른 부작용을 일으켜서 제동성을 심각하게 위협하는 단계로 발전하게 된다.

3.2 응력거동 해석

Fig. 6은 디스크의 미끄럼 마찰 중심구간 ㉠-㉢-㉣-㉤에서 발생된 von Mises 응력분포를 보여준 결과이다. Fig. 6(a)는 디스크의 표면에서 발생된 von Mises 응력분포를 매크로하게 제시한 결과로 디스크의 가운데 안쪽면에서 최대 von Mises 응력 355MPa , 바깥쪽 표면 가장자리에서 최소 von Mises 응력 44.2MPa 가 각각 발생하였다. 결국 디스크의 마찰표면 가운데에서 최대응력이 발생한 것은 디스크의 마찰면 중앙에서 국부적인 열집중 현상이 발생하였기 때문이다. 결과적으로 최대 변위량은 패드에 의해 열팽창력이 억제되기 때문에 접촉압력의 국부적인 급상승과 마멸 발생이라는 브레이크의 제동 불안정성이 반복하게 된다. 접촉응력도 Fig. 5에서 보여준 변위량 분포처럼 반경방향과 원주방향으로 정현파 응력이 불균일하게 분포하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6(b)는 응력분포를 마이크로하게 보여준 해석결과로 Fig. 4의 ㉠-㉢-㉣-㉤에서 발생한 최대응력(290MPa)과 최소응력(200MPa)의 차이가 90MPa 정도로 대단히 크게 나타났다. 이렇게 국부적으로 집중된 응력은 마찰표면의 온도 상승, 적열점 발생과 열탄성 마멸로 이어지는 원인으로 작용하게 된다.

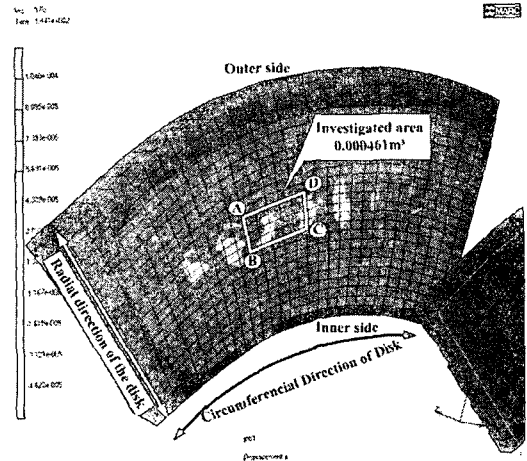
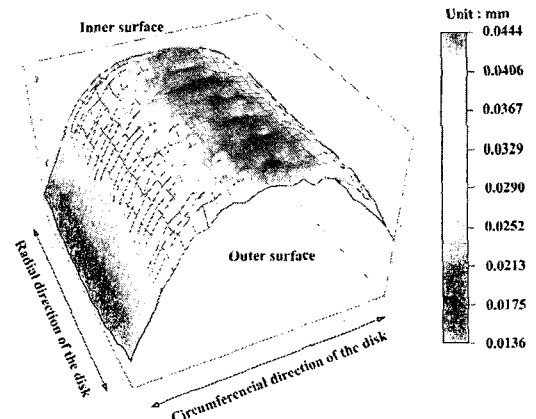
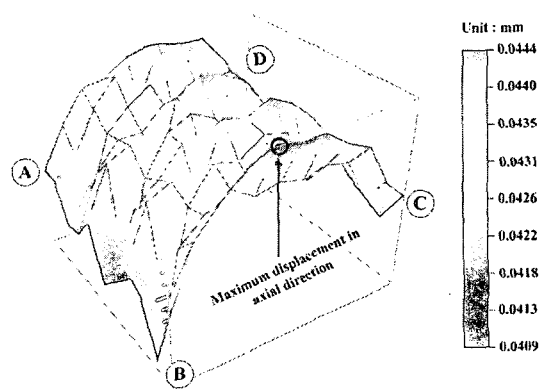


Fig. 4 Distorted surface of the disk-pads contact model after braking



(a) Macro distribution



(b) Micro distribution

Fig. 5 Displacement distribution on the rubbing surface of the disk after braking

디스크-패드 의 마찰표면에서 발생된 불균일한 응력차는 상대 마찰조건을 더욱 심화시켜 마멸발생으로 브레이크의 제동성이 불안정하게 되고 수명을 단축시키게 된다. 이러한 현상을 완화시키기 위해서 마찰식 브레이크는 방열구가 있는 벤틸레이티드 디스크를 선호하며, 비교적 열전도가 잘 일어나는 경량 알루미늄 소재를 사용하는 것도 하나의 대안이지만, 항상 디스크의 최적화 설계는 필수적이다.

열점 패턴을 비선형 유한요소법으로 해석하였다.

디스크 표면은 마찰열에 의한 열팽창으로 인해 마찰 접촉면은 반경방향과 원주방향으로 정현파의 변위를 보여주는데, 매크로하게는 디스크 마찰면의 가운데 부분에서 최대 변위량이 발생한다. 그러나, 마찰표면을 마이크로하게 관찰하면 마찰면에 불규칙한 변위량이 분포하고, 마찰면의 관찰길이를 4mm 이동할 때마다 약 5 μ m의 진폭으로 정현파 변위거동을 반복하고 있다.

디스크 접촉면에서 발생하는 응력은 정현파 형태를 보여주는데, 반경방향의 정현파가 더 불안정하게 변화하고 있다. 국부적으로 90MPa이라는 큰 차이를 보여준 결과는 마찰표면의 응력이 매우 불균일하게 분포하고 있음을 나타내며, 마찰면의 불균일한 응력은 디스크 표면에 적열점 발생 원인으로 작용하게 된다.

참고문헌

- (1) Rainbolt, J. D., 1975, "Effects of Disk Material Selection on Disk Brake Rotor Configuration," SAE 750733, pp. 1973~1814.
- (2) Anderson, A. E. and Knapp, R. A., 1989, "Hot Spotting in Automotive Friction Systems," *Intl. Conf. on Wear of Materials*, Vol. 2, pp. 673~680.
- (3) Jimbo, Y., Mibe, T., Akiyama, K., Matsui, H., Yoshida, M. and Ozawa, A., 1990, "Development of High Thermal Conductivity Cast Iron for Brake Disk Rotors," SAE 900002, pp. 22~28.
- (4) Burton, R. A., 1980, "Thermal Deformation in Frictionally Heated Contact," *Wear*, Vol. 59, pp. 1~20.
- (5) Anderson, A. E. and Knapp, R. A., 1989, "Hot Spotting in Automotive Friction Systems," *Intl. Conf. on Wear of Materials*, Vol. 2, pp. 673~680.
- (6) 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.
- (7) Floquet A. and Dubourg, M. C., 1996, "Realistic Braking Operation Simulation of Ventilated Disk Brakes," *J. of Tribology*, Vol. 118, pp. 466~472.
- (8) MARC Program Capabilities, 1996, MARC Analysis Research Corp., Palo Alto, CA.

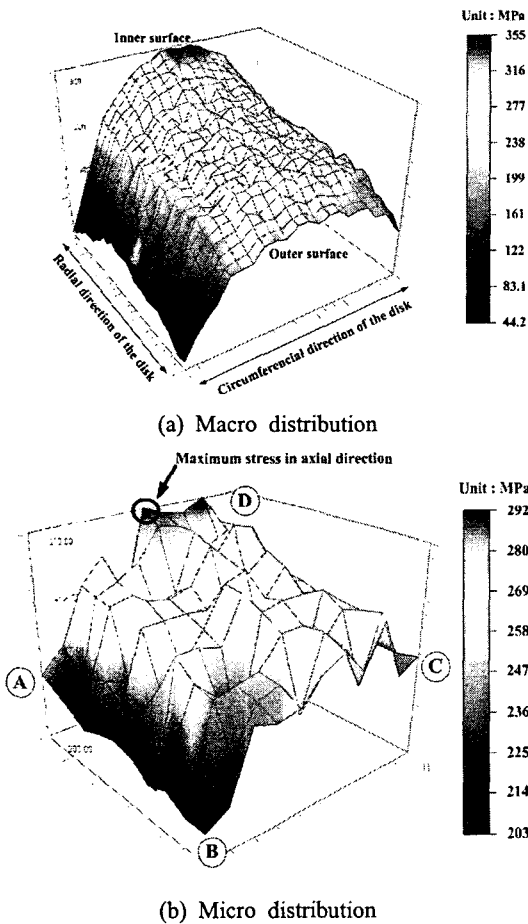


Fig. 6 von Mises stress distribution on the rubbing surface of the disk after braking

4. 결 론

디스크의 마찰표면에는 패드와의 제동작용으로 발생된 마찰열이 국부적으로 축적되고, 이에 따른 적열점 발생 → 열변량 발생 → 국부적인 접촉응력 증대 → 마멸입자 발생과 탈락이라는 적