

제어봉 부착에 따른 원형실린더 근접 후류 유동제어에 관한 실험적 연구

김옥석[†] · 이경우^{*}

[†] 국토해양부 목포지방해양항만청, * 목포해양대학교 해양시스템공학부

Flow control on the near wake of a circular cylinder attached with control rods

Ok-Sok Gim[†] · Gyoung-Woo Lee^{*}

[†] Ministry of Land Transport and Maritime Affairs Mokpo branch office, 1101, Okam-dong, 530-831, Korea

^{*} Division of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime Uni., Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 원형실린더에 크기가 다른 제어봉을 부착하여 2차원 단면 유동특성에 대해서 시간평균유동장을 계측하여 근접후류 제어에 관하여 PIV기법을 적용하여 연구를 수행하였다. 모델시험은 각각 크기가 다른 제어봉을 적용하였으며($d/D=0.1 \sim d/D=0.5$) 레이놀즈수는 원형실린더의 직경을 기준으로 $Re=15,000$ 으로 적용하였다. 유동장의 속도분포를 획득하기 위해 2프레임 상호상관법을 이용하였다. 실험에 적용된 원형실린더($D=50\text{mm}$)에 제어봉을 부착한 결과를 상호 비교함으로써 시간평균속도분포와 제어봉에 의한 유동제어 효과를 알 수 있었다.

핵심용어 : 원형실린더, 제어봉, 유동제어, 입자영상유속계(PIV)

Abstract : Flow characteristics of the control-rod-attached 2-dimensional circular cylinder was accomplished using by PIV techniques. model tests had been carried out with different diameters of control rods($d/D=0.1$ through $d/D=0.5$). and the Reynolds number $Re=15,000$ based on the cylinder diameter($D=50\text{mm}$) to predict the performance of the model and the two-frame grey-level cross-correlation method had been used to obtain the velocity distribution in the flow field. 50mm circular cylinder had been used during the whole experiments and measured results had been compared with each other. The measured results have been compared with each case. therefore this article identifies not only the mean velocity profiles but also the control effects of the control rods.

Key words : Circular cylinder, Control rod, Flow control, Particle image velocimetry(PIV)

1. 서 론

원형실린더 주위에는 경계층유동, 유동박리, 및 후류유동 등 많은 유동형태가 상호 복합적으로 존재한다. 이러한 원형실린더 주위의 유동특성에 대한 연구는 기초적인 학문의 범주인 동시에 그 응용분야가 산업분야에서 다양하게 적용되기 때문에 중요한 연구의 대상으로 간주되고 있다.

해양구조물은 여러 가지 형태를 취하고 있으나 외력에 의한 영향을 최소화하고자 원형실린더형 구조물의 사용빈도가 높게 나타나고 있다. 유체 중에 놓인 원형실린더 후류에서 발생하는 주기적인 와류출은 양력과 항력 및 진동의 원인으로 와의 생성과 소멸에 대한 메커니즘을 파악하는 것은 중요한 의미를 갖는다. 이러한 관점에서 실린더형 구조물의 경계층제어나 후류제어를 위해 제어봉의 기하학적 형태를 달리하거나 설치위치를 변화시켜 제어효과를 향상시키려는 연구가 지속되고 있다.

원형실린더형 해양구조물은 풍력, 파력 및 조류 등 외력에 대해 복원성과 힘의 평형, 모멘트의 상호관계를 고려한 안정성과

능동적 운동성능을 유지해야 한다. 이러한 해양구조물에 작용하는 힘의 총합은 흔히 유체 정역학적 힘과 동력학적 힘으로 이 두 힘은 모두 구조물 표면에 수직한 수압의 변화를 통하여 나타난다.

김 등(2007)은 원형실린더 정체점 맞은편에 제어봉을 부착하여 유체력을 평가하여 제어봉의 크기가 $d/D=0.2$ 에서 압력손실이 가장 적게 나타남을 수치해석을 통해 평가하였다. 임 등(1998)은 원형실린더의 박리 전단층에 제어봉을 부착함으로써 시스템의 후류제어는 제어봉의 크기와 실린더와 제어봉 사이의 거리와 밀접한 관계가 있으며 레이놀즈수에 따라 영향이 달라지고 있음을 규명하였다. 이에 대한 연구로 이와 김(1992)은 원주 박리된 전단층내에 제어봉을 장착하여 원주 주위에서 발생하는 난류유동의 제어를 위해 $L/D=2.081$ 의 지점에 제어봉을 설치하여 항력이 29%감소함을 실험을 통하여 규명하였다. 또한, 이와 김(2001)은 PIV기법을 적용하여 정사각 실린더의 근접후류에 관한 평균유동장을 계측한 결과 레이놀즈수의 증가에 따라 재순환영역의 길이가 $0.29D$ 만큼 더 길어지는 것을 규명하여 원형실

[†] 교신저자 : 김옥석(정회원), domingo@mmu.ac.kr 016) 614-3001

^{*} 중신회원, kwlee@mmu.ac.kr 061) 240-7083

린더와 차이를 규명하였다. 더불어 Igarashi(1997)는 정사각 실린더의 항력을 감소시키기 위해 상류측에 작은 실린더를 부착함으로써 주위유동을 제어 항력을 최대 50%까지 감소시켰다. 이를 통해 $Re=3.2 \times 10^4$ 에서 30mm길이의 프리즘을 사용하여 유동패턴을 변화하는 제어봉의 거리에 대해 규칙성을 유도하여 제어봉의 부가항력은 프리즘 항력의 10%이하임을 밝혔다.

유사한 연구로는 Mahbub Alam(2003)은 수직한 두 개의 실린더를 배열 $Re=6.5 \times 10^4$ 에서 유동특성에 대한 실험결과 다운스트림에서 양·항력은 실린더 사이의 간격에 따라 매우 민감하게 작용하고 $L/D=1.4$ 에서 양·항력의 값은 하나의 실린더에서 보다 약 2배, 2.8배의 값을 나타내고 있음을 규명하였다. 제어봉에 의한 효과적인 원형실린더 후류 유동제어는 Tsutsui(2002)의 선행연구 결과에 잘 나타나 있다.

본 연구에서는 원형실린더 정체점 맞은편에 크기가 다른 제어봉을 부착 시간평균유동장을 분석하여 후류 유동특성을 알아 보았다. 그리고 김 등(2007)의 수치해석에 의한 압력손실에 대한 결과를 바탕으로 PIV기법을 적용하여 제어봉 크기에 따른 유동제어 효과를 고찰하고자 하였다.

2. 실험장치 및 조건

원형실린더에 제어봉을 부착한 전체적인 실험장치에 대한 개략적인 구성은 Fig. 1과 같다. 실린더 주위의 유동의 추적을 위한 고체 트레이서는 비중이 유체와 비슷한 추종성이 좋은 직경 $100\mu\text{m}$ 의 PVC(비중 1.02)입자를 사용하였으며 균일한 입자를 선별하여 유체 중에 고르게 분포시키고 부유중인 고체 입자를 제거하여 동일입자추적을 위한 오차 성분이 최소가 되도록 하였다. 유동가시화와 동일입자 추적을 위한 광원은 직진성과 반사성이 우수한 5W급 수냉식 아르곤-이온 레이저와 원통형 렌즈가 연결된 광파이버를 이용하여 원형실린더 계측영역에 2mm 전·후의 시트 빔을 조사하였다. 유동정보는 고속캠으로 촬영하여 획득하였으며, 원형실린더 주변 및 후류유동 영상을 기록 저장하였다. 해석영역의 격자는 총 2,660(70×38)개 정사각형으로 정렬되도록 생성하여 원형실린더와 제어봉 부착에 따른 후류유동의 미세한 영역의 유동해석에 적용하였다. 동일입자추적을 위한 입자최대이동거리는 12픽셀로 설정하여 정사각형의 상관영역 내에서 추적이 이루어지도록 하였다.

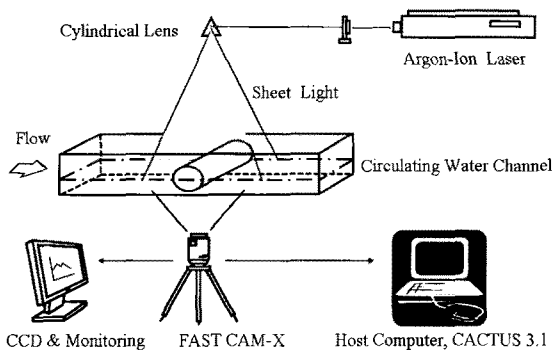


Fig. 1 Schematic arrangement of PIV system

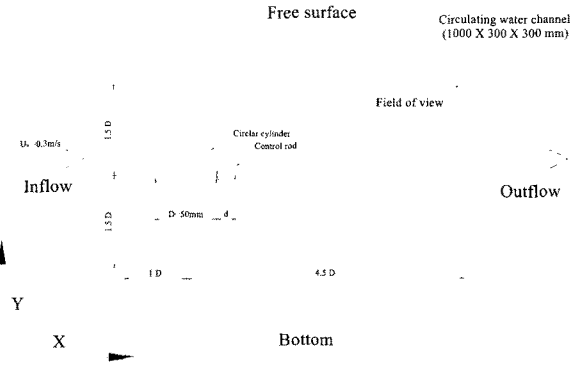


Fig. 2 Solution region and coordinate system

영상처리를 위한 이미지보드는 내장형 Fastcam 1280Pci, B&W로 총 500프레임 (125 Frame/sec)의 연속된 유동을 1280×1024 해상도로 획득하였다. 속도벡터의 추적 알고리즘은 2-프레임 상호상관법을 이용한 상업용 코드(CACTUS 3.1)를 이용하여 동일입자를 추적하였다. 미소간격을 갖는 연속된 두 프레임의 영상을 이용하여 이들의 계조치에 대하여 식(1)과 같은 상호상관계수를 이용하여 최대 상관 계수의 위치를 속도 벡터의 종점좌표로 정하는 방법을 택하였다. 여기서, C_{fg} 는 상호상관계수, f_i, g_i 는 상관영역내의 각 픽셀의 계조치를 의미하며 "-"는 평균을 뜻한다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i) (g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (1)$$

원형실린더 주변 및 후류 유동장 계측을 위해 Fig. 2와 같이 $1000 \times 300 \times 300\text{mm}$ 의 회류수조를 이용하였으며 실험모델은 아크릴계 원형실린더를 사용하여 회류수조 관측영역 중앙에 장착하였다. 2차원 유동장 계측을 위한 관측영역(Field of view)은 원형실린더 정체점 맞은편에 크기별로 제어봉을 부착하였으며 중심에서 상·하부 및 전방으로 1.5D와 후방으로 4.5D까지를 관측영역으로 설정하였다.

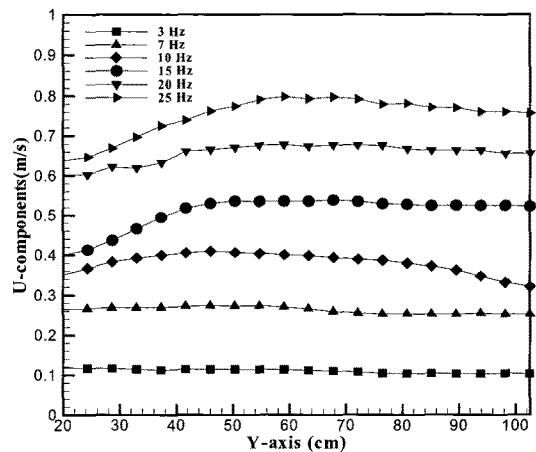


Fig. 3 Characteristics of circulating water channel

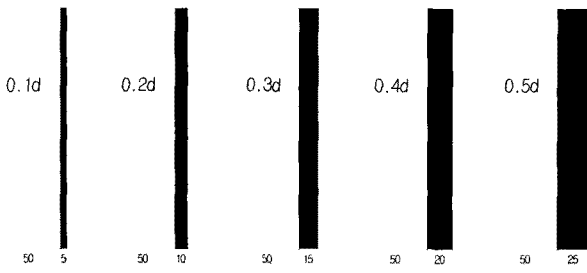


Fig. 4 Schematic diagram of a circular cylinder with a control rod

Table 1 Experimental analysis conditions

Velocity (m/s)	Diameter of control rod(mm,d)		Reynolds number.	Remarks
0.3	5	0.1D	Re=15,000	Circular Cylinder (D=50mm)
	10	0.2D		
	15	0.3D		
	20	0.4D		
	25	0.5D		

실험유체는 20°C(±1°C)의 청수를 사용하였다. Fig. 3은 회류수조의 관측범위 내 유입유속에 따른 오차를 알아보기 위하여 모델을 장착하지 않고 유입유동에 수직하게 시간평균속도성분을 등간격으로 추출한 결과이다. 이는 자유수면과 회류수조 벽면의 의해 교란성분을 계속하여 실험의 객관성을 높이고자 하였다. 그리고 회류수조 벽면과 자유수면에 의해 교란성분에 의한 영향을 최소화하고자 상·하 20mm를 제외하고 해석하였다.

회류수조 유입유동 조절을 위한 유속조절센서 주파수 15Hz 이상에서는 자유수면보다 회류수조 하부 벽면에 의한 교란되는 성분이 많이 나타났다. 또한 주파수 10Hz의 경우를 살펴보면, 실험모델이 설치될 위치에서 수직방향으로 추출한 수평방향의 시간평균유속(u)은 0.380m/s로 표준편차는 6.57%로 2차원 회류수조 단면에서의 유동분포는 시간평균값에 집중하여 벽면영향이 미소한 것으로 나타났다.

제어봉을 원형실린더 후방에 d/D=0.1에서 d/D=0.5까지 부착하여 원형실린더 단독인 경우와 합하여 총 6개의 모델을 Fig 4와 같이 설계·제작하였다. 접합부는 아크릴계 접착제를 사용하여 견고히 틈이 발생하지 않도록 부착하였다. 유입유속(U_∞=0.3m/s)에서 원형실린더 직경(D=50mm)에 기준으로 한 레이놀즈수는 Table 1에서와 같이 약 Re=1.5×10⁴이었다. 제어봉(d)과 원형실린더(D)에 대한 비(d/D)는 제어봉의 크기에 따른 유동제어효과를 알아보기 위해 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 및 0.5까지 선정하였다. 실험에 적용한 유입유속은 모델크기와 회류수조 특성을 감안하여 0.3m/s로 선정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 정체점 맞은편에서 연직방향과 수평방향의 시간평

균유속분포를 유입유속(U_∞)으로 무차원하여 나타낸 결과이다.

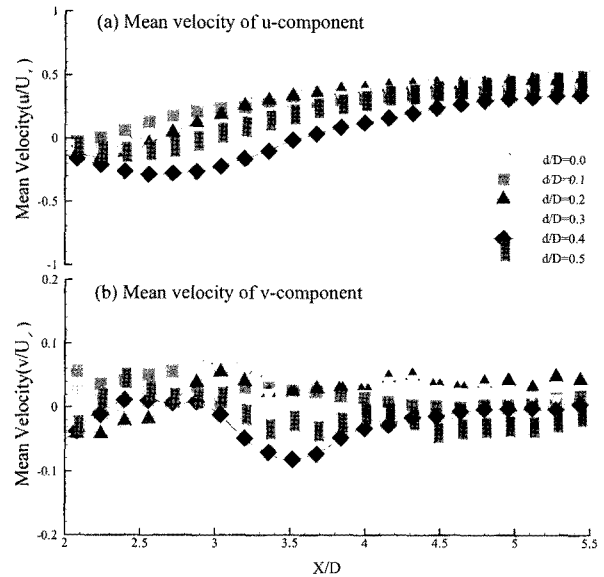


Fig. 5 Mean velocity distribution of u,v component

Fig. 5(a)에서는 실린더에 근접한 지점에서는 낮은 수평방향속도성분(u)이 추출되었고 후방으로 갈수록 속도결손을 회복하고 있다. d/D=0.1에서는 원형실린더에 비하여 근접 후류에서 수평방향속도성분이 X/D≃3.0까지 상대적으로 높게 나타났다. 그러나 전체적인 경향은 제어봉을 부착하지 않았을 때 정체점 맞은편에서 수평방향속도성분이 높고 안정성을 보였다.

Fig. 5(b)에서는 상하 대칭적인 와가 만나는 끝단에서 가장 높은 수직방향속도성분(v)이 나타났다. 그러나 d/D=0.4와 d/D=0.5는 강한 반류가 나타나는 X/D≃2.5지점에서 수직방향속도성분(v)가 높게 나타나고 X/D≃3.5에서 다운스트림이 크게 나타났다.

Fig. 6은 U_∞=0.3m/s에서 제어봉 크기별로 상하 대칭구조를 갖는 원형실린더 상부에 대한 시간평균속도장을 나타낸 것이다. 전체적으로 박리점의 이동은 제어봉의 크기와 관계없이 일정하게 나타났다. 그러나 박리점에서 상부에서 빠르게 빠져나가는 유속분포는 제어봉의 크기가 커질수록 후방으로 이동하면서 유동방향(X축)으로 길게 분포되었다. 제어봉의 크기가 증가할수록 시스템의 부피가 증가하여 경계층 영역 또한 증가하고 있다.

와의 생성유형을 살펴보면 제어봉을 부착하지 않은 d/D=0.0에서는 원형실린더에 근접한 후방에서 원형으로 생성되었다. d/D=0.1에서는 타원형의 형태로 제어봉이 없는 경우에 비하여 와의 중심이 상부로 이동하여 나타났다. d/D=0.2에서 와의 형태는 원형실린더 단독의 경우와 유사하게 원형으로 거의 동일한 위치에서 생성되었다. d/D=0.3에서는 와의 중심이 X/D≃2.5까지 후방으로 이동하였으며 와의 주변 유동구조가 활발하게 발달하였다. 특히 와의 중심에서 전방으로 향하는 반류는 작은 제어봉을 부착하였을 경우에 비하여 상대적으로 크게 나타나고

있다. $d/D=0.4$ 의 경우에는 와의 중심위치가 가장 후방으로 이동한 경우이며 기울어진 형태를 유지하면서 강한 반류를 제어봉이 부착된 방향과 박리점으로 향하는 특성을 보이고 있다. $d/D=0.5$ 에서는 제어봉이 가장 큰 경우로 시스템의 크기가 1.5배 증가한 경우이지만 오히려 $d/D=0.4$ 의 경우에 비하여 와의 생성이 $d/D=0.3$ 과 같은 형태를 유지하면서 중심부 후방에서 제어봉으로 향하는 강한 반류가 형성되며 반류가 제어봉에 의해 상부로 강한 업스트림을 형성하고 있다.

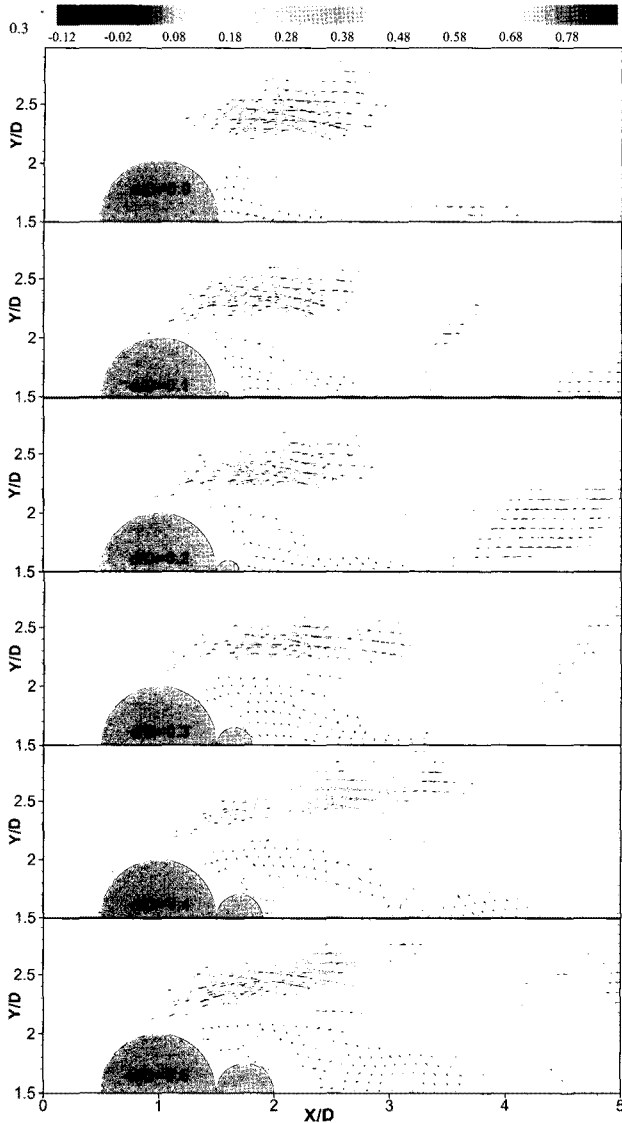


Fig. 6 Mean velocity field ($Re=1.5 \times 10^4$)

Fig. 7은 원형실린더 중심 후방 $Y/D=1.5$ 지점에서 유입하는 유동에 평행한 방향으로 시간평균 벡터성분을 추출하여 제어봉의 크기별로 상호 비교한 결과이다. $d/D=0.0$ 에서는 $X/D=2$ 에서 감소하여 $X/D=2.5$ 에서 가장 낮은 속도분포를 보이다가 후방으로 갈수록 다시 증가하면서 속도결손을 회복하는 경향을 보이고 있다. $d/D=0.1$ 의 경우 실린더에 근접한 $X/D=2.2$ 에서 낮은 속도분포를 보이다가 제어봉이 없는 경우에 비해 완전한 속도

구배를 보이며 속도결손을 회복하고 있다. $d/D=0.2$, $d/D=0.3$ 및 $d/D=0.5$ 에서는 낮은 속도분포를 보이는 지점이 후방으로 이동하다가 다시 증가하는 경향이 제어봉의 크기가 커질수록 비례적으로 후방으로 이동하고 있다. 그러나 $d/D=0.4$ 의 경우에는 다른 제어봉을 부착했을 경우와 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 즉, $X/D=2.5$ 를 경계로 음의 속도구배를 형성되고 다시 $X/D=3.8$ 에서 반대로 양의 속도구배로 변화하여 후방에서 속도결손을 회복하는 경향을 보이고 있다. 제어봉 부착에 따른 전체적인 시간평균 속도성분의 분포 경향은 $X/D=3$ 을 지나는 후방에서 제어봉을 부착하지 않은 경우에 비하여 낮은 속도성분을 나타내는 일관된 결과를 보이고 있다. 즉, 와의 중심부 후방 다운스트림이 형성되는 지점을 경계로 속도구배가 음에서 양으로 변화하는 지점으로 나타났다.

Fig. 8은 와의 중심이 생성되는 $Y/D=1.75$ 지점에서 유입유동과 평행한 방향으로 시간평균 벡터성분을 추출한 결과를 제어봉 크기별로 비교한 그래프이다. $d/D=0.4$ 와 $d/D=0.5$ 에서는 원형실린더에 근접한 영역에서는 높은 속도분포를 보이다가 와류의 후단에서 낮은 속도분포를 보이고 있다. $d/D=0.0$ 의 경우 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, $X/D=0.3$ 이후에 제어봉을 부착한 경우에 비하여 속도결손을 회복하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 9는 원형실린더 박리점 부근($Y/D=2.0$)에서 유입유동에 수평방향으로 시간평균 벡터분포를 추출하여 상호 비교한 결과이다. $d/D=0.0$ 경우에는 박리점 후방에서부터 완전한 속도의 증가를 보이고 있다. 그러나 제어봉의 크기에 비례하여 근접후류에서 속도분포가 낮게 나타나고 있다. 일반적인 경향은 박리점 부근 후방으로 지속적으로 증가하는 경향이 나타났다.

Fig. 10은 $X/D=2.5$ 에서 수직방향으로 제어봉의 크기별로 시간평균 벡터성분을 추출한 결과이다. 원형실린더 근접후류의 난류영역에서는 속도분포가 낮게 상하 대칭적인 구조를 보이고 있으며, $Y/D=0.5$ 하부와 $Y/D=2.5$ 상부에서는 유입유속으로 회복하는 구간으로 나타났다. 즉 시간평균속도분포에서는 원형실린더 상하 0.5배 영역까지 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 제어봉의 크기가 $d/D=0.4$ 에서는 원형실린더 후방에서 속도의 변화가 다른 제어봉에 비해 크게 나타났다.

Fig. 11은 $X/D=3.5$ 에서 Fig. 10과 동일한 방법으로 비교한 결과이다. 이 지점은 와의 생성, 소멸 및 재부착에 의한 상호 영향이 끝난 후방에서의 유동특성이다. $d/D=0.4$ 및 $d/D=0.5$ 의 경우 제어봉의 크기가 크고 경계층 영역에서 유입유동의 교란과 와의 배치형태로 인하여 속도결손을 회복하는 경향이 늦어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 원형실린더로부터 3배 떨어진 지점($X/D=4.5$)에서 Fig. 10과 동일한 방법으로 비교분석한 결과를 나타낸 것이다. $d/D=0.0$ 에서는 $Y/D=1.5$ 를 중심으로 전체적으로 완전한 증감분포를 나타내고 있다. 그러나 다른 제어봉에 비해 $d/D=0.4$ 와 $d/D=0.5$ 에서는 속도결손의 회복성향이 지연되고 있다.

제어봉을 부착함으로써 원형실린더 근접후류 유동제어효과는 원형실린더에 비해 제어봉을 부착한 경우 속도분포를 낮추는

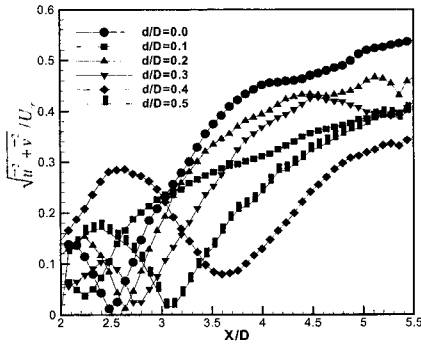


Fig. 7 Velocity distribution at Y/D=1.5

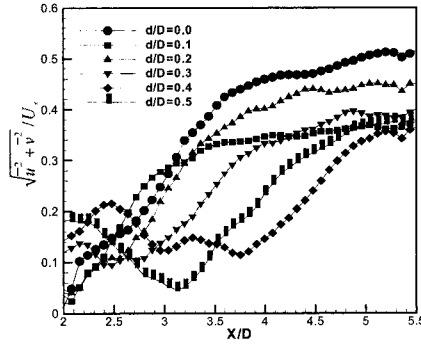


Fig. 8 Velocity distribution at Y/D=1.75

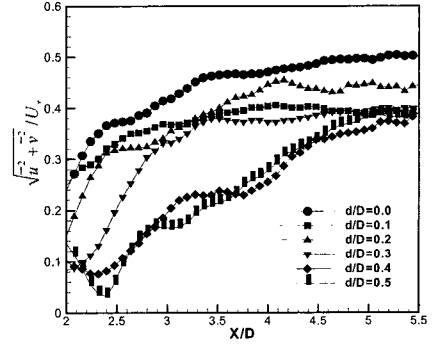


Fig. 9 Velocity distribution at Y/D=2.0

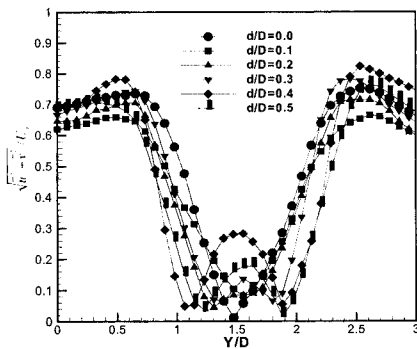


Fig. 10 Velocity distribution at X/D=2.5

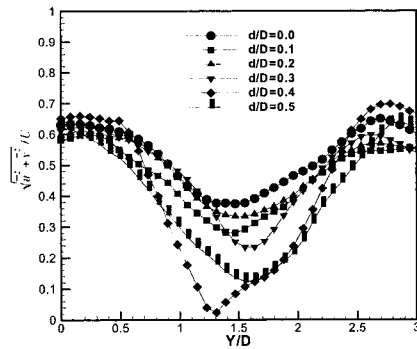


Fig. 11 Velocity distribution at X/D=3.5

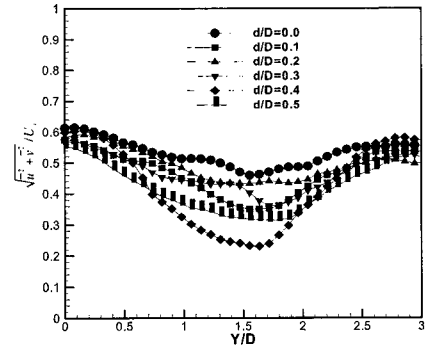


Fig. 12 Velocity distribution at X/D=4.5

결과를 가져왔다. 또한 후류 와류 끝단에서 가장 낮은 속도분포를 보였다. 이는 시간평균속도분포의 경향이 상하대칭적인 와분포에 의한 상부의 다운스트림과 하부의 업스트림되는 구간에서 상호 상쇄되는 유동구조에 기인한다고 판단된다.

본 연구의 주요 목적은 후류 유동제어이지만 제어봉의 부착에 따른 항력감소의 필요성을 요하고 있다. 시간평균속도의 분포를 분석한 결과 $Re=15,000$ 에서 제어봉을 부착하지 않은 경우에 실린더 후류의 속도결손이 가장 적은 것으로 나타났다. 그러나 제어봉 크기에 따른 근접후류의 유동패턴에 대한 제어효과는 제어봉별로 고유의 특성은 보이고 있으며, 김 등(2007)의 결과에서 항력은 $d/D=0.2$ 에서 압력손실이 가장 적은 것으로 나타났다. 따라서 항력은 유속의 제곱에 비례하는 함수관계를 고려하면 제어봉 부착에 따른 유속 감소결과는 후류에서 항력을 낮추는 결과를 유추해 볼 수 있다.

원형실린더에 작용하는 양력과 진동은 정체점을 지나 박리되어 상·하부에서 교대로 발생하는 주기적인 와열이 원인이며 항력은 원형실린더 전방과 후방에서 와의 방생으로 인한 압력 차로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서 접근한 유속분포를 통한 후류 유동제어 효과는 유동의 패턴과 속도분포라는 관점에 중요하며 후류의 와의 주기성이 항력에 미치는 영향에 대한 분석을 통한 전체 시스템에서 작용하는 주기적인 와류의 운동이 시스템에 미치는 힘의 메커니즘의 단계적인 접근이 필요하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 원형실린더형에 제어봉을 크기별로 부착하여 2차원 유동특성을 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

가. 정체점 맞은편에 부착한 제어봉은 박리점 이동에는 크게 영향을 미치지 않았다. 전체적으로 시간평균 유속분포는 원형 실린더 상하 0.5D까지 경계영역으로 나타났으며 $X/D=3$ 이후에서는 속도결손의 회복이 크게 나타났다.

나. 제어봉은 와 생성과 소멸 지점을 변화시켜 유동제어에 효과가 있었다. 수직과 수평방향 속도분포에서 상·하 대칭적인 와가 끝나는 지점에서 유속분포가 낮게 나타났으며 속도구배가 음에서 양으로 변화하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

참 고 문 헌

[1] 김옥석, 이경우, 조대환(2007), “제어봉에 의한 원형실린더 주위의 압력분포에 관한 수치해석”, 한국항해항만학회지 제

- 31권 제6호, pp. 485-490
- [2] 이만복, 김경천(2001), "PIV기법을 이용한 정사각 실린더의 근접후류에 관한 연구", 대한기계학회논문집 B권, 제25권 제10호, pp. 1408-1416
- [3] 이상준, 김대훈(1992), "제어봉이 부착된 원주후류 유동특성에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집 제29권 제1호, pp. 139-150
- [4] 임용섭, 손동기, 이준식, 양정수(1998), "Reynolds수와 난류 강도의 변화에 따른 실린더 주위 유동 박리점의 거동에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집 B권 제22권 제7호, pp 889-898
- [5] 해양수산부(2001), "표준형 (등)부표 개발에 관한 연구", pp. 6-24
- [6] Igarashi, T.(1997), "Drag reduction of a square prism by flow control using a small rod", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 69-71 pp 141-153
- [7] Tsutsui, T. and Igarashi, T.(2002), "Drag reduction of a circular Cylinder in an air-stream", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90, pp 527-541

원고접수일 : 2008년 4월 14일

심사완료일 : 2008년 7월 11일

원고채택일 : 2008년 7월 25일