

마찰식 브레이크의 미세 접촉면에 발생된 적열점 현상의 수치적 연구

김청균[†] · 조승현

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Numerical Study of Micro-Contact Surface Induced Hot Spots in Friction Brakes

Chung Kyun Kim[†] and Seung Hyun Cho

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract – This paper presents hot spot behaviors on the rubbing surface of disk-pad type brake by using coupled thermal-mechanical analysis technique. The height of micro-asperity on the rubbing surface is usually 2~3 μm in practical disk brakes. Non-uniform micro-contacts between the disk and the rigid friction pads lead to high local temperature distributions, which may cause the material degradation, and develop hot spots, thermal cracks, and brake system failure at the end for a braking period. The friction temperatures on the rubbing surface of disk brakes in which are strongly related to the hot spot and thermal related wears are rapidly concentrated on the micro-contact asperities during braking. The computed FEM results show that the contact stress, friction induced temperature and thermal strain are highly concentrated on the rubbing micro-contact asperities even though the braking speed and force are small during the braking period. This hot spot may directly produce the slippage and various thermal wears on the brake-rubbing surface.

Key words – hot spot, friction, temperature, micro-contact, asperity, friction disk brake.

1. 서 론

마찰식 브레이크(friction brake)는 회전하는 두 개의 평판 마찰면에 축방향으로 유압 수직력을 가함으로써 디스크-패드 소재와 접촉면의 마찰조건에 의해 결정되는 접선방향의 미끄럼 마찰력을 발생시키는 제동장치이다. 자동차를 포함하여 움직이는 물체의 속도를 줄이거나 또는 물체를 정확한 위치에 정지시키기 위한 제동장치로 디스크-패드식 브레이크를 널리 사용한다.

Fig. 1은 자동차에서 널리 사용하는 통풍구(ventilation hole) 있는 디스크 브레이크로 가격이 저렴하면서도 열전도성, 열확산성, 주조성, 내마멸성과 같은 열적, 기계적 특성이 우수하다. 이러한 기계적·열적 특성을 비교적 만족하는 브레이크 소재로 회주철(gray cast iron)

을 채택하고는 있지만, 자동차가 요구하는 제동성을 모두 만족하지는 못한다. 특히, 고속으로 주행하는 자동차가 급제동을 하는 경우에 마찰식 브레이크는 국부적 마찰열 집중현상에 의한 제동력 문제가 많이 제기되고 있다.

마찰식 브레이크는 움직이는 자동차의 운동 에너지를 마찰열 에너지로 전환시켜, 브레이크에 축적되는 마찰열을 대기중으로 잘 소산시킴으로써 마찰에 의해 패드와 디스크 마찰표면이 국부적으로 뒤틀리는 형상변화에 대한 안전성을 확보하도록 해야 한다[1,2]. 결국, 패드와 디스크의 초기 마찰면은 평행한 평판 마찰상태를 유지하지만, 제동작용이 반복적으로 진행되면서 브레이크의 제동력을 확보하기 위해 마찰표면에 제작되었던 초기 표면 거칠기(surface roughness)는 마멸(wear)이나 제동과정에서 흔히 발생하는 열변형 또는 응력집중에 의해 접촉조건을 항상 균일하게 지속적으로 유지할 수

[†]주저자 · 책임저자 : cckim@wow.hongik.ac.kr

는 없다. 따라서, 마찰 패드식 브레이크의 마찰표면에 형성된 작은 돌기(asperity)는 제동조건과 사용시간에 따라 국부적인 열변형과 적열점(hot spots) 현상으로 인한 열탄성 마멸(thermoelastic wear)이나 용융 마멸(melting wear) 등이 지속적으로 발생하게 된다. 이것은 브레이크 마찰면에 열저더(thermal judder)의 발생, 슬립에 의한 제동력의 저하, 수명단축이라는 제동장치의 손상과정이 순차적으로 진행하게 된다[3-5].

제동력이 우수한 자동차는 주행 안전성을 확보할 수 있지만, 움직이는 자동차에서 제동력을 순간적으로 상실하게 되면 사고로 이어질 가능성은 대단히 높아진다. 정상 작동조건에 의한 브레이크의 제동 신뢰성 확보는 아무리 강조해도 부족함이 없다. 따라서, 본 연구에서는 자동차의 고속화와 고출력 엔진의 일반화, 도로의 요철부 상존, 차량증가에 따른 짧은 제동거리 확보의 필요성 등은 마찰열에 의한 적열점(frictional heat induced hot spots)이 마찰표면에 발생하면서 브레이크의 제동력 저하로 연결되는 현상을 규명하고자 한다. 특히, 평판 디스크 마찰면의 접촉거동 적열점 현상을 돌기에 의한 미세적 접촉조건(micro-contact conditions) 측면에서 해석하고자 한다.

2. 해석조건 및 해석모델

패드-디스크 브레이크의 마찰면 내부에는 공기 유동에 의한 냉각력을 확보하기 위해 Fig. 1과 같은 통풍구가 있고, 평판 마찰면에는 수많은 미세한 돌기(asperity)가 균일하게 분포한다고 가정한다. 제동작용에 의해 이들 돌기 마찰면은 국부적으로 집중된 마찰열을 받으면서 열변형을 일으키고, 이것은 결국 적열점(hot spots) 현상을 유발하는 원인으로 작용하게 된

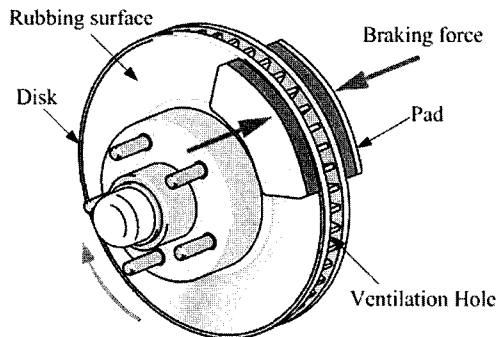


Fig. 1. General view of typical ventilated disk brake.

다. 불가피하게 형성된 돌기는 통풍구 디스크 브레이크(ventilated disk brake)의 마찰면에 있는 표면 거칠기(surface roughness)로 초기 가공조건에서, 그리고 브레이크 사용에 따른 마찰면의 마멸 등에 의해 발생된다.

본 해석에 사용된 디스크 원주방향의 마찰면 접촉길이, 즉 1회전 제동길이는 80.74 cm이고, 패드의 접촉길이는 9.1 cm이다. 디스크 마찰면에 솟아난 돌기의 평균 크기는 Fig. 2에서 보여준 것처럼 0.002×0.875×

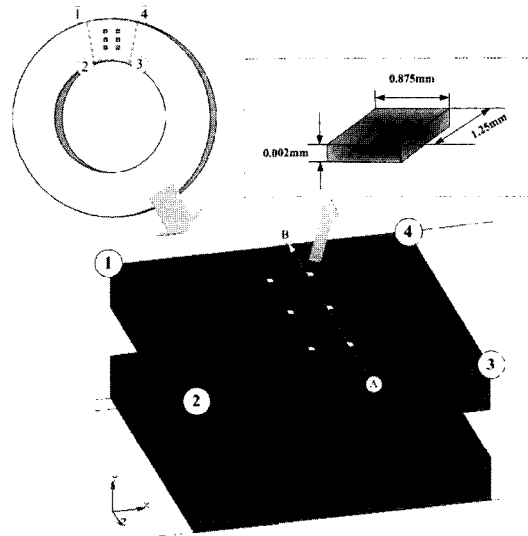


Fig. 2. FE analysis model on the rubbing asperity surfaces of ventilated disk brake.

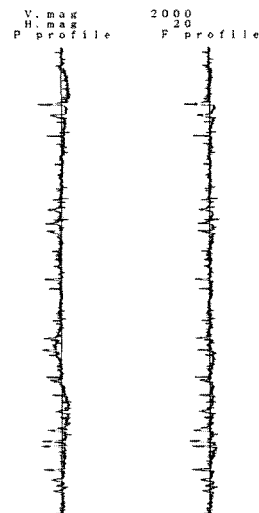


Fig. 3. Wavy surfaces on the rubbing surface of ventilated disk brakes.

Table 1. Total time for a revolution of a disk brake

Velocity, km/h	Total time for a revolution, sec	Contact time of a disk-pad for a revolution, sec
10	0.290660	0.032786
30	0.096887	0.010929
60	0.048443	0.005464
97	0.029965	0.003380

Table 2. Physical and thermal properties of a disk brake

Material parameters	Values
Poisson's ratio	0.3
Elastic modulus, MPa	125,000
Mass density, kg/m ³	7,300
Thermal conductivity, W/m·K	36
Specific heat, J/kg·K	586

1.25 mm의 직사각형으로 가정한다. 이러한 미세 돌기는 초기 마찰면에 가공된 거칠기, 제동작용에 따라 불가피하게 발생하는 디스크 표면의 마멸, 국부적인 열 변형 등에 의해 발생한다. Fig. 3은 브레이크 마찰표면에 형성된 대표적인 표면 거칠기 데이터를 제시하고 있다. 여기서, 거칠기의 산(peak)을 미시적으로 보면, 하나의 독립된 돌기로 가정할 수 있다.

디스크가 1회전을 하는 동안에 걸리는 총시간과 디스크가 1회전할 때에 디스크가 패드와 직접 접촉하는 총시간을 계산하면 Table 1과 같다. 마찰면의 적열점 현상을 해석하기 위해 사용된 디스크 재질은 통풍구 디스크 브레이크에서 널리 사용하는 회주철로 열적, 기계적 특성치를 Table 2에서 제시하고 있다.

유한요소해석[6]에서 패드는 강체(rigid body)로 변형이 발생되지 않고, 디스크는 변형거동이 가능한 재질이라 가정한다. 따라서, 브레이크가 제동작용을 하게 되면, 미끄럼 마찰면에는 적열점(hot spots) 현상이 패드가 아닌 디스크 마찰표면에서 발생된다는 조건하에 모델링을 하였다. Fig. 2는 통풍구 브레이크의 디스크 마찰면에 형성된 다수의 미세 돌기를 포함한 해석모델을 제시하고 있다. 이러한 마찰접촉 제동 모델에 3차원 해석을 수행하기 위한 통풍구 마찰 디스크에는 8개 절점, 등파라메트릭, 임의 6면체(arbitrary hexahedral) 요소를 사용한 유한요소해석 모델을 Fig. 2에서 보여주고 있다.

본 연구에서 자동차의 이동속도는 10~97 km/h이고, 마찰계수는 0.3으로 브레이크 장치에 사용되는 대표적

인 제동조건을 사용하였다. 또한, 디스크 마찰면을 구성하는 패드와 디스크에 작용하는 수직방향의 제동 가압력(braking force) 15 kN에 의해 브레이크는 제동력을 확보하게 된다. 디스크 마찰면에는 Fig. 2에서 제시한 것과 같은 크고 작은 돌기가 있어서 패드와 디스크가 미끄럼 마찰접촉을 하게 되면, 이들 돌기들이 우선적으로 접촉하면서 높은 온도발생과 열응력이 집중되고, 이것은 적열점 현상으로 발전하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 유한요소해석을 수행하기 위해 디스크 마찰면에 임의의 크기를 갖는 돌기, 즉 0.875 mm의 폭에 2 μm 높이의 돌기가 다수 있다고 가정한 상태에서 적열점의 거동특성을 규명하고자 하였다.

3. 해석결과 및 토의

브레이크 마찰면의 미끄럼 속도가 10~97 km/h로 변화하고, 마찰계수가 0.3로 일정하다고 가정할 경우, 2 μm 높이의 돌기(asperity) 형상을 갖는 미끄럼 마찰면에 분포하는 온도를 Fig. 4에서 보여주고 있다. 디스크 마찰면에 솟아있는 여러개의 돌기를 중심으로 분포하는 온도를 Fig. 2에서 표시한 반경방향 ①→②를 따라서 고찰하였다. 여기서 마찰면(friction surface)에 용기된 사각형의 미세 돌기(micro-asperity) 크기는 2 μm×0.875 mm×1.25 mm로 미끄럼 마찰제동이 시작되면, 가장 먼저 이들 돌기부분에서 마찰접촉 제동작용이 일어나게 된다.

Fig. 4에서 브레이크 마찰면의 온도분포는 97 km/h의 속도로 주행하던 자동차가 제동하는 경우에 발생된 최고온도 T_{97} 를 기준으로 임의의 주행속도에서 발생된 최고온도 T 와의 무차원 온도비 T/T_{97} 로 나타낸 것이다.

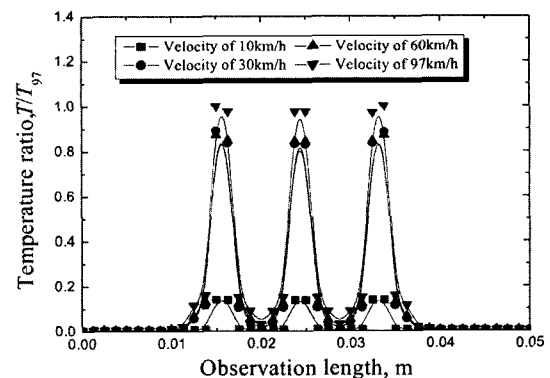


Fig. 4. Dimensionless temperature ratio on the rubbing surface of a ventilated disk brake.

자동차의 주행속도가 30 km/h 정도로 이동하면 마찰면에 축적된 온도분포는 안정적이지만, 60 km/h 이상의 제동속도로 증가하면 마찰 돌기부에서 발생된 온도는 대단히 불안정해지는 현상을 보여준다. Fig. 2와 같이 미세한 마찰 돌기부가 미끄럼 마찰 제동작용을 하게 되면, 자동차의 주행속도가 증가함에 따라 마찰에 의해 생성된 마찰열이 마찰면에 균일하게 소산되기보다는 국부적으로 작은 돌기부에 집중적으로 축적된다는 사실을 잘 보여주고 있다. 계속하여 제동속도가 증가하면, 실제로 접촉한 마찰면에 발생된 마찰열은 국부적으로 축적되면서 솟아오른 돌기(asperity)는 탄성변형 → 소성변형 → 열탄성 마멸 → 용융마멸 → 마멸입자의 탈락이라는 제동 순환 사이클이 형성되면서 마찰부는 온도상승과 마멸이 지속적으로 진행된다. 이러한 순환 사이클 과정에서 디스크-마찰재의 미끄럼 마찰에 의한 마찰열의 축적과 소산은 상기 순환 사이클을 형성시키는 중요한 에너지원으로 작용하게 된다. 따라서, 미세한 마찰 접촉부에서 발생하는 마찰열 축적 현상을 완화시키기 위해서는 디스크 마찰면 부근에 통풍구(ventilation hole)를 만들어 외기에 의한 마찰면의 냉각을 충분히 고려하면 돌기부의 온도상승과, 이에 따른 열적마멸은 크게 완화될 수 있을 있다는 결과를 제시하고 있다.

Fig. 5는 자동차의 주행속도가 60 km/h로 일정하고, 디스크와 마찰재 사이의 마찰계수가 0.1~0.5로 변하는 경우에 디스크 마찰면의 미세 돌기부를 중심으로 분포하는 최고온도를 해석한 무차원 온도비 $T/T_{0.5}$ 를 보여주고 있다. Fig. 5에서 브레이크 마찰면의 온도분포는 최고 마찰계수 0.5의 마찰조건으로 제동하는 디스크 마찰면에서 발생된 최고온도 T_{max} 를 기준으로 임의의 마

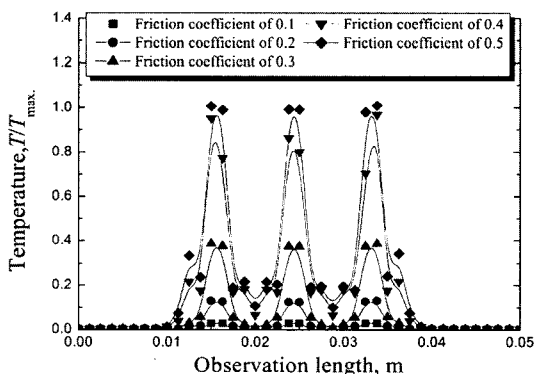
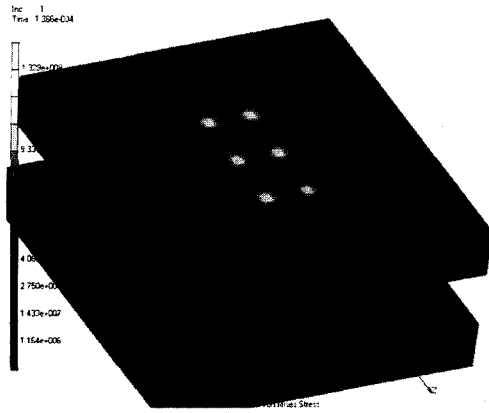


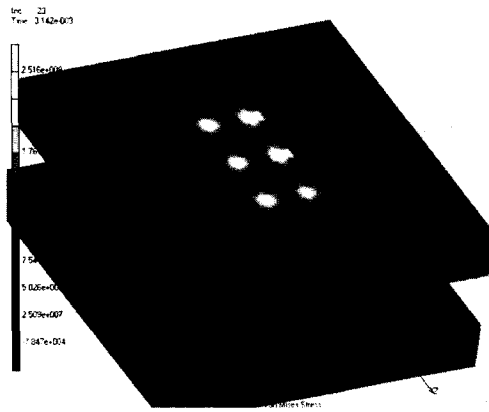
Fig. 5. Dimensionless temperature ratio, on the rubbing surface of a ventilated disk brake.

찰조건에서 발생된 최고온도 T 와의 무차원 온도비 T/T_{max} 로 나타낸 것이다. 미끄럼 마찰면의 마찰계수가 0.3 미만에서는 온도분포가 비교적 안정적이라 할 수 있지만, 마찰계수가 0.3을 넘어서게 되면 특히 마찰면 돌기부에서 발생된 온도가 급격히 증가하면서 불안정해지고 있음을 보여주고 있다. Fig. 2에서 제시한 브레이크 마찰면에 솟아있는 미세 돌기부를 고려한 미끄럼 마찰 제동조건에서 자동차의 주행속도 또는 마찰계수가 증가함에 따라 미끄럼 마찰면에서 발생된 마찰열의 대부분은 미세 돌기부에 집중적으로 축적되기 때문에 국부적인 열팽창과 수축 현상에 의한 적열점 현상이 반복적으로 발생하게 된다. 이러한 적열점 현상은 미세 돌기부를 중심으로 기계적 특성이 떨어지다가, 열적마멸이나 열적저터 등에 의한 브레이크의 제동력 저하로 연결되고, 궁극적으로는 제동력 상실과 사고라는 큰 문제점이 진행된다.

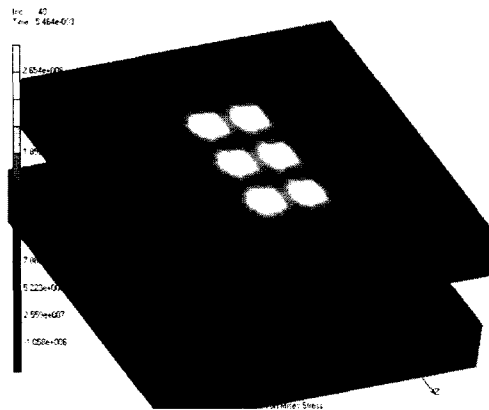
Fig. 2에서 보여주는 것처럼 브레이크에 설치된 통풍구 표면에 6개의 돌기(asperity)가 솟아있는 미끄럼 마찰접촉 제동 모델에 대해 von Mises 응력분포를 제시한 유한요소해석 결과가 Fig. 6이다. 이 때에 자동차의 주행속도는 60 km/h이고, 마찰계수는 0.3으로 유지한 상태에서 디스크가 제동작용을 위해 한바퀴 회전하는 1사이클 동안에 발생된 von Mises 응력분포를 보여준 것이다. 즉, Fig. 6(a)는 디스크 브레이크 제동작용의 초기에 발생된 von Mises 응력분포로 6개의 미세 돌기부에 집중되는 현상을 보이지만, 아직은 안정된 133 MPa의 응력을 나타낸다. Fig. 6(b)는 디스크 브레이크 제동작용의 탄·소성 변형 과정으로 마찰면에서 용기된 돌기부를 중심으로 마찰열에 의한 소성변형이 처음 일어나는 단계에서 252 MPa의 von Mises 응력분포를 나타낸 것으로 응력에 의한 문제점은 아직 없다. Fig. 6(c)는 제동작용의 마지막 단계로 6개의 돌기부에 집중된 von Mises 응력분포 결과로 265 MPa로 안전하지만, 6개의 돌기부는 인접 돌기에 약간의 영향을 미치고 있음을 보여준다. Fig. 6의 해석결과에 의하면, 미끄럼 마찰면의 돌기부가 먼저 미끄럼 마찰 운동을 하기 때문에 국부적으로 von Mises 응력이 집중된 것으로 나타났지만, 계산된 접촉응력은 아직도 항복강도 이내에 있으므로 소재의 구조강도 측면에서 문제가 없다. 이처럼 브레이크의 미끄럼 마찰면에 집중된 열응력 거동보다는 열탄성 마멸이나 용융마멸 등과 연계된 마찰열에 의한 변형 거동이 브레이크의 제동력에 더 큰 영향을 미치는 것으로 예측된다.



(a) Initial braking contact period



(b) First plastic deformation period



(c) Final braking period

Fig. 6. von Mises stress distributions at the contact patch of the asperities for a braking speed, 60 km/h and a friction coefficient, 0.3.

디스크 브레이크가 1회 제동 사이클(braking cycle)을 하는 동안에 디스크 마찰 접촉 운동면에서 발생된

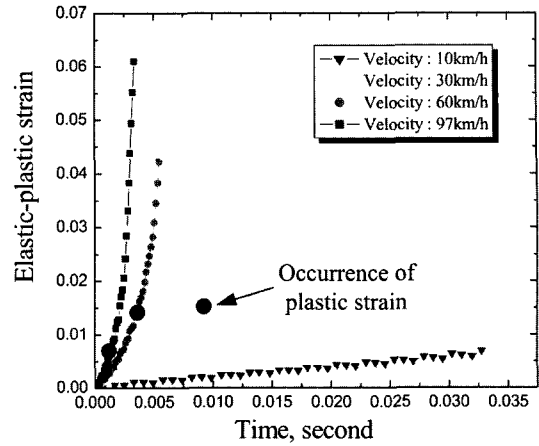


Fig. 7. Elastic-plastic strain on the rubbing surface with several asperities in ventilated disk brakes.

von Mises 응력분포 결과를 제시한 Fig. 6의 해석결과에 의하면, 미끄럼 마찰접촉을 하는 용기된 돌기부에서 발생된 접촉응력은 인접 돌기부에 약간의 영향을 주기는 하지만 안전하고, 작은 돌기부(micro-asperity)에 마찰열은 더 축적되면서 급속하게 성장하고, 이것은 미세적인 적열점 현상으로 이어져 국부적인 열탄성 마찰이나 미세적 용융 마멸(micro melting wear)과 같은 물리적 현상으로 발전할 가능성이 높다는 해석결과를 보여주고 있다.

Fig. 7에서 보여준 탄·소성 변형률(elastic-plastic strain)은 마찰면의 제동속도가 증가함에 따라 급격하게 변형되고 있음을 나타내고 있다. 이들 변형거동 해석결과에 의하면, 미세한 돌기부에서 발생된 탄·소성 변형은 마찰열 집중에 의해 빠르게 시작되고 있음을 알 수 있다. Fig. 7에서 표시한 큰 점은 각각의 제동 속도에 대하여, 마찰열에 의해 처음에는 탄성변형을 하다가 나중에 소성변형을 하는 경계점을 나타낸다. 즉, 마찰열 축적에 의해 탄·소성 변형거동이 공존하는 제동시기(braking time)를 큰 점으로 나타낸 것이다. 여기서 제동속도가 크게 낮은 10 km/h에서는 소성변형이 발생되지 않았지만, 제동속도가 빨라질수록 소성변형이 발생하는 시점이 대단히 짧아지고 있음을 알 수 있다. 이것은 동일한 마찰접촉 운동조건에 대하여 제동속도가 증가할수록 열축적이 국부적으로 집중되면서 급격한 변형 거동량은 결국 더 많은 마찰열의 증가, 급격한 열탄성 마찰이나 용융 마멸량 발생이라는 전형적인 적열점 현상의 진행과정으로 설명될 수 있다.

결국, 미끄럼 마찰접촉 운동을 하는 디스크의 용기

된 돌기부에서 발생된 접촉응력이나 변형량은 인접한 돌기부에 영향을 주기보다는 오히려 작은 돌기부 자체에 마찰열이 더 축적되면서 변형량이 더 성장하고, 이것은 미시적인 적열점 현상으로 이어져 국부적인 마멸과 같은 물리적 현상으로 발전할 가능성이 높다는 해석결과를 Figs. 6과 7에서 잘 보여주고 있다.

국부적으로 돌기부가 있는 디스크의 미끄럼 마찰면은 항상 열적 불안정성이 발생하기 때문에 돌기부의 열적거동 문제를 안정시키기 위해서는 디스크 브레이크의 통풍구 설계와 통풍구를 통과하는 공기에 의한 방열 효과를 극대화시켜 국부적으로 축적되는 온도를 마찰면에 고르게 소산시켜야 한다. 그렇지 않고서는 브레이크의 제동 마찰속도나 마찰계수의 증가는 특히 돌기부에 국부적인 온도 상승과 열변형, 열응력 집중을 일으켜 결국은 열탄성 마멸과 용융 마멸 등으로 연결되면서 마찰식 브레이크는 제동과정에서 진동과 소음을 유발하고, 마멸이나 열크랙에 의한 수명 단축이라는 결과를 초래하게 된다. 또한, 미끄럼 마찰면의 국부적인 온도상승에 의한 강도저하와 마멸량 증가로 인한 슬립(slip)이 진행하게 되면, 브레이크는 국부적으로 제동력을 상실하게 되어 큰 사고를 유발할 수 있다는 사실이다.

결국, 마찰식 브레이크는 초기 가공 정밀도, 응착/용융마멸, 열변형 뒤틀림, 연삭마멸 입자 등에 의해 마찰면에 솟아있는 돌기부를 중심으로 마찰열이 집중되면서 적열점의 발생, 이에 따른 열탄성 마멸입자의 발생이라는 열탄성 불안정성(thermoelastic instability)이 제동작용에 따라 반복하게 된다. 제동과정에서 디스크 마찰면에 발생된 적열점 현상은 슬립현상의 발생과 제동력 저하, 열변형에 의한 진동과 소음의 유발, 수명단축이라는 제동성능을 떨어뜨리게 된다. 브레이크 장치의 제동과정에서 이러한 적열점 현상에 의한 제동력 저하는 순간적으로 제동장치의 기능 이상으로 연결되면서 자동차 사고를 유발하는 직접적 원인으로 작용하기 때문에 항상 중요하게 다룬다.

4. 결 론

마찰식 제동장치의 미끄럼 마찰면에는 제작과정에서

형성된 표면 거칠기와, 제동과정에서 생겨난 마멸이나 국부적 변형 등에 의해 제동 마찰면에는 불가피하게 작은 돌기들이 많이 발생하게 된다. 마찰 접촉면의 돌기부에는 자동차의 제동속도가 증가함에 따라 국부적인 온도하중이 축적되고, 열응력과 열변형은 특히 미세한 돌기부에 집중되고 있음을 제시하고 있다.

FEM 해석결과에 의하면, 브레이크 마찰면에 가해지는 제동력이나 속도가 작다할지라도 패드와 디스크가 실제로 접촉하는 돌기부의 면적이 대단히 작을 경우는 마찰열에 의한 온도상승이나 열변형량이 워낙 크게 나타난다. 따라서, 이들 미세 마찰부에는 국부적인 열탄성 마멸이나 용융 마멸 등이 불가피하게 일어날 수밖에 없다는 사실을 잘 보여주고 있다. 미세 접촉면에 집중된 이러한 국부적인 손상은 마찰면의 국부적인 슬립과 마멸을 증대시켜 브레이크의 제동력을 떨어뜨리는 원인으로 작용할 것이라는 예상을 충분히 할 수 있다.

참고 문헌

1. Kim, C.K., Cho, S.H., and Lee, I.K., "Computer Simulations on the Hot Spots in a Automotive Disk Brake," Proceeding of the ITC, Nakasaki, Japan, pp. 1937-1941, 2000.
2. Vick, B. and Furey, M.J., "A Basic Theoretical Study of the Temperature Rise in Sliding Contact with Multiple Contacts," Tribology International, Vol. 34, pp. 823-829, 2001.
3. Furey, M.J., Vick, B., Foo, S.J. and Weick B.L., "A Theoretical and Experimental Study of Surface Temperatures Generated during Fretting," Proceedings of the Japan International Tribology Conference, Nagoya, pp. 809-814, 1990.
4. Azarkhin, A. and Barber, J.B., "Thermoelastic Instability for the Transient Contact Problem of Two Sliding Half-Planes," Trans. of the ASME, J. of Tribology, Vol. 107, pp. 565-572, 1985.
5. Lee, K.J. and Barber, J.R., "An Experimental Investigation of Frictionally-Excited Thermoelastic Instability in Automotive Disk Brakes Under a Drag Brake Application," Trans. of the ASME, J. of Tribology, Vol. 116, pp. 409-414, 1994.
6. MARC Analysis Research Corporation, California, USA, 1998.