플라즈마 가진에 의한 원형 실린더 후류의 제어

김 동 주

금오공과대학교 기계공학과

CONTROL OF CIRCULAR CYLINDER WAKE USING PLASMA ACTUATION

Dongjoo Kim

Dept. of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology

Numerical simulations are carried out for flow over a circular cylinder controlled by the momentum forcing which is generated by a pair of plasma actuators symmetrically mounted on the cylinder surface. A popular and empirical plasma model is used for the spatial distribution of momentum forcing. In this study, we consider two different types of actuation, i.e., steady and unsteady (or pulsed) actuation. In the unsteady actuation, the actuation is turned on and off periodically, its frequency being a control parameter. The objective of this study is to investigate the effects of actuator location and actuation frequency on the flow structures and the forces on the cylinder. Results show that the cylinder wake can be effectively controlled by proper actuator location. For example, when the actuators are located at 120° from the stagnation point, vortex shedding is completely suppressed with the boundary layer almost fully attached to the surface, resulting in drag reduction and lift elimination.

Key Words : 원형 실린더(Circular Cylinder), 후류 제어(Wake Control), 플라즈마 가진 (Plasma Actuation)

1. 서 론

항력 감소, 양력 증가, 혼합 증대, 열전달 향상 등을 목표로 유동장을 제어하고자 많은 연구가 수행되어 왔다. 그 결과 다양한 형태의 제어장치 및 제어기법이 개발되었고, 공기의 분사/흡입[1], 합성제트(synthetic jet)[2], 전기장 및 자기장을 이용하는 방법 등을 예로 들 수 있다. 이 방법들 중 상대적으로 최근에 유체역학자들의 관심이 되고 있는 유동제어 방법은 플라즈마 액츄에이터를 이용하는 것이다[3,4]. 특히 유전체 장벽 방전(Dielectric Barrier Discharge, DBD)이라는 개념의 플라즈마 장치가 개발된 후, 많은 연구자들이 플라즈마를 유동 제어의 수단으로 활용하고 있다[3]. 예를 들어, 평판 경계층의 마찰 항력 감소, 비행기 날개의 유동박리 제어 등이 성공적으로 수행되었다.

이와 같이 연구자들이 플라즈마를 이용한 유동제어에 관심을 갖는 이유는 기계적인 제어장치에서 발생하는 여러 단점들로부터 자유롭기 때문이다[5]. 즉, 플라즈마 제어장치에는 공기의 분사/흡입 및 합성제트 장치와 달리 움직이는 기계 부품이 필요 없기 때문에 진동이 없고 소음이 적으며, 마모 등으로 인한 장치의 파손을 걱정할 필요가 없다. 또한, 플라즈마 제어의 경우 시스템의 응답 시간이 매우 짧기 때문에 고주파에서 실시간으로 제어가 가능하다.

본 연구의 대상인 원형 실린더에서 발생하는 후류를 플라즈마 액츄에이터를 이용하여 제어한 선행연구는 다음과 같다. Thomas 등[6]은 플라즈마 액츄에이터를 이용한 실험을 통해 원형 실린더에서 발생하는 보텍스 shedding을 억제함으로써 후류의 난류 강도를 감소시키고 근거리 소음을 약 13.3 dB 감소시켰다. Kim & Wang[7]은 플라즈마 가진을 운동량 부가의 형태로 모델링하여 LES 해석을 수행한 결과, Thomas 등[6]의 실험결과를 검증함과 동시에 평균 항력 및 양력의 섭동량이 플라즈마 가진에 의해 감소하는 원인을 밝혔다. 그 후, Kozlov & Thomas[8]은 랜딩 기어 구조물의 단순화한 모델로서 한 쌍의 실린더가 앞뒤로 놓여 있는 경우에 대해 실험을 수행하였고, 플라즈마 가진에 의해 하류에 위치한 실린더 표

Received: May 19, 2012, Revised: June 13, 2012,

Accepted: June 14, 2012.

* Corresponding author, E-mail: kdj@kumoh.ac.kr

DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2012.17.2.071

© KSCFE 2012

Fig. 1 Schematic of DBD plasma actuator

면의 압력 섭동을 크게 감소시킬 수 있음을 보였다.

지금까지 살펴본 바와 같이 본 연구의 주제와 관련된 선행 연구가 매우 제한적이었기 때문에 체계적인 연구가 계속적으로 수행될 필요가 있다. 예를 들어, 레이놀즈 수, 액츄에이터의 설치 위치 및 가진 주파수에 따른 제어 효과의 차이에 대해 심도 있는 연구가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 기존 연구에 비해 상대적으로 낮은 레이놀즈 수에서 플라스마 가속에 의한 운동량 부가가 실린더 후류를 효과적으로 제어할 수 있는지 살펴보고 그 원인을 분석하고자 한다.

2. 수치해석 방법

Fig. 1에 나타난 바와 같이 전형적인 DBD 액츄에이터는 두 개의 전극과 유전체 등으로 구성되며, 하나의 전극은 공기 중에 노출되지만 다른 전극은 유전체로 둘러싸여 있다. 만약 충분히 높은 전압의 교류를 전극에 공급해 주면, 공기가 이온화되어 플라스마가 발생한다. 이때, 플라스마는 두 전극이 가까이 이웃한 지점에서 시작되어 숨어 있는 전극 위에 위치한 유전체 표면을 따라 형성된다. 이렇게 이온화된 공기는 전극 주위의 전기장에 의해 힘을 받아 벽 제트(wall jet) 형태의 유동을 형성하며, 이를 이용하여 유동장을 제어할 수 있다.

DBD 플라스마에 의한 가진 효과는 Navier-Stokes 방정식에 운동량을 추가하는 것으로 나타낼 수 있다. 따라서, 플라스마에 의한 운동량 부가 f_i 를 고려할 경우, 비압축성 유동에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0. \quad (2)$$

여기서, u_i 와 p 는 각각 유체의 속도 성분 및 압력을 나타내고, ρ 와 μ 는 유체의 밀도와 점성계수를 의미한다. 플라스마

Fig. 2 Model for plasma forcing

에 의한 운동량 부가는 전하 밀도(charge density) ρ_c 와 전기장 벡터 E_i 의 곱으로 표현되며 ($f_i = \rho_c E_i$), 전기장 벡터는 전기 포텐셜 ϕ 의 구배에 해당한다 ($E_i = -\partial\phi/\partial x_i$). 위의 지배방정식을 자유유동 속도 U_∞ , 실린더의 직경 D , 전하 밀도 ρ_c , 전기장 세기의 기준값 E_{ref} 을 이용하여 무차원화하면 아래의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial t^*} + \frac{\partial u_i^* u_j^*}{\partial x_j^*} = - \frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_j^* \partial x_j^*} + D_c f_i^*, \quad (3)$$

$$D_c = \frac{\rho_c E_{ref} D}{\rho U_\infty^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial x_i^*} = 0. \quad (5)$$

여기서, 위첨자 *는 무차원화된 변수임을 나타내며, D_c 는 관성력에 대한 플라스마에 의한 힘의 비를 나타내는 무차원수이다. D_c 에 대한 유사한 정의는 Rizzeta & Visbal[9]의 연구에서 찾아볼 수 있으며, 그들은 D_c 를 ‘plasma scale parameter’라 명명하였다. 식 (3)에서 알 수 있듯이 D_c 는 레이놀즈 수와 함께 플라스마를 이용한 유동 제어에서 중요한 무차원수가 된다. 본 연구에서는 보텍스 shedding이 발생하는 $Re=100$ 을 연구 대상으로 하였고, D_c 는 Rizzeta & Visbal[9]를 참고하여 50이라 가정하였다. 지배방정식 (3)과 (5)를 풀기 위해 본 연구에서는 범용 유동해석 프로그램인 FLUENT를 사용하였다. 속도와 압력의 연계 알고리즘으로 SIMPLE를 사용하였고, 운동량 방정식에서 대류항의 공간차분 기법으로 2차 정확도의 상류 도식(linear upwind scheme)을 사용하였다.

플라스마에 의한 운동량 가진 f_i^* 에 대해 Fig. 2와 같이 Shyy 등[10]이 제시한 모델을 사용하였다. 그림의 화살표는 f_i^* 를 나타내며, OAB로 이루어진 삼각형 내부에 플라스마가 형성된다고 가정한다. 또한, 전기장의 세기는 O점에서 최대값을 갖고 O점에서 멀어질수록 선형적으로 감소하는 반면, 전하 밀도는 플라스마 내부에서 일정하다고 가정한다. 이 모델은 실험에 기반을 둔 모델로서 간단하지만 지금까지 많은 연

Fig. 3 Geometry and boundary conditions

Fig. 4 Coarse computational mesh

구에 활용되어 좋은 결과를 보여주고 있다[9,10].

Fig. 3과 Fig. 4는 실린더 주위의 유동을 해석하기 위한 좌표계 및 격자를 나타내며, 본 연구에서는 직교좌표계에서 비정렬 격자를 사용하였다. 좌표계의 중심은 실린더의 중심으로 정의하였고, 전체 계산영역으로 x 방향은 $-20D \sim 20D$, y 방향은 $-50D \sim 50D$ 를 사용하였다. 경계조건으로 입구 및 원거리에서 Dirichlet 경계조건을 사용하였고, 출구에서는 Neumann 조건에 해당하는 outflow 조건을 주었다. 계산에 사용한 격자는 실린더 표면의 경계층을 위한 직사각형 형태의 격자와 후류 및 나머지 영역을 위한 삼각형 격자를 혼합하여 사용하였다. 약 3만 개와 6만 개의 격자를 갖는 두 격자계에서 평균 항력 및 보텍스 shedding 주파수를 비교한 결과, 차이가

Fig. 5 Spanwise vorticity contours at $t^*=200$ for the baseline case (20 levels between -5 and 5)

1% 이내임을 확인하였다. 두 격자계에서 실린더 표면에 사용한 격자점은 각각 180개와 270개이다. 해석에 사용된 시간 간격은 $\Delta t^* = \Delta t U_\infty / D = 0.02$ 이다.

3. 해석 결과

3.1 운동량을 부가하지 않은 경우

플라즈마 가진에 의한 운동량 부가 효과를 분석하기에 앞서 가진이 없는 경우에 대해 실린더 주위의 유동을 먼저 해석해 보았다. Fig. 5는 해석 결과가 충분히 수렴한 $t^* = 200$ 인 순간의 와도 분포를 나타낸 것으로 전형적인 Karman 보텍스 shedding을 잘 보여준다. Table 1은 정량적인 검증에 위해 여러 데이터를 기존의 실험 및 계산 결과와 비교한 것이다. 본 연구에서 얻은 평균 항력, 양력의 섭동량 및 보텍스 shedding의 주파수(무차원 스트로울 수) 모두 기존의 연구 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

3.2 운동량을 부가하여 제어한 경우

Fig. 6은 플라즈마 액츄에이터를 원형 실린더에 설치한 모습으로 위아래가 대칭이 되도록 설치되어 있다. 액츄에이터의 설치 위치는 일반적으로 유동 박리가 발생하는 지점 근처에 설치하는 것이 효과적이며, 제어하지 않은 유동의 박리점은 정체점으로부터 약 120° 근처에서 관찰된다. 따라서, 본 연구에서는 정체점으로부터 액츄에이터까지의 각도 α_c 가 90° , 120° , 150° 인 세 경우에 대해 연구를 수행하였다.

Table 1 Simulation results without control at $Re = 100$

	$\overline{C_d}$	$C_l(RMS)$	St
Present Simulation	1.344	$\pm 0.329(0.233)$	0.166
Park et al.[11] (Simulation)	1.33	± 0.3321	
Kim & Choi[12] (Simulation)	1.336	(0.233)	
Williamson[13] (Experiment)			0.164

Fig. 6 Plasma actuators mounted on the cylinder

Fig. 7 Two different actuation modes

한편, Fig. 7은 액츄에이터에 공급되는 전압의 시간에 따른 변화를 나타낸 것으로, 전력 공급의 방식에 따라 두 가지 가진 방법을 생각할 수 있다. 우선, 정상 가진(steady actuation)은 액츄에이터를 항상 ON 시킨 경우이다. 통상 사용되는 수십 kHz에 달하는 교류 전압의 시간 스케일이 유동의 시간 스케일에 비해 매우 작은 경우, 플라즈마에 의한 힘을 정상 상태로 가정할 수 있다[6]. 반면, 비정상 가진(unsteady actuation)의 경우에는 액츄에이터의 전원 공급을 주기적으로 ON/OFF 시킴에 따라 비정상적인 힘을 발생시킨다. 따라서, 정상 가진의 경우에는 운동량 부가 f_i 가 시간에 대해 일정한 반면, 비정상 가진의 경우에는 ON/OFF에 따라 펄스 형태의 함수를 사용하였다. 비정상 가진을 공급할 경우, ON/OFF 주기에 해당하는 주파수 성분($f = 1/T_1$, $St_c = fD/U_\infty$)이 존재하며, 이 주파수에 따라 항력 감소 등 제어 효과가 달라질 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 정상 가진과 비정상 가진의 제어 효과를 비교하고, 더불어 가진 주파수에 따른 차이가 있는지에 대해서도 연구를 수행하였다. 하지만, duty cycle($= T_2/T_1$)은 제어 효과에 미치는 영향이 크지 않다는 선행 연구결과[6]를 바탕으로 25%로 고정하였다. 본 연구에서는 정상 및 비정상 가

Fig. 8 Time histories of drag and lift coefficients for the baseline and controlled cases with three different actuator locations: (a) drag; (b) lift

진에 상관없이 두 액츄에이터에 공급된 전압이 항상 일치하는, 즉 대칭적인 가진을 고려하였다.

3.2.1 액츄에이터 설치 위치의 영향

Fig. 8은 플라즈마 가진에 의해 유동을 제어한 결과로 항력 계수와 양력 계수를 시간의 함수로 그린 것이며, 비교를 위해 제어하지 않은 경우를 함께 나타내었다. 설치 위치에 상관없이 $t^* = 200$ 에서 운동량을 부가하기 시작하였고, 항력 및 양력 계수 모두 $t^* = 220$ 이전에 새로운 수렴 상태에 도달하였다. 항력 계수를 먼저 살펴보면, 액츄에이터의 설치 위치가 실린더 뒤쪽으로 이동할수록 항력 계수가 감소한다. 제어하지 않은 경우와 비교해 보면, 90° 위치에서는 오히려 항력이 약 9% 증가한 반면, 120° 와 150° 에서는 각각 31%와 58% 감소한다. 한편, 양력 계수를 살펴보면, 평균값은 예상대로 모든 경우에 영이 되지만, 섭동량은 설치 위치에 따라 다른 경향을 보인다. 즉, 90° 와 120° 에서는 가진에 의해 정상유동이 되기 때문에 영이 되지만, 150° 에서는 보텍스 shedding을 약

Fig. 9 Contours of instantaneous spanwise vorticity for different actuation locations: (a) $\alpha_c=90^\circ$; (b) $\alpha_c=120^\circ$; (c) $\alpha_c=150^\circ$

화시켜 섭동량의 크기는 감소하지만 여전히 비정상 유동이기 때문에 완전히 영이 되지는 않는다.

이러한 항력 및 양력 계수의 변화는 실린더 후류에서 발생하는 보텍스 웨딩의 구조와 밀접한 관련이 있다. 따라서, 이를 분석하기 위해 Fig. 9와 같이 횡방향 와도 분포를 그려 보았다. Fig. 8에서 예상했듯이 액츄에이터가 90° 와 120° 에 설치되어 있는 경우에는 보텍스 웨딩이 완전히 억제되어 사라진다. 반면, 액츄에이터가 150° 에 설치된 경우에는 실린더의 위와 아래에서 발생하는 두 박리 전단층(separating shear layer) 및 보텍스의 상호작용이 크게 약화되었지만, 여전히 보텍스 웨딩이 발생하는 것을 알 수 있다. 이를 보다 명확히 살펴보기 위해 Fig. 10에 실린더 근처의 유선 및 압력 분포를 비교하였다. 90° 에 설치된 액츄에이터는 유동 박리를 지연시켜 약 145° 에서 박리가 발생한 반면, 120° 에 설치된 액츄에이터는 실린더의 거의 전 구간에 걸쳐 유동 박리를 억제하고 있다. 이에 비해 150° 에 설치된 액츄에이터는 약 125° 근처에서 발생하는 유동 박리를 억제하지는 못하고, 약 140° 근처에서 경

Fig. 10 Comparison of near-wake flow fields for different actuator locations (top, $\alpha_c=90^\circ$; middle, $\alpha_c=120^\circ$; bottom, $\alpha_c=150^\circ$): (a) streamlines; (b) pressure contours (15 levels between -1 and 1)

계층을 재부착 시킨다. 한편, 압력 분포를 살펴보면 액츄에이터가 설치된 위치 주변의 압력이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이러한 특징으로 인해 압력 항력이 감소한 것으로 판단된다. 특히, 액츄에이터가 150° 에 설치된 경우, 두 벽 제트의 강한 충돌로 인해 실린더 뒷면의 압력이 크게 증가하는데, 그 결과 120° 에 설치된 경우보다 항력이 더 감소한다. 따라서, Fig. 8에서 α_c 가 증가함에 따라 항력이 감소하는 경향을 보이는 것은 운동량 부가에 의한 유동박리 지연 및 압력 항력의 감소 때문이라 할 수 있다. 하지만, α_c 가 90° 일 때 제어하지 않은 경우보다 항력이 오히려 증가한 이유는 유동박리 지연 및 압력 항력의 감소 효과보다 마찰 항력의 증가 효과가 더 크기 때문이다.

3.2.2 정상 가진 vs. 비정상 가진 ($St_c = 1$)

앞 절에서 기술한 정상 가진의 결과를 보면 보텍스 웨딩을

Fig. 11 Comparison of drag and lift coefficients between the steady actuation and unsteady actuation at $St_c = 1$ for $\alpha_c = 120^\circ$: (a) drag; (b) lift

완전히 억제시켜 양력의 섭동이 사라지고 항력 역시 크게 감소된 120° 의 경우를 최적의 액츄에이터의 위치라 할 수 있다. 따라서, 이 절에서는 액츄에이터의 설치 위치는 120° 로 고정하고, 가진 방식을 정상 가진에서 $St_c = 1$ 인 비정상 가진으로 바꾸어 해석을 수행하고 결과를 비교하였다.

Fig. 11은 가진이 없는 경우, 정상 가진, 비정상 가진의 세 경우에 대해 항력 계수와 양력 계수를 시간의 함수로 나타낸 것이다. 비정상 가진의 경우, 항력 계수는 가진 주파수에 따라 크게 섭동하는 특징을 보이는 반면, 양력 계수는 가진 주파수의 영향을 쉽게 확인할 수 없다. 이는 액츄에이터를 대칭적으로 설치함에 따라 각 액츄에이터가 양력에 미치는 효과는 서로 상쇄되기 때문이다. 전체적으로 정상 가진과 비정상 가진을 평가해 보면, 양력의 관점에서는 유사하지만 항력의 관점에서는 지나치게 크게 증가한 항력의 섭동으로 인해 비정상 가진을 좋은 제어 방법이라 하기 힘들다. Fig. 12는 비정상 가진으로 발생하는 보텍스를 관찰하기 위해 와도 분포의 한 주기 변화를 그린 것이다. 액츄에이터가 설치된 위치 주변에 상대적으로 작은 보텍스가 대칭적으로 발생했다가 소멸되

Fig. 12 Time sequence of vorticity contours near the cylinder during one cycle of actuation T_c from $t^* = 230$: (a) $T_c/4$; (b) $1/2 T_c$; (c) $3/4 T_c$; (d) T_c

는 것을 알 수 있다.

3.2.3 비정상 가진에서 주파수의 영향

3.2.2절과 마찬가지로 120° 에 설치된 액츄에이터에 대해 무차원 가진 주파수 St_c 를 0.5, 1, 2로 바꾸어 해석을 수행하여 주파수의 영향을 살펴보았다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 항력 계수의 평균값 및 양력 계수의 섭동량에 큰 차이가 없고, 항력 계수의 주파수 성분만 가진 주파수에 따라 변한다. 즉, 연구를 수행한 조건에서는 항력 감소 및 보텍스 쉼딩의 제어 관점에서 주파수를 변화시키는 것은 별 도움이 되지 않았다. 이러한 결과는 가진 주파수에 따라 보텍스 쉼딩 억제 효과에 차이를 보인 높은 레이놀즈 수($Re=33,000$)의 결과와는 다른 특징이다[6]. 이러한 차이는 레이놀즈 수의 차이에서 기인한 것으로 보이며, 높은 레이놀즈 수에서는 후류의 보텍스 쉼딩 뿐만 아니라 전단층에서 발생하는 작은 스케일의 보텍스 역시 존재하기 때문에 가진 주파수에 따른 제어 효과가 다른 것으로 추정할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 수치해석을 수행하여 플라즈마 액츄에이터에 의한 운동량 부가가 실린더 주위의 유동 및 실린더에 작용하는 항력과 양력에 미치는 영향을 분석하였다. 특히 설계 인자에 해당하는 액츄에이터의 설치 위치, 정상 가진과 비정

Fig. 13 Dependency of drag and lift coefficients on the actuation frequency for $\alpha_c=120^\circ$: (a) drag; (b) lift

상 가진의 차이, 비정상 가진에서 가진 주파수의 영향을 차례로 조사하였다.

해석을 수행한 결과 액츄에이터의 설치 위치에 따라 실린더에서 발생하는 보텍스 shedding 억제 및 항력 감소의 효과가 크게 변하였다. 즉, 플라스마 가진에 의해 경계층에 운동량을 부가함으로써 유동 박리를 지연시킬 수 있다는 사실은 잘 알려져 있지만, 효과적인 항력 감소와 보텍스 shedding 제거를 위해서는 최적의 설치 위치를 찾을 필요가 있음을 알았다. 한편, 비정상 가진을 사용하면 정상 가진에 비해 유동 제어에 필요한 전력을 감소시킬 수 있기 때문에 선행 연구에서 관심의 대상이 되었다. 하지만, 본 연구에서는 비정상 가진에 의해 항력 계수의 섭동량이 크게 증가하여 제어하지 않은 경우보다도 커지는 것이 관찰되었다. 마지막으로 선행 연구와 달리 가진 주파수의 영향은 매우 미미하였는데, 이는 레이놀즈 수 및 전단층의 특성 차이에 기인한 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2008년 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성

사업비)으로 학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-521-D00055).

참고문헌

- [1] 1992, Williamson, D., Mansy, H. and Amato, C., "The response and symmetry properties of a cylinder wake subjected to localized surface excitation," *J. Fluid Mech.*, Vol.234, pp.71-96.
- [2] 2002, Glezer, A. and Amitay M., "Synthetic jets," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol.34, pp.503-529.
- [3] 2010, Corke, T.C., Enloe, C.L. and Wilkinson, S.P., "Dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol.42, pp.505-529.
- [4] 2004, Post, M.L. and Corke, T.C., "Separation control on high angle of attack airfoil using plasma actuators," *AIAA J.*, Vol.42, pp.2177-2184.
- [5] 2007, Moreau, E., "Airflow control by non-thermal plasma actuators," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.40, pp.605-636.
- [6] 2008, Thomas, F.O., Kozlov, A. and Corke, T.C., "Plasma actuators for cylinder flow control and noise reduction," *AIAA J.*, Vol.46, pp.1921-1931.
- [7] 2009, Kim, D. and Wang, M., "Large-eddy simulation of flow over a circular cylinder with plasma-based control," *AIAA paper 2009-1080*.
- [8] 2011, Kozlov, A. and Thomas, F.O., "Plasma flow control of cylinders in a tandem configuration," *AIAA J.*, Vol.49, pp.2183-2193.
- [9] 2009, Rizzetta, D.P. and Visbal, M.R., "Large eddy simulation of plasma-based control strategies for bluff body flow," *AIAA J.*, Vol.47, pp.717-729.
- [10] 2002, Shyy, W., Jayaraman, B. and Andersson, A., "Modeling of glow discharge-induced fluid dynamics," *J. Appl. Phys.*, Vol.92, pp.6434-6443.
- [11] 1998, Park, C., Kwon, K. and Choi, H., "Numerical solutions of flow past a circular cylinder at Reynolds numbers up to 160," *KSME Int. J.*, Vol.12, pp.1200-1205.
- [12] 2005, Kim, J. and Choi, H., "Distributed forcing of flow over a circular cylinder," *Phys. Fluids*, Vol.17, pp.033103-1-16.
- [13] 1989, Williamson, C.H.K., "Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers," *J. Fluid Mech.*, Vol.206, pp.579-627.