

흡수정의 유동해석

정한별¹, 노승희^{2*}

¹한국폴리텍대학 광주캠퍼스 컴퓨터응용기계과, ²조선이공대학교 기계과

Flow analysis of the Sump Pump

Han-Byul Jung¹, Seung-Hee Noh^{2*}

¹Dept. of Computer Aided Mechanical, Gwangju Campus of Korea Polytechnics

²Department of Mechanical Engineering, Chosun College of Science & Technology

요약 흡수정은 댐이나 저수지에 저장된 물을 흡입하여 사용하는 설비이다. 흡입한 다량의 물은 화력 및 원자력 등의 대형 발전소의 냉각시스템에 사용된다. 특징으로 흡입 유량과 흡수정의 비가 작으면 흡입구 주변에서 유속이 증가한다. 이로 인해 와류나 선회류의 불균형 유동이 발생된다. 불균형 유동은 흡수정의 성능을 저하나 고장의 원인이 된다. 해결하기 위한 다양한 방법이 고안되고 있으나 최저수위 일 경우 정확한 해결 방법을 찾지 못하고 있다. 가장 효율적인 해결방법으로는 AVD를 설치하거나 관로를 길게하는 방법이 있다. 이렇게 설치된 구조물이 유동의 흐름을 균일하게 만들어 주기 때문이다. 본 논문에서는 관로의 길이와 AVD의 형태 변화에 따른 흡수정 내의 유동특성을 수치해석으로 분석한다. 수치해석을 위하여 수정의 흡입부, 선프, 펌프의 3단계로 분리하여 모델링하였다. 격자는 해석의 정확도를 위해 흡입부는 비조밀, 흡수정과 AVD는 조밀하게 하였다. ANSYS ICEM-CFD 14.5를 이용하여 120~150만개의 격자를 생성하였고 Tetra grid와 Prism grid를 혼용하였다. 해석을 위해 상용 CFD 프로그램인 ANSYS CFX14.5의 SST 난류모델을 선정하였다. 조건으로 H.W.L 6.0m, L.W.L 3.5, Qmax 4.000 kg/s, Qavg 3.500 kg/s Qmin 2.500 kg/s로 설정하였다. 보텍스 각도와 속도분포로 해석한 결과는 다음과 같다. Ext E-type의 AVD를 설치한 흡수정이 최고수위 일때 합격하였다. 추후, Ext E-type을 기본으로 하여 최저수위일 때 만족하는 연구가 필요하다.

Abstract sump pump is a system that draws in water that is stored in a dam or reservoir. They are used to pump large amounts of water for cooling systems in large power plants, such as thermal and nuclear plants. However, if the flow and sump pump ratio are small, the flow rate increases around the inlet port. This causes a turbulent vortex or swirl flows. The turbulent flow reduces the performance and can cause failure. Various methods have been devised to solve the problem, but a correct solution has not been found for low water level. The most efficient solution is to install an anti-vortex device (AVD) or increase the length of the sump inlet, which makes the flow uniform. This paper presents a computational fluid dynamics (CFD) analysis of the flow characteristics in a sump pump for different sump inlet lengths and AVD types. Modeling was performed in three stages based on the pump intake, sump, and pump. For accurate analysis, the grid was made denser in the intake part, and the grid for the sump pump and AVD were also dense. 1.2-1.5 million grid elements were generated using ANSYS ICEM-CFD 14.5 with a mixture of tetra and prism elements. The analysis was done using the SST turbulence model of ANSYS CFX14.5, a commercial CFD program. The conditions were as follows: H.W.L 6.0 m, L.W.L 3.5, Qmax 4.000 kg/s, Qavg 3.500 kg/s Qmin 2.500 kg/s. The results of analysis by the vertex angle and velocity distribution are as follows. A sump pump with an Ext E-type AVD was accepted at a high water level. However, further studies are needed for a low water level using the Ext E-type AVD as a base.

Keywords : AVD(Anti Vortex Device), CFD, Sump Pump, Swirl, Vortex

*Corresponding Author : Seung-Hee Noh(Chosun College of Science & Technology)

Tel: +82-10-4645-7416 email: ifretrade@hanmail.net

Received November 29, 2016

Revised (1st February 8, 2017, 2nd March 9, 2017)

Accepted March 10, 2017

Published March 31, 2017

1. 서론

흡수정(Sump Pump)은 댐이나 저수지에 저장된 물을 펌프로 흡입 후 배출하면서 용도에 맞게 이용하도록 제작된 설비를 말한다. 흡수정에서 흡입한 다량의 물은 화력 및 원자력등의 대형 발전소의 냉각시스템에 주로 사용된다. 특징으로는 흡입유량과 흡수정의 비가 작으면 흡입구 주변의 유속증가하고 이로인해 불균형 유동이 발생된다. 이는 와류(Vortex)나 선회류(Swirl)을 발생시킨다[1-4]. 이렇게 발생하는 유동 특성은 흡수정의 성능을 저하시킬 뿐 아니라 고장의 원인도 된다[5-7]. 이를 해결하기 위해 다양한 방법이 고안되고 있으나 수위가 입계 값 아래(최저수위 Low.Water. Level : L.W.L)일때는 정확한 해결방법을 찾지 못하고 있다. 이를 해결하기 위해서는 흡수정에 흡입되는 관로를 길게하거나 AVD(Anti Vortex Device)라는 특수 구조물을 설치하여 유동을 균일하게 만드는 방법이 주로 사용된다. 본 논문에서는 흡수정 관로의 길이와 AVD의 형태 변화에 따른 흡수정 내의 유동특성(Flow characteristic)을 수치해석(CFD) 데이터를 정리하고 흡수정의 유동특성 두종류의 분석식의 만족하는 모델을 결정하데 그 목적을 둔다.

2. 국내외 흡수정 규격 및 연구동향

2.1 흡수정 규격

2.1.1 국내 흡수정 규격[5]

국내 흡수정 관련 규격은 흡수정내 펌프 설치 등에 관한 내용으로 총 3페이지에 불과하다. 이러한 내용을 가지고 흡수정 및 제반 구조물을 설계하는 것은 불가능할 것으로 보인다. 그중 본 논문에서 해석하기 위한 내용은 다음과 같다.

- ① 펌프 흡입관은 공기가 갇히지 않도록 배관한다.
- ② 펌프의 토출관은 마찰손실이 작도록 고려함과 동시에 펌프의 토출관에는 체크밸브와 제어밸브를 설치한다.
- ③ 펌프 흡수정은 펌프의 설치위치에 가급적 가까이 만들고 난류나 보텍스가 일어나지 않는 형상으로 한다.

2.1.2 국제 흡수정 규격[6-7]

HI, JSME, CEN 기준에서는 정수뿐만 아니라 고행물

을 포함하는 하수에 대하여 적용할 수 있는 여러 형상의 흡수정에 대한 설계 기준을 제시하고 있다. 이 기준에서는 Fig. 1과 같은 순서로 흡수정을 설계하도록 흐름도를 제시하고 있으며, 사각형 흡수정 외의 다른 형상의 흡수정 설계에 대한 내용도 제시하고 있어 흡수정 설계에 널리 활용되고 있다.

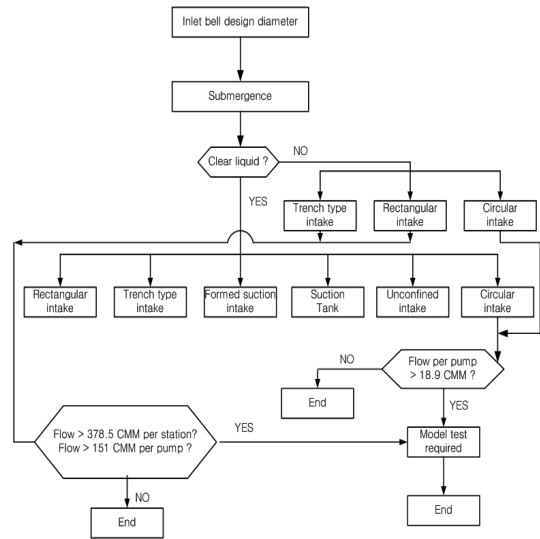


Fig. 1. Sump design process(ANSI/HI 9.8)

2.1.3 연구동향

해외의 연구들로, Rajendran[8]와 Constantinescu[9]는 PIV와 CFD를 이용하여 와류의 형상 연구 및 난류 모델을 연구하였으며, Okamura[10]등은 다양한 상용코드를 이용한 수치해석으로 유동 특성을 분석하였으며 Ansar[11]는 단일 및 다중펌프를 가지는 흡수정의 수치해석을 하였다. 국내의 연구들로, 박영규[12]가 물, 공기의 2상 상태를 해석하였으며 최중웅[13,14]는 단일 흡수정에서 AVD의 해석을 표영석[15]은 커튼월을 이용한 와류방지에 관한 수치해석을 하였다. 기본 흡수정의 분석으로 시작된 연구는 AVD장치의 연구로 발전하였고 이를 통해 얻어진 연구데이터를 기반으로 단일 채널 흡수정에서 다채널 흡수정의 해석으로 발전하였고 AVD장치는 흡수정 형태 변화에서 커튼벽, 흡수정 내부장치 등을 설치하여 와류의 저감 효과를 해석하였다. 이와 같은 연구에도 불구하고 흡수정이 대형으로 설치되는 경우 해석결과와 상이한 결과를 보이기에 유동특성의 분석식을 통해 분류의 기준을 잡는 방식으로 발전하였다.

2.2 흡수정의 종류와 보텍스의 분류

2.2.1 흡수정의 종류

흡수정은 댐이나 저수지의 가장 하단에 설치되어 물을 저장하는 시설이다. 흡수정 관로는 입구에서부터 흡수정까지의 유체의 균일분포이송을 담당하는 구조물이며, 흡입펌프는 흡수정에서 외부시설로 유체를 강제 이송하는 시설이다.

Fig. 2는 흡수정내에 설치된 흡입관의 형태에 따른 흡수정의 분류이다. 각흡입관의 형태에 따라 발생하는 보텍스가 달라진다. 여러 가지의 보텍스 종류 중 흡수정의 성능에 영향을 미치는 대표적인 2.2.2의 보텍스의 분류에 나타내었다.

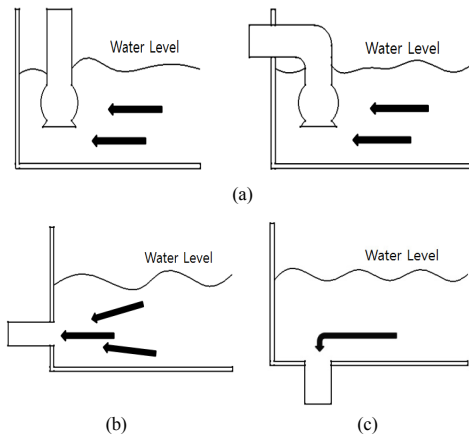


Fig. 2. Sump type
(a) Vertical type (b) Horizontal type (c) Floor type

2.2.2 보텍스의 분류

흡수정의 특성에 따라 발생하는 보텍스는 자유표면, 측면부, 후면벽과 바닥벽으로부터 기체를 동반하여 발생하는 보텍스가 있다. 이를 크게 자유표면(Free Surface) 보텍스와 수중(Submerged) 보텍스로 구분한다. Fig. 3의 (a)는 자유표면 보텍스이고 (b)는 수중 보텍스이다.

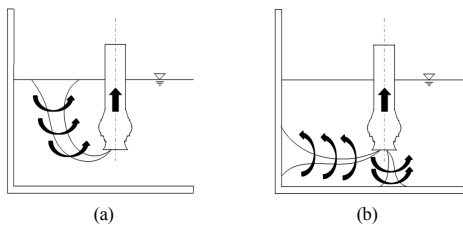


Fig. 3. General vortex in the sump.
(a) Free surface vortex (b) Submerged vortex

2.3 흡수정의 유동특성 분석식

자유표면 보텍스와 수중 보텍스의 발생을 저감하기 위한 방법으로는 흡수정내의 흡입관에서 발생하는 유동 특성중 각 포인트의 유선을 통해 분석하는 보텍스 각도 측정 방법과 흡수정의 속도 분포의 표준편차를 비교하는 두가지 분석식이 있다. 두 분석식의 계산법은 아래와 같다.

2.3.1 보텍스 각도 측정

흡수정의 직경(D)를 기준으로 직경의 4배 떨어진 지점의 흡입관 지름(d)에 관한 보텍스 각도(θ)의 비교시 각도가 7°미만이어야 한다. Fig. 4는 보텍스 각도의 계산 도표이다.

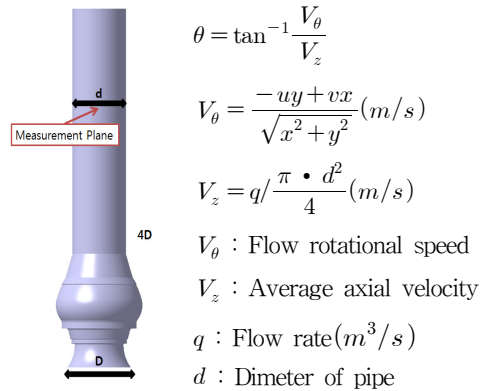


Fig. 4. Measurement vortex angle

2.3.2 흡수정의 속도 분포

속도 분포는 흡수정의 직경(D)를 기준으로 길이(L)만큼 지점의 d'의 절단면에서 $\theta 0.7d'$ 과 $\theta 0.5d'$ 크기의 원 위의 P1~P8의 포인트의 평균속도분포값을 측정하며 10%내의 표준편차 내에 속해야 한다. Fig. 5는 속도 분포의 계산 도표이다.

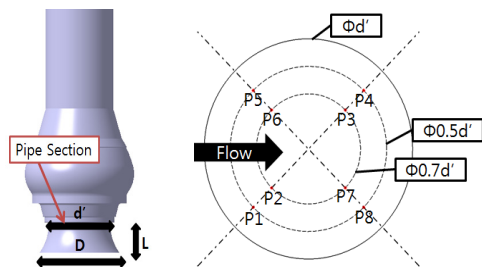


Fig. 5. Velocity distribution

3. 해석 및 결과

3.1 흡수정 해석 영역

해석에 사용된 모델은 미국 국제펌프기준인 (HI:Hydraulic institute)의 기준인 Base 모델과 AVD가 장착된 C-type, E-type, Ext E-type의 모델을 최고수위(H.W.L), 최저수위(L.W.L)을 기준으로 최고유량(Q_{max}), 최저유량(Q_{min}), 평균유량(Q_{avg})의 24케이스에 관한 유동특성을 확인하였다.

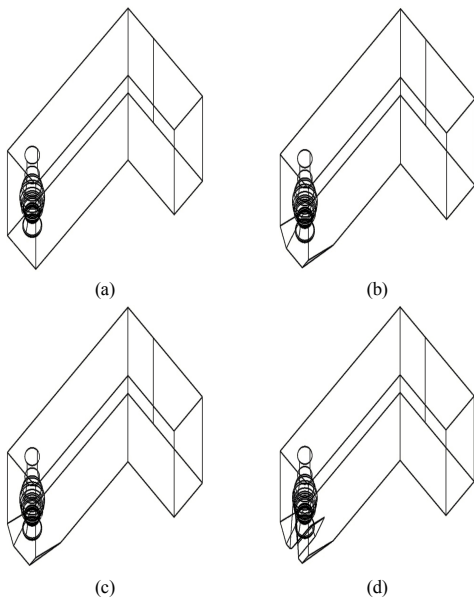


Fig. 6. Analysis model case
(a) Base (b) C-type (c) E-type (d) Ext E-type

최고수위는 6.0m, 최저수위는 3.5m이며 최고유량은 4,000, 평균유량은 3,500, 최저유량은 2,500으로 설정하였다. Fig. 6.은 해석 모델의 와이어프레임 형상이다.

3.2 수치해석을 위한 환경변수 및 검증

본 연구에서는 흡수정의 흡입부(In-tank), 섬프(Sump), 펌프(Pump)의 3단계로 분리하여 모델링하였고 해석의 정확도를 위해 흡수정 관로는 비조밀하게 생성하였고 해석결과에 영향을 미치는 흡수정과 AVD의 격자를 조밀하게 하였다. 사용 프로그램은 ANSYS ICEM-CFD 14.5의 자동격자 생성방식을 이용하여 비조밀 해석영역에는 Tetra grid를, 조밀 영역의 벽면에는 Prism grid를 생성

하였다. 형상에 따라 100만개~150만개의 격자를 사용하였다.

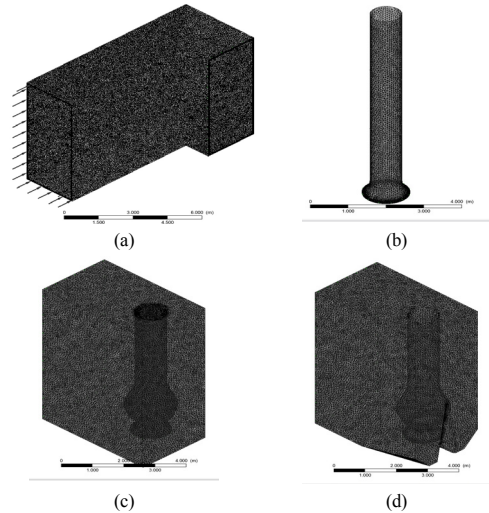


Fig. 7. Computational grid
(a) In-tank grid (b) Sump grid
(c) Base type grid (d) Ext E-type grid

Table 1. Condition of CFD analysis model

Name		Condition	Unit
Design Type		Straight	[-]
Time Dependent		Steady flow Auto Time Scale	[-]
phase		Single	[-]
Water Level	high	6,000	[mm]
	Low	3,500	[mm]
Flow Rate	Maximum	4,000	[kg/s]
	Average	3,500	[kg/s]
	Minimum	2,500	[kg/s]
Turbulence Model		$k-w$ SST	[-]
Free Surface		Free Slip Wall	[-]
Sidewall I		Non Slip	[-]
Sidewall I		Non Slip	[-]
Backwall		Non Slip	[-]

경계조건은 Table 1과 같이 주었다. 해석모델의 수렴 정도는 Base 모델 형상을 기본으로 격자의 수를 50만개에서 200만개까지 증가시켜 해석후 약 100~150만개의 격자에서 수렴을 확인하였다. Fig. 7은 각 부위회 격자이고 Fig. 8 수렴 그래프이다.

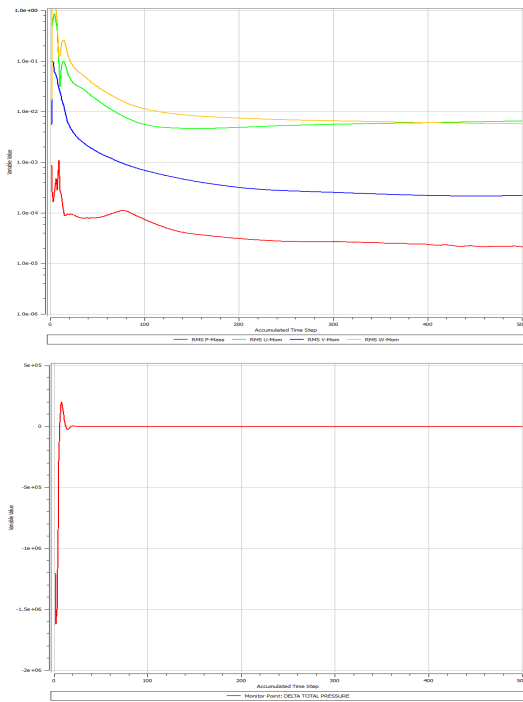
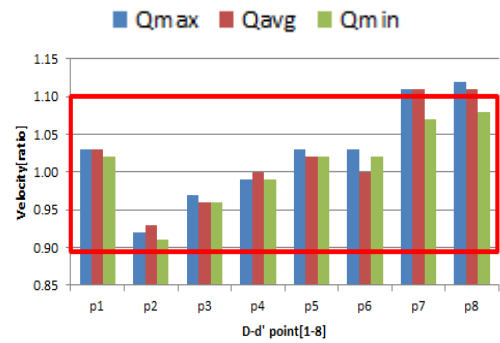


Fig. 8. Analysis model verification

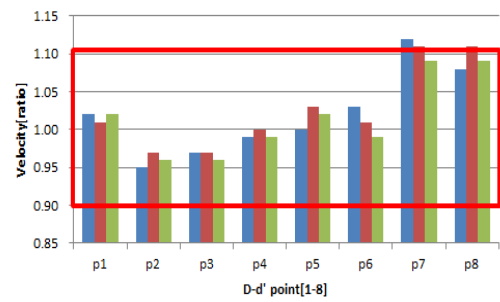
3.3 수치해석 결과

Fig. 9. ~12.은 흡수정 해석 영역내에서 HI 규격에 따른 환경변수를 적용한 수치해석결과를 흡수정의 유동특성에 가장 중요한 보텍스의 각도와 속도분포를 값 정량화 하여 도표로 만든 것이다. Base케부터 Ext E-type의 4개의 모델을 기준으로 최고수위와 최저수위로 분류하고 D-d' point와 D-d point순으로 도표를 정리하였다. 데이터를 가독성을 위해 속도분포는 붉은색 사각박스로 표기하여 박스의 내부의 값이 합격 값이며, 각도는 붉은색 선으로 합격수준을 하였고 선의 아래값이 합격값이다.

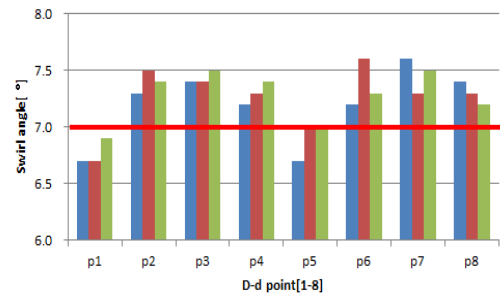
기본 모델인 Case 1.의 경우 최고수위와 최저수위 방식중 최고수위와 최저수위의 최저유속에서 속도분포값을 제외하고는 전부 분석식의 합격기준에 불만족하였고, C-type의 AVD모델이 설치된 Case 2.의 경우 Case 1.의 형태보다 나쁜 결과를 보여주었다. E-type의 Case 3.의 경우 최고수위에서 유속에 상관없이 모든 속도분포값이 분석식에 만족함을 보였으나 보텍스의 각도가 불만족을 보였다. Ext E-type의 AVD가 장착된 형태는 최고수위에서 모든 값이 합격기준에 만족하였다. 하지만 극한의 상태인 최저수위에서는 합격하지 못함을 확인하였다.



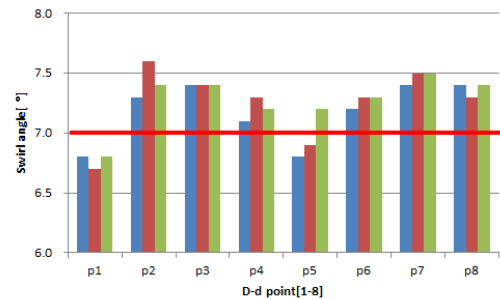
(a)



(b)



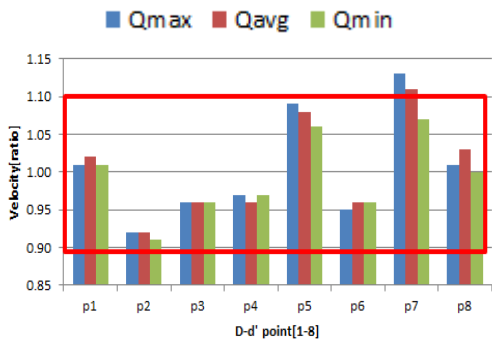
(c)



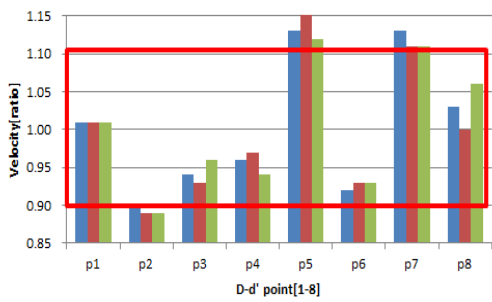
(d)

Fig. 9. Base model chart

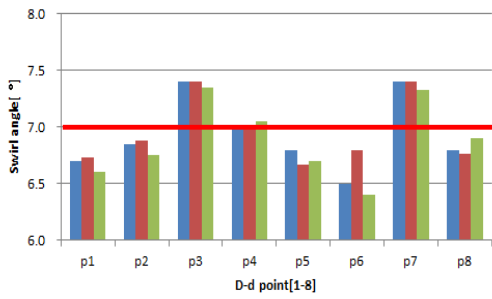
- (a) H.W.L Velocity
- (b) L.W.L Velocity
- (c) H.W.L Swirl angle
- (d) L.W.L Swirl angle



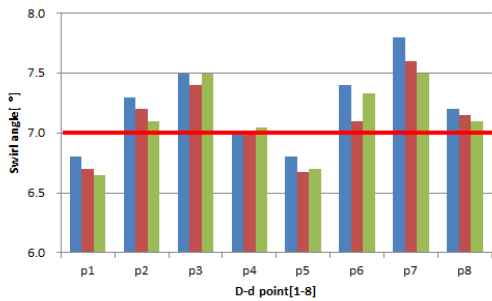
(a)



(b)

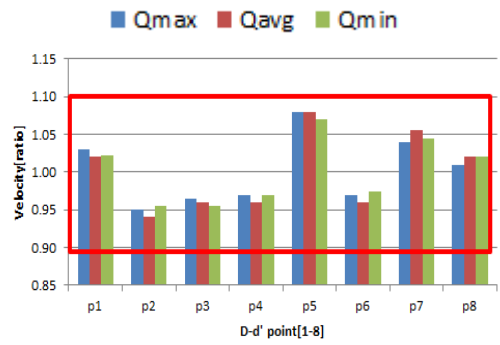


(c)

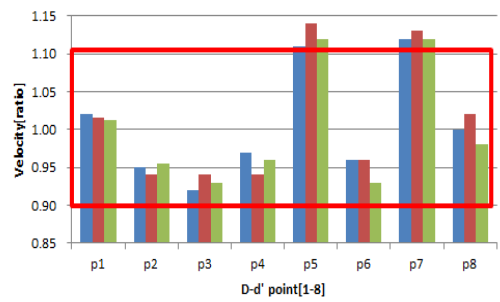


(d)

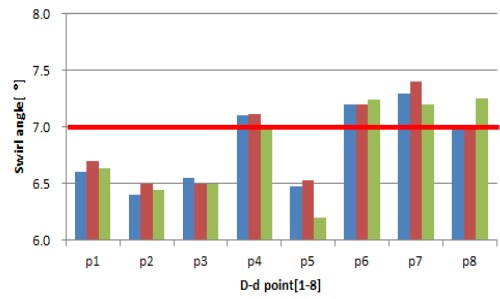
Fig. 10. C-type model chart
 (a) H.W.L Velocity (b) L.W.L Velocity
 (c) H.W.L Swirl angle (d) L.W.L Swirl angle



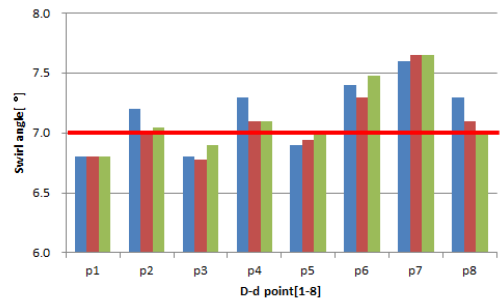
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 11. E-type model chart
 (a) H.W.L Velocity (b) L.W.L Velocity
 (c) H.W.L Swirl angle (d) L.W.L Swirl angle

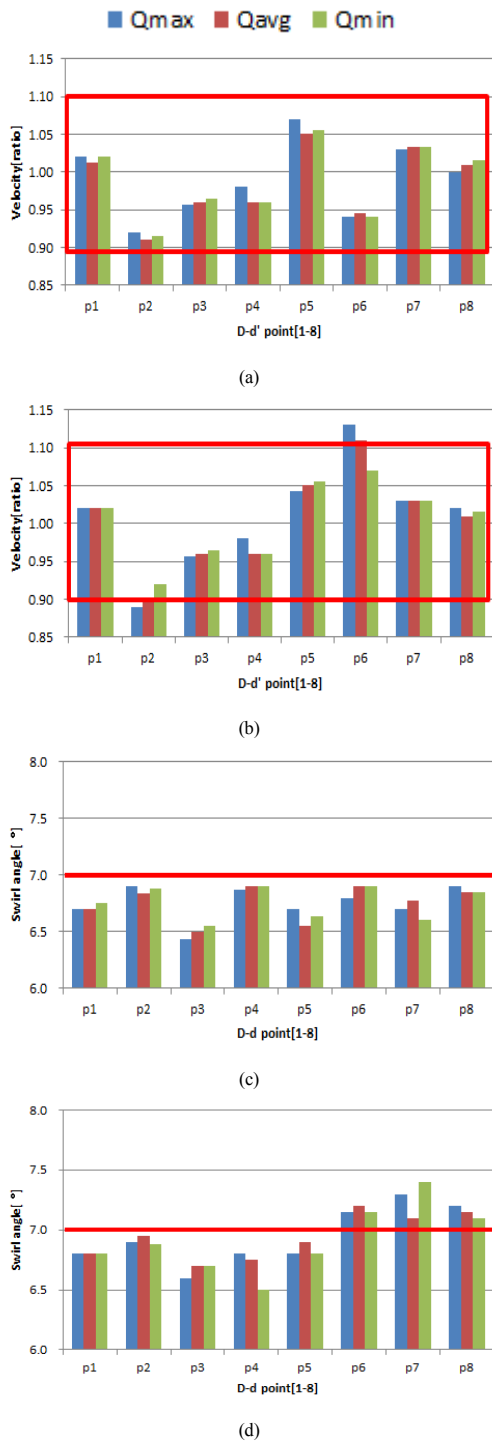


Fig. 12. Ext E-type model chart
 (a) H.W.L Velocity (b) L.W.L Velocity
 (c) H.W.L Swirl angle (d) L.W.L Swirl angle

3.4 해석 결과 비교표

Table 2 수치해석 결과 데이터를 기반으로 HI 기본 규격의 Velocity와 Swirl angle의 정량화 조건에 만족하는 합부 여부를 각 해석 케이스 별로 정리한 것이다.

Table 2. Analyses result table

Case	Water Level	Flow Rate	Velocity profiles	Swirl angle
Case 1	H.W.L	Q_{max}	Fail	Fail
		Q_{avg}	Fail	Fail
		Q_{min}	Pass	Fail
Base model	L.W.L	Q_{max}	Fail	Fail
		Q_{avg}	Fail	Fail
		Q_{min}	Pass	Fail
Case 2	H.W.L	Q_{max}	Fail	Fail
		Q_{avg}	Fail	Fail
		Q_{min}	Pass	Fail
C-type model	L.W.L	Q_{max}	Fail	Fail
		Q_{avg}	Fail	Fail
		Q_{min}	Fail	Fail
Case 3	H.W.L	Q_{max}	Pass	Fail
		Q_{avg}	Pass	Fail
		Q_{min}	Pass	Fail
E-type model	L.W.L	Q_{max}	Fail	Fail
		Q_{avg}	Fail	Fail
		Q_{min}	Fail	Fail
Case 4	H.W.L	Q_{max}	Pass	Pass
		Q_{avg}	Pass	Pass
		Q_{min}	Pass	Pass
Ext E-type model	L.W.L	Q_{max}	Fail	Fail
		Q_{avg}	Fail	Fail
		Q_{min}	Pass	Fail

4. 결론

흡수정에 흡입관로와 AVD의 상태에 따른 CFD 유동 해석결과는 다음과 같다. 최고수위와 평균 유속 및 최저 유속에 관한 Ext-E type의 형태는 속도 및 보텍스 각도 측정이 규정에 만족하였다. 위의 정량적인 값은 최고수위에서 최고유량의 포인트별 속도 분포는 p1=1.02, p2=9.2, p3=9.5, p4=9.8, p5=1.07, p6=9.4, p7=1.03, p8=1.0이고 평균유량의 속도분포는 p1=1.01, p2=9.1, p3=9.6, p4=9.6, p5=1.05, p6=9.46, p7=1.03, p8=1.0이며, 최저유량의 속도분포는 p1=1.02, p2=9.15, p3=9.64,

p4=9.6, p5=1.06, p6=9.41, p7=1.03, p8=1.02이다. 최저 수위일 때 최고유량의 보텍스 각도 측정값은 p1=6.7, p2=6.9, p3=6.43, p4=6.87, p5=6.7, p6=6.8, p7=6.7, p8=6.9이고, 평균유량의 보텍스 각도 측정값은 p1=6.7, p2=6.84, p3=6.5, p4=6.9, p5=6.55, p6=6.9, p7=6.77, p8=6.85이며, 최저유량의 보텍스 각도 측정값은 p1=6.75, p2=6.88, p3=6.55, p4=6.9, p5=6.64, p6=6.9, p7=6.6, p8=6.85이다.

추후 Case 4.의 모델을 기본으로 최저수위일 때 보텍스 각도를 줄이는 AVD형상에 대한 연구가 필요하다.

References

- [1] J. P. Tullis, "Modeling in Design of Pumping Pits", J. Hydr. Div., ASCE, vol. 105, no. 9, pp. 1053-1063, 1979.
- [2] G. Arboleda, M. El-Fadel, "Effects of Approach Flow Conditions on Pump Sump Design", J. Hydr. Engrg., ASCE, vol. 122, no. 9, pp. 489-494, 1979.
DOI: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:9\(489\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:9(489))
- [3] C. E. Sweeney, R. A. Elder, D. Hay, "Pump Sump Design Experience : Summary", J. Hydr. Div., ASCE, vol. 108, no. 3, pp. 361-377, 1982.
DOI: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:8\(1178\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:8(1178))
- [4] M. Padmanabhan, G. E. Hecker, "Scale Effects in Pump Models", J. Hydr. Engrg., ASCE, vol. 110, no. 11, pp. 1540-1556, 1984.
DOI: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:11\(1540\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:11(1540))
- [5] Korea Water Resources Corporation, "Domestic and International Standards Related to Sump" The KSFJ Journal of Fluid Machinery, pp. 53-56, 2005.
- [6] ANSI/HI 9.8, "American National Standard for Pump Intake Design", Hydraulic Institute, Parsippany, New Jersey, 1998.
- [7] JSME Standard S004-1984, "Standard Method for Model Testing the Performance of a Pump Sump", The Japan Society of Mechanical Engineers, 1984.
- [8] V. P. Rajendran, G. S. Constantinescu, V. C. Patel, "Experiments on Flow in a Model Water-pump Intake Sump to Validate a Numerical Model", ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting June 21-25 FEDSM98-5098, 1998.
- [9] G. Constantinescu, V. C. Patel, "A Numerical Model for Simulation of Pump-intake Flow and Vortices", J. Hydr. Engrg., ASCE, vol. 124, no. 2, pp. 123-134, 1998.
DOI: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:2\(123\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:2(123))
- [10] T. Shibata, R. Iwano, T. Nagahara, T. Okamura, "A Numerical Method for Predicting the Cavitation Inception of a Submerged Vortex in Pump Sumps", The Hydraulic Machinery and Systems 20th IAHR Symposium, CFD-G03, 2000.
- [11] Matahel Ansar, Tatsuaki Nakato, George Constantinescu, "Numerical Simulations of Inviscid Three-Dimensional Flows at Single- and Dual-pump intakes", Journal of Hydraulic Research, vol. 40, No. 4, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1080/00221680209499888>
- [12] Young-Kyu Park, "A Study on the Behavior of the Vortex in a Pump Sump", Master's Thesis, Mechatronics Engineering Department, Graduate School, Pukyong National University, 2011.
- [13] Jong-Woong Choi, No-suk Park, Seong-Su Kim, Sang-Su Park, Young-Ho Lee, "Study on Performance Analysis of Pump within Sump Model with AVD installation by CFD", Journal of Korean Society of Water and Wastewater, vol. 26, No 3, pp. 463-469, June, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.11001/jksww.2012.26.3.463>
- [14] Jong-Woong Choi, Young-Do Choi, Chang-Goo Kim, Young-Ho Lee, "Flow Uniformity In a Multi-Intake Pump Sump Model", Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 24, no. 7, pp. 1389-1400, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-010-0413-5>
- [15] Young-Seok Pyo, "Free Surface Vortex Flow Control around Pump Intake with Curtain Wall Installation", Master's Thesis, Interdisciplinary Program of Biomedical Engineering, Pukyong National University, 2014.

정 한 별(Hna-Byul Jung)

[정회원]



- 2008년 6월 : (주)우신공업 R& D center 연구원
- 2016년 2월 : 조선대학교 일반대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 한국폴리텍대학 광주캠퍼스 컴퓨터응용기계설계과 조빙교수

<관심분야>

금형, CAD/CAM, 유체, 절삭가공

노 승 희(Seung-Hee Noh)

[정회원]



- 1997년 2월 : 조선대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2010년 3월 ~ 2014년 3월 : (주) 엠엔티 연구소 책임연구원
- 2014년 4월 ~ 현재 : 조선이공대학교 기계과

<관심분야>

금형, CAD/CAM, 유체, 절삭가공