

펌프 흡입수조 모형시험에서의 수중와에 대한 유동해석

김진영* · 정경남* · 김휴곤** · 김영학**

Numerical Analysis of the Subsurface Vortices in the Pump Sump Models

Kim Jin Young*, Chung Kyung Nam*, Kim Hyu Gon**, Kim Young Hak**

Key Words : Pump sump(펌프 흡입수조), subsurface vortex(수중 와류), CFD(전산유체역학)

ABSTRACT

In order to study the characteristics of the subsurface vortex the flow fields of the three pump sump models were analysed by the numerical simulation. The calculation results show that there are circulation flows in the pump sump model and maximum vorticity strength which make iso-surface from the wall to the pump inlet could be used for predicting the subsurface vortex generation. Also, the flow field for the sump model with anti-vortex devices simulated and the results shows that there is no vorticity value which make iso-surface from the sump wall to the pump inlet.

1. 서론

발전소의 냉각수 순환용 펌프(Circulating water pump)와 같이 대용량의 펌프의 경우 흡입 수조의 형상 및 유입 조건에 따라 펌프 성능에 나쁜 영향을 주는 보오텍스(Vortex)나 펌프 흡입구 부근에서의 회전 유동 등이 발생할 수 있다. 이러한 유동은 펌프 효율의 저하, 진동 및 소음 문제를 일으킬 수 있으므로 냉각수를 공급하기 위하여 설계된 취수조에 대해서는 반드시 모형시험을 통해 흡입 수조 내부의 유동 상태가 펌프의 성능에 영향을 주지 않음을 확인하여야 한다⁽¹⁾. 그러나 모형시험의 경우 시험을 수행하는 데에 많은 비용 및 시간이 요구되기 때문에 최근에는 전산유체역학(Computational fluid dynamics)을 이용하여 이를 대체하고자 하는 연구가 이루어지고 있다.

Constantinescu⁽²⁾와 Rajendran⁽³⁾은 흡입수조 모형에 대한 수치해석이 가능한 코드를 개발하고 이를 이용한

해석 결과와 PIV(Particle image velocimetry) 시스템을 이용하여 측정된 와도(Vorticity) 값을 비교하여 수치해석에 의해 보오텍스의 발생 예측이 가능함을 보였다. 또한 Iwano⁽⁴⁾는 보오텍스의 발생이 예상되는 위치에 보오텍스 모델을 적용한 유동 해석을 통해 수중 와류 내부의 압력을 추정하였으며 일본터보기계학회인 TSJ⁽⁵⁾에서는 동일한 해석 대상에 대해 여러 가지 프로그램을 사용하여 정상 및 비정상 유동해석을 통해 펌프 흡입수조 모형시험에서의 보오텍스 발생 예측이 가능한가를 비교하여 펌프 흡입수조 모형시험에서의 수치해석의 활용 가능성을 검토하였다. 한편 국내에서는 노형운 등⁽⁶⁾이 수치해석을 통해 흡입수조 내의 유동장 해석을 수행하여 유선의 변화로부터 보오텍스의 발생을 추정하는 바 있다.

펌프 흡입수조 모형시험에 있어서 발생하는 보오텍스는 자유 표면으로부터 발생하여 공기와 같이 펌프로 흡입되는 공기흡입 와류(surface/air-entraining vortex)와 수조의 바닥, 옆 또는 뒷 벽면에서부터 발생하는 수중 와류(subsurface/undergrounded vortex)로 분류될 수 있다. 본 연구는 당사에서 모형 시험을 수행한

* 현대중공업 선박해양연구소

** 현대중공업 펌프터빈설계부

E-mail : jinyoung11@korea.com

세 곳의 발전소 순환수 펌프 흡입 수조에 대하여 수치 해석을 수행하고 그 결과로부터 수중 와류의 발생을 예측할 수 있는 기준을 마련하기 위해 수행되었다. 수조 모형 시험에서 관측되는 보오텍스(공기흡입 와류 및 수중 와류)의 생성 및 소멸 과정은 시간에 따라 변하는 비정상 유동이므로 수중와의 발생 및 소멸 현상을 정확히 모사하기 위해서는 비정상 유동해석을 수행하여야 하는데 이 경우 많은 계산 격자와 계산 시간이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 정상 상태에 대해 계산을 수행하여 수중 와류 발생과 유동장의 관계에 대해 고찰하였다.

2. 수치 해석 방법

수치 해석은 실물 수조를 1/10로 축소한 3 종류의 수조 모형 형상에 대하여 수행되었으며 Fig. 1 및 Table 1에 이들 수조의 주요 치수를 나타내었다. 여기에서 D는 모형 펌프의 입구 지름을 나타내며 Sump 1, Sump 2, Sump 3의 모형 펌프의 입구 지름은 각각 128 mm, 159 mm, 192 mm의 값을 갖는다.

계산 격자는 3차원 정렬격자 생성 프로그램인 ICEMCFD Hexa⁽⁷⁾를 이용하여 다중 블록 격자를 생성하였으며 계산에 사용된 Sump 1의 표면 격자를 Fig. 2에 나타내었다. 계산 격자는 약 40 만개가 사용되었다. 수치 계산은 상용 수치해석 프로그램인 CFX-TASCflow 2.12⁽⁸⁾을 사용하였다. 작동 유체는 물($\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$)이며 입구에는 압력 경계 조건, 출구에는

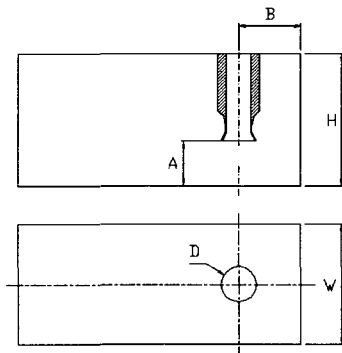


Fig. 1 Geometry of the sump model

Table 1 Main dimensions of the sump models

Sump	W	H	A	B
Sump 1	3.51 D	4.64 D	0.86 D	1.41 D
Sump 2	3.40 D	3.71 D	1.26 D	1.76 D
Sump 3	3.00 D	3.33 D	2.23 D	1.00 D

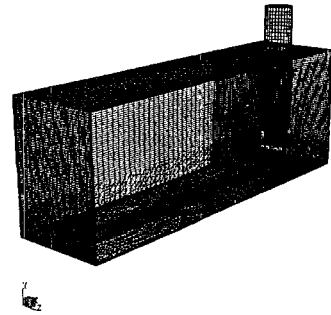


Fig. 2 Calculation grid for the Sump 2

질량 유량, 자유 표면에는 대칭 조건을 적용하였고 난류 모델은 Wilcox의 $k-\omega$ model을 사용하여 계산하였다.

3. 3. 해석 결과

3.1. 수중 와류의 와도

Sump 1의 경우 Table 2에 보인 바와 같이 3 가지 유량 조건에서 수조 모형 시험이 수행되었으므로 수치 계산도 동일한 조건에서 수행되었다. 표에서 보듯이 유량이 가장 큰 Case 3에서만 수중 와류가 수조 바닥에서 발생하는 것으로 관측되었다. Fig. 3은 계산 결과로부터 그린 펌프 관 주위의 유선을 보여주고 있는데

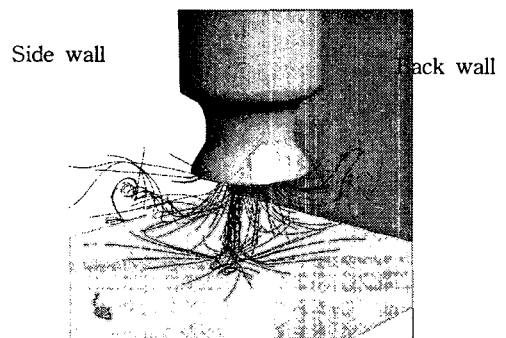


Fig. 3 Streamlines around the pump inlet(Case 3)

Table 2 Calculation condition for the Sump 1

Case	Flow-rate [m ³ /min]	Test result
Case 1	1.25	None
Case 2	1.87	None
Case 3	3.93	Subsurface vortex at the bottom wall

바닥 면과 옆 벽 및 뒷벽에서 회전하는 유동을 볼 수 있으며 이러한 회전 유동은 Sump 1의 3 가지 경우 모두에서 나타나고 있다. 그러나 유동의 회전 성분의 크기는 유량이 클수록 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 아래의 식 (1)과 같이 속도(U)의 길이(x)에 대한 미분치의 차이로 정의되는 와도(vorticity)의 등고선(contour)이나 동일 표면(iso-surface)을 그리면 회전 유동의 강도를 추정할 수 있다.

$$\omega_{ij} = \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

Fig. 4는 Case 3의 경우에서 수조 벽면과 수직인 방향으로의 와도 등고선과 이들 면에서의 속도 벡터 및 바닥으로부터 펌프 흡입구까지 연결되는 수직인 방향의 와도 동일 표면을 만든 예를 나타낸다.

이와 같이 유동의 회전 성분이 클수록 벽면에서의 와도의 절대값이 크며 벽면에서부터 펌프 흡입구까지 연결되는 와도 동일 표면을 만드는 최대 와도 값이 크게 되므로 벽면 근처에서의 와도 값 및 벽면에서부터 펌프 흡입구까지 연결되는 와도 동일 표면을 만드는 최대 와도 값을 수중 와류의 발생 여부와 비교하면 유동의 회전 강도와 수중 와류의 관계를 추정할 수 있다. 계산 결과의 정량적인 비교를 위해 다음과 같이 벽면

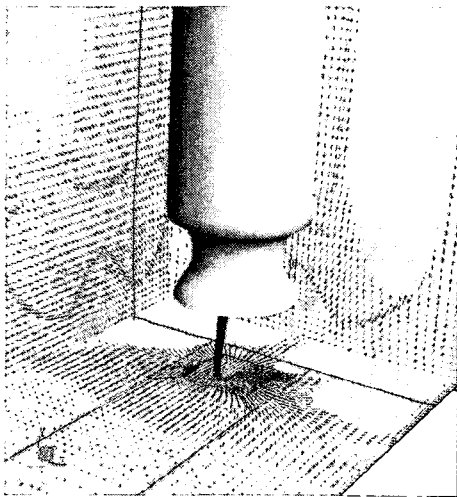


Fig. 4 Vector plot with contour and iso-surface of vorticity(Case 3)

Table 3 Calculated vorticity for the Sump 1

Case	Wall	Range*	Max. value**
Case 1	Side	-11.8 ~ 5.8	-8
	Bottom	-23.7 ~ 11.3	-14
	Back	-6.5 ~ 5.4	-4
Case 2	Side	-22.4 ~ 7.7	-14
	Bottom	22.2 ~ 22.3	20
	Back	-13.7 ~ 12.3	-11
Case 3	Side	-48.3 ~ 17.1	-33
	Bottom	-39.5 ~ 47.3	45
	Back	-18.9 ~ 21.9	5

* Vorticity range at the $l/L_{sl} = l/L_{bo} = l/L_{ba} = 0.03$ plane

** Maximum vorticity(absolute value) which make continuous iso-surface from the wall to the pump inlet

근처의 위치를 정하여 비교하였다. 바닥 면으로부터 펌프 흡입구까지의 거리를 L_{bo} , 옆 벽면으로부터 펌프 중심까지의 거리를 L_{sl} , 뒷 벽면으로부터 펌프 중심까지의 거리를 L_{ba} 라고 하고 벽면에서부터의 거리를 l 이라고 할 때 각각의 l/L_{bo} , l/L_{sl} , l/L_{ba} 값이 0.03이 되는 평면에서의 와도의 최대 및 최소값과 벽면에서부터 펌프 흡입구까지 연결되는 와도 동일 표면을 만드는 최대 와도 값을 Table 3에 나타내었다. 최대 와도의 절대값이 가장 큰 경우는 바닥 면이며 바닥 면 및 옆 벽면에서의 최대 와도 값은 유량이 클수록 그 절대값이 커지며 뒷 벽면에서의 최대 와도 값은 상대적으로 작은 경향을 보인다. 따라서 Sump 1의 경우에는 최대 와도값이 가장 큰 바닥 면에서 수중 와류가 발생할 가능성이 가장 크다고 할 수 있다.

Sump 2와 Sump 3에 대한 계산 결과로부터 작성된 와도 동일 표면과 이 때의 시험에서의 수중 와류의 발생 사진을 Fig. 5에 나타내었으며 계산된 벽면 근처에서의 와도의 최대, 최소값 및 벽면에서부터 펌프 흡입구까지 연결되는 와도 동일 표면을 만드는 최대 와도 값을 Table 4에 나타내었다. 표에서 와도 동일 표면의 최대 값이 없는 경우는 벽면에서 펌프 흡입구까지 연결되는 와도 동일 표면이 없다는 것을 나타내고 있다.

Sump 2의 경우 시험에서 바닥 면 및 옆면에서 모두 수중 와류가 발생하였으며 이는 유동해석 결과로부터 벽면에서 펌프 흡입구까지 연결되는 와도 동일 표면을 만드는 와도의 최대값으로 작성된 와도 동일표면과 유사한 형상을 보이고 있다. 또한 Sump 3의 경우 사진에서 보듯이 양 측벽에서 수중 와류가 발생하고

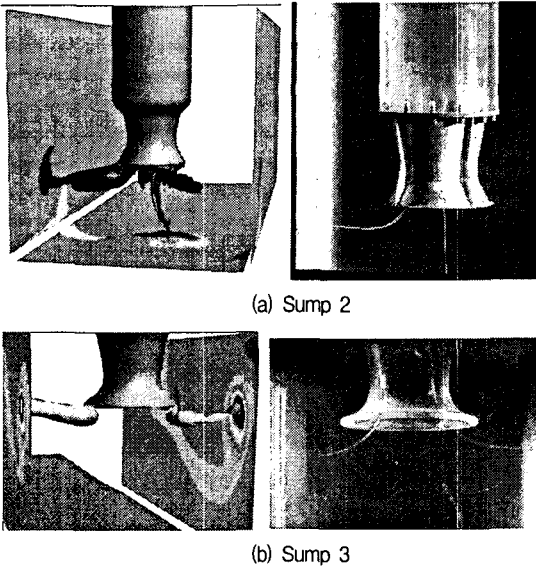


Fig. 5 Calculated vorticity iso-surface and tested underground vortex generation

있으나 바닥 면으로부터 흡입구까지의 거리가 상대적으로 크기 때문에 바닥 면으로부터 발생하는 수중 와류는 관찰되지 않았으며 이는 유동해석 결과에서도 재현되고 있다.

Sump 2의 계산 결과는 벽면에서부터 펌프 흡입구까지 연결되는 와도 동일 표면을 만드는 최대 와도 값의 절댓값이 17로 Sump 1, Case 2에서의 바닥 면에서의 값인 20보다 작으나 수중 와류가 발생하였다. 그러나 기준 면에서의 와도 범위의 최대값은 Sump 2의 옆 벽면에서의 값이 29.1로 Sump 1, Case 2의 22.3보다 크게 계산되었다. 이로부터 수중 와류에 대한 발생은 어느 한 값만으로 예측될 수 없고 두 가지 값 즉, 벽면 근처에서의 와도 값의 크기와 벽면에서 펌프 흡입구까지 연결되는 와도 동일 표면의 최대 와도 값의 크기로 예측될 수 있다. 잠정적으로 각각 29와 17 이상인 경우로 놓을 수 있는데 이들 값이 수중 와류의 발

Table 4 Calculated vorticity for the Sump 2 & Sump 3

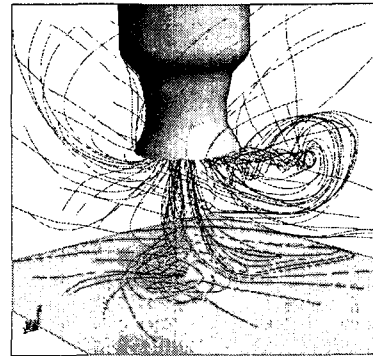
Sump	Wall	Range	Max. value
Sump 2	Side	-7.6 ~ 29.1	17
	Bottom	-55.5 ~ 27.2	-41
	Back	-1.5 ~ 1.2	-
Sump 3	Side	-4.6 ~ 30.8	30
	Bottom	-7.1 ~ 5.2	-
	Back	-4.0 ~ 3.4	-

생 여부를 정확히 결정하는 기준으로 활용되기 위해서는 보다 많은 시험 결과와의 비교가 필요할 것이다

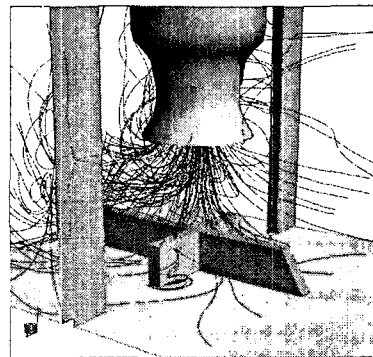
3.2. 와류 방지 구조물의 영향

펌프 흡입 수조의 모형 시험에서 기본 형상에 대한 시험을 통해 보오텍스가 발생하면 이를 방지하기 위한 구조물을 수조 내부에 설치하게 된다. 여기에서는 수중 와류를 방지하기 위해 설치한 구조물이 유동장에 미치는 영향을 수치 해석을 통해 검토하였다. 계산은 Sump 2의 형상에 적용하여 수행되었으며 수중 와류 방지 구조물의 형상은 Fig. 6 (b)와 같으며 이 와류 방지 구조물은 기존에 수행된 시험을 통해 수중 와류 발생 방지 성능이 검증되었다.

계산 결과 Fig. 6의 유선 분포와 같이 와류 방지 구조물이 없는 경우에는 옆 벽면과 바닥 면에서 강한 회전 유동이 발생하고 있으나 와류 방지 구조물이 있는 경우에는 방지 구조물의 영향으로 벽면에서부터 발생하는 회전 유동은 관찰되지 않는다. 또한 바닥 면에 설치된 와류 방지 구조물에 의해 유동의 방향이 바뀌



(a) Without anti-vortex devices



(b) With anti-vortex devices

Fig. 6 Streamlines for the Sump 2

며 발생하는 회전 유동은 방지 구조물에 의해 회전 성분이 감소하며 펌프로 흡입됨을 알 수 있다. 한편, 기준 단면에서의 와도 절대값을 살펴보면, 와류 방지 구조물을 가지는 경우에 그 크기가 구조물이 없는 경우보다 더 크게 계산되었으나 이는 구조물에 의해 유동의 방향이 급격히 바뀌면서 가지게 되는 값으로 수중 와의 생성에는 영향을 주지 않는다. 이는 위와 같은 유선 분포와 와류 방지 구조물이 있는 경우에는 바닥면 또는 옆 벽면에서부터 펌프 흡입구까지 연결되는 와도 동일 표면을 만드는 와도 값이 존재하지 않는 것으로부터 확인할 수 있다. 다시 말하면 이는 수조 벽면에서 발생하는 보오텍스가 와류 방지 장치에 의해 소멸되는 것을 나타내고 있다.

4. 결론

펌프 흡입수조 모형의 정상 상태 수치 해석 결과로부터 수중 와류의 발생을 추정하기 위하여 3 가지 형상의 수조 모형에 대하여 수치 해석을 수행하였고 그 결과로부터 벽 근처에서의 와도 강도와 벽면에서부터 펌프 입구까지 연결되는 동일 와도 면을 만드는 와도의 최대값이 수중 와류의 발생 여부를 판단하는 기준으로 사용될 수 있음을 제시하였다. 또한, 와류 발생 방지 구조물이 유동장에 미치는 영향과 이 때의 와도 강도 변화를 수치 해석을 통해 고찰하였다. 그러나 정확하게 수중 와류의 발생 여부를 판단할 수 있는 정량적인 값을 제시하기 위해서는 보다 많은 수조 형상에 대한 계산과 시험 결과와의 비교가 요구된다. 또한 수치 해석을 이용하여 와류 방지 구조물의 형상을 최적화한다면 시험에 소요되는 많은 시간과 비용을 절감할 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Hydraulic Institute, 1998, "American National Standard for Pump Intake Design," ANSI/HI9.8.
- (2) G. S. Constantinescu and V. C. Patel., 1998, "Numerical Model for Simulation of Pump-intake Flow and Vortices", Journal of Hydraulic Engineering, Feb., pp. 123-134.
- (3) P. Rajendran and V. C. Patel, 1988, "Experiments of Flow in a Model Water-pump Intake Sump to Validate a Numerical Model", FEDSM98-5098, pp. 1-10.
- (4) 岩野龍一郎, 柴田貴範, 2002, "流れ解析によるポンプ吸水槽内の水中渦豫測手法の開発", 日本機械學會論文集(B編), 66巻 667, pp. 652-657.
- (5) Turbomachinery Society of Japan, 2005, "Standard Method for Model Testing the Performance of a Model Sump," TSJ S002.
- (6) 노형운, 김재수, 서상호, 2002, "CFD에 의한 펌프장 Sump내 유동해석", 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 89-94.
- (7) ICFM CFD Engineering, 2002, ICFM CFD Meshing Tutorial Manual Version 4.1.
- (8) AEA Technology, 2002, CFX-TASCflow Computational Fluid Dynamics Software User Documentation Version 2.12.