

펌프 흡수정내 발생된 보텍스에 대한 CFD 예측

박상언* · 노형운**

CFD Prediction on Vortex in Sump Intake at Pump Station

Sang-Eun Park*, Hyung-Woon Roh**

Key Words : Sump Station(흡수정), Vortex(보텍스), Cavitation(캐비테이션), CFD Prediction(수치해석 예측)

ABSTRACT

In large pump station, vortex generation such as free-surface vortex and submerged vortex occurring around pump intake, or at bell-mouth inlet has been an important flow characteristics which should be considered always to keep away the suction of air-entrained or cavitated flow. In this study, a commercial CFD code was used to predict accurately the vortex generation for the specified intake design. These result shows the preliminary result of submerged vortex prediction for the Turbo-machinery Society of Japan Sump Test CFD standard model. At bottom wall, air volume fraction (red color) was found in a large scale to explain the submerged vortex generation at particular operation and configuration condition. And these indicate the free surface formation behind the bell mouth. Particularly, non-uniform approaching flow is a major parameter to govern the occurrence of the free-surface vortex. Futhermore the comparison between turbulence (k-ε & k-ω model) mode were executed in this study.

1. 서론

컴퓨터 시뮬레이션은 유체와 열전달과 관련된 제반 물리적 현상을 수학적 접근을 통해 컴퓨터를 이용하여 해석하는 분야로서 기계, 항공, 및 물리 그리고 최근에는 건축 설비에 이르기까지 방대한 적용 영역을 가지고 있다. 이는 유체, 열 그리고 물질전달을 지배하는 편미분 방정식들의 해를 구함으로써 다양한 물리값 (기류, 온도 및 기타 오염물질 분포, 연소 등)들의 특성을 파악

한다.

최근 컴퓨터의 급속한 발전으로 불과 10년 전에는 불가능하였던 직접모사법 (DNS) 및 대외동 모사법 (LES)등이 가능하게 되었고 유체와 관련된 대부분의 영역 (자동차, 항공, 전자 (반도체), 전기, 바이오, MEMS, 환경 및 건축 등)에서 폭 넓게 활용되고 있다. 기존 기계 및 항공에 국한된 해석영역이 다양한 영역으로 확장되면서 열분해용융시설과 관련된 제반 시설들에 대한 적용이 활발해 지고 있다.

본 연구에 적용된 섬프내 유동장 문제는 난류, 캐비테이션, 카르만 보텍스 등과 같은 복잡한 복잡한 물리적 특성을 가지고 있기 때문에 해석이 쉽지는 않다^{(1)~(3)}.

* 시립인천전문대학 기계과 교수
** (주)아이베이 GD3 대표이사
E-mail : rohlee@ivai.co.kr

하지만 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 정성적 자료 도출 및 데이터베이스 확보는 시간과 비용이 많이 드는 실험을 대체할 수 있다는 의미에서 매우 중요하며, 또한 보텍스 유무 문제 파악에 있어 물리적 특성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 여기서는 흡수정 모형실험 결과를 CFD 해석 결과와 비교하고 비정상 3차원 Vortex 발생 메커니즘을 분석함으로써 연구의 신뢰성을 확보하고 향후 전산 해석을 통한 흡수정 안정성 평가의 기반을 마련하는데 목적이 있다.

2. 흡수정 관련 CFD관련 연구동향

펌프장내 sump (흡수정) 주위의 유동과 관련된 연구는 해외에서는 오래 전부터 시작되어 실험방법의 급격한 발전덕택으로 많은 결과가 제시되었다⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾.

1998년 Rajendran은 사각채널안의 수직 흡입관을 포함한 흡입수조내의 3차원 난류유동을 수치해석하고 PIV (Particle Image Velocimetry) 실험으로 해석하였다. 국내에서는 2001년 이영호 교수에 의하여 흡입수조내의 자유표면과 자유표면 아래에서 발생하는 보텍스의 거동을 PIV 실험으로 유동가시화하려는 시도가 있었으며 현재 활발한 연구 활동 중에 있다. 이러한 연구결과는 Table 1과 같이 정리하였다.

Table 1에서 보는바와 같이 최근의 연구결과는 대부분이 일본에서 수행된 것이다. 일본에서는 2005년도 TSJ 규격을 재개정하면서 컴퓨터시뮬레이션의 타당성 검토를 수행한 바 있고, 이에 대한 연구결과를 히다치, 쿠보타, 에바라 등의 펌프업체들과 컨소시엄의 형태로 공동수행하고 있는 실정이다. 또한, 네덜란드 등 유럽에서 수행된 연구 결과 등 도 흡수정의 유동형태를 잘 표현하고 있다. Figs. 1과 2와 같은 연구결과를 미루어 보았을 때 일본이나 덴마크에서 수행된 흡수정 관련 연구

결과가 현재 수준에서 최고 수준이라고 판단된다. 그러나 결론적으로, 두 연구결과 모두 자유표면에 대한 효과를 고려하지 않았으며, 흡수정 유동문제 해석시 단상류 해석만이 행해졌다. 이때 보텍스의 발생을 예측하기 위해 별도의 보텍스 모델 등을 이용하여, 단상류 해석결과를 바탕으로 보텍스 발생을 가시화 할 수 있었다. 따라서 VOF (Volume of Fraction) 모델을 적용한 Air-Water 이상류 해석을 수행할 필요가 있으며, 추후 필요에 따라 자유표면을 고려한 해석 등을 적용할 필요가 있다고 판단된다.

Table 1의 연구동향을 자세히 살펴보면 대부분의 연구에서 사용된 연구방법은 in-house 코드가 아니고 상용코드 (CFX, FLUENT, STAR-CD 등과 같은 범용 CFD solver)를 사용하고 있다는 것이다. 이는 복잡한 3차원 유동장 해석에 있어서는 더 이상 in-house 코드로 해결이 되지 않는다는 것을 의미한다.

또한, 현재까지 많은 연구자들에 의해 정상상태 (steady state) 해석이 주로 수행 되었으나, 현재 일부기

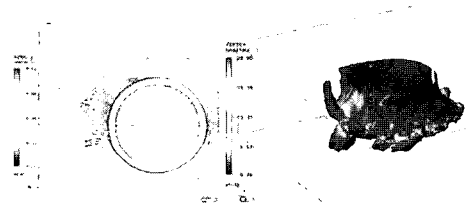
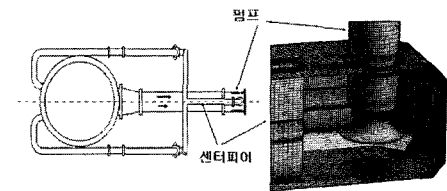
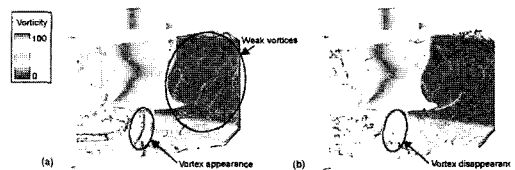


Fig. 1 Result examples of www.CF3D.dk



(a) computational grid



(b) predicted submerged vortex

Fig. 2 Result examples of Hitachi co in Japan

Table 1 CFD research trends for in the sump station

	Takanori 등	Iwano 등	Rajendran 등	WL/Delft Hydraulics	www.cf3d.dk	노형운 등
코드명	in-house	??	??	CFX 5.7	CFX5.7	CFX4.4
수치해법	FVM	FVM	FVM	FVM	FVM	FVM
난류모델	RNG K-ε	RNG K-ε	K-ε	K-ε	K-ε	K-ε
해석격자	Hexa Multi-block	Hexa Multi-block	Hexa Multi-block	Hexa Multi-block	Unstructured grid	Hexa Multi-block
정상/비정상	정상/비정상	정상	정상	정상	정상	정상
보텍스 유무	○	○	○	○	○	△
국가	일본	일본	미국	네덜란드		한국
발표년도	2000	2002	1998	2005	2005	2001

관에서 비정상 상태 (unsteady state) 해석을 진행하고 있으며 비정상 상태 해석을 통해 시간에 따라 위치와 크기가 가변적인 보텍스의 미소한 발생 및 움직임을 미소 시간 변화에 따라 관찰할 수 있으며, 유체역학적인 보텍스 발생원인 규명을 위한 기초자료로써 활용가치가 높다. 그러나 계산량의 방대함과 상당한 기간의 계산시간을 필요로 하기 때문에, 대용량 병렬 컴퓨팅 시스템이 완벽히 갖추어져야만 가능한 연구로써 현재까지 적용사례가 많이 보고 되고 있지 않다. 최근에 일본은 외법으로 격자생성을 수행하지 않으면서도 비정상결과를 얻을 수 있는 기법을 개발하여 발표하고 있다.

따라서 실제 많은 연구자들은 정상상태 해석만으로 자유표면 보텍스 발생과, 수중 보텍스 발생 유무를 파악하는 수준으로 연구를 진행하고 있고 정상상태 해석을 통한 보텍스 발생유무 등에 관한 해석 결과만으로도 최적의 흡수정 형상 결정을 위한 데이터로써의 충분한 활용가치가 있으며, 실제 최적 흡수정 설계를 위해 Delft Hydraulics에서 CFX에 의한 흡수정 해석을 수행하고 있다.

3. 수치해석적 방법

3.1 지배방정식

섬프장내 유동특성을 해석하기 위하여 적용된 지배방정식은 식 (1), 식 (2)와 같다. 식 (1)은 연속방정식이며, 식 (2)는 운동량방정식이다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + S_{u_i} \tag{2}$$

여기서, ρ =밀도, u_i =속도, P =압력, μ =점성계수, H =전엔탈피, h =정적엔탈피, T =온도, τ_{ij} =응력텐서를 의미한다.

3.2 형상 모델링과 경계조건

CFD 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 Fig. 3과 같이 TSJ에서 수행된 흡수정 전산해석 모델과 동일한 3차원 형상을 모델링 (단순한 형태의 흡수정 모델)하였다.

본 연구에서 계산격자의 형태는 HEXA, Tetra-

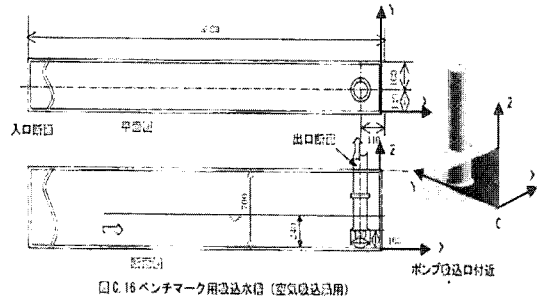


Fig. 3 Selected TSJ sump model for the comparative study

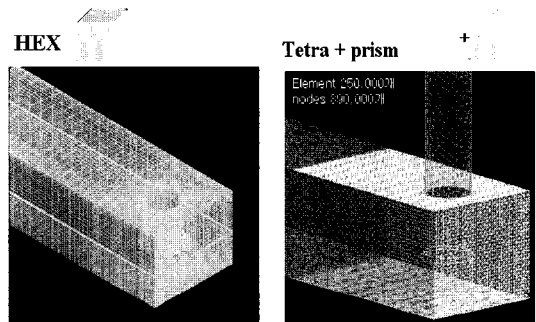


Fig. 4 Computational Hexa or Tetra-prism grid

Prism 두 가지 형태를 사용하였으며 격자 생성을 위해 ICEM-CFD 을 적용하였다. Fig. 4는 계산 격자의 형태를 보여준다. HEXA의 경우 약 240,000 nodes로 구성하였고 Tetra-Prism의 경우 250,000 nodes로 구성하였다. 또한 입구경계조건은 균일유입조건, 0.2546 m/s로 하였으며 출구경계조건 : 압력조건을 적용하였다. 또한 공기의 보텍스 현상 (Air-Water 이상류)을 표현시켜주기 위하여 VOF 모델의 적용하였으며 Free-Surface 모델을 적용하였다⁽⁸⁾.

본 연구에서 계산격자 수가 해석결과에 미치는 영향을 살펴보고자 약 90,000개의 노드로 이루어진 Tetra-Prism 형태의 성긴 격자를 생성하였다.

4. 결과 및 검토

4.1. 격자계에 따른 비교

격자계의 따른 해석결과를 살펴보기 위하여 Fig. 5와 같이 다양한 격자계를 구성하여 계산하였다. Fig. 5(a)는 Tetra와 prism의 혼합 형태로서 element가 90,000

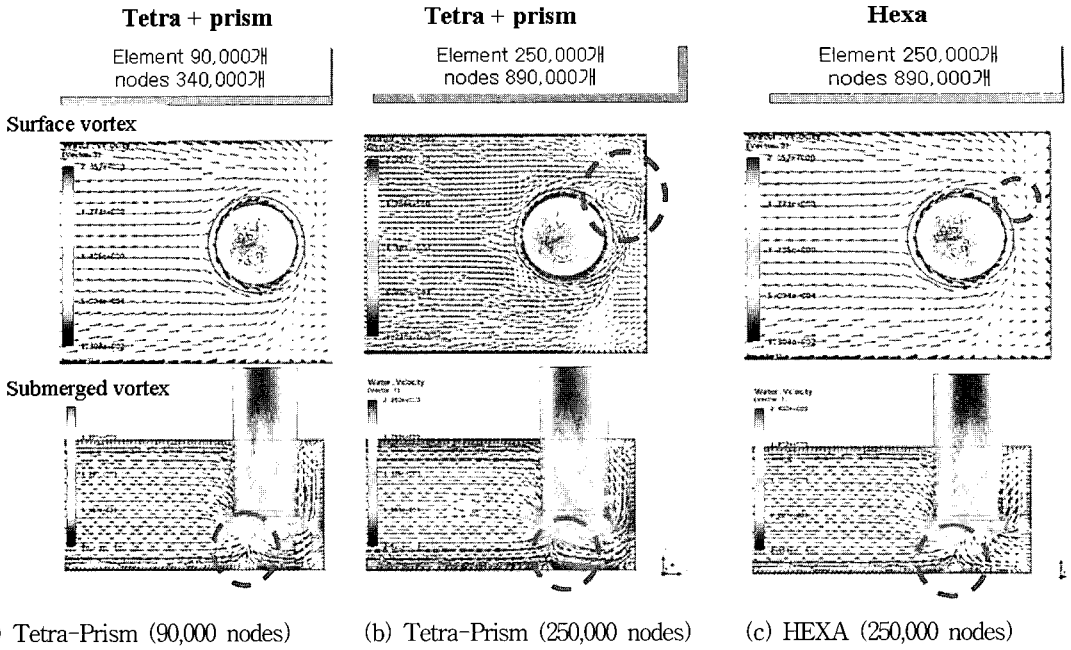


Fig. 5 Velocity vectors with the resolution and shape of the grid at the horizontal plane and the vertical plane of sump station

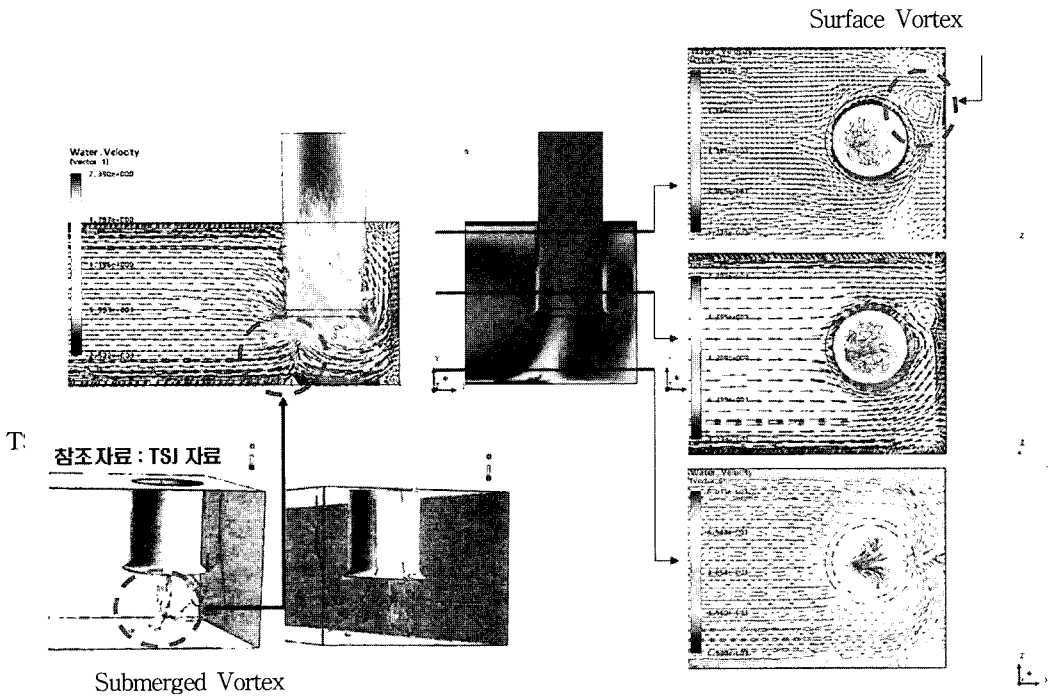


Fig. 6 Calculated velocity vector and VOF contours at the several plane

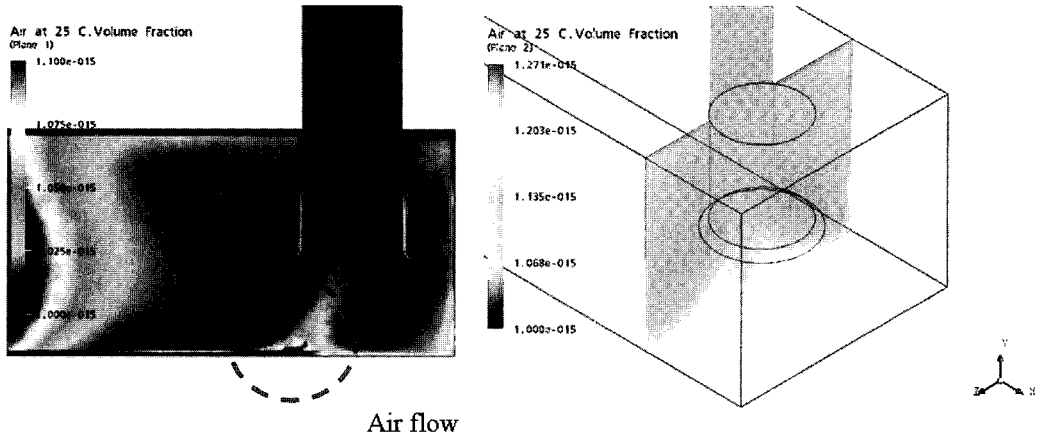


Fig. 7 Air VOF contours of the several plane

nodes이고 Fig. 5(b)는 Tetra와 prism의 혼합 형태로서 element가 250,000 nodes로서 Fig. 5(a)보다 약 2.8배의 element를 더 가지고 있는 경우이다. 반면에 Fig. 5(c)는 Hexa 격자로서 Fig. 5(b)와 같이 동일한 element를 갖는 경우로 선택하였다.

일반적으로 Hexa의 경우에는 비교적 매우 높은 정확성 해를 얻을 수 있는 장점이 있으며 격자 형상이 매우 복잡한 경우에는 격자형성에 문제가 많은 단점을 가지고 있어 부득이 하게 안정된 해를 얻을 경우에만 사용되는 기법이다. 반면에 Tetra의 경우는 비교적 정확한 해를 얻기 위하여 많은 격자를 생성시켜 주어야 하는 단점이 있지만, 최근 격자가 복잡한 경우에는 격자형성에 매우 쉬어 최근에 많이 사용되는 기법이다. 또한 Tetra 격자인 경우에는 벽면에서 경계층문제를 처리하는 데 발산소지가 있어 안정된 해를 얻기 위하여 반드시 prism 격자를 생성시켜 주어야 한다.

이러한 3가지의 경우에 대한 결과 (Fig. 5)를 살펴보면 surface 보텍스를 해석하기 위해서는 적어도 타당성 있는 격자를 보장 시켜주어야 한다고 판단된다. 즉 Fig. 5(a)에서 보듯이 표면에서 보텍스의 발생이 생성되고 있지 않고 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 5(b)와 같이 격자를 2.8배 더 조밀하게 구성된 경우에는 자유표면 보텍스가 관찰되고 있음을 알 수 있었다. Fig. 5(b)에서 보듯이 HEXA 격자의 경우 표면 보텍스가 다소 나타나는 하나 미약한 형태의 보텍스가 형성되고 있음을 확인할 수 있었다.

따라서, 계산격자를 HEXA 형태의 격자 또는 Tetra-Prism 중 어느 것을 선택해야 하는 기준은 계산시간

(computational time)이 적은 것을 선택하여 주는 것이 바람직하다고 판단할 수 있었다. 그러나 이에 대한 기준은 어느 정도 타당성 있는 격자를 보장하여 주어야 한다는 것이다. 즉 Figs. 6과 7과 같이 계산결과로부터 자유표면 흡수정 유동을 해석할 수 있음을 알 수 있었다.

특히 Fig. 7은 공기의 VOF 값을 가시화하여 나타나어 흡입관 하단부에 공기의 VOF가 존재하고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 수중 보텍스의 생성함을 의미한다. Fig. 7에서 보여준 결과는 TSJ 자료 (Fig. 7의 좌측하단)의 수중 보텍스 발생위치와 유사한 위치에서 수중 보텍스가 발생하고 있다.

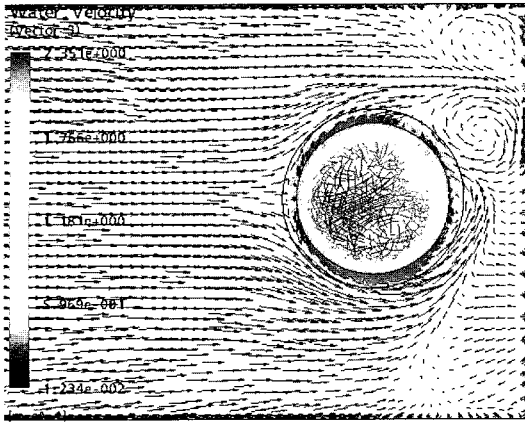
따라서 일본 TSJ의 결과와 비교하여 본 연구의 CFD 해석에 사용된 모델의 해석결과와 타당성이 일치적으로 확보되었으며, 기존의 일본, 덴마크 등에서 수행된 최신 연구결과 수준의 결과를 확보할 수 있었다.

4.2. 난류모델에 따른 비교

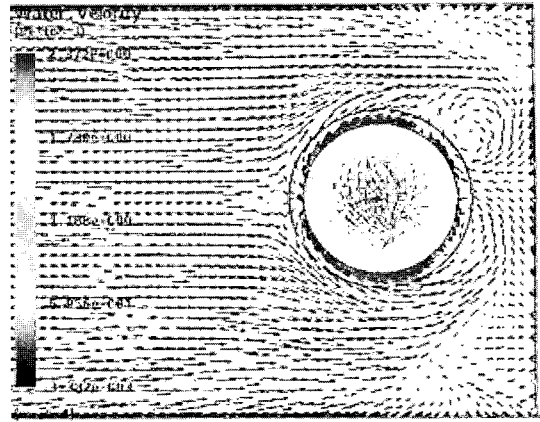
본 연구는 난류모델의 변화에 따른 유동장의 해석결과 예측정도를 비교하기 위한 목적으로 Fig. 8과 같이 수행되었다.

일반적인 상용 CFD 코드에서 기본적으로 채택하고 있는 k-ε 모델과 1994년 Menter에 의해 제안된 k-ω SST 모델과의 해석결과를 Figs. 8(a)와 (b)와 같이 비교하였다.

두 결과의 표면 속도벡터 분포에 대한 차이점이 거의 나타나지 않으며, 해의 수렴성이 k-ω SST 모델보다 우수한 특징을 가지며, 벽면에서 보다 성긴 격자계의 구성



(a) k- ϵ model



(b) k- ω model

Fig. 8 Surface velocity vector with the turbulent model

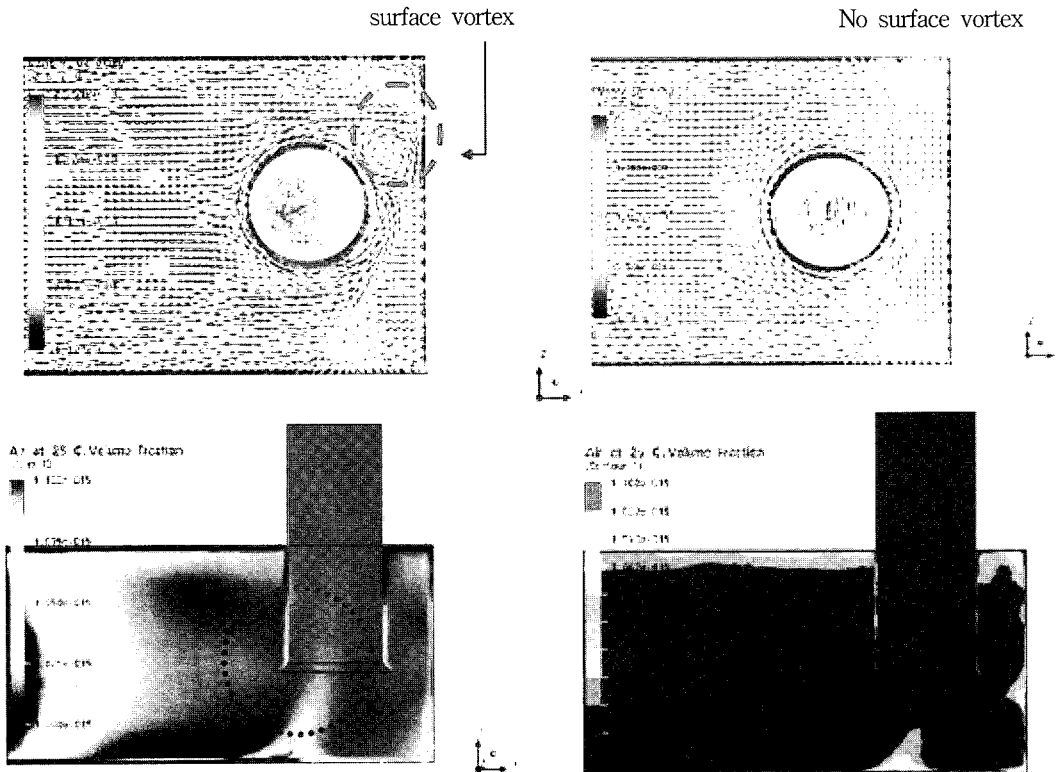


Fig. 9 Surface velocity vector with planes of symmetry or asymmetric

을 허용하는 k-ε 모델의 적용이 보다 효율적일 것으로 판단된다.

4.3 대칭유무에 따른 해석결과의 변화

Figure 8를 자세히 살펴보면 흡수정내 배관이 왼쪽으로 약간 치우쳐 있다. 즉 TSJ의 모델은 보텍스의 생성을 인위적으로 생성시켜 주기 위한 것으로 판단된다, 따라서, 본 연구에서는 Fig. 9와 같이 대칭성과 비대칭성을 연구결과를 비교하기 위하여 해석을 하였다.

Figure 9에서 볼 수 있듯이 비대칭 구조에서는 surface vortex가 발생이 되었지만 대칭적인 구조에서는 Fig. 9의 오른쪽에서 보는바와 같이 보텍스가 발생되지 않았음을 알 수 있다. 결론적으로 보았을 때 결국 좌우 대칭여부에 따른 유동의 교란은 자유표면 보텍스 발생 여부를 좌우할 수 있음을 암시하고 있다. 그러나 수중 보텍스의 발생은 두 가지 모두 발생을 하였지만 그 세기는 비대칭성이 무척 큼을 알 수 있다.

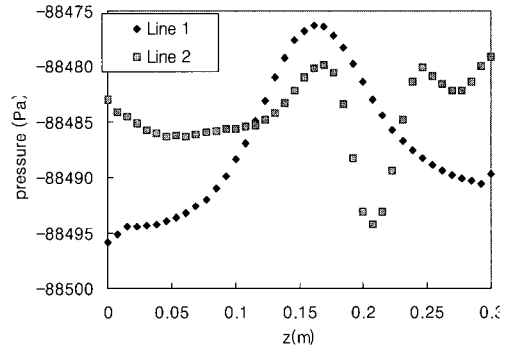
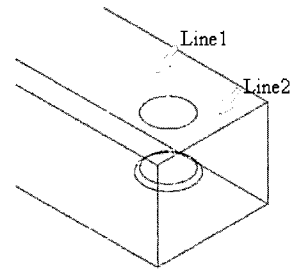
또한 2가지 경우에 보텍스 발생여부를 정확히 살펴보기 위하여 Fig. 10과 같이 배관의 전단 (Line 1)과 후단 (line 2)에 압력분포를 살펴보았다. Fig. 10의 (a)는 비대칭인 경우의 압력분포로 압력변화의 폭이 급격하게 변화는 곳 (Line 2)에서 자유표면 보텍스의 발생을 검토할 수 있었다. 그러나 대칭성 모델과 확연하게 차이가 나는 것은 대칭성 모델의 Line 2는 안정성 압력분포를 가지고 있다는 것이다. 즉 압력분포장이 안정하게 분포되고 있다면 보텍스의 발생은 생기지 않음을 알 수 있다.

이러한 결과는 전단의 압력분포 (Line 1)의 경우 비대칭임에도 불구하고 유동장이 균일하게 밀려들어오기 때문에 보텍스의 발생은 발생하지 않았다. Fig. 10(b)에서 볼 수 있듯이 대칭 모델에서도 같은 경향을 나타내고 있다.

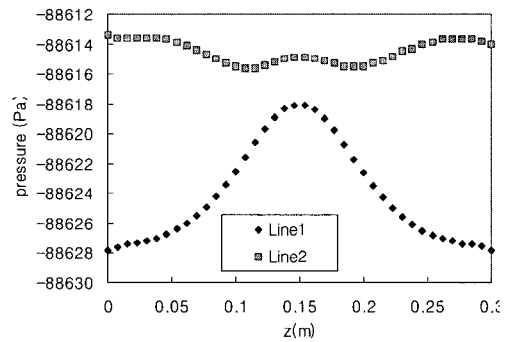
5. 결론

CFD 해석 가능성을 평가하기 위하여 TSJ 표준 단순 흡수정 모델에 대한 수치해석을 수행하였다. 공기와 물이 혼합된 VOF 모델과 Free-surface 모델을 적용하였으며, 해석결과 자유표면 보텍스와 수중 보텍스의 발생을 예측할 수 있었다.

계산격자의 형태에 따른 해의 정확성을 판단하고자 Tetra-Prism 및 HEXA형태의 격자계를 적용한 해석을 수행하였으며, 이에 대한 결과는 격자형태와 상관없



(a) asymmetric plane



(b) symmetric plane

Fig. 10 Pressure variation along the Line 1 and Line 2 in the symmetry or asymmetrical sump station

이 타당한 격자를 보장하여 준다면 보텍스의 재현이 가능하다는 것이다.

또한 난류모델의 변화에 따른 해석결과를 비교하고자 k-ε, k-ω 모델을 적용한 계산을 수행하였으며, 두 결과가 큰 차이점을 나타내고 있지 않음을 확인되었다. 따라서 정상상태에서는 해의 수렴성이 우수하며, 보다 성긴 격자의 사용이 가능한 k-ε 모델을 적용하는 것이 효율적이라 판단된다. 흡수정의 대칭성 여부는 자유표면 보텍스를 좌우할 수 있는 인자임으로 반드시 설계시 고

려하여 될 사항이다.

참고문헌

- (1) Ryuichiro IWANO, Takanori Shibata, Takahide Nagahara, Tomoyoshi Okamura, "Numerical Prediction Method of a Submerged Vortex and its Application to the flow in Pump Sumps with and without a baffle plate," The 9th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamic of Rotating Machinery, 2002.
- (2) Standard Method for Model Testing the Performance of a Pump Sump, TSJ, 2005.
- (3) HI Centrifugal Pump and Application, 1994.
- (4) 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.
- (5) 최종웅, 김정환, 남창도, 김유택, 이영호, "PIV에 의한 흡입수조내 흡입관 주위의 유동특성에 관한 연구", 대한기계학회 2001년도 추계학술대회 논문집 B(2001), pp. 563-569.
- (6) M. Padmanabhan and G. E. Hecker, "Scale Effects in Pump Sump Models," J. of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 11(1984), pp. 1540~1556.
- (7) 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.
- (8) ANSYS-CFX10 Manual, ANSYS.