

# 고속 전철에서 디스크 브레이크의 열거동에 관한 유한요소해석

김청균 · 조승현

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

## Finite Element Analysis of Thermal Behaviours of a Disk Brake in High-Speed Trains

Chung Kyun Kim and Seoung Hyun Cho

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract—This paper presents the thermal behaviours of a solid type disk brake for a high-speed train. The thermal behaviours of a brake disk with 50mm thickness shows good performance compared with 45mm thickness of a disk because of a high specific heat capacity and thermal expansion ratio. The FEM results show that the thickness of the disk with a same weight of the brake disk should be increased for a good flexibility of the contact thermal problems. Therefore, the ratio between the pad and disk in diameter may be reduced and the thickness of a disk increased.

Key Words : Disk brake, Finite element method, Thermal behaviour, Pad

### 1. 서 론

철도차량, 자동차, 항공기 등에서 고출력화와 고속화가 추진되면서 제동 시스템은 더욱 가혹한 상태에서 운전되어야만 하고, 최근에는 제동거리를 대폭적으로 단축한 브레이크 개발에 많은 연구비를 투자하고 있다. 이와 같이 가혹한 건조마찰 상태에서 운전되어야 하는 브레이크 시스템에 대한 문제는 트라이볼로지적 측면에서 해결책을 찾아야 한다. 브레이크 마찰면에서의 마멸, 열크랙 및 열탄성 문제로 인한 열적저더 현상(Thermal judder)과 이 결과로 나타나는 소음과 진동 문제는 결국 브레이크 시스템의 수명단축이나 심각한 사고로 이어진다.

디스크 브레이크의 제동 성능에 직접적인

영향을 주는 주요 인자중의 하나인 마찰열은 미끄럼 마찰면의 온도상승을 가져오고, 마찰면의 접촉상태에 따라서는 접촉면에 마찰온도가 집중되면서 열팽창이 국부적으로 진행되어 스파이크 압력(Spike pressure)이 발생하고, 궁극적으로는 마멸로 이어지는 열탄성 마멸(Thermoelastic wear)이 발생하게 된다. 또한 디스크와 패드 사이의 미끄럼 마찰면에서 불균일한 가공상태, 디스크 마찰면의 축방향 변형 등에 의하여 발생될 수 있는 열탄성 불안정 접촉문제는 불균일한 마찰열에 의한 적열점(Hot spot) 현상으로 마찰표면 하부에서 발생하는 미세 열크랙(Thermal hair crack)이나 마멸을 일으킨다.

철도차량에서 제동(Braking)이란 주행중인 차량을 정지시키는 작용으로 제동시에는 차

량의 운동 에너지를 열 에너지로 소산시킴으로써 원활하게 정지된다. 이 때에 발생된 대규모 열 에너지를 디스크-패드면에 균일하면서도 신속하게 소산시키는 것이 대단히 중요하다.

제동시 발생하는 마찰열 거동 문제가 Parker 등[1]에 의하여 거시적 관점에서 처음 관찰된 이후로 여러 연구자들에 의하여 마찰열에 의한 온도분포, 열응력 및 변형거동[2,3], 열크랙[4,5] 등의 문제가 체계적으로 연구되었다.

Carpenter[5]는 디스크 마찰표면에서 관찰되는 국부적인 마찰열 영향지역에서 열크랙이 발생되고 있다는 사실을 밝혀냈고, 이러한 마찰열의 영향을 받고 있는 지역은 25~100mm의 간격을 두고 마찰 원주면을 따라서 발생되고 있음을 보여준다. 디스크의 마찰 접촉면에서 국부적으로 팽창율이 높아지면 그 지점에서의 접촉압력과 마찰온도는 더욱 커지고, 마찰소재의 팽창은 더욱 진전되어 마멸, 열크랙 등이 급속하게 진행되어 브레이크의 마찰면이 손상을 입게되고, 이러한 와중에서 디스크 마찰면의 열적 저터에 의한 거시적 진동(Macro-vibration)과 마찰면의 미세 크랙(Hair crack)에 의한 소음(Squeal)이 발생하게 된다.

브레이크에서 발생하는 마찰열에 의한 제동성능 문제는 디스크 몸체의 열팽창에 관련된 해석과 설계가 일반적이고, 그 동안 디스크 마찰면의 거시적 해석[6]에 관련된 진동 문제와 열크랙에 관련된 미시적 측면의 소음 문제에 대한 해석을 분리하여 추진해 왔다.

국내에서 기존의 철도차량용 브레이크에 대한 설계는 대부분 외국 기술에 의존하고 있으며, 기본 데이터도 부족하여 도입된 기

술로 생산만 하고 있는 실정이다. 더욱이 외국에서 개발된 고속철도용 디스크/마찰재 연구결과에 대한 데이터가 공개된 것이 없고, 350km/h와 같은 초고속에서의 실험적 데이터는 기술보호 측면에서 적극 차단되고 있다. 철도차량에서 핵심부품중의 하나인 제동 시스템에 대한 기반기술이 절대적으로 부족하기는 하지만 이에 대한 기초적인 연구를 수행하고자 한다.

브레이크 마찰표면에서 발생하는 마찰열 크랙이나 마멸문제와 관련된 진동이나 소음 등의 문제를 해결하기 위해서는 기계적 접촉 하중과 열하중 및 속도 조건을 동시에 고려하여 마찰표면에서의 온도분포, 접촉응력 및 디스크의 동적거동 문제를 유한요소법으로 해석하고자 한다. 본 연구에서 해석한 고속용 디스크 모델은 TGV에서 채택한 UIC 모델로 열용량이 서로 다른 45mm와 50mm 두께를 갖는 디스크 로터가 평면식 패드(Flat pad)와 점박이식 패드(Spot pad)가 서로 미끄럼 마찰을 하는 경우에 대하여 해석하였다.

## 2. TGV 제동 시스템

프랑스 국철인 TGV 고속전철은 제1세대라 할 수 있는 200km/h급의 TGV-PSE를 1981년에 개통한 이후로 2세대인 300km/h급의 TGV-A를 1989년에 개발하여 대서양 고속전철에 적용하였고, 계속하여 안정적인 300km/h급의 제동 시스템을 개발한 결과 1993년에 TGV-R(북유럽선 고속전철), 1994년에는 Eurostar를 개발하여 영국과 프랑스 사이의 해저 터널 고속전철에 사용중에 있으며, 1996년에 TGV-D를 개발하여 북유럽 고

속철도망에 투입하였다. 최근에는 한국에서는 2002년을 목표로 최고 주행속도가 350km/h인 초고속 전철 제동 시스템 개발을 독자적으로 추진하고 있다[7].

프랑스 TGV-PSE의 초기 제동 시스템은 벤틸레이티드 디스크와 평면식 패드를 사용하였으나, 철도차량의 초고속화로 인한 열용량 증가의 필요성과 열변형에 대한 내구성 문제를 해결하기 위하여 주철제 디스크와 비석면 패드의 마찰제동 방식을 강제 디스크 (Steel disk)와 점박이식 소결합금 패드로 교체하였다.

2세대라 할 수 있는 TGV-A가 채택하고 있는 고속용 제동 시스템에서 디스크 마찰면은 솔리드 타입의 디스크 4개를 차륜의 안쪽 축에 병렬로 연결하고, 패드식 마찰재는 소결합금을 사용한 점박이식 패드로 대체하여 마찰계수를 높힘으로써 제동 성능을 향상시키고자 하였다. 여기서 사용한 디스크 브레이크는 솔리드 타입으로 열용량과 기계적 가압 제동력에 견딜 수 있도록 질량을 크게 증가시켰고, 또한 패드는 점박이식 마찰재로 다수의 점박이에 마찰 접촉부위를 집중적으로 분산시켜서 마찰계수를 높히면서 대류 열전달에 의한 열소산 효과를 극대화 시키는 설계 기법을 사용하였다.

### 3. 수치적 해석

#### 3-1. 에너지 입력 및 가정

운행중인 철도차량을 정지시키기 위해서는 차량의 운동 에너지를 균일한 열 에너지로 방열시켜야 한다. 이 때에 철도차량의 운동 에너지를 방사시키기 위한 방법으로 디스크 브레이크와 패드 사이에 상대 마찰운동을 시

켜서 마찰 에너지 형태로 소산시키는 것이 일반적이다. 발생된 마찰열은 마찰 디스크와 마찰재에 전도되어 브레이크 소재의 기계적 특성, 마멸률 증가나 소재의 특성을 변화시키고, 일부는 진동이나 소음의 형태로 열에너지를 방사시킨다. 여기서 디스크나 마찰재로 유입된 열 에너지는 철도차량의 질량, 감속도, 마찰조건, 열용량 등에 의하여 지배를 받는다.

디스크나 패드 마찰면에서의 열전도와 대류 문제는 고려의 대상이나 복사 에너지에 의한 열유동은 철도차량이 사용되는 주변환경과 주행속도 등을 고려할 때 무시하는 것이 일반적이다. 본 연구에서 고려한 디스크에 대한 마찰열 거동 문제를 해석하기 위한 가정을 요약하면 다음과 같다.

- 디스크나 패드 접촉면에서의 열적특성은 균일하다.
- 마찰열의 유입이나 방열은 마찰면에 수직하게 발생된다.
- 대류 열전달 계수는 일정하다.
- 디스크 주변의 공기에 의한 냉각은 없다고 가정한다.
- 마찰면에서의 복사열 문제는 배제한다.

Table 1 Mechanical and material properties of a disk brake[6].

| Disk thickness<br>Specifications      | 45mm                  | 50mm                  |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Elastic modulus, N/mm <sup>2</sup>    | 2.15×10 <sup>11</sup> | 2.15×10 <sup>11</sup> |
| Poisson's ratio                       | 0.3                   | 0.3                   |
| Mass density, kg/m <sup>3</sup>       | 7,850                 | 7,850                 |
| Coef. of thermal expansion, mm/mm · K | 12×10 <sup>-6</sup>   | 12×10 <sup>-6</sup>   |
| Thermal conductivity, W/m · K         | 45                    | 45                    |
| Specific heat, J/kg · K               | 460                   | 460                   |

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

| Simulation Conditions                 | Values |
|---------------------------------------|--------|
| Vehicle axle load, kg                 | 17,000 |
| Wheel diameter, mm                    | 920    |
| Number of disk per a axle             | 4      |
| Initial velocity of braking km/h      | 350    |
| Convection coef., W/m <sup>2</sup> °C | 60.74  |
| Atmospheric temperature, °C           | 35     |

• 철도차량의 모든 운동에너지는 제동시 에너지를 열 에너지로 전환되어 디스크와 패드에 일정한 비율로 전달된다.

◦ 디스크-패드 사이에서 발생하는 마찰열은 접촉면에서 균일하게 발생된다.

브레이크 마찰열에 대한 유한요소해석을 위하여 사용한 디스크 브레이크 재질의 기계적 특성과 작동조건은 Table 1과 Table 2에서 각각 주어진다.

### 3-2. 감속도와 제동거리

고속전철에서 350km/h의 최고속도로 달린 차량을 정지시키기 위하여 브레이크가 제동작용에 들어간다 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 제1차 감속 구간과 제2차 감속 구간 그리고 3차 감속 구간으로 나누어 제동한다. 즉, 385~230km/h의 주행속도 구간에서는 감속도를  $-0.005143V+0.892483\text{m/s}^2$ 으로 1차적으로 제동하고, 230~70km/h의 주행속도 구간에서는 감속도를  $-0.010062V+1.20675\text{m/s}^2$

으로 2차적으로 제동하고, 70~0km/h의 주행속도 구간에서는  $1.0111\text{m/s}^2$ 의 감속도로 제동하여 정지시킨다.

주행중인 철도차량을 Fig. 1에서 제시한 감속도 패턴으로 제동하여도 차량을 안전하게 정지시키기 위해서는 최소한의 제동거리가 필요한데, 350km/h로 달리는 고속전철의 제동거리는 약 9,409m로 계산된다.

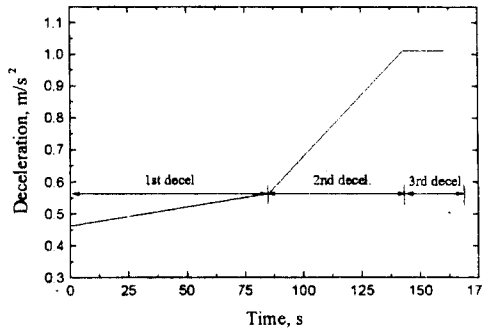


Fig. 1 Deceleration curve of a high-speed train with a Maximum speed of 350km/h.

### 3-3. 해석모델 및 유한요소망

고속전철용 디스크 브레이크의 마찰면 형상은 Fig. 2에서 보여준 것처럼 UIC 솔리드 타입 모델로 디스크 브레이크의 재질은 주강이고, 마찰재 패드는 소결합금 소재를 선정하였다.

디스크-마찰재 패드에서 마찰열에 관련된 비선형 열적거동에 대한 해석은 많은 노력과 시간 그리고 컴퓨터 용량을 크게 필요로 하므로 2차원 접촉 열응력과 거동문제를 해석하였다. 본 연구에서는 기존의 고속전철용 디스크에 대한 열적거동 문제를 비선형 유한요소해석 프로그램 MARC[8]를 사용하여 디스크 브레이크의 열적거동 특성을 파악하고자 한다.

Fig. 2의 두가지 디스크 모델(두께 : 45mm

와 50mm)을 해석하기 위한 유한요소 데이터는 4-node isoparametric quadrilateral ring과 4-node heat transfer axisymmetric ring을 동시에 사용하였다. Fig. 2의 디스크 모델에서 45mm 디스크 두께를 갖는 해석 모델의 유한요소와 절점의 갯수는 630과 710이고, 50mm 두께를 갖는 디스크 모델의 경우는 719과 802이다.

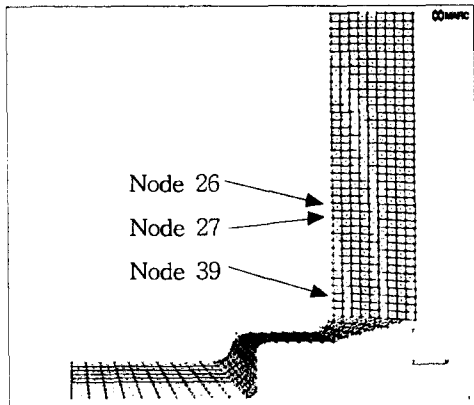


Fig. 2 Solid type disk model for a high-speed train.

#### 4. 해석결과 및 고찰

디스크가 패드와 상호 미끄럼 마찰운동을 하면서 발생하는 마찰열에 의한 온도분포와 열변형 해석을 수행하면 디스크 마찰면에서 발생하는 다음과 같은 문제점 또는 현상을 규명할 수 있다.

- 디스크와 패드 마찰면에서의 적열점 (Hot spot) 현상
  - 디스크와 패드 마찰면에서의 열크랙 현상과 이에 따른 미세 진동(Micro-vibration) 과 소음(Squeal) 문제
  - 디스크와 패드의 열변형 거동문제와 이에 따른 거시적 진동(Macro-vibration) 해석
  - 디스크와 패드 마찰면에서의 열탄성 마

찰 문제

- 디스크와 패드 마찰면에서의 스틱 슬립 문제

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 솔리드 타입의 디스크 모델을 보여주고 있는데, 디스크 마찰면의 두께는 45mm와 50mm의 두가지 모델에 대하여 해석하였고, 마찰재 패드는 평면식과 점박이식의 두가지 패드 모델이 고려되었다. 철도가 350km/h의 최고속도로 주행할 때에 발생하는 총발열량은 22.4MJ이고, 이 결과는 320km/h로 주행하는 TGV 모델 해석에서 계산한 22MJ과 유사한 결과치이다 [9].

#### 4-1. 온도분포 해석

(1) 디스크가 평면식 패드와 접촉하는 경우 철도차량을 1회 제동으로 정지시켜야 하기 때문에 디스크와 패드 사이의 미끄럼 마찰조건은 대단히 가혹하다. 디스크와 패드의 마찰면에서 발생하는 마찰열은 철도차량의 운동 에너지가 모두 열 에너지로 전환된다고 가정할 경우 350km/h로 주행하는 고속전철에서는 22.4MJ로 대단히 높다.

디스크와 패드 마찰재가 미끄럼 마찰운동을 하게되면 마찰열이 발생되고, 상대 접촉운동을 하지 않는 구역에서는 브레이크 주변의 공기 유동에 의한 방열이 진행되어 냉각하게 된다. 브레이크가 제동을 하게되면 발열과 냉각이 제동시 마다 주기적으로 반복 운동하게 된다.

Fig. 3은 최고 주행속도가 350km/h이고, 디스크 두께가 45mm인 디스크 마찰면에서 발생하는 마찰열 온도분포를 보여주는데, 디스크와 패드 사이의 마찰면에서 발생하는 마찰열은 22.4MJ이고, 모두가 디스크로 전달된

경우에 대한 계산결과이다. 디스크가 마찰 제동한 후 약 160초가 경과되었을 때에 마찰면에서 발생하는 온도를 Fig. 3(a)에서 보면 약 500°C로 수렴하며, 디스크의 상단부로부터 26번째 되는 절점에서는 520°C의 높은 온도가 발생되고 있다. Fig. 3(b)는 패드가 디스크와 직접적으로 접촉하지 않는 패드의 바로 아래인 절점 39에서 마찰열에 의하여 160초 동안 전도된 경우에 최고 온도가 약 360°C로 계산되었음을 보여주고 있다.

디스크 두께가 50mm인 경우에 대한 온도 분포 해석을 보여준 Fig. 4(a)의 계산결과를 보면 디스크의 두께가 45mm인 경우에 비하여 마찰열 온도분포가 400°C로 안정적이고, 디스크 마찰면에 비교적 고르게 분포하고 있기 때문에 동적거동 측면에서 보면 유리하다. 디스크 마찰면에서 가장 높은 온도가 410°C를 보여준 절점 26에서는 Fig. 3(b)에 비하여 온도가 크게 낮아지고, 패드와 직접 접촉하지 않는 절점 39에서는 300°C로 45mm 두께의 360°C에 비하여 낮게 나타났다.

철도차량의 속도가 350km/h이고, 디스크의 두께가 서로 다른 두가지 모델(45mm와 50mm)을 비교한 상기의 결과를 요약하면, 디스크 마찰면의 두께가 50mm로 두껍게 제작된 디스크가 45mm의 두께를 갖는 디스크에 비하여 열용량이 크기 때문에 마찰면 온도가 낮고, 균일하게 분포하는 열거동 형태를 보면 보다 안정적인 브레이크 설계라 할 수 있다. 그래서 고속전철 디스크 브레이크에서 동일한 중량을 설계할 경우는 가능한 디스크의 내외경비를 작게, 그리고 디스크 두께를 크게해 주는 것이 유리함을 알 수 있다.

(2) 디스크가 점박이식 패드와 접촉하는 경우 점박이식 마찰재는 평면식 마찰재에 비하여 마찰열 발생과 열용력이 국부적으로 과다하게 걸리나, 점박이와 점박이 사이에는 일정한 간격을 유지하도록 설계해야 한다. 점박이식 패드는 대류 열전달이 원활하게 일어날 수 있도록 점박이를 적절히 배열하면 냉각효과를 극대화시킬 수 있고, 미끄럼 마찰에 의하여 발생하는 마멸입자에 의한 연삭마멸(Abrasive wear) 등을 크게 줄일 수 있다는 장점을 갖고는 있으나 국부적인 마찰 열용력 상승문제를 해결해야 한다.

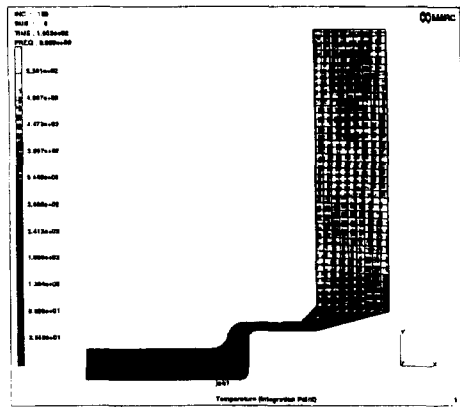
Fig. 5는 최고속도가 350km/h이고, 두께가 45mm인 디스크가 점박이식 패드와의 마찰면에서 발생하는 마찰열 온도분포를 보여주고 있다. 이 결과는 디스크와 점박이식 패드 사이에서 발생하는 마찰열은 22.4MJ이고, 모두 디스크로 전달된다고 가정할 경우에 대한 결과이다. 디스크가 마찰 제동한 후 약 160초가 경과되었을 경우 마찰면에서 발생하는 온도는 Fig. 5(a)와 같이 550°C로 수렴한다. Fig. 5(b)는 디스크의 상단부로부터 27번째 되는 절점에서는 590°C의 높은 온도가 발생하고, 점박이식 패드가 디스크와 직접적으로 접촉하지 않는 점박이식 패드의 바로 아래인 절점 39에서 마찰열에 의하여 160초 동안 전도될 경우 최고 온도가 약 380°C로 계산되었음을 보여주고 있다.

또한 디스크의 두께가 50mm인 경우에 대한 온도분포 해석을 보여준 Fig. 6의 계산결과를 보면 브레이크 디스크의 두께가 45mm인 경우에 비하여 마찰열 온도분포가 440°C 이하로 안정적이고, 디스크 마찰면에 비교적 고르게 분포하고 있기 때문에 동적거동 문제에서도 비교적 유리하다. 디스크 마찰면에서 가장 높은 온도 410°C를 보여준 절점 27에서

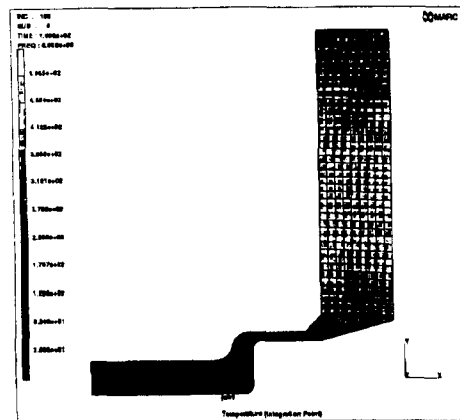
는 Fig. 5(b)에 비하여 온도가 크게 낮으며, 패드와 직접 접촉하지 않는 절점 39에서는 360℃로 45mm 두께의 380℃에 비하여 약간 낮게 나타났다.

Table 3 Maximum temperature of a disk with a maximum speed of 350km/h.

| Temperature, °C<br>Disk Thickness, mm | Flat Pad | Spot Pad |
|---------------------------------------|----------|----------|
| 45                                    | 500      | 550      |
| 50                                    | 400      | 440      |

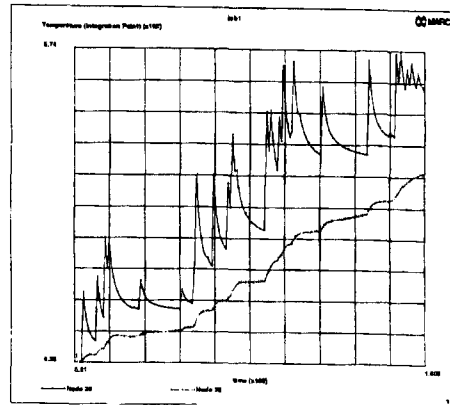


(a) Temperature distribution of a disk

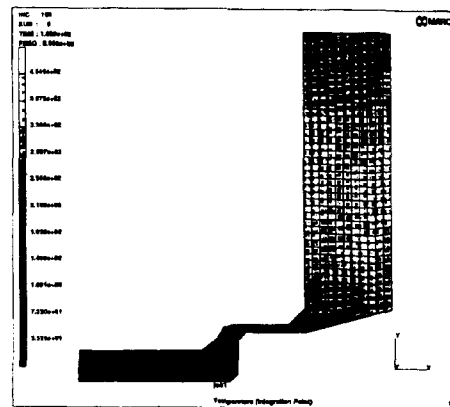


(b) Temperatures at nodes 26 and 39

Fig. 3 Temperature distributions between flat pad and 45mm disk brake with a maximum speed of 350km/h.

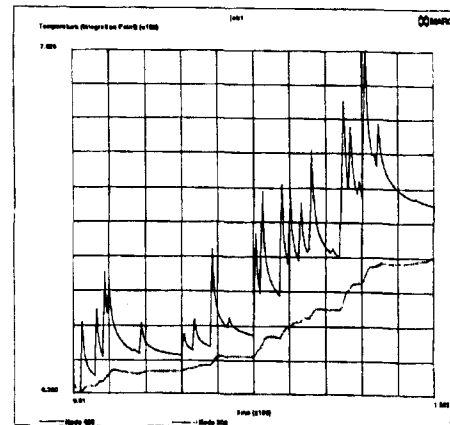


(a) Temperature distribution of a disk

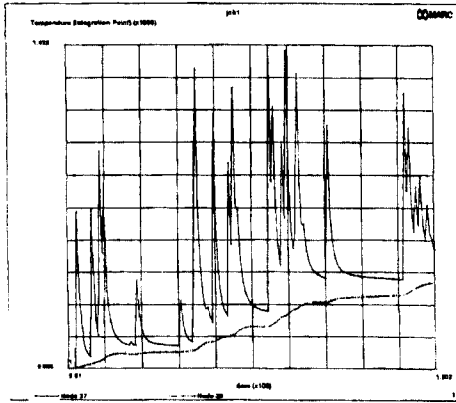


(b) Temperatures at nodes 26 and 39

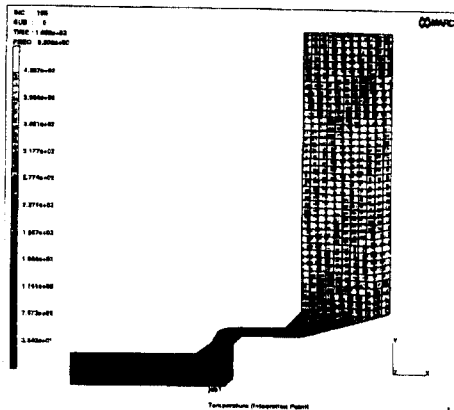
Fig. 4 Temperature distributions between flat pad and 50mm disk brake with a maximum speed of 350km/h.



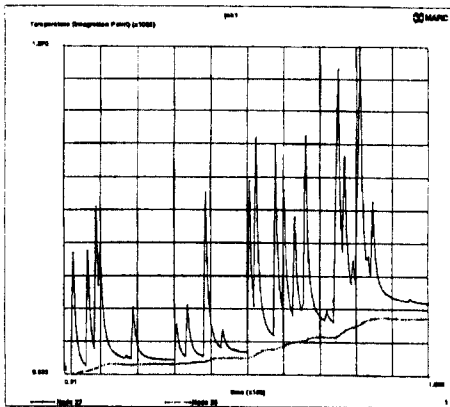
(a) Temperature distribution of a disk



(b) Temperatures at nodes 26 and 39  
 Fig. 5 Temperature distributions between spot pad and 45mm disk brake with a maximum speed of 350km/h.



(a) Temperature distribution of a disk



(b) Temperatures at nodes 26 and 39

Fig. 6 Temperature distributions between spot pad and 50mm disk brake with a maximum speed of 350km/h.

점박이식 패드와 접촉하는 두가지 모델(두께 : 45mm와 50mm)을 비교한 상기의 결과를 요약하면, 디스크 마찰면의 두께가 50mm로 두겹게 제작된 디스크가 45mm의 두께를 갖는 디스크에 비하여 열용량이 크기 때문에 마찰면 온도가 크게 낮고, 균일하게 분포하는 거동형태를 보면 보다 안정적인 설계라 할 수 있다.

평면식 패드와 점박이식 패드가 디스크와 마찰접촉 운동(최고속도 : 350km/h)을 하는 경우 점박이식 패드와 마찰운동을 하는 디스크 마찰면의 평균온도는 Table 3에서 제시하는 것처럼 약 10% 정도 높게 나타났으나, 최고속도가 350km/h이고 평균온도라는 측면에서는 그리 높은 온도 상승은 아니다.

### (3) 디스크 - 패드의 접촉거동 해석

디스크 로타와 패드 사이의 미끄럼 마찰 접촉거동 문제를 미시적 관점에서 보면 패드와 접촉하는 곳은 마찰면의 집중현상으로 Fig. 7에서 보여주는 것처럼 점박이 패드와 접촉하는 지역에서 불룩하게 팽창됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 3개의 점박이 마찰재와 접촉하는 경우에 대한 접촉거동 현상으로 패드와 접촉하는 중심부에서 순간적으로 인장강도가 발생하고, 점박이 패드간의 공간에서는 상대적으로 압축응력이 발생되어 제동시 마다 주기적으로 반복한다. 이러한 반복 피로응력의 증가는 마찰 열용력 크랙과 팽창에 따른 열탄성 마멸이 진행되어 디스크와 패드는 마찰 열 손상을 입게 된다.



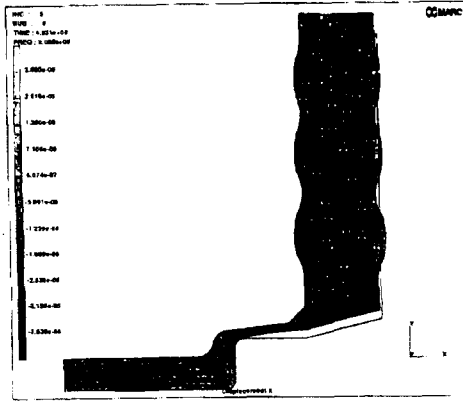


Fig. 7 Deformed geometry of a disk contact surface.

#### 4-2. 열변형 거동 해석

디스크 로타로 전달된 마찰열에 의한 열거동 현상은 마찰열이 디스크 내부에서 불균일하게 소산된다면 디스크 로타는 동심원으로 회전하지 않고 불규칙하게 회전하기 때문에 거시적 진동과 마멸이 크게 발생하게 된다. 그러나 마찰열이 디스크 내부로 균일하게 소산된다면 디스크 마찰면은 초기의 형상을 그대로 유지할 수 있으므로 문제가 없으나 디스크는 Fig. 2에서 보여주는 것처럼 해트부에서 기하학적으로 비대칭 형상을 갖고 있으므로 축방향으로 변형이 발생하고, 열소산의 비균일성이 크면 클수록 열적 디틀립 현상 (Thermal distortions)은 더욱 크게 발생하며, 이에 따른 진동과 소음, 마멸이 발생하게 된다.

##### (1) 디스크가 평면식 패드와 접촉하는 경우

Fig. 8은 평면식 패드와 접촉하는 디스크의 축방향 열거동을 해석한 결과로 디스크 두께가 45mm인 경우는 Fig. 8(a)에서 보여주는 것처럼 0.64mm 정도의 최대 축방향 변위량이 Fig. 8(b)에서 제시하는 것처럼

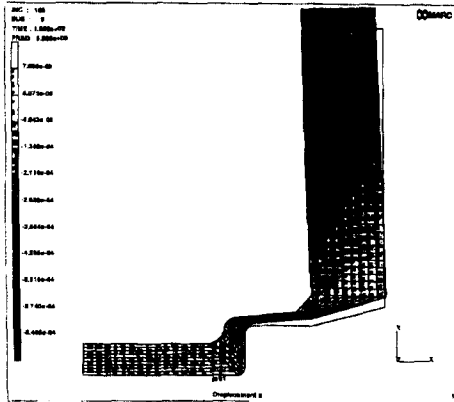
0.42mm의 축방향 변위량이 좌상단부에서 유사하게 발생하고 있다.

이 결과는 50mm의 두께를 갖는 디스크가 45mm의 두께를 갖는 디스크에 디스크의 좌상단부에서 발생하고, 디스크의 두께가 50mm인 경우는 비하여 35% 정도의 열변형 거동이 작게 발생한다는 것으로 50mm 디스크에서의 마멸량이나 축방향 진동이 그만큼 줄어들기 때문에 디스크의 두께가 두꺼운 50mm가 회전 안정성 측면에서 대단히 유리함을 알 수 있다.

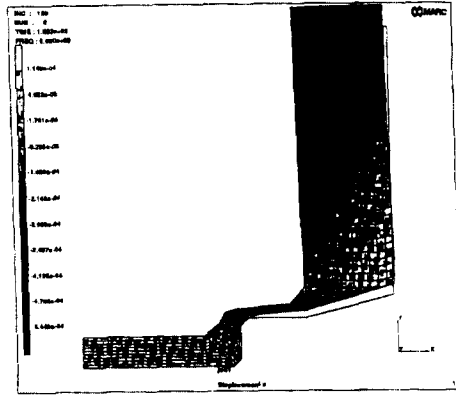
##### (2) 디스크가 점박이식 패드와 접촉하는 경우

Fig. 9는 점박이식 마찰재 패드와 접촉하는 디스크의 축방향 열변형 거동을 해석한 결과로 디스크 두께가 45mm인 경우는 Fig. 9(a)에서 보여주는 것처럼 0.72mm 정도의 축방향 변위량이 디스크의 좌상단부에서 발생하고, 디스크의 두께가 50mm인 경우는 Fig. 9(b)에서 보여주는 것처럼 0.54mm의 축방향 변위량이 좌상단부에서 발생하고 있다. 이 결과는 50mm의 디스크가 45mm 디스크에 비하여 25% 정도 열변형 거동이 작게 발생한다는 것으로 마멸량이나 축방향 진동이 줄어들기 때문에 회전 안정성 측면에서 대단히 유리함을 알 수 있다.

평면식 패드와 점박이식 패드가 디스크와 마찰접촉 운동을 하는 경우 점박이식 패드와 마찰운동을 하는 디스크 마찰면의 축방향 변위량을 Table 4에서 제시한다. 이 결과에 의하면 45mm의 디스크에서는 12%, 50mm인 경우는 28% 높게 나타났으나, 제동력 측면에서 보면 그리 큰 축방향 변위량 증가는 아니다. 그러나 두꺼운 50mm 디스크는 45mm 디스크에 비하여 발생한 열변위량 크기가 대단히 작게 나타났다.

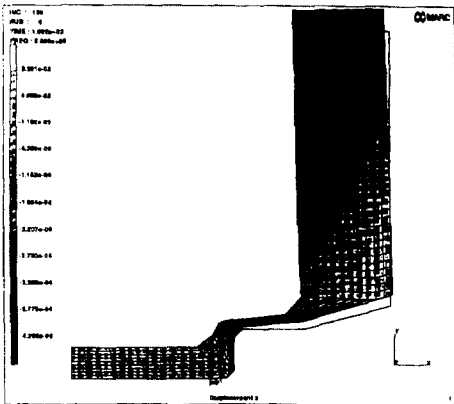


(a) 45mm disk



(b) 50mm disk

Fig. 9 Thermal deformations with a maximum speed of 350km/h in spot pad - disk rotor.



(b) 50mm disk

Fig. 8 Thermal deformations with a maximum speed of 350km/h in flat pad - disk rotor.

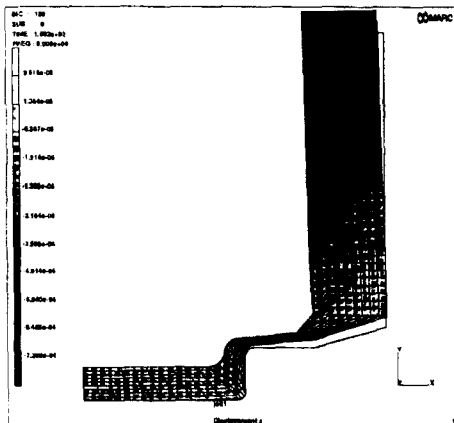
Table 4 Comparison of a thermal displacement between flat pad and spot pad.

| Disk Thickness, mm | Axial Displacement, mm |          |
|--------------------|------------------------|----------|
|                    | Flat Pad               | Spot Pad |
| 45                 | 0.64                   | 0.72     |
| 50                 | 0.42                   | 0.54     |

### 5. 결론

디스크와 마찰재 패드 사이의 미끄럼 마찰에 의한 마찰열 발생을 이론적으로 계산하여 디스크 마찰 접촉 운동면에서의 온도 분포와 열변형 거동문제를 비선형 유한요소해석 프로그램인 MARC를 사용하여 해석하였다.

고속전철에서 패드와 접촉하는 디스크의 두께가 서로 다른 두가지 모델(45mm와 50mm)을 비교하면, 디스크 마찰면이 50mm로 두껍게 제작된 디스크가 45mm의 두께를 갖는 디스크에 비하여 열용량이 크기 때문에 마찰면 온도가 크게 낮고, 균일하게 분포하는 열변형 거동 형태를 보면 보다 안정적이라 할 수 있다. 그래서 디스크는 마찰 열용



(a) 45mm disk

량과 강성도를 증가시킬 수 있도록 가능한 디스크의 내외경비는 작게하고, 디스크의 두께는 크게 설계하는 것이 바람직하다.

평면식 패드와 점박이식 패드가 디스크와 마찰접촉 운동(최고속도 : 350km/h)을 하는 경우 점박이식 패드와 마찰운동을 하는 디스크 마찰면의 최고 평균온도가 약 10% 정도 높게 나타났고, 열변형 거동은 12%(45mm 디스크)~28%(50mm 디스크)로 높으나, 이 결과는 대류에 의한 냉각효과를 배제하고 해석한 것이므로 실제로는 약간 달라질 것으로 예상된다.

### 참 고 문 헌

1. Parker, R. C. and Marsall, P. R., "The Measurement of the Temperature of Sliding Surfaces with Particular Reference to Railway Blocks," Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 159, pp.209-229, 1948.
2. Johnson, M. R., Welch. R. E. and Young, K. S., "Analysis of Thermal Stresses and Residual Stress Changes in Railroad Wheels Caused by Severe Drag Braking," J. Eng. Ind., Vol. 99, No. 18, Feb. 1977.
3. Novak, G. E., Eck. B. J., Dahlman G. E. and Kucera J. W., "Thermal Patterns in 36-inch Freight Car Wheels during Severe Tests," Winter Annual Meeting, New York, ASME 76WA/RT-11, Dec. 1976.
4. Kunikare, T., Nishimuri. S. and Tagashira, H., "The Metallographic Observation of the Tread of Wheels Subjected to Various Service Conditions," Trans. Iron Steel Inst. Japan, Vo. 10, pp.476, 1977.
5. Carpenter, G. F., "The Cause of Thermal Fatigue Cracking in Metroliner Wheels," Final Report to DOT, Rep. No. FRA-ORD-77/17, U.S. Steel Corp. Res. Lab., Monroeville, Pa. 15146, March 1977.
6. 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.
7. 최경진, 구병춘, "고속철도 TGV의 제동 시스템," 철도기술정보, 제3호, pp.7-9, 1997.
8. MARC User's Manual, Ver. K6.1, MARC Analysis Research Co., 1996.
9. Tirovic, M., "Development of a Wheel Mounted Disc Brake for a High-Speed Train," Proc. Instn Mech. Engrs, IMechE, C511/15/070/96, 1996.