

경사도가 다른 수중 삼각형상구조물 주위의 유동특성

최상범* · 조대환**†

* 목포해양대학교 실습선, ** 목포해양대학교 기관시스템공학부

Flow Characteristics around Underwater Triangular Structure
with Different Inclination

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 수중 삼각형상구조물의 경사도와 레이놀즈 수 변화에 따른 구조물 주위의 유동특성을 분석하였다. 모델링한 삼각형상구조물 주위의 유동장은 회류수조에서 가시화실험과 입자영상유속계(PIV)를 이용하여 계측하였다. 실험결과 경사각이 45°인 삼각형상구조물이 레이놀즈 수 $Re=2.9 \times 10^3$ 에서 구조물 높이의 2.7배까지 상승하는 속도성분이 나타났다. 레이놀즈 수가 일정할 때 경사각이 클수록 구조물 후방에 하강하는 속도성분이 크게 나타났고, $y/hs=1.75$ 이상의 영역에서는 경사각과 레이놀즈 수가 구조물 후방의 유동형태에 변화를 주지 않았다.

핵심용어 : 삼각형상구조물, 경사도, 유동가시화, 입자영상유속계, 회류수조

Abstract : The purpose of this study is to investigate the flow characteristics around underwater triangular structure with various inclination and Reynolds number. A flow fields around the triangular structure model were measured by visualization method and PIV in the circulating water channel. The result of the experiment is where the triangular structure that has a inclination of 45° and the reynolds number at $Re=2.9 \times 10^3$ showed rising velocity component to 2.7 times of the structure height. When the reynolds number is steady and when the inclination is greater the descending velocity component of the structure's rears current form is greatly shown and for the areas where it's more than $y/hs=1.75$ has a change in the angle of inclination but it doesn't give a great effect to it.

Key Words : Triangular structure, inclination, Flow visualization, Particle image velocimetry, Circulating water channel

1. 서 론

최근 연안의 해양환경오염과 공해의 조업 규제 및 조업가 능해역의 축소 등으로 인하여 수산자원의 어획량이 급격히 줄어들고 있다. 이러한 수산자원감소에 대응하고 연안해역의 수산자원 증대를 위해 해양수중구조물에 대한 관심이 높아지고 있으며 이에 관한 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 수산자원회복을 위한 대표적인 해양수중구조물로는 인공어초 및 인공용승 구조물 등이 있으며 이러한 구조물은 어류의 산란장 및 서식지를 제공할 뿐만 아니라 인위적으로

용승류를 발생시켜 영양염이 풍부한 저층의 해수를 표층부 근까지 상승시킴으로써 생물들이 서식하기에 좋은 어장을 형성한다. 용승어장은 전 해양에서 용승해역 면적의 약 0.1%에 불과 하나 용승해역은 어류 생산량은 전체의 약 50%를 차지함으로써 어업생산의 중요한 부분을 차지한다(Ryther, 1969). 이러한 용승현상을 인위적으로 발생하게 하는 것이 인공용승 구조물이며 수중방파제등과 함께 해저에 설치되어 용승류를 만들어 내는 중요한 역할을 한다(Yanagi and Nakajima, 1991). 해양수중구조물에 대한 연구를 살펴보면, Kim and Hwang(2006a)은 수중 구조물의 유동 특성 및 유동 변화에 대한 연구를 통하여 수중 구조물의 기능 및 안정성 검토에 대해 연구하였고, Jeon et al.(2007)은 인공용승구조물의 재질에 따른 기능성에 관해 연구하였다. Kim and Hwang(2006b)

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

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

은 인공용승류의 발생은 구조물의 크기와 작용 유속에 영향을 받지만 성층계수가 3.0이고, 수심(h)에 대한 구조물의 높이(hs)의 비가 0.125~0.15 일 때 구조물 배후에서 안정적인 용승류가 발생한다고 보고하였다.

또한, Cho et al.(2003)은 연근해역에 인공 구조물을 구축하여 구조물 투하 전과 투하 후의 해양환경의 변화에 대해 연구하였으며, 수중 구조물 설치를 통하여 연직유동성분 흐름의 변화가 구조물 투하 전에 비하여 구조물 투하 후에 상승류의 성분이 많이 나타남을 확인하였다(Kim et al., 2009). 인공용승구조물에 대한 연구의 결과로서 인공 용승류를 일으키기 위한 수중구조물의 발명과 특허가 이루어지고 있다. 최근 연구보고에 따르면 수중구조물의 용승효과는 사면을 가진 삼각형상의 구조물이 가장 우수하다고 알려진 바 있으며(Kim, 2006), 인공용승구조물의 최적단면 설계 및 용승효과 실험에 대한 연구가 진행되었다(Jeon et al., 2007). Han and Cho(2008)는 해산형태의 삼각형상 구조물을 대상으로 용승효과를 알아보았으며 그 결과 구조물 높이와 수심과의 관계에 따른 용승효과는 hs/h 가 약 0.5에서 가장 높다고 하였다. 이상과 같은 연구에서는 수중구조물의 형태와 구조물 높이 및 수심과의 관계에 대한 연구가 주를 이루고 있으며 PIV(Particle Image Velocimetry)를 이용한 삼각형상 구조물의 경사각이 유동에 미치는 영향에 대한 연구는 미흡하다.

따라서 본 연구에서는 용승효과가 가장 우수하다고 알려진 삼각형상구조물을 모델링하여 PIV계측을 통해 유동장을 가시화하고, 삼각형상구조물의 경사도와 레이놀즈 수의 변화에 따른 구조물주위의 유동장 특성을 비교하여 관련 분야의 기초적인 자료제공을 목적으로 한다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 방법

실험에 사용된 회류수조는 1000×300×300(mm) 크기의 직사각형이며 균일한 유입속도를 얻기 위하여 전방에 정류관과 다공판을 설치하였다. 유동장의 유입유속은 축류모터의 회전수에 의해서 결정되며, 실험유체는 11°C의 수도수를 사용하였다. 유동장 가시화를 위한 PIV는 유동장 분석을 위해 사용된 입자의 이동을 미소시간의 간격을 두고 얻어진 영상을 이용하여 속도벡터에 대한 데이터를 컴퓨터를 이용하여 분석하는 방법이다. 따라서 입자의 추종특성이 결과의 신뢰성을 좌우하므로 입자가 작동유체와 가능한 밀도차가 작은 것을 사용하여 침강 또는 부력의 영향을 최소화 하여야 한다. 이 실험에서 사용된 고체 트레이서 입자는 비중이 대략 1.02 전후이며, 거름망을 이용하여 평균직경이 110 μ m 전후의 추종성과 산란성이 우수한 백색의 PVC(Poly Vinyl Chloride) 구

형 입자를 사용하였다.

Fig. 1은 PIV 실험장치의 개략도로써 가시화 실험을 위한 레이저 시트(Laser sheet), 영상촬영장치인 고속카메라(High Speed Camera), 영상처리프로그램(CACTUS 3.1)과 제어 및 계산용 컴퓨터(Host computer) 등으로 구성된다. 레이저로부터 원통형 렌즈를 통해 2차원의 단면광을 생성하여 계측 유동장을 가시화 하고, 가시화된 영상을 고속카메라를 이용하여 프레임 속도 125 fps로 연속적으로 촬영한다. 촬영된 영상은 이미지를 0에서 255단계의 Gray레벨로 전송하는 Fastcam-X 1280 PCI를 통해 1280×1024 pixel로 컴퓨터에 저장된다. 그리고 영상처리프로그램을 이용하여 해석하였으며 다양한 후처리 및 재현성의 확보를 위하여 외부 저장장치에 영상을 기록할 수 있다. 가시화 실험 및 PIV 계측에 따른 실험조건은 Table 1과 같다.

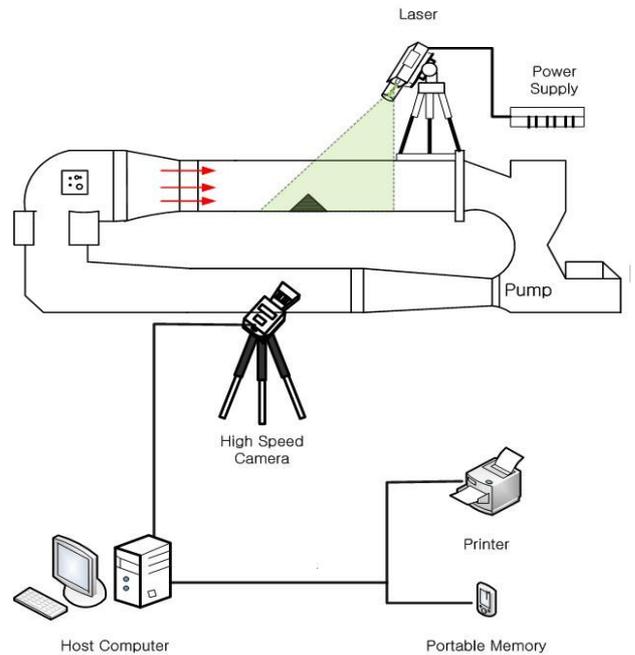


Fig. 1. Experimental setup for PIV.

Table 1. Experimental condition for PIV system

Item	Specification
Light source	SLOC Lasers (GL532H-5000mW)
Sheet light	Cylindrical lens(with : 2mm)
Working fluid	Fresh Water (11±1°C)
Particle	PVC (SG : 1.02, \varnothing 110 μ m)
Time resolution	125fps
Image recording	FASTCAM-X 1280 PCI

2.2 실험조건

Fig. 2는 실험에 사용된 삼각형상구조물 및 계측영역을 나타낸 것으로 경사각이 다른 세 가지 삼각형상구조물에 대해 두 가지 유속을 적용하여 실험을 하였다. 실험을 위해 제작된 세 가지 모양의 삼각형상 구조물은 밑변에 대한 경사각이 45°, 52.5°, 60°인 이등변삼각형으로 높이(hs)는 60 mm로 동일하다. 구조물에는 레이저 광의 반사를 막기 위해 검은색으로 무광택 코팅을 하였다. 실험에 적용한 유속은 0.049 m/sec와 0.094 m/sec이며 삼각형상구조물의 높이(hs)를 대표길이로 잡아 환산한 레이놀즈 수(Re)는 $Re=2.9 \times 10^3$ 과 $Re=5.6 \times 10^3$ 이다. 용승효과는 저층수가 표층을 향하여 상승하는 것을 말하기 때문에 실험유체의 구조물 상부영역과 후방의 유동특성을 규명해야 한다. 따라서 본 실험에서는 계측영역을 수중구조물의 높이(hs)를 기준으로 하여 구조물 상부 방향으로 2.75 hs, 구조물 배후 방향으로 4 hs로 설정하였으며, 계측영역을 중심으로 경사면의 각과 유속의 변화에 따른 속도분포 변화와 구조물주위의 유동특성을 분석하는데 주안점을 두었다.

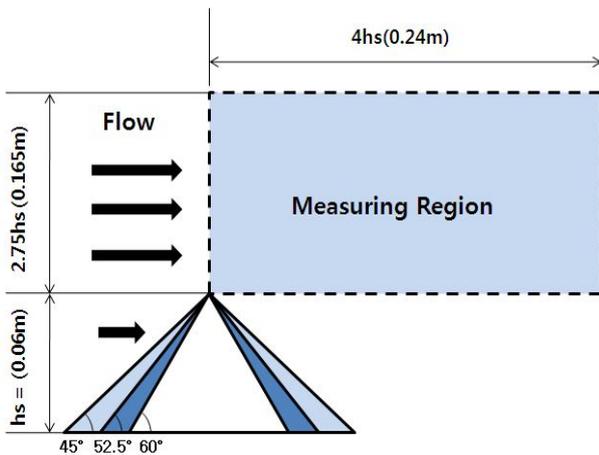


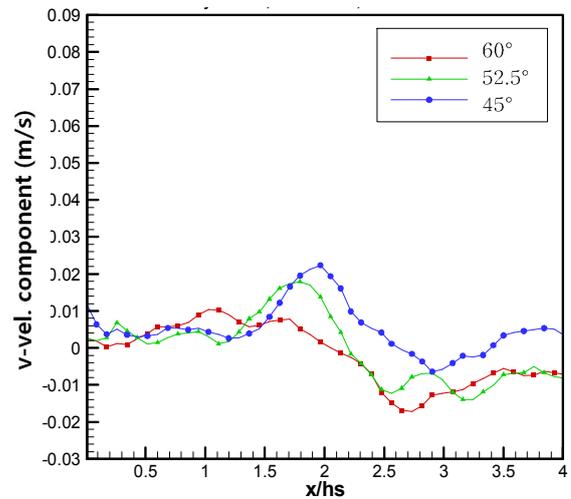
Fig. 2. Dimension & measuring region.

3. 실험결과 및 고찰

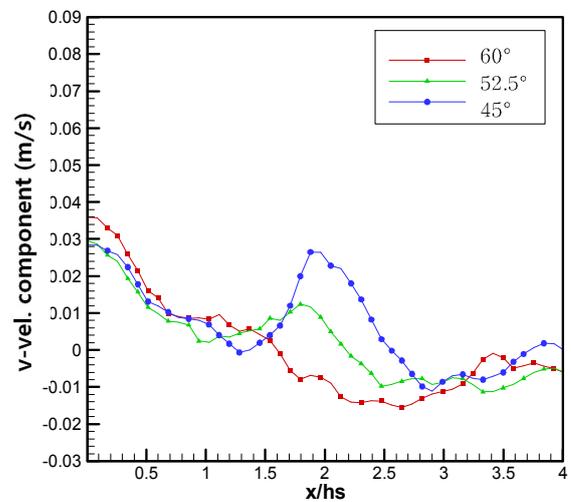
Fig. 3은 레이놀즈 수 $Re=2.9 \times 10^3$ 일 때 삼각형상구조물의 높이를 기준으로 거리를 무차원화하여 높이 변화에 따른 수직방향 속도성분을 나타낸 것이다. Fig. 3을 전체적으로 볼 때 $x/hs=1.5$ 까지 세 가지 조건 모두 비슷한 경향의 상승하는 속도성분을 나타냈다. 특히 경사각이 45°인 경우는 $x/hs=2.5$ 까지 수직방향의 속도성분이 양의 값을 보였으며, $x/hs=1.5 \sim 2.0$ 인 구간에서는 다른 구조물에 비해 상승속도성분이 크게 증가하는 경향을 보였다. 또한, $x/hs=2.7$ 까지 다른 조건에 비하여 큰 수직방향의 속도 값을 보였다. 따라서 경

사각이 45°인 삼각형상이 다른 조건에 비해 구조물 높이의 2.7배까지의 영역에서 가장 좋은 용승효과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

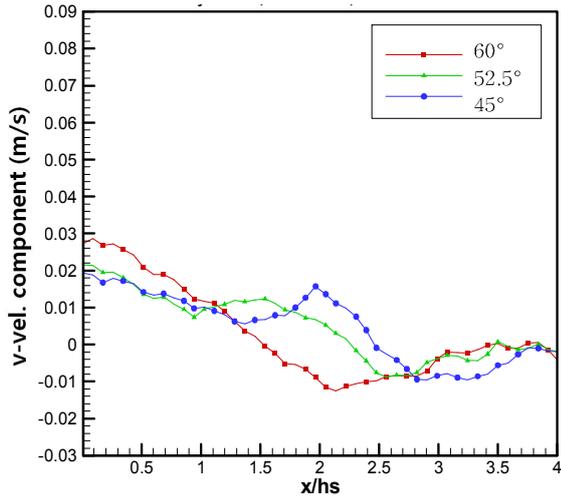
Fig. 3(a)는 $y/hs=1.0$ 에서 $x/hs=4.0$ 까지의 수평선상에서 수직속도성분을 나타낸 것으로, 세 가지 삼각형상 구조물의 수직속도 성분의 변화는 전체적으로 비슷한 경향을 보이고 있으나, 경사각이 45°인 경우는 약 $x/hs=1.8$ 과 $x/hs=2.0$ 사이에서 가장 높은 상승속도 성분을 보였다. 경사각이 60°와 52.5°는 약 $x/hs=2.2$ 부근에서 수직속도성분이 음의 값으로 바뀌었으며 45°인 경우는 $x/hs=0 \sim 1.5$ 위치까지는 각 구조물의 수직속도성분은 비슷한 분포를 보이고 있으나, $x/hs=2.7$ 지점 이후에 음의 값을 나타내고, 이후 $x/hs=4.0$ 까지 수직속도성분이 타 구조물에 비해 비교적 높은 값을 나타냈다.



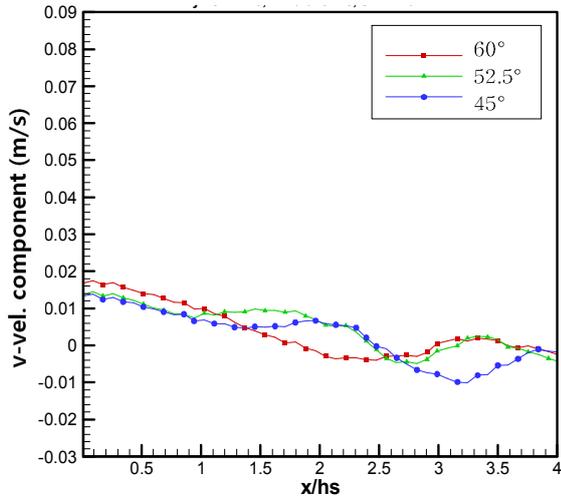
(a) $y/hs=1.0$



(b) $y/hs=1.25$



(c) $y/hs=1.5$



(d) $y/hs=1.75$

Fig. 3. Vertical velocity component at $Re=2.9 \times 10^3$.

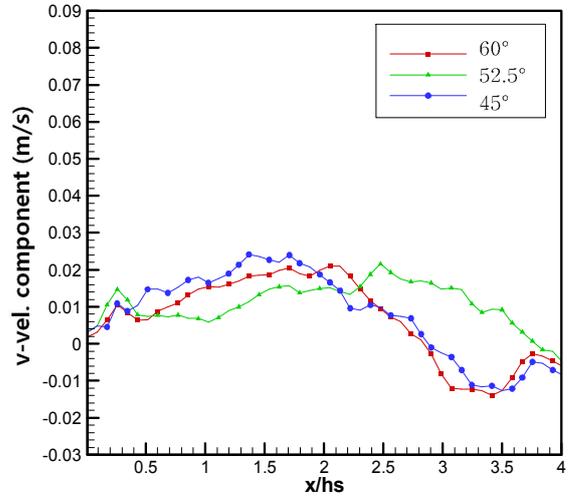
Fig. 3(b)의 경우는 $y/hs=1.25$ 에서의 수직속도성분을 나타낸 것으로, Fig. 3(a)와 비슷한 추세를 보이고 있으나, 상승속도 성분이 Fig. 3(a)에서 보다 크게 나타났다. 이것은 삼각형상 구조물의 경사면을 따라 형성된 상승유동과 전면에서 유입되는 유동이 만나서 나타난 결과이며, 구조물 후류에 형성되는 볼텍스(Vortex)의 중심이 $y/hs=1.25$ 부분에 위치해 있어 볼텍스 좌측에 상승하는 성분과 합쳐졌기 때문이며, Fig. 5를 통해 확인 할 수 있다. 평균적으로 경사각이 45° 인 구조물의 수직속도 성분이 높게 나타났으며, $x/hs=1.5$ 부근을 기점으로 $x/hs=3.0$ 까지 45° 인 구조물의 수직속도가 가장 높게 나타났으며, 60° 인 구조물이 가장 작은 값을 보였다.

Fig. 3(c)는 Fig. 3(a), (b)와 비슷한 추세를 보이나 수직속도 성분의 범위 차가 줄어들었다. 경사각이 45° 인 경우 $x/hs=2.5$

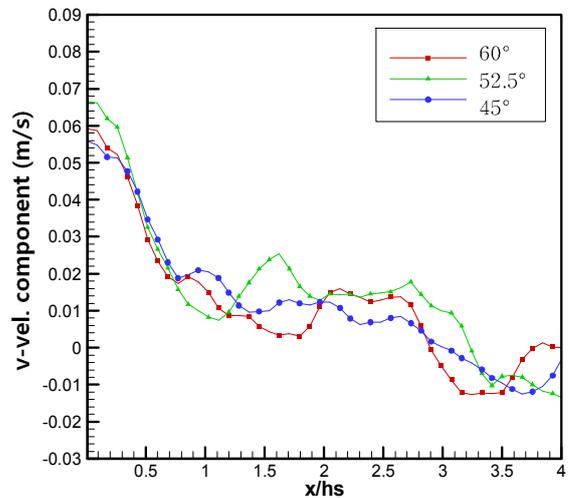
까지 상승하는 수직속도분포를 보였으며, 특히 $x/hs=1.8 \sim 2.5$ 에서 타 구조물 보다 큰 수직속도성분을 나타냈다. 그 이후 영역에서는 구조물과 같이 후방으로 갈수록 수직속도성분이 0에 수렴하는 모습을 보였다.

Fig. 3(d)의 $y/hs=1.75$ 인 경우는 세 삼각형상구조물의 수직속도성분이 큰 차이 없이 비슷한 경향을 보였다. 그 이유는 경계층이 $y/hs=1.75$ 의 영역에 존재하기 때문에 그 이상의 영역에서는 볼텍스로 인해 발생하는 수직속도성분이 경계층의 상부 영역까지 영향을 주지 못하기 때문으로 보인다. 상부영역으로 갈수록 상하 수직성분의 속도분포가 작게 나타나므로 $y/hs=1.75$ 이상의 영역에서는 구조물의 영향에 의한 상승류가 효과적으로 나타나지 않을 것으로 보인다.

Fig. 4는 레이놀즈 수 $Re=5.6 \times 10^3$ 일 때 높이 $y/hs=1.0$, $y/hs=1.25$, $y/hs=1.5$ 및 $y/hs=1.75$ 에서 수직속도성분을 비교하여 나타낸 것이다.

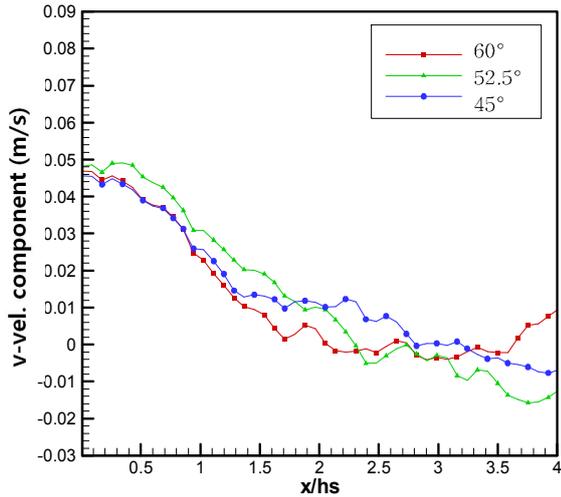


(a) $y/hs=1.0$

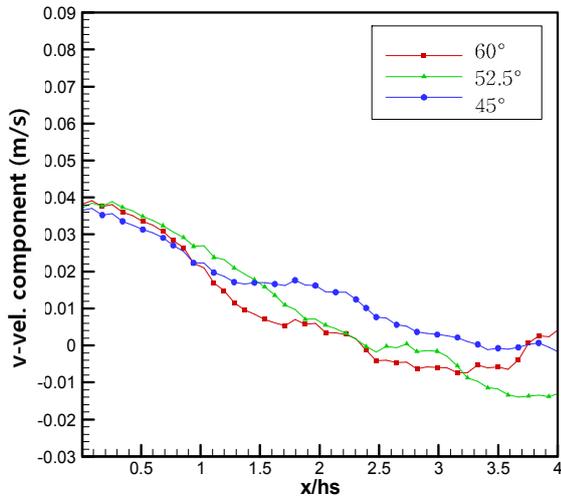


(b) $y/hs=1.25$

경사도가 다른 수중 삼각형상구조물 주위의 유동특성



(c) $y/hs=1.5$



(d) $y/hs=1.75$

Fig. 4. Vertical velocity component at $Re=5.6 \times 10^3$.

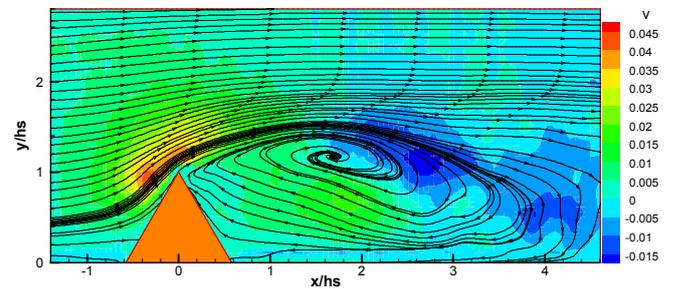
Fig. 4(a)의 $y/hs=1.0$ 인 경우는 $x/hs=2.8$ 까지 각 조건별로 모두 상승하는 속도성분을 보였다. 그러나 그 이후 영역에서는 경사 경사각이 60° 와 45° 인 경우는 하강하는 속도성분을 보였다. 이것은 60° 와 45° 인 경우는 구조물 후방에 재순환에 의해 생성된 볼텍스의 위치가 $x/hs=2.8$ 에 발달된 반면, 52.5° 의 경우는 뚜렷한 볼텍스가 형성되지 못하여 나타난 결과로 보인다.

Fig. 4(b)의 경우는 $y/hs=1.25$ 위치에서의 값을 비교한 것으로 Fig. 4(a)의 경우와 비슷한 위치인 $x/hs=2.8$ 에서 60° 와 45° 인 경우가 하강하는 속도성분을 나타냈으며, 각 조건별로 수직속도성분이 비슷하게 주기적으로 증감하는 전형적인 구조물 후방의 유동형태를 보였다. Fig. 4(c)의 경우는 $x/hs=0 \sim 1.7$ 에서 경사각이 52.5° 인 구조물의 수직속도성분이 크게 나타났으며 이후 영역에서는 주기성을 보이며 하강하는 속

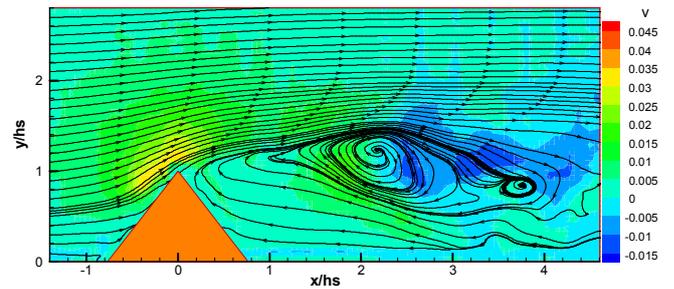
도성분을 보였다. 60° 의 경우는 $x/hs=3.5$ 이후에서 상승하는 속도성분이 나타났으며 이것은 2차 볼텍스가 생성되어 나타난 것으로 보인다.

Fig. 4(d)는 $y/hs=1.75$ 에서 경사각의 변화에 따른 수직속도성분을 비교한 것으로 레이놀즈 수가 $Re=2.9 \times 10^3$ 인 경우와 유사하게 조건별로 큰 차이가 없는 유동형태를 보였다. 따라서 삼각형상 구조물의 $y/hs=1.75$ 이상에서는 경사각과 유속의 변화가 구조물 후방의 유동형태에 큰 영향을 주지 않는 것으로 보인다.

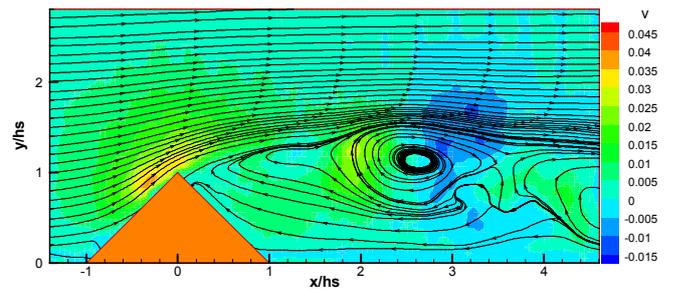
Fig. 5는 레이놀즈 수가 $Re=2.9 \times 10^3$ 일 때 시간평균속도 값을 이용하여 각 구조물의 수직속도성분에 대한 등속도 분포와 유선을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)의 경사각이 60° 일 때 볼텍스의 중심은 약 $x/hs=1.6$ 이고, Fig. 5(b)의 경우는 $x/hs=2.2$, Fig. 5(c)의 경우는 약 $x/hs=2.6$ 의 위치에 볼텍스의 중심이 나타났다.



(a) Inclination 60°



(b) Inclination 52.5°



(c) Inclination 45°

Fig. 5. Streamline & v-vel. component at $Re=2.9 \times 10^3$.

유속이 동일하고 구조물의 높이가 일정할 때 경사각이 작아질수록 볼텍스의 중심이 후방으로 이동하는 것을 알 수 있었다. 볼텍스의 중심을 기점으로 후방에서는 큰 규모의 순환류가 형성되어 수직속도성분이 음의 값을 나타냈으며 경사각이 클수록 그 값은 크게 나타났다. 또한, 볼텍스의 중심 좌측부근에는 순환류에 의해 상승하는 속도장이 형성되어 있음을 보였다. 따라서 삼각형상구조물 형상에 따라 볼텍스의 중심 위치가 변하며 볼텍스의 중심이 구조물로부터 멀어지면 후방에서 새로운 타원형의 와류가 발생되어 후방 영역의 유동패턴에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 삼각형상구조물을 모델링하여 구조물 주위의 유동장을 PIV계측을 통해 유동장을 가시화하고, 삼각형상구조물의 경사도와 레이놀즈 수의 변화에 따른 구조물 주위의 유동장 특성을 비교하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 경사각이 45°인 삼각형상구조물이 레이놀즈 수 $Re=2.9 \times 10^3$ 에서 다른 구조물에 비해 상승하는 속도성분이 가장 높게 나타났다.

(2) $y/hs=1.75$ 이상의 영역에서는 경사각과 유속의 변화가 구조물 후방의 유동형태에 영향을 주지 않았다.

(3) 레이놀즈 수가 증가함에 따라 각 구조물 후방에 상승 속도 성분도 증가하였다.

(4) 레이놀즈수가 동일할 때 경사각이 작아질수록 볼텍스의 중심이 후방으로 이동하였고, 경사각이 클수록 구조물 후방에 하강하는 속도성분이 크게 나타났다.

향후 세분화된 유속과 경사각에 대해 다양한 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

Engineering and Technology Vol. 21, No. 4, pp. 21-27.

- [4] Kim, D. S. and S. B. Hwang(2006a), The Variation of Current by the Building of Artificial Upwelling Structure (I), Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 12, No. 4, pp. 301-306.
- [5] Kim, D. S. and S. B. Hwang(2006b), "Characteristics of Oceanographic Environment in a Sea Area for the Building of Artificial Upwelling Structure", Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 12, No. 1, pp. 1-8.
- [6] Kim, S. H., S. W. Bae and D. S. Kim(2009), "Numerical Experiments for Upwelling Phenomenon Caused by Artificial Seamount", Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 36, No. 2, pp. 37-41.
- [7] Kim, W. G.(2006), A Study on Characteristics of the Three-Dimensional Flow around Submerged Structures, Graduate School Pukyong University, p. 54.
- [8] Ryther, J. H.(1969), Photosynthesis and Fish Production in the Sea, The production of organic matter and its conversation to higher forms of life vary throughout the world ocean, Science 166, pp. 72-76.
- [9] Yanagi, T. and M. Nakajima(1991), "Change of oceanic condition by the man-made structure for upwelling", Marine pollution bulletin, Macmillan Journals, 23, pp. 131-135.

원고접수일 : 2014년 02월 19일

원고수정일 : 2014년 04월 11일

게재확정일 : 2014년 04월 25일

References

- [1] Cho, K. D., D. S. Kim and S. E. Park(2003), "Characteristics of Oceanographic Conditions in an Area Suitable for the Construction of Artificial Upwelling", Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 36, No. 2, pp. 187-192.
- [2] Han, W. H. and D. H. Cho(2008), "A Study on the Flow Characteristics around Underwater Triangular Structure", Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 14, No. 1, pp. 21-27.
- [3] Jeon, Y. H, G. S. Lee, Y. K Yoon and C. R. Ryu(2007), "An Experimental Study for the Falling Test and Upwelling Effect of the Artificial Upwelling Structur", Journal of Ocean