

## 디스크 브레이크의 방열구 형상비에 따른 열적 거동에 관한 연구

김진택<sup>†</sup>

전북대학교 자동차신기술연구소

### A Study of Thermal Behaviors on the Effect of Aspect Ratio of Ventilation Hole in Disk Brake

Jin-Taek Kim<sup>†</sup>

Automobile High Technology Research Institute, Chonbuk National University

**Abstract** – The adequate design of a passenger car braking system, which is directly related to the safety of a car, is very important since the safety is an essential design parameter of a car to keep men and car from the damage. The thermal behaviors of the ventilated disk has been investigated based on the air cooling effects during repeat braking operations. In this study, the 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 aspect ratio of ventilated hole on the heat dissipation was investigated.

**Key words** – ventilated disk brake, ventilated hole, aspect ratio, unsteady, repeated braking.

#### 1. 서 론

경제 성장으로 인해 급격하게 자동차가 증가되었고, 이와 더불어 자동차로 인한 교통사고는 높은 비율로 증가하고 있다. 이러한 사실은 차량에 의한 교통사고의 예방 차원에서 자동차의 제동 시스템에 대한 중요성을 크게 인식시키는 계기가 되고 있다. 산업이 발달함에 따라 요구되는 수송량의 증대 및 운행시간의 단축은 차량의 고속화를 필요로 하게 되었고, 자동차 엔진의 출력, 고속화 등을 통하여 차량운행의 고속화를 이룩하였다. 그러나, 차량의 고속화는 더욱 가혹한 상태로 제동장치의 작동을 요구하고 있다.

제동 시스템은 승용차의 주행속도, 도로조건, 하중, 패드 및 디스크의 재질과 형상, 차체의 형상 등에 맞는 최적설계가 요구되지만, 국내에서는 제동 시스템 설계

와 관련된 기반 기술의 부족으로 적절한 대응을 하지 못하는 실정이다[1].

제동 시스템의 부적절한 설계는 마찰면에서 발생하는 과도한 온도상승과 열변형을 야기하고[2,3], 이로 인한 소음과 진동[4]을 유발하며, 결국에는 자동차의 안정성에 치명적인 영향을 미치게 된다.

제동시스템은 주행하는 차량의 운동에너지를 기계적인 마찰에너지로 전환시킴으로서 차량을 안정하게 정지시키는 것을 목적으로 한다. 이에따라 1950년 말경에는 일체형의 디스크 브레이크 시스템이 개발되었고, 1975년 이후에는 새로운 개념의 벤틸레이티드 디스크 브레이크 시스템이 승용차와 철도 차량에 사용되는 원판 브레이크에 통풍구를 설치하여[5] 브레이크의 온도 상승에 의한 성능저하를 방지하고 냉각 성능이 향상될 수 있음을 확인하였다.

주행중인 자동차의 앞부분에 위치해 있는 제동장치 대해서 수치적으로 디스크를 해석하여 유동장의 흐름으

<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : kjtak@mail.chonbuk.ac.kr

로 회전하는 디스크에 대한 냉각에 대해서 연구되었고 [6], 또한 공기 유동 속도에 대해서 디스크에 대해 열 거동을 분석하여 열응력 분포가 연구되었다[7].

국내에서는 자동차에 통풍구가 설치되어 있는 원판 브레이크에 대해서 반복제동에 의한 열적 거동을 유한 요소해석 기법으로 해석되었고[8], 공냉 효과가 디스크 브레이크의 열변형에 미치는 영향을 고찰[9]하는 등 관심이 증대되고 있다.

최근 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. 차량이 주행과 제동을 반복적으로 수행하면서 정지 상태에 이를 경우 디스크 내의 온도의 불균일성은 디스크의 변형에 영향을 준다. 따라서 본 연구에서는 제동초기에서 제동완료시까지 실제 제동조건을 모사하여 비정상적으로 변화하는 열이동 구조를 통풍구의 입구와 출구의 변화에 따라 브레이크 내부의 온도 특성을 고찰하고자 한다.

### 2. 해석조건 및 제동모드

주행중인 차량은 패드에 압력이 가해져서 디스크와 패드 사이의 접촉면에서 발생하는 마찰열을 디스크의 마찰에 의해 운동에너지의 감소를 가져옴으로서 정지하게 된다. 주행중에 제동이 해제되면 즉 방열상태가 되면 패드와 디스크는 떨어지게 되어 발열은 멈추게 되고 디스크와 패드에 저장된 열에너지가 공기에 의해 대류 냉각된다. 제동시 전체 디스크의 1/6 구간에서 패드와 접촉에 의해서 마찰이 이루어지고, 나머지 5/6 구간에서는 축적된 마찰열이 외부 표면과 접촉하는 공기에 의해 대류 냉각된다. 따라서 본 모델에서는 제동이 이루어지는 3초의 1/6은 마찰열 발생, 5/6는 마찰열없는 상태에서 열이동하는 것을 반복하는 것으로 모사하였다. 본 연구에서는 60 mph로 주행중인 자동차가 정지하는데 제동과 주행을 반복해서 실시했을 때의 방열구를 통한 공기의 대류냉각을 고찰하기 위하여 유한체적 프로그램인 FLUENT를 사용하여 마찰열을 고려한 비정상 문제로 해석하였다.

디스크와 패드사이의 접촉면에서 발생하는 마찰열을 잘 소산시킬 수 있도록 하기 위하여 32개의 방열구가 반경방향으로 균일하게 배열되어 있는 캘리퍼 형식을

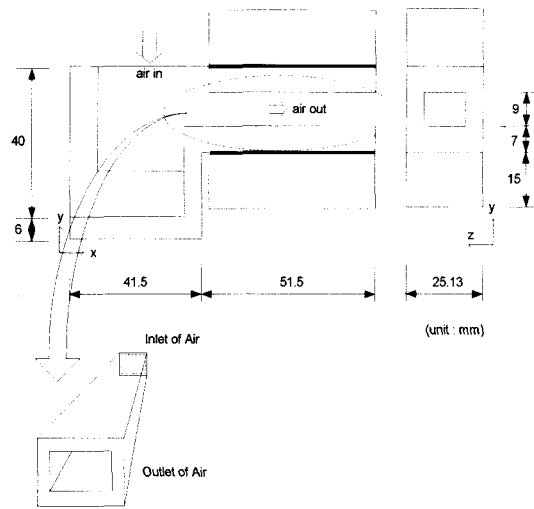


Fig. 1. Cross section of simulation model.

취하고 있는 브레이크를 모델로 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 지나는 공기, 허브 등 열이동 매체의 단면을 나타내고 있는 3차원 해석 모델이다. 또한 통풍구의 입구 형상을 보여주고 있다. 통풍구에서 공기와 대류가 일어나는 면적은 같이 하고 형상을 바꾸어서 원래의 통풍구에서의 마찰열의 이동을 비교하였다. 또한 대류가 일어나는 면적을 감소하여 마찰열이 전도에 의해서 디스크 내부로의 이동을 원활히 하여 면적의 변화에 의한 마찰열의 이동을 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. 그림은 제동과 주행이 3초씩 반복적으로 이루어지고 정지상태에 이르게 된다.

### 3. 해석결과 및 고찰

주행과 제동을 반복적으로 수행하였을 때 상부의 디스크가 하부의 디스크보다 온도가 높게 나타나고 있다. 이는 상부의 디스크에 축적되는 열이 크다는 것을

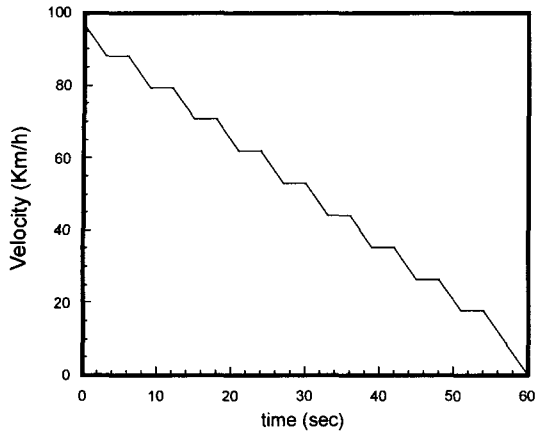


Fig. 2. Repeated braking mode.

의미한다. 온도의 불균일성은 디스크의 열변형을 일으키는 큰 요인이 되기도 한다. 상부 디스크의 온도에 영향을 주기 위하여 열이 하부 디스크로 이동할 수 있는 면적을 조정하였다. 현재 사용되고 있는 모델의 통풍구의 면적을 100%라고 하면 92%로 조정하였다. 통풍구의 면적은 유로의 높이는 변화시키지 않고 유로의 밑면과 윗면을 감소시켜 디스크와 공기와의 접촉면적을 줄였다. 통풍구의 면적을 감소시킴으로서 전도의 영역을 확대하여 상부와 하부의 온도 차이를 감소시킨다. 또한 통풍구의 면적을 100%로 유지하고 유로의 밑면을 넓히고 윗면을 감소시켜 상부 디스크에서 하부 디스크로의 열의 이동을 증가시킴으로서 온도 차이의 감소를 검토한다.

Fig. 3과 Fig. 4는 통풍구의 면적을 92%로 변화

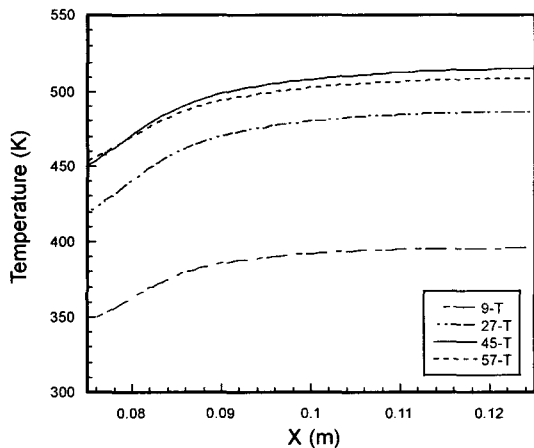


Fig. 3. Temperature distribution at y=0.024 m.

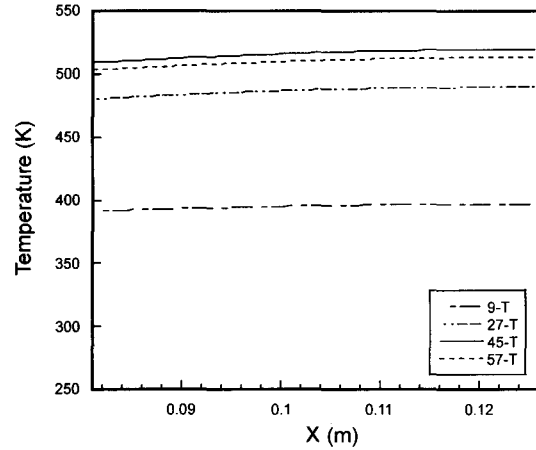


Fig. 4. Temperature distribution at y=0.033 m.

주었을 때 밑면과 윗면에서 온도 변화를 보여주고 있다. 각 그림들은 입구측에서 유동이 진행됨에 따라 완만한 온도 상승을 유지하며, 제동시간이 증가할수록 표면의 온도는 증가하여 45초에서 최대 온도에 도달한 후 제동이 완료됨에 따라 온도는 감소하고 있다. 특히 통풍구의 윗면에서 제동횟수가 증가하면서 최대 온도에 도달하는 45초에는 원래의 형상에 비해 최고 온도가 7°C 낮게 나타나고 있다. 이는 공기와의 대류에 의한 열의 이동보다 디스크와 허브를 통한 전도에 의한 열이동이 원활이 일어나고 있음을 보여준다.

통풍구의 밑면(y=0.024 m)에서 통풍구의 면적비를 달리하여 온도 분포를 유동 방향에 대해서 살펴본 것이 Fig. 5이다. 그림에서 o는 원래의 형상을 나타내고, m은 통풍구의 면적은 유지하면서 형상을 변화시킨 것이다. 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 그 온도차는 증가하여 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. 통풍구의 면적을 동일하게 유지하면서 형상을 변화시켰을 경우에는 제동시간이 9초가 경과한 후에는 차이가 없으나, 45초가 경과한 후에는  $\Delta T=4^{\circ}\text{C}$ 의 차이를 보이고 있다.

Fig. 6은 통풍구 중심(x=0.105 m)에서 원주 방향을

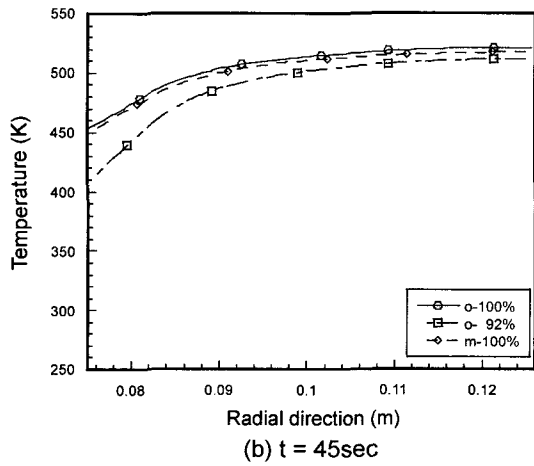
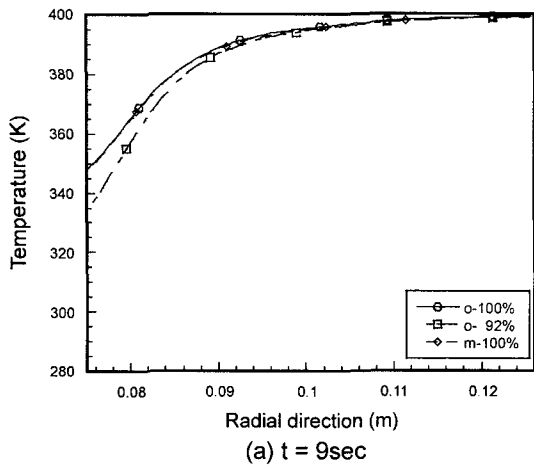


Fig. 5. Effect of aspect ratio on the temperature distribution along the radial direction.

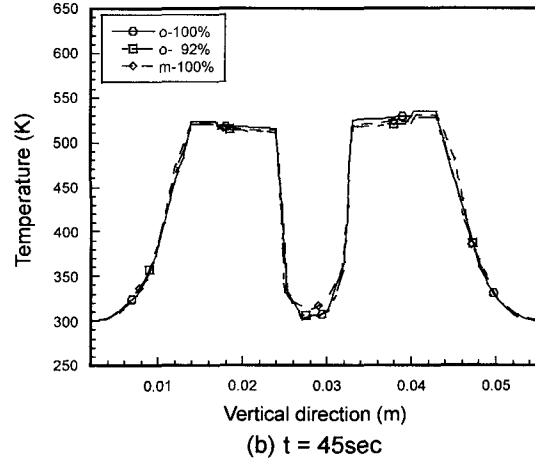
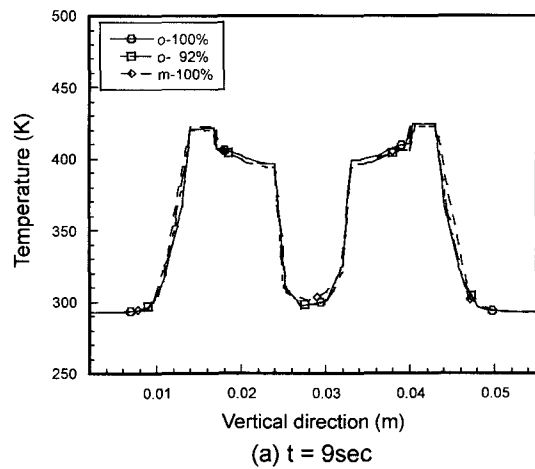


Fig. 6. Temperature distribution at the middle of ventilated region ( $x=0.105\text{ m}$ ).

따라 변화하는 온도 분포를 각 제동 모드에 대해 9초와 45초에서 나타낸 것이다. 통풍구의 면적비를 92%, 형상의 변화에 의한 제동이 이루어져도 디스크의 상부와 하부에서 발생하는 마찰열은 각기 디스크와 패드로 전도되지만 통풍구를 중심으로 대칭적으로 일어나지 않는 것은 발생된 마찰열의 이동이 디스크의 상부와 하부에 각기 다르게 전도됨을 나타내고 있다. 하부에서 발생하는 마찰열은 허브쪽으로 연결되어 있는 디스크를 통하여 디스크의 상부보다 원활하게 이동된다. 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. 통풍구의 면적비를 바꾸어도 하부의 디스크에 상부의 디

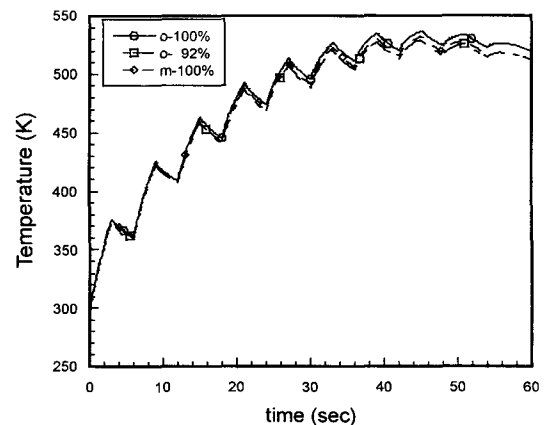


Fig. 7. Effect of aspect ratio on the maximum temperature variations.

스크보다 많은 열을 이동함을 보여준다. 면적비를 92%로 축소한 경우에 제동 시간이 9초가 경과한후 상부의 디스크에서는  $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$ , 하부의 디스크에서는  $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$  낮게 나타나고, 제동 시간이 45초가 경과한후에는 상부의 디스크에서는  $\Delta T=8^{\circ}\text{C}$ , 하부의 디스크에서는  $\Delta T=4^{\circ}\text{C}$  낮게 나타남을 보여준다. 통풍구의 형상이 변화된 경우에 제동 시간이 9초가 경과한후 상부의 디스크에서는  $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$ , 하부의 디스크에서는  $\Delta T=1^{\circ}\text{C}$  낮게 나타나고, 제동 시간이 45초가 경과한후에는 상부의 디스크에서는  $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ , 하부의 디스크에서는  $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$  낮게 나타남을 보여준다. 또한 상부와 하부의 디스크의 온도 차이도  $\Delta T=7.5^{\circ}\text{C}$ 로 감소하였다. 같은 조건에서 전도의 영향을 크게 함으로써 상부 디스크의 온도와 하부 디스크의 온도의 차이를 줄일 수 있었고, 공기와 대류 냉각을 이루는 면적이 같을지라도 형상의 변화에 의해서 디스크 내부의 온도가 감소시킬수가 있었다. 이는 온도 차이로 인한 디스크의 열변형에 중요한 자료가 된다.

Fig. 7은 면적비를 달리 했을때와 통풍구 형상의 변화에 의한 최대 온도를 나타낸 것이다. 제동 초기에는 변화가 없으나 3회의 제동이 있는 후에는 최대 온도의 변화가 보이고 있다. 이 후 제동이 반복되면서 8차 제동이 있을 때 면적비 92%일 때의 최대온도는 529 K이다. 이는 면적비 100%일때보다  $7^{\circ}\text{C}$  낮은 결과이다. 또한 제동이 이루어져 정지상태에 이르렀을 때에는 512 K로서  $7^{\circ}\text{C}$  낮은 결과를 보인다. 통풍구의 면적비를 조정함으로써 디스크 내부의 온도를 낮출 수 있었다. 또한 형상의 변화에 의한 경우는 8차 제동이 있을 때 최대 온도를 보이고 있고, 이는 원래의 형상에 비해  $4^{\circ}\text{C}$  낮은 결과를 보인다.

제동이 이루어지면서 상부와 하부 디스크에 온도차이가 생기고, 급격하게 상승하는 디스크 내부의 온도 변화는 상부에서 발생하는 마찰열을 하부로 많이 이동하기 위하여 전도의 영향을 늘리는 방법도 있지만, 같은 통풍구의 면적을 유지하면서도 형상의 변화에 의해서 디스크 내부의 온도를 감소시키고, 상부와 하부 디스크의 온도차이도 줄일 수 있다.

#### 4. 결 론

반복적인 주행과 제동을 수행하였을 때 상부 디스크가 하부의 디스크보다 축적되는 마찰열이 크게 되어 온도의 불균일이 형성된다. 온도의 불균일은 디스크의 열변형을 일으키는 큰 요인이 되기도 한다. 따라서 통풍구의 면적비에 따른 디스크 내부 열이동의 변화량을 검토하였다. 면적비 감소에 따른 통풍량의 감소에 의한 대류 냉각 효과는 저하되나 축 방향으로 전도 열전달에 의한 방열성능이 우수하였다. 또한 동일 면적비에서 통풍구의 형상을 변화시켜 상부 디스크의 전도 열전달을 증가시킴으로서 디스크내 최대 온도를 낮출 수 있었다.

#### 참고문헌

1. 조동두, "자동차브레이크의 설계요소," 대한기계학회지, 제39권, 제7호, pp. 49-57, 1997.
2. Burton, R. A., "Thermal Deformation in Frictionally Heated contact," *WEAR*, vol.59, pp.1-20, 1980.
3. Lui, T. and Rhee, S. K., "High Temperature Wear of Semi-metallic Disk Brake Pads," *Wear of Materials*, pp.552-554, 1977.
4. Crolla, D. A. and Lang, A. M., "Brake Noise and Vibration-The State of Art," *I. Mech. E.* 1991.
5. M.A. Tanvir, "On the Cooling of Disk Brakes on a Train," *Rail International March*, pp 37-42, 1988.
6. Rolf Krusemann, Gerald Schmidt, "Analysis and Optimization of Disk Brake Cooling via Computational Fluid Dynamics," *SAE 950791*, 1995.
7. Akira Fukano, Hiromichi Matsui, "Development of Disc-Brake Design Method Using Computer Simulation of Heat Phenomena," *SAE 860634*, 1986.
8. 민현석, 김청균, "디스크 브레이크 마찰면에서의 온도분포 해석," *Tribology Journal*, vol. 2, pp. 71-79, 1994.
9. 조승현, 이일권, 김청균, "벤틸레이티드 디스크 브레이크에서 공냉 효과가 열변형 거동에 미치는 영향에 관한 수치적 연구," 윤활학회 춘계학술대회, 1999.
10. Fluent Inc., *Fluent User's Guide (V.5.0)*, Fluent Inc., 1998.