

고속용 디스크 브레이크의 열탄성 마멸거동에 관한 유한요소해석

이일권 · 김청균*

홍익대학교 대학원 기계공학과
*홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Finite Element Analysis on the Thermoelastic Wear Behaviors for a High-Speed Disk Brake

Il Kwon Lee and Chung Kyun Kim*

Graduate School, Hongik University
*Tribology Research Center, Hongik University

Abstract – This paper presents the results of thermoelastic wear behaviors in ventilated disk brakes for a high-speed automotive and train using the finite element method. The computed results show that the sinusoidal distortions due to non-uniform distributions of temperature profiles may lead to thermoelastic wears on the rubbing surface. This may decrease the service life of a disk brake and produce micro-cracks, noise and squeals between two rubbing surfaces.

Key words – ventilated disk brake, high speed train, thermoelastic wear, frictional heating, thermal cracks, sinusoidal distortion, tribology.

1. 서 론

미국, 프랑스, 독일과 일본을 중심으로 대용량, 고효율화 및 안전성을 강조한 새로운 개념의 고속 브레이크 시스템이 개발되고 있다. 이러한 기술개발 경향에 적합한 제동 시스템은 더욱 가혹한 상태에서 제동성능을 확보해야 하고, 더욱이 제동거리를 대폭적으로 단축한 초고속의 제동성능을 갖추어야 한다. 디스크/패드식 브레이크가 가혹한 건조마찰 상태에서 운전되어야 할 경우, 브레이크의 마찰 접촉면에서 발생하는 마멸거동 문제는 트라이볼로지 기술을 이용한 해결법이 강조되어야 한다.

디스크 브레이크의 마찰면에서 일어나는 마멸, 열크랙 및 열탄성 문제로 인한 열적저더 현상(thermal judder)이 발생하고[1-3], 이로 인한 브레이크의 진동과 스퀸 문제[4,5]는 브레이크 시스템의 수명단축으로 이어지고, 결국에는 대형 철도차량 사고로 이어진다.

여기서 필연적으로 수반되는 브레이크 디스크와 패

드 사이의 비균일 마찰열에 의한 열탄성 불안정성(thermoelastic instability)에 대한 해석[6]은 브레이크 설계에서 가장 중요한 과제중의 하나이다. 브레이크가 건조마찰을 할 경우, 디스크 마찰면에서 1,500°C 이상의 높은 표면온도가 국부적으로 일어날 수 있기 때문에 마찰열의 집중화에 따른 열탄성 마멸이나 열크랙 문제를 해석한다는 것은 고속용 디스크/패드 설계에서 중요하게 다루어야 할 과제이다.

본 연구에서 디스크와 패드 계면에서 발생된 열탄성 마멸거동(thermoelastic wear behavior) 문제를 비선형 유한요소해석 프로그램 MARC[7]로 해석하여 고속용 디스크 브레이크 설계에서 필요한 기본 데이터를 제공하고자 한다.

2. 유한요소해석

2-1. 열에너지 및 가정

디스크와 패드의 미끄럼 마찰 접촉면 사이에서 발

생된 마찰열이 서로 같다고 가정할 경우, 디스크 내부로의 열유동률 \dot{q} 는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\dot{q} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_P \cdot C_P \cdot k_P}{\rho_R \cdot C_R \cdot k_R} \right)^{1/2}}$$

여기서, C = 비열

k = 열전도 계수

ρ = 밀도

첨자 P = 패드

첨자 R = 디스크 로터

디스크와 패드 사이의 열탄성 마멸거동 문제를 해석하기 위해 필요한 가정을 요약하면 다음과 같다.

- 디스크와 패드 사이에서 발생하는 마찰열은 접촉면에서 균일하게 생성된다.
- 마찰열에서의 유입과 방열은 마찰면에 수직하게 발생된다.
- 마찰면에서의 복사열 문제는 배제한다.
- 패드는 완전 단열재이고, 차량의 운동에너지는 제동시 모두 열에너지로 전환되어 디스크로 균일하게 전달된다.

2.2. 감속도

고속용 브레이크 시스템을 널리 채택하고 있는 고속전철은 제동특성상 감속도를 일정하게 계속해서 유지할 수 없고, 주행 속도에 따라 달라지는 감속도를 가지고 제동한다. 최근 고속전철의 경우 최고 주행속도가 300 km/h 이상으로 대단히 높기 때문에 높은 감속도를 가지고 갑자기 제동을 하면, 고속으로 주행하는 차량은 제동 시스템 뿐만 아니라 승객의 안전성을 보장할 수 없게 된다. 그래서, 제동 작용에 의하여 차량의 속도는 감소하고 감속도는 점진적으로 높여 나가게 된다. 이와 같은 이유로 고속전철의 경우, 브레이크 해석에서는 2개의 구간에서 일정한 감속도를 갖는 제동 패턴을 사용하였다. 즉, 300~215 km/h의 주행속도 구간에서는 감속도를 0.9 m/s²로 고정하여 18 KN의 압력으로 1차 제동을 하고, 215~0 km/h의 주행속도 구간에서는 감속도를 1.2 m/s²로 고정한 후에 20 KN의 압력으로 2차 제동을 하여 차량을 정지시킨다.

2.3. 해석 방법

브레이크 마찰면에서 발생하는 온도분포와 열응력

거동에 관련된 적열점, 마멸·크랙거동 문제는 브레이크가 1~5회의 반복제동을 하였을 경우, 마찰면에서 발생한 온도분포, 열응력 분포, 열변형 거동 등을 비선형 유한요소법으로 해석하였다.

고속으로 주행하는 차량에서 가장 중요한 안전장치는 브레이크 시스템이기 때문에 보다 가혹한 제동 조건을 만들어 충분한 안전성을 확보할 수 있도록 하였다. 즉, 브레이크가 1회 제동으로 차량을 정지할 수 있음에도 불구하고, 본 연구에서는 5회 반복제동을 하는 경우에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 즉, 1회 제동 사이클은 75초 동안 제동을 하고, 이후에 약 100초 동안 방열(냉각)하여 디스크를 정상상태로 만드는 과정을 말하며, 5회 제동이란 이러한 과정을 5회 동안 반복하여 해석하였다는 것을 말한다.

고속용 디스크 브레이크에서 발생하는 마찰열에 대한 유한요소해석을 수행하기 위하여 사용한 디스크 브레이크 재질의 기계적 특성은 Table 1에서, 그리고 해석조건은 Table 2에서 각각 제시하고 있다. 또한, 유

Table 1. Mechanical and material properties of a disk brake

Properties	Values
Dimension, mm	∅ 640×80r
Elastic modulus, E (N/mm ²)	2.15×10 ¹¹
Poisson's ratio, ν	0.3
Mass density, ρ (kg/m ³)	7,850
Thermal expansion coef., α (mm/mm · K)	12×10 ⁻⁶
Thermal conductivity, k (W/m · K)	45
Specific heat, J/kg · K	460
Weight, kg	100
Tension hardness, MPa	1050~1250
Yield strength, MPa	970

Table 2. Simulation data of a disk-pad used in the finite element analysis.

Simulation Conditions	Values
Number of element	848
Number of node	1131
Element mode	Three-dimensional 8-node isoparametric arbitrary hexahedral
Vehicle axle load, kg	17,000
Wheel diameter, mm	920
Number of disk per a axle	3
Atmospheric temperature, °C	50

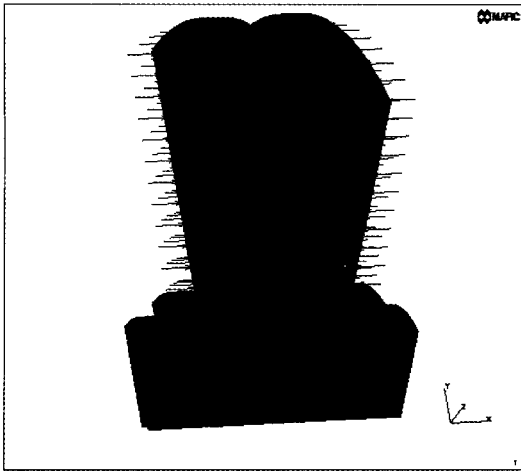


Fig. 1. Mechanical forces and heat fluxes which are applied to the disk rubbing surfaces.

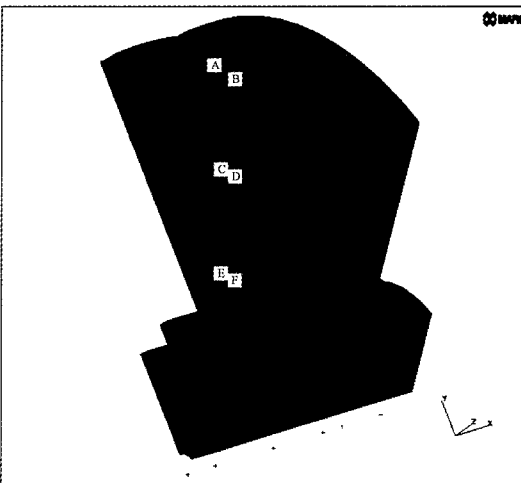


Fig. 2. Observation positions and directions for a FEM computation.

한요소해석에서 필요한 경계조건은 Fig. 1과 같고, 디스크 마찰면에서의 열탄성 거동에 관련된 관찰점 위치는 A-F로 Fig. 2에서 표시하였다.

3. 해석결과 및 토의

제동작용으로 발생된 열에너지는 자동차나 철도차량의 운동 에너지 전환에 의해 발생된 것으로, 열에너지 모두가 디스크-접박이식 마찰 제동에 의해 100% 소산된다고 가정할 경우, 디스크 브레이크 시스템에서 발생한 열량은 19.7 MJ로 대단히 높다.

Fig. 3은 마찰제동을 최고속도 300 km/h에서 1회부터 5회까지 반복제동을 하였을 경우에 디스크의 미끄럼 마찰면에서 발생된 온도분포를 디스크의 대표적인 마찰부위 6곳 A-F에서 발생된 온도 패턴을 보여주고 있다. Fig. 2에서 반경방향으로 위치한 마찰점 A, C, E는 벤트홀(vent hole)이 있는 위치, 즉 대류에 의한 열전달이 원활하게 이루어지는 디스크의 마찰표면이고, 위치 B, D, F는 벤트홀 리브와 디스크가 만나는 벽에 붙어있는 디스크의 표면으로 벤트홀이 있는 지역보다는 전도 열용량이 상대적으로 큰 지역을 말한다.

Fig. 3에서는 1회부터 5회까지 반복제동을 할 경우, 시간이 경과함에 따라서 패드와 접촉하는 디스크의 대표적인 접촉점 6개의 위치에서 마찰열이 축적되고, 또한 소산되는 과정을 표시하고 있다. 이들 결과에 의하면 1회 제동을 하였을 경우, 마찰점 위치 E와 F, 즉 패드의 하단부와 접촉하는 부위로 미끄럼 마찰면에서 최고온도가 발생한다. 또한, 마찰점 위치 C와 D는 패드와 접촉하는 마찰부의 기하학적 중심부보다 약간 아래쪽에서 최고온도가 발생하고 있으며, 제동회수가 증가함에 따라서 회전축과 가까운 E와 F점을 제외하고는 마찰 접촉면에서 온도가 비교적 고르게 분포하면서 전반적으로 상승하는 경향을 나타낸다. 이것은 마찰 제동시 발생한 높은 온도가 벤트홀의 적극적인 대류 냉각작용에 의해 바깥쪽 반경방향으로 열이 잘 소산되기 때문이다.

Fig. 3에서 보여주는 것처럼 디스크의 최고 온도는 1회 제동시 485°C, 2회 제동시 678°C, 3회 제동시 920°C, 4회 제동시 1156°C이며, 5회의 반복제동이 끝난 직후에는 1449°C의 대단히 높은 온도가 발생한다. 실제로 고속전철의 경우, 운행하는 상황에서는 5회의 반복제동을 하는 경우가 없기 때문에 문제가 되지는 않는다. 그러나, 디스크의 마찰면에서 온도가 680°C를 넘어서면 일반적으로 마멸량이 급격하게 증가한다. 가열되었던 디스크의 탄소소재가 급냉에 의하여 마르텐사이트 조직으로 변하면서 조직이 매우 경해지고, 부피는 약 4% 정도 증가하기 때문에 열탄성 마멸이나 열균열이 발생할 우려가 많다[8]. 그래서, 고속용 디스크 설계에서 미끄럼 마찰부의 극부적인 최고온도 상승을 억제시키고, 마찰부의 온도를 전체적으로 균일하게 감소시키는 일이 대단히 중요함을 알 수 있다.

디스크의 미끄럼 마찰면에서 발생된 온도를 해석

적으로 계산하기 위해 사용된 식은 다음과 같다.

$$\Delta T = \frac{\text{Heat Flux[MJ]}}{460[\text{J/kg}\cdot\text{K}]\cdot\text{Weight[kg]}}$$

여러 가지 최고속도에 대하여, 상기 식으로 계산한 값과 유한요소해석으로 계산한 값을 비교한 결과를 Table 3에서 제시하고 있다. 이 결과에서 사용된 디스크의 두께는 80 mm이고, 무게는 100 kg이다. 300 km/h로 주행하던 차량을 제동할 경우, 발생된 온도를 상기 식으로 계산하고, 여기에 대기 온도를 포함하면 476°C가 된다. 또한, 이 경우를 유한요소법으로 해석한 결과는 485°C로 이들 사이의 오차는 단지 2.1%로 대단히 근사적임을 알 수 있다.

Table 3의 결과에 의하면, 상기 식을 이용한 최고 온도와 유한요소법으로 해석한 결과가 최대 5% 이내에 있다는 사실은 열탄성 마멸거동 연구에서 가장 중요한 기본 데이터인 온도분포에 대한 신뢰성이 대단히 높다는 것을 의미한다.

상대접촉 마찰운동을 하고 있는 두 물체에서 한쪽의 온도 변화는 그 위치에서 재료의 열변형을 일으키고, 그 결과로 나타나는 두 물체간의 접촉 압력의 변화는 마찰열을 변화시키므로 결국 그 위치에서 온도가 연속적으로 변하면서 미끄럼 마찰방향으로 약간씩 이동하는 현상이 발생한다. 마찰열의 변화가 물체내의 열확산 속도에 비해 상대적으로 빠르면 이와 같은 온도 변화가 커지게 되므로 열탄성 거동 관점에서 보면, 불안정한 마찰 시스템이 된다. 그러나, 패드 내부로의 열확산 속도가 크면 마찰열의 변화는 점점 사라지게 되므로 안정된 마찰 시스템이 된다. 이와 같은 열탄성 불안정성 문제에서 디스크에서 발생하는 마찰열이 빠르고 고르게 확산시키는 것은 미끄럼 마찰 시스템에서의 열안정성 측면에서 매우 중요하다.

최고 제동속도가 300, 350, 400 km/h에서 1회 마

Table 3. Compared results between two computation methods

Braking speed (km/h)	Generated heat (MJ)	Analytically computed temp. (°C)	FEM computed temp. (°C)	Error (%)
300	19.6	476	485	2.1
350	26.7	610	641	5.1
400	30.9	722	734	1.7

찰제동을 하였을 때의 결과를 Fig. 4에서 제시하고 있다. 디스크 마찰면의 온도분포를 디스크 마찰면의 최외곽에서 휠 축(wheel shaft)쪽으로, 즉 Fig. 2의 A에서 E의 방향으로 계산한 결과이다. Fig. 4에서 가로축의 왼쪽은 마찰면의 바깥쪽이 되고, 오른쪽은 휠 축의 안쪽을 의미한다. 이 그림에서 보여주는 바와 같이 제동을 하였을 때, 반경방향으로의 온도분포는 정현파 형태를 나타내는데, 가장 높은 온도가 발생하는 위치는 Fig. 5에서 표시한 휠 축과 가까운 마찰면의 위치(Fig. 4에서는 약 150 mm 부근)에서 발생한다. 이와 같이 정현파 형태로 발생한 표면온도가 마찰면의 원주방향으로는 균일하게 분포하기 때문에 마찰 제동력이 증가함에 따라서 디스크 표면에서 발생된 온도변동은 패드와의 미끄럼 마찰에 의하

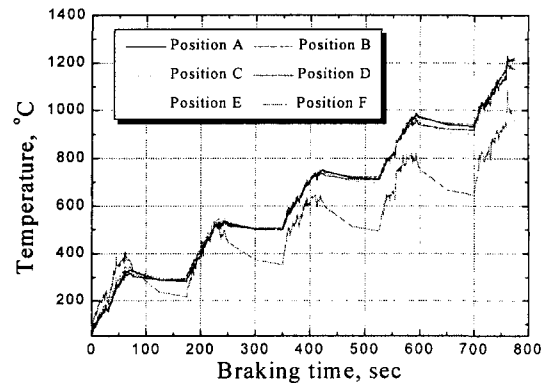


Fig. 3. Maximum temperature profiles on the disk rubbing surfaces at the maximum speed of 300 km/h during 5 braking periods.

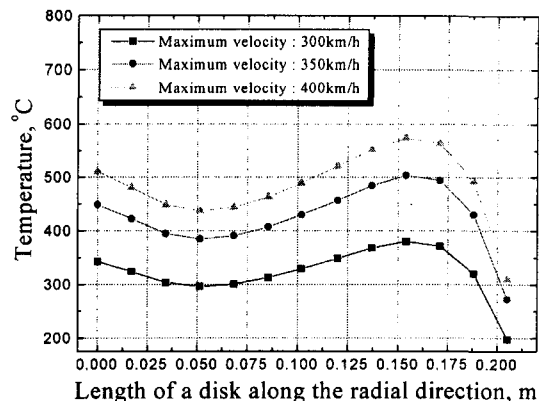


Fig. 4. Temperature profiles on the disk rubbing surfaces along the radial direction (A → E line) of a disk during one braking period.

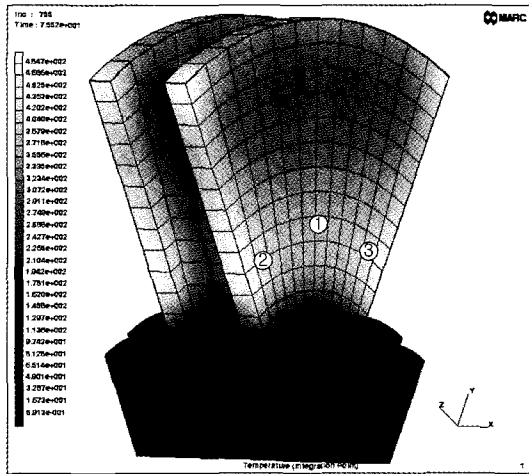


Fig. 5. Temperature distributions on the disk rubbing surfaces at the maximum speed of 300 km/h during one braking period.

여 원주방향으로 마멸을 일으키는 스크래칭(scragging) 현상의 원인이 된다. Fig. 4의 150 mm 부근에서처럼, 디스크의 마찰열에 의해 국부적으로 발생된 돌기부(asperity)는 패드와의 상대 마찰운동에 의하여 연삭 마멸이 발생되기 쉽고, 팽창되었던 돌기부는 마멸에 의하여 탈락되면서 주변에 비해 상대적으로 온도 저하가 일어난다. 이러한 냉각 현상에 의한 소재의 국부적인 수축은 마찰표면에서 흠이 패인 결무늬(textured surfaces)처럼 마멸이 발생하게 된다. 또한, 마찰열에 의한 팽창과 냉각이나 마멸입자의 탈락에 의한 수축 변형거동도 역시 온도의 정현파와 비슷한 형태로 발생하고 있다.

Fig. 5는 최고 제동속도 300 km/h에서 1회 제동을 하였을 때, 디스크 마찰면에서 발생된 온도분포를 보여주는 그림으로 패드와 접촉하는 마찰면의 중간 아래의 좌·우에서 높은 온도가 발생하였고, 중간보다 약간 윗쪽에서는 가장 낮은 온도가 발생하였다. 특히, 마찰점의 위치 ②와 ③에서는 가장 높은 온도 484.7°C가 발생하였다. 이와 같이 국부적으로 발생한 높은 온도는 적열점(hot spot) 현상을 유발하여 그곳에서 마찰면의 열팽창과 국부적인 용융이나 열탄성 마멸을 일으키는 원인이 된다.

Fig. 6은 최고 제동속도 300 km/h에서 1회 제동을 하였을 때, 디스크 마찰면의 축방향 거동량 분포를 나타낸 결과이다. 미끄럼 마찰면에는 여러 가지의 색 띠가 나타난 것으로 보아 상당히 불균일한 열변형이

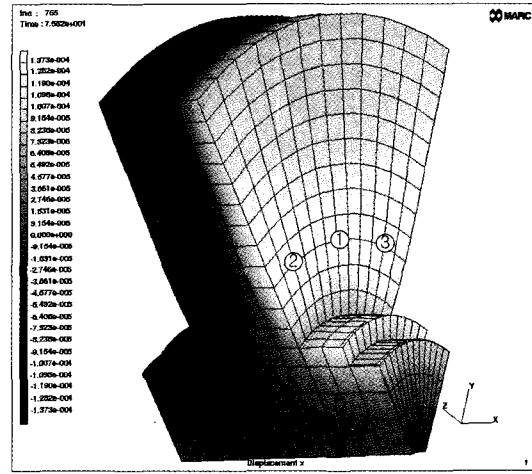


Fig. 6. Axial displacement distributions on the disk rubbing surfaces at the maximum speed of 300 km/h during one braking period.

발생하였음을 알 수 있다. Fig. 5의 온도분포와 비슷한 형태로 높은 온도가 발생한 마찰면의 중간아래 부분과 좌·우에서 열팽창으로 큰 변위량이 발생하고 있는데, 특히 마찰점 위치 ②와 ③에서 가장 큰 열변형 거동량 0.1373 mm가 발생하였다. ②와 ③과 같이 국부적으로 팽창한 곳에서 적열점이 발생할 수 있는 지점이 된다. 이와 같이 디스크의 마찰면이 패드와의 상대 마찰운동에 의하여 불균일한 열변형이 발생하게 되면, ②, ③과 같은 곳에서는 국부적으로 온도를 더 크게 일으키기 때문에 그 위치에서의 용융, 또는 강도 저하로 이어져서 열탄성 마멸로 발전될 수 있고, 열저터와 스킨소음의 원인이 되기도 한다.

Fig. 7은 최고 제동속도 300 km/h에서 1회 제동을 하였을 때, 디스크 마찰면에서 발생된 von Mises 응력 분포이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 다양한 응력 분포가 발생하였음을 알 수 있는데, 휠 축에 가까운 위치 ③점에서 가장 높은 von Mises 응력이 발생하고, 위로 올라갈수록 감소하다가 위치 ③에서 다시 커지고, 이후 다시 감소하여 위치 ①에서 가장 낮게 발생한다. 위치 ①을 포함해서 좌우로 마찰면 상부에 짙은 검은 색을 띠고 있는 부분(흰색 화살표로 표시된 지역)은 벤트홀이 있는 곳으로서 공기에 의한 냉각 때문에 벤트 리브가 있는 곳에 비하여 상대적으로 온도가 낮게 발생한다. 즉, 대류에 의한 열전달 효과가 크게 나타나고 있는 부분으로 응력은 온도에 의해 가장 많은 영향을 받기 때문에 온도가 낮

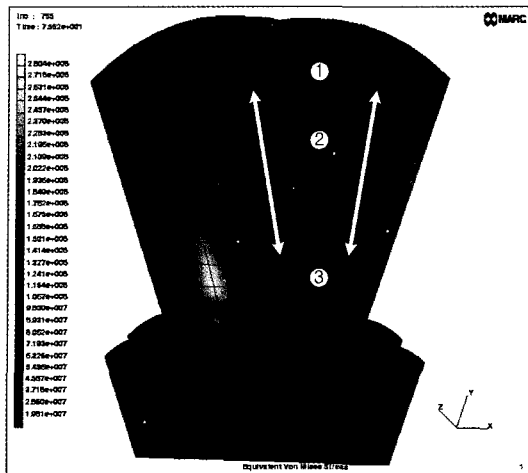


Fig. 7. Von Mises stress distributions on the disk rubbing surfaces at the maximum speed of 300 km/h during one braking period.

은 곳에서 응력이 낮게 나타나는 것은 당연하다. 또한, 그림에서 알 수 있듯이 마찰면에서 발생한 응력은 세로 방향으로 분포한다. 이와 같이 세로 방향으로 발생한 응력이 항복응력을 넘게 되면서 세로 방향으로 열크랙(thermal cracks)이 발생하게 된다. 이것은 실제의 디스크 마찰면에서 발생된 마찰열 크랙과 일치하는 결과이다.

5. 결 론

패드와 접촉하는 디스크의 미끄럼 마찰면에서 발생할 수 있는 열탄성 마멸 거동에 대한 유한요소해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 디스크에서 반경방향으로 거의 불안정성을 결정하는 섭동 온도는 접촉면의 길이와 거의 같은 주기를 가지는 정현파의 형태로 나타난다.

(2) 디스크 마찰면에서 원주방향으로 열탄성 마멸이 발생하는 것은 마찰면에서 정현파 형태의 열변형 거동이 규칙적으로 발생하기 때문이다.

(3) 디스크의 온도가 680°C가 넘어서면 마멸량이 급격히 증가하는데, 이것은 마찰열에 의하여 디스크 조직이 매우 연하게 되기 때문이다. 또한, 가열된 디스크의 카본소재가 급냉에 의하여 마르텐사이트 조직으로 변하면서 조직은 매우 경해지고, 부피는 약 4% 정도 증가하기 때문에 열균열이 발생할 우려가 많다. 따라서, 디스크의 온도가 급격히 증가하지 않도록 신속히 균일하게 방열하는 것이 대단히 중요하다.

(4) 열팽창 계수가 클수록 접촉면에서의 마찰열의 유입에 따른 접촉 압력의 증가가 커지므로 브레이크는 불안정하다. 그러나, 열전달 계수가 크면 마찰열을 빨리 확산시키므로 접촉 압력의 증가를 막을 수 있어서 디스크 마찰면 시스템에서의 트라이볼로지적 변형거동은 안정된다.

참 고 문 헌

1. Rainbolt, J. D., "Effects of Disk Material Selection on Disk Brake Rotor Configuration," SAE 750733, pp. 1973-1814, 1975.
2. Anderson, A. E. and Knapp, R. A., "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., "Development of High Thermal Conductivity Cast Iron for Brake Disk Rotors," SAE 900002, pp. 22-28, 1990.
4. Crolla, D. A. and Lang, A. M., "Brake Noise and Vibration-The State of the Art," IMechE, 1991.
5. Rhee, S. K., Jacko, M. G., and Tsang, P. H. S., "The Role of the Friction Film in Friction, Wear and Noise of Automotive Brakes," Wear, Vol. 146, 1991.
6. Kwangjin Lee and Baber J. R., "An Experimental Investigation of Frictionally-excited Thermoelastic Instability in Automotive disk Brakes Under a Drag Brake Application," Journal of Tribology, Vol. 116, pp. 409-414, 1994.
7. MARC Program Capabilities, MARC Analysis Research Corp., Palo Alto, CA, Sept. 1996.
8. Kalpakjian, S., "Manufacturing Processes for Engineering Materials," Addison-Wesley Pub., 1991.