

## 원형 충돌 제트에서의 유동 및 온도 특성

김정우\*·최해천\*\*

### Flow and Temperature Characteristics in a Circular Impinging Jet

Jungwoo Kim\* and Haecheon Choi\*\*

**Key Words :** Circular impinging jet (원형 충돌 제트), Large eddy simulation(큰 에디 모사), Vortical structure(보텍스 구조), Nusselt number(누셀 수)

#### Abstract

In the present study, we perform LES of turbulent flow and temperature fields in a circular impinging jet at  $Re=5000$  for two cases of  $H/D=2$  and  $6$  ( $H$  denotes the distance between the jet exit and flat plate, and  $D$  does the diameter of the jet exit). In the case of  $H/D=2$ , the regular vortical structures observed in free jet do not exist because of the smaller distance than the potential core. The Nusselt number on the wall is largest at  $r/D \approx 0.67$  where vortex rings impinge. At  $r/D \approx 1.5 \sim 2.0$ , the vortex rings induce the secondary vortices, resulting in a secondary peak in the Nusselt number there. In the case of  $H/D=6$ , the vortex rings change into three-dimensional vortical structures and the small-scale vortices impinge on the flat plate. The increase of turbulent intensity due to small-scale vortices results in the largest Nusselt number at the stagnation point.

#### 1. 서론

충돌 제트는 공학적으로 냉각, 건조나 입자 흡착 등에 많이 이용되는 유동 현상 중의 하나이다. 지금까지 실험이나 수치 계산을 통해 충돌 제트에서의 유동이나 온도 특성을 알아보고자 하는 많은 연구가 이루어져 왔다. Gardon과 Arkifirat[1]은 실험을 통해 제트 출구에서의 난류가 벽에서의 열전달에 미치는 영향에 대한 연구를 하였다. Lytle와 Webb[2], Lee 등[3]은 충돌 제트에 대하여 레이놀즈수와 평판과 제트 사이의 거리 등 실험 조건들을 달리 하면서 유동장에서의 값들과 벽에서의 열전달을 측정하였다. 지금까지 충돌 제트에 대하여 많은 실험들이 이루어져 온 데 비해, 수치계산은 지금까지 컴퓨터 성능 제한으로 인해 난류 모델링을 이용한 계산(Behnia 등[4], Park과 Sung[5])이 많이 이루어져 왔다. 그러나, 난류 모델링을 통한 계산으로는 3차원 유동장에 대한 정확한 정보를 얻기가 힘들다. 따라서, 수치 계산을 통하여 충돌 제트에 대한 보다 자세한 유동장과 온도장을 알기 위해서는 직접 수치 모사나 큰 에디 모사들이 이루어져야 할 필요성이 있다. 이런 사정으로 최근에 들어 컴퓨터의 성능이 향상됨에 따라 Olsson과 Fuchs[6]를 비롯하여 몇몇 연구자들에 의해 큰 에디 모사법을 이용하여 충돌 제트에서의 유동장에 대하여 연구되어지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 큰 에디 모사법을 이용하여 제트와 평판 사이의 거리에 따른 원형 충돌 제트에서의 유동 및 온도 특성에 대하여 연구해 보고자 한다.

#### 2. 본론

##### 2.1 수치 해석 방법

본 연구에서는 원형 충돌 제트를 Germano 등[7]과 Lilly[8]에

제안된 dynamic model을 이용한 큰 에디 모사법으로 계산하였다. 원형 충돌 제트의 기하학적 형상이 축대칭이므로 격자계도 원통 좌표계를 이용하여 구성하였다. 시간에 대한 차분 방법은 Akselvoll과 Moin[9]과 같이 전체 영역을 두 개의 영역으로 나누어 각각의 영역에 대하여 한 방향에 대해서만 내재적인 2차 정확도의 Crank-Nicolson 방법을 적용하였으며, 다른 방향에 대해서는 외재적인 3차 정확도의 RK-3 방법을 적용하였다. 내재적인 방법을 적용하는 방향은 중심에서 가까운 지역은 원주 방향으로, 중심에서 먼 지역은 반경 방향으로 하였다. 또한, 공간에 대한 차분방법은 2차 정확도의 중심 차분법을 이용하였다. 본 연구에서는 유동장과 함께 온도장을 계산하였다. 온도장을 계산하기 위한 시간 차분 방법은 유동장의 경우와 같게 하였다. 그러나, 온도장의 경우 공간에 대하여 중심 차분법을 적용할 경우 해에 진동이 생겨 비물리적인 해가 생기게 된다. 본 연구에서는 이러한 현상을 막기 위해서 Koren[10]의 단조 차분 방법(monotone difference scheme)을 사용하였다.

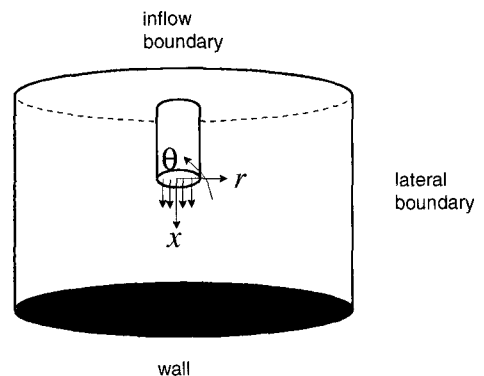


Fig. 1 Schematic diagram of the computational domain.

\* 서울대학교 대학원, kimjw@couette.snu.ac.kr

\*\* 서울대학교 기계항공공학부, choi@socrates.snu.ac.kr



Fig. 2 Instantaneous vortical structures in the case of  $H/D=2$ .

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 전체 계산 영역을 도식화한 것이다. 전체 계산 영역은  $-14 < x/D < H/D$ ,  $0 < r/D < 20$  그리고  $0 \leq \theta < 2\pi$  이다. 여기서  $H$ 는 제트와 평판 사이의 거리로, 원형 충돌 제트는 지금까지의 연구들을 통하여  $H$ 에 따라 같은 레이놀즈 수에 대해서도 서로 다른 유동 현상을 보이는 것으로 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서는 제트 유동장이 평판에 충돌할 때, 제트 유동장이 충분히 발달하지 못하고 충돌하게 되는  $H/D=2$ 와 포텐셜 코어가 끝나서 충돌하게 되는 6인 두 가지 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 사용한 전체 격자 개수는 각각  $x$ ,  $r$ ,  $\theta$ 에 대하여  $H/D=2$ 인 경우에는  $104 \times 314 \times 120$ ,  $H/D=6$ 인 경우에는  $136 \times 315 \times 120$  이다. 유동장에 대한 경계 조건은 제트 출구를 제외한 입구 영역과 출구영역에서 Neumann 조건을, 벽에서는 점착 조건을 만족하도록 하였다. 또한, 제트 출구에서 균일한 속도 분포를 가지도록 하였다. 온도장에 대한 경계 조건은 유동장과 같이 제트 출구를 제외한 입구 영역과 출구영역에서 Neumann 조건을 만족하도록 하였다. 그리고, 벽에서는 균일한 열유속 조건을,

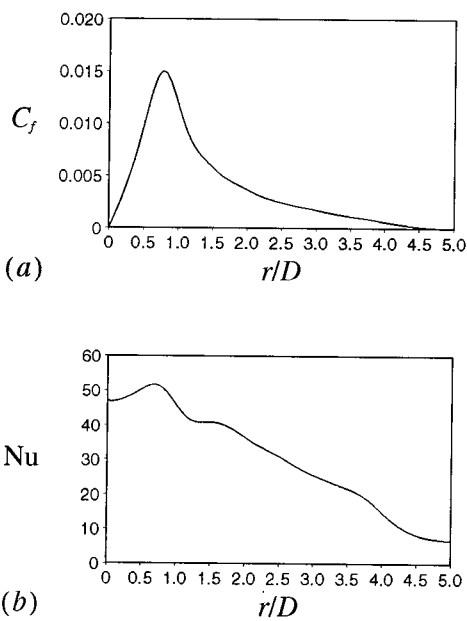


Fig. 3 Flow variables along the wall in the case of  $H/D=2$ : (a) skin friction coefficient; (b) Nusselt number.

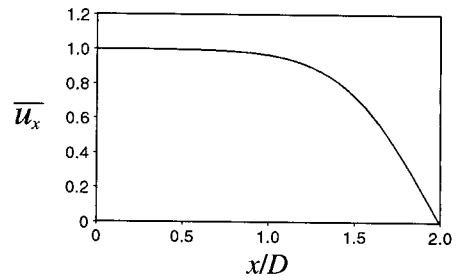


Fig. 4 Mean streamwise velocity along the centerline in the case of  $H/D=2$ .

제트 출구에서는 균일한 온도 조건을 주었다. 이런 벽에서의 온도 경계 조건은 Behnia 등[4]과 Park과 Sung[5]의 경우와 같은 것이다. 따라서, 본 연구에서 온도는 벽에서의 열유속과 제트 입구에서의 온도를 이용하여 무차원화하였다. 계산에 사용된 제트 레이놀즈수는 제트 출구에서의 속도  $U_j$ 와 제트 출구의 지름  $D$ 로 무차원화하여 5,000이며, 프란틀 수는 공기와 같이 0.71을 이용하였다.

### 3. 결과

#### 3.1 $H/D=2$ 일 때의 유동장 및 온도장 특성

Fig. 2는  $H/D=2$ 인 경우에 대하여  $\lambda_2$  방법을 이용하여 보텍스를 나타낸 그림이다. 제트 출구에서 전단층이 형성되지만, 제트 출구와 평판 사이의 거리가 짧아서 3차원 유동장으로 미처 발달하지 못하고 보텍스링의 형태로 충돌하게 되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 벽을 따라서 시간 평균된 마찰 계수( $C_f$ )와 누셀 수(Nu)를 나타낸 그림이다. 원형 제트와 벽까지의 거리가 작을 경우에는 Nu의 최대값이 정체점에 존재하지 않고 정체점에서 떨어진 위치에 존재한다는 사실이 잘 알려져 있다. 본 연구에서도  $H/D=2$ 인 경우 그와 같은 사실을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 제트 중심선을 따른 시간 평균된 주유동 방향 속도 성분을 그린 그림이다. 포텐셜 코어가  $x/D=0.7$  근처까지 유지되다가 급격히 속도가 감소하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5(a)는 순간 유동장에서의 원주방향 와도를 그린 그림이

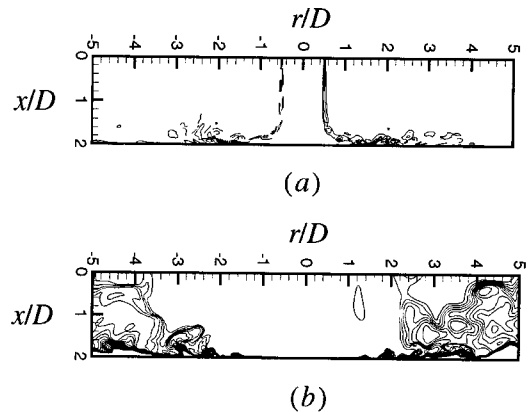


Fig. 5 Instantaneous flow fields in the case of  $H/D=2$ : (a) azimuthal vorticity; (b) temperature.

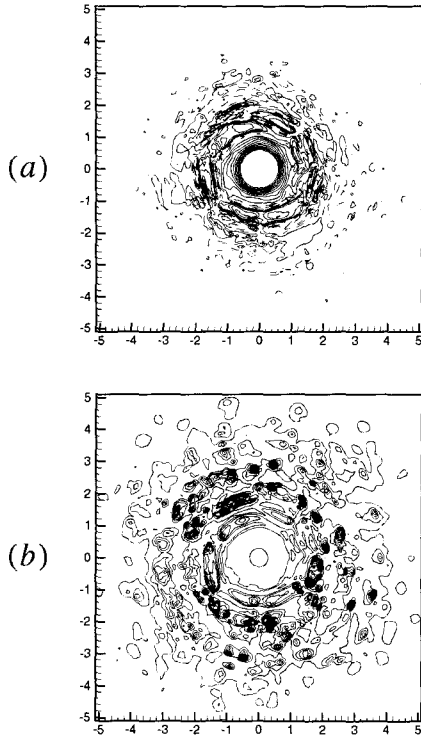


Fig. 6 Instantaneous flow fields at the wall in the case of  $H/D=2$ : (a) pressure; (b) Nusselt number.

다. 제트 출구에서 강한 전단층이 형성되어 벽에서 가까운 위치까지 유지되는 것을 볼 수 있다. 이런 유동 현상은 Fig. 2의 보텍스 구조와도 같은 것이다. 그 후 전단층 끝에서 규칙적인 보텍스가 형성되어 하류로 흘러가면서 벽과의 상호 작용을 통해  $r/D > 2$ 의 지역에서는 2차 보텍스를 유도하는 것을 볼 수 있다. 이렇게 유도된 2차 보텍스는 그 지역에서 국소적으로 열전달을 향상시키는 데 도움을 준다. Fig. 5(b)는 같은 순간에서의 온도장에 대한 그림이다. 제트 유동과 외부 유동과의 온도 차이가 없기 때문에 제트 출구 근처에서는 온도 변화가 거의 존재하지 않고, 제트가 평판에 점점 가까워짐에 따라 얇은 온도경계층이 형성되면서 평판을 따라 하류로 발달해가게 된다.

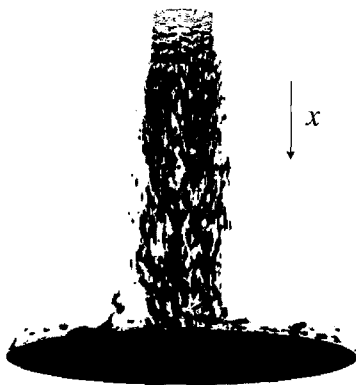


Fig. 7 Instantaneous vortical structures in the case of  $H/D=6$ .

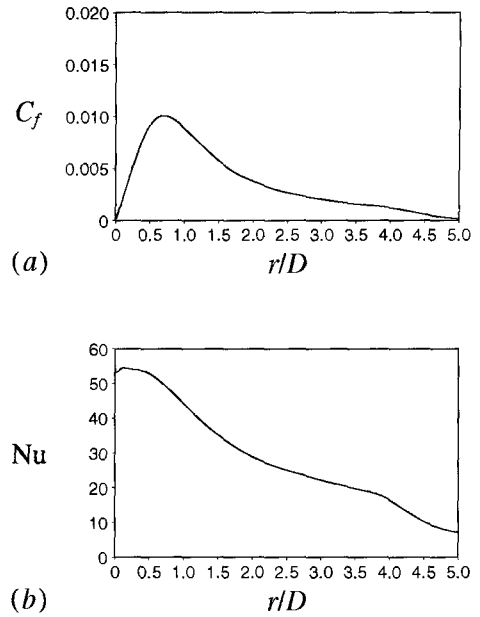


Fig. 8 Flow variables along the wall in the case of  $H/D=6$ : (a) skin friction coefficient; (b) Nusselt number.

Fig. 6(a)와 6(b)는 벽에서의 압력과 Nu 분포를 나타내는 그림이다. 압력과 Nu 모두 정체점 근처에서 일정한 값을 가지다가  $r/D$ 가 증가함에 따라 보텍스들의 영향으로 인해 국소적인 최대값들이 나타나는 것을 볼 수 있다.

### 3.2 H/D=6일 때의 유동장 및 온도장 특성

Fig. 7은  $H/D=6$ 인 경우에 대하여  $\lambda_2$  방법을 이용하여 보텍스를 나타낸 그림이다. Fig. 2에서와 달리 제트와 평판 사이의 거리가 먼 경우, 제트 출구에서 형성된 보텍스링이 하류로 감에 따라 3차원적인 보텍스 구조로 발달한 후 평판에 충돌하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 벽을 따라서 시간 평균된  $C_f$ 와 Nu를 나타낸 그림이다.  $H/D=6$ 의 경우  $H/D=2$ 의 경우와 달리 정체점 근처에서 Nu의 최대값이 존재하게 된다. 이것은 Fig. 7과 같이 원형 제트가 평판에 충돌하기 전에 충분히 발달하여 정체점 근처에서 작은 스케일의 보텍스로 인한 난류의 영향이 커지기 때문이다.

Fig. 9는 제트 중심선을 따른 시간 평균된 주유동 방향 속도 성분을 그린 그림이다. 포텐셜 코어가 Fig. 4에 비해 길어져서  $x/D=3\sim 4$  근처까지 유지되는 것을 알 수 있다.

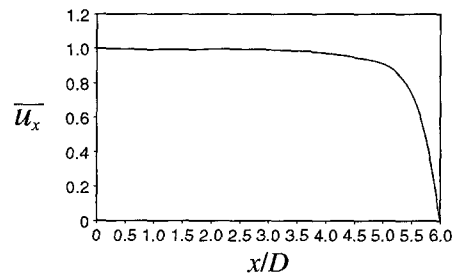


Fig. 9 Mean streamwise velocity along the centerline in the case of  $H/D=6$ .

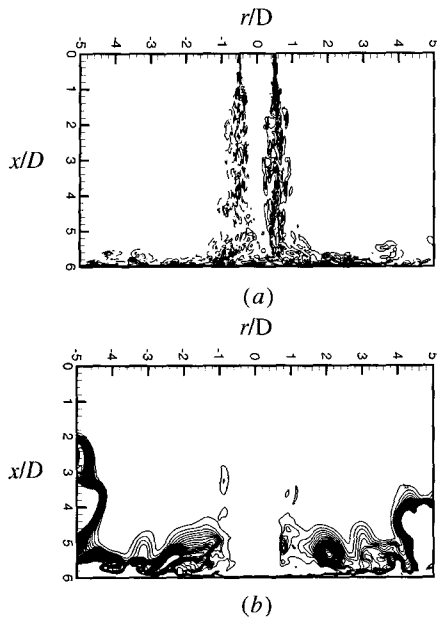


Fig. 10 Instantaneous flow fields in the case of  $H/D=6$ : (a) azimuthal vorticity; (b) temperature.

Fig. 10(a)는 한 단면에 대한 순간 유동장에서의 원주방향 와도를 그린 그림이다. 앞에서의 Fig. 5(a)에서의 경우와 달리 정체점 근처에 작은 스케일의 보텍스들이 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 10(b)는 같은 순간에서의 온도장에 대한 그림이다. Fig. 5(b)에서의 경우와 달리 정체점 근처에서 작은 스케일의 보텍스로 인해 온도장이 정체점 근처에서도 변하는 것을 알 수 있다.

Fig. 11(a)와 11(b)는 벽에서의 압력과 Nu 분포를 나타내는 그림이다. Fig. 6과 달리 정체점 근처에서 압력은 일정하나, Nu는 국소적인 최대값이 나타나는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 큰 에디 모사법을 이용하여 원형 충돌 제트에서 유동장 및 온도장 특성에 대하여 알아보았다. 원형 제트와 평판 사이의 거리가  $H/D=2$ 일 때는 제트 출구에서 강한 전단층이 형성되어 정체점 근처에 규칙적인 보텍스 링이 생기며, 이 보텍스가 하류로 갈수록 2차 보텍스를 유도하게 된다. 이런 보텍스들로 인해 마찰 계수와 Nu가 시간에 따라 변하게 된다. 또한,  $H/D=6$ 일 때는 제트 출구에서 형성되는 전단층이 벽에서 상당히 먼 지역부터 불안정하게 되어 정체점 근처에 작은 스케일의 보텍스들이 존재하게 된다. 따라서,  $H/D=2$ 일 때와 비교해서 정체점 근처에 난류로 인한 영향이 크며, 그로 인해 정체점에 Nu의 최대값이 존재하게 된다.

#### 후기

본 연구는 과학기술부 창의적연구진흥사업과 교육인적자원부 BK21 지원하에 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

[1] R. Gardon and J. C. Arkfirat, The role of turbulence in determining the heat transfer characteristics of impinging jets, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 8 (1965), pp. 1261-1272.  
 [2] D. Lytle and B. W. Webb, Air jet impinging heat transfer at

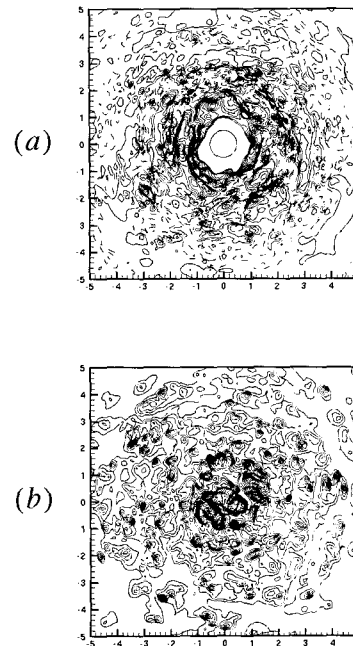


Fig. 11 Instantaneous flow fields at the wall in the case of  $H/D=6$ : (a) pressure; (b) Nusselt number.

low nozzle-plate spacings, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37 (1994), pp. 1687-1697.

[3] D. Lee, R. Grief, S. J. Lee and J. H. Lee, Heat transfer from a flat plate to a fully developed axisymmetric impinging jet, *J. Heat transfer*, Vol. 117 (1995), pp. 772-776.  
 [4] M. Behnia, S. Parneix, and P. A. Durbin, Prediction of heat transfer in an axisymmetric turbulent impinging on a flat plate, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41 (1998), pp. 1845-1855.  
 [5] T. Park and H. Sung, Development of a near-wall turbulence model and application to jet impingement heat transfer, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 22 (2001), pp. 10-18.  
 [6] M. Olsson and L. Fuchs, Large eddy simulations of a forced semiconfined circular impinging jet, *Phys. Fluids*, Vol. 10 (1998), pp. 476-486.  
 [7] W. K. Germano, U. Piomelli, P. Moin and W. H. Cabot, A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model, *Phys. Fluids A*, Vol. 3 (1991), 1760.  
 [8] D. K. Lilly, A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method, *Phys. Fluids A*, Vol. 4 (1992), 3.  
 [9] K. Akselvoll and P. Moin, Large eddy simulation of turbulent confined coannular jets and turbulent flow over a backward facing step. Report No. TF-63, Thermoscience Division, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 1995.  
 [10] B. Koren, A robust upwind discretization method for advection, diffusion and source terms. In: Vreugdenhill, C.B., Koren, B. (Eds.), Numerical methods for advection-diffusion problems, Notes on numerical fluid mechanics, Vol. 45. Vieweg, Braunschweig, 1993, pp. 117-138.