

## 통기식 디스크 브레이크의 방열 성능에 관한 수치적 연구

김진택<sup>†</sup> · 백병준<sup>\*‡</sup>

전북대학교 대학원  
\*전북대학교 기계공학부

### A Numerical Study of Thermal Performance in Ventilated Disk Brake

Jin-Taek Kim<sup>†</sup> and Byung-Joon Baek<sup>\*‡</sup>

Graduate School, Chonbuk National University

\*Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University

**Abstract** – Disk brake system transforms a large amount of kinetic energy to thermal energy in a short time. As the size and speed of automotive increases in recent years, the disk brakes absorbs more thermal energy. And this thermal energy can cause an unacceptable braking performance due to the high transient temperature, that is attained at the friction surface of brake disk and pad. Although these high temperatures are one of the biggest problems. In this study, the overall thermal behavior of ventilated disk brake system was investigated by numerical method. The 3-Dimensional unsteady model was simulated by using a general purpose software package “FLUENT” to obtain the temperature distributions of disk and pad. The model includes the more realistic braking method, which repeats braking and release. The effects of several parameters such as the repeated braking, inlet air velocity and thermal conductivity on the temperature distribution were investigated.

**Key words** – ventilated disk brake, ventilated hole, friction heat, unsteady, repeated braking.

#### 1. 서 론

제동시스템은 주행하는 차량의 운동에너지를 기계적인 마찰에너지로 전환시킴으로서 차량을 안정하게 정지시키는 것을 목적으로 한다. 좀더 안정된 제동과 제동거리의 단축을 위해서 많은 제동시스템이 제시되어져 왔으며 최근 자동차나 철도 차량에 사용되고 있는 접촉식 제동시스템에 있어서 제동 안정성은 디스크와 패드에서 발생하는 마찰열을 마찰면에 균일하게 전이시키고, 통풍구(ventilated hole)를 통해 브레이크 회전력에 의해 공기에 의한 대류 냉각 특성은 브레이크 성능에 많은 영향을 미친다. 특히 차량의 고속화, 고효율화 추세에서 제동거리의 단축과 수명연장을 추구하고 있기

때문에 디스크와 패드의 내마멸성, 안전성 향상을 위한 최적화 설계등의 트라이볼로지적 연구를 필요하게 되었다. Tranvir[1]은 브레이크의 온도 상승에 의한 성능저하를 방지하기 위하여 철도 차량에 사용되는 원판 브레이크에 통풍구를 설치하여 냉각 성능이 향상 될 수 있음을 확인하였다.

Floquet와 Dubourg[2]는 축대칭으로 운동하는 디스크 브레이크 모델에 비대칭, 비정상 상태의 열유속 조건에 대한 분석으로 디스크내의 온도장을 계산하였다.

Schmidt[3]는 주행중인 자동차의 앞부분에 위치해 있는 제동장치 대해서 수치적으로 디스크를 해석하여 유동장의 흐름으로 회전하는 디스크에 대한 냉각에 대해서 연구하였고, Zhang[4]은 브레이크 로터 형상에 대한 수치적 계산으로 디스크의 냉각에 대해서 연구하여 로터 형상에 의해서 디스크의 냉각이 향상된다는 것을 보여주었다.

<sup>†</sup>주저자 : kjtaek@shinburo.com

<sup>‡</sup>책임저자 : baekbj@moak.chonbuk.ac.kr

Fukano[5]는 공기 유동 속도에 대해서 디스크에 대해 열거동을 분석하여 열응력 분포를 연구하였다.

국내에서는 민형석[6]은 자동차에 통풍구가 설치되어 있는 원판 브레이크에 대해서 반복제동에 의한 열적 거동을 유한요소해석 기법으로 해석하였고, 조승현[7]등에 의해 공냉 효과가 디스크 브레이크의 열변형에 미치는 영향을 고찰하는 등 관심이 증대되고 있으나 마찰 열의 상세한 열의 이동 구조(mechanism)가 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 제동초기에서 제동완료시까지 실제 제동조건을 모사하여 비정상적으로 변화하는 열이동 구조를 분석하고, 브레이크 내부의 온도 특성 및 통풍구의 영향을 통풍구의 유입속도, 제동모드의 변화 등에 의해서 고찰하고자 한다.

## 2. 수치적 연구

### 2-1. 해석조건

디스크와 패드 사이의 접촉면에서 발생하는 마찰열을 소재내의 전도와 방열구를 통한 공기의 대류냉각을 고찰하기 위하여 유한체적 프로그램인 FLUENT를 사용하여 해석하였다. 디스크와 패드사이에는 에너지 방정식이 적용되었고, 통풍구에서의 공기와의 대류는 운동량, 에너지 방정식이 동시에 적용되었다. 대기중의 노출된 디스크와 패드의 표면에서는 전도된 마찰열이 대기중의 공기에 의하여 방열되며, 이때 대류 열전달 계수는  $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 하였고, 마찰면에서의 복사열은 없다고 가정한다. 제동시 전체 디스크의 1/6 구간에서 패드와 접촉에 의해서 마찰이 이루어지고, 나머지 5/6 구간에서는 축적된 마찰열이 외부 표면에 의해서 공기와 대류 냉각을 한다. 따라서 본 모델에서는 제동이 이루어지는 3초 동안 1/6시간은 마찰열 발생, 5/6시간은 마찰열없는 상태에서 열이동하는 것을 반복하는 것으로 모사하였다.

디스크와 패드에서 발생하는 마찰열의 소산율은 자동차의 주행과 제동의 특성에 따라 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 60 mph로 주행중인 자동차가 정지하는데 제동과 주행을 반복해서 실시했을 때의 마찰열을 고려한 비정상 문제로 해석하였다.

### 2-2. 해석모델 및 제동모드

디스크와 패드사이의 접촉면에서 발생하는 마찰열을 잘 소산시킬 수 있도록 하기 위하여 32개의 방열구가

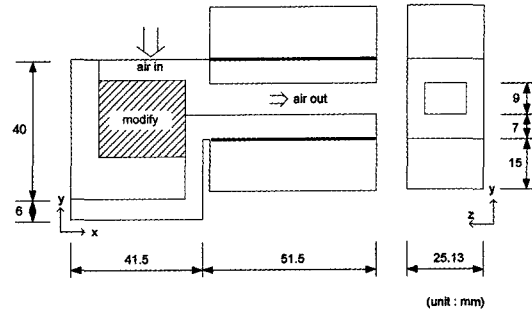


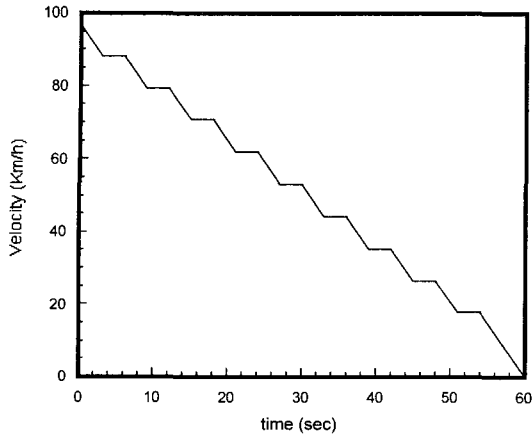
Fig. 1. Cross section of simulation model.

반경방향으로 균일하게 배열되어 있는 캘리퍼 형식을 취하고 있는 브레이크를 모델로 선정하였다. 디스크에 패드가 양쪽에서 균일한 압력으로 가해져 마찰열이 발생하고, 이 발생한 마찰열은 디스크와 패드를 통하여 소재 내부로 전도가 되어 표면에서 공기와 대류 냉각을 하게 되고, 내부에서는 디스크를 통하여 전도된 마찰열이 방열구를 통해 유입되는 공기에 의해서 냉각되어 진다. Fig. 1은 패드와 디스크의 접촉면의 발열부위와 통풍구를 지나는 공기, 허브 등 열이동 매체의 단면을 나타내고 있는 3차원 해석 모델이다. 입구 형상을 그림과 같이 수정하여 원래의 형상과 비교하였다. 이때 제동에 의해서 발생하는 마찰열은 3초의 시간동안 제동이 이루어지고, 3초 동안은 제동없이 주행이 이루어지는 상태를 반복하여 정지상태에 이루어질 때까지의 상태를 해석하였다.

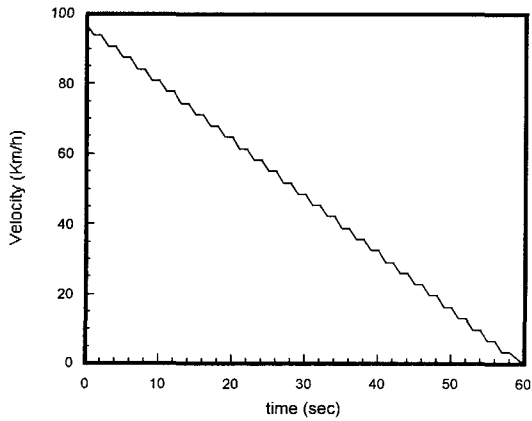
Fig. 2에서는 본 연구에서 수행한 제동모드를 보여주고 있다. 제동이 반복되는 동안 속도가 줄어들면서 마찰열은 줄어들고, 주행시에는 마찰열이 발생이 되지 않는 상태가 반복됨을 보여주고 있다. 그림 (a)는 제동과 주행이 3초씩 반복적으로 이루어지고, 그림 (b)는 1초씩 반복적으로 이루어져 정지상태에 이르게 된다. 이때 발생하는 열량이 같은 조건에서 다른 제동모드에 대해서 적용하였다.

## 3. 해석결과 및 고찰

주행중인 자동차에 제동을 반복적으로 가했을 경우에 발생하는 마찰열이 디스크와 패드로 각각 전도가 되고, 디스크를 통해 전도되어지는 마찰열에너지는 통풍구를 통해 유입된 공기에 의한 대류에 의해서 냉각되어 진다. Fig. 3은 제동 및 비제동을 반복됨에 따라 마찰면에서 증가하는 온도분포를 나타내고 있다. 마찰



(a) braking 3sec



(b) braking 1sec

Fig. 2. Braking mode.

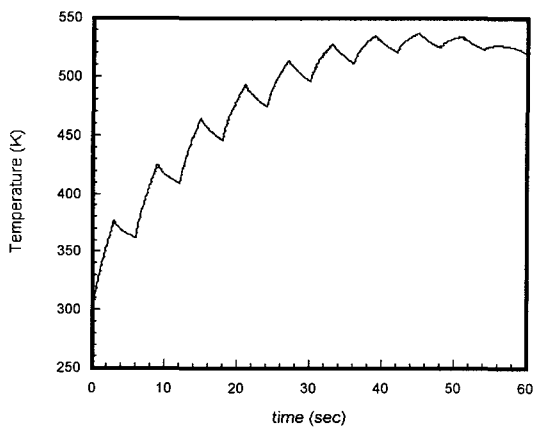


Fig. 3. Temperature distribution of friction surface.

에 의해 발생된 열 에너지에 의해 제동이 진행되는 동안 급격한 온도 상승이 있으며, 비제동시 방열에 의한

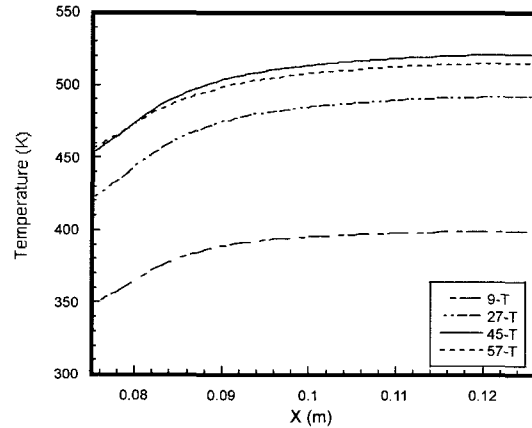


Fig. 4. Temperature distribution at  $y=0.024$  m.

온도 감소가 반복된다. 제동이 반복됨에 따라 마찰면에서의 최대 온도는 증가하나 제동 횟수가 증가하여 속도가 감소하면 제동시 발생 열량이 감소함으로 그 온도 상승폭은 감소하여 30초 이후의 최대 온도는 537 K로 거의 일정하게 나타났다.

Fig. 4는 통풍구 아랫면( $y=0.024$  m)에서의 유동진행 방향으로 도시한 온도 분포를 나타낸 것이다. 입구측에서 유동이 진행됨에 따라 완만한 온도 상승을 이룬 후  $x=0.09$  m 이후 일정한 온도를 유지하며, 제동시간이 증가할수록 표면의 온도는 증가하여 45초에서 최대 온도에 도달한 후 제동이 완료됨에 따라 그 온도는 감소되고 있다( $t=57$ 초). 입구 부분에서 일정한 온도 분포를 보이지 않고 완만한 온도 상승을 이루는 것은 공기의 대류 냉각이 입구 쪽에서 활발하게 일어나고 있음을 보여주고 있다.

통풍구 위면( $y=0.033$  m)에서의 유동진행 방향 온도 분포는 Fig. 5와 같다. 통풍구 입구로부터 출구까지 일정한 온도가 제동 횟수에 따라 제동초기에는 급격하게 증가하나 후기에 완만한 온도 상승 및 제동 완료후 온도 감소를 나타낸다. 제동 횟수가 증가하면서 최대 온도에 도달하는 45초에는 초기 온도보다 255°C 상승하였고, 통풍구의 출구에서 위면( $y=0.033$  m)이 아랫면( $y=0.024$  m)보다 7°C 온도가 높음을 보여준다. 통풍구 아랫면은(Fig. 4) 그 구조상 디스크 판과 허브, 차축과 연결됨으로 인해 마찰면에서의 발생 열이 전도됨으로써 입구 부근의 온도가 상대적으로 낮게 나타남을 알 수 있다. 같은 이유로 위면의 평균 온도는 아랫면에 비해 높게 나타난다.

Fig. 6은 통풍구 중심( $x=0.105$  m)에서 폭 방향을 따

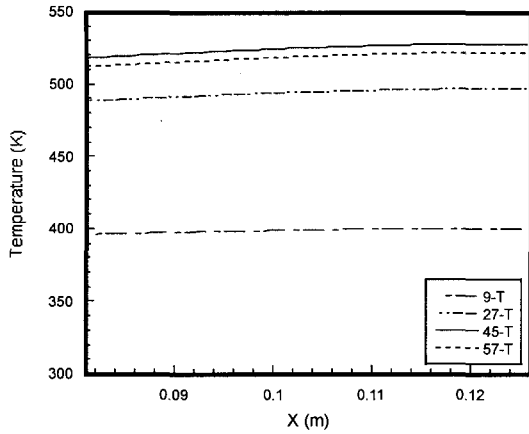


Fig. 5. Temperature distribution at  $y=0.033$  m.

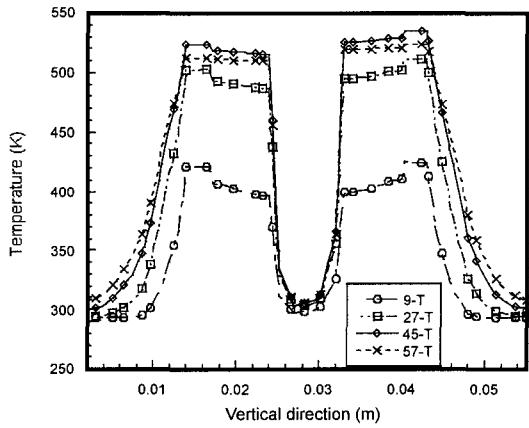


Fig. 6. Temperature distribution of the middle at ventilated region ( $x=0.105$  m).

라 변화하는 온도 분포를 제동 시간에 대해서 나타낸 것이다. 디스크 양쪽면과 패드 접촉면에서의 극대 온도와 패드 및 디스크 내부에서의 열전도, 통풍구로의 대류에 의한 온도 변화를 보여주고 있다. 디스크 ( $0.017\text{ m} \leq y \leq 0.024\text{ m}$ ,  $0.033\text{ m} \leq y \leq 0.04\text{ m}$ )면의 온도가 패드( $0.002\text{ m} \leq y \leq 0.0016\text{ m}$ ,  $0.041\text{ m} \leq y \leq 0.055\text{ m}$ )의 온도보다 높은 열전도도에 의해 현저하게 높게 나타나며, 상부 발열면에서의 최대 온도는 45초후  $264^{\circ}\text{C}$ 가 된다. 온도 곡선이 통풍구의 중심을 기점으로 대칭을 이루지 못하고 있는 것은 발생한 마찰열의 이동이 디스크의 상부와 하부에 각기 다르게 전도됨을 나타내고 있다. 하부에서 발생하는 마찰열은 허브쪽으로 연결되어 있는 디스크를 통하여 디스크의 상부보다 원활하게 이동된다. 상부의 디스크와 하부의 디스크의 온

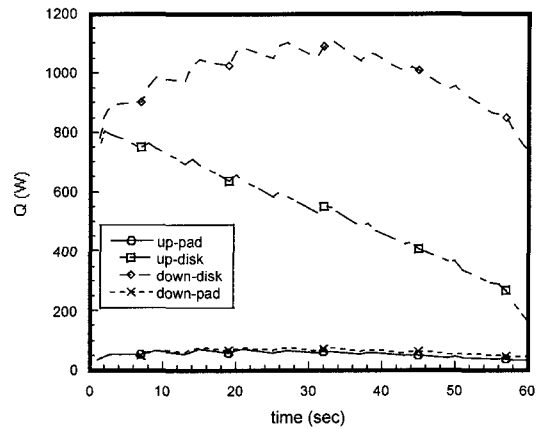


Fig. 7. Heat conduction rate of the disk and pad.

도 차이가 제동이 시작된지 9초가 지난 후에는  $3^{\circ}\text{C}$ 의 차이를 보이고, 45초가 경과한 후에는  $11^{\circ}\text{C}$ 의 차이를 보여주고 있다. 상부의 디스크가 하부보다 높은 온도를 보여주는 것은 디스크 내의 온도 불균일로 인하여 디스크의 열적 변형이 발생 할 수 있다는 것을 알 수 있으며 이는 브레이크의 열적 불안정성이 되는 요인이 될 것이다.

Fig. 7은 디스크와 패드 사이의 마찰면에서 발생된 열의 이동 형태를 정량적으로 나타낸 결과이다. 상·하 각각의 접촉면에서 패드의 내부와 디스크의 내부를 통해 전도되어 가는 열량( $Q=kA\Delta T/\Delta x$ )을 전체 면적에 대해 계산하였다. 제동이 반복됨에 따라 초기에는 디스크 아랫면에서는 허브의 낮은 온도에 의해 용이한 열전도 증가를 나타낸 후 27초 후부터는 속도 감소에 따른 마찰 열량 감소로 인해 서서히 감소한다. 패드로의 전도량은 낮은 열전도도의 영향으로 적은양의 이동을 나타낸다. 디스크 윗면에서는 전도에 의한 열 방출이 상대적으로 적게되며 패드를 통한 열 이동은 약간 증가한다. 허브 쪽으로 연결이 되어 있는 아래쪽에서의 발열상태는 마찰열이 디스크로 약 94.3%, 패드로 약 5.7% 전열이 되었고, 윗쪽에서의 발열상태는 발생 열이 디스크로 약 90.3%, 패드로 약 9.7% 전열이 되고 있다.

통풍구 내의 대류에 의한 방열 성능은 디스크의 통풍구를 흐르는 공기 유속의 영향을 받을 것으로 판단된다. 따라서 변화되는 각 유입 속도(0.5 m/s, 1.0 m/s, 1.5 m/s)에 대해서 디스크 내부에서의 최대 온도를 제동시간에 대해서 나타낸 그림이 Fig. 8이다. 제동이 반복됨에 따라 온도가 증가하여 최대 온도  $540\text{ K}$ 까지

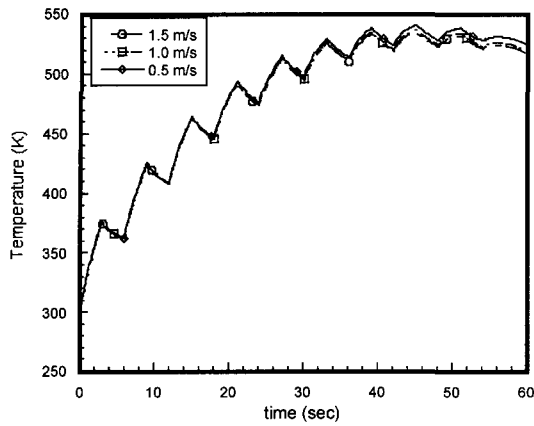


Fig. 8. The effect of inlet velocity on the maximum temperature.

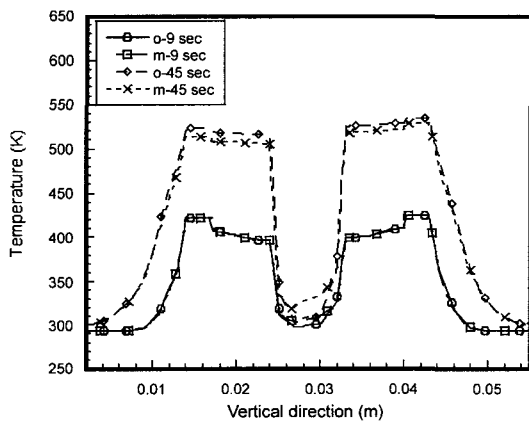


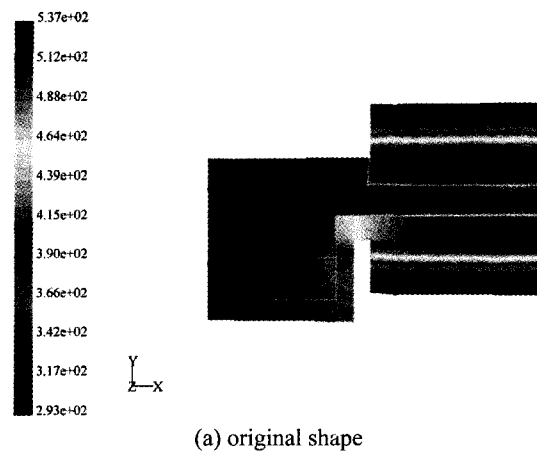
Fig. 9. Temperature distribution at the middle of ventilated region ( $x=0.105$  m).

증가하고 있으나, 유입 속도의 증가는 이 최대 온도를 냉각시키는데는 충분치 않음을 알 수 있다. 제동 시간이 진행되면서 통풍구에 유입되는 속도의 변화에 따른 최대 온도는 변화가 없다가 45초가 경과하면 유입 속도가 1.0 m/s 일때가 1.5 m/s 일때보다  $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$  높으며, 0.5 m/s 일때가 1.0 m/s 일때보다  $\Delta T=4^{\circ}\text{C}$  높은 온도를 나타낸다.

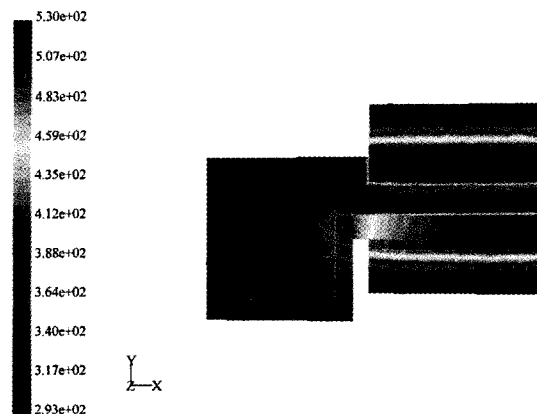
통풍구 내부로 유입되는 공기는 유로의 형상에 따라 유동 구조에 변화를 초래한다. 따라서 Fig. 1과 같이 공기의 흐름이 정체되지 않고 바로 통풍구에 유입될 수 있도록 유로의 형상을 변화시키면 통풍구의 온도 분포와 디스크 내의 열에너지의 흐름이 바뀌게 될 것이다. Fig. 9에서는 통풍구 중심( $x=0.105$  m)에서 폭 방향을 따라 변화하는 온도 분포를 제동 시간이 9초,

45초가 경과한 경우에 대해서 나타낸 것이다. 그림에서 첨자 o는 원래의 형상, m은 입구의 형상변화해서 수정했을 때를 나타낸다. 형상의 변경 전과 후가 9초가 경과한 후에는 패드 및 디스크 면의 온도 변화가 크지 않으나, 입구 형상 변화에 따라 대류가 활발하게 발생함으로써 공기 온도가  $10^{\circ}\text{C}$  높게 나타난다. 45초가 경과한 후에는 상부의 디스크에서 입구 형상을 변경하였을 때가 변경전보다  $8^{\circ}\text{C}$  낮게 나타나고 있음을 보이고, 하부의 디스크에서는  $10^{\circ}\text{C}$  낮게 나타나 형상 변화가 전도에도 영향을 끼치고 있음을 보여준다. 또한 통풍구의 중심에서는 형상 변화에 의한 속도 패턴 변화로 공기의 온도가  $23^{\circ}\text{C}$  높게 나타남으로서 형상 변경전보다 대류가 활발히 진행되고 있음을 보여준다.

Fig. 10은 디스크와 패드 사이의 접촉면에서 발생된 열이 제동이 반복됨에 따라 허브와 축, 통풍구로 전달



(a) original shape



(b) modified shape

Fig. 10. Contour of temperature distribution of ventilated disk at  $t=45$  sec.

됨에 따라 변화하는 열분포를 원래의 상태와 Fig. 1과 같이 수정된 상태에서 나타낸 그림이다. (a)에서는 원래의 상태로서 제동이 완료되는 시점에서 아직 축으로의 영향은 크지 않으며 허브로의 전도 및 허브와 유입 공기와의 대류에 의한 대류 열전달이 중요한 열이동 경로가 됨을 알 수 있다. 이때 상-하 디스크면의 온도 차이는  $\Delta T=21^{\circ}\text{C}$ 로서 윗면의 냉각성을 향상시킬 필요가 제기된다. 통풍구에서의 유입형상이 변화된 (b)에서는 열이동 경로의 차이가 생기는 것을 볼 수 있다. 제동이 반복됨에 따라 개선된 형상을 통하여 신속한 열의 방출이 가능함으로서 원래 형상과 비교하여 안정된 온도 분포를 가질 수 있었다.

디스크의 열전도도는 열의 방출에 영향을 미친다. 최근 경량화등 문제로 검토되고 있는 알루미늄은 열전도도가 디스크의 4.5배가 된다. Fig. 11은 유로의 밀면 ( $y=0.024\text{ m}$ )에서 발생하는 온도를 기존의 디스크와 재질을 알루미늄으로 바꾼 후의 온도 분포를 보여준다. 발열이 시작된지 9초 후의 온도 분포를 보면 기존의 디스크일 때보다 통풍구의 입구( $x=0.075\text{ m}$ )에서는  $4^{\circ}\text{C}$ , 출구( $x=0.128\text{ m}$ )에서는  $21^{\circ}\text{C}$  정도 낮게 나타남을 볼 수 있다. 이는 마찰에 의해 발생하는 열에너지를 유로의 밀면에 빠른 전도로 이동시킴으로서 온도를 높인 결과이다. 그 이후에는 기존의 디스크일 때보다 빠른 열에너지의 전도로 많은 열에너지를 허브쪽으로 이동시킴으로서 유로 근방의 온도를 떨어뜨리는 결과를 초래한다. 45초일 때에는 재질이 알루미늄일때가 통풍구의 입구( $x=0.075\text{ m}$ )에서는  $17^{\circ}\text{C}$ , 출구에서는  $49^{\circ}\text{C}$  정도 낮게 나타남을 보이고 있다. 시간이 지난면서 계속

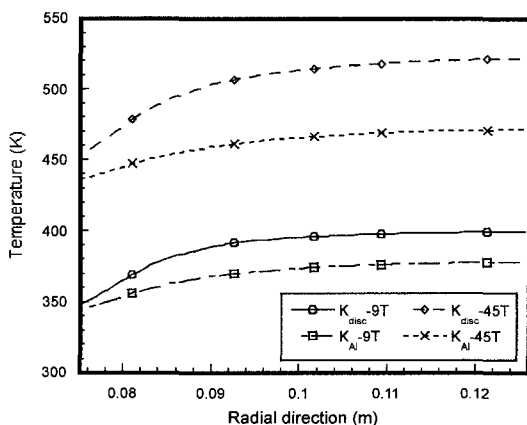


Fig. 11. Temperature distribution for radial direction of disk & aluminum.

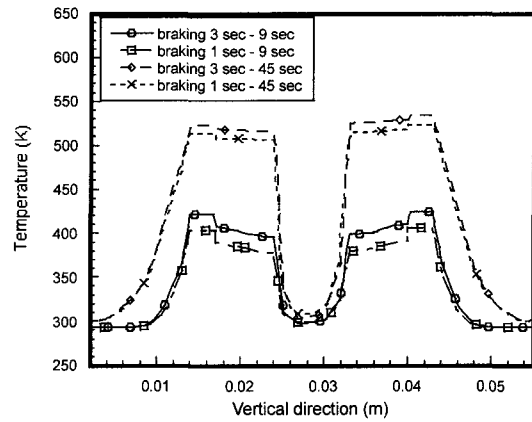


Fig. 12. Temperature distributions along the vertical direction at the middle of ventilated region ( $x=0.105\text{ m}$ ).

온도의 차이가 큰 것은 계속해서 큰 열에너지의 이동이 있다는 것을 의미한다. 알루미늄의 높은 열전도도에 의해서 열에너지의 이동이 빠르게 이루어져 디스크 내의 온도가 전체적으로 낮아짐을 알 수 있다.

Fig. 12은 지금까지의 제동 모드를 Fig. 2의 (b)와 같이 바꿔서 제동하였을 때 통풍구 중심( $x=0.105\text{ m}$ )에서 원주 방향을 따라 변화하는 온도 분포를 각 제동 모드에 대해 9초와 45초에서 나타낸 것이다. 제동모드가 3초 간격으로 이루어지는 것과 1초 간격으로 이루어져도 디스크의 상부와 하부에서 발생하는 마찰열은 각기 디스크와 패드로 전도되지만 통풍구를 중심으로 대칭적으로 일어나지 않는 것은 Fig. 6에서 보여주는 것과 같은 현상이다. 제동 모드를 바꾸어도 하부의 디스크에 상부의 디스크보다 많은 열을 이동함을 보여준다. 제동 시간이 9초 경과한 후 제동모드가 1초 간격으로 이루어지는 것이 상부의 디스크에서는  $\Delta T=19^{\circ}\text{C}$ , 하부의 디스크에서는  $\Delta T=18^{\circ}\text{C}$  낮게 나타나고, 제동 시간이 45초가 경과한 후에는 상부의 디스크에서는  $\Delta T=11^{\circ}\text{C}$ , 하부의 디스크에서는  $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$  낮게 나타남을 보여준다.

#### 4. 결 론

실제 제동 조건을 모사하여 비정상적으로 변화하는 브레이크와 패드 사이의 열적 거동을 해석하였다.

1) 디스크와 패드의 마찰면에서 나타나는 최대 온도는 제동, 비제동의 반복과 함께 지속적으로 증가하나 제동이 완료됨에 따라 완만한 온도 상승 후 냉각된다.

또한 이 접촉면의 최대 온도는 디스크의 양쪽면에서 비대칭적 온도차를 나타냄으로서 열변형의 주요 요인이 될 것으로 판단된다.

2) 마찰면에서 발생한 열량의 이동 경로를 분석하였다. 각각 디스크와 패드 방향으로 이동되는 열전도비는 허브 연결부는 94.3%, 5.7%, 비연결부는 90.3%, 9.7%로써 차이를 나타내었다.

3) 통풍구를 통과하는 공기에 의한 대류열전달은 디스크 내부의 열전도량에 비해 상대적으로 크지 않으나, 유로의 입구 형상을 변경시킴으로서 냉각성능을 향상시킬 수 있었다.

4) 최근 경량화를 문제로 검토되고 있는 알루미늄 디스크를 대상으로 열전도도의 영향을 분석한 결과, 디스크 내부의 온도 강하 및 온도 균일성이 향상됨으로서 안정된 열적 거동을 나타내었다.

5) 제동 주기를 짧게 하여 제동 횟수를 증가시킨 반복 제동의 경우 디스크 내부 온도가 낮아진 안정된 제동 효과를 나타내었다.

## 후 기

본 연구는 전북대학교 자동차신기술 연구소의 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. M.A. Tanvir, 1988, "On the cooling of disk brakes on a train," *Rail International*, March, pp 37-42.
2. A Floquet, M. C. Dubourg, 1994, "Nonaxisymmetric Effect for Three-Dimensional Analysis of a Brake," *Journal of Tribology*, vol.116 pp.401-408.
3. Rolf Krusemann, Gerald Schmidt, 1995, "Analysis and Optimization of Disk Brake Cooling via Computational Fluid Dynamics," *SAE*, 950-791.
4. Jian J. Zhang, 1997, "A High Aerodynamic Performance Brake Rotor Design Method for Improved Brake Cooling," *SAE*, 973-016.
5. Akira Fukano, Hiromichi Matsui, 1986, "Development of Disc-Brake Design Method Using Computer Simulation of Heat Phenomena," *SAE*, 860-634.
6. 민현석, 김청균, 1994, "디스크 브레이크 마찰면에서의 온도분포 해석," *Tribology Journal*, vol.2, pp. 71-79.
7. 조승현, 이일권, 김청균, "벤틸레이티드 디스크 브레이크에서 공냉 효과가 열변형 거동에 미치는 영향에 관한 수치적 연구," *윤활학회 춘계학술대회*, 1999.
8. Fluent Inc., 1998. *Fluent User's Guide(V.5.0)*, Fluent Inc.