

## 경사벽면을 갖는 개방 캐비티의 유동제어에 관한 연구

조대환<sup>1</sup> · 진완빈<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2009년 8월 3일, 원고수정일 : 2009년 9월 10일, 심사완료일 : 2009년 10월 18일)

### A Study on Flow Control of Open Cavity with Inclined Rear Walls

Dae-Hwan Cho<sup>1</sup> · Wan-Bin Jin<sup>†</sup>

**요 약 :** 이 실험적인 연구는 오픈 캐비티에서 경사후방벽면을 가지고 있는 유동장안의 제어봉이 있고 없음과 제어봉의 위치에 따른 유동 내부특성을 알고자 하였다. 속도 측정법으로는 흐름과 입자 영상의 가시화가 가능한 PIV기법을 이용하여 레이놀즈수의 변화와 속도에 대하여 고찰하였다. 제어봉의 어느 위치가 캐비티 내부유동 특성에 영향을 적게 주며, 전단 혼합 층이 유동장 상부와 하류 쪽으로 이동하는지에 대한 레이놀즈수의 임계점을 알고자 하였다. 그 결과, 제어봉의 위치  $L/H=0.2$ 에서, 제어봉의 위치를 각각 상이하게 정하여 보았으나,  $L/H=0.2$ 의 경우가 가장 캐비티에 영향을 적게 주는 것으로 판단된다. 주와류 후방의 흐름이 상부로 서서히 치우쳐 있으며 레이놀즈수가 증가할수록 이러한 현상은 뚜렷해지고, 이것은  $y/H=1.0$  전후의 주 흐름은 제어봉의 효과로 캐비티 상부에 발생한 주 와류의 위쪽으로 치우쳐 하류로 진행하기 때문으로 판단된다. 이러한 현상은 레이놀즈수가 증가하면서 더욱 뚜렷해지며 그 임계점은  $Re=1.0 \times 10^4$  전후임을 알 수 있었다. 제어봉의 위치가  $L/H=0.1$ 의 경우 레이놀즈수의 증가 ( $Re=6.0 \times 10^3$ ,  $Re=8.0 \times 10^3$ ,  $Re=1.0 \times 10^4$ ,  $Re=1.2 \times 10^4$ )에 따라 상부에 이중와류 구조가 발생하고, 캐비티 상부의 전단 혼합 층이 증가함에 따라 하단부의 속도분포가 더 안정적인 모습도 알 수 있었다.

**주제어 :** 개방 공동, 경사후방벽면, 와류, 전단혼합층, 입자영상유속계

**Abstract:** This experimental study is about the flow characteristics according to existence and nonexistence of the control rod and location in the flow field where it has the Inclined rear walls in the open cavity. By using the visualization of flow and particle image velocimetry (PIV), we performed about a change and speed of the Reynolds number. Our objective was what part of the control rod gives less effects to the characteristics of flow and how the shear mixing layer moves at what critical point of the Reynolds number. As a result, we differed the location of control rod. So finally,  $L/H=0.2$  was discovered to give less effects to the cavity. The flow of backside of vortex faces the upper side. And we found that this phenomenon shows up more clear when the number of Reynolds increases. This is because of the flow of vortex causes by the condition of  $y/H=1.0$ . This phenomenon gets more clear with increasing of number of Reynolds, and critical point of the Reynolds number was  $Re=1.0 \times 10^4$  around. If control rod is  $L/H=0.1$ , depending on the number of Reynolds ( $Re=6.0 \times 10^3$ ,  $Re=8.0 \times 10^3$ ,  $Re=1.0 \times 10^4$ ,  $Re=1.2 \times 10^4$ ), doubled vortex shows up. As the shear mixing layer of the upper side of cavity increases, the speed of the lower side was very stable.

**Key words:** Open cavity, Inclined rear walls, Vortex, Shear mixing layer, PIV

<sup>†</sup> 교신저자(목포해양대학교대학원, E-mail:love1948@empal.com, Tel: 061-240-7200)

<sup>1</sup> 목포해양대학교 기관시스템공학부

## 1. 서 론

캐비티 유동은 경계조건이 단순하여 유체역학분야에서 벤치마킹으로 많이 이용되는 유동장이다. 그러나 기어펌프의 케이싱, 축 밀봉에 사용되는 오일 씰(oil-seal), 회전기어의 틈새 등 기계공학적인 측면에서 보면 벽면이 직각이 아닌 경사면 또는 곡면이 대부분이다. 거시적인 관점에서 수중 잠재 등 해양 수중구조물 주위의 유동 또한 경사면을 갖는 캐비티의 형상으로 모델링이 가능하다. 이러한 캐비티는 유입 및 유출부분의 영역에 대해 캐비티 부근이 확대관의 형상을 갖게 되므로, 재순환 흐름과 충돌하는 부분에서 전단 혼합 층이 형성되게 되며 그 크기와 위치는 유입흐름의 레이놀즈수에 따라 달라진다. [1] 전단혼합영역의 크기와 상대위치의 내부유동은 물론 하류의 유동패턴에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 이에 대한 유동특성을 규명하는 것은 매우 중요 하며 필요할 경우 유동제어를 통해 캐비티 내부에 미치는 영향을 감소시킬 수 있다. 일반적으로 물체 주위의 유동을 제어하는 방법으로는 경계층 영역에 외부 에너지의 공급 유무에 따라서 능동제어(active control)와 수동제어(passive control)로 구분된다. 능동제어는 원리상 외부에너지의 공급을 필요로 하는 제어 방법이다. 즉, 경계층에서 와류가 박리되기 전에 경계층 내에 운동에너지를 공급하여 보충하거나 에너지를 소실한 경계층을 흡입해서 하류에 새로운 경계층을 만드는 방법과 음향효과, 물체의 진동, 표면온도제어와 다른 물질의 혼합 등이 있다. 반면에 수동제어는 소극적 방법과 적극적 방법으로 분류된다. 소극적 방법은 물체의 기하학적 구조를 변경하여 유선형 등의 형상으로 설계함으로써 압력 상승을 완만하게 하는 것이며, 적극적 방법은 물체 표면에 부가물을 설치하여 경계층 부근의 흐름을 교란시켜서 운동에너지가 부족한 물체표면의 흐름이 경계층 밖의 흐름과 혼합해서 박리에 견디는 능력을 증가시켜 물체 표면주위의 유동을 제어하기 때문에 산업현장에서 응용하기가 쉽다. 전단혼합영역의 크기와 상대위치의 내부유동은 물론 하류의 유동패턴에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 이에 대한 유동특성을 규명하는 것은 매우 중요 하며 필요할 경우

유동제어를 통해 캐비티 내부에 미치는 영향을 감소시킬 수 있다. Yamamoto 등[2]은 캐비티를 가진 직사각형 채널의 3차원적 점성 흐름을 수치해석과 실험을 수행하였다. 수치해석으로는 유한 체적법(Fvm)을 이용하였고, 실험에서는 용액 흐름을 캐비티 부분 근처에서 3차원 흐름 행동을 관찰하기 위해 시각화를 이용하여, 중심 면을 향하여 이동하는 급격한 흐름이 캐비티 내부에 발생된다고 증명을 하였다. Rasmussen[3]은 공간 기반 연료 인젝터/플레임 홀더의 화염 안정성에 대한 연구에서 플레임을 3과 4의 깊이/비율에 두 가지 다양한 후벽면 구조와 길이를 가진 캐비티에서의 안정화를 두고, 연료를 캐비티 플로어로 주입되었을 때 부분적으로 예비혼합이 플레임의 전단 층부 에서 일어나는 것을 보고하였다. Tan[4]은 캐비티 진동을 억제하고 캐비티 흐름의 비회광학을 향상시키기 위한 수동적 제어방법으로 수치 해석적으로 레이놀즈 평균 내비어-스토크(URS) 방정식을 이용하여 수치 시뮬레이션을 연구하였다. 다양한 종횡비  $L/D(=2,4,15)$ 의 캐비티 리딩 에지(edge)에 적용하고 캐비티 전단층의 대규모 와류(vortex) 구조는 수동적 흐름 제어에 결합된 능동적 유량 제어 기술을 사용함으로써 현저하게 감소한다고 보고하였다. 김[5]은 캐비티를 가지는 연료분사에서 연료 분사를 위한 3차원 흐름 반응 코드와 장치에 연소/혼합 증강의 방법을 개발하고, 종횡비로는 슬릿 노즐의 흐름 폭에 측면의 길이 비율을 사용하였다. 또한, 안쪽으로 유입되는 슬릿측면에 와류 모두를 혼합의 관점에서 고려하여 캐비티를 가진 연소기는 캐비티 없는 경우와 비교하여 압력 손실을 증가시키는 동안 혼합과 연소가 개선된다는 것을 발견하였다고 보고하였다. 서 등[6]은 캐비티 뒤 부분에 수직으로 제트를 분사시키고 캐비티의 길이/높이 비를 1로 고정한 다음 크기변화에 따른 내부 혼합 특성을 고찰하였다. 그 결과 캐비티의 크기가 커질수록 제트 분사구 이후의 압력회복속도가 빨라지며 전단 경계층의 두께가 증가하는 결과를 보고 하였다. 김 등[7]은 경사벽면을 갖는 개방 캐비티에 정수장의 2차 침전지 유입부 형상을 이상적으로 모델화 하여 일정이상의 유량이 후류로 진행 할 경우

침전지의 유입부에서 균형을 이루지 못한 흐름이 발생하게 되어 하류 침전지역이 전반적으로 수리적 안전성을 상실하게 되므로 유입부 입구의 유동제어는 매우 중요하고, 그 제어가 캐비티 내부에 미치는 영향을 최소화 될 수 있음을 보고 하였다. 노와 김[8]은 모서리에 여러 종류의 펜스를 설치한 정방형주의 유체력 저감 효과를 수소 기포법에 의한 가시화 실험과 양·항력측정 실험으로 고찰하고 정방형주의 뒤쪽 상·하부 모서리에 수직펜스를 부착할 경우 항력 저감 효과가 가장 크게 나타났으며, 본래의 정방형 주에 비해 각 레이놀즈수 평균 6.8%의 항력 저감 효과를 얻을 수 있음을 보고 하였다. 캐비티 내에서 제어를 위한 기존의 연구에서는 강제적으로 플로어를 주입하거나, 펜스를 설치 등 능동제어에 연구를 보였으며, 수동 제어적 방법으로는 수치해석을 적용한 예가 있었다. 그래서 이 연구에서는 캐비티의 후방 벽면이 경사면일 경우, 유동장내의 유동특성에 대한 수동적 제어로 제어봉을 제작 하고 설치하여 실험을 실시하였으며, 계측수법으로는 동시다점으로 속도계측이 가능한 PIV[9-11] (Particle Image Velocimetry) 기법을 적용하였다. 이 기법을 통해 유동장내 캐비티에 영향을 적게 주는 제어봉의 위치와 와류가 유동장 상부, 하류쪽으로 치우치는 레이놀즈수의 입계점을 알고자 하였다.

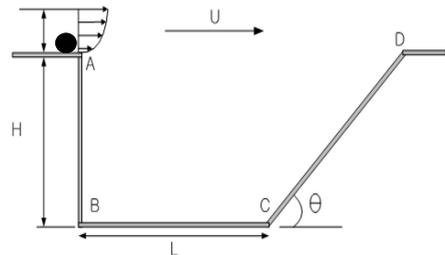
## 2. 실험장치 및 방법

Figure1 (a) (b)는 실험장치구성과 유동장의 개략도를 나타낸 것이다. 유동장은 뒤 벽면이 경사져 있으며 전방벽면은 직각으로 된 계단유동으로 후방에 장애물이 있는 형태의 캐비티 이다. 캐비티 상부는 개방되어 있으며 상류로부터 균일유속의 흐름이 유입된다. PIV계측의 영상처리시스템은 크게 아르곤-이온 레이저(Argon-ion laser, 5W)를 이용한 약 2mm 두께의 평면 광 발생장치, 고속카메라(Fast Cam), 영상처리장치(CACTUS 3.1), 호스트 컴퓨터 등으로 구성하였다. 후벽 면에 경사벽을 갖는 캐비티는 개수로(open channel) 유동으로 분수 되므로 수동을 이용하였다.

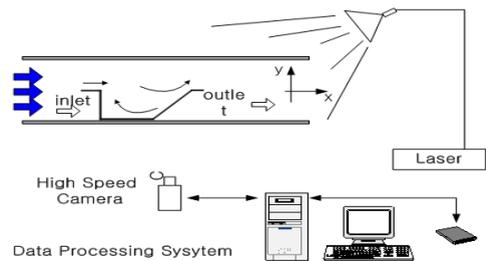
실험에서 제어봉 유무 및 위치(유동장  $L/H=$

0.1, 0.2)에 따른 전단혼합 영역의 크기와 유동패턴을 고찰하기 위해 단이진 전방 유로에 지름  $D = 0.1H$ 의 원형 제어봉을 설치하였다.

설치위치는 세 가지 경우(설치 안함, 0.1H, 0.2H)이다. 회류수조의 시험 부는 길이 1000mm, 너비 300mm, 깊이 300mm의 장방형이고 모델은 수동의 중앙에 고정하였다. 가시화실험은  $150\mu\text{m}$  정도의 PVC입자를 추종성이 우수한 입자만을 선별하기 위해 회류수조 내로 수차례 입자를 흐르게 하여 가라앉은 입자를 선별 처리하였고 수조 내의 물 온도는 입자의 추종성에 중요한 요소로 작용하기에 이 실험에서는  $21^{\circ}\text{C} \sim 22^{\circ}\text{C}$ 를 맞추기 위해 투명한 아이스팩을 유동장 뒷면 바닥에 설치하고 소량의 얼음을 이용하여 일정한 온도를 유지하여 최적의 입자만을 유동장에 고루 분포토록 하였다. 또한 약 2mm 두께를 갖는 시트라이트가 산란되지 않도록 벽면을 음영 처리하고 실험조건을 높이기 위해 야간을 주로 이용하여 충분히 발달된 유동장에 대해 2,000프레임의 영상을 획득하여 PIV계측에 이용하였다. 실험 중에는 수동의 하부에서 빛의 반사에 의한 산란을 막기 위해 거울



(a) Cavity shape with inclined rear wall



(b) Experimental setup

Figure 1: Schematic diagram of Experiment

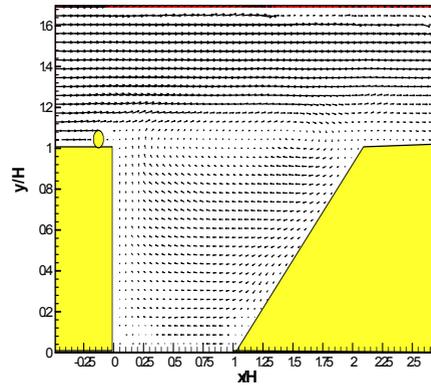
을 이용해 빛의 방향을 시험부 외곽으로 향하도록 하고, 동시에 0.1mm 두께의 시트용지용 필름을 수조 상단에 설치하여 상부반사에 의한 산란을 막았다.

### 3. 결과 및 고찰

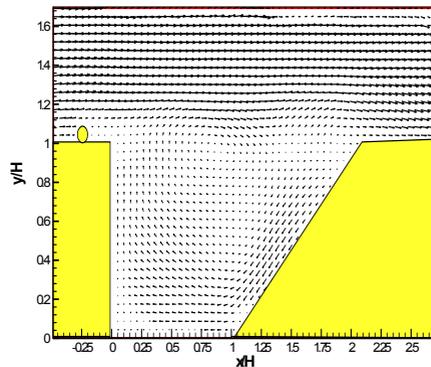
경사벽을 갖는 캐비티는 경사면 유동과 후향 계단유동이 중첩된 유동으로 볼 수 있으며, Photo. 1은 PIV 계측을 위해 가시화한 유동장의 실제 이미지이다. 전체적인 유동패턴은 캐비티의 중심을 기준으로 이사분면에 강제와류의 형태를 갖는 중간 규모의 와류가 존재하고, 레이놀즈수가 ( $Re=6.0 \times 10^3$ ,  $Re=8.0 \times 10^3$ ,  $Re=1.0 \times 10^4$ ,  $Re=1.2 \times 10^4$ ) 증가함에 따라 비슷한 규모의 와류가 이사분면의 우측상부에 새로이 나타나 이중 와류구조를 보였다. 주 흐름의 대부분은 하류로 진행하나, 일부가 경사면을 따라 캐비티 내부로 진행하고 이로 인한 캐비티 내부의 재순환 영역이 생성되었다. 재순환 흐름은 유입영역인 이사분면의 상부  $y/H=0.25$  부근의 제어봉 ( $L/H=0.1$ ,  $L/H=0.2$ ) 위치에서 주 유동과 충돌하여 매우 복잡한 형태의 전단혼합층을 형성하게 된다. Figure 2는 제어봉의 유무와 위치에 따라 계측된 시간평균속도벡터 분포이다. 전체적으로 평이하나, 제어봉이 존재하는  $L/H=0.1$ ,  $L/H=0.2$  부근에는 캐비티 좌측상부 모서리 또는 제어봉으로부터 박리 흐름의 경향이 나타나 있다. Figure 3은  $x/H=0.5$ 의 지점에서  $y=0.04H$  간격으로 속도데이터를 추출하여 제어봉의 유무 및 위치 그리고 레이놀즈수의 증가에 따른 결과를 도시한 것이다. Figure 3 (a) 와 (b)는 도시된바와 같이 전단부의 속도에서 제어봉을 거친 캐비티 후반부의 속도가 현저히 감소함으로써 캐비티에 영향을 적게 주는 것으로 나타났다.



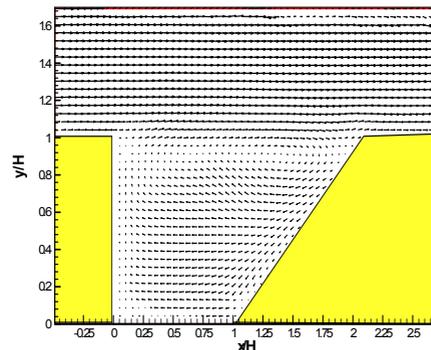
Photo 1: Original Image



(a)  $L/H=0.1$



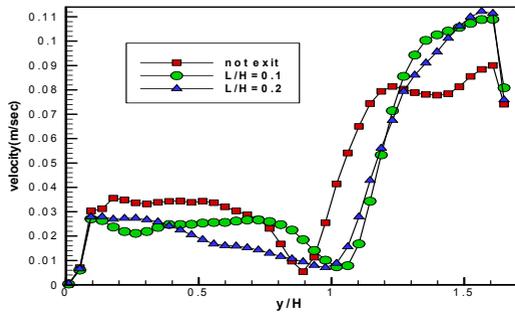
(b)  $L/H=0.2$



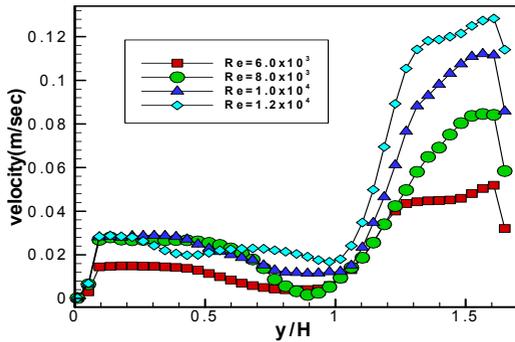
(c) No exit

Figure 2: Velocity distribution between control rod and cavity( $Re=1.0 \times 10^4$ )

제어봉의 위치를 각각 상이하게 정하여 보았으나,  $L/H=0.2$ 의 경우가 가장 캐비티에 영향을 적게 주는 것으로 판단된다. 이 경우  $Re=1.0 \times 10^4$ 를 경계로 하여 캐비티 내부의 속도분포가 낮게 나타



(a)  $x/H = 0.5$

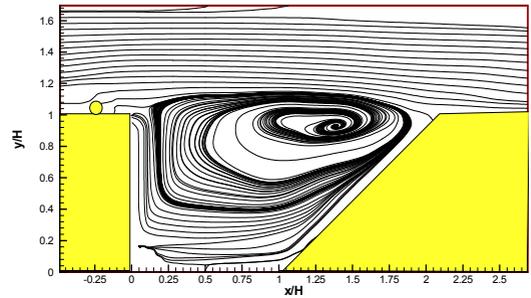


(b)  $L/H = 0.2$

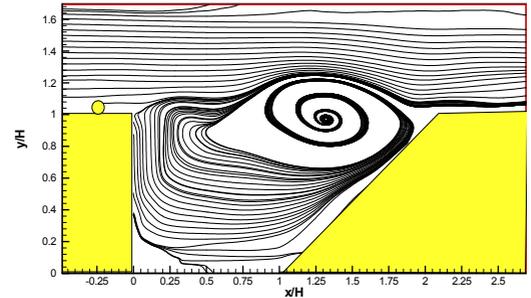
Figure 3: Comparison of velocity at  $x/H = 0.5$

나고 있다. Figure 4는 레이놀즈수의 점차적인 증가(a→d)에 따른 스트림라인을 도시한 것이다. (c)의 스트림라인에서 주와류 후방의 흐름이 상부로 서서히 치우쳐 있으며 레이놀즈수가 증가할수록 이러한 현상은 뚜렷해지고 있다. 이것은  $y/H = 1.0$  전후의 주 흐름은 제어봉의 효과로 캐비티 상부에 발생한 주 와류의 위쪽으로 치우쳐 하류로 진행하기 때문이다. 이러한 현상은 레이놀즈수가 증가하면서 뚜렷해지며 그 임계점은  $Re = 1.0 \times 10^4$  전후로 판단된다.

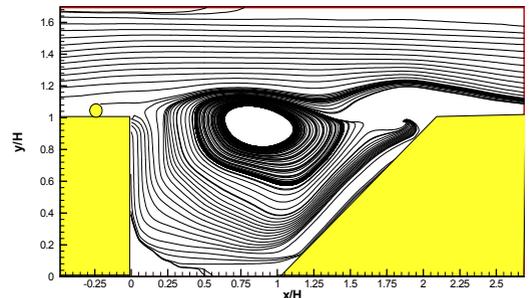
Figure 5는 제어봉의 위치가  $L/H = 0.1$ 의 경우이다. 레이놀즈수가 증가할수록 상부에 이중와류 구조가 나타나고, 캐비티 상부의 전단혼합영역도 좁고 길게 형성되었다. 그리고 상부의 주 흐름과 재순환류가 만나는 전단 혼합영역에서 발생한 에디(eddy)들은 출구 측으로 연속적으로 진행하며 일부가 경사 벽면에 부딪쳐 재순환흐름에 혼합되고 있다.



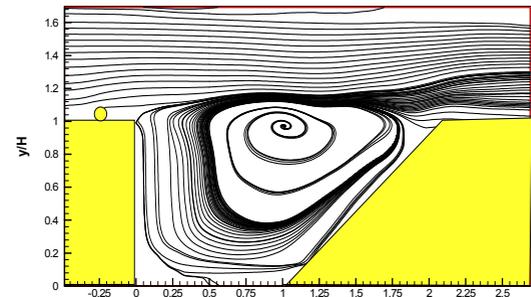
(a)  $Re = 6.0 \times 10^3$



(b)  $Re = 8.0 \times 10^3$



(c)  $Re = 1.0 \times 10^4$



(d)  $Re = 1.2 \times 10^4$

Figure 4: Comparison of Stream Lines at  $L/H = 0.2$

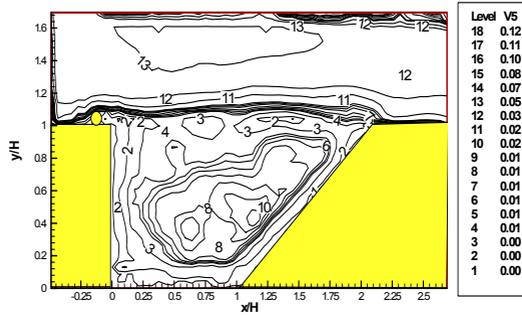
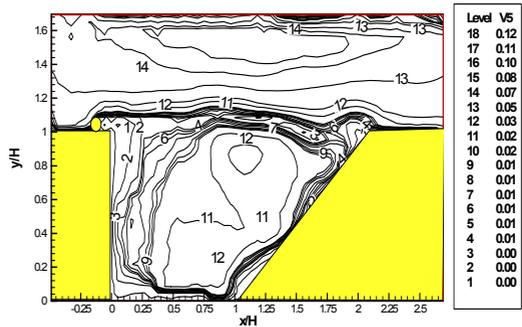
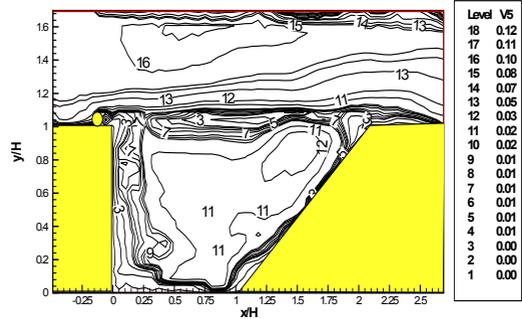
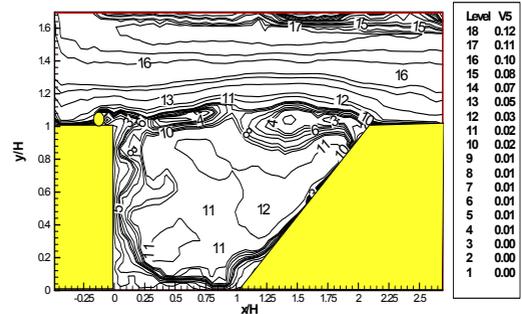
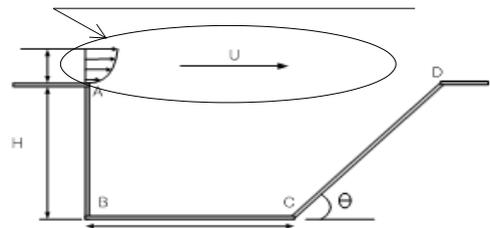
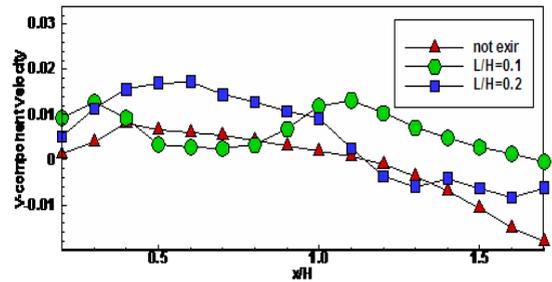
(a)  $Re=6.0 \times 10^3$ (b)  $Re=8.0 \times 10^3$ (c)  $Re=1.0 \times 10^4$ (d)  $Re=1.2 \times 10^4$ Figure 5: Comparison of velocity at  $x/H=0.5$ 

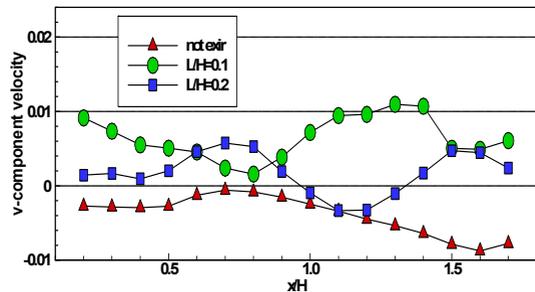
Figure 6은 캐비티의 상부  $y/H=1.13$  위치의 수직방향속도성분을 나타낸 것으로, 제어봉의 위치에 따라 진폭이 각각 13.21%, 10.34% 정도 큰 것으로 나타나는 효과를 알 수 있다. 이러한 유동 특성은 이 연구에서와 같은 상부에 흐름이 존재하는 캐비티의 독특한 특징으로 여겨진다. 운동에너지의 배분 및 유입 현상이나 전체적으로 일그러진 주 와류의 거동 현상을 나타내고 있다.

Measuring position ( $y/H=1.13$ )

(a) Measuring position



(b) u-velocity



(c) v-velocity

Figure 6: Comparison of v-component velocity at  $y/H=1.13$

#### 4. 결 론

이 연구에서는 캐비티의 후방 벽면이 경사면일 때의 유동장에 대해 PIV기법을 이용해 속도분포를 측정하고 유동특성을 규명하고자 하였으며, 특히 레이놀즈수에 따른 전단혼합영역의 크기와 상대 위치에 대해 고찰하였다. 그 결과 제어봉의 위치  $L/H=0.2$ 에서  $y/H=1.0$  전후의 주 흐름이 캐비티 상부에 발생한 주 와류의 위쪽으로 치우쳐 진행하여 캐비티 내부에 미치는 영향이 감소하였다. 이러한 현상은 레이놀즈수에 의존하며 그 임계점은  $Re=1.0 \times 10^4$  전후이다. 제어봉의 위치가  $L/H=0.1$ 의 경우 레이놀즈수의 증가( $Re=6.0 \times 10^3$ ,  $Re=8.0 \times 10^3$ ,  $Re=1.0 \times 10^4$ ,  $Re=1.2 \times 10^4$ )에 따라 상부에 이중와류 구조가 발생하고, 캐비티 상부의 전단혼합층이 증가함에 따라 하단부의 속도분포가 더 안정적인 모습을 보였다.

#### 참고문헌

- [1] J.O. Mo, S.J. Kang, K.T. Song, C.D. Nam, and Y.H. Lee, "The flow characteristic of three-dimensional lid-driven cavity by large eddy simulation", Int. Conf. Marine Engineering, pp. 383~388, 2001.
- [2] Yamamoto, T., Ishiyama, M., Nakajima, M., Nakamura, K. and Mori, N. "Three-dimensional viscoelastic flows through a rectangular channel with a cavity" Journal of non-Newtonian fluid mechanics, vol. 114, no. 1, pp.13~31, 2003.
- [3] Rasmussen, Chadwick Clifford. An Experimental Study of Flame Stability in a Directly-Fueled Wall Cavity with a Supersonic Free Stream University of Michigan. Ph.D. 2006.
- [4] Tan, Yan, CFD-based Aero-Optical Analysis of Flow Fields over Two-Dimensional Cavities with Active Flow Control, Washington University. D.Sc. 2005.

- [5] 김경무, 초음속 공기유동으로의 연료 분사에 관한 수치적 연구, 한국과학기술원, 박사학위논문, 2002.
- [6] 서형석, 스크램제트 연소기 내부의 캐비티 크기 변화에 따른 혼합특성에 관한 연구, 건국대학교 대학원, 석사학위논문, 2008.
- [7] 김남일, 김대근, 유창환, 김태영, "침전지 유입부 설계를 위한 CFD 모형의 적용", 상하수도학회지, vol. 19, no. 3, pp.758~766, 2005.
- [8] 노기덕, 김광석, "모서리에 펜스를 가진 정방형 주의 유체력 저감 특성", 한국마린엔지니어링학회지, vol. 30, no. 3, pp. 389~395, 2006.
- [9] S.Mahmud, A.K.M. Sadrul, M.A.H. Mamun, "Separation characteristics of fluid flow inside two parallel plates with wavy surface", J. Engineering Science, vol. 40, pp. 1495~1509, 2002.
- [10] 조대환, 김진구, 김춘식, 이영호, "PIV에 의한 채널 캐비티의 중횡비에 따른 유동특성", 대한기계학회, 추계 학술대회논문집, 제2권 제2호, pp. 535~541, 1997.
- [11] 이영호, "PIV에서의 동시 다점 측정의 원리 및 적용", 대한기계학회 열 및 유체공학부문 추계 학술강연논문집, pp.30~44, 1996.

#### 저 자 소 개



##### 조대환(趙大煥)

한국해양대학교 대학원 졸업(공학박사),  
현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수



##### 진완빈(秦完彬)

1999년 목포해양대학교 대학원 졸업(공학석사), 현재 목포해양대학교 대학원 박사과정