

펌프장의 흡입수조내 흡입관의 유동특성에 관한 PIV 측정

이영호* · 김유택** · 김정환*** · 최종웅***

A PIV Measurement on Flow Characteristics of Intakes within a Sump in a Pump Station

Key Word: PIV(입자영상유속계), Sump(흡입수조), Free surface(자유표면), Front side-wall(앞벽), back-wall(뒷벽), 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 in 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, side-wall and back-wall due to different clearances from back-wall to vertical in take pipe. Moreover, the locations and vorticities of the various types of vortices that were found in the examinations are discussed.

1. 서론

흡입수조내 흡입관 주위에서 발생하는 와는 펌프의 성능 저하와 불량한 운전상태 그리고 이로 인한 펌프의 유지 보수에 많은 비용을 초래한다. 흡입부에서 침전물의 흡입과 공기를 동반한 흡입이 없을 때의 설계가 가장 이상적인 설계이며, 이 때에 펌프의 작동은 원활하게 운전된다. 그러나 물 수위가 한계값 아래로 내려갈 때 와는 자유표면으로부터 발생하게 된다. 이러한 와들은 강한 공기의 흡입을 동반하며, 진동, 캐비테이션 그리고 일반적으로 펌프의 효율을 저하시킨다. 또한, 흡입수조의 바닥과 옆벽으로부터 발생하는 와는 침전물의 흡입을 동반한다. 만약 물 속에 이러한 강한 와들이 존재한다면, 이것은 흡입관 주위에서 선회류를

유발시키며 펌프 효율을 떨어뜨리는 주 원인이 된다. 특히 대형 펌프에서 이와 같은 유동형상은 심한 진동, 그리고 불안정한 운전상태를 유발하며, 심한 경우에는 펌프의 정지에까지 이르게 된다.

1940년에 Folsom에 의해 최적의 흡입수조가 처음으로 연구 되었으며, 1984년에 Padmanabhan과 Hecker가 흡입수조에 발생하는 와의 형태를 정의하여 흡입수조의 축척비율(1:1, 1:2, 1:4)에서 발생하는 와의 형태를 프로드 수에 의하여 분류하였다[1]. 그들은 이러한 축척비율인 스케일효과에 의한 와의 발생을 연구하여, 스케일 효과에 의한 와의 발생에 중요한 영향을 미치지 않는다는 사실을 발견하였다. 1998년에는 Rajendran 등에 의해 사각 채널안의 수직 흡입관을 포함한 흡입수조 내의 3차원 난류유동을 수치 해석하여 그 결

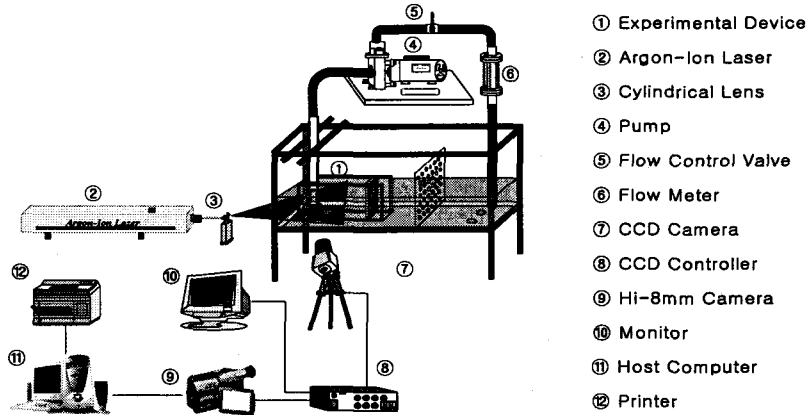


Fig. 1 Schematic view of the PIV system

과를 실험으로 분석하였다[2]. 2001년에 Lee가 흡입수조내의 자유표면과 자유표면 아래에서 발생하는 와의 거동을 가시화 하였다[3]. 이밖에 여러 연구자들에 의해 흡입수조의 설계 및 각종 연구가 진행되고 있다[4][5][6][7]. 흡입부에서 공기의 흡입과 선회류를 방지하기 위해서는 본질적으로 와의 구조, 위치 그리고 와도에 대한 연구가 필요하나, 아직까지는 흡입수조내 흡입부에서의 이러한 현상에 관한 본격적인 연구가 많지 않는 실정이다. 이러한 배경으로부터 본 연구에서는 뒷벽에서 흡입관의 거리에 따른 자유표면(free surface), 옆벽(front side-wall), 그리고 뒷벽(back-wall) 부근에 대한 유동패턴을 PIV기법을 이용하여 실험 해석하였다. 또한 자유표면에서 발생하는 와의 위치를 조사하였으며, Hacker가 정의한 와의 발생종류를 프로드 수에 따라 분류하였다. 그리고 와 발생시 와 중심에서의 와도 값을 정량적으로 구하여 그 와도 값을 비교 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 실험 장치도를 나타내고 있다. 가로 2m, 세로 1m, 폭이 1m인 대형수조 속에 수직 흡입관을 갖는 흡입수조를 만들어 설치하였다.

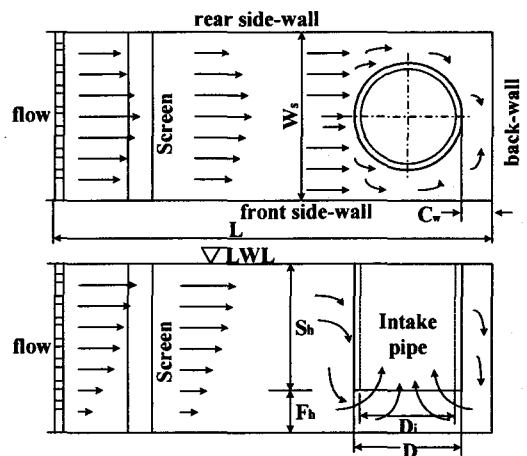
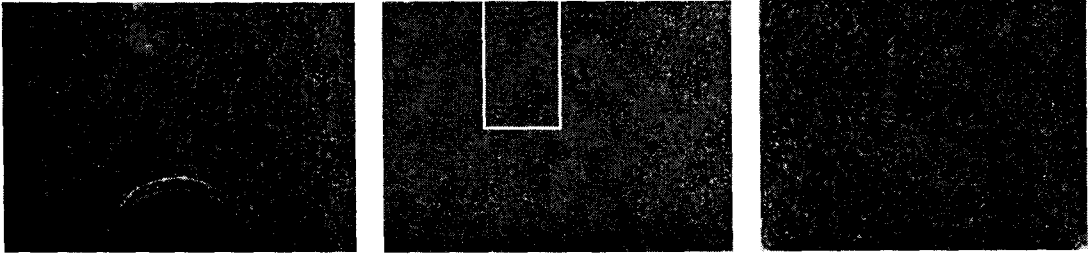


Fig. 2 Pump sump definition sketch

흡입수조는 내부의 유동장을 가시화 하기 위해 투명아크릴로 제작하였으며, 흡입수조 내의 흡입관으로 인한 산란광을 최소화하기 위하여 검은색 칼라 시트라이츠를 사용하여 영상의 잡음성분을 최소화하였다. 흡입수조내에서 흡입관까지 균일한 유입을 위해 정류관과 다공판을 설치하였고, 조명장치로는 최대 5W출력의 연속광 Argon-Ion 레이저를 이용하였으며, 원통형 렌즈를 통한 시이트 라이트는 두께 2mm 내외의 2차원 평면조명으로 유동장에 직접 조사하였다.

작동유체로는 상온의 수도수(15℃)를 이용하였다. 추적입자는 송화가루를 이용하였으며, 유동장의 기록을 위하여 CCD카메라(Sony사, XC77RR)



(a) Free Surface

(b) Front side-wall

(c) Back-wall

Fig. 3 Examples instantaneous original images ($W_s:2.5D$, $C_w:1.25D$, $S_h:1D$, $F_h:1D$)

Table 1 Experimental conditions and devices

	Item	Specification
Experimental Conditions	Intake Pipe Outer Diameter(D)	50mm
	Intake Pipe Inner Diameter(D_i)	40mm
	Sump Width(W_s)	$2.5D$
	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)	$1.0D$
	Sump Length(L)	$1.3D$
Visualization Equipment	Image Board	Miro-Video DC30 plus
	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	PentiumIII PC (500MHz)
	Calculation Time	30 sec/frame
	Number Data for Time-mean	200 Frames
	Identification	Two-Frame Gray-level Cross Correlation Algorithm
	Ratio of Error Vector	less 1%/frame

및 영상 입력기기를 배치하였다. Fig. 2는 실험에 사용된 흡입관 직경(D), 흡입관과 뒷벽 사이의 거리(C_w), 흡입구에서 수면까지의 거리(S_h), 흡입수조 바닥과 흡입구 사이의 거리(F_h)를 갖는 흡입수조의 규격을 나타내었다. 흡입수조의 너비는 $2.5D$ 이며, 길이는 $13D$ 이다. 실험조건과 제반실험장치는 Table 1과 같다.

2.2 실험 방법

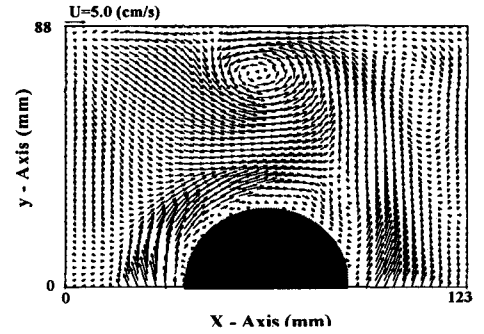
본 가시화 실험에 있어서는 먼저 유동장을 형성하고 유동장이 충분히 발달하면 약 70ml 정도 입자를 선별한 다음 정전기를 방지하기 위하여 계면 활성제를 소량 혼합하여 계측 직전에 수조에 투입하였다. 자유표면, 옆벽, 그리고 뒷벽 근처에 대하여 뒷벽으로 부터의 흡입관의 위치에 따른 4가지 조건($1.25D$, $1.0D$, $0.75D$, $0.5D$)에 대하여 실험을 행하였으며, 유량은 $0.0013\text{m}^3/\text{s}$, 관유속은 1.03m/s (관레이놀즈수 3.6×10^4)으로 일정하게 유지하였다. 유동장에서 획득한 영상은 다시 재생 과정을 거쳐 영상처리장치에 입력된다. 입력된 유동장은 아날로그 신호를 2차원의 디지털 영상정보로 바꾸어 주는 역할을 하는 영상 입력장치, Motion-JPEG 보오드(Miro-Video DC30plus, 24비트, RGB256 color)를 사용하여 영상을 호스트 컴퓨터에 저장하였으며[8], 각종 전처리 조작은 전용의 처리 소프트웨어(FlowInside 3.0)를 이용하였다.

Fig. 3은 자유표면, 옆벽, 그리고 뒷벽 근처에 대한 입의 순간영상을 나타낸 것이다. 속도벡터 추출을 위한 유동장의 영상처리에는 전처리 과정이 필요하며 다양한 기법들이 소개된다. 이 과정으로 잡음제거, 회전보정을 거친 다음 2차화된 영상으로 탐색반경을 결정 한 후에 유동장의 거동특성을 관찰하여 상관영역을

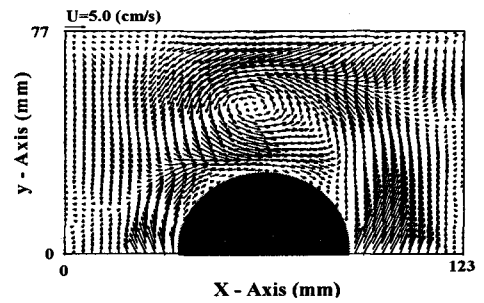
설정한다. 전처리 과정 중에 가장 큰 비중을 차지하는 것은 잡음제거에 있어 큰 효과를 얻을 수 있는 배경제거이다. 이것은 계측영역에서 입자를 제외한 고정물체를 제거하여 영상의 불필요한 부분을 최소화하며 처리 영상에 포함된 노이즈를 제거하기 위한 것이다. 이를 위하여 연속된 200개의 원시 영상의 계조치를 산술 평균한 다음, 실제로 처리하고자 하는 순간의 유동장으로부터 감산하는 방법을 택하였다. 잡음이 제거된 영상에 대해서 계측영역내 직선 윤곽선을 이용하여 CCD 카메라의 위치에 대한 회전보정을 행하였다. 전처리가 끝나면 계산영역을 설정하고 장애물처리를 하여 계조치 상호상관법[9] 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 뿐만 아니라 계산시간의 단축에도 결정적인 영향을 미친다. 속도벡터의 격자수는 각각의 조건에 대해 달리 하였으며, 탐색영역의 반경은 8픽셀로 하였다. 상관영역의 크기는 41픽셀이며, 하나의 순간유동장에 대한 처리시간은 기종(CPU 500MHz)에서 약 30초정도가 소요되었다. 원하는 영상을 얻기 위해 200개의 영상을 순차적으로 처리한 다음 산술평균하였다. 후처리 과정에서는 기록된 영상의 화질에 따라 발생한 고유의 에러성분인 이상치를 판별하여 과오벡터를 제거하는 에러제거, 격자점 재배치, pixel단위를 m/sec로 바꾸는 단위환산 등을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

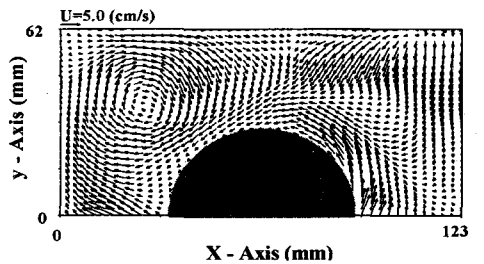
Fig. 4, 5 그리고 Fig. 6은 각 조건에 대하여 자유표면, 옆벽, 그리고 뒷벽 근처에 대한 200개 데이터의 시간 평균속도벡터이며, 와의 생성위치와 크기를 알 수 있다. Fig. 4에서는 흡입관과 뒷벽과의 거리가 가까울수록 와의 위치가 한쪽 모서리에서 발생하는 것을 관찰 할 수 있다. 또한 뒷벽으로부터 흡입관의 위치가 1.25D, 1.0D 떨어져 있을때는 와의 방향이 시계방향으로 회전하였으나, 0.75D, 0.5D에서는 반시계방향으로 와가 발생하는 것을 관찰 할 수 있다. 또한 뒷벽으로부터 흡입관의 위치가 1.25D, 1.0D 떨어져 있을때는 와의 방향이 시계



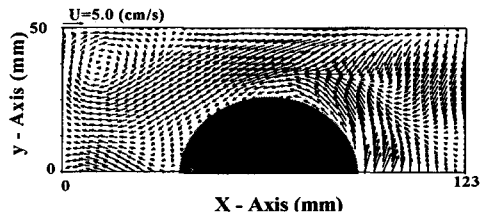
(a) $W_s:2.5D, C_w:1.25D, S_r:1D, F_r:1D$



(b) $W_s:2.5D, C_w:1.0D, S_r:1D, F_r:1D$

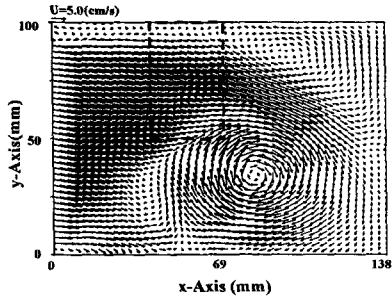


(c) $W_s:2.5D, C_w:0.75D, S_r:1D, F_r:1D$

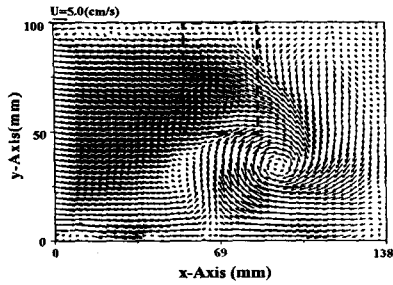


(d) $W_s:2.5D, C_w:0.5D, S_r:1D, F_r:1D$

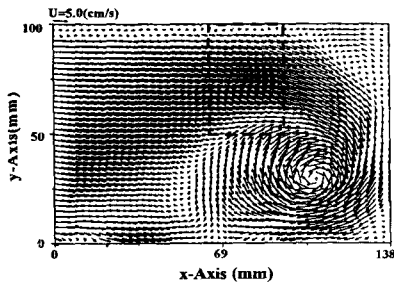
Fig. 4 Time-averaged velocity vectors of free surface



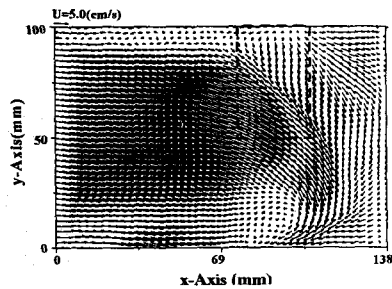
(a) $W_s:2.5D, C_w:1.25D, S_r:1D, F_r:1D$



(b) $W_s:2.5D, C_w:1.0D, S_r:1D, F_r:1D$

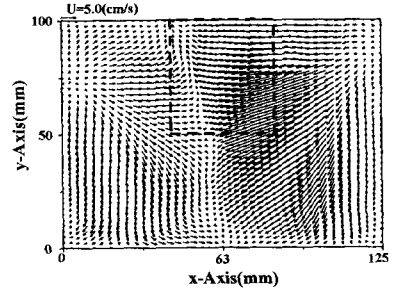


(c) $W_s:2.5D, C_w:0.75D, S_r:1D, F_r:1D$

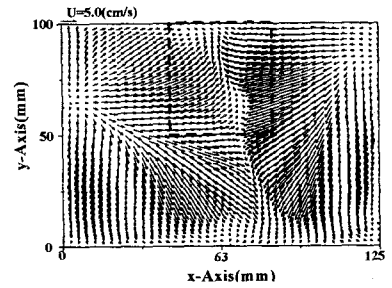


(d) $W_s:2.5D, C_w:0.5D, S_r:1D, F_r:1D$

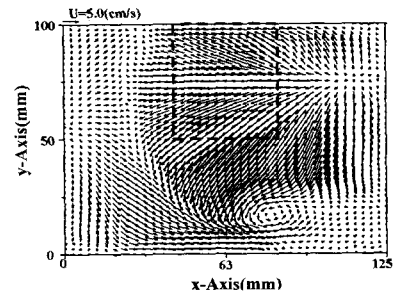
Fig. 5 Time-averaged velocity vectors of front side-wall



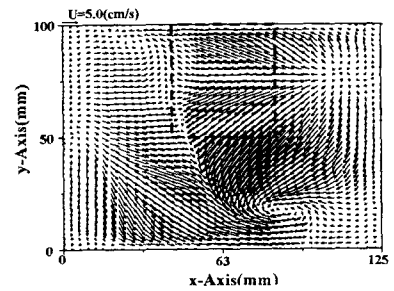
(a) $W_s:2.5D, C_w:1.25D, S_r:1D, F_r:1D$



(b) $W_s:2.5D, C_w:1.0D, S_r:1D, F_r:1D$



(c) $W_s:2.5D, C_w:0.75D, S_r:1D, F_r:1D$



(d) $W_s:2.5D, C_w:0.5D, S_r:1D, F_r:1D$

Fig. 6 Time-averaged velocity vectors of back-wall

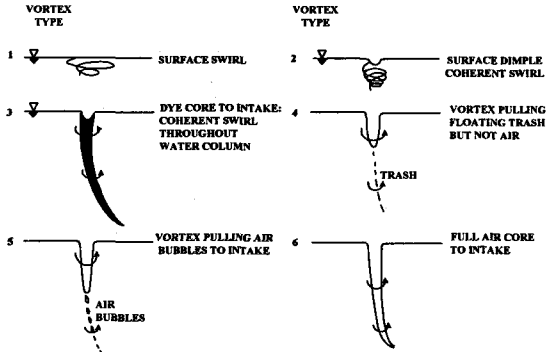


Fig. 7 Vortex type[Padmanabhan and Hecker]

방향으로 회전하였으나, 0.75D, 0.5D에서는 반시계방향으로 와가 발생하는 것을 관찰 할 수 있다. Fig. 5 은 흡입관의 위치가 뒷벽 쪽 가까이로 위치함에 따라 와는 흡입관 중심부에서 발생하지 않고, 흡입관의 한쪽 모서리 아래부분에서 발생하였다. 그리고 뒷벽으로 부터 흡입관의 위치가 0.5D일 때는 1.25D, 1.0D 그리고 0.75D에서 발생한 와와 같이 그 형태가 뚜렷하게 나타나지 않았으며, 거의 흡입관아래에서 약한 와가 발생하였다.

Fig. 6에서는 뒷벽에서 흡입관의 거리가 1.25D, 1.0D일 때는 와가 발생하지 않았으나, 0.75D, 0.5D일 때는 흡입관 주위에서 발생하는 선회류에 의해 와가 흡입관 아래쪽 모서리로 치우쳐 발생하는 것을 볼 수 있었다. 그리고 옆벽 부근에서 발생한 와가 자유 표면, 그리고 뒷벽 부근에서 발생한 와보다 그 형태가 뚜렷하게 나타나는 것을 관찰 할 수 있었다.

Fig. 7은 Padmanabhan과 Hecker가 정의한 일반적인 와 형태분류이고, Fig. 8는 Fig. 7의 발생하는 와의 형태를 본 실험에서 프로드 수($Fr = u/\sqrt{gs}$)에 따라 분류한 것이다. 프로드 수 0.3일 때는 흡입관 주위에서 부분적인 공기를 동반한 공기 흡입와가 발생하였으며 프로드 수 0.4 이상 일 때는 공기 기등을 동반한 공기 흡입와가 발생하였다. 이처럼 공기기등을 동반 와의 발생하에서 펌프의 운전은 펌프의 진동, 소음, 그리고 캐비테이션이 발생하며, 펌프의 효율이 저하된다.

Table 2는 흡입관의 위치가 뒷벽으로부터 1.25D, 1.0D, 0.75D, 0.5D일 때, 본실험에서 획득한 200개의 데이터를 평균한 와도값이며, 그 값을 절대치하여 그래프로 나타낸 것이 Fig. 9이다.

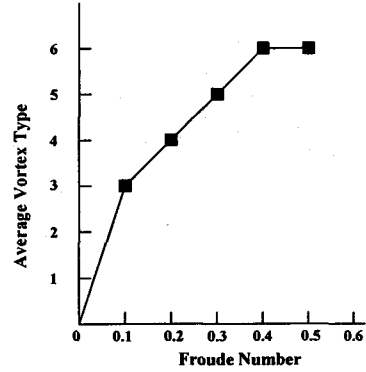


Fig. 8 Average vortex types on froude number

	free surface	front side-wall	back-wall
0.5D	-7.15	-7.2	12.0
0.75D	-8.27	-17.8	10.3
1.0D	10.88	-14.4	×
1.25D	11.11	-13.12	×

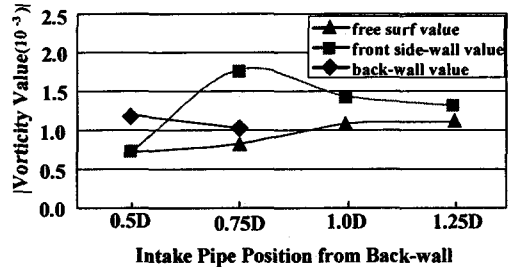


Fig. 9 Absolute Vorticity

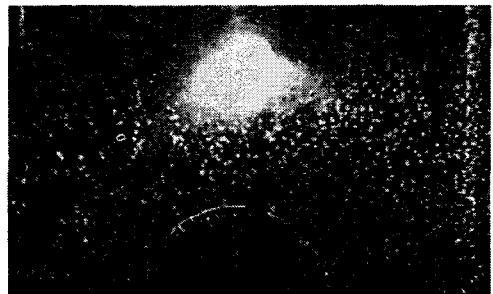


Fig. 10 Light Reflection at Bubble Surface

자유표면 근처에서는 흡입관의 위치가 뒷벽으로부터 0.5D에서 1.25D쪽으로 이동할수록 와도의 절대치 값은 커지며, 옆벽 부근에서는 와의 절대치 값이 커지다가

작아짐을 알 수 있다. 이는 흡입관으로 유입되는 난류의 성분으로 인한 것으로 여겨진다. 전체적으로 옆벽 근처에서 발생한 와의 절대치 값이 높게 나타났으며, 자유표면 근처에서 발생한 와의 절대치 값이 낮게 나타났다.

Fig. 10은 공기를 동반한 와가 형성될때의 순간 원시 영상이다. 공기에 의한 레이저 시트의 반사광이 심하여 많은 에러 벡터가 존재하게 된다.

4. 결론

본 연구는 수직흡입관을 뒷벽으로부터 위치를 달리 하였을 때, 자유표면, 옆벽, 그리고 뒷벽 근처에서 발생하는 유동패턴, 와의 위치, 그리고 와의 다양한 형태를 PIV기법을 사용하여 계측하였으며, 획득한 순간 유동장의 데이터를 이용하여 거시적이고, 정량적으로 유동구조를 검토하였으며, 그 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 자유표면 부근에서는 흡입관과 뒷벽과의 거리가 가까울수록 와의 위치가 한쪽 모서리에서 발생하였다.
- (2) 옆벽 부근에서는 흡입관으로 부터의 와의 위치가 거의 비슷한 지점에서 발생하였으나, 그 크기는 달랐다.
- (3) 프로드 수 0.4이상에서는 공기기동을 동반한 공기 흡입 와가 발생하였다.
- (4) 옆벽 부근에서 발생한 와도 값이 일반적으로 뒷벽, 그리고 자유표면 부근에서 발생한 와도 값보다 크게 나타났다.
- (5) 공기를 동반하 흡입와에 대한 빛의 반사를 해결하기 위하여 3-D PIV의 적용이 필요하다.

참고 문헌

- (1) Padmanabhan M.; 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.; 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.; 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.; Hay D. (1982) "Pump Sump Design Experience: Summary." J. Hydr. Div., ASCE, Vol.108(3), pp.361-377.
- (7) Constantinescu G.; 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) Lee Y. H.; Choi J. W.; Kim M. Y.; Kobayashi T. (1998) "Real Time Animation on PC from PIV Database.", Proc. of VSJ-SPIE98 Yokohama, pp.234-235.
- (9) Lee Y. H.; 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.