

병렬구조를 가진 장방형 실린더의 길이가 후류 유동에 미치는 영향

최상범* · 조대환**†

* 목포해양대학교 실습선, ** 목포해양대학교 기관시스템공학부

Effect on the Wake Flow according to Various length of Rectangular Cylinder in a Parallel Arrangement

Sang-Bom Choe* · Dae-Hwan Cho***

* Training Ship, Mokpo National Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

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

요 약 : 본 연구에서는 길이가 다른 장방형 실린더 사이에서 발생하는 제트류가 후류에 미치는 영향을 알아보기 위해 회류수조에서 PIV기법을 사용하여 실험을 실시하였다. 장방형 실린더의 높이(h)와 실린더 사이의 간격(gap)은 10mm이며 폭(B)은 300mm로 하였다. 유동방향의 모델의 길이(L)는 30mm, 60mm, 90mm 및 120mm를 각각 적용하였으며, 모델의 높이(H=30mm)를 기준으로 길이의 비가 1, 2, 3, 및 4이다. 유입유동은 조류의 수심에 따른 차이를 감안하여 모델의 높이(H)를 기준으로 $Re=1.4 \times 10^4$, $Re=2.0 \times 10^4$, $Re=2.9 \times 10^4$ 를 각각 적용하였으며, 유동계측을 위한 영역은 실린더 후방으로 모델 높이의 5배까지 설정하였다. 실험결과 유속이 증가함에 따라 와의 크기가 후류영역으로 증가하며, 근접 후류에서는 장방형 구조물일수록 관통류의 속도성분이 증가하는 특성을 나타냈다. 또한 후류로 갈수록 속도결손은 유입유동이 증가할수록 중형비가 작은 경우에 크게 나타났다.

핵심용어 : 장방형 실린더, 수중구조물, PIV기법, 제트류, 후류

Abstract : An experimental study is carried out to investigate the effect of jet stream in the gap of rectangular cylinders with different length in a parallel arrangement by using PIV method in a circulating water channel. The height(h) of the rectangular cylinder and the gap between the cylinder is 10mm, and the width(B) which is 300mm. The length of the model for flow direction was applied to 30mm, 60mm, 90mm & 120mm, The aspect ratio of a model on the basis of height(H=30mm) is 1, 2, 3 and 4. Reynolds number $Re=1.4 \times 10^4$, $Re=2.0 \times 10^4$, $Re=2.9 \times 10^4$ based on the height(H) of model for the distance of tidal distributions as of water depth have been applied during the whole experiments. The measurement area was set to 5H rear of the cylinder. As a result, Vortex size in the wake area were increased as velocity increased. and high aspect ratio increased through-flow velocity component in the near wake. Velocity deficit increased highly after near-wake area and low aspect ratio.

Key Words : Rectangular cylinder, Submerged marine structure, Particle image velocimetry(PIV), Jet stream, Wake flow

1. 서 론

최근 해양개발과 해양환경에 대한 활발한 연구가 진행되면서 다양한 기능을 가진 해양구조물의 개발에 대한 관심이 증대되고 있다. 해양구조물들은 설치해역의 해상조건, 지역적 특성 및 대상 해역에 적합한 기능을 수행하며 원하는 해수 정온화를 확보해야 한다. 이를 위하여 설치되는 해양시설의 기능성 및 해양오염 예방, 해수교환 등의 여러 인자를

효율적으로 극대화하기 위하여 실현 가능한 해양구조물로써 부유식 해양구조물과 수중해양구조물에 관심이 모아지고 있다.

이러한 해양구조물은 원형이나 사각 실린더형의 구조물로 구성되어 있으며, 실린더형 구조물은 구조 및 유체역학적으로 안정된 특성을 가지고 있어 많은 산업분야에 다양하게 적용되고 있다. 유체 중에 놓인 실린더는 그 형상에 따라 유동박리, 경계층 구조, 양력, 항력 및 압력 등 복잡한 유동구조를 형성하여 구조물 자체에 미치는 영향에 대해 공학적인 접근을 통해 실린더 주위나 후류를 능동적으로 제어하여

* First Author : king@mmu.ac.kr, 061-240-7431

† Corresponding Author : dhcho@mmu.ac.kr, 061-240-7217

병렬구조를 가진 장방형 실린더의 길이가 후류 유동에 미치는 영향

그 효과를 극대화 하고자 많은 연구가 이루어지고 있다. 기하학적으로 단순한 물체이면서 박리, 와류의 형성 및 장애물 주위의 점성유동의 흐름에서 발생하는 유동현상들이 모두 나타나기 때문에 실린더 주위에서 유동현상을 규명하는 것은 유체력의 상호작용을 이해하는데 유효한 방법이다.

사각실린더에 대한 실험적인 연구로 Roshko(1961)는 원형 실린더의 경우 와류는 실린더의 50배 후방에서 소멸된다고 보고하였다. 또한, Chang and Lee(2004)은 PIV(Particle Image Velocimetry)기법을 이용한 후류유동에 대한 연구에서 실린더 후류에서 재순환 영역을 확인하였으며 축방향 난류강도는 레이놀즈 수에 관계없이 실린더 높이의 14배까지 후방에서는 하나의 봉우리 형태로 나타나며 $Re=5.0 \times 10^4$ 에서는 실린더 높이의 14~16배 후방에서 약한 쌍을 이루는 봉우리 형태에 대한 결과를 제시하였다. Eom et al.(2000)은 제트류 분출에 따른 유동혼합현상은 제트류에 의해 와홀림(Vortex shedding)을 밀어내고 진폭을 감소시키는 특성을 보이고 확산에 의한 혼합보다 대류현상이 지배적임을 제시하였다.

수치해석에 대한 연구로 Kim(2005)은 2차원 층류 유동해석과 수치해석 결과평가를 통해 유동박리는 사각 실린더 전방에서 형성되며, 레이놀즈 수가 증가함에 따라 실린더 후면에서 발생한 유동박리의 영향을 받고, 와홀림도 빨라지고 그 진폭이 커진다고 보고한바 있다. 또한, Park and Son(2010)은 종횡비 변화에 따른 유동특성에 대한 수치해석에서 종횡비에 관계없이 실린더 후류의 와의 길이가 감소하며, 횡방향으로 진폭은 종횡비에 따라 변화하는 결과를 제시하였다. Hwang(2003)은 고립파(Solitary wave)에 의한 투과성 수중방파제에서의 유속장 및 난류강도 해석에 관한 연구로서 수치해석을 통해 입사파가 고립파인 조건에서, 사각형상 투과성 수중방파제의 폭과 높이의 변화에 따른 유속장과 무차원화된 난류강도 변화를 검토하였다.

본 연구에서는 장방형의 해양구조물인 수중구조물을 장방형의 사각실린더로 단순화하였다. 장방형의 사각실린더는 정온해역 조성과 환경 친화적인 수중방파제 하부에 적용이 가능한 형상으로, 병렬로 배열된 길이가 다른 장방형 실린더 사이에서 발생하는 관통류(Through-flow)가 후류 유동에 미치는 영향을 PIV실험을 통해 고찰하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 회류수조, 고속카메라 및 동일입자추적시스템 등 실험장치의 개략적인 구성을 도시한 것이다. 회류수조는 투명한 강화유리로 제작되었으며 균일한 유입속도를 얻기 위하여 전방에 정류판과 다공판을 설치하였다. 실험에 사용된

회류수조의 규격은 $1.0L \times 0.3B \times 0.3Dm^3$ 이고, 미소한 간격으로 축류펌프의 주파수를 변화시켜 유속을 가변 할 수 있다. PIV 기법은 유동의 흐름을 추적하기 위해 미소한 입자를 삽입하여 모델 주변의 유동을 계측하는 기법이다. 모델 주변 부유 중인 동일입자추적을 위한 광원은 직진성과 반사성이 우수한 SLOC Lasers(GL532H-500 mW)를 사용하였으며, 원통형 렌즈(Cylindrical lens)를 이용하여 유동장의 계측영역에 2mm의 시이트 광(Sheet light)을 조사하였다. 모델 실험 시 회류수조 내 유체의 온도는 $24^\circ C$ 전후의 청수를 사용하였으며, 실험 전후 계측한 유체온도는 $0.5^\circ C$ 차를 보였다. 모델 주위 유동 관측을 위해 사용된 PVC(Polyvinyl chloride)입자는 비중이 1.02로 광원에 의한 반사성이 우수한 균일한 입자로 일정한 크기를 선별하여 실험에 사용하였다. 또한 미소기포의 부착 등에 의해 추적입자와 유체와의 비중차가 발생하지 않도록 하였다. 유동장을 해석하기 위해 가시화된 유동장을 고속카메라를 이용하여 초당 125프레임으로 8초간 촬영하여 1000 프레임의 영상을 취득하였으며, 1~500프레임까지의 4초간의 영상에 대해 PIV해석을 수행하였다. 가시화 실험 및 PIV 계측에 따른 실험조건은 Table 1과 같다.

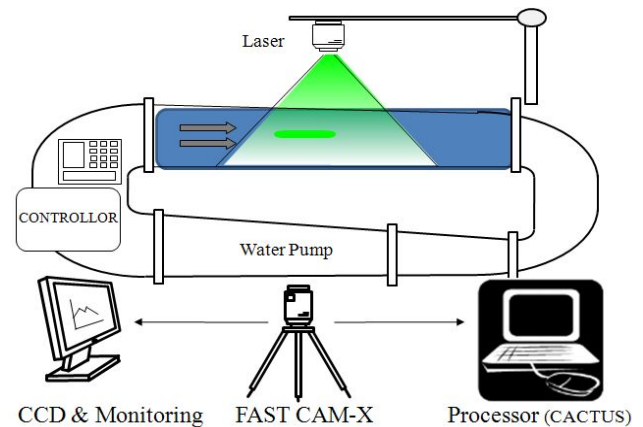


Fig. 1. Schematic arrangement of PIV system with CWC.

Table 1. Experimental condition for PIV system.

Item	Specification
Light source	SLOC Lasers (GL532H-5000mW)
Sheet light	Cylindrical lens(with : 2mm)
Particle	PVC (SG : 1.02, $\phi 110\mu m$)
Camera setup	Resolution : 1280 x 1024
Time resolution	125fps
Calculation time	4 sec
Image recording	FASTCAM-X 1280 PCI

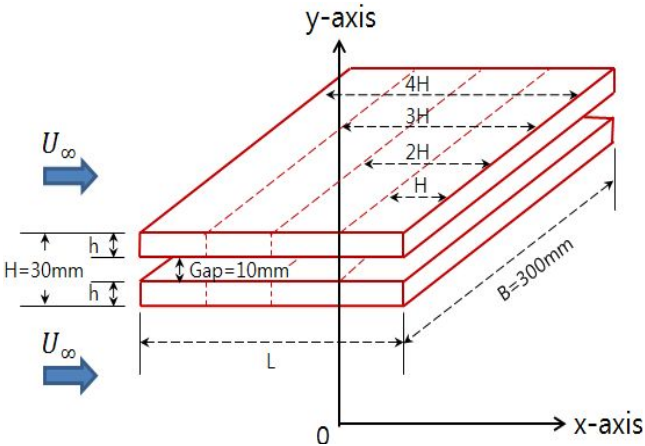


Fig. 2. Coordinate system & model setup.

Fig. 2는 장방형 실린더 모델의 형상에 대해 개략적으로 도시한 것이다. 투명한 아크릴로 제작한 장방형의 모형은 높이 $H=30\text{ mm}$ 를 대표길이라고 하였으며, 바닥으로부터 약 $3.7H$ 수면에서 모형상부까지는 약 $2.3H$ 에 모형을 설치하여 회류수조 하부와 벽면의 영향 및 상부 자유표면의 영향을 최소화하였다. 대표길이 $H=30\text{ mm}$ 에 따른 벽면방향 길이 $L=300\text{ mm}$ 의 비가 1:30인 장방형의 사각실린더 중앙에 10 mm 의 틈새를 주었다.

2.2 실험방법

유동계측을 위한 영역은 Fig. 2와 같이 길이가 다른 실린더 후방의 일정한 영역을 계측하기 위하여 카메라를 고정하고 실린더의 길이와 상관없이 실린더의 끝단이 모델의 높이(H)만큼 포함되어 계측되도록 실린더를 설치하였으며, 후방으로 $5H$ 까지 설정하였다. 그리고 유입유동의 수평인 방향을 x -axis, 수직인 방향을 y -axis로 하였다. 회류수조의 유입속도는 국립해양조사원에서 제공하는 조류표를 이용하였으며, 부산항(35-12-11N, 129-14-48E)과 해운대(35-17-00N, 129-18-00E) 인근의 조류(13.1.1-6.28, 168일)를 모델링하였다. 또한, 평균유속의 수직분포는 표층에서 저층으로 갈수록 유속이 재수 함수적으로 감소하는 경향(Yang, 2011)을 갖고 있으므로 깊이 따른 유속의 변화를 위해 0.14 m/s , 0.21 m/s , 0.29 m/s 로 하였다.

모델의 높이($H=30\text{ mm}$)에 기초한 레이놀즈수는 $Re=1.4 \times 10^4$, $Re=2.0 \times 10^4$ 및 $Re=2.9 \times 10^4$ 로 균일한 유입유동 중에서 회류수조 중앙에 모델을 장착하였다. 유동방향의 모델의 길이(L)는 30 mm , 60 mm , 90 mm 및 120 mm 를 각각 적용하여 유입유동에 평행한 실린더의 길이가 후류에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 동일입자의 추적을 위한 알고리즘은 계조치(階照值) 상호상관(Grey Level Cross-correlation) PIV기법이 적용된 CACTUS(V. 3.1)을 이용하였다(Cho and Lee 2001; Gim et al.,

2011). 계조치 상호상관 PIV는 연속된 두 프레임의 입자영상의 계조패턴은 미소시간동안 크게 변하지 않는다고 가정하면 제1프레임과 제2프레임에서 미소시간 후 상관영역내의 계조치 분포는 유사한 특성을 나타낸다. 따라서 제1프레임의 입자의 위치를 중심으로 하여 제2프레임의 같은 크기를 갖는 영역과의 계조치에 대하여 상호상관계수 값을 구하여 비교하면 그중 가장 큰 값을 동일입자의 이동위치로 간주할 수 있게 된다. 상호상관방식의 PIV에서는 유동방향의 모호성이 없으며 Noise에 강한 특성을 갖고 있어 상대적으로 낮은 강도의 입자영상으로부터도 속도벡터를 취득할 수 있다. 시간 해상도는 초당 125프레임으로 분할하여 유동정보를 얻었으며 순간유동을 해석하였다. 시간평균 유동장 계측을 위해 획득한 유동정보를 평균한 결과 전체 동일입자추적과정에서 발생한 오차는 평균 4% 이하로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

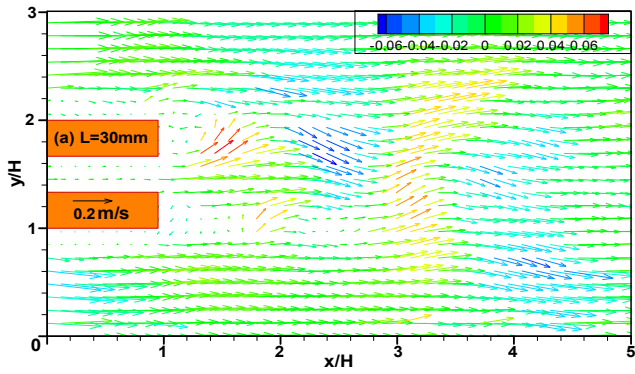
3.1 속도벡터

Fig. 3은 $Re=1.4 \times 10^4$ 에서 병렬로 배열된 장방향 구조물 주위의 순간유동에 대해 속도벡터를 도시한 결과이다. 속도벡터의 Contour는 수직속도 성분을 나타낸 것이다. 전체적으로 모델 후류에서 상하로 진동하는 유동의 흐름을 관찰할 수 있다. Fig. 3(a)는 모델의 길이(L)가 30 mm 인 경우로 실린더 근접 후방에서 높은 속도분포를 보이고 있으며 상하로 빠르게 진동하는 후류유동이 길게 형성되고 있다. Fig. 3(b)는 $L=60\text{ mm}$ 인 경우로 상하로 진동하는 유동이 다소 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 Fig. 3(c)(d)에서는 각각 $L=90\text{ mm}$ 와 $L=120\text{ mm}$ 인 경우로 확연하게 진동하는 후류 유동은 감소하였으며 실린더 후방의 상하부에서 빠른 유동이 관측되었다.

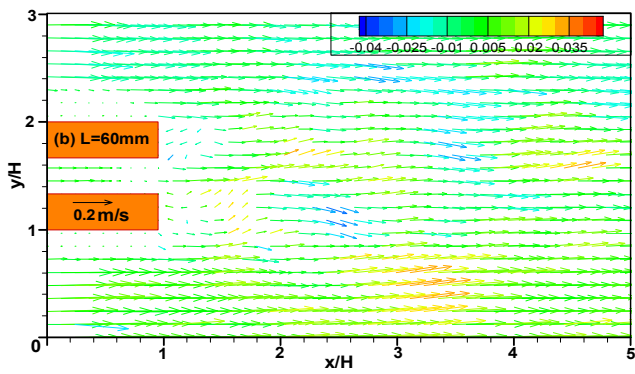
Fig. 4는 $Re=2.9 \times 10^4$ 에서 병렬로 배열된 장방향 구조물 주위의 순간유동에 대해 속도벡터를 도시한 결과이다. 유입유동의 속도가 빨라짐에 따라 전체적으로 실린더 근접 후방에서 와의 형성이 뚜렷하게 관측되었다. 상하로 진동하는 유동의 특성이 감소하는 대신 후류로 빠르게 빠져나가는 특성이 두드러지게 나타났다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)에서는 강한 다운스트림의 특성이 실린더 후방 상부에서 유동방향으로 폭 넓게 분포되는 특징을 보이고 있다.

또한 $L=90\text{ mm}$ 인 Fig. 4(c)에서는 넓게 분포하는 상향 및 하향류가 감소되는 특성을 보이고 있다. 이와 더불어 가장 길이가 긴 $L=120\text{ mm}$ 인 Fig. 4(d)에서는 실린더 후방 상하부에서 빠른 유입유동과 혼합된 영역이 형성되지만 그 폭이 Fig. 4(a) 및 Fig. 4(b)에서 나타나는 넓은 영역의 영향에까지 미치지 못하고 있다. 상하부 실린더 사이에서 나타나는 유동이 중앙부를 관통하여 후방으로 길게 형성되는 특성이 나

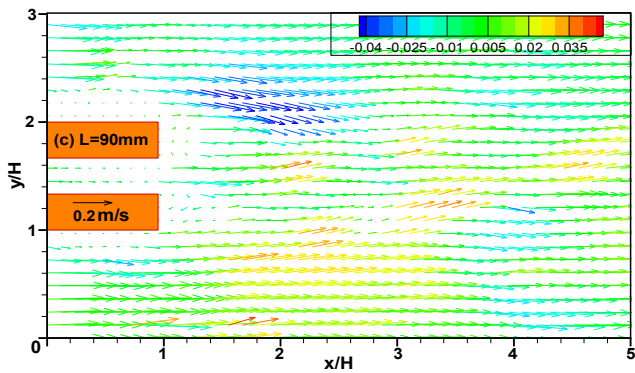
병렬구조를 가진 장방형 실린더의 길이가 후류 유동에 미치는 영향



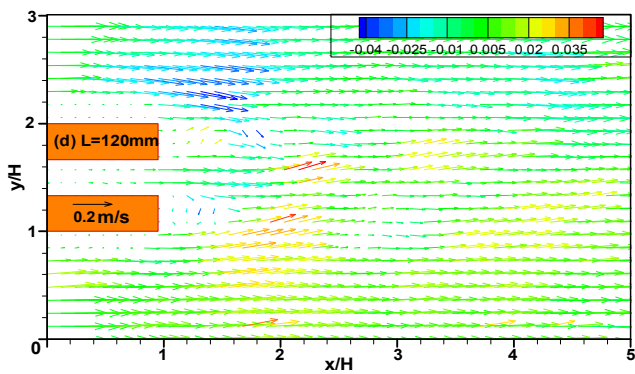
(a) L=30 mm



(b) L=60 mm

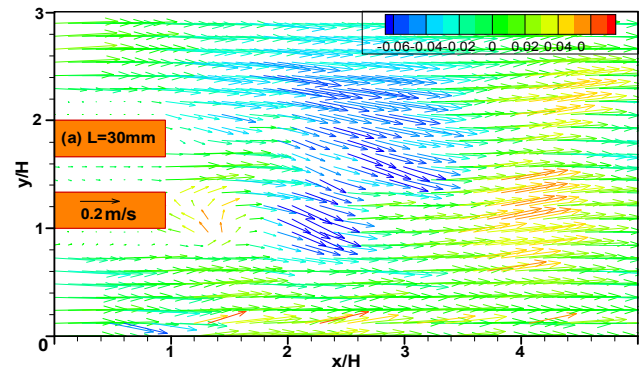


(c) L=90 mm

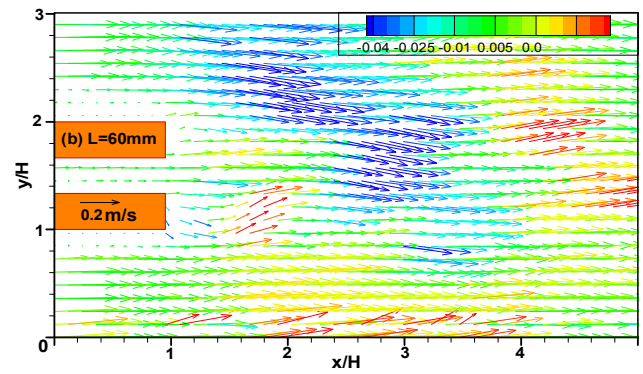


(d) L=120 mm

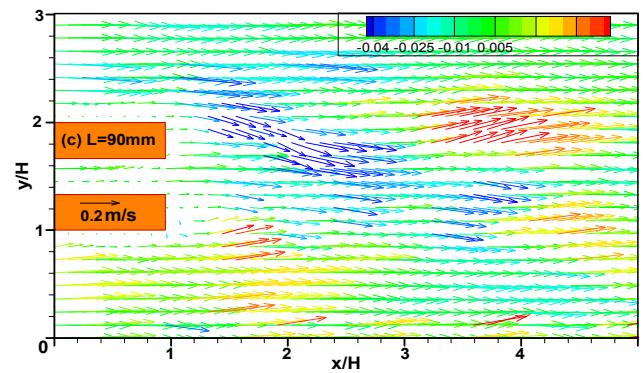
Fig. 3. Instantaneous Velocity Field at $Re=1.4 \times 10^4$.



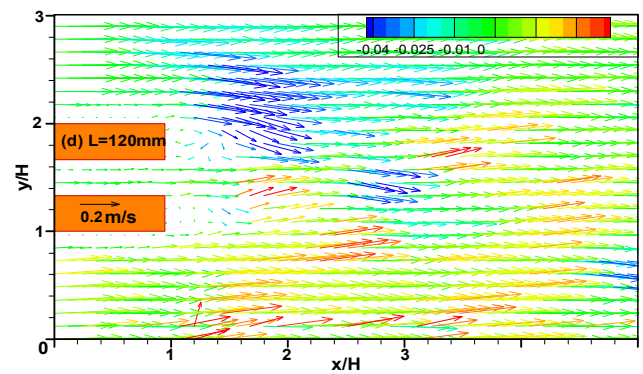
(a) L=30 mm



(b) L=60 mm

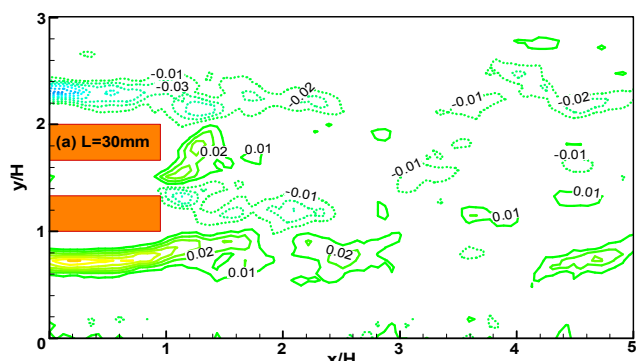


(c) L=90 mm

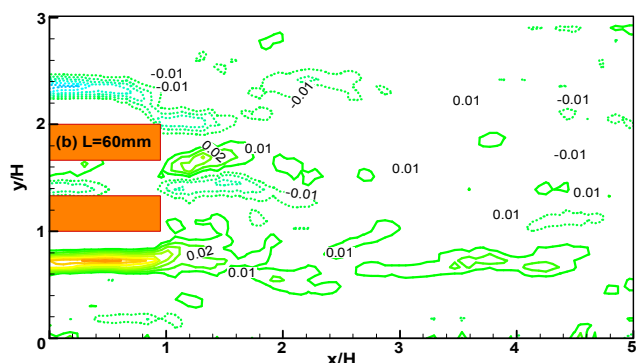


(d) L=120 mm

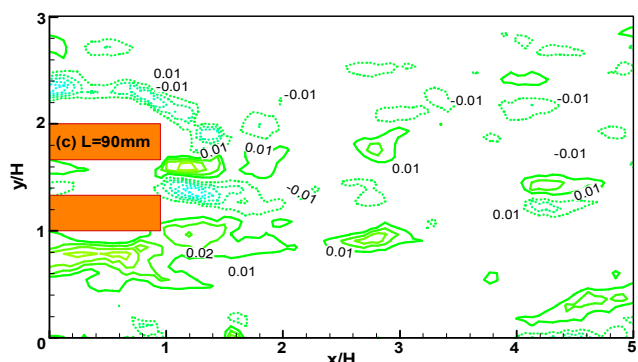
Fig. 4. Instantaneous Velocity Field at $Re=2.9 \times 10^4$.



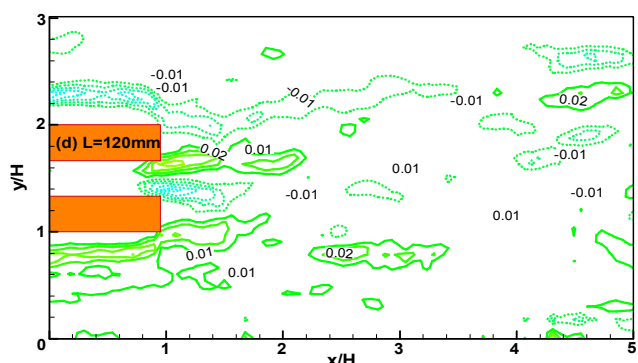
(a) L=30 mm



(b) L=60 mm

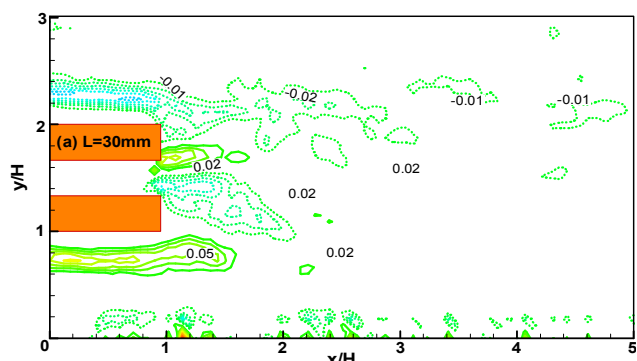


(c) L=90 mm

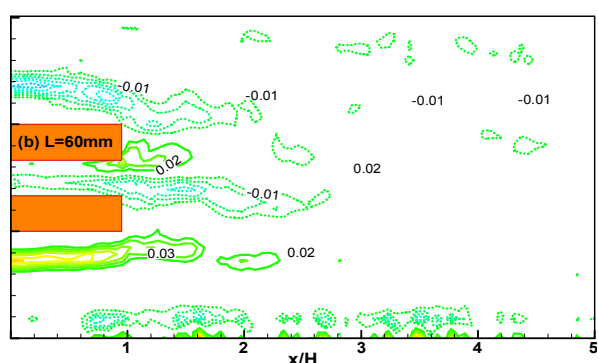


(d) L=120 mm

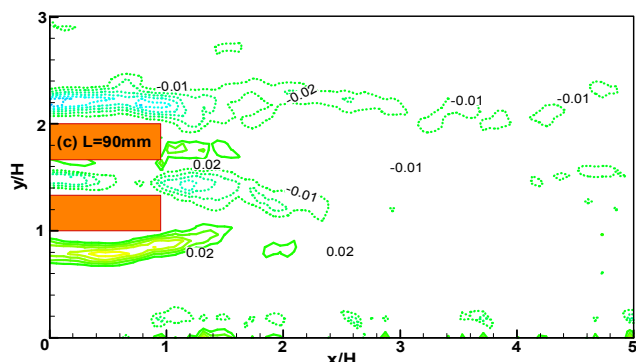
Fig. 5. Vorticity Field $Re=1.4 \times 10^4$: dotted lines(clockwise) solid lines(count clockwise).



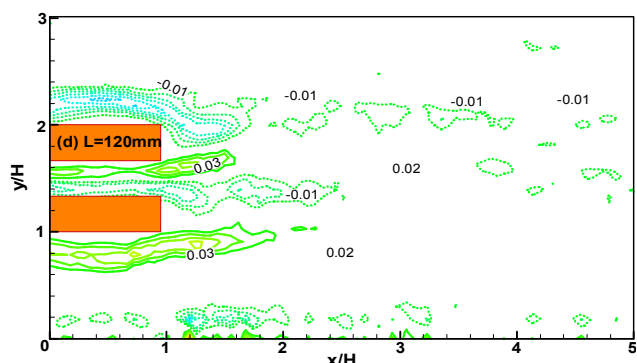
(a) L=30 mm



(b) L=60 mm



(c) L=90 mm



(d) L=120 mm

Fig. 6. Vorticity Field $Re=2.9 \times 10^4$: dotted lines(clockwise) solid lines(count clockwise).

병렬구조를 가진 장방형 실린더의 길이가 후류 유동에 미치는 영향

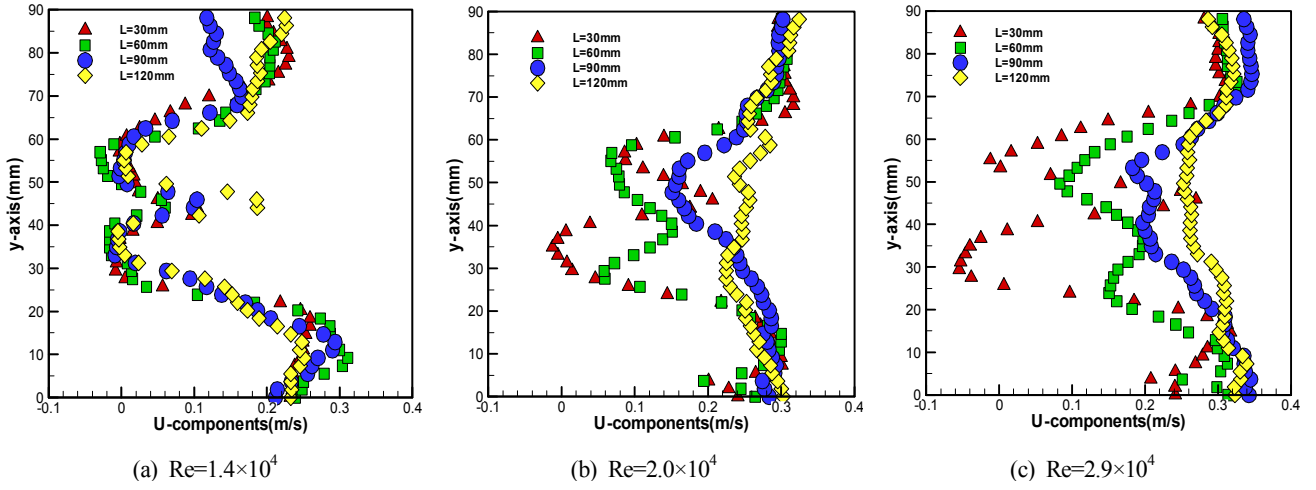


Fig. 7. Streamwise Velocity distribution at $x/H=1$.

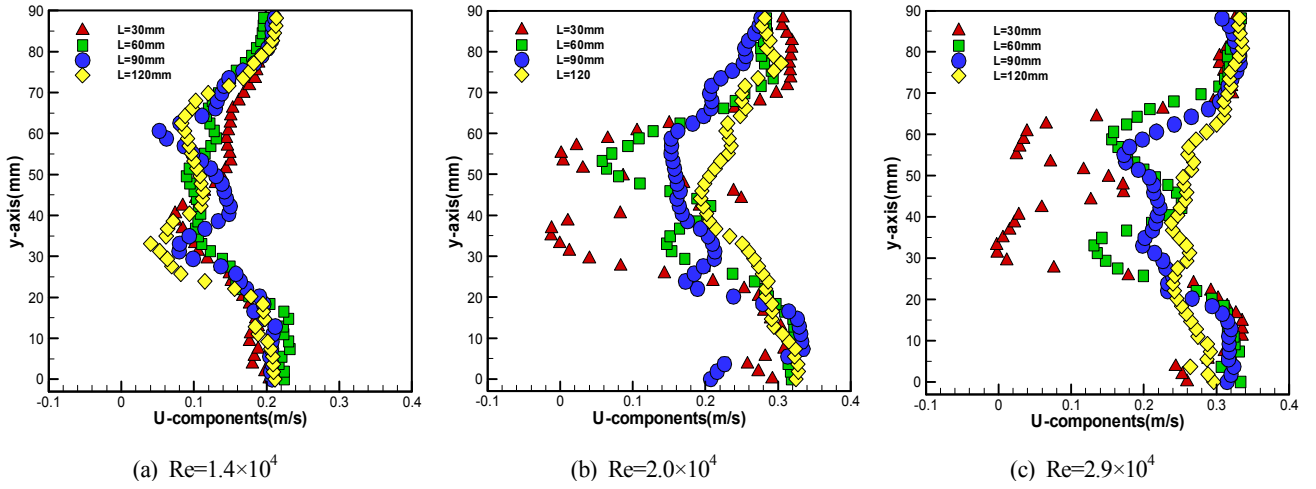


Fig. 8. Streamwise velocity distribution at $x/H=3$.

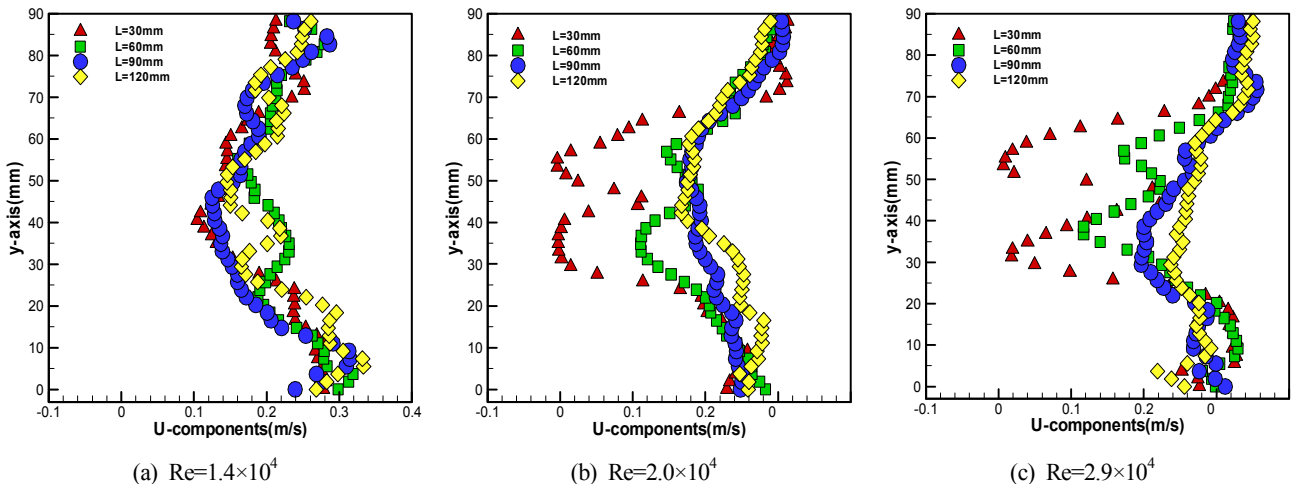


Fig. 9. Streamwise velocity distribution at $x/H=4$.

타나고 있다. 이러한 병렬구조를 가진 장방형 실린더를 정은 해역을 만드는 수중방파제 하부에 적용하면 실린더 사이의 관통류가 방파제 내측의 해수순환을 촉진시키는 기능을 할 것으로 보인다.

3.2 와도분포

Fig. 5는 $Re=1.4 \times 10^4$ 에서 와도분포를 도시한 결과이다. 점선은 시계방향의 회전성분을 실선은 반시계방향의 회전을 의미한다. 실린더 외부에서 강하고 넓은 분포의 와도성분이 나타나며 실린더 사이에서 실린더 외부에서 분포되는 방향과 반대로 와도성분이 형성되는 특징을 보이고 있다. Fig. 5(a)와 Fig 5(b)는 각각 $L=30\text{ mm}$ 및 $L=60\text{ mm}$ 로 와도분포가 길게 후방으로 흐르는 특성을 보이는 반면에 Fig. 5(c) 및 Fig. 5(d)에서는 $x/H=1$ 지점을 지나 실린더 외부 상하부에서 안쪽으로 휘말리는 특성을 보이고 있다. 마찬가지로 상하부 실린더 중앙을 관통하는 유동이 안쪽으로 휘말리는 와도분포의 영향으로 상대적으로 Fig 5(a) 및 Fig. 5(b)에 비해 후방으로 길고 대칭을 이루는 특징을 나타내고 있다.

Fig. 6는 $Re=2.9 \times 10^4$ 에서 와도분포를 도시한 결과이다. 전체적으로 레이놀즈 수가 증가함에 따라 실린더 표면을 따라 생성된 와도분포가 후방으로 길게 열을 이어 흐르는 특성을 보이고 있으며, 실린더의 길이가 증가할수록 와도분포도 길게 나타나는 특성을 보이고 있다. 실린더 후방에서 관통류의 유속분포에 대해서는 실린더 높이(H)의 1배, 3배 및 4배 후방에서 유입유동과 같은 방향의 유속을 레이놀즈수와 모델별로 추출하여 Fig. 7~Fig. 9에 도시하였다.

3.3 속도분포 특성

Fig. 7은 $x/H=1$ 지점에서 수직인 방향으로 수평방향의 유속성분을 추출한 결과로 $Re=1.4 \times 10^4$ 에서는 모델사이의 중간에서 가장 장방형인 구조 $L=120\text{ mm}$ 에서 높은 속도분포를 보였으며, $Re=2.0 \times 10^4$ 와 $Re=2.9 \times 10^4$ 에서는 유입유동과 동일한 속도분포를 나타냈다. 그러나 유속이 빨라짐에 따라 가장 작은 장방형 구조물인 $L=30\text{ mm}$ 에서는 관통류의 유속이 증가하고 실린더 근접 후방에서는 오히려 유속이 감소하는 특징을 보였다. 이것은 실린더 내측과 외측의 흐름이 실린더 끝단에서 박리되어 실린더 후방으로 재순환하여 나타난 결과로 판단된다. 또한 실린더 외벽 측의 근접 후류에서는 유동방향으로 길게 배열된 모델일수록 유입유속과 관통유속과의 차를 나타내는 속도결손이 작게 나타났다. 이러한 결과는 Park and Son(2010)의 Re 와 사각실린더의 종횡비가 주위의 유동특성에 중요한 영향을 미친다는 것과 일치한다.

Fig. 8은 모델의 높이 3배 후방에서 속도분포를 레이놀즈수와 모델별로 비교한 결과이다. 낮은 레이놀즈수($Re=1.4 \times 10^4$)에서는 모델에 따라 큰 차이를 보이지 않으며 비슷한 유속분포를 나타냈다. 그러나 레이놀즈수가 증가할수록 관통류의 속도 차는 크게 나타났다. $Re=2.0 \times 10^4$ 에서는 Fig. 7에서와 유사한 속도결손 특성을 나타냈으며, 레이놀즈수 증가에 따른 속도 분포 특성 또한 Fig. 7과 유사한 경향을 보였다. Fig. 9는 모델 높이의 4배 후방에서 속도성분을 추출하여 비교한 결과로 $Re=1.4 \times 10^4$ 에서는 실린더를 중심으로 U자형의 속도분포 보였으며, 전체적인 경향은 Fig. 8에서 나타나는 속도결손 특징이 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 수중구조물 형태로 장방형 실린더의 길이 변화에 따라 제트류 생성이 후류유동의 변화에 미치는 영향을 PIV기법을 통해 계측하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

장방형의 비가 증가함에 따라 상하 진동하는 칼만와류는 감소한다. 유입유동이 증가함에 따라 와의 크기가 후류영역으로 증가하며 상·하 실린더 사이의 관통하는 유동의 영향으로 외부영역에서 형성되는 와도분포와 반대되는 와가 형성되었다. 근접 후류에서는 장방형 구조물일수록 관통류의 속도성분이 증가하는 특성을 나타냈다. 후류로 갈수록 속도결손은 유입유동이 증가할수록 종횡비가 가장 작은 경우에 크게 나타났다. 장방형 실린더 사이의 관통류는 방파제 내수면의 해수순환을 증가시키는 기능을 할 것으로 판단되며, 향후 적용에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

References

- [1] Chang, T. H. and J. B. Lee(2004), "An Experimental Study on the Wake of a Square Cylinder Using PIV Technique", Journal of the Korean Society of Marine Engineers, Vol. 28(1), pp. 124-135.
- [2] Cho, D. H. and Y. H. Lee(2001), "Application of PIV to Fluid Machinery and Assessment of Ventilation Performance in Ships", Journal of Korean Society of Marine Engineering, 25(3), pp. 540-551.
- [3] Eom, J. S., D. H. Kim and K. S. Yang(2000), "Confined laminar vortex shedding and scalar mixing around a square cylinder with a jet", KSME Proceeding, pp. 759-764.
- [4] Gim, O. S., G. W. Lee, C. W. Lee and W. J. Oh(2011), "PIV Measurement of Flow around a submerged Pitch Damping Foil", Proceeding of the Annual Autumn Meeting,

SNAK, pp. 573-578.

- [5] Hwang, J. K.(2003), “Analysis of Velocity Fields and Turbulence Intensity due to Submerged Porous Breakwater by Solitary Wave”, Korean Society of Civil Engineers, Regular Conference, pp. 5119-5123.
- [6] Kim, H. M.(2005), “Numerical Solution of Laminar Flow over Square Cylinder in a Channel and Evaluation of LBM Simulation Results”, Journal of computational fluids engineering, Vol. 10(2), pp. 30-37.
- [7] Park, Y. G. and C. M. Son(2010), “A Numerical Study on Flow Characteristics Around Rectangular Cylinder with Different Width-to-height Ratios”, Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 22(8), pp. 523-529.
- [8] Roshko(1961), “Experimental on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number”, Journal of Fluid Mech., Vol. 10, pp. 345-356.
- [9] Yang, C. H.(2011), “A Study on Tidal Current Energy in the Sea near Wando”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 35, pp. 126-132.

Received : 2014. 10. 06.

Revised : 2014. 11. 12. (1st)

: 2014. 11. 28. (2nd)

Accepted : 2014. 12. 26.