

# 주기적 회전을 이용한 원봉 후류의 되먹임 제어

이 상 봉<sup>\*1</sup>, 백 승 진<sup>\*2</sup>, 성 형 진<sup>\*3</sup>

## Feedback Control of a Circular Cylinder Wake with Rotational Oscillation

S. B. Lee, S.-J. Baek and H. J. Sung

A new feedback control system based on system identification is proposed and preliminarily tested on Van der Pol equation which has a similar characteristic to circular cylinder. The same principle is applicable to circular cylinder in a uniform flow for suppressing the vortex shedding. The feedback controller is designed to impose feedback signal at the phase which is located outside the range of lock-on. The lift coefficient (CL) is employed as a feedback signal and the control forcing is given by a rotational oscillation of the cylinder. By applying the feedback control system, the lift coefficient is reduced.

**Key Words:** 되먹임제어(Feedback Control), 원봉 후류(Cylinder Wake), 동조(Lock-on)

### 1. 서 론

원봉 후류는 와홀림 현상에 의한 자려 진동 (self-sustained oscillation)의 특성을 가지고 있다. 이로 인한 원봉 후류에서 발생하는 유동 유기 진동/소음 및 열/물질 전달 등의 문제 해결을 위해서 와홀림 구조의 제어에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 대부분의 이전 연구의 방향은 와홀림 억제에 초점이 맞춰져 왔다. 이를 위해서 기하학적 형상 변경의 수동적 방법 외에도 원봉의 수직 진동, 회전 진동, 표면에서의 흡입/분사, 음향 가진 등의 가진 방법 등이 많이 이용되어 왔다.<sup>(1~4)</sup> 문헌 조사에 의하면 이러한 연구는 대부분 일정한 주파수와 크기로 가진한 경우에 와홀림 구조 변화를 관찰한 것이다. 대표적으로 알려진 결과는 가진 주파수와 와홀림 주파수의 일치인 lock-on 현상이다. 또한 수치적, 실험적 가시화에 의해서 자연 와홀림 주파수 부근의 가진 주파

수로 가진한 경우에 원봉의 가진 위상에 대한 와홀림 위상이 대략 180° 정도의 급격한 변화를 한다는 사실이 알려져 있다.<sup>(1~3,7)</sup>

위와 같은 open loop의 주기적 가진에 관한 많은 연구가 있으나, 상대적으로 되먹임제어(feedback control)에 관한 연구는 적다.<sup>(8,10,12,14)</sup> 되먹임 제어는 원봉 후류 유동장의 정보를 측정하여 가진 크기 및 위상을 결정하는 것으로 크게 두가지로 구분할 수 있다. 하나는 유동장의 고정된 한점에 센서를 고정시키고 시간 지연의 크기를 바꾸는 경우이고, 나머지 하나는 시간 지연을 고정시키고 센서의 위치를 바꾸는 경우이다. Roussopoulos (1993)<sup>(14)</sup>은 되먹임 제어의 풍동 수행을 수행하여 와홀림 시작 레이놀즈수인 48보다 약 20%가 높은 레이놀즈 수까지 와홀림을 억제하였다. Park, Ladd & Hendricks (1994)<sup>(12)</sup>는 원봉 일부 표면에서의 분사, 흡입을 이용하여 레이놀즈 수 60에서 와홀림 억제가 가능하나 레이놀즈수 80에서는 불가능한 사실을 보였다. Huang (1996)<sup>(10)</sup>과 Fujisawa, Kawaji & Ikemoto (2001)<sup>(8)</sup>은 센서의 위치를 고정시키고 되먹임 시간 지연을 조절하여 최적 조건에서 유동장의 섭동량이 감소하고 항력 등이 감소하는 결과를 보였다. 그러나 위와 같은 되먹임 제

\*1 학생회원, KAIST

\*2 학생회원, 현대자동차 남양 연구소

\*3 정회원, KAIST

\*E-mail : hjsung@kaist.ac.kr

어는 몇가지의 단점을 가지고 있다. 와홀림 억제제를 위한 센서의 위치나 시간 지연의 조건을 찾기 위해 각각에 대한 실험이 행해져야 한다는 것이다. 또한 이러한 와홀림 억제제가 가능한 센서의 영역이 좁고, 원봉 후류의 반응이 센서 위치에 따라서 매우 민감하다는 것이다. 센서의 위치가 바뀌게 되면 와홀림 억제제가 가능하지 않고, 반대로 강화 될 수도 있다.

본 연구에서는 가진과 와홀림의 위상 관계를 이용한 되먹임 제어 방법을 제안한다. Lock-on과 같은 원봉의 특성과 유사한 거동을 보이는 Van der Pol 방정식을 통해 선형적 되먹임 제어 이론이 비선형 시스템에 적용되는 방식을 분석한다. 이러한 분석을 통해 비선형 되먹임 제어에서는 가진과 되먹임 신호 간의 위상 관계가 중요한 제어 인자가 됨을 밝히고, 위상 관계에 따른 제어 결과를 살펴본다. 같은 원리를 원봉에 적용하여 되먹임 제어를 행한다. 원봉에서 되먹임의 제어 신호는 기존의 연구에서 사용한 유동장의 섭동량에 대신하여 와홀림의 위상과 직접적인 관계를 갖는 원봉의 양력 계수( $C_L$ )를 이용한다. 제어기를 통해 양력계수의 위상을 조절하여 되먹임함으로써 위상에 따라 와홀림을 강화시키거나 약화시키는 제어를 행할 수 있다.

본 연구의 목적은 가진과 와홀림의 위상 관계를 이용한 원봉 후류의 제어이다. 가진 방법으로 원봉의 회전을 이용하였고, 이차원의 원봉 후류를 수치모사하였다.

## 2. 수치 방법

아래와 같은 무차원화된 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 수치모사하였다.

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

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

수치 모사 방법은 일반 좌표계에서의 부분 단계 변환을 이용하였다.<sup>(5)</sup> 자세한 격자수, 경계 조건 등은 이전의 논문에서 참조할 수 있다.<sup>(1,3)</sup>

## 3. Van der Pol 방정식의 되먹임 제어

### 3.1 되먹임 제어

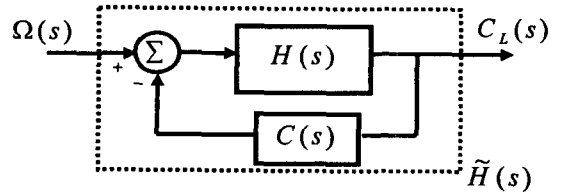


Fig.1 Block diagram of feedback control system

일반적인 되먹임 제어는 Fig.1과 같이 block diagram으로 표현할 수 있다. 선형 시스템의 경우는 (3)과 같은 관계식이 성립하므로  $1+C(s)H(s)$ 를 제어 인자로 하여 되먹임 제어가 가능하지만, Van der Pol 방정식과 같은 비선형 시스템의 경우 되먹임 제어에 대한 심도있는 고찰이 필요하다.

$$\tilde{H}(s) = \frac{C_L(s)}{F(s)} = \frac{H(s)}{1 + C(s)H(s)} \quad (3)$$

한편 제어기  $C(s)$ 는 다음과 같은 종류를 사용한다. 이러한 제어기는 로패스필터와 유사한 주파수 특성을 지니므로 미분이나 잡음으로 인한 고주파 성분을 제거할 수 있으며, 특정 주파수에서 되먹임 신호의 크기와 위상을 손쉽게 결정할 수 있다.

$$C(s) = \frac{\beta_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0} \quad (4)$$

### 3.2 Van der Pol 방정식의 되먹임 제어

원봉 후류에서 보이는 거동과 비슷하게 아래와 같은 Van der Pol 방정식에서도 lock-on 영역이 관찰된다. 이러한 lock-on 영역에서는 가진 주파수와 진동 주파수가 일치하며, 가진의 크기에 따라 진동의 크기가 증가하는 등 다소의 준선형성을 갖고 있다. 따라서 system identification을 통해 Van der Pol 방정식의  $H(s)$ 를 구함으로써 선형 시스템의 되먹임 제어 이론을 적용하여 Fig.2와 같은 제어 결과를 얻을 수 있었다. 두 경우 모두  $|1+C(s)H(s)|=2.0$ 인 경우이므로 같은 정도로 감소된  $C_L$ 를 얻을 것으로 기대되지만, 그림에서 보는 바와 같이 위상에 따라 감소 혹은 증가된  $C_L$ 를 얻는다. 이는 선형 시스템과 달리 비선형 시스템에서는 되먹임에 의한 위상의 변화가 주요 제어 인자임을 의미한다. 이러한 위상의 영향은  $1+C(s)H(s)$ 와  $C(s)$ 의 위상 관계를 그린 Fig.3에서 잘 나타난다. 그림에서 보는 바와 같이 두 위상은 선

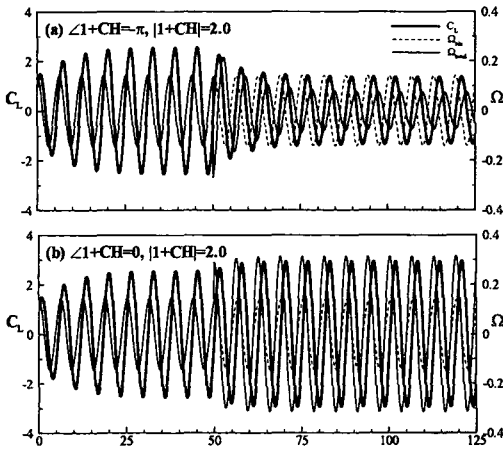


Fig.2 Control results against  $\angle 1+C(s)H(s)$

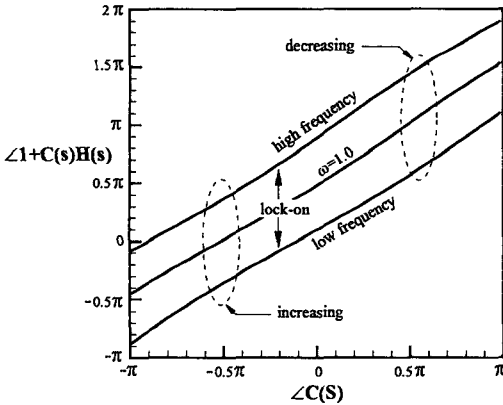


Fig.3 Relationship between  $\angle 1+C(s)H(s)$  and  $\angle C(s)$

형적인 관계식을 갖고 있으므로  $1+C(s)H(s)$ 의 위상은  $C(s)$ 의 위상에 의해 결정된다. 따라서 그림에서 나타내었듯이  $C(s)$ 의 위상에 따라 증가 혹은 감소된 제어 결과를 얻을 수 있다.

#### 4. 원봉 후류의 되먹임 제어

유동의 기하학적 형상을 Fig 4.에 나타내었다. 원봉의 회전속도는 일정한 주파수와 크기를 갖는 open loop가진과 되먹임 제어에 의한 가진으로 주어진다. 되먹임 제어가 없이 open loop가진만을 가하는 경우, 자연와홀림 주파수 부근의 주파수로 가진을 하여 와홀림 주파수와 가진 주파수가 일치되는 lock-on현상

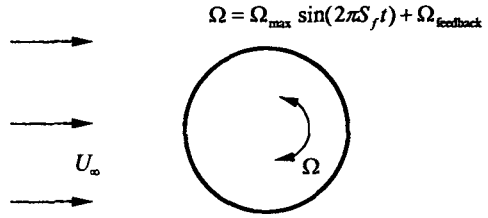


Fig.4 Flow configuration

	$\alpha_0 > \omega^2$ $\pi/2$	$\alpha_0 < \omega^2$ $\pi/2$	
$\pi$	stable & in phase	unstable	unstable
		0	$\pi$
	unstable	stable & out of phase	stable & out of phase
		$-\pi/2$	$-\pi/2$
			0

Fig.5 Characteristics of  $C(s)$  vs phase and  $\alpha_0$

이 일어나게 되면 가진위상과 양력 계수의 위상차가 고정된다(phase- locked). 이러한 위상차는 가진주파수와 가진 크기에 따라 결정된다. 최대 회전속도  $\Omega_{max}=0.05$ 에 대한 lock-on 주파수 영역을 조사하여 가진 주파수  $S_f=0.167$ 에서  $S_f=0.181$ 까지 lock-on이 발생하는 것이 관찰되었다. 따라서 이 주파수 영역 내에서 되먹임 제어를 행하도록 한다.

되먹임의 제어 신호는 와홀림의 위상과 직접적인 관계를 갖는 원봉의 양력 계수( $C_L$ )를 이용한다. 앞의 Van der Pol 방정식에서 살펴본 바와 같이 제어기를 통해 양력계수의 위상을 조절하여 되먹임함으로

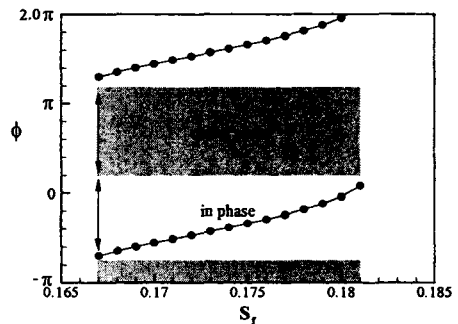


Fig.6 Characteristics of  $\angle C(s)$

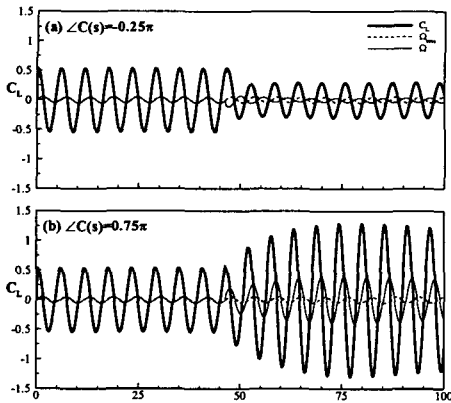


Fig.7 Control results against  $\Delta C(s)$

써 위상에 따라 와플림을 강화시키거나 약화시키는 제어를 행할 수 있다. 이러한  $C(s)$ 의 위상에 따른 특징은 Fig 5.과 Fig 6.에서 살펴볼 수 있다. Fig 6.에서  $C(s)$ 의 위상이 'out of phase'인 경우는 lock-on과 반대 상태의 위상이며, 'in phase'인 경우는 lock-on과 같은 위상 상태임을 의미한다. 각 위상에서의 제어 결과는 Fig 7.과 같다. Fig. 7에서 보여지듯이 'out of phase'의 위상으로 제어한 경우는  $C_L$ 이 효과적으로 감소하며, 반대로 'in phase'인 경우는

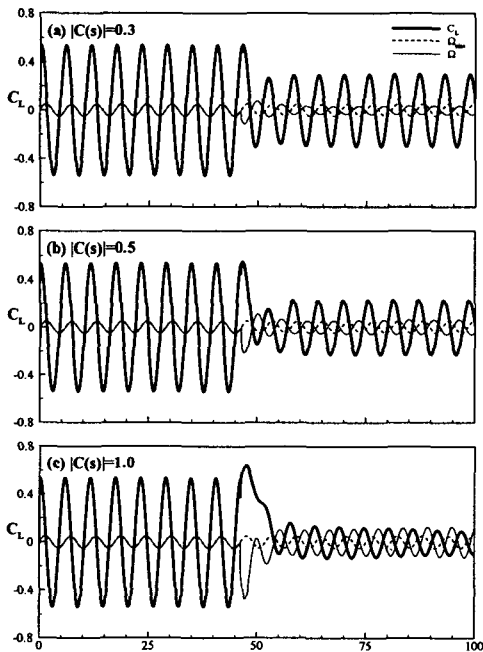


Fig.8 Control results against  $|C(s)|$

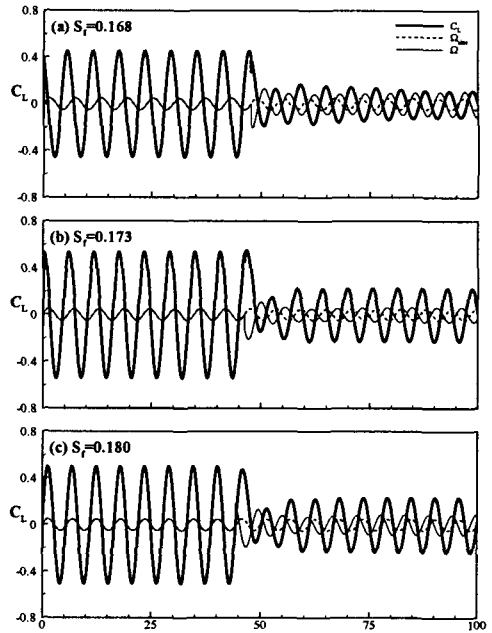


Fig.9 Control results against  $S_f$

$C_L$ 이 증가한다. 또한 Fig. 8에서 나타나듯이  $C(s)$ 의 크기를 크게하여 되먹임 신호를 증가시키면  $C_L$ 이 더욱 많이 감소한다. 이러한 경향은 를 이용한다. 앞의 Van der Pol 방정식에서 살펴본 바와 같이 제어를 통해 양력계수의 위상을 조절하여 되먹임함으로써 위상에 따라 와플림을 강화시키거나 약화시키는 제어를 행할 수 있다. 이러한  $C(s)$ 의 위상에 따른 특징은 Fig 5.과 Fig 6.에서 살펴볼 수 있다. Fig 6.에서  $C(s)$ 의 위상이 'out of phase'인 경우는 lock-on과 반대 상태의 위상이며, 'in phase'인 경우는 lock-on과 같은 위상 상태임을 의미한다. 각 위상에서의 제어 결과는 Fig 7.과 같다. Fig. 7에서 보여지듯이 'out of phase'의 위상으로 제어한 경우는  $C_L$ 이 효과적으로 감소하며, 반대로 'in phase'인 경우는  $C_L$ 이 증가한다. 또한 Fig. 8에서 나타나듯이  $C(s)$ 의 크기가 커지면서  $C_L$ 이 더욱 많이 감소한다. 한편 이렇게 되먹임 신호의 위상을 통해  $C_L$ 을 감소 혹은 증가시키는 제어 방법은 lock-on이 일어나는 주파수 영역에서 적용가능하며 Fig 9와 같이 효과적인 제어 결과를 얻을 수 있다.

이렇게 되먹임 신호의 위상에 따라 제어 결과가 결정되는 메커니즘을 밝히기 위해 Fig 10과 같은 와플림 mode를 정의한다.

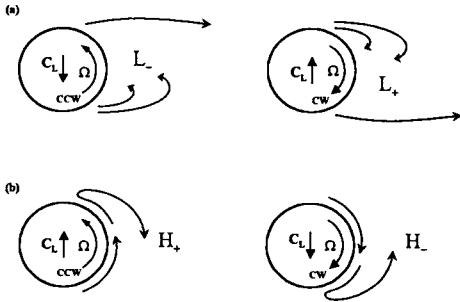


Fig.10 Vortex shedding modes

그림에서 (a)는 저주파에서 lock-on이 일어났을 때의 와홀림 모드이며, (b)는 고주파에서 lock-on이 일어났을 때의 와홀림 모드이다. 이러한 모드를 바탕으로 되먹임 제어가 행해졌을 때의 와홀림 모드를 분석하면 Fig. 11과 같다.

Fig. 11에서 볼 수 있듯이  $L_+$  모드와  $H_+$  모드 사이의 constructive interference에 의해 크기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 한편 되먹임 제어가 행해진 경우 (f)부터 (h)까지  $L_+$  모드와  $H_+$  모드가 서로 상쇄되고 (h)부터 (j)까지  $L_-$  모드와  $H_+$  모드가 서로 상쇄되는 mode cancellation이 발생함으로써 양력 계수의 값이 감소한다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 Van der Pol 방정식을 통해 비선형 시스템의 되먹임 제어에 대해 고찰하였고, 그 결과를 원봉 후류의 와홀림에 적용하여 와홀림을 효과적으로 약화시키거나 강화시키는 제어 방법을 제안하였다. 일반적으로 lock-on이 발생하는 경우에  $C_L$  등과 같은 비정상 섭동량은 가진이 없는 자연 와홀림 경우와 비교해서 증가된다. 이 때, 제어기를 통해 전달된 되먹임 신호의 위상을 lock-on상태의 위상과 'out of phase' 혹은 'in phase' 관계에 결정함으로써 와홀림이 효과적으로 약화되거나 강화되는 제어결과를 얻을 수 있었다. 이러한 제어 방법은 lock-on이 일어나는 전 주파수 영역에 적용될 수 있다.

### 후기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] Baek, S.-J. and Sung, H.J., 1998, "Numerical Simulation of the Flow Behind a Rotary Oscillaing Circular Cylinder," *Physic of Fluids*, Vol. 10, pp.869-876.
- [2] Baek, S.-J. and Sung, H.J., 2000, "Quasi-Periodicity in the Wake of Rotationally Oscillating Cylinder," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 408, pp.275-300.
- [3] Baek, S.-J., Lee, S.B. and Sung, H.J., 2001, "Response of a Circular Cylinder Wake to Superharmonic Excitation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 442, pp.67-88.
- [4] Blevins, R.D., 1985, "The Effect of Sound on Vortex Shedding from Cylinders," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 161, pp.217.
- [5] Choi, H, Moin, P. and Kim, J., 1993, "Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow over Riblets," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 255, pp.503.
- [6] Fey, U., Konig, M. and Eckelmann, H., 1998, "A New Strouhal- Reynolds-Number Relationship for the Circular Cylinder in the Range  $47 < Re < 2 \times 10^5$ ," *Physics of Fluids*, Vol. 10, pp.1547.
- [7] Filler, J.R., Marston, P.L. and Mih, W.C., 1991,

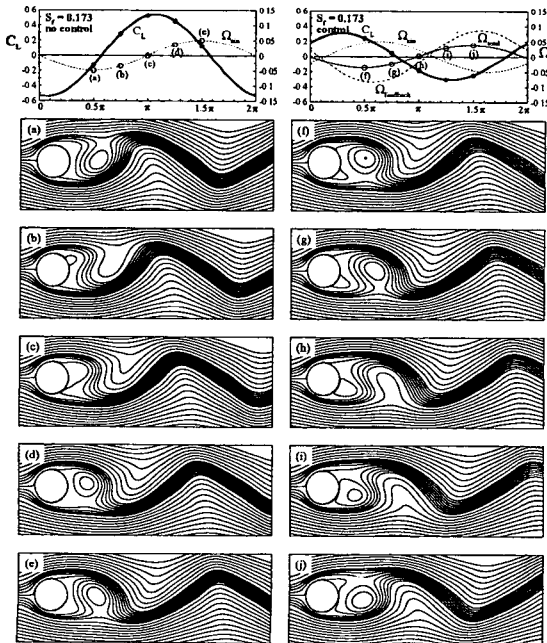


Fig.11 Instantaneous streamline pattern

- "Response of the Shear Layers Separating from a Circular Cylinder to Small- Amplitude Rotational Oscillations," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 231, pp.481.
- [8] Fujisawa, N., Kawaji, Y. and Ikemoto, K., 2001, "Feedback control of Vortex Shedding from a Circular Cylinder by Rotational Oscillations," *Journal of Fluid Structure*, Vol. 15, pp.23.
- [9] Griffin, O.M. and Hall, M.S., 1991, "Review -Vortex Shedding Lock-on and Flow Control in Bluff Body Wakes," *Transactions of ASME I: Journal of Fluids Engineering*, Vol. 113, pp.526.
- [10] Huang, X.Y., 1996, "Feedback Control of Vortex Shedding from a Circular Cylinder," *Experiments of Fluids*, Vol. 20, pp.218.
- [11] Kwon, K. and Choi, H., 1996, "Control of Laminar Vortex Shedding Behind a Circular Cylinder Using Splitter Plates," *Physics of Fluids*, Vol. 8, pp.479.
- [12] Park. D.S., Ladd, D.M. and Hendricks, E.W., 1994, "Feedback Control of von Karmann Vortex Shedding Behind a Circular Cylinder at Low Reynolds Number," *Physics of Fluids*, Vol. 6, pp.2390.
- [13] Rockwell, D., 1998, "Vortex-Body Interactions," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 30 pp.199.
- [14] Roussopoulos, K., 1993, "Feedback control of Vortex Shedding at Low Reynolds Numbers," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 248, pp.267.
- [15] Williams, D.R., Mansy, H. and Amato, C., 1992, "The Response and Symmetry Properties of a Circular Cylinder Wake Subjected to Localized Surface Excitation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 234, pp.71.
- [16] Williamson, C.H.K., 1989, "Oblique and Parallel Modes of Vortex Shedding in the Wake of a Circular Cylinder at Low Reynolds Numbers," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 206, pp.579.