주기적으로 배열된 회전하는 원형 실린더를 이용한 채널유동 토폴로지 변화

정 태 경, 양 경 수,* 이 경 준, 강 창 우

인하대학교 기계공학과

CHANGE OF CHANNEL-FLOW TOPOLOGY BY A STREAMWISE-PERIODIC ARRAY OF ROTATING CIRCULAR CYLINDERS

Taekyeong Jeong, Kyung-Soo Yang,* Kyongjun Lee and Changwoo Kang

Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.

In this study, we consider the characteristics of channel flow in the presence of an infinite streamwise array of equispaced identical rotating circular cylinders. This flow configuration can be regarded as a model representing a micro channel or an internal heat exchanger with cylindrical vortex generators. A numerical parametric study has been carried out by varying Reynolds number based on the bulk mean velocity and the cylinder diameter, and the gap between the cylinders and the channel wall for some selected angular speeds. An immersed boundary method was employed to facilitate implementing the cylinders on a Cartesian grid system. No-slip condition is employed at all solid boundaries including the cylinders, and the flow is assumed to be periodic in the streamwise direction. The presence of the rotating circular cylinders arranged periodically in the streamwise direction causes a significant topological change of the flow, leading to increase of mean friction on the channel walls. More quantitative results as well as qualitative physical explanations are presented to justify the effectiveness of rotating cylinders to modify flow topology, which might be used to enhance heat transfer on the channel walls.

Key Words : 채널 유동(Channel Flow), 회전원형실린더(Rotating Circular Cylinder), 가상경계법(Immersed Boundary Method)

1. 서 론

고온에서 작동하는 열교환기에서 열전달을 증진하기 위해서 가장 중요한 요소는 효율적인 유동 교환이다. 따라서 이러한 유동 불안정성이 발생하는 임계 Re (critical Reynolds number, Re_c)에 대한 연구는 열교환기 설계에서 매우 중요하다. 채널 내 유동 불안정 축진을 위한 가장 단순화된 유동 모델로 실린더형 장애물을 이용한 채널내의 유동장 및 열전달에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해 지금까지 수행되어져 왔다[1-5]. 이러한 연구들은 주로 실린더 후류에서의 주기적인 와류 특성 및 실린더 표면에서의 열전달에 관한 내용이며,

대부분 실린더가 채널 내에 고정된 경우에 대한 것들이다. 한편 Yoon et al.[6]은 채널 내에 원형 실린더가 주기적으로 존재하는 경우에 실린더와 채널 벽과의 간격 변화가 유동 특성에 큰 변화를 가져오게 됨을 보였다. 또한 Jeong et al.[7]은 채널 벽에서의 열전달 효율은 채널 벽에서의 평균 전단응력과 밀접한 관계를 갖는다는 연구결과를 얻었다. 본 논문은 Jeong et al.[7]의 후속연구로서, 본 연구에서는 실린더의 회전이 기존의 유동 위상(topology)에 어떤 영향을 주는지를 파악하는데 그 목적이 있다.

그동안 많은 연구자들이 무한공간에서 일정한 각속도로 회전하는 원형실린더를 지나는 유동에 관하여 연구해왔다. 회전하는 원형 실린더를 지나는 유동은 Re 와 무차원된 회전각속도(α)의 변화에 따라 정상유동이거나 비정상유동으로 발달하게 되는데, Hu et al.[8] 및 Xiong et al.[9]은 $\alpha \leq 1.5$ 구간에서 Re 와 α 에 따라 정상유동과 비정상유동을 구분 짓는 안정성 곡선(stability curve)을 구하였다. 이때 발생하는 와류 패턴을

Received: October 30, 2013, Revised: December 9, 2013,

Accepted: December 9, 2013.

* Corresponding author, E-mail: ksyang@inha.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.4.017>

© KSCFE 2013

Fig. 1 Flow configuration

모드 I 이라 한다. 또한 Stojković et al.[10]은 $4.85 \leq \alpha \leq 5.15$ 구간에서 발생하는 와흘림 모드 II를 구하였으며, 이 유동은 모드 I에 비해 낮은 주파수로 와흘림을 하는 것이 특징이다. 이렇게 많은 연구자들이 무한공간에서 회전하는 실린더를 지나는 유동에 대해 연구력을 집중하고 있지만, 채널 내에서 회전하는 실린더를 지나는 유동에 대한 연구는 아직도 매우 부족한 실정이다.

본 연구에서는 마이크로 채널, 열교환기 등에서 평판 사이의 열전달 효율을 높이기 위해 흔히 사용되는 와류 생성기의 가장 단순한 모델(Fig. 1), 채널 내 회전하는 원형 실린더가 주기적으로 존재하는 경우, 실린더와 채널 벽과의 간격(G) 변화가 유동 특성 및 유동 1차 불안정성(정상유동 → 비정상유동)에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 특히 유동 불안정성이 발생하는 Re_c 와 유동 불안정성 특성을 실린더와 채널 벽 사이 간격을 변화시켜가며 파악하였으며, 이에 대한 연구 결과는 채널형 열교환기에서 열전달 효율증진에도 참고 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 수치해석 기법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 채널 내 원형 실린더를 구현하기 위해 가상 경계법[11]을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 가상경계법이 적용된 2차원 비압축성 연속 방정식, 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \quad (2)$$

여기서 u_i 는 x_i 방향으로의 속도성분, p 는 압력, f_i 는 운동량 부가를 각각 나타낸다. 위 방정식의 모든 길이는 채널 높이의 반(h)으로 무차원 되었으며, 속도는 실린더가 없는 채널유동

Fig. 2 Computational domain and boundary conditions

에서 중앙속도($U_d = 3Q/4h$)로 무차원 되었다. 무차원 파라미터 Re , α 는 각각 $U_d h / \nu$, $\omega h / 2U_d$ 로 정의되며 ν , ω 는 각각 동점성계수, 실린더의 반시계방향 회전각속도를 의미한다. 본 연구에서는 2차원 유동에서의 정확한 해석을 위해 무한공간에서 회전하는 원형 실린더의 안정성 분석을 수행한 Pralits et al.[12]의 결과를 참고하여 $\alpha = 7.5$ 로 고정하였다. 이 α 값에서는 $Re \leq 200$ 에서 3차원 유동으로 진행되지 않음이 Pralits et al.[12]의 연구 결과로부터 유추될 수 있다. 또한 Q 는 채널 내 유량을 의미하며, 유량 Q 를 고정시키기 위해 You et al.[13]의 방법이 사용되었다.

각 지배 방정식은 직교좌표계에서 유한체적법으로 차분되었고, 비균일 엇갈림격자계를 사용하였다. 시간 차분은 대류항에 대하여 3차 정확도의 Runge-Kutta 양해법(explicit)으로 적분하였고, 확산항은 Crank-Nicolson의 음해법(implicit)으로 적분을 수행하였다. 또한 연속방정식과 운동량 방정식을 분리하기 위하여 Fraction Step 기법[13]이 사용되었다.

2.2 계산 영역과 경계 조건

유동장의 경계 조건은 입구와 출구에서 주기 조건이 사용되었으며, 계산 영역 윗면과 아랫면, 실린더 표면에서는 점착 조건을 사용하였다. 계산 영역과 유동 형상은 특정한 G/d 에서 실험 및 안정성 분석을 수행한 Schatz et al.[14]과 동일하게 Fig. 2와 같이 설정하였으며, 유동방향, 수직방향으로 각각 $0 \leq x \leq 6.666h$, $0 \leq y \leq 2$ 를 사용하였다. 또한 막음비(blockage ratio)는 $d/2h = 0.2$ 가 사용되었다.

3. 수치 해석 기법의 검증

코드의 검증을 위해서 무한공간에서 일정한 각속도로 회전하는 실린더를 지나는 유동과 채널내에 주기적으로 배열된 정지되어 있는 실린더를 지나는 유동을 각각 계산하였다. 먼저 Fig. 3은 무한공간에서 회전하는 실린더를 지나는 유동에 대해 Re 와 α 의 변화에 따른 안정성 곡선(stability curves)을 나타낸 그림이다. Re 와 α 의 변화에 따른 안정성 곡선을 다른

Fig. 3 Stability curves in the Re - α plane Fig. 4 Growth rate vs Reynolds number at $G/d = 0.75$, $\alpha = 0$

연구자들의 연구결과와 비교하였으며, 결과 값들이 서로 잘 일치하였다. 다음으로 Fig. 4는 채널 내에 주기적으로 배열된 정지되어 있는 실린더를 지나는 유동에 대해 선형 안정성 분석을 통해 계산된 유동 불안정성 모드의 선형 증가율을 나타낸 그림이다. 채널 내 실린더형 장애물이 존재할 경우, 실린더에서 발생하는 전단층은 채널 내 유동 불안정성을 증가시키게 된다. 이러한 비정상 유동이 발생하는 유동 불안정성은 Stuart-Landau (SL) 방정식으로 이해할 수 있다. 즉 유동 불안정성이 발생하는 유동 파라미터(Re) 근처에서는 다음과 같은 SL방정식을 만족한다[15,16].

$$\frac{dA}{dt} = \sigma(Re)A - l|A|^2A \quad (3)$$

여기서, $A(t)$ 는 특성 진폭(characteristics amplitude)이며,

Fig. 5 Critical Reynolds number plotted against G/d

$\sigma = \sigma_r + i\sigma_i$ 는 유동 불안정성 모드의 선형 증가율(linear growth rate)을, $l = l_r + il_i$ 는 첫 번째 Landau 상수(the first Landau 'constant')를 각각 나타낸다. $\sigma_r = 0$ 에서 존재하는 Re_c 근처에서 식 (3)의 실수부분을 선형화하면, 유동 불안정성의 순간 증가율에 대한 식을 얻을 수 있다[15].

$$\frac{1}{|A|} \frac{d|A|}{dt} = \sigma_r - l_r|A|^2 = \sigma_r \left(1 - \frac{|A|^2}{|A|_{sat}^2}\right) \quad (4)$$

Re_c 근처에서 σ_r 은 $(Re - Re_c)$ 의 선형 함수가 되며, 다음 식과 같다.

$$\sigma_r = K(Re - Re_c) \quad (5)$$

여기서 K 는 양의 상수가 된다. Park[17]과 Sohankar et al.[18]은, Re_c 와 양력계수가 밀접한 관계를 가지며, Re_c 를 측정하기 위한 특성 진폭 $A(t)$ 의 함수로 양력 계수를 사용하였다.

Schatz et al.[14]은 $G/d = 0.75$ 인 경우, 채널 내 유동 불안정성에 대한 연구를 수행하여 비정상 유동이 발생하는 Re_c 를 측정한다. 이에 Fig. 4에서 Schatz et al.[14]의 실험 및 선형 안정성 분석을 통해 계산된 유동 불안정성 모드의 선형 증가율(σ_r)을 본 연구결과와 비교하였으며, 결과 값들이 서로 잘 일치하였다.

4. 결 과

Fig. 5는 G/d 의 변화에 따라 2차원 정상 유동에서 비정상 유동으로 천이하는 Re_c 의 변화를 나타내었다. 여기서 채널 내

Fig. 6 Instantaneous streamlines at several selected times over one flow period : $G/d = 0.5$, $Re = 160$, $\alpha = 7.5$

Fig. 7 Instantaneous streamlines at several selected times over one flow period : $G/d = 0.75$, $Re = 150$, $\alpha = 7.5$

Fig. 8 Instantaneous streamlines at several selected times over one flow period : $G/d = 1.0$, $Re = 150$, $\alpha = 7.5$

Fig. 9 Instantaneous streamlines at several selected times over one flow period : $G/d = 2.0$, $Re = 190$, $\alpha = 7.5$

의 실린더가 회전하지 않을 때($\alpha=0$) 실린더가 채널 벽에 가까이 접근할수록 유동장이 안정되는 것을 관측할 수 있는데, 이는 실린더가 채널 벽에 접근하게 되면 실린더 주위에서의 유동의 속도가 낮아지고, 채널 벽에서 재순환 와류가 성장하면서 유동장을 안정화시키기 때문이다[7]. 채널 내에 실린더가 회전하는 경우($\alpha=7.5$), 회전하지 않을 때와는 반대로 실린더가 채널 벽과 멀어 질수록 유동장이 안정되는 것을 관측할 수 있으며, $\alpha=7.5$ 일 때 모든 G/d 에 따른 Re_c 가 $G/d=2.0$ 인 경우를 제외하고 $\alpha=0$ 일 때보다 낮은 값을 갖는다. 또한 $\alpha=7.5$ 일 때와 $\alpha=0$ 일 때의 Re_c 의 차이는 실린더가 채널 벽에서 점점 멀어질수록 작아진다($G/d=2.0$ 제외). 따라서 채널 내에서 실린더가 회전하는 경우, 회전하지 않을 때에 비해 특히 G/d 가 작을 때 효율적인 유동 교란이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 6-9는 $\alpha=7.5$ 일 때 G/d 의 변화에 따른 Re_c 근처에서의 비정상유동에 대하여 시간에 따른 유선의 변화를 나타내었다. 회전하는 실린더가 채널 벽에 가까이 위치할 경우(Fig. 6), 채널 위쪽 벽에 재순환 와류E(Fig. 6(b), 반시계방향 회전)가 주 유동방향으로 진행하다가 소멸된다. 또한 실린더 후류에서는 재순환 와류A(Fig. 6(a), 시계방향 회전)와 채널 아래쪽 벽에는 재순환 와류B(Fig. 6(a), 반시계방향 회전)가 각각 발생한다. 실린더 후류와 채널 아래쪽 벽에서 발생한 재순환 와류A, B는 시간이 지남에 따라 그 크기가 점점 커지고 유동 방향을 따라 이동하면서 커다란 재순환 영역을 이룬다. 이때 재순환 와류B는 유동방향을 따라 이동하다 소멸되고 재순환 와류A는 재순환 와류C(Fig. 6(a), 시계방향 회전), D(Fig. 6(a), 반시계방향 회전)로 발전한다. 회전하는 실린더가 채널 벽과 멀어 질수록 채널 아래쪽 벽에 발생하는 재순환 영역은 점차 작아지며(Fig. 7, 8), $G/d=2.0$ 에서는 채널 아래쪽 벽에서 반시계방향으로 회전하던 재순환 와류B는 더 이상 발생하지 않고 시계방향으로 회전하는 재순환 와류만 발생한다(Fig. 9). 또한 $G/d \geq 1.0$ 부터는 회전하는 실린더 근처에서 작은 와류 F(Fig. 8(a), 시계방향 회전)가 추가적으로 발생한다.

Jeong et al.[7]의 연구 결과와 비교하면, 채널 내에서 실린더가 회전함에 따라 발생하는 유동 변화의 가장 큰 특징은 모든 G/d 에서 채널 위쪽 벽에 재순환 와류가 발생한다는 것이다. 또한 $G/d \geq 1.0$ 일 때 채널 내에서 실린더가 회전하지 않을 경우, 채널 벽에서 재순환 와류는 발생하지 않고 실린더 후류에서 와류만 발생한다. 하지만 $G/d \geq 1.0$ 일 때 채널 내에서 실린더가 회전하게 되면 종전에 실린더가 회전하지 않을 경우 실린더 후류에서 발생하던 와류는 나타나지 않지만 실린더 표면에서 유동박리가 발생하고 채널 벽에서는 재순환 와류가 발생한다. 따라서 채널 내에서 실린더가 회전하는 경우 실린더가 회전하지 않을 때에 비해 복잡한 유

Fig. 10 Distribution of mean friction coefficient on the upper channel wall for $Re = 150$, (a) $\alpha = 0$, (b) $\alpha = 7.5$

동 특성을 가지며, 이는 채널 내에서 효율적인 유동 교란을 발생시킴을 알 수 있다.

Fig. 10, 11은 채널 벽에서 시간 평균된 마찰계수($\overline{C}_f$)를 보여주며, $\overline{C}_f$ 의 정의는 다음과 같다.

$$\overline{C}_f = \frac{\overline{\tau_w}}{\frac{1}{2}\rho U_d^2} \quad (6)$$

여기서 $\overline{\tau_w}$ 는 채널 벽에서 시간 평균된 전단응력, ρ 는 밀도 그리고 U_d 는 중앙속도를 각각 나타낸다. Fig. 10은 채널 내의 실린더가 회전하지 않을 때(Fig. 10(a))와 회전할 때(Fig. 10(b))의 채널 위쪽 벽에서의 시간 평균된 마찰계수($\overline{C}_{f, Upper}$) 값을

Fig. 11 Distribution of mean friction coefficient on the lower channel wall for $Re = 150$, (a) $\alpha = 0$, (b) $\alpha = 7.5$

각각 나타낸다. Fig. 10(b)에서의 $\overline{C_{f,Upper}}$ 는 채널 위쪽 벽 $x = 3.0 \sim 3.5$ 지점에서 높은 값을 나타내며 회전하는 실린더가 채널 아래쪽 벽에 가까워질수록 $\overline{C_{f,Upper}}$ 값이 더욱 높게 나타난다. 또한 실린더가 채널 벽에서 멀어질수록 각 G/d 에서 $\overline{C_{f,Upper}}$ 의 최고값이 발생하는 위치가 오른쪽으로 이동하는 경향이 나타난다. 이는 회전하는 실린더와 채널 아래쪽 벽에서 생기는 재순환 영역 사이를 지나는 유체의 진행 각도에 따라 유동이 위쪽 벽에 영향을 주는 지점이 달라짐에 따라 나타나는 현상이다. 앞서 Fig. 6-9에서 보았듯이 회전하는 실린더가 채널 아래쪽 벽에서 멀어질수록 실린더 후류에서 발생하는 재순환 영역의 크기가 점점 작아지게 되고 위치가 오른쪽으로 조금씩 이동하게 되는데, 이 재순환 영역의 크기와 위치의 변화는 회전하는 실린더와 채널 아래쪽 벽에서 생기는 재순환 영역 사이를 지나는 유체의 진행 각도를 변화시키

Fig. 12 Time-averaged friction factor plotted against G/d

는 요인이 된다.

Fig. 11은 채널 내의 실린더가 회전하지 않을 때(Fig. 11(a))와 회전할 때(Fig. 11(b))의 채널 아래쪽 벽에서의 시간 평균된 마찰계수($\overline{C_{f,Lower}}$) 값을 각각 나타낸다. Fig. 11(b)에서의 $\overline{C_{f,Lower}}$ 는 회전하는 실린더의 앞쪽 지점($x = 1 \sim 1.5$)에서 높은 값을 나타낸다. 이는 실린더의 회전이 실린더와 아래쪽 채널 벽 사이를 지나는 유동을 보다 빠른 속도로 진행하게 만들기 때문이다. 그리고 회전하는 실린더가 채널 아래쪽 벽에 가까워질수록 $\overline{C_{f,Lower}}$ 값이 더욱 높게 나타나는데, 이는 실린더와 채널 아래쪽 벽 사이가 가까워질수록 실린더의 회전이 실린더와 채널 아래쪽 벽 사이를 지나는 유동의 속도를 증가시키기 때문이다. Fig. 10, 11에서의 $\overline{C_{f,Upper}}$, $\overline{C_{f,Lower}}$ 값 모두 실린더가 회전할 때가 회전하지 않을 때에 비해 높은 값을 갖는다. 이는 실린더의 회전으로 인하여 실린더 주위 유체의 속도가 증가하여 채널 벽에서의 전단력을 증가시키기 때문이다.

Fig. 12는 G/d 의 변화에 따른 채널에서의 f (friction factor)를 보여주며, f 의 정의는 다음과 같다.

$$f = \frac{\beta h}{\frac{1}{2} \rho U_d^2} \quad (7)$$

여기서 β 는 압력강하를 나타낸다.

원형 실린더는 채널에서의 f 를 상당히 증가시킨다. 실린더가 회전하지 않을 경우, G/d 가 커짐에 따라 f 값이 서서히 증가한다. 그러나 실린더가 회전하는 경우 G/d 가 커질수록

f 는 감소하며, $G/d \geq 1.75$ 에서는 f 값이 실린더가 회전하지 않을 때의 f 값에 비해 더 작게 나타난다. 따라서 채널 아래쪽 벽에 실린더가 가까이 존재하는 경우, 실린더가 회전하게 되면 실린더가 회전하지 않을 때에 비해 채널에서의 압력강하가 크게 발생하고, 채널 아래쪽 벽에서 실린더가 멀리 떨어져 있는 경우($G/d \geq 1.75$), 실린더가 회전하게 되면 실린더가 회전하지 않을 때에 비해 채널에서의 압력강하가 작게 발생함을 관측할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 채널형 열교환기에서 열교환 촉진체로 많이 사용되는 와류 생성기의 단순화된 모델로 채널 내 주기적으로 배열된 회전하는 실린더를 지나는 유동에 대한 연구를 수행하였다. 열교환기에서 효율적인 열전달을 위해서 가장 중요한 요소는 효율적인 유동 교란이다. 이에 본 연구에서는 비정상 유동 천이가 발생하는 유동 불안정성에 대하여 실린더와 채널 벽 간격이 미치는 영향에 대해 실린더가 회전하지 않을 때와 비교하여 살펴보았다.

채널 내 주기적으로 회전하는 원형 실린더($\alpha = 7.5$)가 존재할 경우, 정지해있는 원형 실린더($\alpha = 0$)가 존재할 경우에 비해 각 G/d 에 대해서 더 낮은 Re_c 를 얻었다. 따라서 회전하는 실린더가 정지해 있는 실린더에 비해 효율적인 유동 교란이 형성되는 것으로 파악 되었다. 또한 채널 내에 실린더가 회전하는 경우, 채널 위쪽 벽과 아래쪽 벽에서의 $\overline{C_{f,Upper}}$, $\overline{C_{f,Lower}}$ 값 모두 실린더가 회전하지 않을 때보다 훨씬 더 높은 결과가 나왔다. 이는 채널 내에서 회전하는 실린더가 채널 벽에 더 많은 영향을 끼치는 것으로 판단된다. 본 연구에서 얻어진 유동 불안정성 특성에 대한 자료는 채널형 열교환기 설계에 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012R1A2A2A01013019).

Note

This paper is a revised version of a paper presented at the KSCFE 2013 Autumn Annual meeting, Seoul national university of science and technology, November 1, 2013.

References

- [1] 2002, Valencia, A. and Cid, M., "Turbulent unsteady flow and heat transfer in channels with periodically mounted square bars," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.45, No.8, pp.1661-1673.
- [2] 2002, Buyruk, E., "Numerical study of heat transfer characteristics on tandem cylinders, inline and staggered tube banks in cross-flow of air," *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, Vol.29, No.3, pp.355-66.
- [3] 2006, Zhou, Y. and Yiu, M.W., "Flow structure, momentum and heat transport in a two-tandem-cylinder wake," *J. Fluid Mech.*, Vol.548, pp.17-48.
- [4] 2010, Han, T.H., Yang, K.S. and Lee, K., "Heat transfer Characterization of two isothermal circular cylinders in proximity," *ASME J. Heat transfer*, Vol.132, No.3, pp.034504.
- [5] 1998, Piñol, S. and Grau, F.X., "Influence of the no-slip boundary condition on the prediction of drag, lift, and heat transfer coefficients in the flow past a 2-D cylinder," *Numer. Heat Transfer, Part A*, Vol.34, pp.313-330.
- [6] 2010, Yoon, D.H., Yang, K.S. and Kang, C., "Primary Instability of the channel flow with a streamwise-periodic array of circular cylinders - Effects of the distance between the cylinder and the channel wall," *J. Comput. Fluids Eng.*, Vol.15, No.3, pp.54-59.
- [7] 2013, Jeong, T., Yang, K.S., Lee, K. and Kang, C., "Heat transfer enhancement in channel flow by a streamwise-periodic array of circular cylinders," *J. Comput. Fluids Eng.*, Vol.18, No.2, pp.85-92.
- [8] 1996, Hu, G.H., Sun, D.J., Yin, X.Y. and Tong, B.G., "Hopf bifurcation in wakes behind a rotating and translating circular cylinder," *Phys. Fluids*, Vol.8, No.7, pp.1972-1974.
- [9] 2004, Xiong, J., Ling, G. and Zhu, K., "Numerical estimate of the stability curve for the flow past a rotating cylinder," *Phys. Fluids*, Vol.16, No.7, pp.2697-2699.
- [10] 2003, Stojković, D., Schön, P., Breuer, M. and Durst, F., "On the new vortex shedding mode past a rotating circular cylinder," *Phys. Fluids*, Vol.15, No.5, pp.1257-1260.
- [11] 2006, Yang, J. and Balaras, E., "An embedded-boundary formulation for large-eddy simulation of turbulent flows interacting with moving boundaries," *J. Comp. Phys.*, Vol.215, pp.12-40.

- [12] 2013, Pralits, J.O., Giannetti, F. and Brandt, L., "Three-dimensional instability of the flow around a rotating circular cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol.730, pp.5-18.
- [13] 2000, You, J., Choi, H. and Yoo, J.Y., "A modified fractional step method of keeping a constant mass flow rate in fully developed channel and pipe flows," *KSME Int. J.*, Vol.14, pp.547-552.
- [14] 1995, Schatz, M.F., Barkley, D. and Swinney, H., "Instability in a spatially periodic open flow," *Phys. Fluids*, Vol.7, No.2, pp.344-358.
- [15] 1994, Schumm, M., Berger, E. and Monkewitz, P.A., "Self-excited oscillations in the wake of two-dimensional bluff bodies and their control," *J. Fluid Mech.*, Vol.271, pp.17-53.
- [16] 1971, Stuart, J.T., "Nonlinear stability theory," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.3, pp.347-370.
- [17] 1994, Park, D.S., "Theoretical analysis of feed back control of Karman vortex shedding at slightly supercritical Reynolds numbers," *Eur. J. Mech. B/Fluids*, Vol.13, pp.387-399.
- [18] 1998, Sohankar, A., Norberg, C. and Davidson, L., "Low-Reynolds number flow around a square cylinder at incidence: study of blockage, onset of vortex shedding and outlet boundary condition," *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol.26, pp.39-56.