

## 분기 가진을 통한 충돌제트 능동 제어 연구

김정우<sup>a\*</sup>

## Active Control of Impinging Jets Using Bifurcating Excitations

Jungwoo Kim<sup>a\*</sup><sup>a</sup> Seoul National University of Science and Technology, Department of Mechanical System Design, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Republic of Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 29 March 2013  
 Revised 14 May 2013  
 Accepted 19 May 2013

## Keywords:

Impinging jet  
 Heat transfer characteristics  
 Bifurcating excitation

## ABSTRACT

The objective of the present study is to investigate the heat transfer characteristics of turbulent impinging jets with bifurcating excitations. Bifurcating excitations use the dual mode, dual frequency forcing, where an axial forcing frequency is equal to double the helical forcing frequency. Under the bifurcating excitation, the heat transfer significantly increases in one plane (bifurcating plane), while nearly no heat transfer occurs in the perpendicular plane (bisecting plane). This result is closely associated with the change in the vortical structures caused by the excitation.

## Nomenclature

A : Forcing amplitude  
 D : Jet diameter  
 H : Distance between jet exit and impingement wall  
 Nu : Nusselt number  
 Pr : Prandtl number  
 $\bar{q}''$  : Subgrid-scale heat flux  
 Re : Reynolds number  
 U : Mean velocity  
 x, r,  $\theta$  : Cylindrical coordinate  
 x, y, z : Cartesian coordinate  
 $\kappa$  : Heat conductivity  
 $\tau$  : Subgrid-scale stress  
 $\phi$  : Temperature  
 $\bar{\Phi}$  : Mean temperature  
 $\Psi$  : Phase difference

## Subscripts

a : Axial forcing  
 c : Jet centerline  
 e : Excitation  
 h : Helical forcing  
 J : Jet bulk property

## 1. 서론

충돌제트는 공학적으로 냉각, 건조나 입자 흡착 등에 많이 이용되는 유동 현상 중의 하나이다<sup>[1,2]</sup>. 지금까지 실험이나 수치 계산을 통해 충돌 제트에서의 유동이나 온도 특성을 알아보려고 하는 많은 연구가 이루어져 왔다. Gardon과 Arkifirat<sup>[3]</sup>은 실험을 통해 제트 출구에서의 난류가 벽에서의 열전달에 미치는 영향에 대한 연구를 수행한 바 있으며, 이후 레이놀즈수와 평판과 제트 사이의 거리 등

\* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6856  
 Fax: +82-2-974-8270

E-mail address: kimjw@seoultech.ac.kr (Jungwoo Kim).

조건들을 달리 하면서 유동장에서의 값들과 벽에서의 열전달 특성을 연구한 많은 연구가 있었다<sup>[4-7]</sup>. 최근 들어서는 컴퓨터의 성능이 향상됨에 따라 Olsson과 Fuchs<sup>[8]</sup>, Hadziabdic과 Hanjalic<sup>[9]</sup>를 비롯하여 몇몇 연구자들에 의해 큰 에디 모사법을 이용하여 일반 층돌제트에서의 유동장이 연구된 바 있다.

층돌제트는 많은 경우 제트 형상이 원형이다. 원형 노즐로부터 나오는 제트 유동의 경우, 축방향 가진과 원주방향 가진을 결합할 경우 흥미로운 유동 구조를 얻게 된다는 연구가 이루어진 바 있다<sup>[10-12]</sup>. 이런 가진 형태를 분기 가진이라고 한다. 제트 유동에서 혼합 특성은 난류 유동장 내에 존재하는 coherent structures에 의해 결정되므로, 분기 가진이 주어지는 경우 혼합특성이 크게 바뀌게 된다. 따라서, 이런 분기 가진을 층돌제트에 적용한다면, 벽면에서의 열전달 특성을 변화시킬 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 아쉽게도 현재까지 분기가진을 층돌제트에 적용한 연구는 진행된 바가 없다.

그러므로, 본 연구에서는 분기 가진을 통한 원형 층돌 제트에서의 유동 및 온도 특성 변화를 큰 에디 모사법을 이용하여 알아보고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 수치해석

본 연구에서는 원형 층돌 제트를 큰 에디 모사법으로 계산하였다. 본 연구에서 고려하는 지배방정식을 텐서 형태로 나타내면 아래와 같다.

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{u}_j \tilde{\phi}}{\partial x_j} = \frac{1}{RePr} \frac{\partial^2 \tilde{\phi}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

여기서,  $x_i$ 는 좌표계 방향이며,  $u_i$ 는 각 방향 속도 성분이다. 또한,  $\phi$ 와  $p$ 는 온도와 압력이다.  $\sim$ 는 필터링된 값들을 의미하며,  $\tau_{ij}$ 와  $q_j$ 는 아격자 응력과 아격자 열유속으로, 본 연구에서는 Germano 등<sup>[13]</sup>, Lilly<sup>[14]</sup>, Moin 등<sup>[15]</sup>의 방법에 따라 각각 모델링하였다.

원형 층돌 제트의 기하학적 형상이 축대칭이므로 격자계도 원통 좌표계를 이용하여 구성하였다. 원통 좌표계에 대해 지배방정식 (1)~(3)이 표현되는 방식은 White<sup>[16]</sup>에 제시되어 있다. 시간에 대

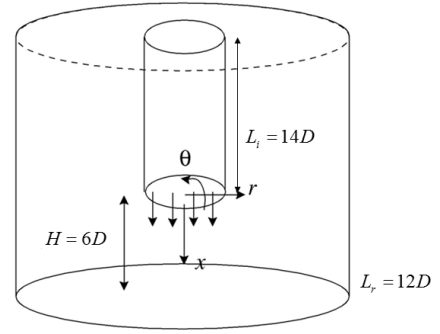


Fig. 1 Computational domain considered in the present study

한 차분 방법은 Akselvoll과 Moin<sup>[17]</sup>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 온도장도 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<sup>[18]</sup>의 단조 차분 방법(monotone difference scheme)을 사용하였다.

Fig.1은 본 연구에서 사용한 전체 계산 영역을 도식화한 것이다. 전체 계산 영역은  $-14 < x/D < H/D$ ,  $0 < r/D < 12$  그리고  $0 \leq \theta < 2\pi$ 이다. 여기서  $H$ 는 제트와 평판 사이의 거리로, 원형 층돌제트는 지금까지의 연구들을 통하여  $H$ 에 따라 같은 레이놀즈수에 대해서도 서로 다른 유동 현상을 보이는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 포텐셜 코어가 끝나서 충돌하게 되는 6인 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 이 경우는 기존 연구결과에 따르면 정체점에서의 열전달률이 가장 높은 경우에 해당한다. 사용한 전체 격자 개수는 각각  $x$ ,  $r$ ,  $\theta$ 에 대하여  $200(x) \times 304(r) \times 120(\theta)$ 이다. 이 때, 제트 내부에 해당하는  $41(x) \times 50(r) \times 120(\theta)$  격자가 분포되나, 실제 계산에는 사용되지 않는다. 유동장에 대한 경계 조건은 제트 출구를 제외한 입구 영역( $x = -L_i$ ,  $D/2 \leq r < L_r$ )과 출구 영역( $-L_i < x < H$ ,  $r = L_r$ )에서 Neumann 조건을, 벽에서는 점착 조건을 만족하도록 하였다. 또한, 제트 출구( $x = 0$ ,  $r < D/2$ )에서 균일한 속도 분포를 가지도록 하였다. Cho 등<sup>[19]</sup>은 제트 출구에서 측정된 속도 분포 측정을 통해 제트 벽 근처 아주 얇은 전단층을 제외한 부분을 제외하고는 균일한 속도를 유지한다는 것을 보인 바 있다. 그러므로 본 연구에서 고려한 균일분포는 아주 얇은 전단층 조건을 상정할 수 있는 조건이라고 볼 수 있다. 또한, 제트 벽에

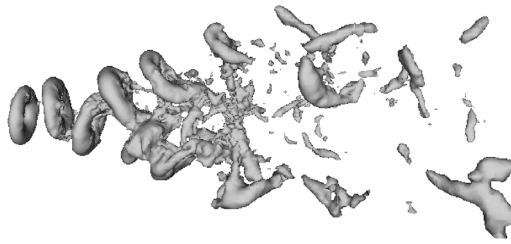


Fig. 2 Instantaneous vortical structures due to the bifurcating excitation in the free jet

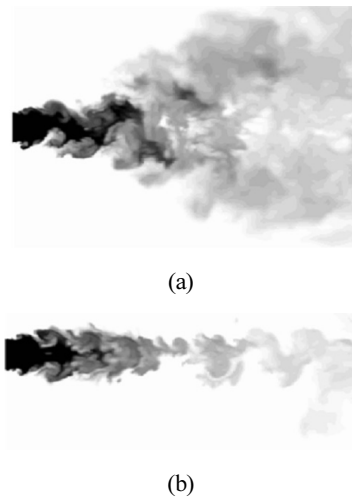


Fig. 3 Instantaneous temperature field due to the bifurcating excitation in the free jet: (a) bifurcating plane; (b) bisecting plane

해당하는  $r = D/2$ 에서는 점착 조건이 적용된다. 온도장에 대한 경계 조건은 유동장과 같이 제트 출구를 제외한 입구 영역, 제트 벽과 출구 영역에서는 Neumann 조건을 만족하도록 하였다. 그리고 벽에서는 균일한 열유속 조건을, 제트 출구에서는 균일한 온도 조건을 주었다. 이런 벽에서의 온도 조건은 Behnia 등<sup>[6]</sup>과 Park과 Sung<sup>[7]</sup>의 경우와 같은 것이다. 본 연구에서 온도는 벽에서의 열유속( $\dot{q}$ )과 제트 입구에서의 온도( $\Phi_j$ )를 이용하여  $(\Phi_j - \phi) / (\dot{q} D / k)$ 로 무차원화하였다. 계산에 사용된 레이놀즈수(Re)는 제트 출구에서의 속도  $U_j$ 와 제트 출구의 지름  $D$ 로 무차원화하여 10,000이며, 프란틀수(Pr)는 공기와 같은 0.71를 이용하였다.

## 2.2 분기 가진

본 연구에서 고려하는 분기 가진이 주어지는 경우, 제트 출구 ( $x = 0, r < D/2$ )에서의 축방향 속도 성분이 아래 식과 같이 정의된다<sup>[20,21]</sup>.

$$U_c / U_j = 1 + A_a \sin(2\pi f_a t - \psi) + A_h \sin(2\pi f_h t - \theta)(2r/D) + A_h \sin(2\pi f_h t + \theta)(2r/D), \quad (4)$$

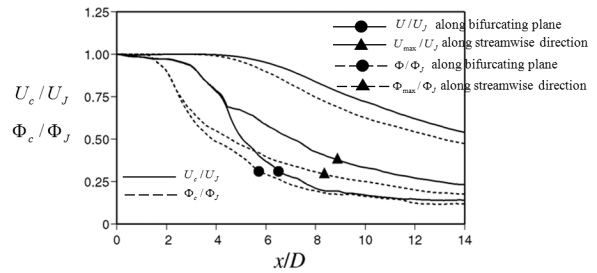


Fig. 4 Mean streamwise velocity and mean temperature along the centerline due to the bifurcating excitation in the free jet

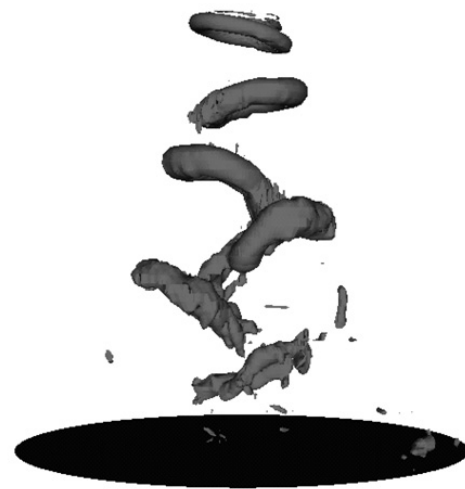


Fig. 5 Instantaneous vortical structures due to the bifurcating excitation in the impinging jet

여기서  $A$ 는 가진 진폭이며,  $f$ 는 가진주파수이다. 또한,  $\psi$ 는 위상차를 의미한다. 하첨자  $a$ 와  $h$ 는 축방향 가진과 원주방향 가진을 각각 의미한다.

본 연구에서 고려한 가진주파수는  $St_a = f_a D / U_j = 0.55$ 이며,  $St_h = f_h D / U_j = 0.275$ 이다. 또한, 가진 진폭은  $A_a = A_h = 0.15$ 이다. 위상차는  $\psi = \pi/4$ 로 하였다. 이런 파라미터들은 Parekh 등<sup>[11]</sup>이 고려한 것과 동일하다.

우선 분기 가진 효과를 살펴보기 위해, 자유 제트에 분기 가진을 가하였을 때 유동장 변화에 대해 살펴보려고 한다.

Fig. 2는 자유 제트에 대해 분기 가진을 가하였을 때 순간 유동 구조를 보여준다. 본 연구에서 유동 구조는 압력 일정 곡면(iso-pressure surface)을 이용하여 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이, 분기 가진의 영향으로 인해 제트 출구에서 발생하는 보텍스 링이 서로 두 방향으로 멀어지게 된다. 이렇게 보텍스 구조가 두 방향으로 나누어지는 모습이 흡사 제트가 두 개의 제트로 나누어지는 것과 같다고 하여, bifurcating jet라고 불리게 되었다<sup>[10,11]</sup>.

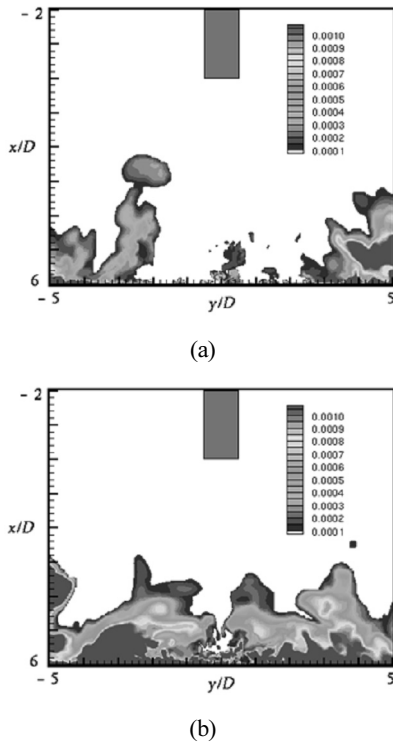


Fig. 6 Instantaneous temperature field due to the bifurcating excitation in the impinging jet: (a) bifurcating plane; (b) bisecting plane.

이 때 보텍스 구조가 존재하는 평면을 보통 bifurcating plane이라고 하며, 보텍스 구조가 존재하지 않는 평면을 bisecting plane이라고 한다.

Fig. 3은 bifurcating plane과 bisecting plane에서 순간 온도장을 보여준다. Figs. 2와 3의 비교를 통해 알 수 있듯이, bifurcating plane에서는 활발한 혼합이 일어나는 반면, bisecting plane에서는 혼합이 중심선 근처에 국한해서 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4는 중심선을 따른 평균 축방향 속도와 평균 온도를 나타낸다. 비교를 위하여 가진이 없는 경우에 대한 결과도 포함하였다. 일반적으로 평균 분기 가진 속도와 평균 속도는 주위 유체와 혼합이 진행됨에 따라 감소하는 특성을 보인다. Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이, 분기 가진이 주어지는 경우 가진이 없는 경우와 비교하여 활발하게 혼합이 이루어짐을 알 수 있다.

결과적으로, 분기 가진이 제트 유동에 주어지는 경우 제트 출구에서 발생하는 보텍스 링들이 상호간섭하여 서로 멀어지게 되어 하류로 떠내려감에 따라, 두 개의 독립적인 제트로 분기되는 것을 알 수 있다. 이에 따라, 일반 원형 제트와 비교하여 제트가 분기되는 평면인 bifurcating plane을 따라 하류에서는 혼합이 증가하게 된다. 이상에서 살펴본 결과를 토대로 볼 때, 분기 가진을 충돌제트에 적용한다면 제트 분기에 따라 bifurcating plane과 bisecting plane에서의 열전달 특성이 각각 다르게 나타날 것을 예측할 수 있다.

### 2.3 수치결과

Fig. 5는 분기 가진이 충돌 제트( $H/D=6$ )에 가해졌을 때 순간 유동 구조를 보여준다. 이 경우도 유동구조는 일정 압력 곡면에서 따라 나타내었다. 여기서, 제트는  $x/D=4$  근처에서 분기하는 것을 알 수 있다. 참고로 본 논문에 나타내지는 않았지만,  $H/D=2$ 일 때는 제트가 분기할 때까지 충분한 거리가 확보되지 않는 관계로 분기하지 못한 상태로 벽면에 충돌하는 것을 확인하였다.

Fig. 6은 bifurcating plane과 bisecting plane에서의 순간 온도장을 보여준다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이, bifurcating plane에서의 온도 경계층 두께가 bisecting plane에서의 그것보다 작다는 사실로부터, bifurcating plane에서의 열전달율이 bisecting plane보다 크다는 것을 알 수 있다.

열전달율을 양적으로 분석하기 위하여, Fig. 7에서 Nusselt 수 분포를 나타내었다. 비교를 위하여 가진이 없는 경우도 포함시켰다. Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이, 분기 가진이 가해질 때 bifurcating plane에 대해서는 열전달율이 증가하고, bisecting plane에 대해서는 열전달율이 감소한다. 이런 사실은 자유 제트에서의 결과로부터 짐작되는 바와 잘 일치한다. 열전달율이 서로 다른 두 방향이 존재한다는 점은, 타원형 충돌 제트와 같은 비원형 충돌 제트에서도 발견되는 현상이다<sup>[22]</sup>. 그러나, 타원형 제트와 달리 bifurcating 제트는 완전히 독립적인 두 개의 제트로 분기된다는 점에서, 정체점 근처에서 다른 열전달 특성을 보이는 것에 유의해야 한다. Bifurcating jet는 분기 가진을 통해 완전히 독립적인 두 개의 제트가 생기는 관계로, 일반적인 충돌제트와 달리 기하학적인 중심과 유체역학적인 정체점이 일치하지 않게 된다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이, bifurcating jet에서는 분기되어 생기는 새로운 제트가 벽면에 충돌하는 지점이 유체역학적인 정체점이 되어 그 부분에서 Nu수가 가장 크게 된다.

다른 한편으로 원주방향을 따른 평균 열전달율을 고려하게 되면, 분기 가진이 있을 경우 열전달율이 전반적으로 가진이 없을 때와 작거나 같은 것을 알 수 있다. 열전달율이 작은 경우는  $r/D < 1$ 에 존재하며, 이는 Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 충돌 제트가 분기 가진에 의해 벽면에 충돌하기 전에 분기하는 관계로 정체점 근처에 바로 충돌하는 보텍스 구조가 없기 때문으로 생각된다.

Fig. 8은 중심선을 따른 평균 축방향 속도를 보여준다. 자유 제트 경우와 유사하게, 분기 가진시 중심선을 따라 축방향 속도가 가진을 안 한 경우와 비교하여 더 많이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 또한, 흥미롭게도 정체점 근처에서 약간의 음의 속도를 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 정체점 근처에서 박리 기포(separation bubble)가 존재한다는 것을 암시하며, Fig. 7에서 정체점 근처에서 Nu 수가 작은 이유를 다시 한번 설명한다고 할 수 있다.

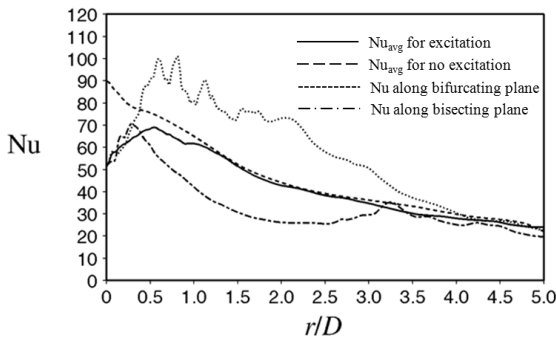


Fig. 7 Variation of the Nusselt number due to the bifurcating excitation in the impinging jet

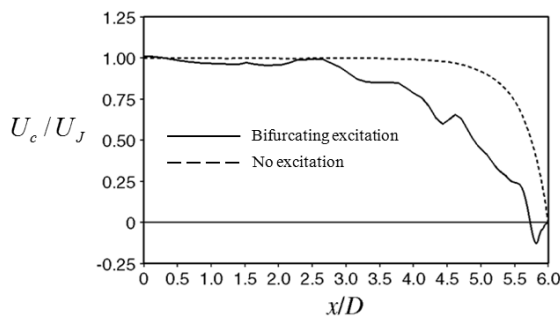


Fig. 8 Mean streamwise velocity along the centerline due to the bifurcating excitation in the impinging jet

### 3. 결론

본 연구에서는 큰 에디 모사를 이용하여 분기 가진을 통한 충돌 제트 능동 제어 특성을 살펴보았다. 본 연구에서 고려한 분기 가진은 축방향과 원주방향에 따라 각각 다른 두 개의 주파수를 주는 형식이며, 이런 분기 가진이 주어지는 경우 제트가 두 개의 가지 형태로 분기되는 현상을 관찰할 수 있다. 이런 분기 가진을 충돌제트에 주는 경우, bifurcating plane과 bisecting plane에 서로 다른 혼합 특성을 보이는 관계로, bifurcating plane에서는 Nu 수가 증가하나 bisecting plane에서는 Nu 수가 감소하는 흥미로운 결과를 얻었다. 또한, bifurcating jet은 제트가 두 개의 독립적인 제트로 분기되므로, 분기된 제트가 충돌하는 지점이 정체점이 되어 그 부분에서 Nu 수가 큰 결과를 보인다. 마지막으로 이런 결과는 보텍스 구조와 밀접한 관련을 맺는 것을 확인할 수 있다.

### 후기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

### References

- [1] Martin, H., 1977, Heat and mass between impinging gas jets and solid surfaces, *Advances in Heat Transfer*, 13 1-60.
- [2] Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M. A., Button, B. L., 1992, A review of heat transfer data for single circular jet impingement, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 13 106-115.
- [3] Gardon, R., Arkifirat, J. C., 1965, The role of turbulence in determining the heat transfer characteristics of impinging jet, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 8 1261-1272.
- [4] Lytle, D., Webb, B. W., 1994, Air jet impinging heat transfer at low nozzle-plate spacings, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 37 1687-1697.
- [5] Lee, D., Grief, R., Lee, S. J., Lee, J. H., 1995, Heat transfer from a flat plate to a fully developed axisymmetric impinging jet, *J. Heat Transfer*, 117 772-776.
- [6] Behnia, M., Parneix, S., Durbin, P. A., 1998, Prediction of heat transfer in an axisymmetric turbulent impinging on a flat plate, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 41 1845-1855.
- [7] Park, T., Sung, H., 2001, Development of a near-wall turbulence model and application to jet impingement heat transfer, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 22 10-18.
- [8] Olsson, M., Fuchs, L., 1998, Large eddy simulations of a forced semiconfined circular impinging jet, *Phys. Fluids*, 10 476-486.
- [9] Hadziabdic, M., Hanjalic, K., 2008, Vortical structures and heat transfer in a round impinging jet, *J. Fluid Mech.*, 596 221-260.
- [10] Lee, M., Reynolds, W. C., 1985, Bifurcating and blooming jets, Report No. TF-22, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, USA.
- [11] Parekh, D., Leonard, A., Reynolds, W. C., 1988, Bifurcating jets at high Reynolds numbers, Report No. TF-35, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, USA.
- [12] Reynolds, W. C., Parekh, D. E., Juvet, P. J. D., Lee, M. J. D., 2003, Bifurcating and bisecting jets, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 35 293-315.
- [13] Germano, W. K., Piomeilli, U., Moin, P., Cabot, W. H., 1991, A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model, *Phys. Fluids A*, 3 1760-1765.
- [14] Lilly, D. K., 1992, A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method, *Phys. Fluids A*, 4 633-635.
- [15] Moin, P., Squires, K. Cabot, W., Lee, S., 1991, A dynamic subgrid-scale model for compressible turbulence and scalar transport, *Phys. Fluids A*, 3 2746-2757.

- [16] White, F. M., 1994, *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill Co., Singapore.
- [17] Akselvoll, K., Moin, P., 1996, An efficient method for temporal integration of the Navier-Stokes equations in confined axisymmetric geometries, *J. Comput. Phys.*, 125 454-463.
- [18] Koren, B., 1993, 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, 45, Vieweg, Braunschweig, 117-138.
- [19] Cho, S. K., Yoo, J. Y., Choi, H., 2000, Resonance in axisymmetric jet under controlled helical, fundamental, and axisymmetric subharmonic forcing, *AIAA J.*, 38 434-441.
- [20] Danaila, I., Boersma, B. J., 2000, Direct numerical simulation of bifurcating jet, *Phys. Fluids*, 12 1255-1257.
- [21] da Silva, C. B., Metais, O., 2002, Vortex control of bifurcating jets: a numerical study, *Phys. Fluids*, 14 3798-3819.
- [22] Lee, J., Lee, S.-J., 2000, The effect of nozzle aspect ratio on stagnation region heat transfer characteristics of elliptic impinging jet, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 43 555-575.