

# PIV에 의한 펌프장 흡입수조의 자유표면에서 발생하는 와의 유동특성에 관한 연구

최종웅\* · 김범석\* · 이 현\* · 김유택\*\* · 이영호\*\*\*

A study on the Flow Characteristics of a Vortex originated in the Free Surface within a Sump in a Pump Station by PIV

J. W. Choi\*, B. S. Kim\*, H. Lee, Y. T. Kim\*\*, Y. H. Lee\*\*\*

Key Word: PIV(입자영상유속계), Sump(흡입수조), Free Surface Vortex(자유표면와), Submerged Vortex(수중와), Swirl(선회류)

## ABSTRACT

The head-capacity curves for pumps developed by the pump manufacturer are based on tests of a single pump operating in a semi-infinite pool with no nearby walls or floors and no stray currents. Hence, flow into the pump suction is symmetrical with no vortices or swirling. Pump station designers rely on these curves to define the operating conditions for the pump selected. But various constraints such as size, cost, and limitations on storage time require walls, floors, and pump intakes to be close proximity to each other. From this background, the authors are carrying out a systematic study on the flow characteristics of intakes within a sump found within a sump of pump stations. Model pump intake basin is designed and PIV is adopted as a measuring tool to capture the instantaneous flow patterns. Special attention is paid to investigate the flow patterns near the free surface due to different clearances from back-wall to vertical intake pipe with bell mouse and without. Moreover, the locations and vorticities of the various types of vortices that were found in the examinations are discussed.

## 1. 서 론

흡입수조내 흡입관 주위에서 발생하는 와는 펌프의 성능 저하와 불안정한 운전상태 그리고 그로 인한 펌

프의 유지 보수에 많은 비용을 필요로 하는 일이 발생한다. 흡입부에서 침전물이나 공기를 동반한 흡입이 없을 때의 설계가 가장 이상적인 설계이며, 그 때 펌프의 작동은 원활하게 된다. 그러나 수위가 임계치 이하로 저하하면 자유표면으로부터 와가 발생하게 된다. 이러한 와들은 강한 공기의 흡입을 동반하며 진동, 캐비테이션 그리고 펌프의 효율을 저하시킨다. 또한, 흡입수조의 바닥과 측벽으로부터 발생하는 와는 침전물의 흡입을 동반한다. 만약 물속에 이러한 와들이 존재한다면, 이것은 흡입관 주위에서 선회류를 유발시키며 펌프 효율을 떨어뜨리는 원인이 된다. 특히, 대형 펌프

\* 한국해양대학교 대학원

\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학부

\*\*\* 한국해양대학교 기계·정보공학부

E-mail : \* woong@pivlab.net, bum\_suck@pivlab.net,  
david@pivlab.net

\*\* kimyt@hanara.kmaritime.ac.kr

\*\*\* lyh@pivlab.net

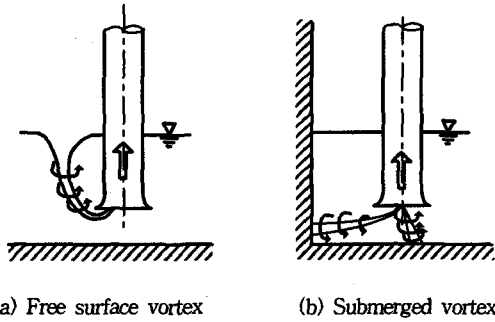


Fig. 1 General vortex in the sump

에서 이와 같은 유동환경은 심한 진동, 불안정한 운전 상태를 유발하며, 극단적인 경우에는 펌프의 정지에까지 이른다. Fig. 1은 일반적으로 흡입수조내에서 발생하는 와의 형태들이다. Fig. 1(a)는 자유표면, Fig. 1(b)는 측벽과 바닥면에서 발생하는 와의 형태이다. 특히, 자유표면에서 발생하는 와는 공기와 접하는 부분이며, 이러한 와들은 직접적으로 공기를 흡입부 쪽으로 이송하는 역할을 한다. Fig. 2는 자유표면에서 발생하는 와의 형태이며, 흡입속도의 증가, 유량의 증가 등으로 Type1에서 Type6으로 유동패턴이 형성된다.

1984년에 Padmanabhan과 Hecker<sup>(1)</sup>는 흡입수조에 발생하는 와의 형태를 정의하여 흡입수조의 축척비율 (1:1, 1:2, 1:4)에서 발생하는 와의 형태를 프루드수에 의하여 분류하였다. 그들은 이러한 축척비율인 스케일 효과에 의한 와의 발생을 연구하여, 스케일 효과가 와의 발생에 중요한 영향을 미치지 않는다는 사실을 발견하였다. 1998년에 Rajendran<sup>(2)</sup> 등은 사각 채널안의 수직 흡입관을 포함한 흡입수조 내의 3차원 난류유동을 수치 해석하여 그 결과를 실험과 비교 분석하였다. 2001년에 Lee<sup>(3)</sup>는 흡입수조내의 자유표면과 자유표면 아래에서 발생하는 와를 가시화 하였다. 이처럼 많은 연구자들에 의해 흡입수조의 설계 등에 관한 다양한 연구가 진행되고 있지만<sup>(4)-(7)</sup>, 정성적인 연구가 대부분이며 정량적인 연구는 전무한 실정이다. 이러한 배경으로 본 연구는 흡입부에서 공기의 흡입과 선회류를 방지하기 위해서 본질적으로 필요한 와의 구조, 위치, 그리고 와도에 대한 정량적인 데이터를 얻기 위하여 뒷벽과 흡입관의 거리에 따른 자유표면에 대한 유동패턴을 PIV기법<sup>(8)</sup>을 적용하여 실험하였으며, 흡입부 선단에 부착되는 벨마우스의 유무에 따라 자유표면의 유동특성을 고찰하였다.

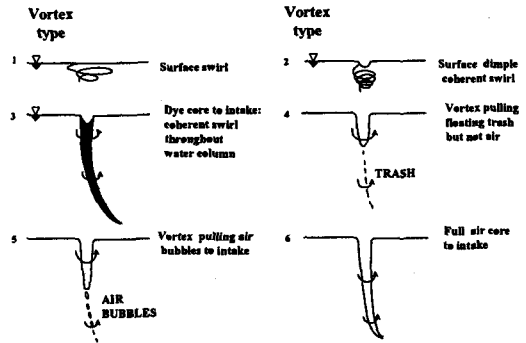


Fig. 2 Vortex Type of free surface

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 3은 본 실험에서 사용한 실험 장치도를 나타내고 있다. 가로 2m, 세로 1m, 폭이 1m인 대형수조 속에 수직 흡입관을 갖는 흡입수조를 만들어 설치하였다. 흡입수조는 내부의 유동장을 가시화하기 위해 투명아크릴로 제작하였으며, 흡입관 및 흡입수조로 인한 산란광을 최소화하기 위하여 검은색 칼라 시트라이트지를 사용하였다. 흡입수조내에서 흡입관까지 균일한 유입을 위해 정류관과 다공관을 설치하였고, 조명장치로는 최대 5W출력의 연속광 Argon-Ion 레이저를 이용하였으며, 원통형 렌즈를 통한 시트라이트는 두께 2mm 내외의 2차원 평면조명으로 유동장에 직접 조사하였다. 작동유체로는 상온의 청수(15°C)를 이용하였다. 추적입자는 송화가루를 이용하였으며, 유동장의 기록을 위하여 고해상도 고속카메라(Photron, B&W, 1280×1024pixel)를 이용하였다. Fig. 4는 실험에 사용된 흡입관 직경( $D$ ), 흡입관과 후벽(back-wall) 사이의 거리( $C_w$ ), 흡입구에서 수면까지의 거리( $S_h$ ), 흡입수조 바닥과 흡입구 사이의 거리( $F_h$ )를 갖는 흡입수조의 치수 정의도이다. 수조의 너비는  $3D$ 이며, 길이는  $13D$ 이다. 실험조건과 실험제반장치는 Table 1과 같다.

### 2.2 실험 방법

본 가시화 실험에 있어서는 형성된 유동장이 충분히 발달하면 약 70ml정도 입자를 선별한 다음 정전기를 방지하기 위하여 계면 활성제를 소량 혼합하여 계측

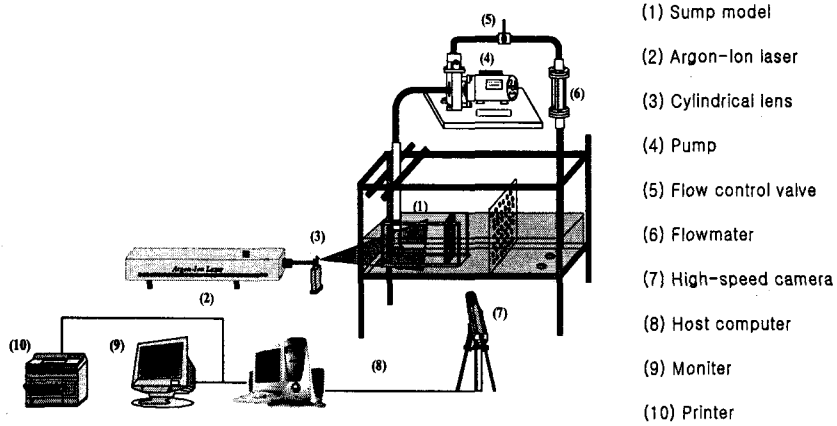


Fig. 3 Arrangement of PIV system

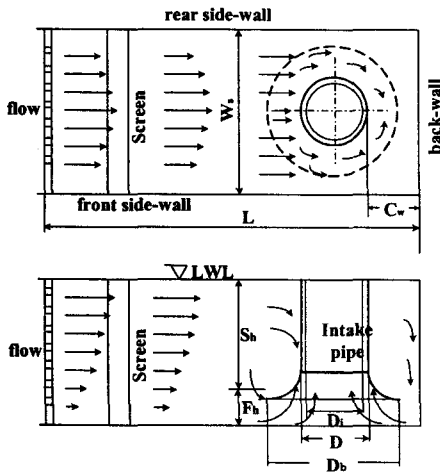
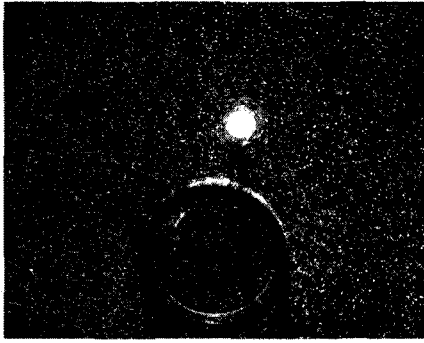


Fig. 4 Dimensions and flow patterns in the sump

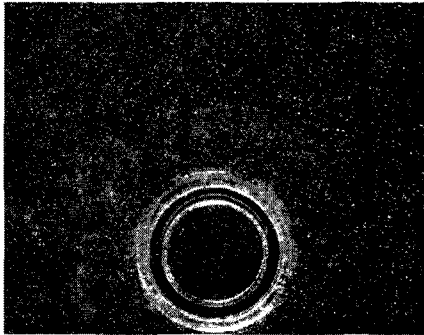
직전에 수조에 투입하였다. 자유표면에서 발생하는 와에 대하여 흡입부 선단에 부착된 벨마우스 유무에 따른 뒷벽으로부터의 흡입관의 위치의 4가지 조건(1.25D, 1.0D, 0.75D, 0.5D)에 대하여 실험을 행하였으며, 유량은 0.0013m<sup>3</sup>/s, 관유속은 0.7m/s(관레이놀즈수 = 3 × 10<sup>4</sup>)으로 일정하게 유지하였다. 아날로그 신호를 2차원 디지털 정보로 바꾸어주는 이미지 보아드는 고해상도 고속도카메라의 보아드에 내장되어 있으며, 고속도 카메라에 의해 획득된 영상을 호스트 컴퓨터에 저장하였다. 본 실험에서 사용된 고속도 카메라의 영상처리 방식은 순차주사방식(Progressive scan)으로 처리되는 영상입력장치이다. 각종 전처리 조작은 전용의 처리

Table 1 Experimental Conditions and Devices

	Item	Specification
Experimental Conditions	Intake Pipe Outer Diameter( $D$ )	60mm
	Intake Pipe Inner Diameter( $D_i$ )	50mm
	Bell-mouse Diameter	$2D$
	Intake Pipe to Back Wall Clearance( $C_w$ )	1.25D, 1.0D, 0.75D, 0.5D
	Intake Pipe Submergence( $S_h$ )	1.0D
	Intake Pipe to Floor Clearance( $F_h$ )	1.0D
Visualization Equipment	Light Source	5W Argon-Ion Laser
	Sheet Light	Cylindrical Lens
Measuring Condition	Working Fluid	Tap Water
	Temperature	15°C
	Particle	Pine Pollen
Image Processing	Host Computer	PentiumIV PC (500MHz)
	Number Data for Time-mean	400 Frames
	Identification	Two-Frame Gray-level Cross Correlation Algorithm
	Ratio of Error Vector	less 1%/frame



(a)  $W_s:3D$ ,  $C_r:1.25D$ ,  $S_r:1D$ ,  $F_r:1D$   
(without bell-mouse)



(a)  $W_s:3D$ ,  $C_r:1.25D$ ,  $S_r:1D$ ,  $F_r:1D$   
(with bell-mouse)

Fig. 5 Instantaneous original images

소프트웨어(FlowInside 3.0)를 이용하였다.

Fig. 5은 자유표면에서 획득한 임의의 순간영상을 나타낸 것이며, 영상은  $880 \times 700$  pixel의 크기를 갖는다. 속도벡터 추출을 위한 유동장의 영상처리에는 전처리 과정이 필요하며 다양한 기법들이 이용된다. 이 과정으로 잡음제거, 회전보정을 거친 다음 2차화된 영상으로 탐색반경을 결정한 후에 유동장의 거동특성을 관찰하여 상관영역을 설정한다. 전처리 과정 중에 가장 큰 비중을 차지하는 것은 잡음제거에 있어 큰 효과를 얻을 수 있는 배경제거이다. 이것은 계측영역에서 입자를 제외한 고정물체를 제거하여 영상의 불필요한 부분을 최소화하며 처리영상에 포함된 노이즈를 제거하기 위한 것이다. 이를 위하여 연속된 400개의 원시 영상의 계조치(gray level)를 산술 평균한 다음, 실제로 처리하고자 하는 순간의 유동장으로부터 감산하는 방법을 택하였다. 잡음이 제거된 영상에 대해서 계측영역내 직선 윤곽선을 이용하여 카메라의 위치에 대한

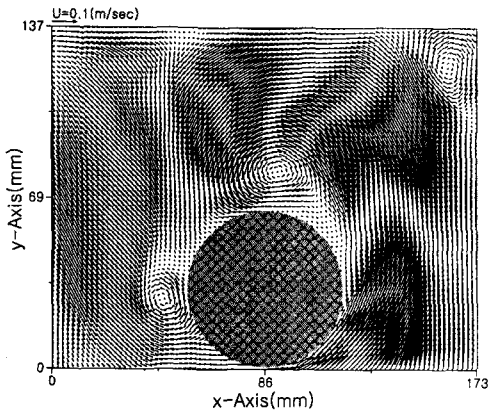
회전보정을 행하였다. 전처리가 끝나면 계산영역을 설정하고 장애물처리를 하여 계조치 상호상관법을<sup>(9)</sup> 이용한 동일입자 확인을 실시하였다. 계조치 상호상관법은 상호상관계수를 이용하여 최대 상관계수의 위치를 속도벡터의 종점좌표로 정하는 방법으로 이 방법을 적용할 때 탐색반경(SAR)과 상관영역(CAS)의 설정은 속도벡터의 신뢰성 뿐만아니라 계산시간의 단축에도 결정적인 영향을 미친다. 속도벡터의 격자수는 각각의 조건에 대해 달리 하였으며, 탐색영역의 반경은 8픽셀로 하였다. 상관영역의 크기는 41픽셀이며, 하나의 순간유동장에 대한 처리시간은 실험에 사용된 Host Computer(Pentium IV 1.4GMz)에서 약 30초 정도가 소요되었다. 원하는 영상을 얻기 위하여 400개의 영상을 순차적으로 처리한 다음 산술평균 하였다. 후처리 과정에서 기록된 영상의 화질에 따라 발생한 고유의 에러성분인 이상치를 판별하여 과오벡터를 제거하는 에러제거, 격자점 재배치, pixel단위를 m/s로 바꾸는 단위환산 등을 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

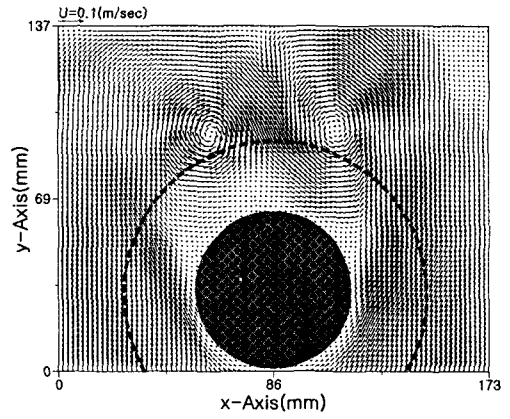
Fig. 6 ~ Fig. 7은 각각 조건에 대하여 자유표면에서 발생하는 와에 대한 400개 데이터의 시간 평균속도벡터를 나타낸 것이며, 이들 그림으로부터 와의 생성위치, 크기 및 유동패턴을 알 수 있다.

Fig. 6는 흡입부 선단부에 벨마우스가 부착되지 않았을 때, 유동장의 하부에서 촬영한  $C_w$ 의 변화에 따른 평균속도벡터를 보인다. Fig. 6(a)와 같이 흡입관과 후벽과의 거리가  $1.25D$ 일 때, 흡입부로 유입되는 유동은 회전력을 가지며 이 회전력은 흡입부로 접근하는 유동 속도보다 큰 힘을 가지게 되어 전체적으로 자유표면에서 선회류가 발생한다. 이 선회류에 의하여 공기를 동반한 와가 더욱 쉽게 발생한다. 그리고 흡입관의 위치가  $1.25D$ 에서  $0.5D$ 로 위치할 때, 자유표면에서 발생하는 선회류는 벽면에 의하여 감소되었으며, 흡입관 윗부분에서 와가 대칭적으로 발생하는 것을 볼 수 있다.

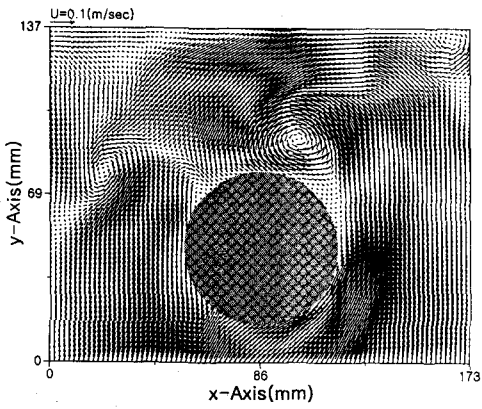
Fig. 7는 흡입부 선단부에 벨마우스가 부착되었을 때, 유동장의 하부에서 촬영한  $C_w$ 의 변화에 따른 평균속도벡터를 보인다. 전체적으로 흡입부 선단부에 부착된 벨마우스에 의하여 흡입부 아래의 유동은 자유표면까지 그 영향을 끼치지 못하며, 이로 말미암아 자유표면에서 선회류는 발생하지 않았다. 또한, 공기를 동반한 와를 관찰할 수 없었다. 자유표면에서 발생하는 와



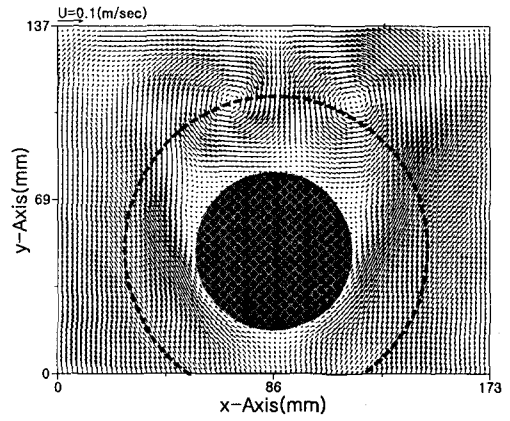
(a)  $W_s:3D, C_w:1.25D, S_{H^*}:1D, F_{H^*}:1D$



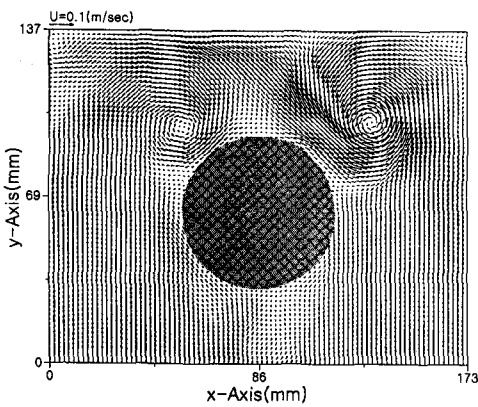
(a)  $W_s:3D, C_w:1.25D, S_{H^*}:1D, F_{H^*}:1D$



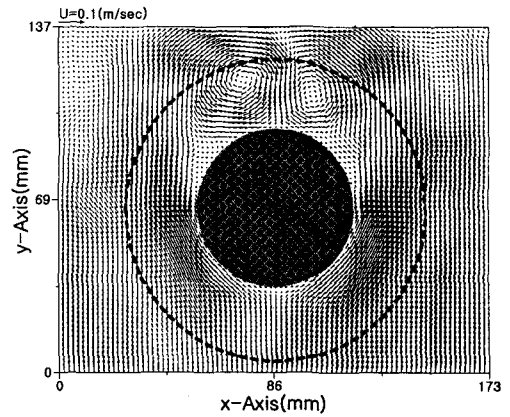
(b)  $W_s:3D, C_w:1.0D, S_{H^*}:1D, F_{H^*}:1D$



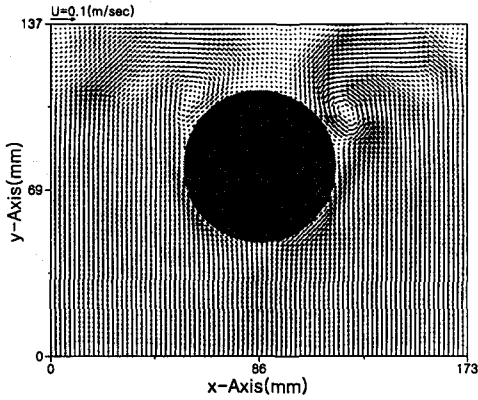
(b)  $W_s:3D, C_w:1.0D, S_{H^*}:1D, F_{H^*}:1D$



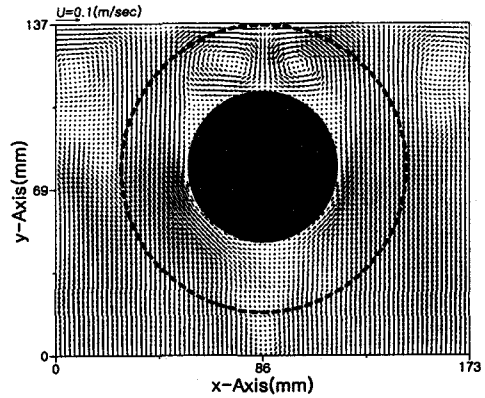
(c)  $W_s:3D, C_w:0.75D, S_{H^*}:1D, F_{H^*}:1D$



(c)  $W_s:3D, C_w:0.75D, S_{H^*}:1D, F_{H^*}:1D$



(d)  $W_s:3D, C_w:0.5D, S_r:1D, F_r:1D$   
 Fig. 6 Time-averaged velocity vectors  
 in the free surface(without bell-mouse)



(d)  $W_s:3D, C_w:0.5D, S_r:1D, F_r:1D$   
 Fig. 7 Time-averaged velocity vectors  
 in the free surface(with bell-mouse)

Table 2 Vorticities for different intake pipe positions  
 unit  $10^{-3}$

	0.5D	0.75D	1.0D	1.25D
Without bell-mouse	11.08	15.93	13.65	11.59
With bell-mouse	10.29	-9.48	-11.28	-11.14

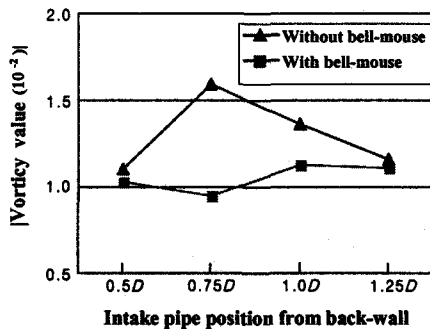


Fig. 8 Absolute vorticity

는 1.25D, 1.0D, 0.75D, 0.5D에서 대칭적으로 나타났다.

Table 2는 흡입관의 위치가 후벽으로부터 1.25D, 1.0D, 0.75D, 0.5D일 때, 본 실험에서 획득한 400개의 데이터를 평균한 와도이며, 그 값을 절대치하여 그래프로 나타낸 것이 Fig. 8이다. 벨마우스가 흡입부 선단

에 부착되지 않았을 경우 전체적으로 와도의 절대치가 낮게 나타났으며, 와도의 최고치와 최저치는 흡입관의 위치가 0.75D일 때 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 흡입부 선단에 부착되는 벨마우스 유무에 따른 수직흡입관의 위치를 후벽으로부터 달리 하였을 때, 자유표면에서의 유동패턴, 와의 위치, 그리고 와의 다양한 형태를 PIV기법을 사용하여 계측하였으며, 획득한 순간 유동장의 데이터를 이용하여 거시적이고, 정량적으로 유동 구조를 검토함으로써, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) PIV를 흡입수조 모델에 적용하여 계측영역의 정량적인 유동정보를 획득할 수 있었으며, 획득한 데이터를 이용하여 유동패턴을 쉽게 이해할 수 있는 애니메이션을 구현하였다.
- (2) 흡입부 선단에 벨마우스가 부착된 경우 자유표면에서 발생하는 와는 대칭적으로 발생하였다.
- (3) 벨마우스의 유무에 따른 와도는 벨마우스가 부착된 경우 전체적으로 낮게 나타났다.
- (4) 와도의 최고치와 최저치는 흡입관이 0.75D에 위치할 때 나타났다.

## 참고 문헌

- (1) Padmanabhan M. and Hecker G. E., 1984, "Scale Effects in Pump Models," J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 110(11), pp. 1540~1556.
- (2) Rajendran V. P., Constantinescu G. S. and Patel V. C., 1998, "Experiments on Flow in Model Water-pump Intake Sump to Validate a Numerical Model," Fluids Engineering Division Summer Meeting, ASME. June 21-25, FEDSM98~5098.
- (3) Lee T. S., 2001, "Visualization of Submerged and Attached Surface Vortices in Pump Sump," Asian Symposium on Visualization, ASV. pp. 97-99.
- (4) Arboleda G. and El-Fadel M., 1979, "Effects of Approach Flow Conditions on Pump Sump Design," J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 122(9), pp. 489~494.
- (5) Tullis J. P., 1979, "Modeling in Design of Pumping Pits," J. Hydr. Div., ASCE, Vol. 105(9), pp. 1053~1063.
- (6) Sweeney C. E., Elder R. A. and Hay D., 1982, "Pump Sump Design Experience: Summary," J. Hydr. Div., ASCE, Vol. 108(3), pp. 361~377.
- (7) Constantinescu G., and Patel V. C., 1998, "A Numerical Model for Simulation of Pump-intake Flow and Vortices," J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 124(2), pp. 123~134.
- (8) 이영호, 최장운, 1996, "PIV의 분류 및 원리", 대한 기계학회지 제 36권 12호, pp. 1146~1162.
- (9) Lee Y. H., and Choi J. W., 1996, "Development of Grey Level Cross Correlation Method in PIV," The Korean Society of Mechanical Engineers, KSME, Proceedings of the KSME 1996 spring Annual Meeting 2, pp. 336~400.