

자동차 디스크 브레이크의 방열성능에 관한 연구 (Thermal Behavior of Automotive Ventilated Disk Brake)

김진택 (전북대 대학원), 백병준 (전북대 공대)

Jin Taek Kim (Graduate School, Chonbuk Univ.), Byung Joon Baek (Chonbuk Univ.)

Key Words : Ventilated Disk Brake(통풍구 디스크 브레이크), Ventilated hole(통풍구), Pad(패드), friction heat(마찰열)

ABSTRACT : The heat generated in contact type braking system can cause an unacceptable braking performance. Thermal behavior of ventilated disk brake system is presented in this paper. The temperature and velocity fields of 3-D unsteady simulated model are obtained using a software package "FLUENT". The numerical results show that there exists a temperature nonuniformity between the disk faces contacting with pads. The conduction rate through the disk and pad is calculated and the effect of material conductivity is also investigated.

1. 서론

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, 고출력화의 요구에 따라 증가된 마찰열의 원활한 방출은 브레이크 수명, 안전성등을 고려하여 많은 연구가 진행되어 왔고, 디스크의 냉각에 대해서 많은 연구들이 수행되어져 왔다.

Tranvir⁽¹⁾은 브레이크의 온도 상승에 의한 성능저하를 방지하기 위하여 철도 차량에 사용되는 원판 브레이크에 통풍구를 설치하여 냉각 성능이 향상될 수 있음을 확인하였다.

Floquet와 Dubourg⁽²⁾는 축대칭으로 운동하는 디스

크 브레이크 모델에 비대칭, 비정상 상태의 열유속 조건에 대한 분석으로 디스크내의 온도장을 계산하였다.

Day⁽³⁾는 트럭 브레이크의 브레이크 마찰에 대해 수치적 분석에 의해서 고압력 제동시 브레이크의 온도, 라이닝 마모와 압력분포, 열적 변형을 예측하고, 마찰면에서 표면온도에 대한 비교적 정확한 온도 예측을 하였다.

Schmidt⁽⁴⁾는 주행중인 자동차의 앞부분에 위치해 있는 제동장치 대해서 수치적으로 디스크를 해석하여 유동장의 흐름으로 회전하는 디스크에 대한 냉각에 대해서 연구하였고, Zhang⁽⁵⁾은 브레이크 로터 형상에 대한 수치적 계산으로 디스크의 냉각에 대해서 연구하여 로터 형상에 의해서 디스크의 냉각이 향상된다는 것을 보여주었다.

Fukano⁽⁶⁾는 공기 유동 속도에 대해서 디스크에 대해 열거동을 분석하여 열응력 분포를 연구하였다. 국내에서는 최근 조승현⁽⁷⁾등에 의해 공냉 효과가 디스크 브레이크의 열변형에 미치는 영향을 고찰하는등 관심이 증대되고 있으나 마찰 열의 상세한 열의 이동 구조(mechanism)가 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 제동초기에서 제동완료시까지 실제 제동조건을 모사하여 비정상적으로 변화하는 열이

동 구조를 분석하고, 브레이크 내부의 온도 특성 및 통풍구의 영향을 고찰하고자 한다.

2. 수치적연구

2.1 해석모델

디스크와 패드사이의 접촉면에서 발생하는 마찰열을 잘 소산시킬 수 있도록 하기 위하여 32개의 방열구가 반경방향으로 균일하게 배열되어 있는 켈리퍼 형식을 취하고 있는 브레이크를 선정하였다. 디스크에 패드가 양쪽에서 균일한 압력으로 가해져 마찰열이 발생하고, 이 발생된 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 지나가는 공기, 허브 등 열이동 매체의 단면을 나타내고 있는 3차원 해석 모델이다.

이때 제동에 의해서 발생하는 마찰열은 3초의 시간동안 제동이 이루어지고, 3초 동안은 제동없이 주행이 이루어지는 상태를 반복하여 정지상태에 이루어질 때까지의 상태를 해석하였다.

Fig.2에서는 제동을 반복하는 동안 마찰면에서 발생하는 열발생을 보여주고 있다. 여기에서의 발생열량은 실제 접촉면에서 발생하는 온도를 기초로 작은 볼륨에서 발생할 수 있는 열량을 계산하였다. 제동이 반복되는 동안 속도가 줄어들면서 마찰열

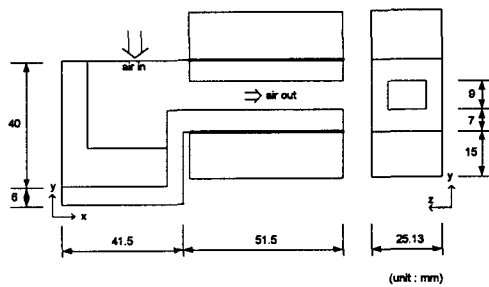
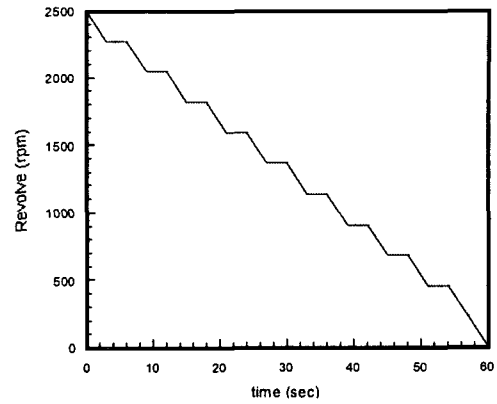
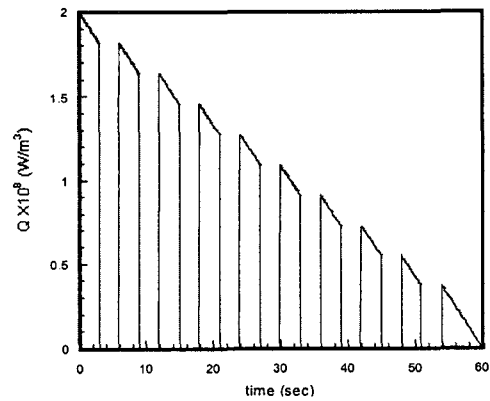


Fig. 1 Cross section of simulation model



(a) Braking mode



(b) Braking energy distribution

Fig. 2 Braking mode and heat generation

은 줄어들고, 주행시에는 마찰열이 발생이 되지 않는 상태가 반복됨을 보여주고 있다.

2.2 해석방법

디스크와 패드 사이의 접촉면에서 발생하는 마찰열을 소재내의 전도와 방열구를 통한 공기의 대류 냉각을 고찰하기 위하여 유한체적 프로그램인 FLUENT를 사용하여 해석하였다. 디스크와 패드 사이에는 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 $10W/m^2K$ 로 하였고, 마찰면에서의 복사열은 없다

고 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 60mph로 주행중인 자동차가 정지하는데 제동과 주행을 반복해서 실시했을 때의 마찰열을 고려한 비정상 문제로 해석하였다. 해석에서 사용된 패드와 디스크의 열전도계수 ($W/m \cdot K$)는 1.2, 48이고 밀도(kg/m^3)는 2595, 3228이고, 비열($J/kg \cdot K$)은 1465, 419이다.

3. 해석결과 및 고찰

주행중인 자동차에 제동을 반복적으로 가했을 경우에 발생하는 마찰열이 디스크와 패드로 각각 전도가 되고, 디스크를 통해 전도되어지는 마찰에너지는 통풍구를 통해 유입된 공기에 의한 대류에 의해서 냉각되어 진다. Fig.3은 반복되는 제동에 따라 마찰면에서 증가하는 온도분포를 나타내고 있다. 제동시 급격한 온도 상승과 비제동시 냉각의 반복이 계속되면서 온도가 증가하나, 제동의 반복 횟수가 증가될수록 속도 감소와 마찰열 감소에 따라 온도 상승률이 줄어들음을 보여주고 있다.

Fig.4는 통풍구 아랫면($y=0.024m$)에서의 유동진행 방향으로 도시한 온도 분포를 나타낸 것이다. 입구 측에서 유동이 진행됨에 따라 완만한 온도 상승을 이룬 후 $x=0.09m$ 이후 일정한 온도를 유지하며, 제동시간이 증가할수록 표면의 온도는 증가하여 45초에서 최대 온도에 도달한 후 제동이 완료됨에 따라 그 온도는 감소되고 있다($t=57초$).

통풍구 위면($y=0.033m$)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. 통풍구 아랫면은 (Fig.4) 그 구조상 디스크 판과 허브, 차축과 연결

됨으로 인해 마찰면에서의 발생 열이 전도됨으로써 입구 부근의 온도가 상대적으로 낮게 나타남을 알 수 있다. 같은 이유로 윗면의 평균 온도는 아랫면에 비해 높게 나타난다.

Fig.6은 통풍구 중심($x=0.105m$)에서 원주 방향을 따라 변화하는 온도 분포를 나타낸 것이다. 디스크 양쪽면과 패드 접촉면에서의 극대 온도와 패드 및 디스크 내부에서의 열전도, 통풍구로의 대류에 의한 온도 변화를 보여주고 있다. 아랫면에서 발생된 열량은 제동이 증가함에 따라 판 주위의 공기와 대류에 의한 열전달이 높게 이루어지나, 통풍구의 유로를 통한 열전달은 윗면의 열전달이 적은 대류 효과를 나타낸다.

Fig.7은 제동 시작 9초 후의 통풍구 내부 x-y 평

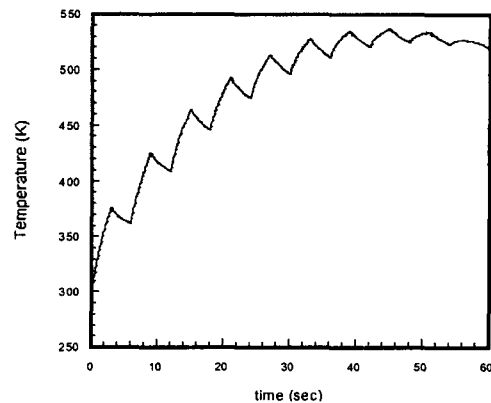


Fig. 3 Temperature distribution of friction surface

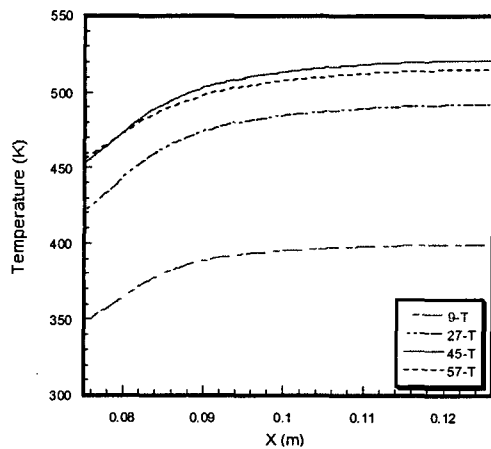


Fig. 4 Temperature distribution at $y=0.024 m$

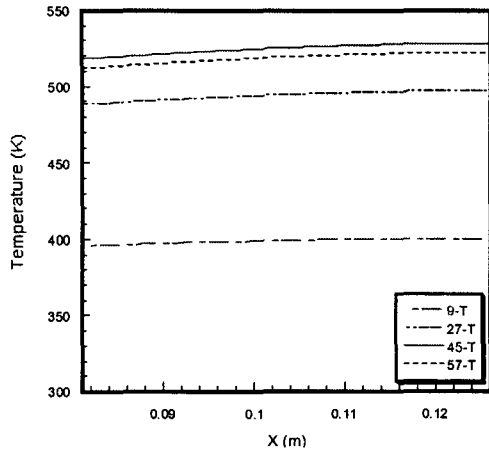


Fig. 5 Temperature distribution at $y=0.033$ m

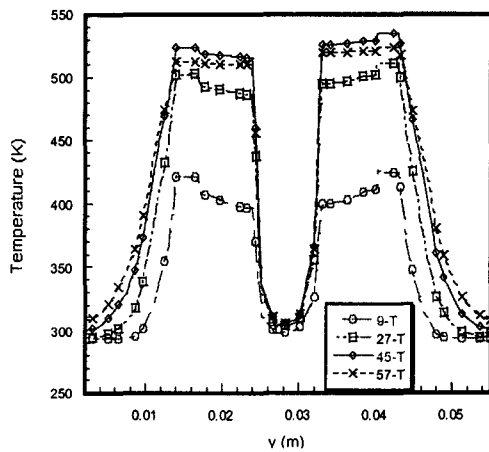


Fig. 6 Temperature distribution of the middle at ventilated region ($x=0.105$ m)

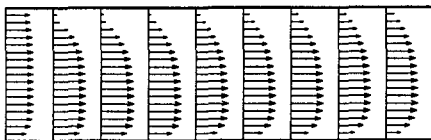
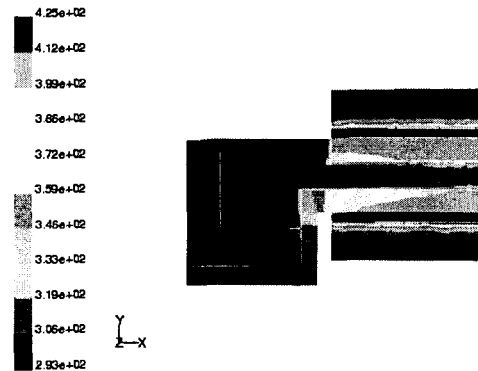


Fig. 7 Velocity profile of ventilated region at time $t=9$ sec

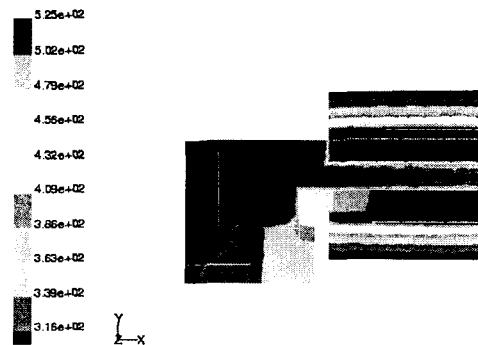
면에서의 속도 벡터를 나타낸 것이다. 차축과 평행하게 유입된 공기가 허브와의 공간에서 순환한 후

그림의 통풍구에 유입된다. 허브와 연결된 통풍구의 아랫면은 윗면에 비해 길이가 크기 때문에 경계층이 조기에 형성되어 상대적으로 큰 속도를 유지하며 유동이 진행됨에 따라 유사한 속도 분포를 이룬다. 유입된 공기의 이러한 유동 특성은 유로의 윗면과 아랫면의 대류 효과가 다르게 나타나는 원인이 된다.

Fig.8은 디스크와 패드 사이의 접촉면에서 발생된 열이 제동이 반복됨에 따라 허브와 축, 통풍구로 전달됨에 따라 변화하는 열 분포를 나타낸 그림이다. 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 디스크의 성능을 추적할 수 있는 변수로 판단되며, 윗면의 냉각성능을 향상시킬 필요가 제기된다.



(a) $t = 9$ sec



(b) $t = 57$ sec

Fig. 8 Contour of temperature in brake system

Fig.9는 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 인해서 서서히 감소한다. 패드의 전도량은 낮은 열전도도($k=1.2\text{w/m}\cdot\text{K}$)의 영향으로 적은양의 이동을 나타낸다. 디스크 윗면에서는 전도에 의한 열

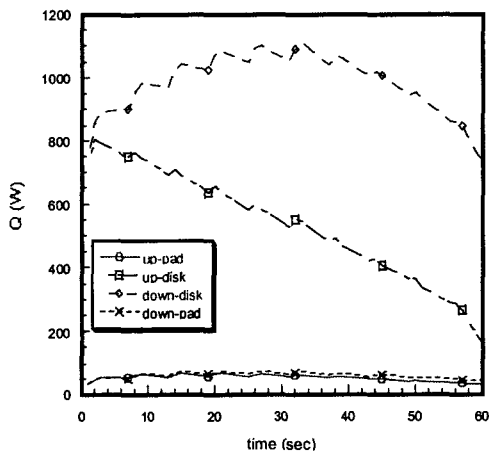


Fig. 9 Heat conduction rate of the disk and pad

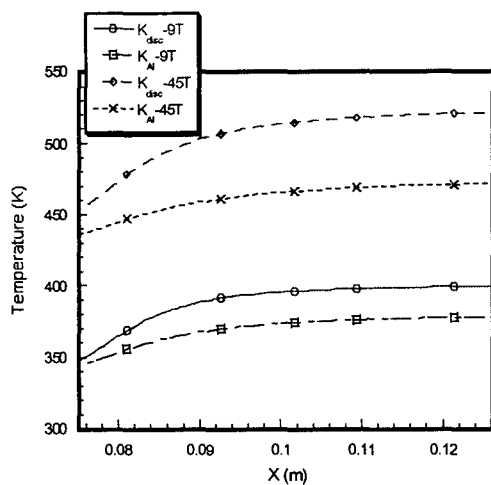


Fig. 10 Temperature distribution of different material

방출이 상대적으로 적게되며 패드를 통한 열 이동은 약간 증가한다. 허브 쪽으로 연결이 되어 있는 아래쪽에서의 발열상태는 마찰열이 디스크로 약 94.3%, 패드로 약5.7% 전열이 되었고, 윗쪽에서의 발열상태는 발생열이 디스크로 약 90.3%, 패드로 약9.7% 전열이 되고 있다.

디스크의 열전도도는 열의 방출에 영향을 미친다. 최근 경량화등 문제로 검토되고 있는 알루미늄($k=202.4\text{w/m}\cdot\text{K}$)은 열전도도가 디스크의 4.2배가 된다. Fig.10은 9초와 45초에서의 유로의 밀면($y=0.024\text{m}$)에서의 온도분포를 보여주고 있다. 유로면을 따라 나타나는 온도의 분포도는 비슷하게 나타나나 하류로 진행됨에 따라 낮은 온도 분포를 보이고 있다. 제동 시간이 경과하면서 통풍구 입구에서도 열전도에 의하여 낮은 온도를 보여주고 있다. 알루미늄의 높은 열전도도에 의해서 허브쪽에서의 열에너지의 이동이 빠르게 이루어져 디스크 내의 온도가 전체적으로 낮아짐을 알 수 있다.

현재 사용되고 있는 형상의 통풍구 유입 속도 분포는 공기가 유입된 후 회전축과 디스크 사이의 넓은 공간에서 정체된 후 통풍구를 통해 유입된 후 일반적인 덕트 유동과 유사한 덕트의 중심이 가장 속도가 높고 벽 주위는 낮은 속도 분포를 이룬다. 공기의 흐름이 정체되지 않고 바로 통풍구에 유입될 수 있도록 유로의 형상 변화에 의하여 측정하는 벽 부위의 속도를 증가시킴으로서 달라지는 벽면의 온도를 Fig. 11에서 보여주고 있다.

입구 형상을 변화시킨 형상과 변화시키지 않은 원래 형상에 대해 유로의 밀면의 온도를 비교한 것이다. 그림에서 첨자 o는 원래의 형상, m은 입구의 형상변화해서 수정했을 때를 나타낸다. 제2차 제동후(9초)에서 통풍구의 입구부분의 온도는 입구 형상 수정에 의한 영향이 적게 나타나며, 연결부에 접근된 위치에서 온도 강하가 크게 되어 접촉면($x=0.081\text{m}$)에서 13°C 낮은 온도가 된다. 45초 후에는 입구에서의 형상 수정에 대한 온도 변화가 명확하게 나타난다. 45초에서는 통풍구 입구($x=0.081\text{m}$)에서의 온도 변화가 43°C 차이가 생긴다. 또한 축방향으로의 열전도량 증가는 통풍구를 통한 냉각량을 감소시킴으로서 통풍구의 출구에서도 입구 형상을 변화시킨 것이 원래 형상의 것보

다 9.5°C 낮게 나타남을 보이고 있다. 시간이 진행됨에 따라 입구 형상 변화를 시킨 연결부로의 많은 열에너지가 전도되면서 전체적으로 디스크의 온도가 낮아진 결과를 얻을 수 있다. 주행과 제동을 반복적으로 수행하였을 때 상부의 디스크가 하부의 디스크보다 온도가 높게 나타나고 있다. 이는 상부의 디스크에 축적되는 열이 크다는 것을 의미한다. 상부 디스크의 온도에 영향을 주기 위하여 열이 하부 디스크로 이동할 수 있는 면적을 조정하였다. 사용되고 있는 모델의 통풍구

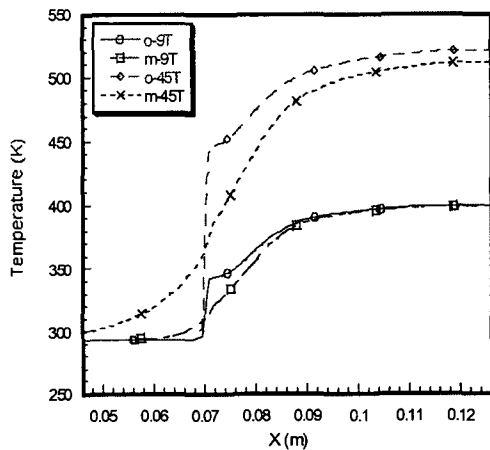


Fig. 11 Temperature distribution for radial direction of disk (o:original , m:modified)

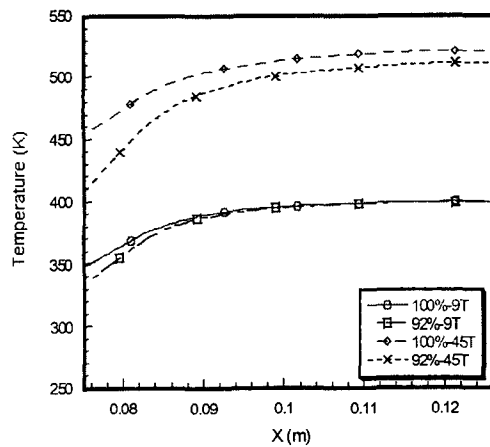


Fig. 12 Temperature distribution for ventilated area ratio

의 면적을 100%라고 하면 92%로 통풍구의 면적을 조정하였다. 통풍구의 면적은 유로의 높이는 변화시키지 않고 유로의 밑면과 윗면을 감소시켜 디스크와 공기와의 접촉면적을 줄였다. 통풍구의 면적을 감소시킴으로서 전도의 영향을 키워 상부와 하부의 온도 차이를 감소시켜보려 한다. 통풍구의 밑면(y=0.024m)에서 통풍구의 면적비를 달리하여 온도 분포를 유동 방향에 대해서 살펴본 것이 Fig. 12이다. 면적비를 92%로 하여서 주행과 제동을 이루었을 때 제동 시간이 9초가 경과한 후에는 통풍구의 입구에서 $\Delta T=13^\circ\text{C}$ 나타남을 볼 수 있다. 제동 시간이 45초가 경과한 후에는 입구에서 $\Delta T=43^\circ\text{C}$, 출구에서는 $\Delta T=10^\circ\text{C}$ 낮게 나타남을 볼 수 있다. 통풍구의 면적을 줄임으로서 통풍구를 지나는 공기의 유속 또한 커져서 접촉면에서의 대류가 활발히 일어나고 있음을 보이고 있다. 또한 확장된 고체면을 통한 마찰열의 이동이 향상되어 온도 분포가 낮아짐을 알 수 있다.

4. 결론

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

- 1) 통풍구 입구로부터 출구까지 제동 횟수에 따라 온도가 증가하나 구조상 허브, 차축으로 연결되어 있는 부분에서는 열의 전도에 의해 입구 부분에서 낮은 온도를 보이고 있다. 이 온도의 불균일은 브레이크 디스크의 변형등의 성능에 영향을 주는 변수가 될 것이다.
- 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) 디스크 재료의 열전도도의 영향이 검토되었다. 높은 열전도도를 갖는 디스크 내부의 온도가 많이 하강하여 상대적으로 안정된 열적 거동이 이루어 짐을 볼 수 있다.
- 4) 디스크 내의 형상을 수정하여 유로에 유입되는 공기의 유동 패턴을 변화시킨 결과 유로에서의 공기에 의한 대류 냉각이 호전되는 것을 보았고,

형상을 수정한 재질에 의하여 열에너지의 전도에도 큰 영향을 주어 전체적으로 디스크내의 온도에 냉각 기능을 하게 되었다.

5) 통풍구의 면적비를 다르게 하여 디스크내의 온도 분포를 살펴보았다. 면적비를 달라짐으로서 전도량을 증가시켜 디스크의 최대 온도와 상부 디스크의 온도를 낮출 수 있었다. 최적의 통풍구의 형상과 면적비는 디스크 브레이크의 설계시 열변형의 방지를 위한 중요한 자료가 될 것이다.

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) A.J. Day, M. Tirovic, T.P. Newcomb, 1991, "Thermal Effects and Pressure Distributions in Brakes," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 205, pp. 199-205
- (4) Rolf Krusemann, Gerald Schmidt, 1995, "Analysis and Optimization of Disk Brake Cooling via Computational Fluid Dynamics," *SAE 950791*
- (5) Jian J.Zhang, 1997, "A High Aerodynamic Performance Brake Rotor Design Method for Improved Brake Cooling," *SAE 973016*
- (6) Akira Fukano, Hiromichi Matsui, 1986 "Development of Disc-Brake Design Method Using Computer Simulation of Heat Phenomena," *SAE 860634*
- (7) 조승현, 이일권, 김청균, "벤틸레이티드 디스크 브레이크에서 공냉 효과가 열변형 거동에 미치는 영향에 관한 수치적 연구," *운활학회 춘계 학술대회*, 1999
- (8) Fluent Inc., 1996, *Fluent User's Guide(V.4.4)*, Fluent Inc.