

삼각형상 수중구조물 주위의 유동특성에 관한 연구

한원희* · 조대환**

*, ** 목포해양대학교 기관시스템공학부

A Study on the Flow Characteristics around Underwater Triangular Structure

Won-Hui Han* · Dae-Hwan Cho**

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

요 약 : 삼각형상 구조물은 바다에서 풍요로운 어장을 만들기 위해 용승류를 발생시키기 위한 인공용승구조물의 기본적인 형태로 이용되고 있다. 인공용승류는 많은 양의 영양염류를 포함하고 있는 저층의 바닷물을 해저로부터 표층으로 끌어 올리는 작용을 한다. 이 연구의 목적은 여러 가지 성층계수에 따른 삼각형상 수중구조물 주위의 유동특성을 규명하는 것이다. 회류수조 내에서 삼각형상 구조물 모델을 대상으로 유동특성을 조사하기 위하여 유동가시화 방법을 이용한 실험적 연구를 수행하였고, 입자영상유속계(PIV)를 이용하여 수중구조물 주위의 유동장을 측정하였다. 실험결과 구조물 후상부 영역에서의 용승효과는 수심이 구조물 높이의 2배이고, 성층계수가 약 3.0일 때 가장 좋은 결과가 나타났다. 이러한 정량적인 데이터는 인공용승구조물의 기능적 효율을 결정하는 데에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 삼각형상구조물, 용승효과, 성층계수, 유동가시화, 입자영상유속계

Abstract : Triangular structure is used as basic shape of artificial structures for generating the upwelling current in order to make rich fishing ground at sea. Artificial upwelling current could bring the deep sea water containing a lot of nutrients from the bottom up to the surface. The purpose of this study is to examine the flow characteristics around underwater triangular structure with various stratification parameter. An experimental study was carried out for the triangular structure model in the circulating water channel to investigate flow characteristics by flow visualization method. A velocity fields around the underwater structure were measured by particle image velocimetry(PIV). The experimental results showed that the upwelling effect at the back and upper region of the structure could be best when the water depth was 2 times of the structure height and the stratification parameter was approximately 3.0. These quantitative data will be useful to determine the functional efficiency of artificial upwelling structures.

Key Words : Triangular structure, Upwelling effect, Stratification parameter, Flow visualization, Particle image velocimetry

1. 서론

수중구조물 설치로 인한 구조물 주위의 유동 변화에 대한 연구는 수중구조물의 기능적인 측면과 더불어 안정성 등을 검토할 수 있는 자료로 사용이 가능하기 때문에 다양한 연구결과가 보고되고 있다(김과 황, 2006; 류, 1995; Nagamatsu et al., 2005). 수중구조물은 해저에 설치되어 국지적으로 해수의 유체력에 변화를 줄 수 있기 때문에, 수중방파제(조, 2003) 등과 더

불어 인공적으로 용승류를 만들어 내는 인공용승구조물로서 이용이 가능하다(박, 2004; Yanagi and Nakajima, 1991). 특히, 각 나라에서는 배타적 경제수역 선포와 발맞추어 자국의 연안역 개발에 총력을 기울이고 있는 실정으로 수중구조물에 대한 중요성이 날로 부각되고 있다(류 등, 2006; 홍 등, 2007).

일반적으로 용승(upwelling)이란 바다 밑바닥에 있는 저층수가 표층으로 상승하는 흐름을 말하는 것으로 표층에서 바람 또는 해류 등에 의해 해수의 이동이 발생하였을 때 이를 채워주기 위한 흐름이 자연스럽게 발생하는 것을 의미한다. 이러한 용승류는 영양염이 풍부한 저층의 해수를 표층까지 상승시킴으로써 풍요로운 어장형성에 영향을 미

* 대표저자 : 종신회원, winhan@mmu.ac.kr, 061-240-7224

** 종신회원 : dhcho@mmu.ac.kr, 061-240-7217

치고 있다고 알려져 있다(Ryther, 1969). 수중에 설치되는 인공용승구조물은 이러한 용승흐름을 인위적으로 만들어 내기 위한 구조물로서 최근 친환경적인 어장 조성에 대한 관심과 더불어 여러 가지 연구가 시도되고 있는 실정이다(김과 황, 2006; 류 등, 2006).

이 연구에서는 인공용승구조물로 사용되는 여러 가지 형상의 수중구조물 모델 중 해산(seamount)과 같은 형태를 가지고 있는 삼각형상 구조물을 대상으로 구조물 주위의 유동특성을 알아보았다. 인공용승구조물의 형태는 여러 가지가 제안되고, 개발되었으나(한국등록실용신안, 2004; Nagamatsu, 2003; United States Patent, 1993) 최근 연구보고에 따르면 수중구조물의 용승효과는 사면을 가진 삼각형상의 구조물이 가장 우수하다고 알려진 바 있다(김, 2006).

유체 및 구조물 주위의 유동장을 고찰하기 위한 방법으로는 2차원 및 3차원 수치실험을 통하여 검증하는 전산유체역학적인 방법과 유체역학적인 상사법칙을 적용하여 실험 또는 축소된 모델을 제작하고 모델을 대상으로 실제 유체의 흐름을 고찰하는 방법이 있다. 앞서 살펴본 바와 같이 수중용승구조물에 대한 연구에서는 지금까지 수리해석에 의한 구조물 주위의 유동장을 고찰하는 방법이 주로 사용되었다. 이 연구에서는 유동장의 특성을 구명하여 수중구조물 설치에 따른 용승효과를 알아보기 위한 방법으로 가시화 실험을 수행하였고, 가시화 실험으로 얻어진 결과는 동시다점계측의 장점을 갖고 있는 PIV(particle image velocimetry) 기법(Adrian, 1991)에 의해 속도성분을 구하여 정량적인 데이터를 확보하였다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 방법

가시화 실험은 유체기계나 기기의 설계 또는 성능향상을 위해서 기본적인 고찰이 되는 유동장의 거동을 파악하기 위한 목적으로 실행하는 것으로, 대상유동장에 추적입자를 넣고 적절한 조명을 가하여 얻어진 영상을 이용하여 순시 또는 시간평균의 유동장에 대해 유체역학적인 특성을 고찰하는 방법이다.

Fig. 1은 실험에 사용된 회류수조로서 길이, 폭 및 높이가 1.0m×0.3m×0.3m이다. 실험유체는 10°C의 수도수를 사용하였다. 가시화 실험을 위한 광원으로서 수냉식 5W 출력의 아르곤-이온 레이저(argon-ion laser)를 사용하였다. 레이저광은 원형의 직진광이므로 광 화이버 케이블(fiber optic cable) 및 원통형 렌즈(cylindrical lens)를 통과시켜 두께 1.5mm전후의 시이트라이트(sheet light)를 계측단면에 직접 조사하였다. 유동장내에서 유체입자의 거동을 가시화하기 위해서는 추종성이 우수한 구형입자를 선택하여야 하는데, 이 실험에서는 비중이 약 1.02이고 직경이 100 μ m~150 μ m인 PVC 재질의 백색 구형입자를 추적입자로 사용하였다. 가시화된 유동장은 고속카메라(high speed camera)를 이용하여 프레임 속도 125pps로 연속적으로 촬영되어 저장된다.

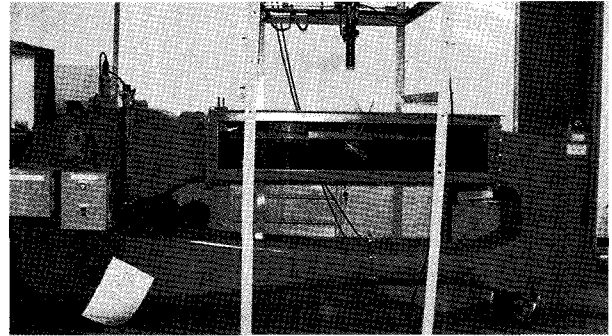


Fig. 1. Circulation water channel.

Fig. 2는 전체적인 실험장치의 배치를 보여주고 있다. PIV에 의한 영상처리시스템은 크게 광원인 레이저, 영상촬영장치인 고속카메라, 제어 및 계산용 컴퓨터(host computer)와 처리프로그램(CACTUS) 등으로 구성되어 있으며, 다양한 후처리 및 재현성의 확보를 위하여 외부 저장장치에 영상을 기록 할 수 있다. Table 1은 가시화 실험 및 PIV 계측에 따른 실험조건을 보여주고 있다.

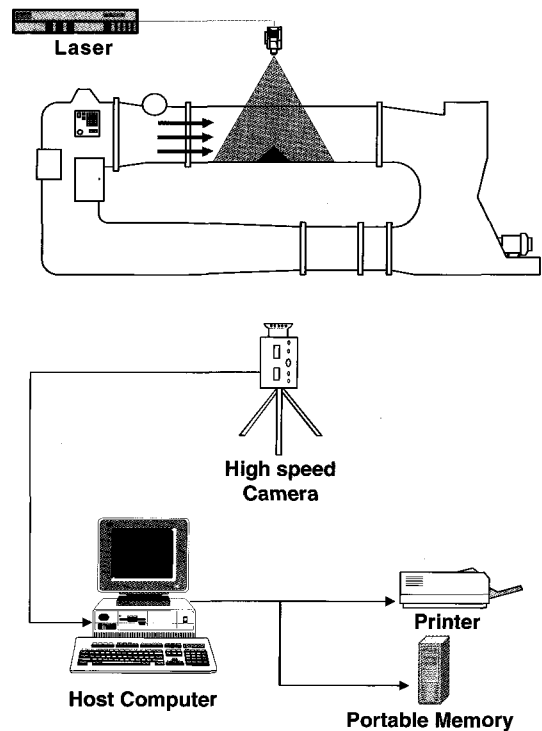


Fig. 2. Experimental setup for PIV.

Table 1. Measuring condition for PIV

| | Item | Specification |
|---------------------|--------------------------|---|
| Visualization | Image board | Fastcam-x1280pci, 16k |
| | Light source | 5W Argon-Ion laser |
| | Sheet light | Cylindrical lens(W: 1.5mm) |
| Measuring condition | Working fluid | Water (10°C) |
| | Particle | PVC(gravity : 1.02, diameter: 100~150 μ m) |
| | Time resolution | 1/125 sec |
| Image processing | Time | 0.5 sec/frame |
| | Mean data | 500 Frames |
| | Identification | 2-frame grey-level cross correlation (CACTUS) Calculation grid: 70 \times 38 |
| | Ratio of error vector(%) | under 1% / frame average : about 0.5% |

2.2 실험조건 및 계측영역

실험에 사용된 삼각형상 구조물은 꼭지점각 90°를 가진 이등변삼각형의 형태로, 높이(h_s) 0.05m, 길이 0.29m, 밑변 0.1m이며, 가시화 실험시 빛의 반사를 막고 관찰을 용이하게 하기 위해서 겉면을 검은색으로 코팅처리 하였다. 회류수조의 수심(h)은 0.2m로 고정하여 실험을 수행하였기 때문에 구조물의 높이와 수심과의 비(h_s/h)는 0.25이다. 한편, 수중구조물의 높이와 수심비에 따른 용승효과는 김 등(2002)은 0.125~0.15, 박(2004)은 0.7(70%) 그리고 전 등(2007)은 0.3 부근에서 가장 효과적인 용승류가 발생한다고 보고된 바 있다.

인공용승류를 만들어 내기 위해서는 흐름을 구성할 수 있을 만큼의 효과적인 유속이 필요하며, 성층(stratification)의 형성 유무와도 관련되어 있다. 해역의 성층상태는 수심을 h , 바닥물의 수평유속을 V 라고 한다면 일반적으로 성층계수(stratification parameter)라고 표현되는 다음의 (1)식으로 나타낼 수 있다(Simpson and Hunter, 1974).

$$\log\left(\frac{h}{V^3}\right) \quad (1)$$

수식에서 보는 바와 같이 성층계수는 연직수심에 대한 유속의 비로서 성층계수가 2.5~3.0에서 가장 좋은 용승효과가 나타난다고 보고되고 있다(Simpson and Hunter, 1974; 김 등, 2002; 전 등, 2007).

이 연구에서는 유속을 0.04, 0.05, 0.06 그리고 0.2 m/s 네 가지 경우를 대상으로 실험하였고 수심과 수평유속과의 상관관계를 나타내는 성층계수는 각 유속에 따라 3.49, 3.20, 2.97 그리

고 1.40로 계산되었다. 구조물의 높이 0.05m를 대표길이로 하여 산출한 레이놀즈 수는 각 유속에서 2.0×10^3 , 2.5×10^3 , 3.0×10^3 그리고 1.0×10^4 으로 산출되었다. Table 2에 유속 및 성층계수에 따른 실험조건을 나타내었다.

Fig. 3은 삼각형상 구조물의 규격과 계측영역을 나타내고 있다. 용승효과는 저층의 해수가 표층부근으로 상승하는 효과를 말하는 것이기 때문에 구조물 상부의 유동특성을 규명하는 것이 중요하다. 또한 구조물을 중심으로 배후면에 나타나는 유동을 고찰함으로써 수중구조물로 인해 야기되는 후류역에서의 와류 패턴을 알아내어 인공용승구조물의 효과를 검증 할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 수중구조물의 높이(h_s)를 기준으로 하여 구조물 상부 방향으로 $3h_s$, 구조물 배후 방향으로 $4h_s$ 를 계측영역으로 설정하였고, 계측영역을 중심으로 재순환영역의 크기 및 상승속도 분포의 변화에 주안점을 두고 실험하였다.

Table 2. Experimental condition with stratification parameter

| Flow velocity (m/s) | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.2 |
|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Item | | | | |
| Stratification parameter | 3.49 | 3.20 | 2.97 | 1.40 |
| Reynolds number | 2.0×10^3 | 2.5×10^3 | 3.0×10^3 | 1.0×10^4 |

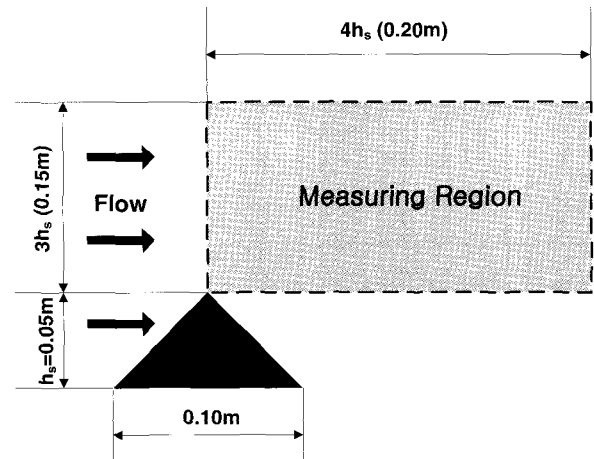


Fig. 3. Dimension and measuring region.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 구조물 상부 및 후류역에서의 유동특성

Fig. 4는 성층계수(SP) 2.97의 경우 순간속도장을 나타낸 것으로 삼각형상 후방의 와류의 형태와 계측영역의 전체 속도분포를 볼 수 있다. 유입평균유속을 기준으로 구조물 상부에서는 약 1.1배에서 1.67배 높은 속도분포를 나타내고, 후방에서는 50%전후의 낮은 속도분포가 형성되고 있다. 이것은 삼각형상 구조물에 의해 유로가 제한된 흐름이 상부에서 형성되고, 구조

물 후방에서는 큰 규모의 재순환류가 형성되어 나타난 흐름의 영향으로 판단된다. 등고선상에 표시된 것은 실제속도로서 단위는 m/s 이며 전체 유동장에 구조물 최상부인 꼭지점 ($x, y=0,0$)으로부터 등간격으로 1,025개의 속도벡터를 나타내었다. 그림에서 좌측 중앙부근에 상승하는 속도장이 형성되어있으며 이러한 유동특성은 $y/h_s=2.0$ 이상에서 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 구조물 후방 $x/h_s=2, y/h_s=0.6$ 근방을 중심으로 타원형의 재순환류가 형성되어 있으며 이 영향으로 $x/h_s=3$ 부터 $x/h_s=4$ 의 영역에서는 하강류가 보이고 있다.

Fig. 5는 성층계수 2.97인 경우에 시간평균 속도값을 이용하여 스트림라인을 나타낸 것이다. 그림의 중앙 하부에 나타난 와의 중심은 $x/h_s=1.92, y/h_s=0.56$ 에 위치하고 있고, 와의 직경은 $x/h_s=1.08$ 이다.

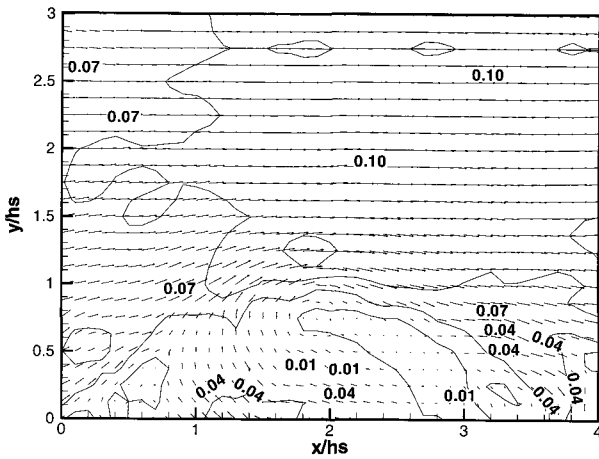


Fig. 4. Velocity contour and vector distribution at SP=2.97.

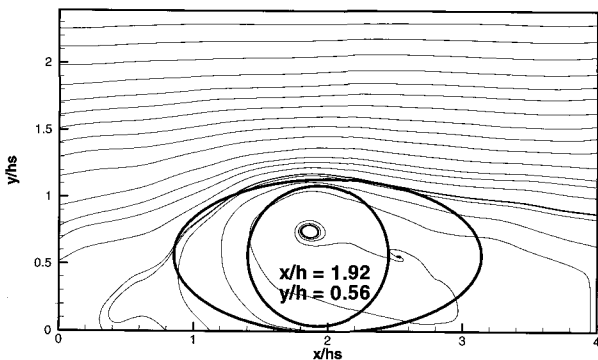


Fig. 5. Streamline at SP=2.97.

3.2 성층계수 및 수심에 따른 용승효과

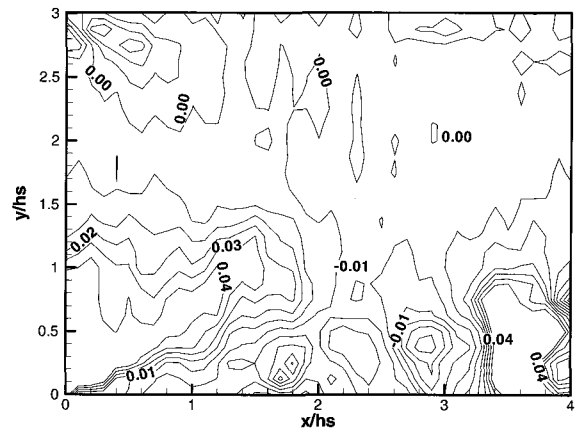
Fig. 6은 실험조건에서 설정한 4가지 레이놀즈수에 대하여 계측한 순간 속도 벡터를 산술 평균하여 그 결과를 수직속도성분의 등고선으로 나타낸 것이다.

레이놀즈수가 가장 큰 1.0×10^4 이고 성층계수가 1.40인 (a)의

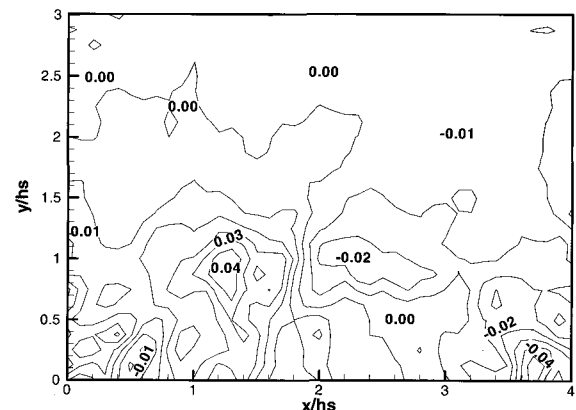
경우를 살펴보면 $x/h_s=2$ 를 중심으로 상승류와 하강류가 전환되고 있다. 또 x/h_s 가 0인 지점으로부터 1.3부근과 후방의 3.4에서 3.8 부근에서 가장 높은 속도 분포를 보이고 있다. 이것은 구조물 사면을 따라 형성된 상승흐름이 구조물 상부로 약 $0.8 \sim 1h_s$ 영역에서 강한 수직속도 분포로 나타난 것이며, 계측영역의 최후방에서 나타난 높은 수직속도성분은 후류역에서 나타난 재순환류가 상승하며 흘러가는 형태의 유동패턴을 보이고 있기 때문이다.

레이놀즈수가 3.0×10^3 이고 성층계수가 2.97인 그림(b)의 경우에도 $x/h_s=2$ 를 기준으로 하여 후방에 재순환류 영역이 나타나고 있으며, y/h_s 가 약 1인 부근에서 가장 높은 0.04 m/s의 수직속도분포가 형성되고 있음을 알 수 있다.

성층계수가 3.2인 그림(c)경우와 성층계수가 3.49인 그림(d)의 경우에는 수직방향의 속도분포가 상대적으로 미약하게 나타나고 있으며 상승류와 하강류가 전환되는 영역도 x/h_s 가 3보다 후방인 영역에서 나타나고 있다. 또한 구조물 상부의 전영역에 걸쳐서도 수직속도 분포가 잘 나타나지 않고 있다. 이것을 살펴보면 용승에 필요한 만큼의 충분한 유속이 형성되지 않았음을 알 수 있으며, 따라서 성층계수가 3이상에서는 효과적인 용승이 일어나지 않는다는 것을 알 수 있다.



(a) SP=1.40



(b) SP=2.97

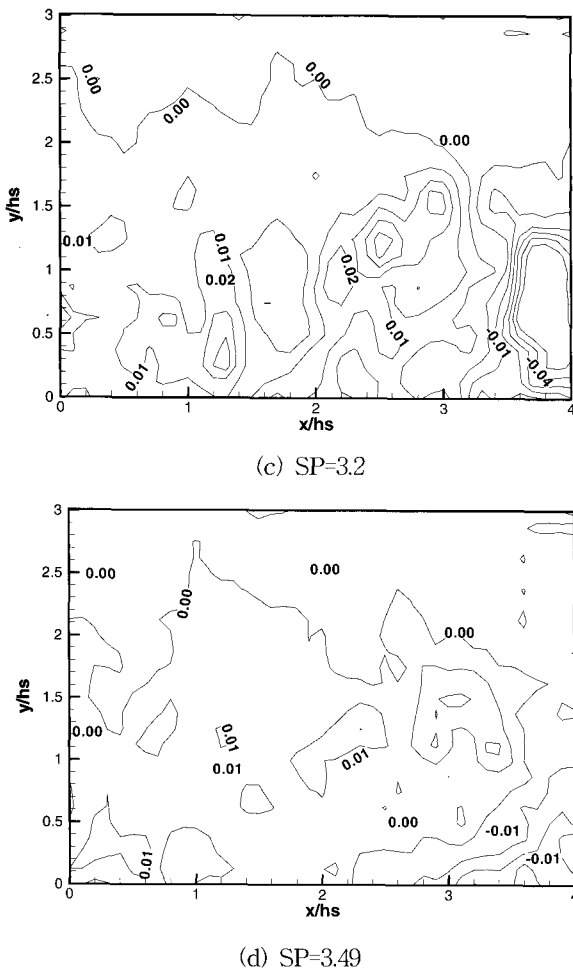


Fig. 6. V-velocity contour with stratification parameter.

Fig. 7은 구조물 배후영역에서 수심에 따른 수직방향으로의 유속을 나타내고 있다. 구조물의 최상부를 기준으로 하여 수직 방향으로 $y/h_s=0.9, 1.2, 1.5, 1.8$ 그리고 2.1 영역에 대한 수직속도분포를 전 계측영역에서 측정하여 그래프로 도시한 것이다.

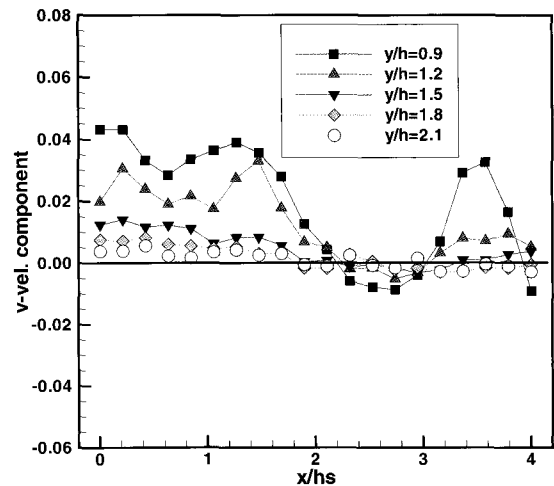
그림 (a),(b),(c) 및 (d)를 전체적으로 살펴볼 때 성층계수가 2.97인 (b)의 경우에 $y/h_s=0.9$ 인 영역에서 수직방향의 상승속도 크기가 약 0.05로 나타나 가장 좋은 상승효과를 보여주고 있다. 즉, 수심(h)이 구조물높이(h_s)의 약 2배인 영역에서 가장 좋은 상승효과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

유동장의 레이놀즈수가 가장 큰 값인 1.0×10^4 를 가지는 (a)의 경우를 살펴보면 $x/h_s=2$ 근처까지는 상승류의 흐름이 나타나다가 $x/h_s=2$ 이상의 구역에서 하강류를 보이고 있다. 또 구조물 최상부와 가장 가까운 영역인 $y/h_s=0.9$ 에서 가장 큰 상승값인 0.45를 나타내고 있으며, 전체적인 계측영역에서 수심에 따른 수직속도분포도 동일한 추세를 나타내고 있다. 따라서 상승속도 성분의 분포로 알 수 있는 용승효과는 구조물의 상부에서 가까운 영역에서 가장 잘 나타나는 것으로 판단된다. 후류영역인 $x/h_s=2 \sim 4$ 구간에서는 계측영역의 전반부에 나타난 상승류의 속도분포보다 낮은 하강류의 분포를 보이고 있는데, 이것은 빠른 수평유속의 유입으로 인하여 하강류가 잘 발달되지 못한

상태에서 후방으로 유출되기 때문인 것으로 보여진다. 다만, $y/h_s=0.9$ 이고 $x/h_s=3.4 \sim 3.8$ 영역에서 나타나는 높은 상승류의 흐름은 앞서 고찰 한 바와 같이 후류영역에서 발생한 재순환류가 형성한 유동특성인 것으로 판단된다.

상승속도 분포가 가장 크게 나타나 효과적인 용승흐름을 발생시킨 (b)의 경우에는 앞서 고찰한 (a)의 경우에 비하여 유입 유속과 레이놀즈수는 약 1/3 수준으로 줄어들고, 그에 따른 성층계수는 약 2배로 증가된 상태이다. 그림에서 살펴보면 (a)의 경우와 비슷한 지점인 $y/h_s=0.9, x/h_s=2$ 이하인 영역에서 상승류의 흐름이 형성되고 있다. 하강류가 나타나고 있는 후류영역인 $x/h_s=2 \sim 4$ 구간에서는 앞서 살펴본 (a)의 경우에 비해서 보다 큰 하강류의 흐름을 보이고 있고, 수직방향의 각 영역에서 나타난 상승속도분포와 유사하게 대칭이 된 하강속도분포를 볼 수 있다. 인공용승구조물의 후방에 위치한 재순환류 영역에서는 각종 영양염류 등을 침강시키며 어장의 피난처를 제공하는 역할을 하기 때문에 하강속도분포의 형성은 반드시 고려되어야 할 사항이다. 따라서 성층을 형성시킬 수 있도록 너무 빠르지 않는 유입유속과 용승흐름을 발생시킬 수 있을 만큼의 적당한 유속을 가지고 있는 성층계수 2.97의 경우에서 가장 좋은 용승효과를 기대할 수 있다고 사료된다. 구조물 최상부로부터 수직 방향으로 나뉜 y/h_s 영역에서는 구조물로부터 가장 가까운 영역인 $y/h_s=0.9$ 로부터 멀어질수록, 즉 상부 영역으로 올라갈수록 상승 또는 하강속도분포가 작게 나타나고 있어서 용승효과가 저하됨을 알 수 있다.

성층계수가 3.20인 (c)에서는 재순환류가 나타나는 영역이 $x/h_s=3$ 후방에 존재하고 있으며, 최대수직속도를 나타내는 영역도 $y/h_s=0.9$ 가 아닌 1.2 영역에서 나타나고 있다. 이러한 유동특성은 성층계수가 3.49인 (d)의 경우에도 유사한 결과를 보이고 있는데, 이것은 유동장의 흐름이 상승류를 형성시킬 만큼의 효과적인 유속에 미치지 못한 결과인 것으로 판단된다. 단, (c)의 경우 $x/h_s=3 \sim 4$ 의 구역에서 비교적 큰 하강류가 발생하고 있는데, 이 부분에 대한 추후 연구가 필요하다고 사료된다.



(a) SP=1.4

4. 결론

이 연구에서는 삼각형상 수중구조물을 대상으로 구조물 주위의 유동특성을 알아보기 위하여 가시화 실험을 수행하였고, 동시다점계측의 장점을 가지고 있는 PIV 기법을 이용하여 정량적인 데이터를 분석하였다. 삼각형상 구조물은 인공용승구조물의 대표적인 형태로서 구조물 상부 및 후부에서의 유동특성을 규명함으로써 성층계수에 따른 용승효과 및 후류역에서의 와류 패턴을 알 수 있었다.

구조물의 최상부를 기준으로 상승류 구역과 하강류가 나타나는 재순환류 영역은 상대적으로 유속이 강한 성층계수가 3이하인 경우에 $x/h_s=2$ 를 기준으로 전환되었고, 성층계수가 3이상인 저속 유동장에서는 $2h_s$ 보다 더 후방영역으로 이동하였다.

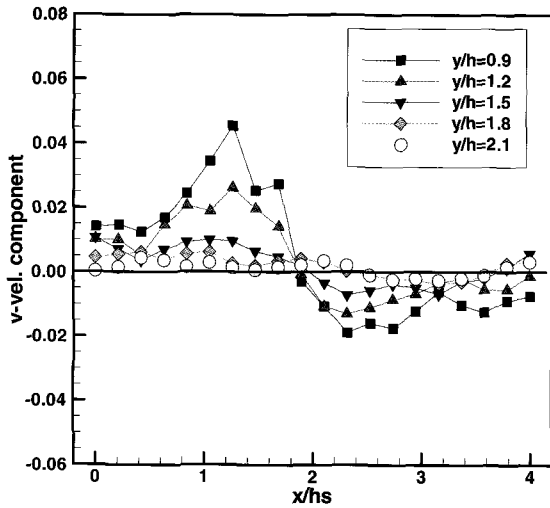
수심에 따른 상승류의 패턴은 구조물을 기준으로 하여 x방향으로 $1.5\sim 2h_s$ 인 영역에서 y방향으로 약 $1h_s$ 범위에서 가장 강한 분포를 보였다. 따라서 용승효과는 수심(h_s)이 구조물높이(h_s)의 약 2배인 영역에서 가장 좋았다.

유속을 변화시켜 성층계수에 따른 용승효과를 알아본 결과 성층계수가 2.97에서 가장 좋은 결과가 나타났고, 이는 선행연구의 수치실험 결과와 일치하였다.

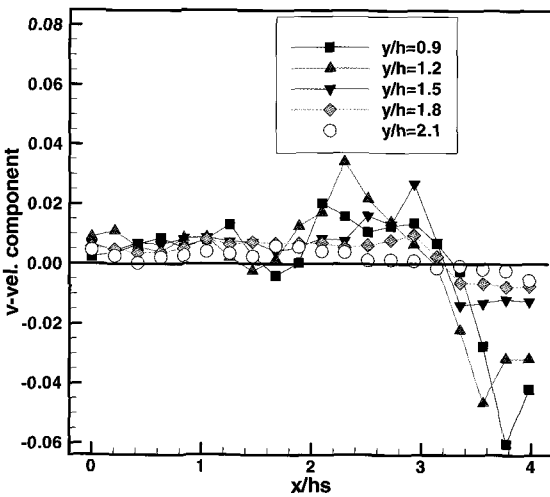
추후의 연구과제로서는 수중구조물 최상부의 형태 및 사면의 각도 변화 등에 따른 유동특성을 규명하고, 구조물 높이에 따른 자유표면 효과 등을 다양하게 검토해야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

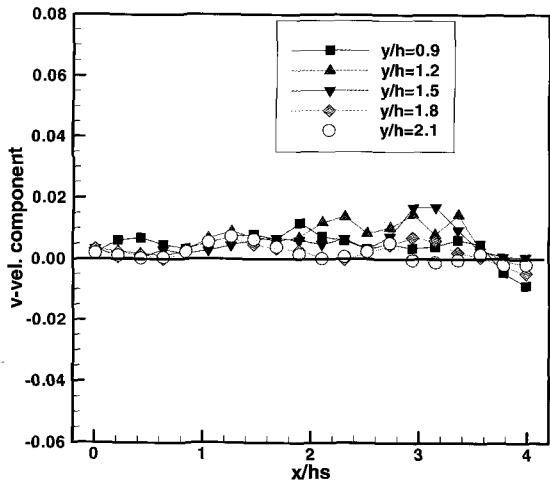
- [1] 김동선, 황석범(2006), 인공용승구조물 설치에 의한 유동 변화(I), 해양환경안전학회지, 제 12권 제 4호, pp. 301-306.
- [2] 김완길(2006), 수중구조물 주위의 3차원 유동특성에 관한 연구, 부경대학교 대학원, p. 54.
- [3] 김홍진, 전용호, 류청로(2002), 인공용승구조물의 수리학적 기능성에 관한 연구, 한국해양공학회 2002춘계학술대회논문집, pp. 62-67.
- [4] 류청로(1995), 복잡한 형상의 수중구조물에 작용하는 유체력 특성, 한국어업기술학회 수산관련공동학술대회발표요지집, pp. 293-294.
- [5] 류청로, 김동선, 박맹언(2006), 인공용승류를 이용한 어장환경 개선 연구-3차년도 보고서, 부경대학교, p. 527.
- [6] 박성은(2004), 해중구조물에 의해 발생하는 인공용승류의 수치실험, 부경대학교 대학원, p. 92.
- [7] 전용호, 이경선, 강윤구, 류청로(2007), 흐름장에서 인공용승구조물의 블록투하 및 용승효과에 관한 실험적 연구, 한국해양공학회지, 제 21권 제 4호, pp. 21-27.
- [8] 조용식(2003), 수중방파제를 이용한 해안침식 방지 기술 개발-최종보고서, 한양대학교, p. 105.
- [9] 한국등록실용신안(2004), 인공 용승류 유도를 위한 블록구



(b) SP=2.97



(c) SP=3.20



(d) SP=3.49

Fig. 7. Vertical velocity component with y-layer.

- 조체, 등록실용 20-0372872, p. 6.
- [10] 홍우람, 심재설, 민인기(2007), 수치해석을 이용한 이어도 기지 구조물이 해수 유동에 미치는 영향 분석과 해류 관측 평가 및 보정방안 연구, 한국해양해양공학회지, 제 19권 제 5호, pp. 476-483.
- [11] Adrian R.J.(1991), Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics, Annu. Rev. Fluid Mech., Vol.23, pp. 261-304.
- [12] Nagamatsu Tetsuo, Nakagama Naruhito, Nishikita C. Masako(2005), Consideration on Scale Effect of Vortical Flow Induced by Artificial Upwelling Structure, Journal of Ocean Science and Technology(KAOSTS), 2(1), pp. 1-8.
- [13] Nagamatsu T.(2003), On Upwelling Induced by Man-made V-Sharped Structure Placed on Sea Bottom, Fluid control, measurement and visualization(FLUCOME03), p. 277.
- [14] Ryther, J.H.(1969), Photosynthesis and fish production in the sea, Science, 166, pp. 72-76.
- [15] Simpson, J.H. and J.R. Hunter.(1974), Fronts in the Irish sea, Nature, 250, pp 404-406.
- [16] United States Patent(1993), Upwelling-generating structure, US-0857842, p. 18.
- [17] Yanagi, T., Nakajima, M(1991), Change of oceanic condition by the man-made structure for upwelling, Marine pollution bulletin, Macmillan Journals, 23, pp. 131-135.

원고접수일 : 2008년 01월 04일

원고채택일 : 2008년 03월 21일