

고속전철용 디스크-패드 브레이크의 동적거동 특성에 관한 유한요소해석

김청균 · 조승현

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Finite Element Analysis on the Dynamic Behaviors of a Disk-Pad Brake in High-Speed Trains

Chung Kyun Kim and Seung Hyun Cho

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract – Using a coupled thermal-mechanical analysis, the dynamic distortion of the ventilated disk brakes has been presented for a high-speed train. The offset ratio between the maximum and minimum values of the thermal distortions has been analyzed as a function of a braking number. The computed FEM results show that the offset ratios in radial direction are much greater than those of circumferentially distorted components. This means that the axial distortions in radial direction may dominantly produce thermally caused wears and cracks at the rubbing surfaces.

Key words – Ventilated disk brake, high speed train, dynamic behavior, thermal judder, frictional heating, sinusoidal distortion, tribology.

1. 서 론

대용량의 고속수송을 위한 기술개발은 하늘에서는 점보 제트기로, 바다에서는 초대형 컨테이너로, 지상에서는 고속전철로 각각 경쟁하고 있다. 지상에서는 자동차 산업의 발달로 한동안 철도산업이 위축되어 왔으나, 차량의 고속화와 안전성, 대량수송의 장점을 살린 고속전철이 등장하면서 철도산업이 다시 각광을 받기 시작하였다.

고속전철에서 사용하는 제동 시스템은 운동 에너지를 마찰열 에너지로 전환·흡수하는 디스크-마찰재의 마찰제동 방식과 저항이나 와전류와 같이 비접촉식으로 제동하는 두가지로 대별된다. 비접촉식 제동은 전기로 작동되기 때문에 전력공급이 끊기는 비상시에는 오직 마찰제동 방식으로만 차량을 정지시켜야 하는 문제점이 있으므로 접촉제동 방식과 보완적으로 사용한다.

디스크의 미끄럼 마찰면에서 발생된 열변형 거동에 대한 유한요소해석은 초고속으로 주행하는 가혹한 조

건에서 디스크 표면의 마멸과 크랙, 진동과 소음에 연결되는 열저더(thermal judder) 문제[1-4]를 이해하는데 중요한 해석결과를 제공한다.

본 연구에서는 디스크가 휠 축(wheel shaft)에 축대칭으로 설치되었기 때문에 축방향으로 좌·우 대칭적 변형을 일으키고, 반경방향으로는 비대칭 변형을 일으키고 있다는 사실을 알 수 있다. 디스크의 제동 성능에 직접적인 영향을 미치는 축방향의 동적거동은 마찰접촉 거동해석에서 대단히 중요한데, 해석모델인 고속용 디스크가 기존의 자동차 디스크 브레이크와는 달리 축대칭으로 설치되어 있기 때문에 디스크 형상의 비대칭성으로 인해 발생하는 구조적인 문제점을 갖고 있다. 즉, 한쪽으로 편향된 편마멸의 발생은 한쪽의 마찰면이 다른쪽에 비하여 더 많은 마멸이 발생하는 현상으로 특히 자동차용 디스크에서 발생하는 일반적인 마멸 패턴이었다.

고속전철에서 널리 사용하는 디스크-마찰재 제동방식에 보다 가혹한 제동조건을 만들어 주기 위하여 고속전철이 단지 1회 제동으로 정지함에 불구하고, 본

연구에서는 고속전철 디스크 브레이크의 보다 확실한 안전성을 확보하기 위하여 5회 반복제동을 하는 경우에 대한 연구를 하였다.

본 연구에서는 축대칭의 고속전철용 디스크 브레이크에 대한 동적 열변형 거동특성을 비선형 유한요소해석 프로그램 MARC[5]를 사용하여 동적거동 문제를 해석하고자 한다.

2. 수치적 해석

2-1. 해석조건 및 방법

디스크와 마찰재 사이의 마찰열에 의한 동특성 거동 문제를 수치적으로 해석하기 위해 필요한 가정을 요약하면 다음과 같다.

디스크와 마찰재의 미끄럼 마찰면에서 발생된 마찰열은 서로 같다.

- 디스크와 마찰재 접촉면에서의 열적특성은 균일하다.
- 열의 유입이나 방열은 마찰면에 수직하게 발생된다.
- 미끄럼 마찰면에서의 복사열 문제는 배제한다.
- 마찰재는 완전 단열재이고, 철도차량의 모든 운동에너지는 제동시 열 에너지로 모두 전환되어 디스크로 전달된다.

자동차 브레이크에서는 안전성을 검증하기 위하여 가혹한 제동조건인 최고 주행속도 97 km/h에서 15회 반복제동을 하고 있다. 그러나, 고속전철용 디스크 브레이크에 대한 안전성 해석은 고속전철의 주행속도가 300 km/h 이상의 초고속이고, 하중도 대단히 크기 때문에 자동차의 주행조건과는 비교가 되지 않을 만큼 제동조건이 대단히 가혹하며, 1회의 마찰제동을 한다.

그러나, 본 연구에서는 열변형 측면에서 보다 더 가혹한 제동조건인 형성과 궁극적으로는 디스크 브레이크의 수명을 예측하기 위하여 고속전철의 최고 주행속도 300 km/h에서 1~5회의 반복제동을 하는 경우에 대한 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 즉, 1회 제동 사이클은 75초 동안 제동을 하고, 이후에는 약 100초 동안 방열(냉각)하여 디스크를 정상상태로 만드는 과정을 말하며, 5회 제동이란 이러한 제동과정을 5회 동안 반복하여 해석한다는 것을 말한다. 고속용 디스크 브레이크에서 발생하는 마찰열에 대한 동적거동 특성을 해석하기 위하여 사용한 디스크 브레이크 재질의 기계적 특성은 Table 1에서, 그리고 해석조건은 Table 2에서 각각 제시하고 있다.

Table 1. Mechanical and material properties of a disk brake

Mechanical and Material Properties	Values
Dimension, mm	Ø640 × 80t
Elastic modulus, N/mm ²	2.1510 ¹¹
Poisson's ratio	0.3
Mass density, kg/m ³	7,850
Thermal expansion coef., mm/mm · K	12 × 10 ⁶
Thermal conductivity, 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-friction pad used in the finite element analysis

Simulation Conditions	Values
Number of element	848
Number of node	1131
Element mode	Three-dimensional isoparametric arbitrary hexahedral 8-node
Vehicle axle load, kg	17,000
Wheel diameter, mm	920
No. of disk per a axle	3
Atmospheric temp., °C	50

벤틸레이티드 디스크 브레이크의 열거동 특성을 해석하기 위해 사용한 경계조건은 Fig. 1과 같고, 유한요소해석 결과를 고찰하기 위한 열변형 거동의 관찰점 위치는 A~F와 1~4로 Fig. 2에서 각각 표시하고 있다.

2-2. 감속도 패턴

고속전철은 기존의 철도차량과는 달리 일정한 감속도를 계속해서 유지할 수 없고, 전철의 주행 속도에 따라 달라지는 감속도를 적용해야 한다. 고속전철의 최고속도는 300 km/h 이상으로 대단히 높기 때문에 높은 감속도를 가지고 갑자기 제동을 하면 고속전철은 제동 시스템 뿐만 아니라 승객의 안전성을 보장할 수 없게 된다. 그래서 제동 작용에 의하여 고속전철의 주행 속도는 감소하고, 감속도는 점진적으로 높여나가게 된다. 이와 같은 이유로 고속전철 브레이크 해석에서는 2개의 구간에서 일정한 감속도를 갖는 제동 패턴을 사용하였다. 즉, 300~215 km/h의

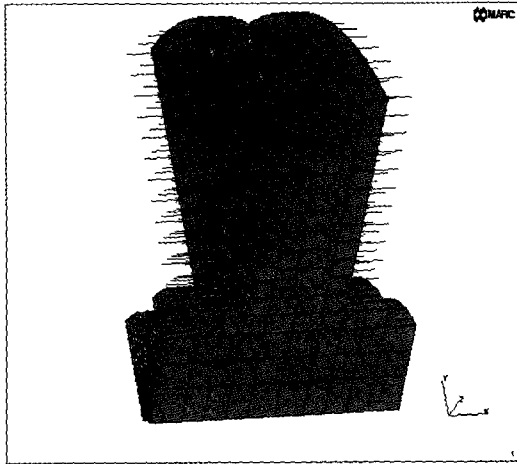


Fig. 1. Boundary conditions for mechanical forces and heat inputs.

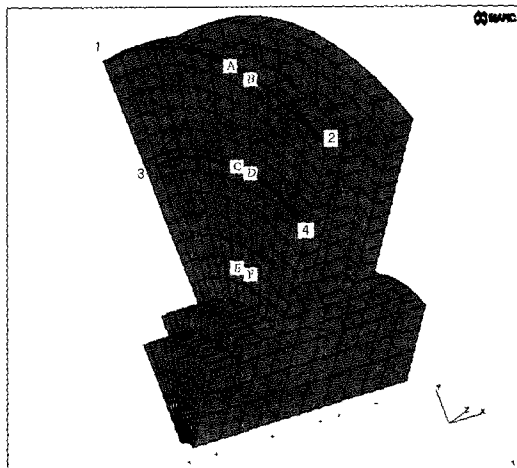
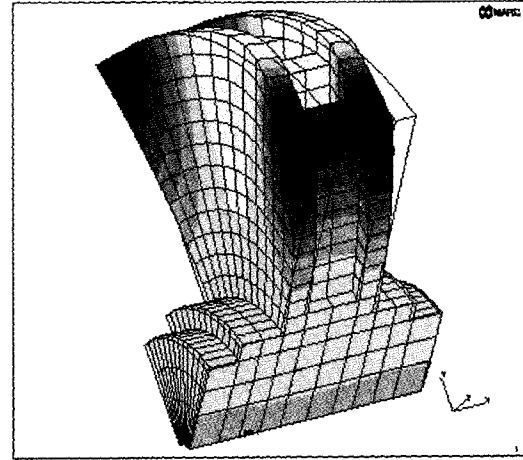


Fig. 2. Observation positions and directions on the rubbing surfaces.

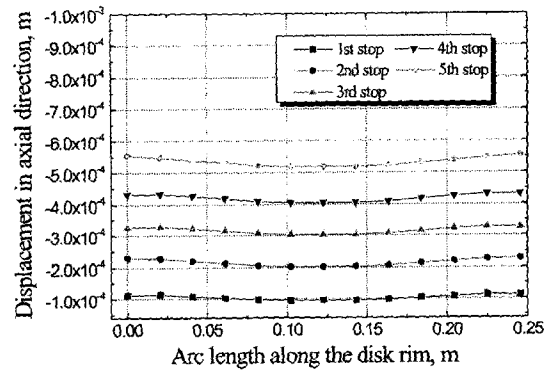
주행속도 구간에서는 감속도를 0.9 m/s^2 로 고정하여 18KN의 압력으로 1차 제동을 하고, 215~0 km/h의 주행속도 구간에서는 감속도를 1.2 m/s^2 로 고정한 후에 20KN의 압력으로 제동하여 고속전철을 정지해야 한다.

3. 해석 결과

300 km/h로 주행중인 고속전철에서 운동 에너지의 100%를 디스크-마찰재 제동 시스템이 모두 담당할 경우, 디스크-마찰재의 미끄럼 마찰면에서 발생하는



(a) Displacement distributions



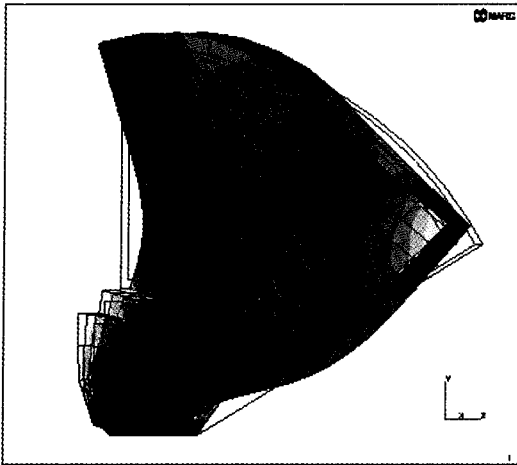
(b) Displacement profiles in axial direction

Fig. 3. Axial displacements along the circumferential direction at the maximum braking speed of 300 km/h during 5 braking periods.

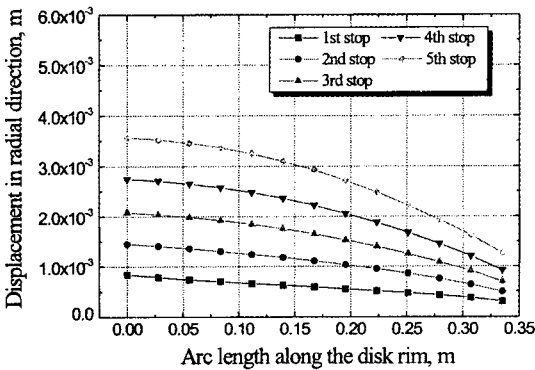
원주방향 z 방향), 축방향(x 방향), 그리고 반경방향 (y 방향)의 열변형 거동 분포도에 대하여 해석하였다.

디스크와 마찰재 사이의 제동력에 의한 마찰열 때문에 미끄럼 마찰면에서 발생된 열변형 거동은 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 발생한다. Fig. 3은 디스크 브레이크가 5회 반복제동을 한 후에 디스크 접촉면의 원주 방향을 따라서 측정된 축방향의 열변형 거동 분포도를 나타내고, Fig. 4는 반경방향을 따라서 측정한 x 방향의 열변형 거동량 분포도를 각각 보여주고 있다.

원주방향을 따라서 뒤틀림 변형거동 분포도를 잘 보여준 Fig. 3(a)에 의하면, 디스크의 마찰표면에서는 원주방향을 따라서 오목, 볼록한 뒤틀림 현상이 함께 나타나는데, 마찰 접촉면의 중앙에서 오목하게 들어가고, 마찰재와 접촉하는 양쪽의 에지부(edge)에서



(a) Displacement distributions



(b) Displacement profiles in radial direction

Fig. 4. Radial displacements along the circumferential direction at the maximum braking speed of 300 km/h during 5 braking periods.

는 약간 튀어나온 열변형 거동 형상을 보여주고 있다. 이들의 결과를 Fig. 3(b)에서 다시 제시하면, 원주방향을 따라서 측정된 축방향의 변위량을 Fig. 2에서 보여준 위치 3→4를 따라서 측정된 축방향 x 방향의 변형된 값을 나타낸다. 제동회수에 따른 축방향의 열변형량은 제동회수가 1회에서 5회로 증가할수록 비교적 균일하게 증가하고, 마찰재와의 접촉 위치에 따라서 변형거동이 약간씩 다르게 나타났다. 즉, 미끄럼 마찰의 기하학적 중심부와 에지부에서의 차이는 6~15% 정도로 적지 않음을 알 수 있다. 이들의 해석결과를 요약하면 Table 3과 같다.

Table 3은 Fig. 2에서 제시한 원주방향 3→4를 따라서 측정된 축방향의 최대 변위량과 최소 변위량의 차이, 즉 편위량(offset)을 제동회수의 항으로 제시하

Table 3. Axial displacement along the circumferential direction at the disk rubbing surfaces for a maximum braking speed of 300 km/h

Braking No.	Maximum Displacement (A) (mm)	Minimum Displacement (B) (mm)	Offset rate (A-B)/A (%)
1	0.1125	0.0951	15.5
2	0.2297	0.2025	11.8
3	0.3261	0.3020	7.4
4	0.4318	0.4046	6.3

고 있다. 여기서 제시된 결과에 따르면, 반복제동을 할수록 거의 0.1 mm씩 균일하게 증가하는데, 최대 변형은 접촉면의 기하학적 중심부보다 약간 아래쪽에서 발생한다. 또한, 디스크의 접촉면에서 발생하는 축방향의 변위량은 반복제동을 할수록 최대값과 최소값의 차이는 증가하는 경향을 보여주지만, 편위율(offset ratio)에서는 15%에서 6%로 감소하는 경향을 나타낸다. 이것은 디스크 브레이크가 고속제동을 할 경우, 편위량은 증가하지만, 그 편위를 증가하는 어느 정도 수렴하는 경향을 나타내고 있다.

이와 같은 결과는 제동조건이 가혹할수록 접촉면에서의 불룩면과 오목면이 더욱 크게 발생되어, 즉 열적 뒤틀림 현상이 크게 발생되어 디스크는 마찰재와의 불균일한 접촉면을 만들기 때문에 마찰열 집중에 의한 적열점(hot spot) 현상과 소음과 진동의 원인으로 작용하며, 궁극적으로는 마멸과 열크랙이 발생되면서 브레이크 제동을 할 수 없게 되는 결과를 초래한다.

반경방향의 뒤틀림 변형거동 분포도를 보여준 Fig. 4(a)에 의하면, 반경방향을 따라서 측정된 디스크의 마찰표면에서는 오목, 볼록한 뒤틀림 현상이 함께 나타나고 있다. Fig. 4(a)에 의하면, 디스크의 한쪽에서 가장 큰 변형이 발생되고, 다른 끝단에서는 가장 낮게 발생하는 정현곡선(sinusoidal curve)의 모양을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 디스크와 마찰재의 미끄럼 마찰면에서 발생된 인장응력과 압축응력에 의한 거동의 불균형에 따른 결과이다.

Fig. 4(b)에서 제시된 해석 결과는 디스크의 반경방향, 즉 Fig. 2에서 보여준 디스크의 외경부 원호 1→2를 따라서 측정된 축방향(x 방향)의 변위 거동량으로, 제동회수(1회에서 5회)에 따른 반경방향의 열변형량은 제동회수가 증가할수록 증가한다. 디스크 마찰의 한쪽 끝에서는 최대 변형량이 발생되고, 다

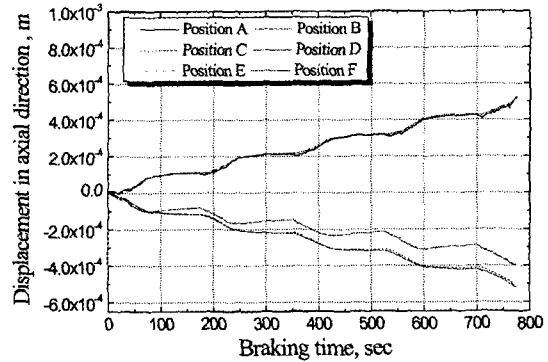
Table 4. Axial displacement along the radial direction at the disk rubbing surfaces for a maximum braking speed of 300 km/h

Braking No.	Maximum Displacement (A) (mm)	Minimum Displacement (B) (mm)	Offset rate (A-B)/A (%)
1	0.8348	0.2973	64.4
2	1.45	0.4943	65.9
3	2.08	0.6935	66.7
4	2.75	0.9202	66.5
5	3.57	1.26	64.7

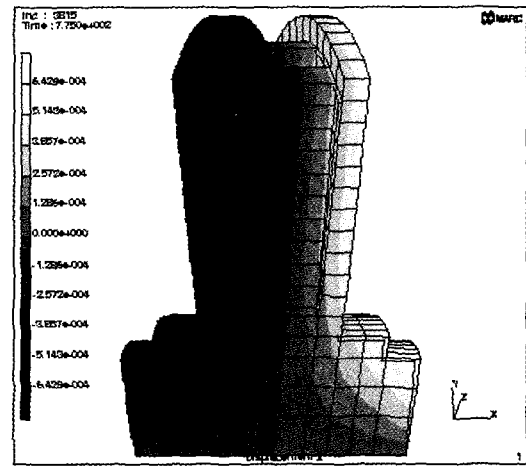
른쪽 끝에서는 최소 변형량이 발생되고 있음을 알 수 있다. 또한, 마찰 제동회수가 증가할수록 최대와 최소 변위량 값의 차는 커지고 있다. 이들의 결과를 요약한 최대 변위량과 최저 변위량을 Table 4에서 제시하였다. 여기서 제시된 결과에 따르면, 반복제동을 할수록 디스크의 접촉면에서 발생한 반경방향을 따라서 측정된 x 방향 변위량의 최대값과 최소값의 차이는 점진적으로 균일하게 증가하는 경향을 보여준다. 반경방향에서 최대 변위량과 최소 변위량의 비를 나타내는 변위율은 64.4%~66.7%로 대단히 높은 수준을 유지하고 있다. 이것은 브레이크의 제동조건이 가혹할수록 반경방향을 따라서 측정된 축방향의 변형, 즉 열변형 뒤틀림 현상이 심해진다는 것을 의미한다.

이들의 열변형 거동에서 제시된 결과처럼, 반경방향의 열변형량은 원주방향 최대값에 비하여 제동회수에 따라 6.3~7.4배 정도는 높게 발생되기 때문에 디스크-마찰재 브레이크 설계시 이러한 열적 변형량을 감안하여야 한다. 즉, 디스크 마찰면에서 발생하는 마찰, 마멸, 열크랙 등의 열거동 특성 문제는 원주방향보다는 반경방향의 열거동으로 인한 문제가 더 지배적이라는 사실이다.

Fig. 5는 축방향의 변위량을 보여주는 그림으로, Fig. 2에 표시된 디스크의 접촉면 위치 6곳 A~F에서 발생된 축방향의 열변형 거동량을 보여준다. 제동시간이 경과함에 따라서 마찰재와 접촉하는 디스크 마찰면의 상부 위치인 A, B에서는 양(+)의 방향으로 거동하고, 중간부 위치인 C, D에서는 음(-)의 방향으로 A, B와는 거의 같은 크기로 거동하며, 회전축에 근접한 마찰 접촉의 맨 아래부인 E, F에서는 음(-)의 방향으로 가장 작게 변형하고 있음을 알 수 있다. 여기서 E, F 지역은 회전축으로의 열전도가 잘



(a) Displacement profiles in axial direction



(b) Displacement distributions

Fig. 5. Axial displacements along the circumferential direction at the maximum braking speed of 300 km/h during 5 braking periods.

되기 때문에 축방향으로의 열변형 거동량이 가장 작게 일어난다. 이러한 해석결과는 미끄럼 마찰면이 축방향으로만 팽창하는 것이 아니라 반경방향을 따라서 볼록한 면과 오목한 면이 발생되는 정현파 곡선 (sinusoidal curve)이 발생한다는 것을 의미한다. Fig. 5(a)에서 제시한 것처럼 1회의 제동을 하였을 때, 위치 C, D에서 가장 큰 변위량이 발생하였으나, 제동이 반복될수록 발생 위치가 점차 위로 이동하다가 5회 반복제동이 끝나면, 가장 큰 변위량이 위치 A, B에서 발생한다. 중간 아래 부분인 위치 C, D에서 위치 A, B로 최고 변형량의 발생 위치가 점진적으로 이동하는 것은 5회 반복제동을 하는 동안 마찰열이 대단히 높게 발생하면서 디스크 내부로의 마찰열 전도가 회전축이 있는 방향보다는 공기에 의한 냉각이

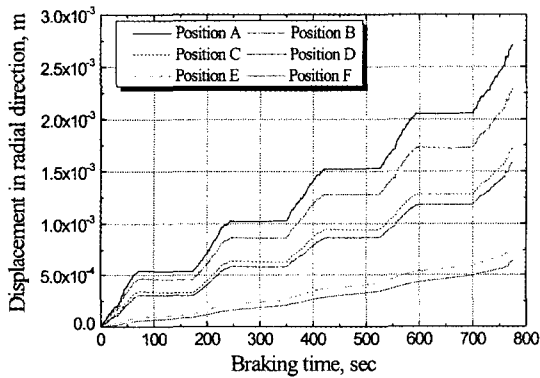
잘되는 디스크 접촉면의 상부로 많이 되기 때문이다. 이러한 축방향으로의 열변형 거동 방식은 원주방향으로의 거동과 함께 디스크의 접촉면을 불균일하게 만들어 제동성능의 약화에 직접적인 영향을 미치게 된다. Fig. 5(b)는 5회의 마찰 제동을 하였을 때, 디스크의 마찰 접촉면에서 발생된 축방향의 변위량 분포를 보여준다. 계산결과에 의하면, 디스크 마찰 접촉면의 양면에서 좌·우 대칭적으로 열변형을 일으키고, 디스크의 중간 아래 부분에서 최대 변위량이 발생한다는 사실을 잘 보여주고 있다.

Fig. 6은 반경방향의 열변형 거동을 나타낸 것으로 디스크 접촉면의 상부 위치 A, B에서 변형거동이 가장 크고, 중간 위치 C, D에서는 그 다음으로 크며, 맨 아래 부분 위치 E, F에서 변형이 가장 작게 발생

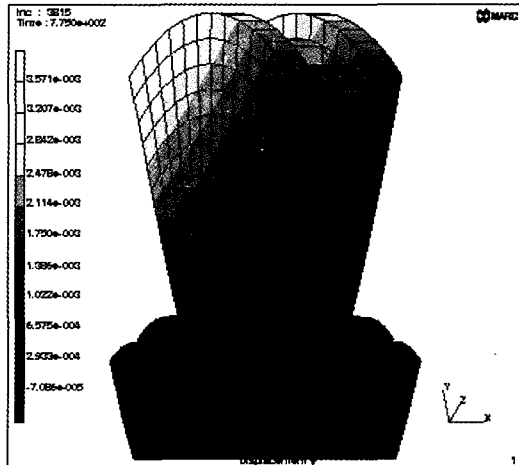
하였다. 반경방향으로의 거동은 상부에서의 온도변화에 따라서 가장 민감하게 반응하여 온도가 증가할수록 갑자기 거동량이 증가하고, 중간부분이 다음으로 반응하며, 가장 아래 부분 E, F에서의 온도 변화에 관계없이 변형 거동의 증가폭이 완만하다.

그리고, 디스크의 미끄럼 마찰 접촉위치 A, C, E에서의 거동량이 위치 B, D, F보다는 크게 나타나는데, 이것은 A, C, E의 위치는 벤트홀이 있는 곳이어서 상대적으로 열용량은 작고, 냉각효과는 크기 때문에 마찰열에 의한 열변형이 크게 발생된다.

Fig. 6(b)는 5회 제동을 하였을 때, 반경방향으로 발생된 변위량 분포를 보여주고 있다. 이 그림에서 접촉면의 왼쪽에서 큰 변위량이 발생하였고, 오른쪽면에서는 작게 발생하였으며, 사선형태의 색깔분포로 보여주고 있다. 이것은 마찰재와 접촉하는 디스크의 미끄럼 마찰 접촉면에서 반경방향으로의 열변형 뒤 틀림 현상이 크게 발생되었음을 의미한다.



(a) Displacement profiles in radial direction



(b) Displacement distributions

Fig. 6. Radial displacements along the circumferential direction at the maximum braking speed of 300 km/h during 5 braking periods.

4. 결 론

고속전철용 디스크 브레이크는 휠 축에 대해 완전 축대칭이기 때문에 마찰면에서 발생하는 열변형 거동은 좌·우가 같게 발생하며, 휠 축에 가까운 부분에서 크게 발생하고 있다. 따라서 자동차 브레이크와 같은 비대칭 열변형이 발생하지 않아서 불균일한 디스크-마찰재의 접촉으로 인한 불균일한 압력분포 →국부적인 응력발생 및 온도상승→불균일한 동적 열변형의 발생→편마멸·크랙의 발생 또는 진동, 소음 등이 발생하는 메카니즘은 많이 감소하였다고 볼 수 있다.

디스크 브레이크는 마찰재와의 제동에 의하여 원주방향과 반경방향으로 정현파 형태의 열변형 거동을 하는데, 이것이 브레이크 제동 시스템의 불안정성에 원인이 될 뿐만 아니라 마멸과 크랙의 직접적인 원인이 된다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 디스크 브레이크의 열용량 증대와 벤트홀에서의 방열효과를 증대시켜서 디스크의 온도를 낮추는 것이 디스크의 동적 거동량을 균일하게 한다.

참 고 문 헌

1. Lies, G. D., "Analysis of Disc Brake Squeal Using Finite Element Methods," SAE 891150, pp. 249-257.

2. Nishiwaki, M., Harada, H., Okamura, H. and Ikeuchi, T., "Study on Disc Brake Squeal," *SAE 890864*, pp. 1-9.
3. Veries, A. de and Wagner, M., "The Brake Judder Phenomenon," *SAE 920554*, 1992.
4. Kao, T-K, Richmond, J. W. and Moore, M. W., "Computational Analysis of Disc Pad Performance," *Proc. Instn Mech. Engrs, IMechE*, C444/02793, pp. 1-12, 1993.
5. MARC Program Capabilities, *MARC Analysis Research Corp.*, Palo Alto, CA, Sept. 1996.