

## 자율 제어봉을 이용한 실린더 후류의 유동제어에 관한 연구

임희창\* · 감동혁\*\* · 이상준\*\*\*

### Flow Control of Turbulent Wake Behind a Circular Cylinder Using a Self-adjusting Rod

Hee Chang Lim\*, Dong Hyuk Kam\*\* and Sang Joon Lee\*\*\*

**Key words :** Drag Reduction, Control Cylinder, Self-Oscillating, Flow Separation, Circular Cylinder.

#### Abstract

The effects of a small control rod ( $d=3\text{mm}$ ) located near a main circular cylinder on the drag reduction and wake structure modification were investigated. The location of the small control rod mounted on a rod-like spring is self-adjusting according to the wake structure for optimal control of the flow around the main cylinder. The experiments were carried out at the Reynolds numbers based on the cylinder diameter ( $D=50\text{mm}$ ) in the range  $Re_D=1\times 10^4\sim 6\times 10^4$ . Mean velocity and turbulent statistics were measured with varying the angle along the cylinder circumference  $\theta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  and the distance between the main and control rods  $L=0.7, 1$ . Compared with the bare cylinder, the main circular cylinder with the fixed and self-adjusting rods reduced drag coefficient by 10% at the angle of  $\theta=45^\circ$ . For the main cylinder with self-adjusting rod, as the Reynolds numbers increase, the streamwise mean velocity is increased, however, the turbulence intensity is decreased. In addition, the control rods tested in this study are effective at higher Reynolds number than at lower Reynolds number.

#### 1. 서론

1970년대 오일 쇼크 이후 에너지 부족과 운송비용 증가로 인하여 세계 각국은 저항 감소를 통한 에너지 소비를 줄여보려고 여러 가지 유동제어기법들에 관심을 가지게 되었다. 특히 고속주행과 연비향상을 위해 경량의 엔진, 차체축소 및 새로운 경질재료의 개발 등 운송체의 경량화 기술개발이 요즘에도 활발히 진행되고 있다. 운송체의 연비를 향상시킬 수 있는 효과적인 방법 중 한가지는 공기역학적 항력을 감소시키는 것으로 이러한 유동제어는 공학적·기술적 견지에서 유체역학 분야에서 핫 이슈가 되고 있다.

운송체에 작용하는 유동 저항을 감소시키기 위해서는 그 운송체 주위에서 발생하는 유동의 특성을 정확하게 예측하고 제어할 수 있어야 한다. 특히, 최근 들어 난류 전단유동 내에 존재하는 응집구조(coherent structure)를 제어하여 유체저항을 감소시키는 논문들이 발표되고 있다.<sup>[1,2]</sup> 유동제어는 벽 경계면 유동이나 자유전단유동을 변화시켜 요구되는 효율을 증대시키는 기법으로써 크게 수동제어(passive control)와 능동제어(active control)기법으로 나눌 수 있다.<sup>[3]</sup> 1990년 이후 활발하게 연구되고 있는 능동적 유동제어는 유체의 흡입(suction)이나 분출(blowing), 온도조절에 의한 유체점도 변화, 진동이나 회전, 그리고 음향여기(acoustic excitation) 등과 같이 지속적으로 혹은 간헐적으로 외부로부터 부가적인 에너지를 유동에 공급함으로써 유동을 제어하는 방법이다.

이에 반해서 수동제어는 외부 에너지의 공급없이 geometry를 변경시키거나 부착물을 장착하여 주로 물체 표면 주위 유동을 제어하는 방법으로 제어봉(control cylinder), tripping wire, riblet, spiral strake 등을 사용한다. 따라서 수동제어기법은 운송체나 산업현장의 유체문제 해결이나 성능 향상에 바로 적용할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 이와 같은 유동제어방법들은 주어진 조건에 따라 유동제어의 목적과 부합하지 않는 경우도 있음을 항상 염두에 두어야 한다.

수동적 제어방법에 의한 원주 주위 유동에 관한 연구로 Igarashi and Tsutui<sup>[4,5]</sup>는 원주 후방의 전단층 내에 매우 작은 원주(이후부터 '제어봉')를 설치하여  $Re=4.2\times 10^4$ 에서 원주에 작용하는 항력을 20~30%까지 감소시키고, 양력계수  $C_L=1.0$ 을 얻었다. 그들은 제어봉의 크기와 위치, 그리고  $Re$ 수를 변화시켜 정체점(stagnation point)을 기준으로  $120^\circ$ 의 위치에 원주 직경 1/4 크기의 제어봉을 설치했을 때 최대의 항력감소를 얻을 수 있다고 하였다. 이러한 항력감소와 양력의 발생은 원주와 제어봉 사이를 빠른 속도로 움직이는 재부착 제트(reattachment jet)에 기인한다고 생각하고 이를 Coanda 효과와 비교하였다.

Prasad and Williamson<sup>[6]</sup>은 풍동에서 물체의 항력을 감소시키고자 원주의 상류 1/4D 위치에 1/3D 크기의 제어판을 설치하여 38% 가량 항력을 감소시켰다. Strykowski & Sreenivasan<sup>[7]</sup>은 원주 전단층 내부에 제어봉을 장착시키고 제어된 후류 유동을 수소기포법으로 가시화하였고, 수치해석을 통하여 와류형성과 와류유출 억제에 미치는 제어봉의 효과를 설명하였다. Sakamoto et al.<sup>[8]</sup>은 정사각형 프리즘(square prism) 주위 유동을 제어봉으로 제어하여 항력을 최대 30%까지 감소시켰다. 이들은 제어봉이 시간 평균한(time-averaged) 항력보다 양력(lift)과 항력의 변동성분(fluctuating component)을 효과적으로 감소시킬

\* 포항공과대학교 환경공학부, hclim@postech.ac.kr

\*\* 포항공과대학교 기계공학과, kag@postech.ac.kr

\*\*\* 포항공과대학교 기계공학과, sjlee@postech.ac.kr

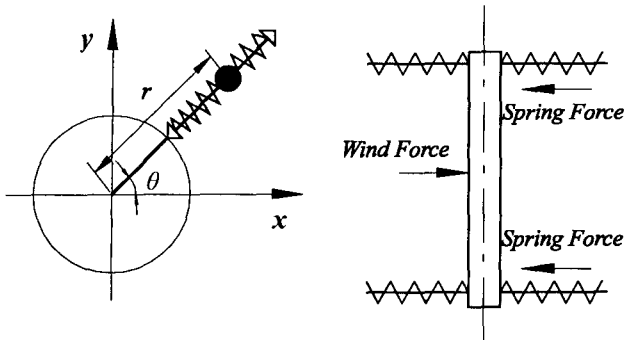


Fig.1 Concept of self-adjusting rod installed around a main cylinder

수 있으며 이때 제어봉의 위치는 정사각형 프리즘에서 박리된 전단층의 바깥 경계 부근임을 밝혔다.

기존에 수행된 연구들은 대부분 물체에 가해지는 공기저항이 물체주위의 유동구조와 밀접한 관계를 가지는 것을 이용하여 물체의 후방에 고정된 제어봉을 설치하고자 하였다. 그러나, 원주에 작용하는 공기저항은 원주와 제어봉사이의 거리, 원주 및 제어봉의 크기 그리고 유속 등의 함수이므로 이들에 대한 체계적인 연구가 필수적이다. 실제  $Re$ 수 변화에 따라 원주 주위의 유동특성이 크게 바뀌기 때문에 특정한  $Re$ 수에 대해서만 효과적인 고정식 제어봉은 현장 적용 시 응용적인 측면에서 문제가 될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 일환으로 본 연구에서는 자율제어방식의 스프링을 활용한 제어봉을 원주 주위에 장착하고, 이것이 원주의 항력 및 후류의 유동특성변화에 미치는 영향을 실험적으로 연구하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 자율제어기법의 원리

본 연구에서는 스프링의 탄성력을 이용하여 유동에 자율적으로 위치제어가 가능한 제어봉을 구현하고자 하였다. Fig.1은 자율 제어봉을 주위 유동에 적용하는 개념도를 보여주고 있다. 그림과 같이 일정한 탄성력을 가지는 스프링에 제어봉을 설치하여 원주 후류의 크기와 유동방향에 따라서 제어봉이 자율적으로 적응 가능하도록 하였다. Fig.1의 오른쪽 그림은 제어봉이 전방 원주에서 박리된 후류에 의해 가진 되었을 때 접근유동에 의해 제어봉에 가해지는 운동량과 스프링에 의한 복원력이 균형을 이루고 있는 개념을 보여주고 있다.

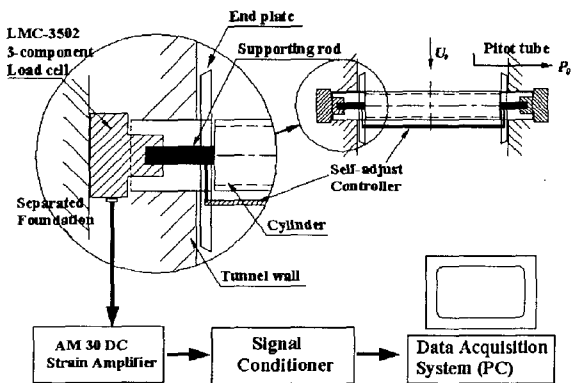
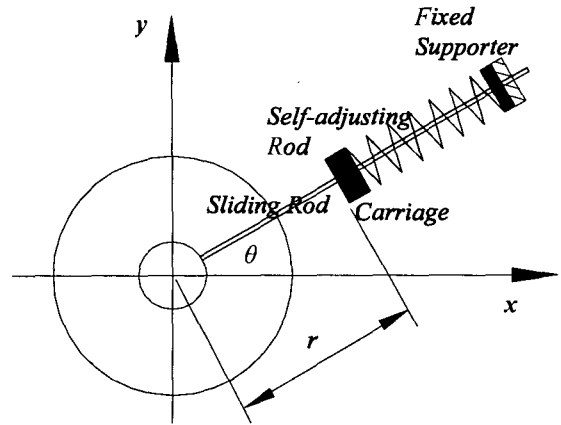
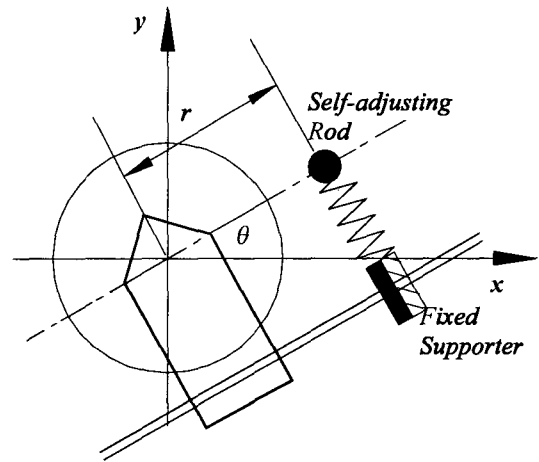


Fig.2 Experimental set-up for drag measurements



(a) Before modification



(b) After modification

Fig.3 Schematic design of the self-adjusting rod & spring

### 2.2 풍동 및 실험모델

본 연구는 시험부 단면이  $0.6m \times 0.72m$ 이고 난류강도가 0.08%이하인 POSTECH 저난류 아음속 풍동에서 수행되었다. Fig.2는 풍동시험부 내에 장착된 원주와 제어봉의 개략도와 좌표계를 나타낸 것이다. 풍동시험부 내부에 설치한 원주는 가급적 2차원 유동을 만들어 주기 위해서 시험부 폭  $600mm$  ( $L/D=12$ )를 최대한 사용하였으며, 벽면경계층 효과를 없애기 위해서 날카로운 모서리를 가진 끝판(end plate)을 원주 양끝에 설치하였다<sup>[9]</sup>. 원주의 직경  $D$ 는  $50mm$ 이며, 자유흐름속도는 최

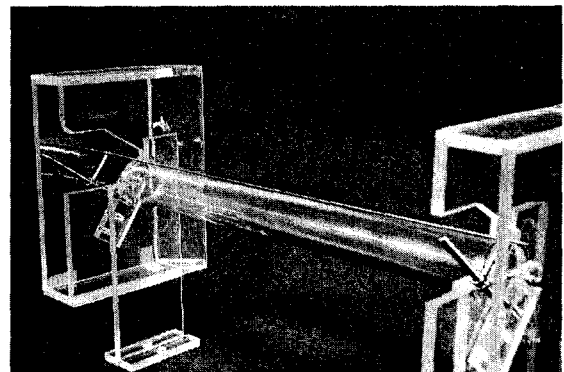


Fig.4 Photograph of the self-adjusting rod & cylinder

소 4m/s에서 최대 18m/s까지 변화시켰고, 이 속도에 기준한  $Re$ 수는 약 10,000 ~ 60,000이다. Fig.3은 자율제어봉을 원주에 설치하기 위해 고안했던 개략도이다. Fig.3(a)의 경우는 스프링 길이방향의 탄성력을 이용하는 방식으로 자율제어봉이 미끄럼 봉(sliding rod)에서 왕복운동하는 캐리지(carriage)에 설치되게 된다. 그러나 제어봉이 장착된 캐리지는 무게가 무거워져서 제어봉에 가해지는 유동의 운동량에 민감하게 반응하지 못하였다. 또한 미끄럼 봉과 제어봉 사이의 마찰로 인해 어느 정도 이상의 힘이 가해져야 움직이기 시작하였다. 실제 풍동에 설치하기 위하여 표면가공과 윤활유 등을 이용하기도 하였지만 이 한계를 극복할 수 없었다. 이에 따라 Fig.3(b)와 같은 자율제어봉 형태를 선택하였다. 앞에서 문제가 되었던 캐리지의 미끄럼 봉을 없애고 캐리지가 원하는 위치에서 왕복운동을 하도록 하기 위해서 그림에서 볼 수 있듯이 swing 방향의 탄성력을 이용한다. 여기서 스프링 자체가 제어봉의 무게를 견딜 수 있어야 하고, 또한 유체유동에 의해 제어봉에 가해지는 힘에 민감하게 반응할 수 있어야 하기 때문에 스프링의 선택이 무엇보다 중요하였다. 본 연구에서 사용된 제어봉은 길이가 550mm이고 직경이 3mm인 스테인레스 봉을 사용하였으며, 스프링은 길이가 30mm이고 여러 가지 스프링을 예비 테스트하여 본 실험에 적합한 스프링 상수  $k = 5.6N/m$ 를 구하였다. Fig.4는 본 연구에 사용되어진 원주 및 제어봉을 찍은 사진을 보여주고 있다. 사진에서 볼 수 있듯이 원주 후방에 자율제어봉이 스프링에 설치되어있으며, 이러한 유동제어장치가 유동에 영향을 주지 않도록 하기 위하여 유선형상의 케이싱 내부에 장착하였다.

## 2.2 항력 및 후류유동 측정

원주에 걸리는 항력은 Fig.2에서 보는 바와 같이 3분력계(Nishio LMC 3502)를 이용하여 측정하였다. 원주에 걸리는 항력만을 측정하기 위해 원주와 3분력계를 연결하는 지지대를 풍동 시험부로부터 분리시켜 설치하였다. 3분력계에서 나오는 전압신호는 DC strain amplifier(DSA-100)를 이용하여 증폭하였고, IBM PC로 연결되어진 자료획득장치(DT 2838)를 이용하여 아날로그 신호를 디지털 신호로 시간 평균화된 값을 구하였다. 원주에 걸리는 저항력을 측정하기에 앞서서 저울 추를 사용하

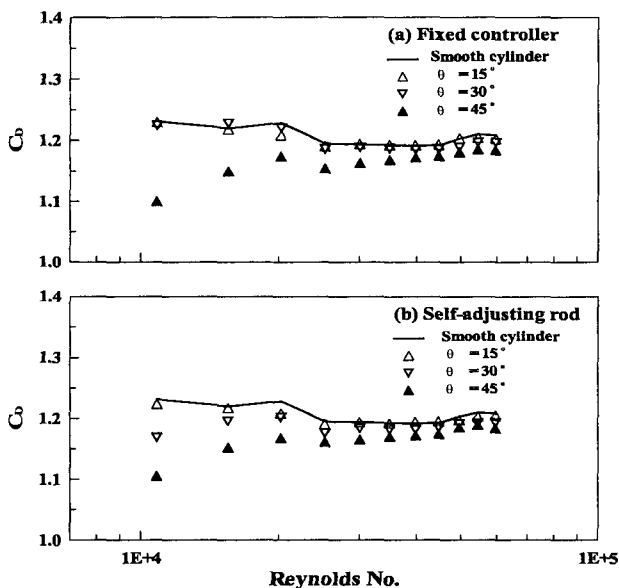


Fig.5 Variation of drag coefficient with Reynolds number

여 3분력계를 보정(calibration)하였다. 항력계수  $C_D$ 는 물체에 걸리는 저항력  $F$ 와 공기밀도  $\rho$ , 자유흐름속도  $U_0$ , 물체의 단면적  $A$ 로 무차원화시킨 다음의 식을 이용하여 구하였다.

$$C_D = \frac{2F}{\rho U_0^2 A} \quad (1)$$

원주 후류의 유동특성해석에는 TSI사의 IFA100 정온형 열선유속계를 사용하여 측정하였다. 후류속도 측정에는 I형 열선 프로브(hot-wire probe), 피토관(pitot tube)을 사용하였다. 열선 프로브로부터 나오는 전압신호는 자료획득장치를 거쳐 DMA 방식으로 컴퓨터에 입력된 후, 통계 처리하여 원하는 속도정보를 얻었다.

후류의 평균속도 및 난류강도는 원주의 하류  $x/D=4$  단면에서  $y/D=-3 \sim 3$ 까지  $0.1D$  간격으로 측정하였다. 열선 프로브는 오차가 0.1mm이하의 정밀도를 가지는 3차원 이송장치에 장착하여 원하는 위치로 이송시켰다. 한 지점에서 초당 1,000개의 비율로 샘플링하여 8,192개의 데이터를 취득하였고, 노이즈 제거를 위해 800Hz의 저역필터를 거치게 했다. 그리고, 실험 중 풍동시험부 내부의 공기온도를  $\pm 0.5^\circ C$  이내로 일정하게 유지시켜 온도에 따른 보정을 따로 하지 않아도 되게 하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 항력

Fig.5는 제어봉의 종류에 따른 원주의 항력계수 변화를 보여주고 있다. 그림에서 가로축은 자유흐름속도에 기초한  $Re$ 수를, 세로축은 원주에 걸리는 항력계수를 나타낸다. 여기서 보면, 제어봉이 없는 원주의 경우에는  $Re$ 수에 따라 항력계수가 1.2에 가까운 일정한 값을 가지고 있다. 이것은 아임계범위(subcritical range)에서 수행한 다른 연구결과와 잘 일치하는 결과이다.

Fig.5(a)는 고정된 제어봉이 설치된 원주에 대한 항력계수 변화를 제어봉이 없는 원주와 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 보면, 고정된 제어봉의 각도  $\theta=15^\circ$ 와  $30^\circ$ 에서 항력은  $Re$ 수 약 40,000 정도까지는 서로 비슷한 값을 가지나 이보다  $Re$ 수가 증가하게 되면 미소한 차이를 보인다. 특히, 제어봉의 각도  $\theta=45^\circ$ 에서는 다른 각도에 비해 낮은  $Re$ 수에서 약 10%의 저항감소를 보여주고 있다.

Fig.5(b)는 자율제어봉을 원주의 후방에 설치했을 때 항력계수를 비교한 결과를 보여주고 있다. 고정된 제어봉을 설치

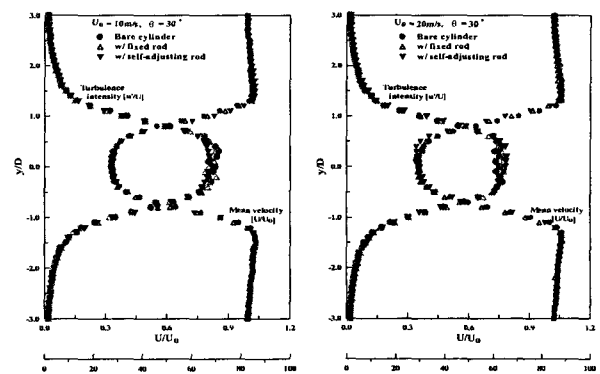


Fig.6 Streamwise mean velocity and turbulence intensity profiles (left,  $U_0=10m/s$ ; right,  $U_0=18m/s$ )

했을 경우에 비해 각도  $\theta$ 가 증가함에 따라 다소 다른 경향을 보여주고 있다. 특히, 각도  $\theta=30^\circ$ 에서 고정된 제어봉에 비해 낮은  $Re$ 수 영역에서 항력이 감소되고 있다. 그러나, 자율제어봉의 각도가  $45^\circ$ 인 경우에는 고정제어봉에 비해 항력감소의 차이가 크지 않았다.

이상의 결과로부터 자율제어봉을 적용한 원주의 경우 상대적으로 낮은  $Re$ 수 영역에서 유동에 탄력적으로 저항을 감소시키는 효과를 가지는 것으로 생각되어진다.

### 3.2 유동구조

Fig.6은 원주 하류  $x/D=4$  위치에서 자유흐름속도가 각각  $U_f=10\text{m/s}$  ( $Re=35,000$ ) 그리고  $U_f=18\text{m/s}$  ( $Re=60,000$ )인 조건에서 고정된 제어봉과 자율제어봉을 각도  $\theta=30^\circ$  위치에 각각 고정시키고 측정된 원주 후류의 주유동 방향 평균속도 및 난류강도분포를 나타낸 것이다. 여기서 가로축은 자유흐름속도로, 세로축은 원주직경  $D$ 로 무차원시켰다. 그림에서 보면 점성력의 영향으로 주유동방향 속도성분의 감소가  $y=1D$  영역에 걸쳐 나타남을 확인할 수 있다. 또한, 난류강도분포는 자유흐름이 원주에 의해 교란됨으로써 둔턱과 같은 모양으로 후류영역과 자유흐름영역이 구분되어진다.

Fig.6(a)는 자유흐름속도  $U_f=10\text{m/s}$  ( $Re=35,000$ )인 조건에서 평균속도와 난류강도 분포를 비교한 결과이다. 제어봉이 없는 원주의 경우에 평균유속은  $y/D=\pm 1.2$  근처에서 최대값을 가지며 후류 중심축에서 멀어질수록 자유흐름속도로 회복되고 있다. 그리고, 난류강도분포도 제어봉이 없는 원주와 고정제어봉의 경우에 비해 감소하고 있는 것을 보여주고 있다.

Fig.6(b)는 하류 위치단면  $x/D=4$ 에서 자유흐름속도를  $U_f=18\text{m/s}$  ( $Re=60,000$ )로 증가시킨 상태에서 측정된 평균속도 및 난류강도분포를 나타낸 것이다. 유속이  $10\text{m/s}$ 인 조건에서는 자율제어봉이 제어봉이 없는 원주와 고정제어봉의 경우에 비해 약 10% 정도의 항력감소가 일어났으나, 유속이  $18\text{m/s}$ 인 조건에서는 오히려 제어봉이 없는 원주의 경우가 전단층에서 유속이 높게 나타났다. 그러나, 전반적으로 후류 중앙부분에서 평균속도와 난류강도가  $Re=35,000$ 에서의 결과와는 다르게 제어봉이 없는 원주가 오히려 속도감쇄가 적은 것으로 나타났다. 이것은 항력분포의 결과에서 알 수 있듯이 자율제어봉 및 고정제어봉을 적용한 원주가  $Re$ 수에 크게 영향을 받고 높은  $Re$ 수 영역에서는 효과가 크지 않음을 나타낸다.

## 4. 결론

본 연구에서는 고정제어봉 및 자율제어봉을 원주 주위에 설치하고 이들이 원주 후류의 유동구조와 항력변화에 미치는 영향을 실험적으로 해석하였다. 자유흐름속도는 최소  $4\text{m/s}$ 에서 최대  $18\text{m/s}$ 까지 변화시켰는데, 원주직경에 기초한  $Re$ 수는

$Re=10,000\sim 60,000$  이었다. 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) Swing 방향의 스프링 탄성력을 이용한 자율제어봉을 원주에 적용하였을 때,  $Re$ 수 및 제어봉의 각도  $\theta$ 에 따라 항력이 크게 바뀌었다.
- (2)  $Re$ 수 40,000 정도까지는 제어봉이 없는 원주에 비해 항력감소가 두드러지게 나타났으나 그 이후에는  $Re$ 수 증가에 따라 항력감소 효과는 줄어들었다. 제어봉의 각도가  $\theta=45^\circ$ 이고 레이놀즈 수가  $Re=10,000$ 인 조건에서 저항이 약 10% 감소하였다.
- (3) 자율제어봉을 적용한 원주는 후류 중심영역에서 제어봉이 없는 원주에 비해 주유동 방향 평균속도의 감소가 작으며, 난류강도도 감소하였다.
- (3) 제어봉 유무에 따른 후류 중심영역에서의 평균속도와 난류강도분포 차이는  $Re$ 수가 증가함에 따라 감소하여 거의 유사한 경향을 보여주었다.

## 후 기

본 연구는 국가지정연구실 사업(NRL)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] Cantwell, B. J., Organized Motion in Turbulent Flow, *Annual Rev. Fluid Mech.*, 13 (1981), pp. 457~515.
- [2] Robinson, S. K., Coherent Motions in the Turbulent Boundary Layer, *Annual Rev. Fluid Mech.*, 23(1991), pp. 601~639.
- [3] Gad-el-Hak, M., Flow Control, *Applied Mechanics Review*, 42 (1989), pp. 261-293.
- [4] Igarashi, T., Tsutsui, T., Fluid Forces Acting on a Circular Cylinder Controlled by Small Rod, *Proc. 3<sup>rd</sup> JSME-KSME Fluid Eng. Conf., Sendai, Japan* (1994), pp.571-576.
- [5] Tsutsui, T., Igarashi, T., Interactive Flow around Two Circular Cylinders of Different Diameters at Close Proximity. Experiment and Numerical Analysis by Vortex Method, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 69-71 (1997), pp.279-291.
- [6] Prasad, A. and Williamson, C.H.K., A Method for the Reduction of Bluff Body Drag, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 69-71(1997), pp.155-167.
- [7] Strykowski, P.J. and Sreenivasan, K.R., On the Formation and Suppression of Vortex Shedding at Low Reynolds Numbers, *J. Fluid Mech.*, 218(1990), pp.71-107.
- [8] Sakamoto, H., Tan, K. and Haniu, H., An Optimum Suppression of Fluid Forces by Controlling a Shear Layer Separated From a Square Prism, *J. Fluid Eng.*, 113(1991), pp.183-189.
- [9] Stansby, P. K., The Effect of Endplates on the Base Pressure Coefficient of a Circular Cylinder, *Aeronautical J.*, 78(1974), pp. 36-37.