

펌프장에서 Sump내 흡입구 주위의 유동해석

노형운*·김재수**·서상호***

Flow Analyses around Intake within Sump in a Pump Station

Hyung-Woon Roh*, Jae-Soo Kim** and Sang-Ho Suh***

Key Words : Pump Station(펌프장), Sump(섬프), Flow Analyses(유동해석), Numerical Analyses(수치해석)

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. Uneven flow distribution can also increase or decrease the power consumption with a change in total developed head. To avoid these sump problems pump station designers are considered intake structure dimensions, such as approaching upstream, baffle size, sump width, width of pump cell and so on. From this background, flow characteristics of intake within sump are investigated numerically to obtain the optimal sump design data. The sump model is designed in accordance with HI code.

1. 서론

펌프를 사용하다 보면 어쩔 수 없이 발생하는 현상, 즉 캐비테이션현상, 수격현상, 서징현상 등이 나타난다. 이 중 캐비테이션의 발생은 펌프의 성능을 저하시키거나, 불안한 운전을 가져 오기 때문에 펌프관련 연구자들은 많은 관심을 가지고 대책을 수립하고 있다^(1,5). 캐비테이션현상의 발생원인은 여러 가지가 있지만, 최근 많은 관심을 가지고 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. 따라서 해외 펌프관련 규격인 HI규격이나 ISO규격과 펌프관련 전문서적들에서는 이러한 현상을 미리 예측을 하고 대처방안을 제시하고 있으나, 국내에서는 이에 관한 전문지식을 가지고 있는 사람이 드물고, KS규격도 아주 간단한 것만 기술되어 있다.

펌프장내 섬프주위의 유동과 관련된 연구는 해외에서 오래전 부터 시작되어 수치해석과 실험방법의 급격한 발전덕에 많은 결과가 제시되었다. 1998년 Rajendran⁽²⁾은 사각채널안의 수직 흡입관을 포함한 흡입수조내의 3차원 난류유동을 수치해석하고 PIV 실험으로 해석하였다. 국내에서는 2001년 Lee 등⁽³⁾에 의하여 흡입수조내의 자유표면과 자유표면 아래에서 발생하는 보텍스의 거동을 PIV실험으로 유동가시화하려는 시도가 있었다.

본 논문에서는 펌프장내 흡입수조의 설계를 최적화하기 위한 자료를 구축하기 위하여 흡입관의 거리에 따른 자유표면, 옆벽,

그리고 뒷벽부근에 발생하는 유동패턴을 해석하고, HI규격에서 제시한 보텍스의 종류를 조사하여, 보텍스의 생성을 제거할 수 있는 섬프형상을 제시하고자 하였다. 본 연구에서는 펌프장에서 섬프내 흡입구 주위의 유동해석을 수치해석적인 방법으로 수행하였다.

2. Sump형상

Sump 형상

HI규격에 제시되어 있는 Sump형상은 Fig. 1과 같다. Fig. 1은 3개의 흡입구가 있지만 본 연구에서는 sump장의 유동형태를 이상화하기 위하여 1개의 흡입구만 있는 경우를 택하였다. Fig. 1

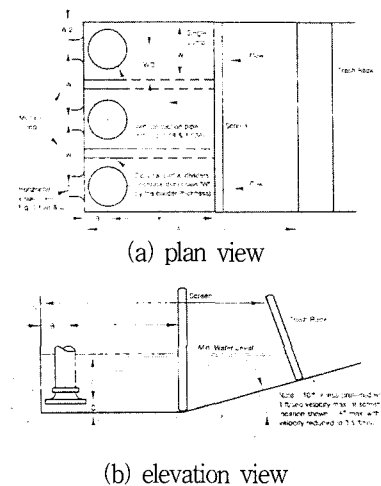


Fig. 1 Sump dimensions views of wet pit type pump

* 조선대학교 항공우주공학과 rohlee@chosun.ac.kr
** 조선대학교 항공우주공학과 jskim@chosun.ac.kr
*** 송실대학교 기계공학과 suhsangho@sfel.ssu.ac.kr

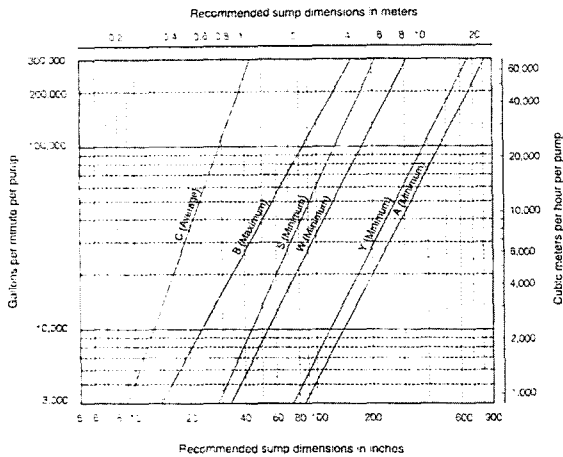


Fig. 2 Sump dimensions versus flow

Table 1 Geometry parameters for sump design

Item	Value(m)	Remarks
D	0.6	Diameter of suction pipe
C	0.3	Average
B	0.5	maximum
S	2	minimum
W	2	minimum
Y	3	minimum
A	6	minimum

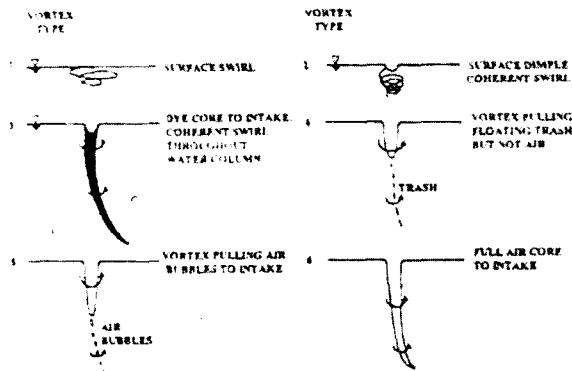


Fig. 3 Classification of vortices

의 기하학적 형상과 관련된 값들은 Fig. 2와 같이 펌프가 시간 당 토출해내는 유량으로부터 결정하게 되어 있다. 이때 유량에 따라 결정되는 기하학적 상수 값은 섬프의 폭(W), 뒷벽과의 간격(B), 바닥면과 간격(C), 스크린과 흡입관의 폭(Y), 흡입수조 폭(A), 벨마우스에서 흡수면까지의 거리(S)이다. 본 연구에서 Fig. 2의 그래프로부터 결정한 치수값은 Table 1과 같다. Table 1의 기준값은 펌프 토출량을 2000 m³/hr(0.556m³/s)을 기준으로 하여 흡입관 지름을 60cm로 한 경우이다.

Vortex 형상

Fig. 3은 펌프장내 흡입수조에서 발생하는 보텍스의 형상을

Padmanabhab과 Hecker⁽⁴⁾가 구분한 것이다. 이들 저자들은 Fig. 3과 같이 흡입수조에서 보텍스의 발생형태는 Froude수에 의하여 분류된다고 하였다. Froude수 0.3이하일때는 흡입관에 부분적인 공기를 동반한 공기 흡입보텍스가 발생하였으며, 0.4이상일 때는 공기기동을 동반한 공기 흡입보텍스가 발생하였다. 그리고 Froude수가 0.4이상일때의 운전은 펌프의 진동, 소음, 그리고 캐비테이션이 발생되며 펌프의 효율이 떨어진다고 보고하였다^(3,4).

이러한 현상을 Rajendran 등⁽²⁾은 Fig. 4와 같이 조금 더 자세히 나타내었다. Fig. 4에서 흡입관을 중심으로 바닥과 양 측벽, 그리고 뒷면에서부터 보텍스가 생성되고 있음을 알 수 있다. 또한, 이렇게 발생한 보텍스를 유동가시화하여 촬영한 것이 Fig. 5와 같다.

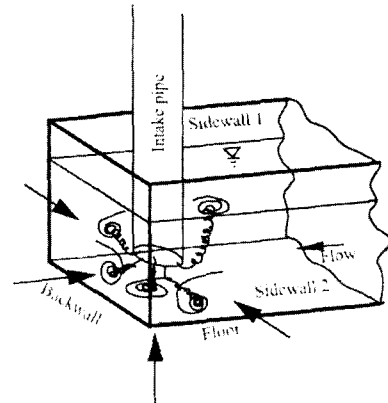


Fig. 4 Vortices around intake within sump model

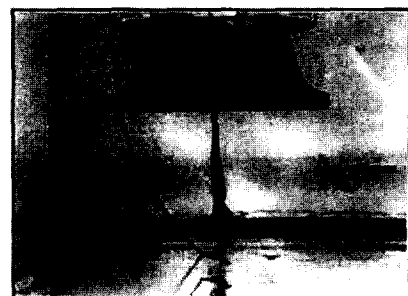


Fig. 5 Visualization of floor vortex

3. 지배방정식

수치해석을 이용한 펌프장내 sump관련 연구를 수행하기 위하여 정상, 비압축성, 시간평균 연속방정식과 운동량방정식을 텐서형으로 나타내면 식 (1), (2)와 같다.

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} \quad (2)$$

윗 식에서 ρ , \vec{v} , p 는 각각 밀도, 속도벡터 그리고 압력이다. 식 (2)의 전단응력 텐서는 속도와 변형률의 관계식으로부터 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 식 (1)과 (2)를 이용하여 펌프장내 흡입수조의 속도분포와 압력분포를 수치계산하였다. 흡입수조내의 유동장을 계산하기 위한 수치적인 방법에서 대류항 처리는 HYBRID 도식을 사용하였다. 운동량방정식의 압력항의 이

산화는 SIMPLE-C 알고리즘을 적용하여 압력과 속도의 상관관계를 고려한 연속방정식의 이산화방정식으로부터 구하였다. 난류모델은 표준 k-ε 모델을 적용하였다.

흡입수조에서 발생하는 보텍스를 계산하기 위해서는 세가지의 유동인자를 중요하게 고려하여 주어야 한다. 첫번째는 자유표면(free surface)이고, 두번째는 벽면에서 조밀한 격자를 보장하여 주어야만 하고 마지막으로 비정상 유동을 고려하여야만 한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 고려사항을 충분히 고려하여 주기 위하여 Fig. 6과 같이 유동장의 흡입수면을 $\tau_w = 0$ 으로 처리하여 줌으로써 자유표면 현상을 고려하여 주었다. 또한, 벽면에서 조밀한 격자를 보장하여 주기 위하여 점성저층내의 y+의 값을 5보다 작게 하여 주었다.

입구경계조건은 균일유동으로 주었고 출구 경계조건은 흡입관에서 음의 압력값을 줌으로써 펌프장내 유동장과 같이 맞춰 주었다. 이때 유동장내의 격자의 개수는 Fig. 6과 같이 351384이다.

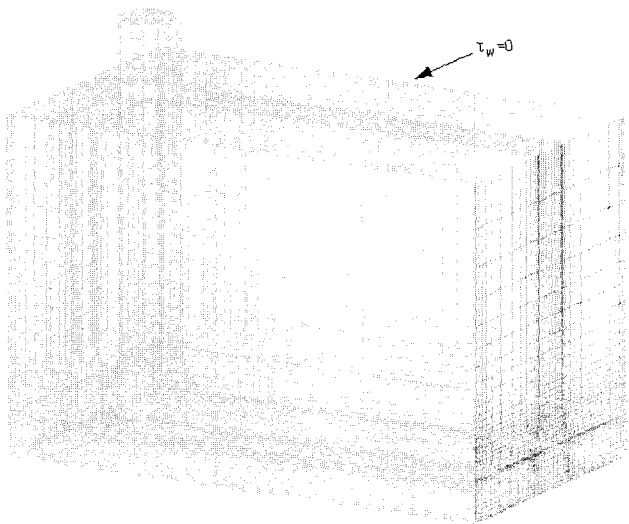
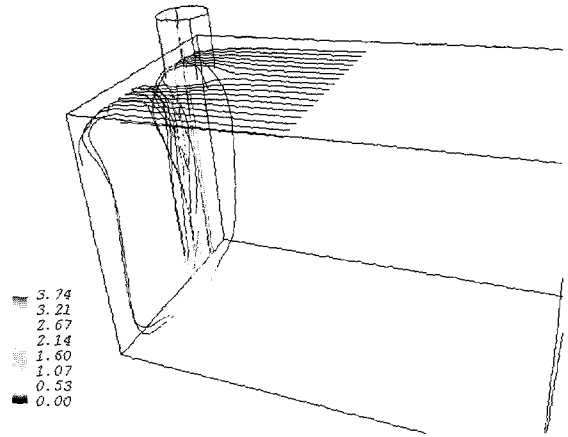


Fig. 6 Computational mesh system of the flow domain

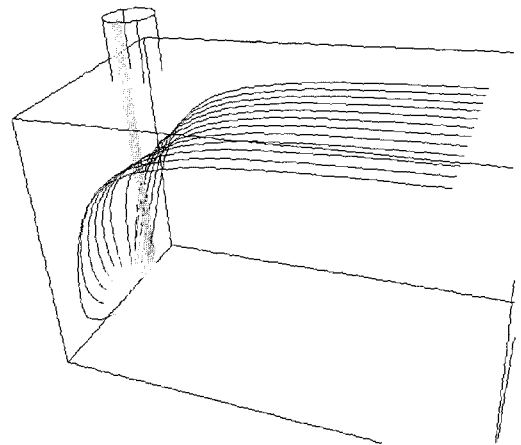
4. 결과 및 토론

펌프장내 흡입수조내 유동장을 살펴보기 위하여 Fig. 7과 같이 입지의 자유표면에서 입자가 어느 방향으로 빨리 들어가는지를 검토하였다. Fig. 7의 유동장은 $Re=9 \times 10^5$ 이고, $Fr=0.61$ 인 경우이다. 이 경우는 펌프장에서 흔히 볼 수 있는 유동장으로 흡입관에서 평균속도는 1.5m/s 정도 된다. Fig. 7에는 두가지 영역에서 시작되는 유적선을 나타내었다. 하나는 Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 흡입관 앞쪽의 자유표면에서 시작되는 유적선들을 나타낸 것이고, Fig. 7 (b)의 나타낸 그림은 입구쪽에 가까운 지점들에서의 유적선들을 나타낸 것이다.

그림에서 볼 수 있듯이 자유표면에 있는 입자들은 흡입관 쪽으로 복잡한 궤적을 나타내면서 빨리 들어가고 있음을 알 수 있었다. 또한 Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 흡입관 근처인 자유표면과 벽면근처에 있는 입자의 궤적이 달리 나타남을 알 수 있다. 이러한 유동장은 Fig. 4와 Fig. 5에 나타낸 보텍스의 형태와 유사함을 알 수 있다.



(a) near the suction pipe



(b) near the inlet region

Fig. 7 Pathlines showing the vortices near the suction pipe and the inlet region

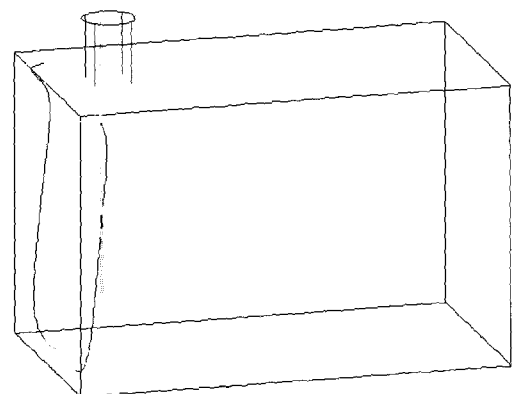


Fig. 8 Pathlines near the back wall

본 연구결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 Fig. 8과 같이 뒷벽영역 자유표면의 2점에서 시작되는 유적선을 나타내었고 이를 Constantinescu 등⁽⁷⁾의 결과와 정성적으로 비교하기 위하여 참고

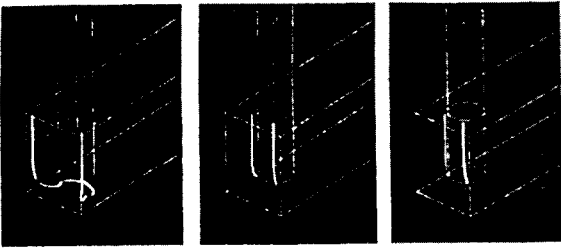


Fig. 9 Vortex cores with Vortexline
(Constantinescu et al.'s results)

문헌의 결과를 Fig. 9와 같이 나타내었다. Fig. 9의 결과는 보텍스가 생성된 지점에서의 vortex line을 나타내고 있다. Fig. 8과 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 입자가 자유표면 밑으로 빨리면서 흡입수조로 들어가고 있음을 알 수 있고, 이러한 결과로부터 보텍스의 경향이 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

5. 결론

펌프장의 sump내 유동특성을 구하기 위하여 자유표면을 고려하여 수치해석하였다. 기초연구로서 많은 인자들을 고려하지는 않았지만, 흡입관을 중심으로 자유표면에서 유동이 생성되어 바닥과 양 측벽, 그리고 뒷면에서부터 보텍스가 생성되고 있음을 알 수 있다. 또한, 자유표면에 있는 입자들은 흡입관 쪽으로 복잡한 궤적을 나타내면서 빨리 들어가고 있음을 알 수 있었다.

그리고 흡입관 근처인 자유표면과 벽면근처에 있는 입자의 궤적이 달리 나타남을 알 수 있다. 이러한 유동장은 선행연구자의 연구와 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있었다. 따라서, 수치해석의 방법을 통하여 펌프장내 Sump에서 발생하는 보텍스의 생성을 충분히 설명할 수 있을 것으로 판단된다.

이러한 결과를 정밀하게 파악하기 위하여는 추후 Fr수의 변화에 따른 보텍스의 변화를 좀 더 세밀하게 검토할 필요가 있다고 판단된다.

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] 최종웅, 김정환, 남청도, 김유택, 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.