

고속용 브레이크에서 디스크 패드의 열응력 특성에 관한 연구

김청균 · 조승현

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Thermal Stress Characteristics of a Disk Pad in High-Speed Brakes

Chung Kyun Kim and Seoung Hyun Cho

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract—The thermal characteristics of a disk such as temperature distribution, thermal behaviors and thermal stress during a braking operation has been analyzed for a high-speed brake using the finite element method. The maximum stress for a pad loaded against a disk was occurred at the trailing and leading edges of the disk pad at the underlayer-backplate interface. The FEM results indicate that the thermal characteristics of the spot type pad shows good performance compared with those of the flat type pad. Thus, the spot type pad in brake system may be recommended for the high-speed train system.

Key words—flat pad, spot pad, disk brake, finite element method, thermal behaviour.

1. 서 론

마찰 접촉력을 이용하여 철도차량을 정지시키는 디스크 패드(Disk pad)는 디스크 로터와 미끄럼 마찰 운동을 하면서 철도차량의 운동 에너지를 열 에너지로 변환·소산시켜 줌으로써 운동 에너지를 감속시키거나 속도를 조절해주는 역할을 수행하는 내열, 내마멸, 내식성을 갖춘 특수한 마찰소재이다. 디스크와 마찰재 패드 사이에서 발생한 마찰열의 대부분은 디스크와 마찰재 패드로 전도되며, 일부는 마찰운동에 따른 진동과 소음 에너지의 형태로 발산된다. 마찰재 패드로 전도된 마찰열의 일부는 대기중으로 소산되고, 나머지는 소재의 내부 에너지 증가와 변형 에너지 형태로 전환되며, 패드의 마찰표면으로부터 마멸입자가 떨어져 나가면서 열 에너지를 함께 가져간다.

패드식 마찰재로는 소결합금, 탄소재, 주철, 유기질 소재 등이 주로 사용되고 있다. 자동차, 트럭, 일반 철도차량의 마찰재로 널리 사용되고 있는 유기질 마찰재는 첨가제, 마찰 조절제, 결합물질 등의 여러 가지

성분을 혼합하여 제작한 복합재료로 마찰특성이 우수한 석면계통의 마찰재가 사라지면서 유기질 복합소재 마찰재에 대한 연구를 많이 진행하고 있다[1]. 그러나 유기질 마찰재나 탄소-탄소 마찰재를 고속전철용으로 사용하기에는 약간의 문제점을 갖고 있다. 즉, 유기질 마찰재에서 결합제로 사용하는 열경화 수지는 크리이프와 내열성이 우수하고 압축응력이 대단히 높으며, 표면 응착력이 좋은 장점을 갖고는 있으나 고속용 브레이크의 마찰면 온도가 유기질 마찰재의 결합제로 사용하는 열경화 수지의 분해온도 이상으로 발열하기 때문에 마찰재가 결합력을 잃게되어 고속전철의 마찰재로 사용하기에는 문제가 있다. 또한 군용 항공기나 민간의 대형 항공기에서 마찰재로 널리 사용하는 탄소-탄소 마찰재의 마찰 제동특성은 대단히 우수하나 고가라는 문제점을 갖고 있다.

마찰재 패드는 내열성, 내마멸성, 내하중성, 내부식성 등을 갖추면서 내구성과 신뢰성을 확보해야 브레이크 패드로써의 기능을 충분히 발휘할 수 있다. 패드는 디스크와의 실제 접촉면적이 작기는 하지만 서로

상반된 성능을 동시에 발휘할 수 있어야 하므로 최적의 소재를 선정하여 설계해야 하나, 실제의 패드개발에서는 주로 마찰조건과 마찰에 관련된 파라메타에 주안점을 두고 설계·제작하는 것이 일반적이다[2].

본 연구에서는 350 km/h의 초고속 전철에서 사용이 가능한 두가지 마찰재 패드(평면식과 접박이식 패드)에 대한 마찰면에서의 온도분포, 열응력 및 열변형 거동특성을 유한요소법으로 해석하고, 이들의 마찰 거동특성에 관련된 접촉모델을 제시하고자 한다.

2. 고속전철용 패드

정상 주행중이거나 또는 비상시를 불문하고 고속전철에서 사용하는 제동장치는 일정한 제동거리 이내에서 안전하게 철도차량을 정지시켜야 한다. 300 km/h로 주행중인 고속전철이 비상제동을 해야하는 경우는 감속도를 약 1.04 m/s^2 , 제동시간은 80초, 그리고 제동거리는 3,500 m 이내에서 정지시켜야 하기 때문에 마찰재 패드의 마찰계수를 약 0.35 ± 0.05 에서 항상 일정하게 유지해야 디스크 브레이크의 제동 성능이 확보될 수 있다.

자동차용 디스크 패드의 마찰속도가 22 m/s인 경우에 패드가 커버할 수 있는 온도범위는 $-40 \sim 800^\circ\text{C}$ 이고, 계면에서의 접촉면압은 10 MPa 정도로 대단히 가혹하게 발생한다[3]. 또한 300 km/h로 주행하는 TGV 고속전철에서 사용하는 마찰재가 흡수해야 할 에너지는 400 kJ/kg , 동력은 5 KW/kg 이고, 마찰면에서 발생되는 온도는 700°C 이상으로 마찰재 패드는 대단히 높은 온도상태에서도 안정성을 확보해야 한다[2]. 마찰재가 이러한 요구조건을 충족하기 위해서는 균일한 저마찰계수, 내마멸성, 내부식성, 충분한 고온 강도, 내열 충격성, 마찰열을 흡수하기에 충분한 비열과 높은 열전도를 유지할 수 있어야 고속용 마찰재 패드로써 최소한의 제동 성능을 확보하게 된다.

3. 해석적 연구

3-1. 가정

디스크-패드식 브레이크 시스템이 1회 제동을 하였을 경우 마찰면에서의 온도분포, 열응력 및 열변형 거동특성을 유한요소법으로 해석하였다. 디스크와 패드 사이의 상대 접촉면에서 발생하는 마찰거동 문제를

를 해석하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 가정을 하였다.

- 패드와 디스크 마찰 접촉면에서의 열적특성은 균일하다.
- 마찰열의 유입이나 방열은 마찰 접촉면에 수직하게 발생된다.
- 대류 열전달 계수가 항상 일정하다.
- 디스크 로터 주변의 공기에 의한 냉각은 없다고 가정한다.
- 마찰면에서의 복사열 문제는 배제한다.

패드의 받침면(Backplate)은 완전한 단열재이고, 전동차의 모든 운동에너지는 제동시에 모두 열 에너지로 전환되며, 디스크와 패드 사이에는 항상 일정 비율로 전달된다.

브레이크 마찰열에 대한 유한요소해석을 위하여 사용한 마찰재 패드의 기계적 특성과 작동조건을 Table 1과 Table 2에서 각각 주어진다.

3-2. 감속도와 제동거리

고속전철에서 350 km/h의 최고속도로 달리던 차량을 정지시키기 위하여 브레이크가 제동작용에 들어간 다 할지라도 일시에 정지할 수는 없고 일정한 감속도(Deceleration)를 유지하면서 정지하게 된다. 고속전철에서는 기존의 철도차량과는 달리 일정한 감속도를 계속해서 유지할 수 없고, Fig. 1에서 보여주는 것처럼

Table 1. Mechanical and material properties of a pad [4]

Specifications	Pad Type	
	Flat pad	Spot pad
Elastic modulus, N/mm ²	1.05×10^9	1.05×10^9
Poisson's ratio	0.3	0.3
Mass density, kg/m ³	2,500	2,500
Coef. of thermal expansion, mm/mm·K	7.5×10^{-6}	7.5×10^{-6}
Thermal conductivity, W/m·K	4.6	4.6
Specific heat, J/kg·K	800	800

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

Simulation Conditions	Values
Area of a pad, m ²	0.02*
Thickness of a pad, mm	24*
Initial velocity of braking, km/h	350
Convection coef., W/m ² ·K	60.74
Atmospheric temperature, °C	35

*UIC code 541-3

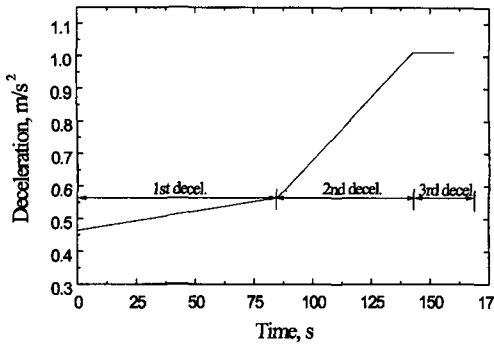


Fig. 1. Deceleration curve of a high-speed train with a speed of 350 km/h.

럼 제1차 감속 구간과 제2차 감속 구간 그리고 3차 감속 구간으로 나누어 제동한다.

3-3. 유한요소망 데이터

디스크-마찰재 패드에서 마찰열에 관련된 비선형 열적거동에 대한 해석은 많은 노력과 시간, 그리고 컴퓨터 용량을 크게 필요하므로 2차원 접촉 열응력과 거동문제를 해석하였다. 본 연구에서는 기존의 고속 전철용 패드에 대한 열적거동 문제를 비선형 유한요소 해석 프로그램 MARC[5]를 사용하여 마찰재 패드의 열적특성을 파악하고자 한다.

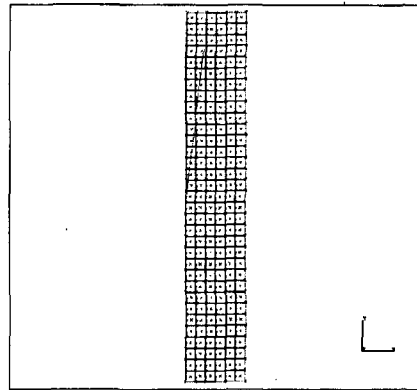
Fig. 2의 두가지 패드 모델(평면식 패드와 점박이식 패드)에 대한 유한요소해석을 수행하기 위하여 사용한 유한요소 데이터는 4-node isoparametric quadrilateral ring과 4-node heat transfer axisymmetric ring을 동시에 사용하였다. 평면식 마찰재 패드의 유한요소와 절점의 개수는 198과 238이고, 점박이식 패드의 유한요소와 절점의 개수는 400과 505이다.

4. 해석결과 및 고찰

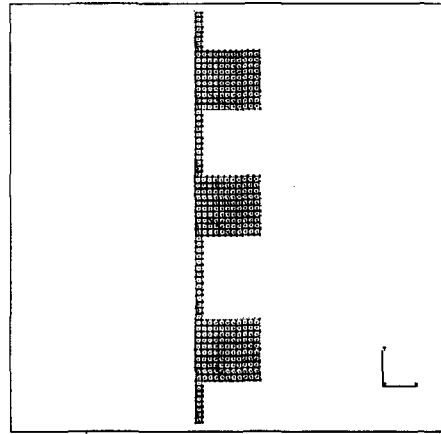
4-1. 평면식 패드(Flat pad)

Fig. 3은 고속전철의 최고속도가 350 km/h이고, 디스크와 미끄럼 접촉하는 평면식 패드 마찰면에서 발생하는 마찰열의 온도분포와 열변형 거동량을 각각 보여주고 있다. 패드와 디스크의 마찰 계면에서 발생된 마찰열 중에서 80%는 디스크로 전달되고, 나머지 20%만 마찰재 패드로 전달된다고 가정하였다.

Fig. 3(a)에서 보여준 평면식 패드 마찰면에서의 최고온도는 850°C로 패드의 아래와 윗면에서 대칭적으



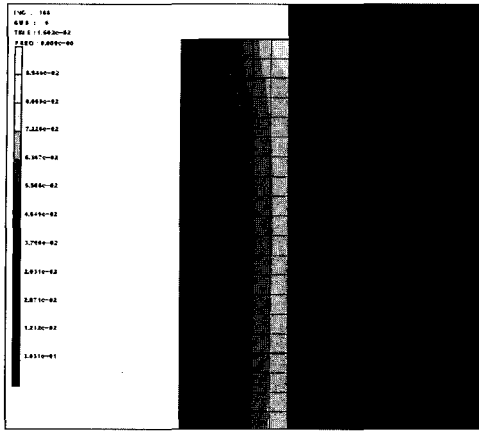
(a) Flat pad



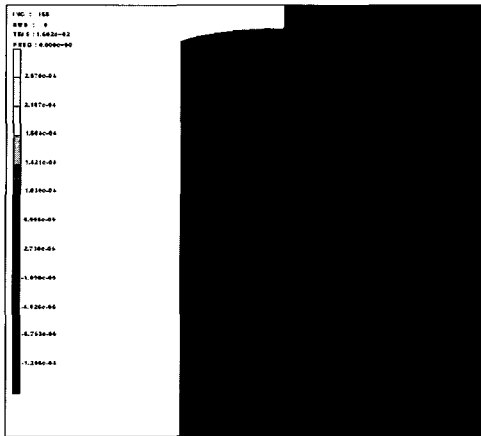
(b) Spot pad

Fig. 2. Finite element meshes of a pad for a high-speed train.

로 발생되며, 마찰접촉을 직접하지 않는 받침대에서 380°C로 많은 차이를 나타내기 때문에 열적 뒤틀림 현상이 발생할 우려가 있다. 이 결과를 열변형 거동량으로 표시한 Fig. 3(b)에 의하면 최대 변형은 디스크와 직접 접촉하는 마찰표면에서 0.083 mm가 x방향으로 발생하고, 미끄럼 마찰면에서 팽창된 소재는 패드의 y방향으로도 열변형을 발생시키고 있음을 알 수 있다. 마찰재 패드는 디스크 소재에 비하여 열적특성이 우수한 소재를 사용하기 때문에 가혹한 마찰열이 전달되어도 열변형량이 상대적으로 작게 발생한다. 패드는 디스크에 비하여 열전도율이 나쁘기 때문에 마찰표면에서 열축적이 크게 발생하므로 특히 내열성, 열전도성, 내마멸성 등이 우수한 소재를 사용해야 브레이크 제동시 균질한 마찰특성을 보장할 수 있다.



(a) Temperature distribution

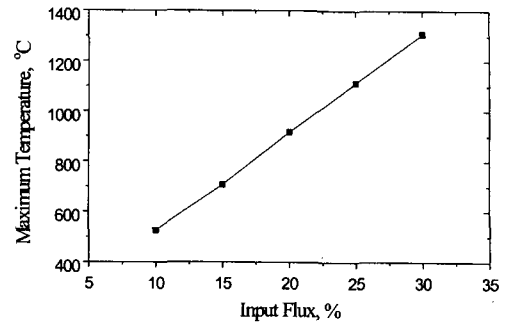


(b) Thermal deformation in axial direction

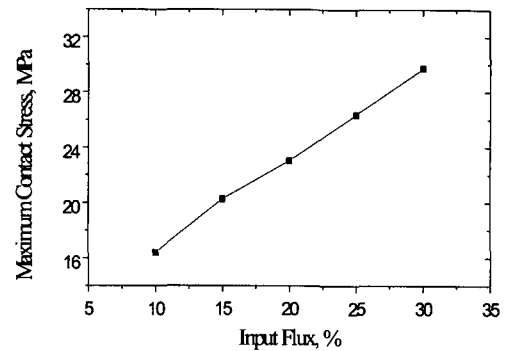
Fig. 3. Thermal characteristics of a flat type pad with a maximum speed of 350 km/h.

마찰재 패드가 디스크와 미끄럼 마찰운동을 하면서 발생하는 마찰표면에서의 최고온도와 최대 열변형량을 패드로 전달되는 전열량의 함수로 표시하면 Fig. 4와 같이 제시할 수 있다. 패드로 전달되는 전열량 (Transferred heat flux)이 10%에서 30%로 증가함에 따라서 마찰면에서 발생하는 최고온도와 열응력이 크게 증가하는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 5는 축대칭의 평면식 패드 모델에서 발생한 열응력 분포도를 보여준 결과로 패드와 받침대를 접합 (Bonding)한 H 위치에서 가장 높은 23 MPa의 접촉 열응력이 걸린다. 이것은 패드와 받침대가 접합하는 최외측 지역에서 접합을 완벽하게 해야 열응력에 의한 파손이 발생하지 않을 것이라는 사실이다. 또한 열변형이



(a) Maximum temperature



(b) Maximum contact stress

Fig. 4. Thermal characteristics of a flat type pad as a function of heat fluxes transferred to a pad.

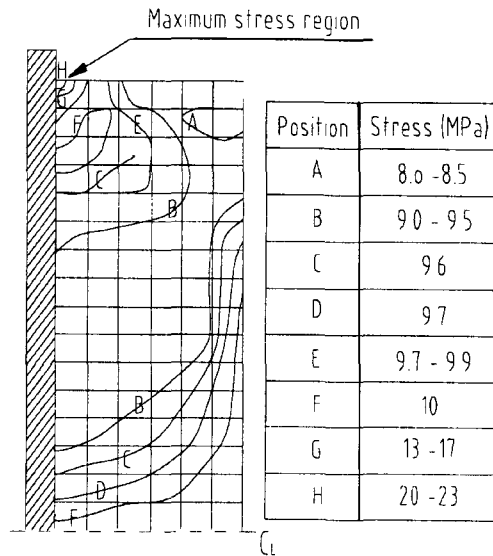


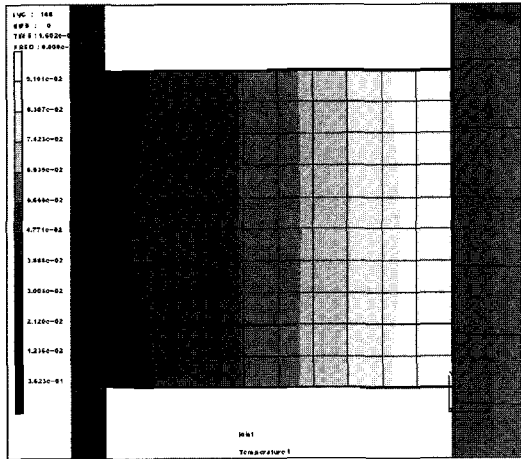
Fig. 5. Contact stress distribution of a flat type pad at end of heating period.

크게 발생한 패드의 상부, 즉 디스크와 상대 마찰운동을 하는 A 부근에서 가장 낮은 열응력이 발생하였다.

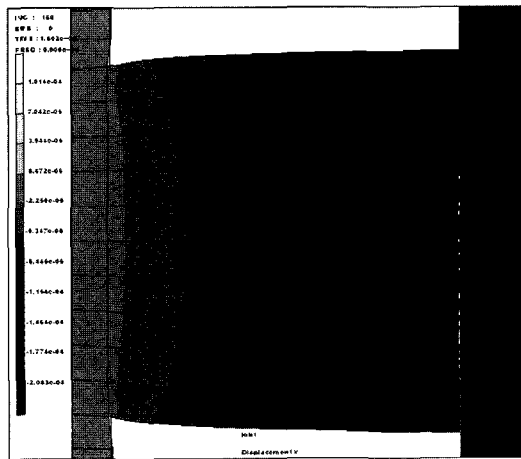
4-2. 점박이식 패드(Spot pad)

상기의 평면식 패드를 3개의 점박이(Spot)를 설치한 마찰재 패드로 교체하여 열적 거동특성을 유한요소법으로 해석하였다. 점박이와 점박이 사이에는 일정한 간격을 유지하도록 설계하였고, 점박이 사이의 공간에서 대류 열전달이 원활하게 발생될 수 있도록 점박이 3개를 적절하게 배열하면 냉각효과를 극대화시킬 수 있다. 미끄럼 마찰에 의하여 마찰재로부터 떨어져 나간 마멸입자에 의한 연삭마멸을 크게 줄일 수 있다는 장점을 갖고 있으나 점박이식 패드에서의 국부적인 마찰 열응력 문제를 해결해야 한다.

Fig. 6는 최고속도가 350 km/h이고, 디스크와 점박



(a) Temperature distribution

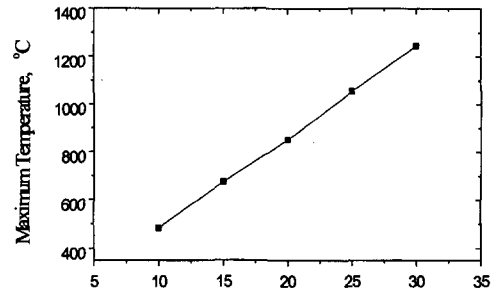


(b) Thermal deformation in axial direction

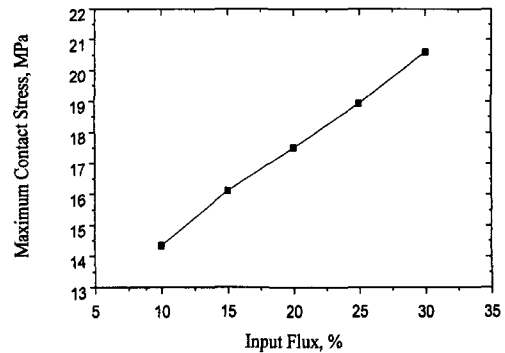
Fig. 6. Thermal characteristics of a spot pad with a maximum speed of 350 km/h.

이식 패드의 마찰면에서 발생된 마찰열중에서 패드로 전달된 마찰열에 의한 온도분포와 열변형 거동량을 각각 보여주고 있다. 패드와 디스크의 계면에서 발생된 마찰열의 80%는 디스크로 전달되고, 나머지 20%만 마찰재 패드로 전달된다고 가정하였다. Fig. 6(a)에서 보여준 점박이식 패드 마찰면에서의 최고온도는 910°C로 점박이의 아래와 윗면에서 대칭적으로 발생되고, 마찰을 직접하지 않는 받침대에서는 430°C로 열적 뒤틀림 현상이 발생된다. 이 결과를 열변형 거동량으로 표시한 Fig. 6(b)에 의하면 최대 열변형량은 디스크와 직접 접촉하는 마찰표면에서 0.21 mm가 x방향으로 발생하고, 패드 마찰면에서 팽창된 소재는 패드의 y방향으로도 열변형을 발생되고 있음을 알 수 있다.

점박이식 마찰재 패드가 디스크와 미끄럼 마찰운동을 하면서 발생하는 마찰 표면에서의 최고온도와 최대 열변형량을 패드로 전달되는 전열량의 함수로 표시하면 Fig. 7과 같이 보여준다. 패드로 전달되는 전열량에 따라서 마찰면에서 발생하는 최고온도와 최대



(a) Maximum temperature



(b) Maximum contact stress

Fig. 7. Thermal characteristics of a spot type pad as a function of heat fluxes transferred to a pad.

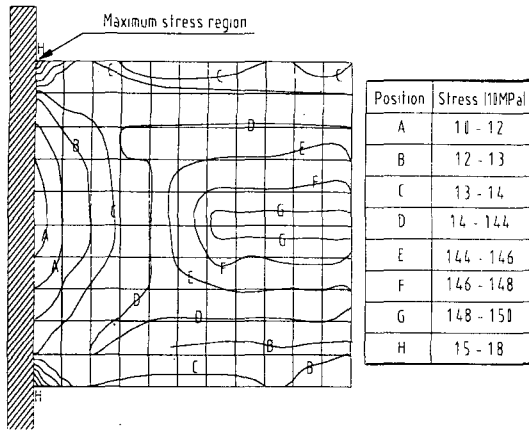


Fig. 8. Contact stress distribution of a spot type pad at the end of heating period.

열변형량이 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 7의 점박이식 패드에 관련된 마찰열이나 변형거동 문제는 Fig. 4에서 제시한 평면식 패드의 결과에 비하여 약간 증가는 하였으나 대류 열전달의 영향을 배제한 결과라는 사실을 고려하면 대단히 양호한 데이터를 보여주고 있다.

Fig. 8은 축대칭의 점박이식 패드 모델에서 발생한 열응력 분포도를 보여준 결과로 점박이식 패드와 반침대를 접합한 H 위치에서 가장 높은 18 MPa의 접촉 열응력이 걸린다. 또한 점박이와 반침대와 접합하는 계면의 중앙 부근인 A 지역에서 가장 낮은 10 MPa의 열응력이 발생하고, 패드와 디스크가 마찰접촉 운동을 하는 점박이의 상하부에서는 마찰열 변형이 크게 발생하기 때문에 B와 C 부근에서도 열응력이 비교적 작게 나타나고 있다.

4-3. 고속용 패드의 열특성 고찰

350 km/h의 최고속도로 운행중인 고속전철을 정지시키면 마찰면에서 발생하는 마찰면의 온도는 패드의 형상에 따라서 크게 달라지고 있음을 알 수 있다. 즉, 점박이식 패드의 마찰면 온도와 열변형 거동량은 평면식 패드에 비하여 10%와 15% 정도가 각각 증가되고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 동일한 열전달량에 대하여 점박이식 마찰재는 평면식 마찰재에 비하여 열용량이 작기 때문이다. 그러나 접촉응력 측면에서 보면 점박이식 마찰재가 평면식 패드에 비하여 20% 정도 낮게 나타나며, 마찰재 패드내에 균일하게 분포하고 있음을 알 수 있다.

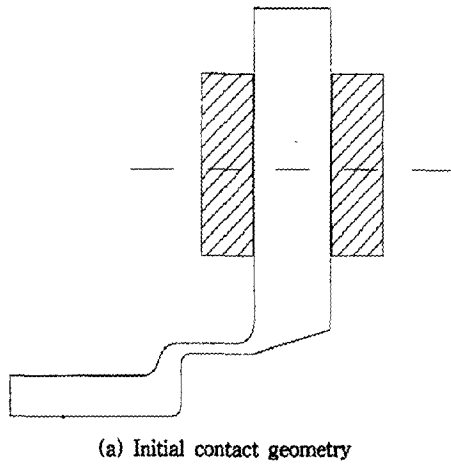
본 연구에서는 미끄럼 마찰에 의하여 발생된 열 에너지가 단순히 전도에 의하여 열이 소산된다고 가정하였기 때문에 대류 열전달에 의한 냉각효과가 큰 점박이식 마찰재의 열특성이 나쁜 계산결과를 얻을 수 밖에 없다. 그러나 점박이식 마찰재는 평면식 마찰재에 비하여 접촉 특성이 대류 열전달을 극대화시킬 수 있도록 설계되어 균일한 대류 열소산과 마멸입자의 신속한 탈락, 균일한 마찰계수 유지와 스틱 슬립(Stick-Slip) 현상의 발생을 최소화 시킬 수 있다는 특성이 있으므로 이러한 요인을 해석에 반영해야 점박이식 패드의 장점을 극대화시킬 수 있다. 본 연구에서는 1차적으로 이러한 대류 열전달에 의한 열소산 문제를 고려하지 않고 해석하였기 때문에 평면식 패드가 열적 안정성이 우수하다는 연구결과를 얻게 되었으나 차후에 진행될 연구에서는 마찰재 패드에 대류 열전달을 고려하여 점박이식 마찰재의 특성을 규명할 예정이다.

5. 마찰재 패드의 열거동 모델 개발

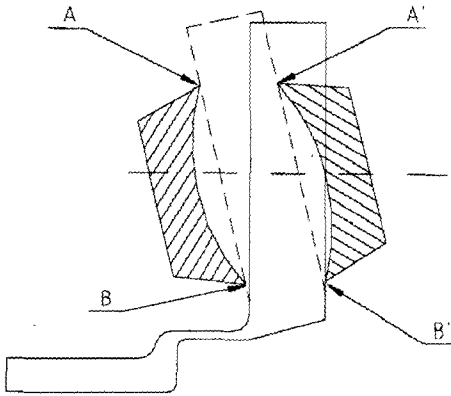
5-1. 평면식 패드

제동력에 의하여 디스크와 패드가 상호 접촉 마찰 운동을 하게 되면 디스크 브레이크는 제동시 발생된 마찰열에 의하여 Fig. 9과 같이 왼쪽으로 열변위가 발생하게 된다. 이 때에 접촉하고 있는 평면식 마찰재 패드는 전달된 마찰열에 의하여 Fig. 9(b)에서 보여주는 것처럼 변형된 패드의 양쪽 끝단부 A와 B지점에 집중되고, 마찰재의 접촉면에 국부적으로 열응력을 축적하게 된다. 그 결과 마찰재 패드는 열적 뒤틀림 현상이 과도하게 진행되어 Fig. 9(b)의 접촉모델처럼 패드와 디스크는 극단적인 선접촉을 하게 된다. 또한 디스크의 축방향 열변형에 따른 마찰선 위치는 패드와 디스크가 초기에 평면으로 접촉한 Fig. 9(a)의 형태 보다는 오목 렌즈처럼 패드의 상단과 하단이 불룩하게 팽창되면서 변형된 패드의 A와 B지역에서 가장 큰 열변형이 발생하고, 궁극적으로 이 곳에서는 마찰 열응력에 의한 적열점(Hot spot)의 발생과 마멸이 진행될 것으로 예상된다.

고속전철용 평면식 패드에서는 디스크와 마찰재의 열변형에 의하여 마찰선이 A와 B지점에서 집중적으로 발생되므로 균일한 마찰상태의 유지나 열응력 크랙의 발생과 스틱 슬립에 의한 마찰특성의 불안정성과



(a) Initial contact geometry



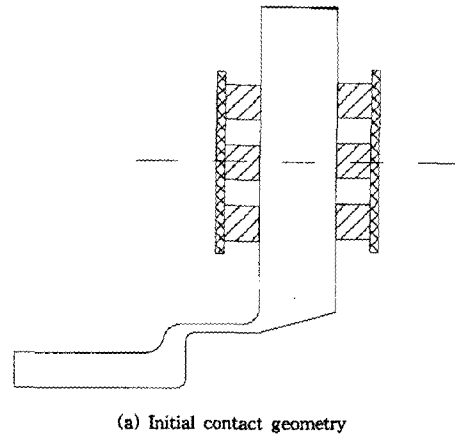
(b) Distorted contact geometry

Fig. 9. Contact geometry of the flat type pad.

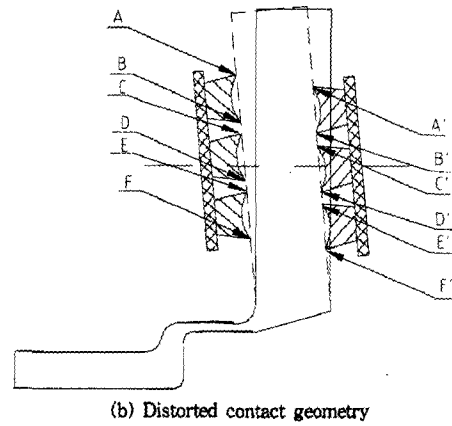
같은 문제점이 많이 발생한다. 그래서 평면식 마찰재에서는 특히 마찰면에서 발생하는 마찰열을 균일하게 소산시키기 위하여 패드의 마찰면에 냉각홈(Cooling groove)을 제작하여 이러한 문제점을 해결하는 것이 바람직하다.

5-2. 점박이식 패드

점박이식 패드도 평면식 패드와 유사하게 디스크 브레이크는 마찰열에 의하여 왼쪽으로 열변위가 발생하게 된다. 이 때에 점박이식 마찰재 패드는 전달된 마찰열(10~30%)에 의하여 Fig. 10에서 보여주는 것처럼 제동시의 마찰열은 각기의 점박이식 마찰재의 일



(a) Initial contact geometry



(b) Distorted contact geometry

Fig. 10. Contact geometry of the spot type pad.

부에서 국부적으로 집중되고, 열응력이 축적하게 된다. 따라서 마찰재 패드의 열적 뒤틀림 현상이 과도하게 진행되면 Fig. 10(b)의 모델처럼 각각의 점박이에서는 디스크 마찰면과 선접촉이 진행된다. 여기서 디스크의 축방향 열변형에 따른 마찰선 위치는 패드와 디스크가 Fig. 10(a)와 같이 평면으로 접촉하던 초기 위치보다는 약간 아래쪽으로 이동하여 점박이의 양단 A와 B지점에서 가장 큰 열변형이 발생하고, E와 F지점에서는 비교적 작게 뒤틀린다. 접촉선 A와 B가 E나 F보다는 적열점의 발생과 열탄성 변형에 의한 마멸이 많이 진행될 것으로 예상된다.

점박이식 패드에서는 디스크의 열변형에 의한 마찰 접촉부위는 각각의 점박이에 대하여 상단부와 하단부 2곳에 집중적으로 발생하므로 마찰면에서 균일한 마찰상태의 유지나 열응력 크랙의 발생과 스킵 슬립에

의한 마찰특성의 불안정성과 같은 문제점이 많다. 그러나 점박이식 마찰재 패드는 평면식 마찰재에 비하여 다수의 지점에서 마찰력을 유지할 수 있으므로 평면식보다는 비교적 균일한 마찰계수의 유지, 스틱 슬립 발생의 완화, 균일하면서도 낮은 접착응력 유지, 마멸입자의 용이한 탈락 등과 같은 장점을 고려한다면 트라이볼로지 마찰특성 측면에서 고속용 점박이식 마찰재 모델이 바람직한 설계라 생각된다.

6. 결 론

마찰재 패드와 디스크 사이의 미끄럼 마찰에 의하여 발생된 마찰열을 수치적으로 계산하여 디스크 마찰 접촉 운동면에서의 온도 분포, 열응력 및 열변형 거동문제를 해석한 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. 평면식 패드에서는 디스크와 패드의 열변형에 의하여 마찰선이 양쪽 끝단부에 집중적으로 발생되므로 균일한 마찰상태의 유지가 어렵고, 열응력 크랙과 스틱 슬립에 의한 마찰특성의 불안정성 등의 문제점이 크다. 그래서 평면식 패드의 마찰면에서 발생하는 마찰열을 균일하게 소산시키고, 열크랙이나 스틱 슬립을 완화시키기 위하여 냉각음을 제작하는 것이 바람직하다.

2. 다수의 점박이를 갖는 패드와 마찰접촉을 하는 디스크는 마찰재의 열변형에 의하여 마찰선이 여러곳에서 평면식 패드와 유사하게 집중적으로 발생한다. 그러나 점박이식 마찰재 패드는 평면식 마찰재에 비하여 다수의 지점에서 마찰력을 유지할 수 있으므로 비교적 균일한 마찰계수의 유지, 스틱 슬립 발생의 완화, 마멸입자의 용이한 탈락 등과 같은 장점을 고려한

다면 트라이볼로지 마찰특성 측면에서 고속전철용 마찰재 패드는 점박이식 모델로 설계하는 것이 바람직하다.

3. 점박이식 패드는 평면식 마찰재에 비하여 최대 열응력이 20% 정도 낮게, 그리고 균일하게 패드내에 분포함으로써 접촉거동 측면에서 보면 대단히 우수한 열응력 특성을 갖는 고속용 마찰재이다.

4. 고속전철용 마찰재는 점박이식 패드로 하되 점박이 수를 늘리는 것이 좋고, 디스크의 열변형에 의한 뒤틀림 현상을 고려하여 점박이는 패드의 아래쪽에 많이 설치하는 것이 마찰열 변형에 의한 열크랙이나 내마멸, 적열점 현상을 완화시킬 수 있다. 궁극적으로 패드는 디스크 마찰면의 열변형 특성을 고려하여 패드 마찰면을 경사지게 설계한다면 브레이크의 제동성능은 크게 향상될 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

1. 김기열, 이범주, 정동윤, "고속전철용 제동 마찰재 기술 현황," 대우기술, pp.33-37, 1996.
2. Hattwig, P., "Pad Wear Indication for Disc Brakes," SAE, pp.2375-2390, 1975.
3. Kao, T-K, Richmond, J. W., Moore, M. W., "Computational Analysis of Disc Pad Performance," IMechE, C444/027/93, pp.1-12, 1993.
4. Dufrenoy, P. and Weichert, D., "Prediction of Railway Disk Brake Temperatures Taking the Bearing Surface Variations into Account," Proceedings IMechE, Vol. 209, pp.67-76, 1995.
5. MARC User's Manual, Ver. K6.1, MARC Analysis Research Co., 1996.