

펌프 섬프장 흡입 조건에 따른 자유표면 보텍스 변동에 관한 연구

박영규* · 이규명* · 최윤환** · 이연원†

A Study on the Change of Free Surface Vortex according to Intake Conditions in the Pump Sump

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

Abstract. In this study the change of free surface vortex is represented at different times according to height of water and with or without curtain wall installation. The air volume fraction is investigated at each condition of water level and the influence about creation of vortex is analyzed. The height of sump intake is taken as 100mm and the water level is divided into 5 steps. The sump model is the TSJ model and the curtain wall is applied by HI standard of America. The results shows that the free surface vortex can be identified on the isotropic surface at air volume fraction 1%~5% and the vortices make an air column from the free surface to the sump intake and are created and destroyed repeatedly. In the higher water level, less air is absorbed into the intake pipe. After curtain wall installation, the suction rate of the air volume fraction is decreased by 6.7%. The result of the vortex motion according to time, works on a cycle.

Key Words: Free Surface Vortex (자유표면 보텍스), Water Level (수면 높이), Volume Fraction (체적비), Curtain Wall (커튼월), Air Column (공기기둥)

1. 서 론

발전소의 냉각용 순환수 펌프는 대용량의 물을 흡입 하므로 흡수정 내부에 강한 압력강하 및 빠른 유속을 발생시킨다. 따라서 물의 정체나 재순환이 이루어지지 않도록 흡수정의 벨 마우스(bell mouth) 형상이 원활히 이루어 져야하며 그렇지 못할 경우 흡수정 내부에 와류성분이 발달하게 되는데 이는 보텍스(vortex) 및 스윙(swirl) 발생의 중요한 원인이 된다.⁽¹⁾

Padmanabhan과 Hecker⁽²⁾의 연구 등에 의해 펌프 흡수정내 발생하는 보텍스의 유형은 잘 알려져 있다. 보텍스의 종류에는 자유표면에서 발생하여 펌프 입구 쪽으로 공기기둥 및 공기방울(cavitation)을 발생시키는 자유표면 보텍스(free surface vortex)와 수조 옆 벽면

이나 바닥에서 펌프 입구 쪽으로 스윙을 발생시키는 수중 보텍스(submerged vortex)가 있다.

이러한 보텍스는 펌프 입구 쪽으로 물 뿐 아니라 공기를 함께 흡입시킴으로써 펌프의 효율저하, 소음, 진동을 발생시킬 뿐 아니라 공기방울과 펌프 블레이드의 마찰로 인한 펌프의 파손을 유발하므로 펌프 설치 전 반드시 흡입 수조 내부의 유동상태가 펌프의 성능에 영향을 주지 않음을 확인해야 하지만 보텍스의 발생 강도는 섬프 흡수정 및 벨 마우스의 형상, 수면 높이, 흡입 유량, AVD(anti vortex device)의 설치 유무에 따라 변하므로 사전에 예측하는 것이 어렵고 따라서 모형실험을 통해서 보텍스 발생여부를 확인하는 것이 일반적이다. 그러나 이러한 모형실험장치의 제작에는 시간과 비용이 많이 들어가기 때문에 이를 대체할 수 있는 방안이 요구되었고 많은 연구자들이 전산유체해석 기술을 통해 펌프 흡수정 내부의 유동을 예측하기 위해 노력해 왔다.

Rajendran⁽³⁾ 등은 사각 채널안의 수직 흡입관을 포함한 흡입수조 내의 3차원 난류유동을 해석하여 그 결과

†부경대학교 기계자동차공학과

E-mail : ywlee@pknu.ac.kr

*부경대학교 대학원 메카트로닉스공학과

**부경대학교 기계자동차공학과

를 실험과 비교분석 하였다. Padmanabhan과 Hecker⁽²⁾는 흡입관 주위에서 발생하는 보텍스의 형태를 정의하여 흡입수조의 축적비율에 대하여 보텍스의 형태를 프루드(Froude)수에 의해 분류하였다.

일본에서는 비교적 펌프 섹프에 관한 연구가 활발히 진행되어 Nagahara⁽⁴⁾는 PIV 실험으로 측정된 수중보텍스 주변의 속도와 CFD를 이용하여 나온 속도 데이터를 비교 분석 하였고 Okamura^(5,6)는 여러 상용 수치해석 프로그램을 사용하여 해석결과와의 차이를 분석하였다.

본 연구그룹의 선행 연구⁽⁷⁾에서는 자유표면에서 발생하는 자유표면 보텍스의 발생위치와 시간에 따른 거동을 표현하기 위해 비정상-정상 유동해석을 수행하여 자유표면 보텍스를 물과 공기의 체적비 및 시간에 따라 가시화시켜 그에 따른 변화를 분석해 보았다. 본 연구에서는 선행 연구에서 수행되지 못했던 섹프 펌프장의 수위 및 커튼 월(curtain wall) 설치 유무에 따른 자유표면 보텍스의 생성과 보텍스의 강도변화를 확인하였다. 또한 각 조건에서 자유표면 보텍스에 의해 흡입 파이프프로 흡입되는 공기량을 비교하여 이를 수치적으로 나타내 보았다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

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

연속방정식

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

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

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

ε방정식

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

여기서 $u_i(i=1, 2, 3)$ 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.

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{\varepsilon_1} = 1.44, C_{\varepsilon_2} = 1.92$$

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. 본 연구의 모델은 Okamura^(5,6)가 수행한 전산모델과

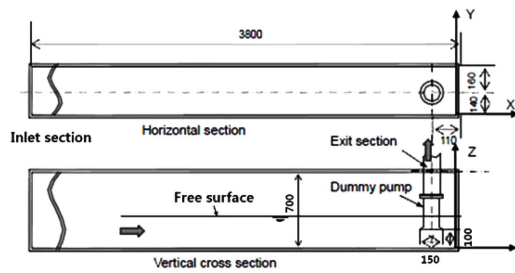


Fig. 1. Pump sump model for numerical analysis.

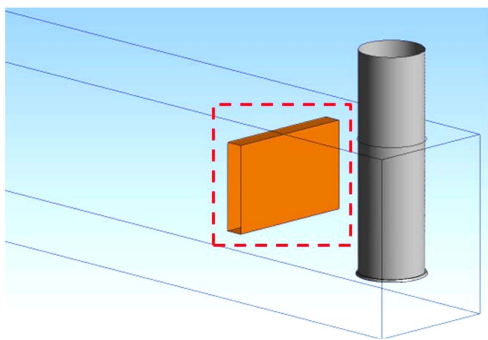


Fig. 2. Pump sump model with curtain wall.

동일한 형상에 대하여 3차원으로 모델링, 격자생성, 계산을 수행하였다. 흡입구의 직경은 150 mm이고 바닥에서 흡입구까지의 높이는 100 mm이다. 격자는 육면체 격자(hexahedral)를 사용하였으며 격자생성을 위해 ANSYS ICEM-CFD 13.1 프로그램을 사용하였다.

Fig. 2는 커튼 월이 설치된 모델을 보여주고 있다. 커튼 월은 흡입파이프 중심축에서 321 mm, 바닥에서 152 mm 떨어진 위치에서 40 mm×300 mm×198 mm 크기의 육면체 고체구조물로서 수면의 와류성분을 억제시키는 역할을 한다. 커튼 월의 형상과 설치위치 및 치수는 미국 표준 펌프협회 규정(HI standard)에 근거하여 최소값을 충족하도록 설정하였다.

2.3 수치해석 조건

해석에 사용된 소프트웨어는 ANSYS CFX-13.1이며, 격자의 개수는 선행연구를 통하여 격자 의존성을 체크한 결과 계산에 적합하다고 판단된 약 120만개의 노드를 사용하였고 60초 동안 비정상 계산을 수행하였다. 공기와 물의 다상유동을 구현하기 위해 식 (6)의 등

Table 1. Water level condition

No.	Case name	S/Z
1	H.W.L.(high water level)	4
2	N.W.L.(normal water level)	3.15
3	L.W.L.(low water level)	2.86
4	L.L.W.L. (low low water level)	2.58
5	L.L.L.W.L. (low low low water level)	2.30

균질 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 m³/min이며 흡입구 높이를 Z(100 mm), 자유표면의 수면높이를 S로 하였을 때 흡입구 높이에 대한 상대적인 자유표면의 높이를 Table 1에 나타내었다. 유동 입구 및 출구는 Fig. 1에 나타나 있는 Inlet section과 Exit section이다.

3. 수치해석 결과

3.1 수위에 따른 자유표면 보텍스 주기 변화

Fig. 3은 공기의 수면높이가 L.L.W.L.이고 체적비가 1%인 지점에서 시간에 따른 자유표면 보텍스의 변화를 나타내고 있다. 0~5.2s까지는 파이프 주변의 유동이 안정화되지 못하여 자유표면 보텍스의 생성 및 소멸이 불규칙하게 이루어지나 유동이 안정화된 5.2s 이후에는 약 7s를 주기로 하여 Fig. 3 (a), (b)에서 보이는 거동이 순차적이고 반복적으로 발생하게 된다.

선행 연구에서 L.L.L.W.L.에서 시간에 따른 보텍스의 거동을 가시화 시켰을 때, 자유표면 보텍스의 변화 주기는 8s로 나타난 바 있다. 수면 높이가 28 mm 상승한 L.L.W.L.과 비교해 보았을 때 주기가 약 1s 단축된 것을 확인할 수 있었으며 수면 높이에 따라 보텍스 주기가 변화한다는 것을 알 수 있다.

그러나 L.L.L.W.L.과 L.L.W.L.을 제외한 다른 수면 높이에서는 자유표면 보텍스가 완전한 주기성이 나타나지 못하고 불규칙하게 나타나게 되는데 이는 수면이 높아질수록 수면 보텍스의 강도가 줄어들고 유동이 안정화 되어 지속적으로 보텍스가 유지되지 못하기 때문이다.

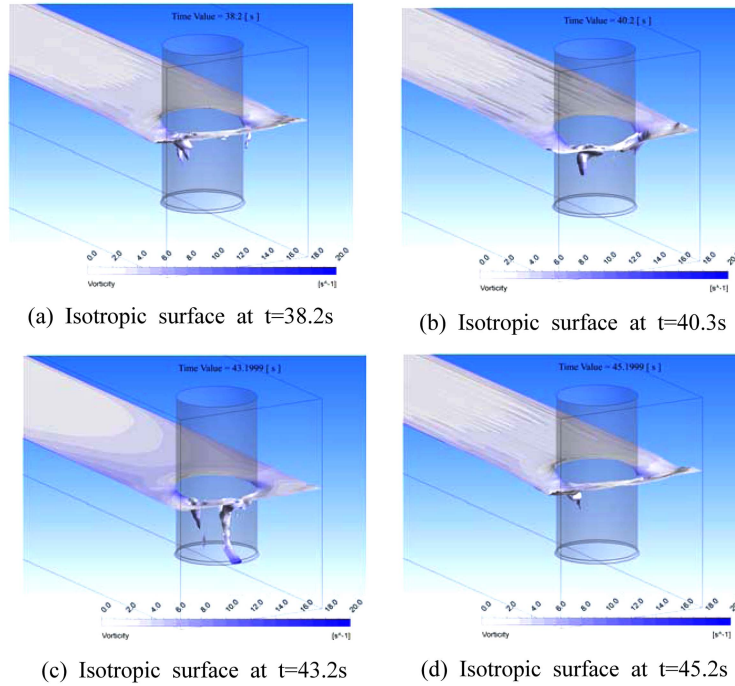


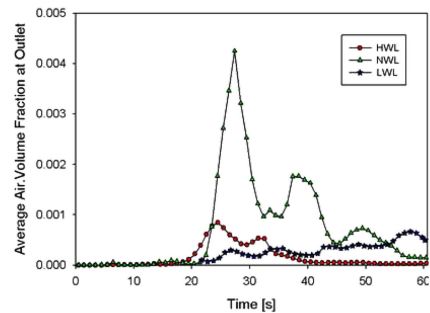
Fig. 3. Isotropic surface at air volume fraction 1% along each time.

3.2 수위에 따른 공기 흡입량 비교

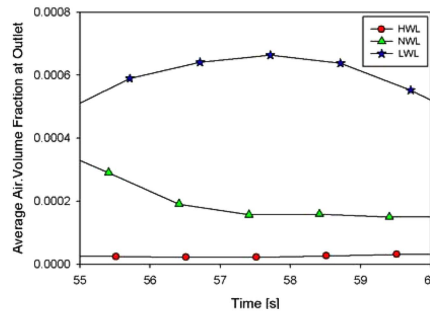
수면 높이에 따라 흡입파이프로 흡입되는 공기량을 나타내기 위해 Fig. 4(a)와 같이 출구단면에서의 평균 공기 체적비를 시간에 따라 나타내었다. t=60s일 때 출구 단면에서의 공기 체적비는 H.W.L. < N.W.L. < L.W.L. 순으로 나타났다. 60s에서 H.W.L.의 평균 공기 체적비는 0.000033, N.W.L.과 L.W.L.은 각각 0.00015와 0.0005이다.

여기서 N.W.L.의 경우 21~45s에서 유동이 안정화 되지 못하여 흡입되는 공기량이 크게 상승하는 경향을 나타내고 그 이후에는 안정화 상태가 지속되어 55s 이후에는 L.W.L.에 비해 더 적은 공기가 흡입된다. 그리고 H.W.L.은 20~34s 사이에서 L.W.L.에 비해 더 많은 공기가 흡입되지만 곧 안정화가 되어 다른 경우에 비해 더 적은 공기가 흡입된다.

Fig. 4 (b)는 55s 이후의 각 수면 높이에서 평균 공기 체적비를 나타낸 것이다. H.W.L.에서의 평균 공기 체적비는 지속적으로 낮은 값을 나타내고 있고 N.W.L.의 경우 유동 불안정의 영향으로 57.5s까지는 평균 공기 체적비의 값이 많이 변동하는 것이 보이지만 그 후 일



(a) Time range at 0 to 60s



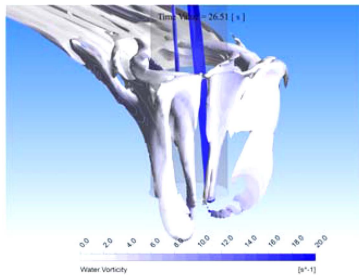
(b) Time range at 55 to 60s

Fig. 4. Average air volume fraction at outlet.

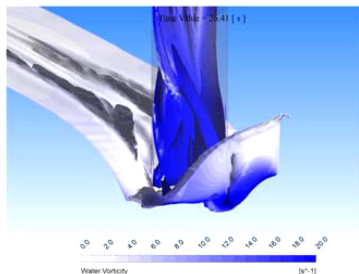
정한 수치로 안정화됨을 알 수 있다. L.W.L의 경우 60s 이전에는 유동이 완전히 안정화되지 않았지만 H.W.L.과 N.W.L.의 평균 공기 체적비의 변화로 판단할 때 60s 이후에는 안정화될 것으로 예상된다.

Fig. 4 (a)에서 확인되는 바와 같이 펌프 구동 후 약 20s에 흡입파이프로 공기가 유입되기 시작하는데(특히 N.W.L.에서 흡입량의 변화가 큼) 이때 발생하는 자유 표면 보텍스는 Fig. 5와 같이 불규칙한 형상으로 나타나며 불규칙한 유동으로 인해 많은 양의 공기가 흡입파이프로 흡입된다. 여기서도 N.W.L.에 흡입되는 공기량이 가장 많은 것을 확인할 수 있다. 그 후 수면이 안정화 되는 40s 이후에는 흡입되는 공기량이 줄어든다.

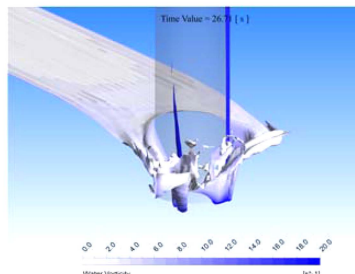
Fig. 6은 출구 단면에서의 공기 체적비 등고면을 나



(a) Free surface vortex at H.W.L.

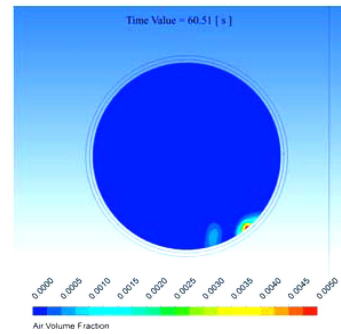


(b) Free surface vortex at N.W.L.

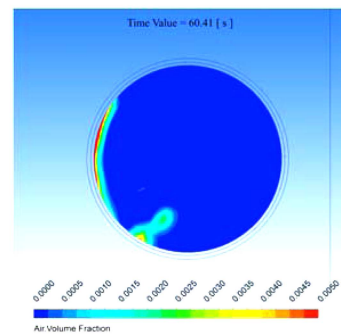


(c) Free surface vortex at L.W.L.

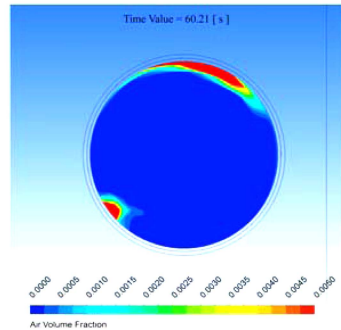
Fig. 5. The free surface vortex at unstable flow.



(a) Air volume fraction at H.W.L.



(b) Air volume fraction at N.W.L.

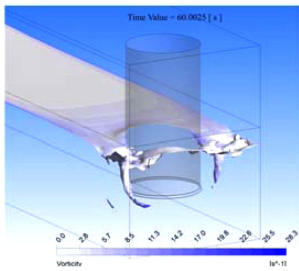


(c) Air volume fraction at L.W.L.

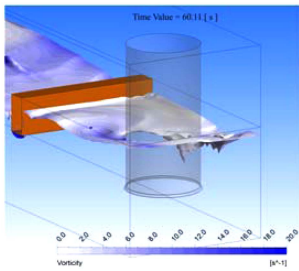
Fig. 6. Air volume fraction at outlet section for each level, $t=60s$.

타내고 있다. $t=60s$ 일 때 H.W.L.의 출구면에서의 공기 체적비가 가장 낮게 형성되며, 다음으로 N.W.L., L.W.L. 순서로 공기 체적비가 증가함을 알 수 있다.

수면 높이에 따라 흡입파이프로 흡입되는 공기량을 나타내어본 결과 수위가 높아질수록 공기 흡입량은 적어진다는 것을 알 수 있다. 또한 수면이 안정화되기 전



(a) Isotropic surface at t=60 s, no curtain wall



(b) Isotropic surface at t=60 s, with curtain wall

Fig. 7. Isotropic surface; (a) no curtain wall, (b) with curtain wall for the L.L.L.W.L.

에는 특정 시간대에서의 높은 수위에서 동 시간대의 낮은 수위보다 더 많은 공기가 유입되는 경우도 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 커튼 월 설치에 따른 자유표면 보텍스 변화

Fig. 7은 커튼 월 설치 전과 설치 후의 보텍스의 변화를 가시화 한 것이다. 커튼 월 설치로 인해 유동 입구 쪽 으로부터 발생하는 와류성분을 커튼 월이 막아줌으로써 보텍스의 발생을 억제한다는 것을 알 수 있다. 따라서 커튼 월 설치위치 및 형상 등 최적화에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 펌프 흡수정 모델에 대한 수치해석을 수행하여 수위 및 커튼 월 설치 유무에 따라 자유표면 보텍스의 발생위치와 거동을 확인하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 자유표면 보텍스의 생성주기는 수위에 따라 변화

되며 수위가 낮아지면 보텍스의 생성주기는 짧아진다.

2) 흡수정의 수위에 따라서 흡입되는 공기량이 다르게 나타나며 수위가 높아질수록 공기 흡입량이 적어진다.

3) 수면의 와류성분을 커튼 월이 막아줌으로써 보텍스의 발생이 억제되었으며 커튼 월의 최적화를 위한 추가적인 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 2단계 BK21(융합기술기반 스마트기계기 술 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) Padmanabhan, M. and Hecker, G. E., 1984, "Scale Effects in Pump Sump Models," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 110(11), pp. 1540~1556
- 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, America
- 4) 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
- 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) Park, Y. K., Li, K. M., Choi, W. H. and Lee, Y. W., 2011, "Visualization of Air Absorption Induced by Free Surface Vortex in the Pump Sump Using Multi-Phase Flow Simulation," *JKSV*, Vol. 9(3), pp.59~64