

펌프 섬프장내 자유표면 보텍스에 의한 공기흡입 현상의 가시화

박영규* · 이규명* · 최윤환** · 이연원†

Visualization of Air Absorption Induced by Free Surface Vortex in the Pump Sump Using Multi-phase Flow Simulation

Young Kyu Park, Kui. Ming. Li, Yoon Hwan Choi and Yeon Won Lee

Abstract. In this study the change of free surface vortex is expressed through the time volume fraction using multiphase unsteady condition in sump, because in previous studies of the pump sump did not represent the behavior of the free surface vortex exactly due to the reason it was calculated using single phase and steady condition. The reliability of the computational analysis is verified through comparing experimental results with that of present numerical analysis. Homogeneous free surface model is used to apply interactions of air and water. The results show that the free surface vortex can be identified on the isotropic surface at air volume fraction 1%~5%. The vortices make an air column from the free surface to the sump intake and are created and destroyed repeatedly. The behavior of free surface vortex at numerical analysis is quite similar to experimental test. The result of vortex motion according to time, works on a cycle.

Key Words: Free Surface Vortex (자유표면 보텍스), Homogeneous Model (등균질 모델), Multi-phase Flow (다상유동), Volume Fraction (체적비), Unsteady Condition (비정상 조건)

1. 서 론

발전소의 냉각수 순환용 펌프나 선박의 해수펌프와 같은 대용량 펌프의 작동으로 펌프 흡입수조(pump sump)에서 물이 흡입파이프로 유입될 때, 흡입수조 및 흡입파이프의 형상이 적절하게 설계되지 못한다면 물이 파이프 입구 쪽으로 부드럽게 흡입되지 못하고 흡입수조 내에 보텍스(vortex) 및 스월(swirl)이 발생하게 된다⁽¹⁾.

보텍스의 종류에는 자유표면에서 발생하여 펌프 입구 쪽으로 공기기동 및 공기방울(cavitation)을 발생시키는 자유표면 보텍스(free surface vortex)와 수조 옆 벽면이나 바닥에서 펌프 입구 쪽으로 스월을 발생시키는 수중 보텍스(submerged vortex)가 있다. 이러한 보

텍스는 펌프 입구 쪽으로 물 뿐 아니라 공기를 함께 흡입시킴으로써 펌프의 효율저하, 소음, 진동을 발생시킬 뿐 아니라 공기방울과 펌프 블레이드의 마찰로 인한 펌프의 파손을 유발한다. 그러므로 펌프를 설치하기 전에 반드시 모형실험을 통해 흡입 수조 내부의 유동상태가 펌프의 성능에 영향을 주지 않음을 확인해야 하지만 실험장치의 제작에는 시간과 비용이 많이 들어가기 때문에 이를 대체할 수 있는 방안이 요구되고 있다.

전산유체해석기술은 유체와 열전달에 관련된 제반 물리적 현상을 수학적 접근을 통해 컴퓨터를 이용하여 해석하는 분야로서 유체기계 유동해석에 신뢰성 있는 결과를 도출해 왔으며, 이를 이용하여 펌프 흡입구 주변의 유동형상을 분석하려는 여러 시도들이 있었다. Nagahara⁽²⁾는 PIV 실험으로 측정된 수중보텍스 주변의 속도와 CFD를 이용하여 나온 속도 데이터를 비교 분석 하였고 Rajendran⁽³⁾ 등은 사각 채널안의 수직 흡입관을 포함한 흡입수조 내의 3차원 난류유동을 해석하여 그 결과를 실험과 비교분석 하였다. Padmanabhan과 Hecker⁽⁴⁾가 흡입관 주위에서 발생하는 보텍스의 형태

†부경대학교 기계자동차공학과

E-mail : ywlee@pknu.ac.kr

*부경대학교 대학원 메카트로닉스공학과

**부경대학교 기계자동차공학과

를 정의하여 흡입수조의 축적비율에 대하여 보텍스의 형태를 프루드(Froude)수에 의해 분류하였고, Okamura^(5,6)는 여러 상용 수치해석 프로그램을 사용하여 해석결과의 차이를 분석하였다.

수조 모형실험에서 관측되는 보텍스의 생성 및 소멸 과정은 시간에 따라 변하는 비정상 유동이며 수면에서는 공기와 물의 상호간 물리량 전달이 발생하므로 이를 정확히 모사하기 위해서는 비정상-다상 유동해석을 수행해야 하지만 많은 격자수와 계산시간이 요구되어 지금까지 연구되어진 사례가 많지 않으며 수면에서 발생하는 보텍스 역시 정확히 가시화시키지 못하고 있다.

본 연구에서는 자유표면에서 발생하는 자유표면 보텍스의 발생위치와 시간에 따른 거동을 표현하기 위해 비정상-다상 유동해석을 수행하였으며 자유표면 보텍스를 물과 공기의 체적비에 따라 그리고 시간에 따라 가시화시켜 체적비와 시간에 따른 변화를 분석해 보았다. 또한 본 연구의 수치해석 결과와 이전 연구에서 수행된 동일모델에 대한 실험결과를 비교하여 수치해석 결과의 신뢰성을 검증하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

본 연구에 사용된 펌프 흡수정 모델의 지배방정식은 N-S 방정식과 표준 난류모델로서 그 식은 다음과 같다⁽⁷⁾.

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} \\ &= \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

k방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \\ &= G_k - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

ε 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] \\ &= \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon_1} G_k - \rho C_{\varepsilon_2} \varepsilon) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $u_i (u_i=1, 2, 3)$ 는 i 방향의 속도 구성성분이고 f 는 체적력, p 는 압력, ρ 는 유체의 밀도이다. G_k 는 생성항으로서 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

난류점성계수 μ_t 를 표현하면 다음과 같다.

$$\mu_t = \rho \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

계수들은 각각 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} C_\mu &= 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_{\varepsilon_1} = 1.0, \sigma_{\varepsilon_2} = 1.3, C_{\varepsilon_1} = 1.44 \\ C_{\varepsilon_2} &= 1.92 \end{aligned}$$

본 연구에 적용된 등균질(homogeneous) 모델은 다상유동에서 각각의 작동유체가 공간상에 점유하고 있는 체적비로서 밀도 및 유체 상호간에 전달되는 물리량을 나타내는 모델로 전달방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \nabla \cdot (\rho U \phi - \Gamma \nabla \phi) = S \quad (6)$$

위 식에서 ρ , U , Γ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\rho = \sum_{\alpha=1}^{N_p} \gamma_\alpha \rho_\alpha \quad (7)$$

$$U = \frac{1}{\rho} \sum_{\alpha=1}^{N_p} \gamma_\alpha \rho_\alpha U_\alpha \quad (8)$$

$$\Gamma = \sum_{\alpha=1}^{N_p} \gamma_\alpha \Gamma_\alpha \quad (9)$$

각각의 유체는 γ_1, γ_2 등으로 나타내고 N_p 는 상(Phase)의 총 수, 각 유체의 체적비, 밀도, 속도, 확산계수는 각각 $\gamma_\alpha, \rho_\alpha, U_\alpha, \Gamma_\alpha$ 이다.

2.2 해석 모델

Fig. 1은 수치해석에 사용된 모델을 나타낸 것이다.

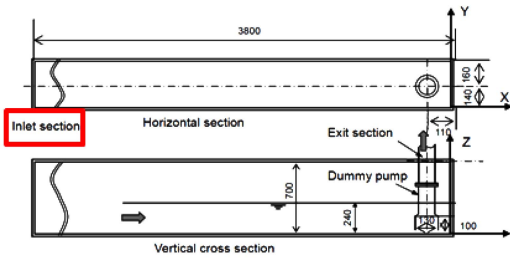


Fig. 1. Pump sump model for numerical analysis.

본 연구의 모델은 Okamura⁽⁴⁾가 수행한 전산모델과 동일한 형상에 대하여 3차원으로 모델링, 격자생성, 계산을 수행하였다. 격자는 육면체 격자(hexahedral)를 사용하였으며 격자생성을 위해 ANSYS ICEM-CFD 12.1 프로그램을 사용하였다.

2.3 수치해석 조건

해석에 사용된 소프트웨어는 ANSYS CFX-12.1, 격자의 개수는 격자 의존성을 체크한 결과 약 120만개의 노드를 사용하였고 60초 동안 비정상 계산을 수행하였다. 공기와 물의 다상유동을 구현하기 위해 등균질 다상유동 모델을 사용하여 유체의 체적을 체적비로서 나타내어 계산을 수행하였다.

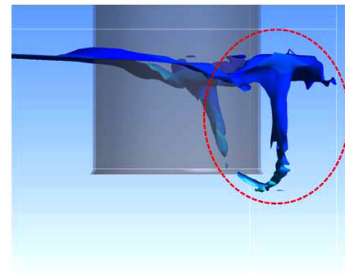
입구조건은 압력조건을 사용하였고 수위에 따른 압력을 구현할 수 있도록 입구 경계면에 압력구배식 $p = \rho gh$ 를 CFX 사용자 함수(expression)를 사용하여 적용하였다. 출구조건은 유량조건으로 $1 \text{ m}^3/\text{min}$ 이며 수면높이는 240 mm로 설정하였다. 유동 입구는 Fig. 1에 나타나 있다.

3. 수치해석 결과

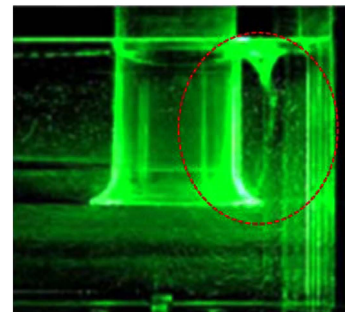
3.1 수치해석과 실험결과 비교

Fig. 2(a)는 공기의 체적비가 5%인 지점의 등고면을 나타낸 것이고 Fig. 2(b)는 동일 모델에 대한 Okamura의 흡수정 실험⁽⁵⁾에서 LLS(Laser Light Sheet)로 자유표면 보텍스의 거동을 촬영한 사진이다. 양자를 비교해 볼 때 자유표면 보텍스의 발생위치, 흡입되는 위치, 보텍스 형상 등이 대체로 일치함을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 자유표면 보텍스의 발생위치에 대해 본 수



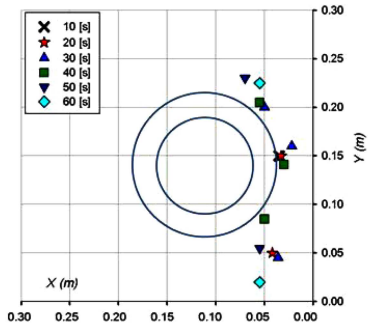
(a) Present numerical result



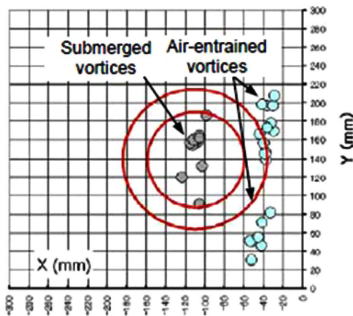
(b) Experimental result of the pump sump test by Okamura

Fig. 2. Comparison between numerical analysis and experiment (vortex behavior).

치해석과 Okamura의 펌프 흡수정 실험⁽⁵⁾을 비교하여 나타낸 것이다. Okamura는 Fig. 4와 같이 자유표면 보텍스 발생주기를 T1, 지속시간을 T2로 설정하여 $T2/T1=0.8\sim 1.0$ 일 때 자유표면 보텍스를 가시적으로 확인할 수 있다고 설명하였으며 그에 따른 자유표면 보텍스 위치확인 결과를 Fig. 3 (b)와 같이 나타내었다. Okamura의 실험결과 자유표면 보텍스는 흡입파이프 중심부 이상단과 우하단의 수면에 각각 집중적으로 분포한다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3 (a)는 수치해석을 통해 자유표면 보텍스의 위치를 10[s] 간격으로 나타낸 결과로서 보텍스 위치가 실험결과와 약간 차이를 보이고 있으나 이는 Okamura의 실험에서 자유표면의 위치가 T2/T1 라는 특정한 존속시간을 통해 나타내어진 것과 달리 수치해석에서는 보텍스의 위치를 비정상적으로 10 [s]마다 나타내었기 때문에 발생하는 해석상의 차이라 판단되며, 자유표면 보텍스 발생위치가 상대적으로 잘 예측됨을 볼 수 있다.



(a) Present numerical results



(b) Results of the pump sump test by Okamura

Fig. 3. Comparison between numerical analysis and experiment (vortex location).

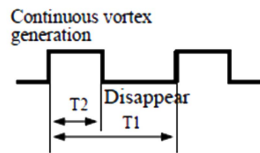
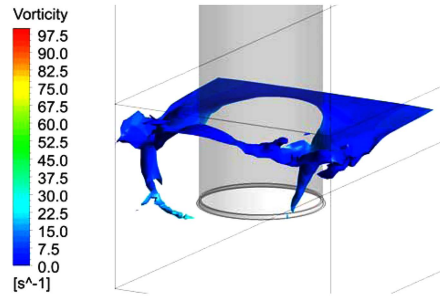


Fig. 4. Period of free surface vortex generation.

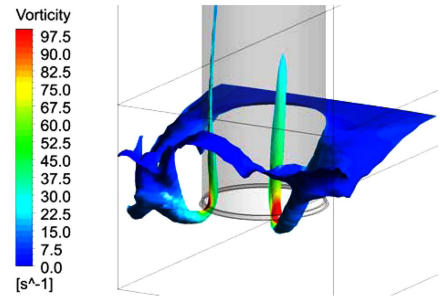
3.2 체적비에 따른 자유표면 보텍스 가시화

Fig. 5는 $t=60$ [s] 일 때 공기의 체적비가 5%, 1%인 지점의 등고면(isotropic surface) 위에 와도(vorticity)를 나타낸 그림이다. 공기의 체적비가 5% 미만일 때는 자유표면에 생성되는 보텍스를 확인할 수 없지만 공기의 체적비가 5%일 때부터(Fig. 5(a)) 자유표면 보텍스를 확인할 수 있으며 공기의 체적비가 1%일 때는(Fig. 5(b)) 자유표면에서 펌프 흡입구 쪽으로 공기기둥을 생성시키는 자유표면 보텍스를 확연히 관찰할 수 있다.

이를 통해 알 수 있는 사실은 다음과 같다. 먼저 펌



(a) Isotropic surface at air volume fraction 5%



(b) Isotropic surface at air volume fraction 1%

Fig. 5. Isotropic surface at each water volume fraction (front view).

프 흡입정에 다상유동 등균질 모델 적용 시 체적비를 조정함으로써 등고면 상에 특정한 체적비 영역의 자유표면 보텍스를 구현할 수 있다는 점을 알 수 있다. 또한 자유표면 보텍스가 관찰되는 물과 공기의 체적비는 물 95~99%, 공기 1~5%임을 확인 할 수 있다.

3.3 시간에 따른 자유표면 보텍스에 의한 공기 흡입 현상 가시화

Fig. 6은 공기의 체적비가 1%인 지점에서 시간에 따른 자유표면 보텍스의 변화를 나타내고 있다. 0~20.1[s]까지는 파이프 주변의 유동이 안정화되지 못하여 자유표면 보텍스의 생성 및 소멸이 불규칙하게 이루어지나 유동이 안정화된 20 [s]이후에는 약 8 [s]를 주기로 하여 Fig. 6 (a), (b)에서 보이는 거동이 순차적이고 반복적으로 발생하게 된다.

Fig. 6의 결과를 통해 펌프 흡수정에서의 자유표면 보텍스는 시간에 따라 일정한 패턴으로 거동한다는 사실을 알 수 있었고 이는 다른 흡수정 모델 해석 시 보

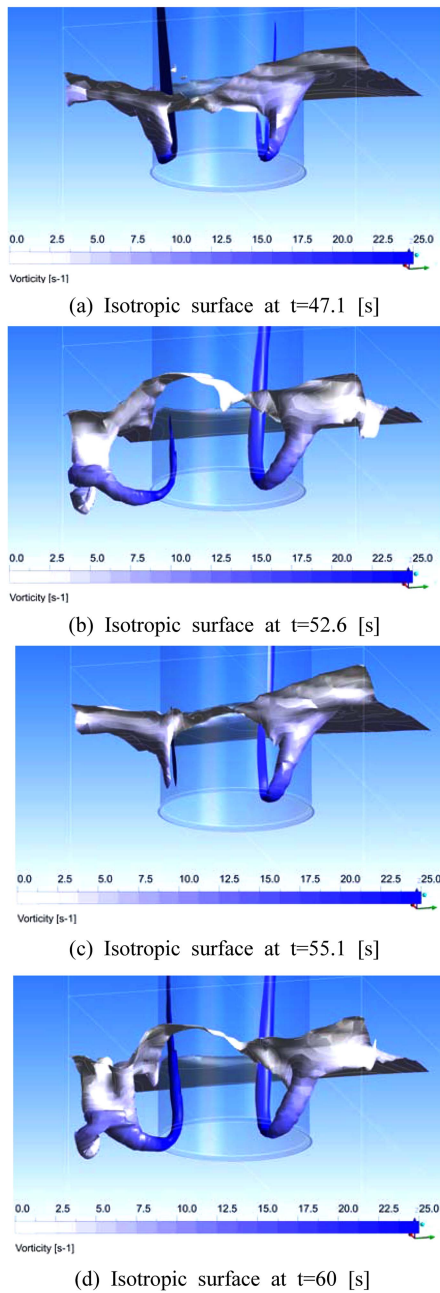


Fig. 6. Isotropic surface at air volume fraction 1% along each time.

텍스 발생지점 및 거동을 특정하기 위한 유용한 자료로 활용할 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 펌프 흡수정 모델에 대한 수치해석을 다상-비정상 조건으로 수행하여 자유표면 보텍스의 발생위치 및 거동을 확인하였고 실험결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 섹프장 내 일정한 체적비 영역을 등고면으로 나타내었을 때 자유표면에서 유입되는 공기의 거동을 명확하게 가시화할 수 있다.
- 2) 흡수정 내부의 유동이 안정화된 후 자유표면 보텍스는 약 8초 주기로 일정한 패턴으로 거동하며 이 거동 패턴은 다른 흡수정 모델의 자유표면 보텍스 발생지점 및 거동을 특정하기 위한 유용한 자료로 활용 가능하다.
- 3) 수치해석 결과와 실험결과의 비교를 통해 수치해석 기법의 신뢰성을 입증하였고 이를 통해 다상-비정상 유동이라는, 자유표면 보텍스 가시화에 적합한 수치해석기법을 확립하였다.

후 기

본 연구는 2단계 BK21(융합기술기반 스마트기계기술 핵심인력 양성사업)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Choi, J. W., Choi Y. D., Lim, W. S. and Lee, Y. H., 2009, "Numerical Analysis on the Flow Uniformity in a Pump Sump Model with Multi Pump Intake", Journal of Fluid Machinery, Vol. 12(4), pp.14~22
- 2) Nagahara, T., Sato, T. and Okamura, T., 2005, "Measurement of The Flow around The Submerged Vortex Cavitation in A Pump Intake by Means of PIV", 5th Int. Symposium on Cavitation, Osaka, Japan
- 3) Rajendran V. P., Constantinescu, G. S. and Patel, V. C., 1998, "Experiments on Flow in A Model Water-Pump Intake Sump to Validate A Numerical Model", Proceedings of FEDSM'98, Washington, DC
- 4) Padmanabhan M. and Hecker G. E., 1984, "Scale

- Effects in Pump Sump Models”, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110(11), pp. 1540~1556
- 5) Okamura, T. and Kamemoto K., 2005, “CFD Simulation of Flow in Model Pump Sumps for Detection of Vortices”, 8th Asian Int. Fluid Machinery Conference, Yichang, China
- 6) Okamura, T., Kamemoto, K. and Matsui, J., 2007, “CFD Prediction and Model Experiment in Suction Vortices in Pump Sump”, The 9th Asian Int. Fluid Machinery Conference, Jeju, Korea
- 7) Zhou, L., Li, X. and Song, Y., 2009, “Numerical Simulation of Turbulent Flow in Recycled Water Pump Intake Sump of Thermal Power Plant”, IEEE