

## 화력발전소 순환수펌프 흡입관 주위에서의 유동특성에 관한 연구

최성룡\*, 안중현\*\*, 문승재\*\*, 이재현\*\*, 유호선\*\*\*

### A study on the flow characteristics around a suction pipe of circulation water pump in thermal power plant

Sung Ryong Choi\*, Jung Hyeon Ahn\*\*, Seung Jae Moon\*\*, Jae Heon Lee\*\* Ho sun Yoo

**Key words :** Vortex, CFD, Model test, Intake sump

#### Abstract

Vortex and swirl occurring in a pump suction intake sump normally reduce the performance and disturb the safe operation of the circulation water pump in thermal power plants. This paper presents a case study of one particular intake sump design via a CFD analysis and a hydraulic model testing. The physical experiments and numerical analysis were performed under two flow and three level variation conditions. The vortex patterns around the pump suction pipe have been predicted by a commercial CFD code with the k-ε model. The model tests were conducted on a 1/10 model for a practical intake sump. The location, number and general pattern of the free surface vortex and submerged vortex predicted by CFD simulation were found to be a good agreement with those observed in the model testing.

#### 1. 서론

펌프 흡입수조 내 흡입관 주위에서 보텍스의 형성은 펌프의 성능 저하와 불량한 운전상태 및 펌프 손상의 원인이 된다. 원활한 펌프의 작동을 위해서는 펌프 흡입수조는 펌프 흡입구로 유입되는 침전물이나 공기를 제거할 수 있는 구조를 가져야 한다. 그러나 수위가 임계값 아래로 내려가거나 펌프 유량이 임계점 이상으로 올라갈 때 자유표면으로부터 보텍스가 발생하며, 이러한 보텍스들은 강한 공기의 흡입을 동반하여 진동, 캐비테이션, 펌프성능저하를 가져온다. 또한, 흡입수조의 바닥과 벽면에서 발생하는 와는 침전물 흡입을 동반한다. 만약 물속에 이러한 강한 공기들이 존재하면 펌프 흡입관 주위에 선회류를 유발시키며 펌프의 성능을 저하시키는 원인이 된다. 특히 대형 펌프에서는 이와 같은 유동 환경은 펌프의 성능저하는 물론 펌프 손상을 유발하기도 한다. 따라서 펌프 흡입수조 설계 시 흡입관에서 공기의 흡입과 선회류를 방지하기 위해서는 펌프 흡입수조 및 흡입관 주위에서 보텍스의 구조, 위치 등 유동패턴 연구가 필요하다.

화력발전소에서 복수기 냉각수 취수용 순환수펌프는 발전소에 설치되는 펌프 중 크기, 중량 및 유량이 최대인 대형 펌프로서 제작공장에서 실제 운전시험을 통한 성능시험이 매우 곤란하다. 그러나 최근에 컴퓨터 용량 및 수치해석 방법의 급속한 발달에 힘입어 CFD(Computational Fluid Dynamic) 기법이 비약적으로 성장하여 실험으로 얻기 어려운 유용한 정보를 많이 얻을 수

있게 되었고 이러한 결과를 바탕으로 최적설계에 반영하여 그 효율을 증대시키고 있는 추세이다.[1],[2][3]

따라서 펌프 및 흡입수조 설계 시 컴퓨터에 의한 CFD 해석, 수조 모형시험 등의 간접적인 방법을 통해 예상 문제점을 조사하여 해결함으로써 비용을 상당히 줄일 수 있다.

본 연구에서는 자유표면을 갖는 영흥화력 발전소 복수기냉각수 취수용 순환수펌프 흡입수조의 수위 변화와 펌프 유량변화에 따른 펌프 흡입관 주위의 유동패턴을 CFD 해석 및 수조 모형시험을 통해 비교, 분석하고, 보텍스 발생을 방지할 수 있는 장치를 설치하여 그 성능을 검증하였다.

#### 2. 수치해석

##### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 유동을 해석하는 여러 가지 방법 중에 유한체적법(FVM)을 기본으로 하였으며, 적용된 지배방정식은 연속방정식(Continuity equation)과 운동량방정식(Momentum equation)이며 식(1), (2)와 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{DU}{Dt} = \rho g + \nabla \cdot \tau_{ij} - \nabla p \quad (2)$$

여기서  $\rho$ ,  $U$ ,  $p$  및  $\tau$ 는 각각 밀도, 속도, 압력 및 응력텐서를 나타낸다.

##### 2.2 형상 모델링과 경계조건

\* 한국남동발전(주), sdragon@kosep.co.kr

\*\* 한양대학교 대학원, jhlee@hanyang.ac.kr

\*\*\* 숭실대학교 대학원 hsyoo@ssu.ac.kr

수치해석은 CFD 결과의 신뢰성을 검증하기 위해 실물 수조를 1/10로 축소한 수조 모형과 동일한 3차원 형상을 모델링 하였다. 계산격자는 3차원 격자 생성프로그램인 Gambit 2.2를 이용하여 다중 블록격자를 생성하였다. Fig. 1은 수치해석에 사용된 수조모형의 격자의 형태를 나타낸다.

계산격자는 약 40만 nodes의 Hex/Wedag를 사용하였으며 CFD 해석은 상용 수치해석 프로그램인 Fluent Inc. 사의 Fluent 6.2(2005)를 사용하였다. 사용유체는 물( $\rho=998.2 \text{ kg/cm}^3$ )이며 입구 경계조건은 균일유입조건, 출구경계조건은 압력조건을 적용하였다. 또한 공기의 보텍스 현상을 표현시켜주기 위해 VOF 모델을 적용하였으며 난류모델은 standard k- $\epsilon$  모델을 적용하였다.[8]

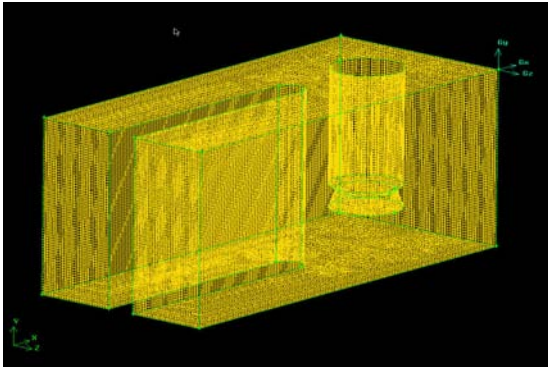


Fig. 1 Calculation grid for the Pump Sump

### 3. 모형시험

#### 3.1 시험범위

모형시험의 목적은 펌프 운전조건에서 펌프 수조 내 보텍스 발생여부를 시험을 통해 검증하고, 적절한 보텍스 방지장치를 도출함으로써 펌프 수조의 건전성을 확보하는데 있다.

본 시험은 영흥화력발전소 복수기 냉각용 해수 취수펌프 흡입수조의 1/10 축소모형에 대해 수행하였다. 보텍스 방지장치가 설치되지 않은 상태에서 예비시험을 수행하였으며 보텍스 방지장치가 구성되어 있는 상태에서 수정시험을 수행하여 보텍스 방지장치의 성능으로 확인하였다. 모형시험 설비는 Fig. 1에 나타나 있다.

모형 시험은 TSJ S002-2005(일본기계학회, 펌프흡입수조의 성능시험법)의 기준에 의해 수행하였다.[6]



Fig. 1 Overview of the sump model

#### 3.2 시험조건

수조 모형시험은 3 개의 서로 다른 수위(LLWL, MSL, HHWL)에서 정격 유량 및 최대 운전 유량의 2 가지 유량에 대하여 수행되었다.

공기흡입 보텍스에 대해서는 1.5 Froude 수 일치법을 적용하며 이 경우의 원형과 모형에서의 Froude 수의 관계는 식 (1)과 같다.

$$\frac{V_M}{\sqrt{gL_M}} = 1.5 \times \frac{V_P}{\sqrt{gL_P}} \quad (1)$$

이때 유속 및 유량 관계는 식 (3), (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$V_M = 1.5 \cdot V_P / \lambda^{0.5} \quad (2)$$

$$Q_M = 1.5 \cdot Q_P / \lambda^{0.5} \quad (3)$$

수중보텍스에 대해서는 유속 일치법을 적용하며 이 경우 원형과 모형에서의 유속 및 유량은 다음의 식 (4), (5)와 같은 관계가 있다.

$$V_M = V_P \quad (4)$$

$$Q_M = Q_P / \lambda^{2.0} \quad (5)$$

위의 식 (1) ~ (5)에서

L = 특성 길이

V = 유속

g = 중력 가속도

Q = 모형 펌프 유량

$\lambda$  = 축척비 ( $L_P/L_M=10$ )

하첨자 P = 실물

하첨자 M = 모형을 나타낸다.

Table 1은 식 (3) 및 (5)에 의해 계산된 유량 및 수위를 나타낸다.

Table 1 Model Test conditions

수위 (mm)		Flow Rate (m <sup>3</sup> /min)			
		Air-entering vortex		Underground vortex	
		Rated flow	Run-out flow	Rated flow	Run-out flow
LLWL	749	5.77	6.64	12.17	14.00
MSL	1260	5.77	7.19	12.17	15.17
HHWL	1780	5.77	7.59	12.17	16.00

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 예비시험

보오텍스 발생에 대한 관측은 각 경우에 대하여 약 5분간에 걸쳐 이루어 졌으며 예비시험 결과는 Table 2와 같다. Table에서 보듯이 모든 시험 유량 및 수위에서 수중와류가 수조의 바닥 및 뒷 벽면에서 발생되었다. Fig. 2, 3은 수중보텍스 모형시험에서 발생한 에서 확인할 수 있다.



Fig. 2 Observation of the vortex formation in the preliminary test(LLWL, Run-out, UGV)

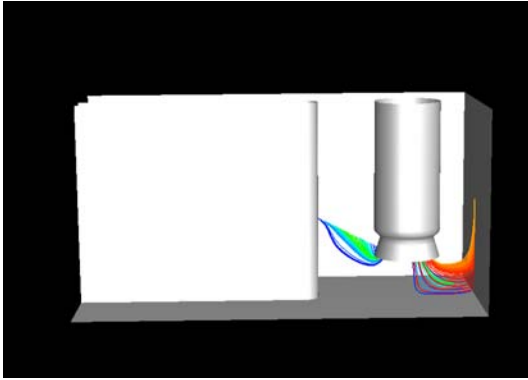


Fig. 3 CFD Analysis of the vortex formation in the preliminary test (LLWL, Run-out, UGV)

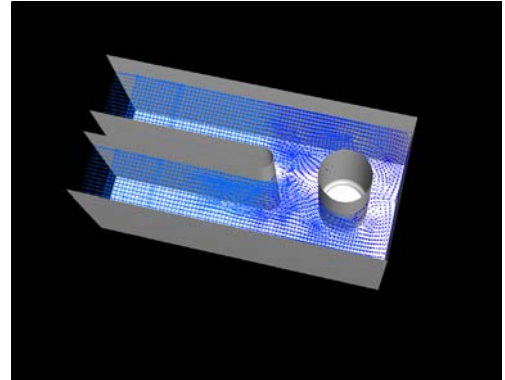


Fig. 4 CFD Analysis of the vector plot in the preliminary test(LLWL, Run-out, AEV)

Table 2 Test result of the preliminary test

Water Level (mm)	Flow Rate (m <sup>3</sup> /min)	Vortex Type	Phenomena
749	5.77	AEV <sup>1)</sup>	Fully AEV near the back wall
	12.7	UGV <sup>2)</sup>	UGV from the bottom and back wall
	6.44	AEV	Fully AEV near the back wall
	14.00	UGV	UGV from the bottom and back wall
1260	5.77	AEV	None
	12.17	UGV	UGV from the bottom and back wall
	7.19	AEV	None
	15.17	UGV	UGV from the bottom and back wall
1780	5.77	AEV	None
	12.17	UGV	UGV from the bottom and back wall
	7.59	AEV	None
	16.00	UGV	UGV from the bottom and back wall

1) AEV :Air-entering vortex, 2) UGV : Underground vortex

공기흡입와류의 경우, LLWL 수위의 정격 유량(Rated flow rate) 및 최대운전 유량(Run-out flow rate)에서 연속적으로 공기가 흡입되는 보텍스가 펌프와 뒷벽 면 사이의 자유표면에서 발생하였으며 Fig. 3, 은 LLWL 수위의 최대운전유량에서 발생한 공기흡입 보텍스의 모습이며, Fig 4는 동일조건에서의 CFD 해석결과이다. 펌프와 벽면 사이에 회전하는 유동이 나타나는 것을 볼 수 있다.



Fig. 3 Observation of the vortex formation in the preliminary test (LLWL, Run-out, AEV)

#### 4.2 수정시험

펌프 흡입수조 모형시험에서 기본 형상에 대한 예비시험을 통해 보텍스가 발생하면 이를 방지하기 위한 구조물을 수조 내부에 설치한다. 보텍스의 발생을 방지하기 위한 구조물은 보오텍스의 발생 상태 및 유동 조건에 따라 설계되며 일반적으로 수면에서의 유동 상태를 개선하기 위해서는 수면에 격자(grating), 보(bar) 등을 설치하며 수중에서의 상태 개선을 위해서는 수조 바닥 또는 벽면에 보를 설치한다[1],[4]

수조 바닥과 벽면에 설치 한 보의 형태를 Fig. 5에 나타내었다.

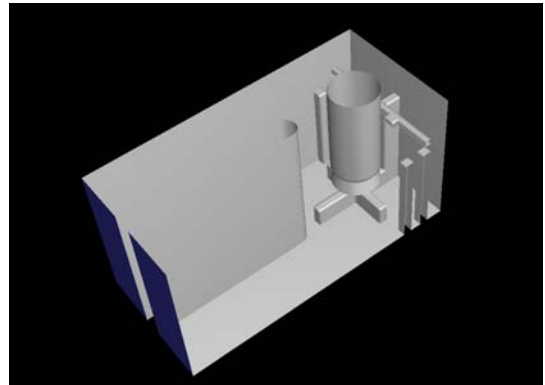


Fig. 5 Anti-vortex device

예비 시험 결과로부터 수조 바닥 및 옆 벽면에서 강한 수중와류가 발생하는 것이 확인되었으므로 바닥 면과 옆 벽면에 유동의 회전 성분을 감소시킬 수 있는 보들을 설치하였으며 기본적인 형상으로부터 조금씩 형상을 변경하며 반복적인 시험을 수행하여 최종적으로 수중와류의 발생을 방지할 수 있는 구조물의 형상을 결정하였다. 또한 공기흡입와류의 경우도 자유 표면에서의 유동의 회전 성분을 감소시킬 수 있도록 보를 설치하였으며 반복 시험을 수행하여 최종 형상을 결정하였다. 최종 형상에 대한 시험 결과 모든 시험 조건에서 수중와류 및 공기흡입와류는 발생하지 않았다.

예비 시험의 LLWL 수위에서 수중와류가 발생한 것과 동일조건에 대한 수정시험 및 CFD 해석결과를 Fig. 6, 7에 나타내었다.



Fig. 6 Observation of the vortex formation in the final modification test(LLWL, Run-out, UGV)

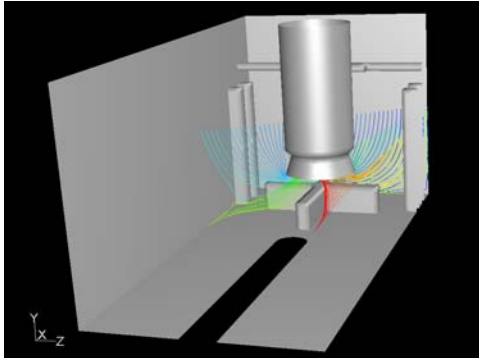


Fig. 7 CFD Analysis of the vortex formation in the final modification test( LLWL, Run-out, UGV)

LLWL 수위에서 공기흡입 보텍스가 발생한 예비시험 조건과 동일조건에서의 수정시험결과 및 CFD 해석결과를 Fig.8, 9에 나타내었다. Fig 9에서 수면에서 균일한 유동이 나타나는 것을 볼 수 있다.



Fig. 8 Observation of thevortex formation in final modification test(LLWL, Run-out, AEV)

벨마우스 목 단면에서의 유속 분포는 MSL 수위에서의 최대운전 유량에 대해 1.5 Froude 수 일치 조건(공기흡입와류 상사 조건) 및 유속 일치 조건(수중와류 상사 조건)에 대하여 측정하였으며 측정 위치는 목 지름의 50 %, 70 %인 위치에서 각각 4점씩, 총 8점에서 측정하였으며 고 측정 유속의 평균값은 각각 5.07 m/s, 8.92 m/s이며 최대 변화량은 5.5 % 및 1.9 %를 나타내었다.

#### 4. 결론

발전소 냉각용 해수 취수펌프 흡입수조 및 와류 방지

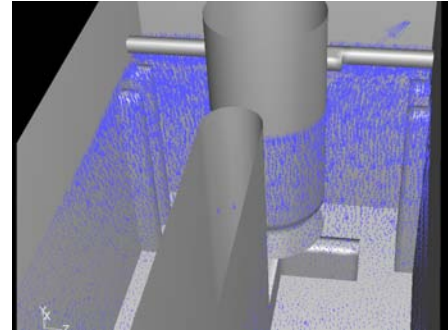


Fig. 9 CFD Analysis of the vortex formation in the final modification test (LLWL, Run-out, AEV)

형상의 최적 설계를 위하여 유량 및 수위조건에 대해 CFD 해석 및 수조 모형시험을 수행하였다.

CFD 해석은 공기와 물이 혼합된 VOF 모델을 적용하였으며 난류모델은 표준 k-ε 모델을 적용하였다.

와류 방지장치를 설치하지 않은 상태에서 CFD 해석 및 수조 모형시험 결과 공기흡입 보텍스와 수중 보텍스의 발생을 확인할 수 있었다.

또한, 와류 방지장치를 설치한 후 수행한 수조 모형시험 및 CFD 해석결과 모든 유량 및 수위 조건에서 보텍스가 발생되지 않아 와류 방지장치가 보텍스 소멸에 효과가 있음을 확인 하였다.

최근 CFD(Computational Fluid Dynamics)의 눈부신 발전으로 컴퓨터상에서 실물유동에 근거한 해석이 가능하게 되었다. 이러한 수치해석 기술을 이용한다면 유동조건에 따른 펌프 흡입수조 및 와류 방지장치 형상을 최적화하여 시험에 소요되는 비용과 시간을 절약할 수 있을 뿐만 아니라 펌프 흡입수조의 보텍스 발생유무 판정이나 건전성 평가에 크게 활용 할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- [1] 김진영, 정경남, 김휴곤, 김영학, “펌프 흡입수조 모형시험에서의 수중와류에 대한 유동해석”, 유체기계연구개발발표회논문집, (2005), pp.593-597
- [2] G. S. Constantinescu and V. C. Patel., “Numerical Model for Simulation of Pump-intake Flow and Vortices”, Journal of Hydraulic Engineering, Feb., (1998), pp. 123-134.
- [3] G. Zhang, H. Oota, A. Ido, H. Takeda, and K. Uranishi, "The 3-D Numerical Simulation of Pump Sump", The Fifth Asian International Conference on Fluid Machinery, (1997), pp.647-653
- [4] P. Rajendran and V. C. Patel, “Experiments of Flow in a Model Water-pump Intake Sump to Validate a Numerical Model”, FEDSM98-5098, (1988), pp. 1-10.
- [5] Hydraulic Institute, "American National Standard for Pump Intake Design," ANSI/HI9.8., (1998).
- [6] Turbomachinery Society of Japan, "Standard Method for Model Testing the Performance of a Model Sump." (2005), TSJ S002.
- [7] 박상언, 노형운, “펌프 흡수정내 발생된 보텍스에 대한 CFD 예측”, 유체기계저널 제10권 제4호, (2007), PP.39-46.
- [8] Fluent Inc., Fluent Documentations Version 6.2, (2005).