

## 펌프장 Sump 모델 시험기준 수립을 위한 실험연구

이영호\* · 김범석\*\* · 이동근\*\*\* · 오유미\*\*\*\*

### An Experimental Study on Standard Establishment of Sump Model Test in Pump Station

L. Y. Lee\*, B. S. Kim\*\*, D. G. Lee\*\*\* and Y. M. Oh\*\*\*\*

*Key Words* : Pump sump(펌프섬프), Standard(기준), Cavitation(캐비테이션), 자유표면보텍스(Fre Surface Vortex), 수중보텍스(Submerged Vortex), PIV

#### ABSTRACT

An experimental study to establish a standard of sump model test of pump station was implemented. Comparison of foreign standard was also performed. Configuration condition around a bell mouth suction intake was easily adjusted by 3-axis traversing system and partition allocation. Operational condition was also varied widely to give accurate test data. PIV was also introduced to produce quantitative analysis of flow field such as free-surface vortex and submerged vortex occurring in the model test. More detailed vortex behaviors were represented by PIV analysis.

#### 1. 서론

펌프장에서는 흡입수조의 형상에 따라 유동패턴이 변화하고, 자유표면에서 발생하는 공기흡입 보텍스(여기서는 자유표면 보텍스, free-surface vortex라고 부름)와 수중에서 발생하는 수중보텍스(submerged vortex)가 발생하여 이들이 벨마우스를 거쳐서 펌프에 유입하게 되면 소음과 진동발생의 원인이 되며, 펌프 임펠러까지 유입되면 캐비테이션에 의한 손상과 함께 펌프의 성능저하는 물론 및 양수불능상태까지 빠지는 문제를 초래한다. 이것은 펌프를 안전하게 또한 효율 좋게 관리하여야 하는 입장에서 보면 반드시 극복하여야 할 과제이다. 따라서, 흡입수조의 형상에 따른 유입 유로의 유동패턴과 벨마우스 주변의 형상조건, 그리고

유입수위, 펌프의 연합운전과 유량조절을 포함하는 제반 운전조건은 펌프의 성능에 커다란 영향을 미치므로 펌프장 설계에 있어서는 토목공학상의 지식뿐 만 아니라 이에 대한 유체역학적인 이해가 반드시 필요하다.

한편, 현장의 펌프장은 주변 여건에 따라서 다양한 형태를 가질 수가 있다. 따라서, 유체역학적으로 완전한 유로, 즉, 균일한 유입흐름을 보장하며 벨마우스간 간섭이나 편향 흐름을 발생하지 않는 이상적인 펌프장 형상구조가 설계단계에서부터 고려되어야 하며, 이러한 경우에는 보텍스의 발생이 억제되어 정상적인 펌프의 운전이 가능해진다. 한편, 현실적인 관점에서 펌프장 설계상의 경제성을 고려하여 보면 자유표면 보텍스가 발생하지 않는 최저수위(L.W.L)가 중요한 설계변수가 될 수 있고 여기에 따라서 결정된 벨마우스출구위 치로부터 펌프장 바닥까지의 거리도 수중보텍스 발생하지 않는 범위에서 가능하면 가까운 것이 바람직하다. 또한 취수원으로부터 벨마우스로 유입하는 유동이 가능하면 균일류가 되도록 주변격벽의 길이도 최적화하여 불필요한 설치면적을 줄이는 것이 요구된다. 나아

\* 한국해양대학교 기계·정보공학부

\*\* 한국해양대학교 기계·정보공학부 유동정보연구실

\*\*\* KOWACO, 수자원연구원

\*\*\*\* KOWACO, 수자원연구원

E-mail : lyh@mail.hhu.ac.kr

가 보텍스발생을 적극적으로 억제할 수 있는 장치 (anti-vortex device)의 도입도 필요하게 된다.

한편, 이러한 펌프장의 흡입수조(sump)에 대한 표준 작업이 외국에서는 오래전부터 시도되어 왔으며, 주로 미국의 HI기준, 유럽의 CEN기준, 그리고 일본의 TSJ 기준(1984년의 JSME기준을 2005년 개정)이 대표적으로 인용되고 있다<sup>(1)~(5)</sup>.

본 과제는 한국수자원공사의 펌프장 흡입수조 설계 기준을 수립하기 위한 것으로서 2004년에 유체기계공업학회 펌프분과에서 수행하였던 한국수자원공사의 신원동취수장 펌프장에 대한 선편모델시험 연구<sup>(6)</sup>를 시발점으로 하고 있다. 과제의 주요목적은 대부분의 펌프장이 착수정과 흡수정으로 구분된 특징을 갖는 수자원공사의 선편에 대하여 흡수정의 형상에 따라서 이들을 크게 개방형, 밀폐형, 마운드형으로 구분하고 여기에 적용할 수 있는 표준적인 형상조건을 수립하는 것이다. 이를 위하여 형상조건을 쉽게 가변할 수 있는 실험장치를 제작하였고 펌프의 연함운전은 최대 3대까지 가능하도록 하였다.

각 운전조건 및 형상조건에 대하여 가시화 보텍스를 이용한 보텍스 판정기준을 도입하면서 이들 보텍스의 발생 메커니즘을 정량적으로 파악하기 위하여 PIV 실험기법<sup>(7)</sup>으로 도입하였다. 여기에서는 실험초기단계에서 고려될 수 있는 제반사항을 검토하였고 실험방법 및 결과의 일부를 소개하는데 목적이 있다.

## 2. 외국기준 및 용어 정의

### 2.1 보텍스의 정의

Fig.1은 ANSI/HI에서 정의하는 보텍스의 종류이다. HI에서는 자유표면 보텍스의 경우, 10분이상의 관찰시간 동안 type3의 dye core 보텍스 발생시간이 관찰시간의 1/10이하이면 발생을 허용하며, 수중보텍스인 경우에도 마찬가지로 type2의 dye core 보텍스 발생시간이 관찰시간의 1/10이하이면 발생을 허용하고 있다. 새로 개정된 TSJ(일본터보기계협회)기준에서는 예를 들어, 상수도용펌프에서, 자유표면 보텍스의 경우에는 관찰시간 5분간 dimple 보텍스(type2) 및 2회이내의 단속 보텍스는 허용하고 있다. 그러나 수중보텍스는 10분간의 관찰시간 동안 발생을 전혀 허용하지 않는다.

### 2.2 기준비교

Fig.2는 본 과제에서 대상으로 하고 있는 선편모델

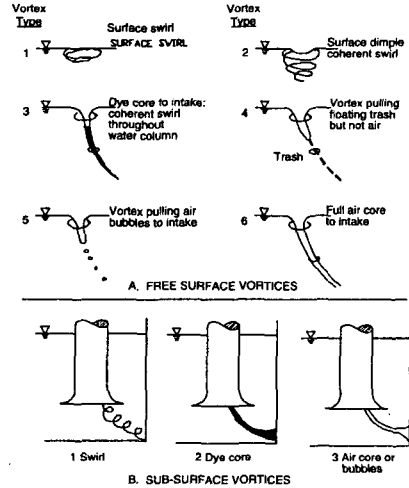


Fig.1 Definition of vortex in ANSI/HI

의 형상조건의 개요이다. Fig.2의 윗 그림과 같이 벨마우스 주변의 측벽유무에 따라서 개방형과 밀폐형, 그리고 유입점근로에 돌출부가 추가된 마운드형으로 구분된다. 표1은 Fig.2와 같이 정의된 형상조건에서 현재까지 공표된 외국기준을 비교한 결과이다.

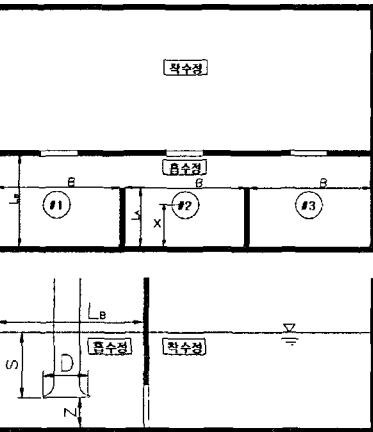
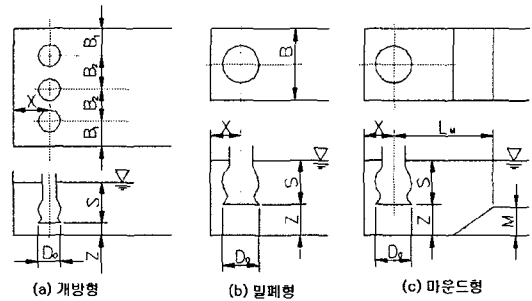


Fig.2 Definition of configuration condition

표 1 외국기준비교

\* 벨마우스 직경 : D<sub>0</sub>

구 분	JSME	HI	CEN
흡수정폭 B/D <sub>0</sub>	2.0~2.5 (밀폐, 개방, 마운드)	2.0	2.0
펌프실벽거리 X/D <sub>0</sub>	0.8~1.0 (밀폐, 개방, 마운드)	0.75	0.75
벨마우스바닥 높이 Z/D <sub>0</sub>	0.5~0.75 (밀폐, 개방, 마운드)	0.3~0.5	0.5
벨마우스 격벽거리 LA/D <sub>0</sub>	≥8.0	≥5.0	동시운전, ≥2.0 부분운전, ≥4.0
흡수정-착수정거리 LB/D <sub>0</sub>	-	-	-
개방형 벨마우스간 거리 B2/D <sub>0</sub>	2.0~2.5	-	-
개방형 벨마우스측벽거리 B1/B2	0.5	-	-
마운드 거리 LM/D <sub>0</sub>	≥6.0	-	-
마운드 높이 M/D <sub>0</sub>	≤0.8	-	-
자유표면보텍스 물수깊이 S/D <sub>0</sub>	(상수도펌프 기준) 밀폐, 개방형 ≥1.3 마운드형 ≥1.4	1 + 2.3FD	1.0~1.5
벨마우스 직경	100mm 이상(모델)	80mm이상(모델)	1.5x펌프입구경(실기)
벨마우스 접근유속	최대 0.5 m/s (8D <sub>0</sub> 상류이상)	최대 0.5 m/s (5D <sub>0</sub> 상류이상)	최대 0.5 m/s (4D <sub>0</sub> 상류이상)
벨마우스 입구유속	-	1.7m/s(추천)	-
모델시험 유속조건	- 수중보텍스: 유속일치 - 자유표면보텍스: 중간유속, n=0.2) - TSJ와 동일	- Froude수 일치 - 벨마우스 입구 레이놀즈수 ≥6x10 <sup>4</sup>	-
보텍스발생 허용기준	(TSJ의 상·하수도용 송수펌프기준, Class II) - 자유표면보텍스: 5분관찰, dimple vortex 및 2회까지의 단속보텍스는 허용 - 수중보텍스: 10분관찰, 발생 불허용	- 자유표면 보텍스: 10분이상관찰, dye core(type3)가 관찰시간의 1/10 이하 허용 - 수중보텍스: 10분 이상관찰, dye core (type2)가 관찰시간의 1/10 이하 허용	-

### 3. 실험

#### 3.1 모형실험에서의 유속조건

##### 1) Froude수(Fr) 일치조건

완전한 자유표면상에서의 유동상사조건을 만족시키기 위하여는 모형수조와 원형수조의 식(1)의 Froude수(Fr)를 일치시켜야 한다. Froude수(Fr)는 유체의 관성력과 중력의 비에 대응하는 무차원수이며, 자유표면의 상태는 Froude수에 의해서 지배된다.

$$Fr = \frac{V_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{V_p}{\sqrt{gL_p}} \quad (1)$$

여기서, V<sub>m</sub> : 모형 벨마우스 유입속도

L<sub>m</sub> : 모형 벨마우스 직경

V<sub>p</sub> : 실기 벨마우스 유입속도

L<sub>p</sub> : 실기 벨마우스 직경

g : 가속도

따라서, 흡수정모형 벨마우스의 유입속도는 모형비 1/10에 대하여 다음 식(2)로 구해지며, 유입유량은 식(3)으로 구해진다.

$$V_m = V_p \times \left( \frac{L_m}{L_p} \right)^{0.5} = \left( \frac{1}{10} \right)^{0.5} \times V_p \quad (2)$$

$$Q_m = Q_p \times \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{2.5} = \left(\frac{1}{10}\right)^{2.5} \times Q_p \quad (3)$$

식(3)은 식(2)에서 유도되며, 아래와 같은 요령으로 구해진다.

$$V_m = \left(\frac{1}{10}\right)^{0.5} \times V_p \rightarrow \frac{Q_m}{A_m} = \left(\frac{1}{10}\right)^{0.5} \times \frac{Q_p}{A_p}$$

$$Q_m = \left(\frac{1}{10}\right)^{0.5} \times \frac{A_m}{A_p} \times Q_p = \left(\frac{1}{10}\right)^{0.5} \times \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^2 \times Q_p \\ = \left(\frac{1}{10}\right)^{2.5} \times Q_p$$

여기서,  $Q_m$  : 모형 유량,  $Q_p$  : 실기 유량

위의 조건은 흡수정의 자유표면의 흐름상태의 상사 조건을 만족시키는데 적용된다.

## 2) 중간유속 일치조건

자유표면 보텍스(free surface vortex)는 자유표면으로 부터 펌프 흡입 벨마우스입구까지 연결되어 있는 보텍스이다. 따라서, 자유표면보텍스의 성장 및 감쇄는 자유표면의 유동뿐만이 아니고 수중에서의 유동으로부터도 영향을 받는다. 그 결과, 자유표면 보텍스의 상사 법칙이 점도(레이놀즈수)나 표면장력(웨버수)과도 연관이 있게 되며, 순수하게 Froude수만을 가지고 상사법칙을 만족시킬 수가 없게 된다. 즉, 자유표면의 유동상태를 지배하는 Froude수(Fr)는 점도 또는 레이놀즈수에 대한 영향이 고려되어 있지 않으므로, 일본기계학회(JSME)나 일본터보기계협회(TSJ)에서는 실험을 통한 경험식으로서 식(4)와 같은 중간유속(Froude수(Fr)와 유속일치의 중간속도)개념을 채택하고 있다.

$$Q_m = Q_p \times \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{2.2} = \left(\frac{1}{8}\right)^{2.2} \times Q_p \quad (4)$$

$$V_m = V_p \times \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{0.2} = \left(\frac{1}{8}\right)^{0.2} \times V_p$$

## 3) 유속일치조건

수중보텍스(submerged vortex)는 펌프흡입 벨마우스 주위의 유속에 의하여 발생된다. 따라서, 실기와 모형 벨마우스에서 동일한 유속 조건이 되도록 하여 수중보텍스 발생유무를 실험한다.

$$Q_m = Q_p \times \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{2.0} = \left(\frac{1}{8}\right)^{2.0} \times Q_p \quad (5)$$

$$V_m = V_p \quad (5)$$

## 3.2 실험장치 제작

Fig.3은 실험장치를 3차원적으로 도시한 그림이다. 벨마우스 직경은 120mm로 하였고 투명 아크릴로 제작하였다. 벨마우스로 연결된 펌프흡입관은 직경이 80mm이며 플렉서블 비닐튜브에 연결되어 있으며, 3축 트레이스장치에 의하여 벨마우스의 위치를  $\pm 1\text{mm}$ 의 오차범위에서 자유롭게 상하좌우 및 전후로 이동하도록 하였다. 전체유량은 디지털전자식 유량계로 측정하였다. 순환펌프는 최대유량이 5.1m<sup>3</sup>/min인 인라인 원심펌프이며 보조펌프는 수위조절 및 순환펌프 기동시 프라임용으로 이용된다. Fig.4는 실험장치 사진이며 Fig.5는 레이저 조명을 비춘 벨마우스의 근방의 모습이며, Fig.6은 벨마우스 근처에서 발생한 수중보텍스를 나타내고 있다.

## 3.3 PIV실험

종래의 모형실험은 보텍스 발생판정 여부를 목측 또는 비디오로 기록된 유동장을 재생하여 기준시간당

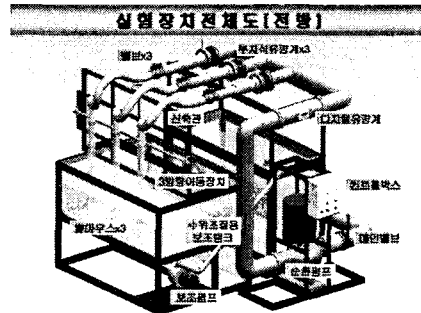


Fig.3 Arrangement of Experimental System

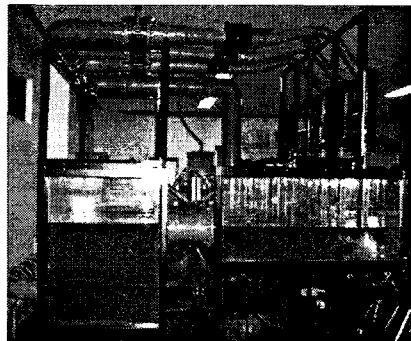


Fig.4 Photo of Experimental Apparatus

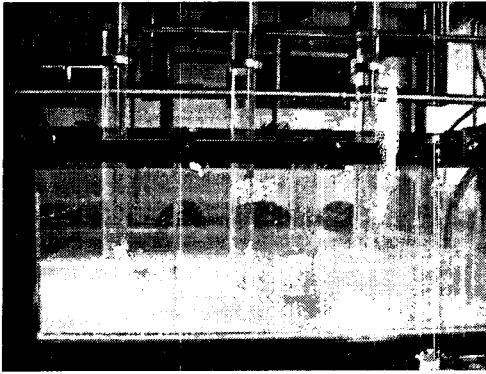


Fig.5 Laser illumination of bell-mouth

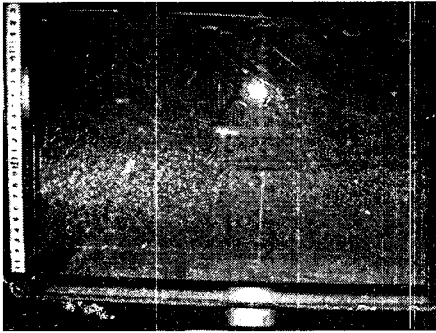


Fig.6 Visualization of bell-mouth and submerged vortex

보텍스 발생빈도로 판정하고 있다. PIV실험에서도 이와 같은 정성적인 판정이 가능하며, 나아가 보텍스가 발생하는 정확한 위치, 보텍스 강도, 보텍스 중심위치의 궤적, 보텍스의 크기 등이 정량적으로 계산되며, anti-vortex device 설치 전후의 유동장 속도 변화, 유입유로의 비균일 속도분포 특성이 미치는 영향 등이 정량적으로 해석이 가능해진다. 따라서, 보텍스 발생 메커니즘의 유체역학적 해석이 원리적으로 가능함으로써 흡수정 최적모델 결정을 위한 유체역학적 근거의 제시에 유리한 장점이 있다.

본 실험조건은 다음과 같다. 순환펌프는 인라인 원심펌프이며 벨마우스 연결관의 직경은 80mm이며 이곳에서의 유속은 1.3 m/sec로 하였다. 벨마우스 벨브는 3개 모두 전개하였으며, 형상조건으로서 벨마우스와 전면벽거리는 1.5D(D는 벨마우스 직경), 벨마우스와 측면벽거리는 2.0D, 벨마우스와 바닥벽거리는 0.8D, 벨마우스의 측면벽거리는 4.0D, 벨마우스와 자유표면과의 거리는 1.0D, 흡수정 길이폭은 6.0D로 하여 계측한 결과이다. PIV에서는 조명용 레이저로서 200mW의 아르곤

이온 반도체 레이저를 이용하였으며, 시이트라이트의 두께는 2mm, 추적입자는 PVC재질로서 평균직경이 100미크론 전후이다. 입력 카메라는 고속도카메라(Photron FASTCAM PCI 1024, 1024(H) x 1024(V) pixel)를 이용하였으며, 셔터스피드는 1/500초(500 fps)이며, 렌즈는 f 1.2 NIKON 52mm이다. Image memory는 1GB이며 시간평균 frame 수는 500 frames이다. PIV의 상호상관계수 계산알고리즘은편의상 FFT를 채택하였으며, 상호상관 계산영역 크기는 24pixel x 24pixel, 상호상관계수 최대 탐사거리는 41pixel로 하였다.

### 3.4 수중보텍스 계측

Fig.7은 수중보텍스 발생시의 순간속도벡터 그림이다. PIV계측은 2차원이나, 발생하는 수중보텍스구조는 3차원으로서 바닥의 발생위치를 중심으로 강한 선회류를 형성하며 벨마우스로 유입하는 상태에서의 결과이다. 따라서, 벨마우스 유입시의 수중보텍스에 대한 완벽한 3차원 계측이 요구되나, 현재의 가장 앞선 PIV 기술로서도 매우 어려운 계측조건이다. 색깔중 붉은색이 빠른 속도벡터를 나타내며, 좌측상단의  $U=1.0$  m/sec는 이 그림에서의 대표속도를 나타내는 벡터표시이며, 여기에서의 벡터길이에 해당하는 속도(1.0 m/sec)를 기준으로 유동장 내부에 존재하는 속도벡터의 상대적인 크기를 알 수 있다. 같은 요령으로 벡터의 크기를 색으로 나타낼 경우 참조색은 우측의 b-형태로 제시된다. Fig.8은 Fig.7과 같은 순간속도벡터를 500프레임 시간평균한 결과를 나타낸다. 이러한 결과는 시간평균 CFD결과와의 비교에 이용될 수 있다.

Fig.9는 Fig.8의 시간평균 속도벡터를 이용하여 x, y 축에 대한 대표선상의 2차원 속도벡터를 나타낸 속도 프로파일(profile)이다. 이러한 그림은 보텍스의 구조를 이해하는데 편리하다. 특히, 벨마우스에 유입되는 속도 분포의 균일성(uniformity)를 잘 표시한다.

Fig.10은 Fig.8의 시간평균 속도벡터를 이용하여 2차원 운동에너지의 분포를 색깔로 나타내고 있다. 운동에너지의 크기는 국소적인 유량값과 비례하며 이 값이 큰 붉은 색 영역은 유속이 크며 벨마우스로의 유입 유량이 큰 부분임을 표시한다.

Fig.11은 Fig.8의 속도벡터를 이용하여 회전흐름의 크기를 나타내는 물리량인 와도(渦度, vorticity)의 크기를 색깔로 표시한 그림이다. 편의상 반시계방향의 와도값은 붉은 색으로, 시계방향의 와도는 푸른 색으로 표시한다. 이 와도 값이 벨마우스 좌우의 유입부에

집중된 것은 이 부분에서의 유입방향의 속도벡터

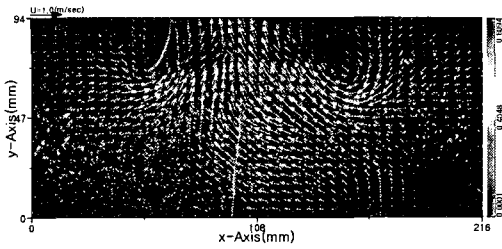


Fig.7 Instantaneous velocity vector

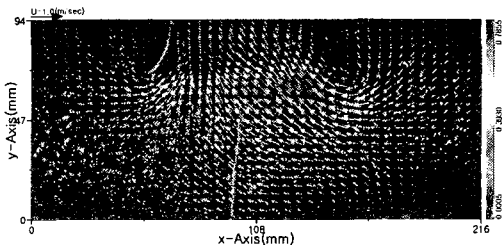


Fig.8 Time-averaged velocity vector

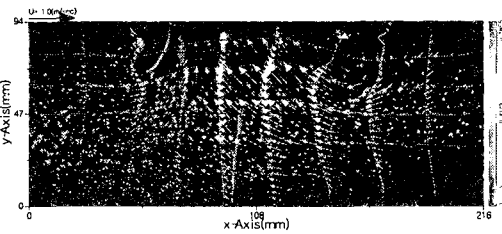


Fig.9 Time-averaged velocity profile

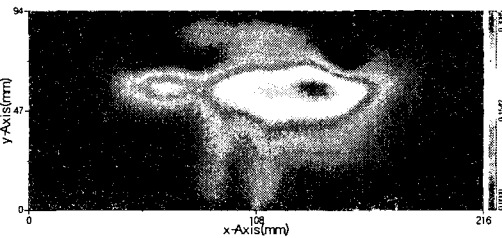


Fig.10 Time-averaged kinetic energy

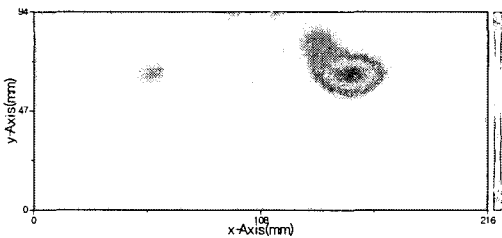


Fig.11 Time-averaged vorticity

분포 형태가 곡선을 이루기 때문이다(Fig.8참조). 향후 이러한 와도분포나 최대 와도값은 점프유동장의 보텍스의 유체역학적인 해석상 매우 중요한 유동정보량으로서 활용될 것이다. Fig.12는 수중보텍스가 발생할 때의 점프바닥면에 접근한 2차원 단면에서의 속도벡터분포를 나타내고 있다. 카메라는 실험실 바닥에 설치되고 렌즈가 벨마우스를 바라보면서 상방으로 유동장을 촬영한 결과이다. 이 경우에는 반시계 방향의 강한 수중 보텍스가 발생하고 있는 상태이다. Fig.13은 시간평균 속도벡터 분포이며, 왼쪽에서의 유입흐름이 매우 강한 특성을 나타내고 있다. 이러한 시간평균 속도벡터와 앞의 순간속도벡터분포를 비교하여 보면 속도의 공간분포에서 매우 큰 차이가 나타나고 있다.

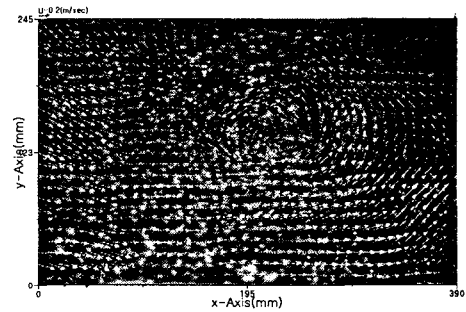


Fig.12 Instantaneous velocity vector(bottom)

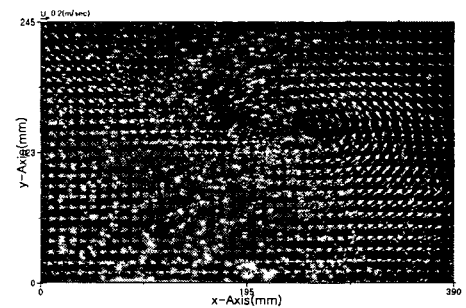


Fig.13 Time-averaged velocity vector(bottom)

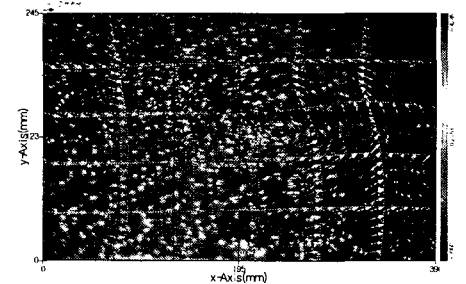


Fig.14 Time-averaged velocity profile(bottom)

## 후기

이 연구는 유체기계공업학회 펌프분과가 주도하여 수행하고 있는 한국수자원공사의 「PIV 유동실험에 의한 최적 흡수정 모델 제시 용역 연구」 중 일부결과임을 밝힌다.

## 참고문헌

- (1) American National Standard for Pump Intake Design, 1998. Hydraulic Institute,
- (2) CEN Report CR13930 Rotodynamic pumps, 2000, "Design of pump intakes-Recommendations for installation of pumps," European Committee for Standardization.
- (3) 1995, "Guidelines for Design of Intakes for Hydroelectric Plants," American Society of Civil Engineers
- (4) 일본터보기계협회, 2005, "펌프 흡입수조의 모형시험방법," TSJ S 002:2005.
- (5) 일본기계학회, 1984, "펌프 흡입수조의 모형시험법," JSME S 004:1984.
- (6) 최종웅, 2003, "PIV에 의한 펌프장 흡입수조내 흡입관 주위의 유동특성에 관한 연구," 한국해양대학교 대학원 기계공학과, 석사학위논문.
- (7) 유체기계공업학회 펌프분과, 2004, "연구용역보고서-모형실험을 통한 흡수정 형상결정 설계방향 수립," 수자원공사.

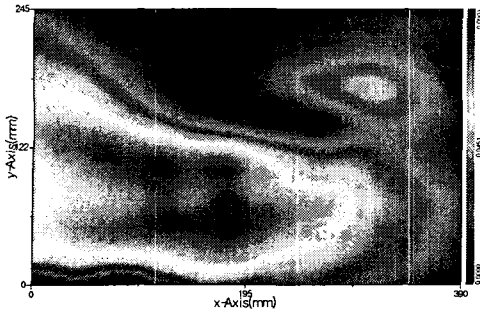


Fig.15 Time-averaged kinetic energy(bottom)



Fig.16 Time-averaged vorticity(bottom)

결국 수중보텍스를 발생시키는 유동장의 본질적인 특성은 3차원의 난류, 비정상성(unsteadiness)이며 보텍스의 발생중심도 시간에 따라 움직이거나, 단속적으로 발생한다.

Fig.14는 시간평균 속도프로파일이며, Fig.15는 시간평균 운동에너지, Fig.16은 시간평균 와도분포를 각각 나타내고 있다.

## 4. 결론

한국수자원공사의 펌프장 심프모델 기준수립을 위한 외국기준의 검토 및 모델실험을 위한 형상조건 및 운전조건을 검토하였다. 또한 유동패턴을 정량적으로 분석하기 위한 PIV기법을 도입하여 계측예를 제시하였다. 실험장치는 다양한 형상조건을 만족시킬 수 있는 가변형으로 제작하여 체계적인 데이터의 확보가 가능하도록 하였다. 향후 CFD의 적용 및 ISO 등 국제기준으로의 확장을 염두에 둔 다양한 연구가 필요하다.