

수리모형실험을 통한 펌프 흡입배관부 보텍스 현상 저감방안

안인수* · 김성호* · 김경엽** · 노형운*** · 이영호****

The plan of depreciation vortex developing a Pump suction pipes through Sump model test

IS Ahn*, SH Kim*, KY Kim**, HW Roh***, YH Lee****

Key Words : Pump Station(펌프장), Sump(흡수정), Vortex(渦), PIV(입자영상유속계), Anti-Vortex Device(보텍스 방지장치)

ABSTRACT

In general, the function of intake structure, whether it be a open channel, a fully wetted tunnel, a sump or a tank, is to supply an evenly distributed flow to a pump station. An even distribution of flow, characterized by strong local flow, can result in formation of surface or submerged vortices, and with certain low values of submergence, may introduce air into pump, causing a reduction of capacity and efficiency, an increase in vibration and additional noise. This study investigated experimentally the formation of the vortex to understand the mechanism of vortex formation and to prevent the formation of vortex in the sump model using by the model test and PIV tool. Sump model was manufactured to 1/8 scale with the drawing of W intake pumping station. From the results of model test and PIV, the vortex were occurred the in the whole section. Thus, sump model tests with the anti-vortex device might be considered to prevent the formation of vortex in the sump model.

1. 서론

펌프설비를 운전하다 보면 캐비테이션 현상, 수격현상, 서징현상 등이 나타난다. 이 중 캐비테이션의 발생은 펌프 성능을 저하시키거나 불안정한 운전을 초래할 수 있기 때문에 펌프관련 연구자들은 많은 관심을 가지고 대책을 수립하고 있다. 캐비테이션 현상의 발생 원인은 여러가지가 있지만, 최근 많은 관심을 보이고 있는 흡입수조내 흡입관 주위에서는 보텍스(vortex)가 물의 흡입과 동시에 공기의 흡입으로 인하여 캐비테이션 현상이 발생된다. 이러한 보텍스는 흡입면의 자유표면으로부터 발생하게 되고, 흡입수조의 형태에 따라

크게 좌우된다.

펌프장내 Sump(흡수정) 주위의 유동과 관련된 연구는 해외에서는 오래 전부터 시작되어 수치해석과 실험방법의 급격한 발전 덕분에 여러가지 결과가 제시되었다⁽¹⁻⁵⁾. 1998년 Rajendran은 사각채널 안의 수직 흡입관을 포함한 흡입수조내의 3차원 난류유동을 수치해석하고 PIV(Particle Image Velocimetry)실험으로 해석하였다⁽²⁾. 국내에서는 2001년 이영호에 의하여 흡입수조내의 자유표면과 자유표면 아래에서 발생하는 보텍스의 거동을 PIV실험으로 유동가시화하려는 시도가 있었으며 현재 활발한 연구활동 중에 있다⁽³⁾.

흡수정(sump)에 관한 해외 펌프관련 규격인 HI규격(미국수력학회규격)⁽¹⁾이나 ISO규격과 펌프관련 전문서적들에서는 이러한 현상을 미리 예측하여 대처방안을 제시하고 있으나 이는 단지 추천치수이며, 시방서에 명기가 없으면 펌프 Maker의 경험에 의한 Data를 바탕으로 각각 다르게 치수를 결정하고 있는 실정이다. 또한 국내에서는 이에 관한 전문지식을 가지고 있는

* 한국수자원공사 수도시설처
ahnis@kowaco.or.kr
** 한국산업기술대학교 기계공학과
*** IVAI Consulting
**** 한국해양대학교 기계·정보공학부

사람이 드물고, KS규격도 매우 간단한 것만 기술되어 있다. 이에 따라, 펌프를 설치한 상태에서 보텍스 발생이 관찰되면 구조물이 이미 완성된 상태이므로 보텍스를 줄일 수 있는 대책을 강구하기가 어렵다.

펌프장 흡입수조에서 발생하는 보텍스에 의해 펌프 성능 저하 및 소음진동 발생 등 운영조건에 악영향을 미치게 되므로, 펌프운전 사전에 Sump Model Test와 PIV 방법을 수행하여 보텍스 발생여부를 검증하고 적절한 보텍스 방지장치(Anti-Vortex Device)를 설계함으로써 수도사업장 운영관리의 안정성을 확보코자 하며 시험 검증된 결과를 기반으로 흡수정의 형상결정을 위한 설계 방향을 수립하는 것이 주요 목적이다.

2. 운영중인 펌프장 현장 조사

운영중인 펌프장에서 보텍스의 발생여부를 확인하기 위하여 한국수자원공사에서 관리하고 있는 광역상수도의 취수펌프장, 가압펌프장 및 정수장 송수펌프장 중 P취수장, BY취수장, BP취수장, G관리단, W취수장을 선택하였다.

상기 취수장 대부분의 흡수정 구조가 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 유체역학적으로 보텍스를 발생시키는 구조를 가지고 있음을 알 수 있었다. 이렇게 발생된 구조는 Fig. 2에서 보는 것과 같이 보텍스가 매우 크게 형성되고 있음을 알 수 있었다.

그러나 G관리단의 흡수정의 형태는 Fig. 1과는 달리 흡입구와 수문이 일직선으로 되어 있는 토목구조를

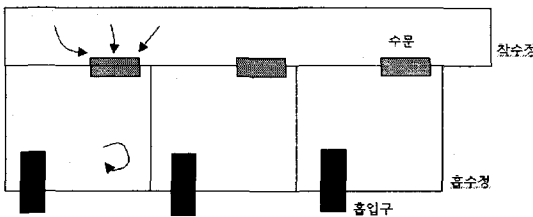
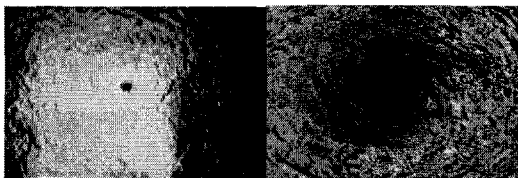


Fig. 1 Schematic diagram of the structure of sump station



(a) P intake pump station (b) BP intake pump station

Fig. 2 Occurred vortices in the sump at the several intake pump stations

가지고 있어 보텍스 발생이 비교적 적었음을 알 수 있었다. 이는 토목구조물의 설계가 펌프특성에 따른 흡수정 내의 유동장을 고려하여 볼 때 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

3. Sump 수리모형 시험

본 수리모형 시험은 부적합한 펌프수조형상 및 제반운전조건에 기인하는 펌프수조내의 각종 보텍스의 [공기흡입보텍스(air-entraining vortex), 수중보텍스(submerged vortex)] 발생여부를 실험을 통하여 검증하고, 이에 상응하여 시험을 통하여 적절한 보텍스 방지장치를 제시함으로써 펌프수조의 건전성을 확보하는데 그 목적이 있다. 본 실험은 (주)효성에바라에서 수행하였으며 시험시 기존 흡수정에 설치되어 있는 보텍스 방지장치가 구성되어 있는 조건으로 시험을 수행하며, 3가지의 유형별 시험조건에 의해 시험을 수행하여 건전성 여부를 검증한다. 시험기준은 JSME S 004-1984 (일본기계학회 기준, 펌프흡입수조의 모형시험법)을 토대로 하였다⁽⁶⁾.

3.1 펌프설비 제원

W취수장에 사용중인 원형펌프의 사양은 아래와 같다.

- 1) MODEL : Horizontal Double Suction Type
- 2) MOTOR : 1,170kW × 3,300V
- 3) PUMP 제원

	Unit	Operating point	Max flow rate
Flow rate	m ³ /hr	4,422	5,500
Head	m	75	62

3.2 상사의 원리

일반적으로, 수리모형 시험에 있어서는 다음 세가지의 상사원리가 적용된다. [모델비 : 1/8 (모델수조와 원형수조는 기하학적 상사를 이룬다)]

3.2.1 Froude수(Fr) 일치

모델수조와 원형수조의 Froude수(Fr)는 일치되어야 한다. Froude수(Fr)는 유체의 관성력과 중력의 비에 대응하는 무차원 수이며, 자유수면의 상태는 이 Froude수에 의해서 지배된다.

3.2.2 중간유속 일치

공기흡입보텍스는 자유수면으로부터 펌프 흡입관까

지 연결되어 있는 보텍스이다. 따라서 공기흡입 보텍스의 성장 및 감쇄는 자유수면의 유동뿐만이 아니고 수중의 유동에도 영향을 받는다.

이는, 공기 흡입와류의 상사법칙이 점도와 관계가 있음을 예시한다. 그러나 자유수면의 유동상태를 지배하는 Fr수는 점도에 대한 영향이 고려되어 있지 않으므로, JSME에서는 경험식으로서 중간유속(Fr수와 유속일치의 중간속도)을 채택하고 있으며, 공기 흡입 보텍스 시험시 이 중간유속을 사용하여 시험하였다.

3.2.3 유속일치

수중 보텍스는 펌프 흡입관 주위의 유속에 의하여 발생하는 것으로 간주된다. 그러므로 실기와 모형펌프가 동일한 유속 조건이 되도록 하여 수중보텍스를 시험하는 것이 요구된다. 이 상사는 수중와류를 검증하는 원리로서 적용된다.

3.3 시험결과의 기준

흡입수조의 모형시험은 발생하는 보텍스의 형태를 조사, 보텍스 방지대책의 필요성 유무의 관점과, 보텍스방지대책 후의 효과검증 등을 행하는 경우에는 다음에 나타내는 허용기준에 의해 시험 결과를 평가하는 것으로 한다.

가. 운전중 타 기기와의 관련으로 양수 중에 공기의 혼입이 발생해서는 안된다. 따라서 중간유속 조건에서 표면 수축이 발생하는 것은 허용되지만 PUMP 흡입관으로 공기가 유입 되어서는 안된다. 경험적으로 모형과 실기 PUMP 흡입관의 크기의 비가 0.2 이하일 때 공기의 유입이 없으며, 이를 허용기준으로 추천한다.

나. 수중보텍스의 경우 진동, 소음의 원인으로 되는 경우가 예측되므로, 펌프의 진동, 소음을 고려하여 공동을 수반하는 수중보텍스가 관찰되는 경우는 허용되지 않는 것으로 한다.

3.4 수조모델과 실험조건

수조모델 실비는 원형수조의 모델비(1/8)로 축소 제작되어 원형수조와 기하학적 상사성을 갖도록 하였다. 모델시험은 각각 LWL, HWL 조건으로 유량비에 따라 유량을 산정하여 수행되며, 각각의 유량에서 수위를 변경해 가면서 Fr 일치, 중간 유속, 유속일치에 대하여 수리 모형시험을 수행하였다.

시험설비의 배열은 시험설비 시스템 구성도(Fig. 3) 및 시험설비 치수도(Fig. 4)에 예시되어 있다.

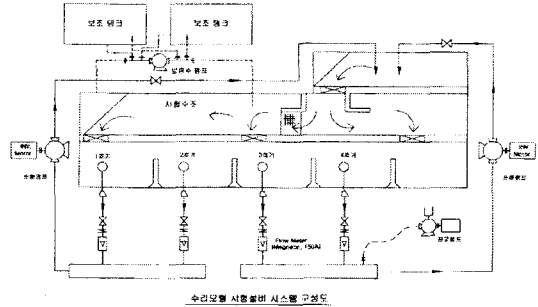


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental model

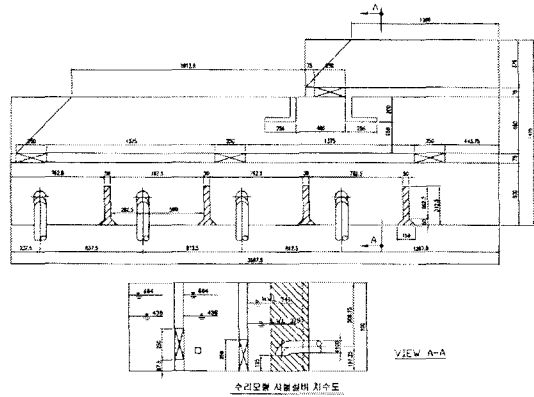


Fig. 4 Dimensions of the experimental model

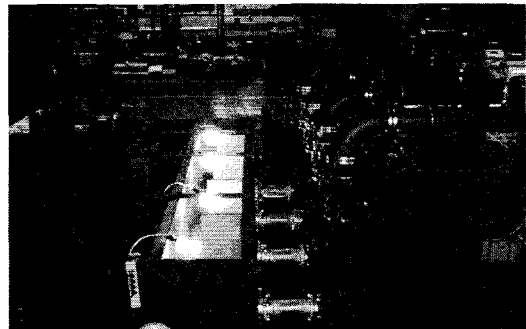


Fig. 5 Photograph of the experimental model

시험설비는 순환펌프, 각 Size별 토출배관, 유량계, 모델수조 등으로서 배관연결에 의한 폐쇄루프를 구성하였다. 순환펌프는 인버터 모터에 의해 구동되며 모터의 회전수를 조절하여 시험유량을 조정한다. 시험유량의 측정은 토출라인의 유량계에 의해 측정되었다.

모델수조는 스틸 용접 구조물로 제작되어 있으며, 펌프 수조의 외벽부분은 투명 아크릴로 제작되어 펌프

수조내의 유체 흐름상태를 육안으로 직접 관찰하기에 적합한 구조로 되어 있다. 또한, 시험시 사용유체는 상온의 청수를 사용하였다.

3.5 보텍스 판정기준

각 보텍스 현상에 대한 판정은 아래 Table 2에 표시된 상사성의 조건에 따라 결정한다. 또한, 각각의 보텍스 현상 판정은 아래와 같이 각각의 조건에 대하여 10분간 관측된 자료를 기준으로 한다.

각각의 시험에 대하여 육안으로 보텍스 현상이 발생하는지의 유무를 관찰하여 보텍스 발생 유무를 판단하고, 보텍스 방지장치의 설치를 결정한다.

Table 2 Judgment criteria for the vortex
(○ : OK, X : Reject)

VORTEX	Judgment	Velocity
(1) Surface vortex		
-Surface dimple	○	Medium
-Air-Entraining Vortex	X	Velocity
-Air-Entraining Vortex	X	
(2) Submerged Vortex	X	Equal
		Velocity
(3)The condition of Water surface	No Whirling low	Froude Number

4. 모형실험과 PIV 실험 결과

4.1 모형실험 결과

본 실험은 Table 3에서 볼 수 있듯이 유속의 조건(V), Fr수 일치(F), 중간유속 일치(M) 조건과 운전호기의 조합에 따라 39번의 실험을 반복하여 수행하였다. 많은 실험결과가 있지만 Fig. 6과 Fig. 7에 대표적으로 생성된 보텍스를 나타내었다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 수위(L.W.L, H.W.L)나, 운전대수 및 호기조합에 따라 정도의 차이는 있으나 모든 경우에 보텍스가 심하게 발생하고 있음을 알 수 있다.

특히 본 실험에서는 벨 마우스의 형상을 변화시켜 실험을 해보아도 보텍스 발생정도에 대한 차이는 미미한 것으로 조사되었다.

Table 3 Operation conditions for the water level, flow rate and similarity criteria with combinations of operating pumps

	Water lever (mm)		Flow rate (m ³ /hr)		pump			
	proto-type	model	proto-type	model				
V	L.W.L (0)	L.W.L (375)	5,500	86	No. 1			
M				56.7				
F				30.4				
V				86	No. 3			
M				56.7				
F				30.4				
V				86+86	No. 1+2			
M				56.7+56.7				
F				30.4 + 30.4				
V				86 + 86	No. 1+3			
M				56.7 + 56.7				
F				30.4 + 30.4				
V				86 + 86	No. 3+4			
M				56.7 + 56.7				
F				30.4 + 30.4				
V				86+86+86	No. 1+2+3			
M				56.7+56.7+56.7				
F				30.4+30.4+30.4				
V				86+86+86	No. 1+3+4			
M				56.7+56.7+56.7				
F				30.4+30.4+30.4				
V				86+86+86+86	No. 1+2+3+4			
M				56.7+56.7+56.7+56.7				
F				30.4+30.4+30.4+30.4				
V				H.W.L (1,330)	H.W.L (541)	5,500	86	No. 1
M							56.7	
F							30.4	
V							86 + 86	No. 1+2
M							56.7 + 56.7	
F							30.4 + 30.4	
V							86+86+86	No. 1+2+3
M							56.7+56.7+56.7	
F							30.4+30.4+30.4	
V							86+86+86	No. 1+3+4
M							56.7+56.7+56.7	
F							30.4+30.4+30.4	
V							86+86+86+86	No. 1+2+3+4
M							56.7+56.7+56.7+56.7	
F							30.4+30.4+30.4+30.4	

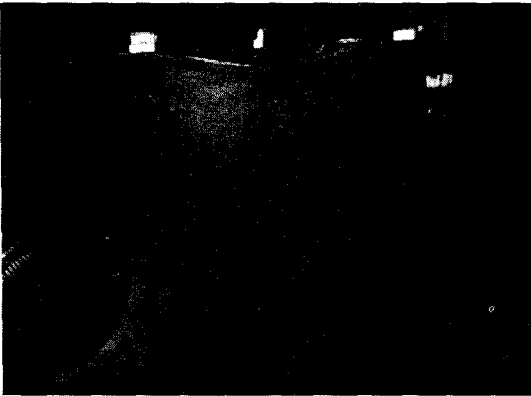
그러나 Fig. 6과 Fig. 7과 같이 보텍스의 발생은 펌프 소음발생, 임펠러의 수명 및 성능에 나쁜 영향을 주기 때문에 반드시 Anti Vortex Device를 설치하여 보텍스의 발생을 저감시켜야 한다. 현재 Anti Vortex Device를 설치하여 실험중에 있다.



Fig. 6 Occurred submerged vortex in the sump model



(a) top view



(b) side view

Fig. 7 Occurred surface vortices in the sump model

4.2 PIV 실험 결과

PIV는 유동장에 분포된 입자의 미소시간 간격의 영상을 컴퓨터로 분석하여 속도벡터에 대한 데이터를 얻는 방법으로 모형내 유동정보를 정량적으로 얻을 수 있으며 또한 애니메이션으로 쉽게 가시화 할 수 있으므로 최근 많이 사용되는 기법이다. 따라서 PIV기법을

Fig. 5와 같은 Sump 모델장치에 적용하여 측정된 영상(640~480 pixel의 500 frame 영상)을 이용하였으며 약 17초간 500장의 영상을 계조치(gray level) 상호상관법을 통하여 동영상 처리한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

측정된 계측단면은 자유표면 보텍스가 발생하는 운전조건에서 펌프 호기별 자유표면으로 선택하여 해석 유동장 확보를 하였다. 또한, 운전조건은 자유표면 보텍스 발생 및 중간유속 조건으로 선택하여 시험하였으며 자유표면의 흐름은 조건 1과 조건 2에서 큰 차이점이 없었다.

- 운전조건 1 : #1, #2, #3호기 운전 (LWL)
- 운전조건 2 : #1, #2, #3, #4호기 운전 (LWL)

Fig. 8에서 볼 수 있듯이 자유표면 보텍스는 #1호기와 #3호기에서 주로 발견되고 있음을 알 수 있다. #3호기에서 표면자유 보텍스가 가장 활발하게 발생하는 이유는 #3호기 흡입구 바로 전방에 있는 취수구의 영향으로 강한 회전흐름이 수조 내에서 형성되기 때문으로 보여진다. #1호기에서 발생한 보텍스의 경향 또한 #3호기와 같은 양상이나 이때에는 취수구에서 들어오는 유량이 #3호기에 비하여 작아(유입취수구까지의 도달거리가 다름) 보텍스의 발생빈도가 감소하고 있음을 알 수 있다.

자유표면 보텍스의 발생빈도를 보면 #3호기, #1호기 순으로 커짐을 알 수 있다. #2호기에서는 보텍스가 거의 발생하지 않고 있으며, #4호기에서는 강한 표면회전 흐름은 발생하나 보텍스는 거의 발생하지 않았다.

5. 요약

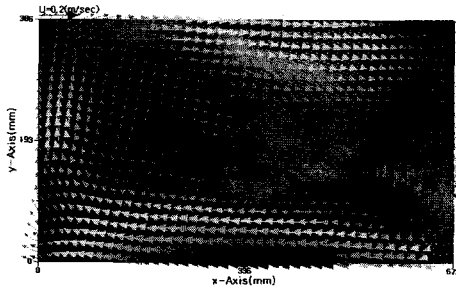
펌프장 흡입수조에서 발생하는 보텍스의 구조를 Sump Model Test와 PIV 방법을 수행하여 보텍스 발생여부를 검증한 결과는 아래와 같다.

1) 현장조사의 결과 취수장 대부분의 흡수정 구조가 유체역학적으로 보텍스를 발생시키는 구조였음을 알 수 있었으며 흡수정의 형태를 흡입구와 수문이 일직선으로 되어 있는 토목구조를 가진 펌프장의 경우는 보텍스 발생이 비교적 적었음을 알 수 있었다. 이는 토목구조의 설계가 펌프특성에 따른 흡수정 내의 유동장을 고려하여 볼 때 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

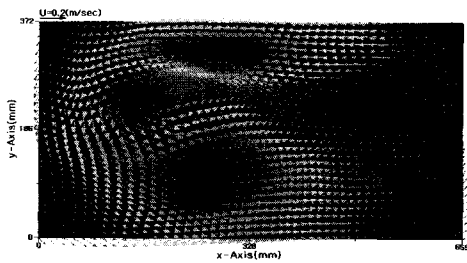
2) JSME S 004-1984를 토대로 1/8 모델내에서 모형수리실험을 수행한 결과 현장에서 발견된 결과와 같



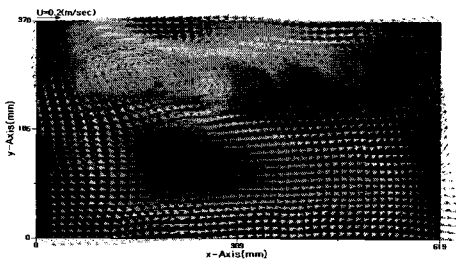
(a) average velocity vector of CASE 1



(b) average velocity vector of CASE 2



(c) average velocity vector of CASE 3



(d) average velocity vector of CASE 4
Fig. 8 PIV experimental results

이 예측되었다. 또한, 모든 상사조건 일치에서 수위나 운전대수 및 호기조합에 따라 정도의 차이는 있으나, 모든 경우에 보텍스가 심하게 발생하고 있음을 알 수 있었다.

3) PIV실험에서 볼 수 있듯이 자유표면 보텍스는 #1 호기와 #3호기에서 주로 발견되었는데 이는 #3호기 흡입구 바로 전방에 있는 취수구의 영향으로 강한 회전 흐름이 수조내에서 형성되기 때문으로 보여진다.

4) 보텍스의 발생은 펌프 소음발생, 임펠러 수명 및 성능에 나쁜 영향을 주기 때문에 반드시 Anti Vortex Device를 설치하여 보텍스의 발생을 저감시켜야 한다.(’04.11.12 현재 현장실험 중에 있음)

후 기

본 연구는 한국수자원공사의 2004년 용역과제인 모형실험을 통한 흡수정 형상결정 설계방향 수립 연구용역으로 수행되었으며, 현장실험에 적극 협조해 주신 효성에바라 관계직원 여러분께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- (1) HI Centrifugal Pump and Application, 1994
- (2) Veera P. Rajendran, G. S. Constantinescu, and V. C. Patel, "Experiments on Flow in a Model Water-Pump Intake Sump to Validate a Numerical Model", Proc. of FEDSM'98, 1998 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, (1998), CD-Rom.
- (3) 최중용, 김정환, 남청도, 김유태, 이영호, "PIV에 의한 흡입수조내 흡입관 주위의 유동특성에 관한 연구", 대한기계학회 2001년도 추계학술대회논문집 B(2001), pp. 563-569.
- (4) M. Padmanabhan and G. E. Hecker, "Scale Effects in Pump Sump Models", J. of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 11(1984), pp. 1540-1556.
- (5) G. S. Constantinescu and V. C. Patel, "Numerical Model for Simulation of Pump-Intake Flow and Vortices", J. of Hydraulic Engineering, Vol. 124, No. 2(1998), pp. 123-134.
- (6) JSME S 004, 1984