

제어봉을 부착한 원형실린더 주위 유동제어에 관한 연구

김옥석* · 이경우** · 조대환***

* 목포해양대학교 대학원, ** 목포해양대학교 해양시스템공학부, *** 목포해양대학교 기관시스템공학부

A Study on the Flow Control around a Circular Cylinder by Control rods

Ok-Sok Gim* · Gyoung-Woo Lee** · Dae-Hwan Cho***

* Graduate School, Mokpo National Maritime Uni., Mokpo, 530-729, Korea

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

*** Division of Marine System Engineering, Mokpo National Maritime Uni., Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 부표시스템 침수체의 주요형상인 원형실린더에 제어봉을 부착하여 2차원 단면의 유동특성에 대해서 수치해석을 수행하였다. 유속을 0.1m/s에서 0.5m/s로 변화시키면서 부표시스템 주위의 유동현상을 파악하고 부표시스템의 효과적인 유동제어를 위해 실린더(D=50mm)에 제어봉의 직경을 0.1D에서 0.5D까지 부착하여 조류에 의한 영향을 조사하였다. 유동장내의 속도분포는 PIV계측기법 중 2프레임 입자추적법을 사용하여 수치해석의 정도를 높이고자 0.3m/s에서 비교 평가하였다. 실린더 주위의 압력분포는 0.2D의 제어봉을 부착하였을 경우, 유속의 변화에 관계없이 가장 양호한 경향을 보이는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 수치해석(Numerical analysis) 입자영상유속계(PIV, Partic image velocimetry), 유동가사화 속도장(velocity field), 원형실린더(Circular cylinders), 제어봉(Control rod)

ABSTRACT : *The purpose in having a control rod on a buoy system is to control the motion of it. The system may be composed entirely of a single circular cylinder and a long mooring anchor cable. A control rod has one function to perform in meeting its purpose, and that is to develop a control force in consequence of its orientation and movement relative to the water. The forces and moments generated as a result of the effects of mutual interference. then determine the stability characteristics of the body. In this paper, the study of control-rod-attached buoy's 2-dimensional section was accomplished. model tests and numerical simulations had been carried out with different diameters of control rods. and varying the Reynolds number $Re=5,000 \sim 25,000$ based on the cylinder diameter($D=50mm$) to predict the performance of the body and the 2 frame particle tracking 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.*

KEY WORDS : Circular Cylinder, Flow control, Vertex shedder, Drag coefficient, Pressure distribution, Particle Image Velocimetry, Flow Visualization

1. 서 론

해양환경의 변화와 해상물동량의 증가추세에 따라 해양어용자들은 해운과 수산분야 등에서 안정한 해상교통환경을 필요로 한다. 이러한 이유로 해상에서 항해원조시설인 부이시스템은 항만의 입출항 및 연안해역에서도 그 수요가 날로 증가하고 있으며 높은 신뢰성을 기본요건으로 한다. 국제항로표지협회에

서는 97%이상의 시스템 운영율을 유지하도록 권고하고 있어 부이의 운동학적 안정성 측면에서 역학적인 연구가 필요하다. 부표시스템은 자유표면에서 해저에 계류된 해양구조물로서 풍력, 파력 및 조류 등의 외력에 대해 복원성과 부력에 의한 힘의 평형, 모멘트의 상호관계를 고려한 위치의 안정성을 유지해야 한다. 부표에 작용하는 힘의 총합은 흔히 유체 정역학적 힘과 동력학적 힘으로 이 두 힘은 모두 부표의 표면에 수직한 수압의 변화를 통하여 나타난다.

김 등¹⁸⁾은 원주의 박리된 전단층내에 제어봉을 장착하여 원주 주위에서 발생하는 난류유동의 제어를 위해 $L/D=2.081$ 의 지점에 제어봉을 설치하면 항력은 29%감소함을 실험을 통하여

* 대표저자 : 정희원, domingo@mmu.ac.kr 016) 614-3001
** 중신회원, kwlee@mmu.ac.kr 011) 9339-3589
*** 중신회원, dhcho@mmu.ac.kr 016) 208-7559

밝혔다.

임 등^[2]은 V형과 U형 리블렛(Riblet) 원주에 작용하는 항력은 Re수가 40,000정도까지는 매끈한 원주와 비슷한 경향을 보이고 Re수 증가에 따라 급격한 차이가 나는데 Re수 약 140,000에서 V형 리블렛 원주의 경우 5%, U형 리블렛 원주는 최고 21%까지 저항감소를 얻음을 밝혔다.

박 등^[5]은 파와 조류가 공존할 때 구조물에 작용하는 외력의 산정법에 대한 이론 및 실험에서 실린더의 직경과 파장비가 0.2보다 작을 경우에도 선형과형을 산정하기 위해서 파력과 조류력을 선형중첩하여 계산하여도 양호한 정도의 외력을 얻을 수 있음을 밝혔다.

강 등^[4]은 원형실린더를 지나는 균일전단 유동에 대해서 가상경계법을 적용하여 레이놀드수, 전단을 및 막힘비율의 범위를 $50 \leq Re \leq 160$, $K \leq 0.2$, $B = 0.1$, 0.05인 유동에 대해서 보텍스 세딩 주파수는 Re수 증가에 따라 현저하게 증가하는 데 반하여 K가 증가하면 거의 일정하거나 약간 감소하며, B에 대해서는 Re 및 K에 관계없이 보텍스 세딩 주파수가 약간 증가함을 밝혔다.

Tamotsu Igarashi et al^[4]은 실험을 통해서 실린더 주위 유동을 작은 실린더를 상류측에 설치하여 정사각형 실린더의 항력감소에 대해 연구하여 주위유동을 제어봉으로 제어하여 항력을 최대 50%까지 감소시켰다. $Re = 3.2 \times 10^4$ 에서 30mm길이의 프리즘을 사용하여 유동패턴을 변화하는 제어봉의 거리에 대해 방정식을 유도하였다. 또 제어봉의 부가항력은 프리즘 항력의 10%이하임을 밝혔다.

Md. Mahbub Alam et al^[7]은 레이놀드 수 $Re = 6.5 \times 10^4$ 에서 수직으로 두개의 실린더를 배열하여 유동특성을 조사하였다. 이들은 다운스트림에서 양항력은 실린더 사이의 간격에 따라 매우 민감하게 작용하고 $L/D = 1.4$ 에서 양항력의 값은 하나의 실린더에서 보다 약 2배, 2.8배의 값을 조사하였다.

이와 같이 원형실린더의 박리되는 전단층내에 제어봉을 부착함으로써 시스템의 후류제어는 제어봉의 크기와 실린더와 제어봉 사이의 거리와 밀접한 관계가 있으며 레이놀드수에 따라 영향을 미치고 있다.

본 연구에서는 부표시스템 침수체의 주요형상인 실린더에 제어봉을 부착하여 운동을 제어하기 위해 제어봉의 크기를 변화시켜 최적의 제어봉을 찾고자 하였다. 2차원 단면에 대한 수치해석과 실험으로 시스템의 유동특성과 압력분포를 파악하고 이를 효과적으로 제어하기 위하여 유입되는 유속과 실린더에 접하여 제어봉을 부착해 부표주위의 압력분포를 감소시켜 힘의 스펙트럼을 최소화하고자 하였다. 또, 부표시스템 주위의 속도 분포를 알아보고자 PIV계측기법 중 2프레임 상호상관계수계산법을 통하여 순간 속도분포, 평균운동에너지, 평균와도 등을 일부 조건에 대해 실험하여 수치해석의 정도를 높이고자 하였다. 부표 주위의 압력분포가 전체 시스템에 미치는 영향을 알아보기 위하여 PIV실험에서 얻지 못한 압력분포를 상용 CFD코드를 이용해 여러 변수영역에 대해 수치해석을 수행하였다.

2. 모델링 및 경계조건

부이시스템의 수면하부 침수체 구조는 상·하부 실린더 구조물을 연결하는 블라켓과 유체방향에 대한 시스템제어를 위한 제어판 및 해저기저부의 침추와 연결된 사슬로 구성된다.

국내 부이시스템 중 LL-26을 사용하는 기수는 2007년 초 기준 190기이며 전체 부이시스템 18종 중 44%를 차지하고 있어서 본 연구의 모델로 채택하였다. 연구모델로 채택한 표준형부표 LL-26^[10]의 2차원 해석영역과 치수는 해양수산부(2001)^[11]과 같으며 축척비를 고려한 형상은 Fig. 1과 같다.

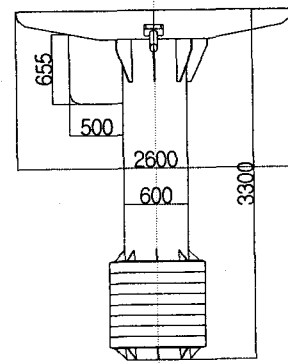


Fig. 1. Physical characteristics of the submerged part of buoy system

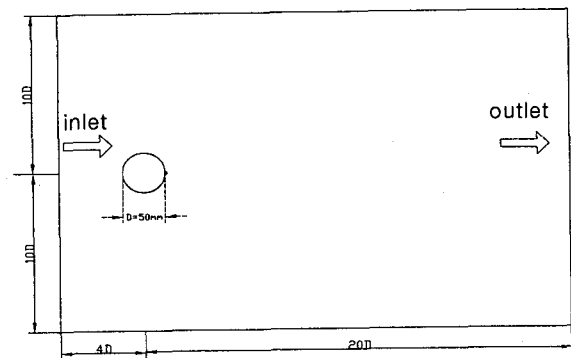


Fig. 2. Solution region & boundary condition.

원형 실린더형 강구조물인 LL-26의 침수체 실린더 상·하부 직경은 각각 2600mm, 600mm이며 회류수조의 벽면효과를 최소화 하고자 모델은 축척비를 $1/12$ 로 하였다. 축척비를 고려한 실린더의 직경(D)은 50mm이고, 제어봉의 직경(d)은 0.1D에서 0.5D로 Fig. 3과 같이 설정하였다. 또 Fig. 2와 같이 실린더 상부와 하부를 각각 10D를 주었고 실린더 후방은 20D를 주 부이시스템 주위의 유동을 관측코자 하였다. 또, 국립해양조사원 조류분포도(2006)를 조사한 결과, 서남해 연안해역에서는 해양환경으로는 0.3m/s가 가장 일반적 조류로 해석에 적용한 유속은 0.1m/s에서 0.5m/s까지로 0.3m/s의 주변영역에 대해서도 해석을 수행하는 조건으로 설정하였다.

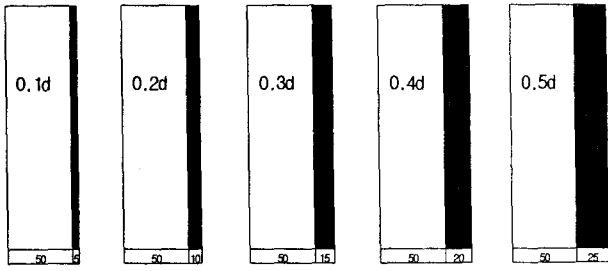


Fig. 3. Schematic diagram of a circular cylinder with a control rod.

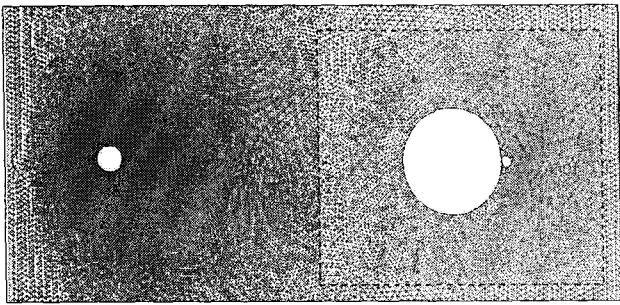


Fig. 4. Unstructured hybrid mesh around a circular cylinder.

수치해석을 위한 해석영역의 격자는 GAMBIT preprocessor 를 사용하여 Fig. 4와 같이 76,712개의 셀과 115,343개의 면의 격자점을 생성하였다. Table 1은 본 연구의 해석조건으로 각각의 유속별 실린더에 부착한 제어봉직경의 크기를 나타낸다. 일부 케이스에 대한 PIV실험은 수치해석의 해석결과와 실험결과를 비교평가하여 일관성있는 해석영역을 설정하고자 수행하였다. 그리고 PIV실험과 수치해석의 비교를 통해 전체 수치해석을 수행하는데 동일한 경계조건을 적용하는데 사용하였다. PIV실험에 대한 자세한 내용은 김 등(2006)¹²⁾과 같으며 회류구조에 대한 유속별 특성은 Fig. 5와 같다.

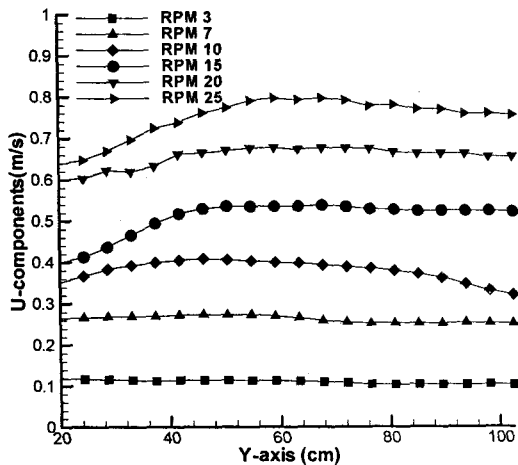


Fig. 5. Characteristics of CWC.

수치해석에서는 벽에서 점착조건(non-slip condition, $u=v=0$)을 사용하였다. 수치해석의 정도를 확인하기 위해 선행 실험을 실시하여 수치해석의 결과와 비교평가 하였다. PIV실험

은 0.25m/s에서 제어봉을 부착하지 않고 원형실린더 단독으로 하였다. 수치해석은 각각의 레이놀드수에 따른 제어봉의 특성을 파악하기 위해 해석조건을 25케이스로 선정하였다. 레이놀드수는 실린더의 직경(D=50mm)을 기준으로 하여 Table 1과 같다.

Table 1. Experimental & numerical analysis conditions

유속 (m/s)	제어봉 (d) 직경	Re	비고
0.1 ~ 0.5	5mm	0.1D	4,985
	10mm	0.2D	9,970
	15mm	0.3D	14,955
	20mm	0.4D	19,940
	25mm	0.5D	24,925

3. 수치해석

3.1 지배방정식

뉴우튼유체로 가정하여 지배방정식을 수치해석하기 위하여 검사체적에 기초한 유한체적법을 적용한 상용 CFD코드인 FLUENT를 사용하였다. 계산영역을 구하려는 유동변수를 둘러싸는 일정한 검사체적으로 나눈 후에 지배방정식을 이 체적에 대하여 적분함으로써 차분화시키는 방법이다. 이산화 방정식 (discretized equation)은 변수의 격자점을 포함하는 각 검사체적에 대하여 지배방정식을 적분해서 유도되며 다음과 같다. 질량보존 방정식(연속방정식)은

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m \quad (1)$$

S_m : 상변화에 의한 추가된 질량, $i=1(x), 2(y), 3(z)$

운동량보존 방정식은

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

P : static pressure

F_i : 외부 body force

τ_{ij} : viscous stress tensor

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

에너지보존 방정식은

$$h = \sum_j m_j h_j \quad h_i = \int_{T_{ref}}^T C_{p,i} dT \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h)$$

(4)

$$= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_j h_j + \frac{\partial p}{\partial t}$$

$$+ u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h$$

J_j : flux of species j

k : mixture thermal conductivity

S_h : source term

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\overline{\rho \phi}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_j \phi}) \\ & = - \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{\rho u'_i \phi'}) + \overline{D_\phi} + \overline{S_\phi} \end{aligned} \quad (5)$$

3.2 $k-\epsilon$ 난류모델

$k-\epsilon$ 모델에서 난류에너지 k 와 점성소산율의 초기 ϵ 에 관한 수송방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} \\ & (6) \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{M_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \\ & \rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) \\ & + \frac{C_1 \mu_t \epsilon}{k} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{C_2 \rho \epsilon^2}{k} \end{aligned}$$

난류 점성계수 μ_t 는 Prandtl-Kolmogorov의 관계식으로부터 난류에너지 k 와 점성소산율의 크기도의 관계식에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

따라서 질량운동에너지 보존방정식을 시간평균값으로 나타낸 일반지배방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (\overline{\rho u \phi}) + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\rho v \phi}) + \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\rho w \phi}) \\ & (8) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \overline{\phi}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \overline{\phi}}{\partial z} \right) + S_\phi \end{aligned}$$

4. 계산결과

4.1 수치해석방법의 검증

PIV실험과 수치해석을 비롯한 경계조건으로 수행하여 속도 성분에 대한 해석결과를 비교 평가하였다. 이 결과를 수치해석의 전체 해석영역으로 설정하여 일관성있는 수치해석을 수행하였다. 그러나 PIV 해석시 회류수조의 유속설정에 어려움이 있어 가장 근접한 영역으로 0.25m/s의 유속을 실험에 적용하였다.

Fig. 6은 유속 0.25m/s에서 초당 125프레임으로 촬영하여 1000프레임을 동일입자추적한 결과로 유동패턴과 순간속도분포이다. Fig. 7은 유속을 0.3m/s로 설정하여 Fig. 2의 해석영역

과 경계조건으로 해석한 실린더 주위의 평균속도분포이다.

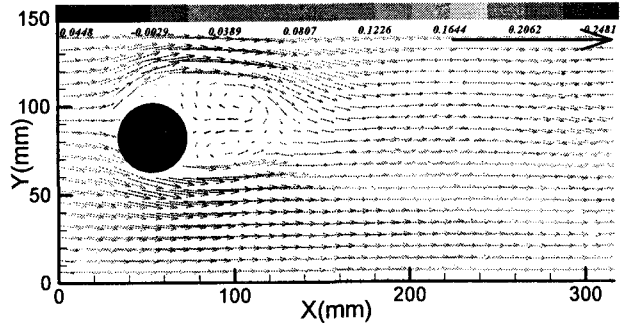


Fig. 6. Instantaneous velocity vectors around a circular cylinder at 0.25m/s.

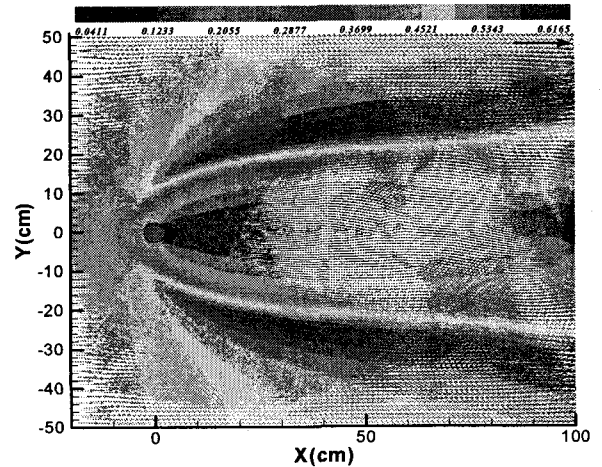


Fig. 7. Mean velocity vectors around a circular cylinder at 0.3m/s.

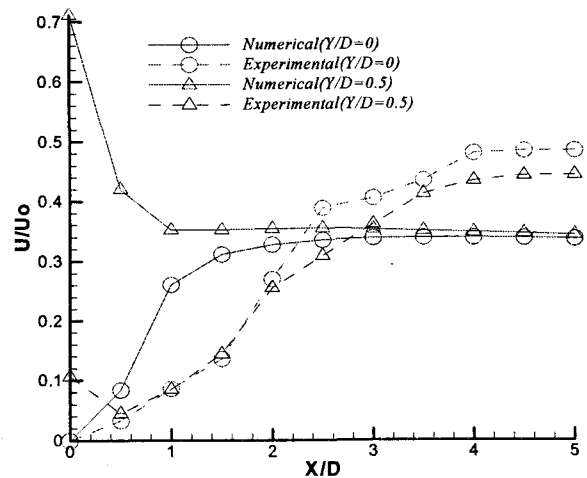


Fig. 8. Comparison with numerical and experimental results.

Fig. 8은 Fig. 6와 Fig. 7의 해석결과를 실린더 중심을 기준으로 양의 방향으로 $Y/D=0$ 와 $Y/D=0.5$ 지점에서 X 축으로 0.5D 씩 증가시키면서 실린더 후방의 U 성분을 추출하여 PIV실험에

의한 동일입자추적 결과와 수치해석의 U성분분포를 비교평가한 그래프이다. Fig. 8의 비교 평가는 제어봉을 부착하지 않은 상태에서 실린더 단독으로 수행하였으며 실험 및 수치해석 결과를 비교하여 수치해석의 전체 경계조건을 실험결과와 일치시키고자 격자생성등의 조건을 전해석 영역에서 통일을 기하였다. Fig. 8에서 속도성분이 각 지점에서 미소한 차이는 있으나 실험과 수치해석의 근본적인 차이를 감안하면 동일한 조건설정에 문제가 없으리라 판단된다. 즉, 실린더에 인접한 부분($X/D=1$ 지점이하)에서의 실험과 수치해석의 차이는 순간속도와 평균속도분포 및 유체의 성질 등의 차이에서 오는 결과라고 판단된다. $X/D=3$ 이후에서의 일정한 간격을 갖는 차이는 실험과 수치해석의 유속에서 오는 차이로 판단된다..

4.2 압력분포 해석 결과

제어봉을 부착한 실린더의 전압력과 정압분포를 통해 유동 제어에 최적인 제어봉은 0.2D로 나타났다. Fig. 9는 유속 0.1m/s-0.5m/s에서 제어봉을 0.1D-0.5D까지 부착하였을 경우에 전압력분포 결과를 나타낸 그래프이다. $d/D=0.2$ 인 제어봉이 전체 유속에서 가장 적은 C_p 값을 나타내고 있다.

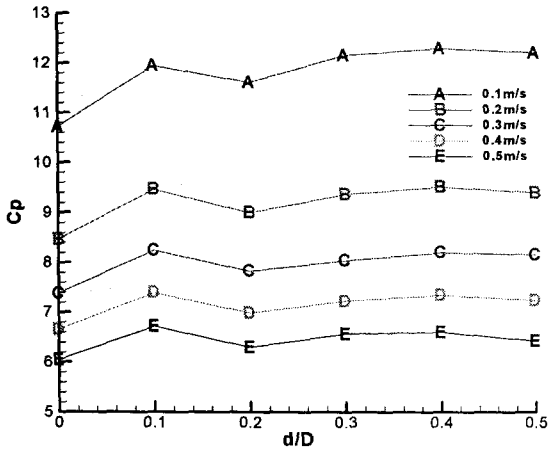


Fig. 9. Total pressure versus control rods.

Fig. 10은 유속의 변화에 대해서 압력분포를 제어봉의 크기 별로 나타낸 그래프이다. a는 제어봉을 장착하지 않았을 경우의 압력분포를 나타낸 것으로 전체영역에서 가장 적은 압력분포를 나타내고 있다. c의 경우가 $d/D=0.2$ 로, 유속의 변화에 관계없이 전체 영역에서 가장 양호한 제어봉의 특성을 나타내고 있음을 또한 알 수 있다.

Fig. 11, Fig. 12 및 Fig. 13은 제어봉을 부착하지 않았을 경우와 제어봉을 부착하였을 경우에서 각각의 제어봉에 따라 실린더 표면의 정압분포를 나타낸 그래프이다. 해석영역으로는 0.1m/s에서 0.3m/s의 유속에서 정체점을 기준(0도)으로 시계방향으로 360도까지 실린더 표면에서의 압력을 산출하여 나타낸 것이다. 기준점의 반대방향인 180도 지점은 실린더에 크기가 다른 각각의 제어봉이 부착된 지점으로 X축 방향의 끝단으로 선

정하였다. 전체적으로 압력분포의 경향은 정체점에서 크게 나타나며 180도 지점에서 가장 작게 나타났다. Fig. 9과 Fig. 10의 전압력 분포에서와 동일하게 정압분포도 $d=0.2D$ 에서 가장 양호한 결과를 나타내고 있다. 유속의 변화에도 불구하고 제어봉을 부착하였을 경우 $d/D=0.2$ 에서 압력분포가 가장 적은 값을 나타내고 있다.

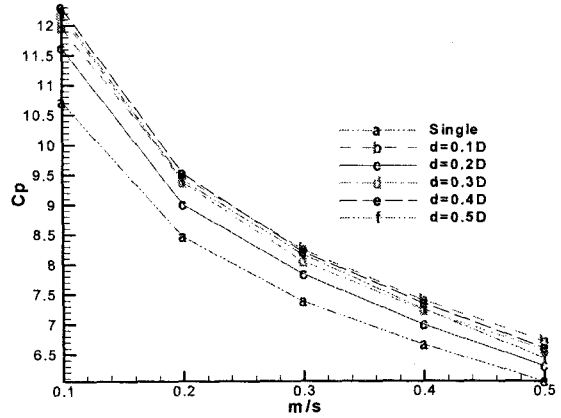


Fig. 10. Total pressure versus velocity.

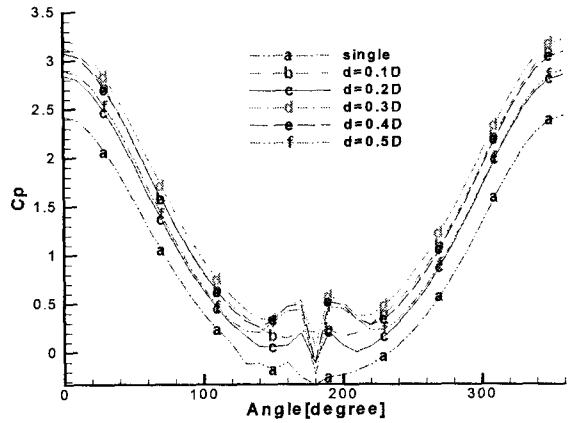


Fig. 11. Surface pressure at 0.1m/s.

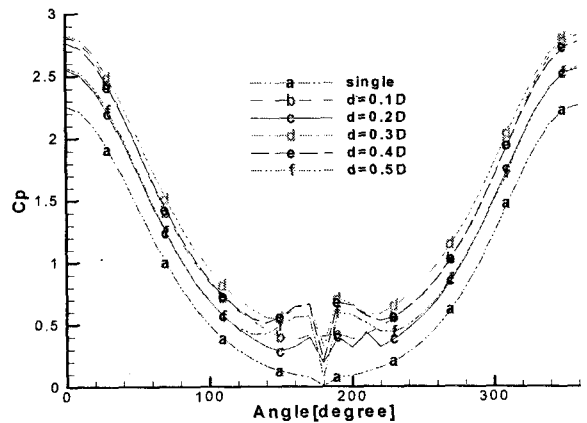


Fig. 12. Surface pressure at 0.2m/s.

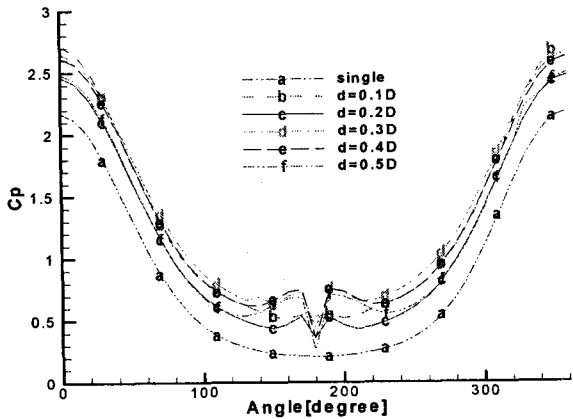


Fig. 13. Surface pressure at 0.3m/s.

5. 결론

본 연구에서는 부표시스템 수면하부 원형실린더에 크기가 다른 제어봉을 부착하여 나타나는 유동에 대해 2차원 압력분포를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 실린더에 제어봉을 부착했을 때, 제어봉에 따라 압력손실은 달라지며, $d=0.2D$ 의 제어봉에서 전압력 손실이 가장 적게 나타났다.
- 2) 유속을 0.1m/s에서 0.5m/s까지 변화함에도 불구하고 0.2d/D인 제어봉에서 가장 양호한 압력분포를 보였다.

차후 연구로는 원형실린더와 제어봉($d=0.2D$) 사이에 일정한 거리를 주어 부이시스템에 미치는 영향을 조사하고자 한다. 또한, 실험 및 수치해석을 병행하여 제어봉수와 유체 유입각도를 변수로 원형실린더 유체력 제어에 대한 복합적인 관계에 대해서 연구를 수행코자 한다.

참고 문헌

[1] 이상준외(1992), 제어봉이 부착된 원주후류 유동특성에 관한 실험적 연구, 대한기계학회논문집, pp. 325-329
 [2] 임희창외(2000), Riblet 홈을 가진 원주의 저항감소에 관한 연구, 대한기계학회논문집, pp. 508-513
 [3] 명현국(2004), 원형 실린더 주위의 비정상 이차원 층류유동 수치해석, 한국전산유체공학회지 제9권 제4호 pp. 41-47
 [4] 강상모(2005), 원형실린더를 지나는 균일전단 유동에 관한 수치연구, 대한기계학회논문집 제29권 제1호 pp. 139-150
 [5] 박광동외(2001), 실린더에 작용하는 파력 및 조류력에 관한 연구, 한국해양공학회지 제15권 제4호 pp. 14-19
 [6] 임용섭외(1998), Reynolds수와 난류강도의 변화에 따른 실린더 주위 유동 박리점의 거동에 관한 실험적 연구, 대한

기계학회논문집 제22권 제7호, pp 889-898
 [7] Md. Mahbub Alam et al.(2003), Fluctuating fluid forces acting on two circular cylinders in a tandem arrangement at a subcritical Reynolds number, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91 pp.139-154
 [8] T.Tsutsui et al.(2002), Drag reduction of a circular cylinder in an air-stream, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90 pp 527-541
 [9] Regis Capobianco et al.(2002), Experimental survey of the hydrodynamic performance of a small spar buoy, Applied Ocean Research 24 pp 309-320
 [10] Tamotsu Igarashi,(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
 [11] 해양수산부(2001), 표준형 (등)부표 개발에 관한 연구
 [12] 김옥석, 조대환, 이 경우, 고재용(2006). 플랩러더 주위의 유동특성에 관한 실험적 연구, 해양환경안전학회 추계학술대회 논문집, pp. 277-282