

## 다중 흡수정을 갖는 펌프장 모델의 유동균일성 해석

최종웅\* · 최영도\*\* · 임우섭\*\*\* · 이영호\*\*\*\*†

### Numerical Analysis on the Flow Uniformity in a Pump Sump Model with Multi Pump Intake

Jong-Woong Choi\*, Young-Do Choi\*\*, Woo-Seop Lim\*\*\*, Young-Ho Lee\*\*\*\*†

Key Words : Pump station(펌프장), Sump(흡수정), Pump intake(흡입관), Vortex(보텍스), Vortex core(보텍스코어), Swirl(선회류), Anti-submerged vortex device(보텍스 방지장치), Flow Uniformity(유동 균일성)

#### ABSTRACT

The head-capacity curves for pumps developed by the pump manufacturer are based on tests of a single pump operating in a semi-infinite basin with no close walls or floors and with no stray currents. Therefore, flow into the pump intake is with no vortices or swirling. However, pump station designers relying on these curves to define the operating conditions for the pump selected sometimes meet the reductions of capacity and efficiency, as well as the increase of vibration and additional noise, which were caused by air-entered flow in the pump station. From this background, the authors are carrying out a systematic study on the flow characteristics of intakes within a sump of pump station model. Multi-intake sump model with anti-submerged vortex device basin is designed and the characteristics of submerged vortex is investigated in the flow field by numerical simulation. In this study, a commercial CFD code is used to predict the vortex generation in the pump station accurately. The analysed results by CFD show that the vortex structure and effect of anti-submerged vortex device are different at each pump intake channel.

#### 1. 서론

펌프의 성능은 일반적으로 제조업체에서 펌프 설계시 펌프가 작동될 펌프장의 환경을 고려하지 않고, 펌프 자체의 성능만을 고려하여 설계·개발되어 왔다. 따라서 펌프로 유입되는 유동에 포함된 보텍스(vortex)와 선회류(swirl)의 영향에 대해서는 펌프 설계시 고려되지 않았다. 만일 흡입관 주위에서 강한 보텍스와 선회류가 발생하면, 자유표면에서는 공기를 동반한 보텍스와 흡입구 아래에서는 국부적인 압력저하로 인하여 캐비테이션(cavitation)이 발생하게 된다. 이러한 유동 환경으

로 인하여 펌프의 효율 저하, 진동 및 소음 문제를 일으킬 수 있다. 그러므로 흡입관 주위의 유동구조를 파악하기 위하여 반드시 모형실험 등을 통한 확인이 필요하다.

외국의 관련 연구로는 Padmanabhan과 Hecker<sup>(1)</sup>가 흡입관 주위에서 발생하는 보텍스의 형태를 정의하여 흡입수조의 축적 비율에 대하여 보텍스의 형태를 Froude수에 의하여 분류하였다.

Rajendran 등<sup>(2)</sup>은 사각 채널안의 수직 흡입관을 포함한 흡입수조 내의 3차원 난류유동을 수치해석하여 그 결과를 실험과 비교 분석하였다. Lee<sup>(3)</sup>는 흡입관 주위의 자유표면과 자유표면 아래에서 발생하는 보텍스를 가시화 하였고, Nagahara 등<sup>(4)</sup>은 흡입수조 내 유로방향으로의 불균형 속도에 의한 흡입관 주위의 유동구조에 대하여 실험과 수치해석을 수행하였다.

또한, 일본터보기계협회<sup>(5)</sup>에서는 펌프 흡입수조에 대한 규격을 재개정하였으며, 동일한 해석 대상에 대하여 여러 종류의

\* (주)태성엔스트

\*\* 국립중앙대학교 메카트로닉스 공학부

\*\*\* 효성에바라(주)

\*\*\*\* 한국해양대학교 기계·정보공학부

† 교신저자, E-mail : lyh@hhu.ac.kr

해석 프로그램을 사용한 수치해석의 활용가능성을 검토하였다.

한편, 국내에서는 이 등<sup>(6)</sup>이 모형실험을 통하여 흡수정의 형상에 대한 설계방향을 제시하였으며, 김 등<sup>(7)</sup>은 수치해석을 통하여 수중 보텍스에 대한 유동해석을 수행하였다. 이처럼 국내에서도 흡수정의 설계 등에 관한 다양한 연구<sup>(8,9)</sup>가 진행되고 있다.

본 연구에서는 흡수정이 7개로 구성된 펌프장 모델에 대하여 각 흡수정 채널에서의 유동분포에 따른 유동균일성을 상세하게 검토하는 것이 목적이며, 특히 단일 흡수정에 대한 Anti-submerged vortex device(AVD) 유무에 따른 유동특성 및 AVD 설치시의 전체 펌프장 모델에 대한 각 흡수정의 유동 특성을 수치 해석적 방법으로 비교 및 검토하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 수치해석 대상 유동장

Fig. 1은 본 연구에서 수치해석을 수행하기 위한 전체 유동장 모델의 2-D 형상을 나타내고 있으며, 점선은 수치해석을 적용하기 위한 영역을 나타내고 있다. 본 연구의 펌프장 모델은 총 7개의 흡수정을 가지고 있으며, 각 흡수정의 흡입관은 동일한 유량으로 토출된다. 전체 형상이 대칭적이므로 절반에 해당하는 형상만 모델링하여 수치해석을 수행하였다. 각 흡수정의 흡입관은 옆벽, 뒷벽, 바닥으로부터 각각 70 mm, 180 mm, 100 mm에 위치하고 있다. 흡수정의 상부는 덮개를 적용

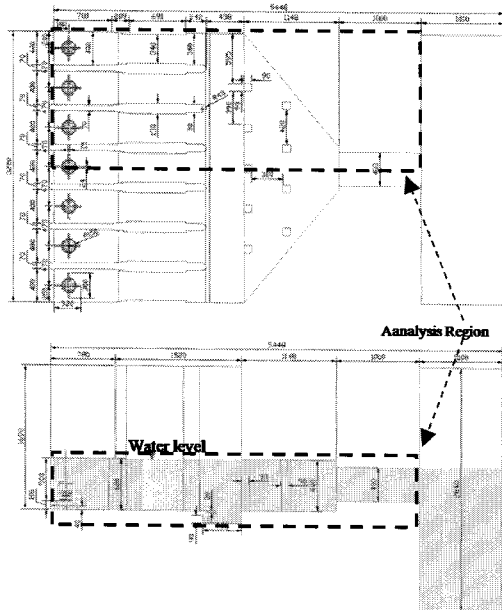


Fig. 1 2D drawing of pump station & analysis region

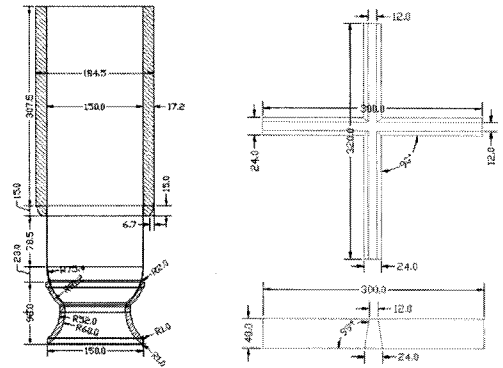


Fig. 2 Bell-mouth and anti-submerged vortex device

하여 자유표면으로부터의 공기흡입을 방지하였으며, 수중 보텍스로 인한 캐비테이션을 억제하기 위하여 흡입관 하부에는 십자 형상을 갖는 AVD를 적용하였다.

Fig. 2는 수치해석에 적용된 흡입관의 형상과 AVD의 형상의 단면도를 나타내고 있다. 흡입관의 내경(Di)은 150 mm이며, 각각에 대한 치수는 그림과 같다.

### 2.2 수치해석 방법

계산격자는 격자 생성 전용 프로그램인 ICEM CFD를 이용하여 3-D hexa-hedral type의 격자로 구성하였다.

Fig. 3은 해석대상 유동장에 대한 계산격자의 형상을 보여 주고 있으며, 사용된 격자의 수는 펌프장 모델 해석의 경우 약 330만 노드가 사용되었고, 단일 흡수정 해석에 대한 격자는 약 80만 노드가 사용되었다. 각 격자에 대한 수치계산은 상용 프로그램인 ANSYS CFX를 사용하였으며, 작동유체로는 25°C의 물을, 경계조건으로는 입구에는 압력, 출구에는 속도 조건(3 m/s), 대칭면에는 대칭조건을 적용하였다. 난류 모델은 SST(Shear Stress Transport) 모델을 적용하여 정상상태 계산을 수행하였다.

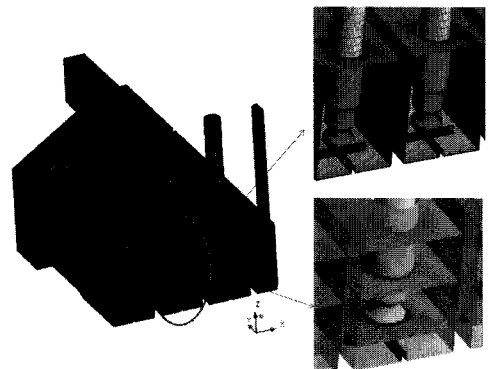
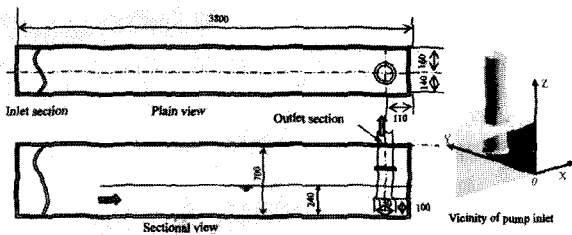


Fig. 3 Computational hexa-hedral grid

### 2.3 계산결과의 신뢰성 검토

본 연구의 CFD 결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 Fig. 4와 같이 일본터보기계협회(TSJ)에서 수행한 전산모델과 동일한 형상에 대하여 3차원으로 모델링, 격자 생성, 계산을 수행하였다. Fig. 4의 결과로부터 흡수정 입구로부터 흡입관으로의 유동방향의 수직한 방향으로의 거리(유로방향 축방향 거리)에 따른 x, y, z 속도성분이 일본터보기계협회의 계산결과와 유사하게 나타났다. 유로방향 축방향의 y속도성분에서는 흡입관의 편심에 의한 선회성분이 나타나는 것을 알 수 있으며, z방향의 속도 성분에서는 흡입관의 주변 흐름이 저면 방향으로 향한다 음 흡입관으로 유입되면 유동은 크게 가속된 후 펌프로 유입되는 것을 알 수 있다.



TSJ Sump model for benchmark Test

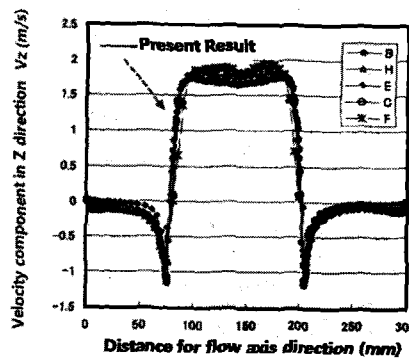
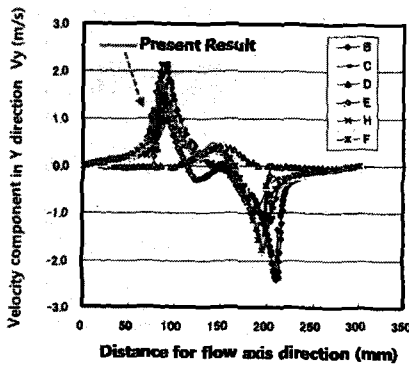


Fig. 4 Comparison of calculation results by CFD analysis

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 단일 흡수정의 유동해석과 AVD의 영향

전체 펌프장 모델을 계산하기 전에 단일 흡수정에 대하여 AVD의 유무에 따른 수치해석을 수행한 후, 전체 펌프장 모델에 대한 수치해석을 수행하였다.

Fig. 5는 단일 흡수정에 대한 수치계산을 수행한 경우이며, 3 m/s의 속도로 흡입되는 흡입관 주위에서 발생하는 보텍스를 AVD의 유무에 따른 Vortex core region을 나타낸 그림이다.

Fig. 5(a)는 AVD가 적용되지 않은 유동장이며, 뒷벽, 옆벽 그리고 바닥에서 발생하는 보텍스 형태를 확인 할 수 있다. Fig. 5(b)는 AVD가 적용된 유동장이며, 옆벽에서 생성되는 보텍스에 비해 바닥과 뒷벽에서 발생하는 보텍스의 영역이 상당히 감소되었음을 확인할 수 있다. 또한, 옆벽에서 생성되는 보텍스 영역은 Fig 5(a)에 비해 뒷벽으로 밀려난 변형된 보텍스 형태를 가지고 있다.

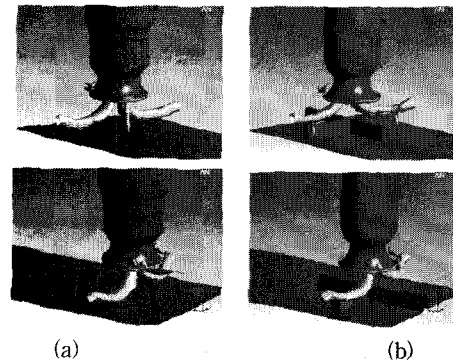


Fig. 5 Vortex core region of single intake sump : (a) without AVD and (b) with AVD

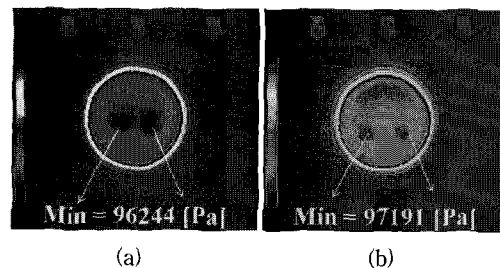


Fig. 6 Absolute pressure of single intake sump (z = 90 mm) : (a) without AVD and (b) with AVD

Fig. 6은 흡입관 바닥으로부터 90 mm에 위치하는 흡입관 주위 단면에서의 절대 압력을 나타내고 있으며, 이 압력은 정수압을 포함한 절대압력이다. AVD가 적용되지 않은 압력이 상대적으로 보텍스가 발생하는 중심 영역에서 낮게 나타났으며, 또한 보텍스 중심으로 부터 반경방향으로 압력구배는 AVD를 적용하지 않은 경우가 상대적으로 크게 나타나며, 이러한 이유로 한 보텍스의 발달이 더욱 활발하게 된다.

흡입관 주위에서 생성되는 보텍스 강도를 정량적으로 알아 보기 위하여 Fig. 7과 8에 와도 값을 그래프로 나타내었다. 또한, 각 그래프의 좌측 상부에는 각 데이터의 검출 위치를 보이고 있다.

Fig. 7은 흡입관 중심에서 흡수정 입구로부터 흡입관으로의 유동방향의 수직인 방향으로의 거리(유로방향 축방향 거리)에 따른 와도 값이며, z(100 mm, 80 mm, 60 mm)는 흡수정 바닥으로부터의 높이를 나타내고 있다. AVD가 적용되지 않은 경우, 와도 값이 유로방향 축방향에서는 급격한 값의 변화가 나타났으며, z의 값이 감소함에 따라 와도의 값이 감소하였다. 이와는 달리 AVD가 적용된 경우는 바닥에서 생성되는 보텍스의 억제로 인하여 상대적으로 와도의 값이 급격한 변화를 보이지 않았으며, z의 변화에 따른 와도 값도 크게 변하지 않았다. z가 60 mm인 그래프에서 와도의 최대값이 옆벽으로 갈수록 증가함을 볼 수 있으며, 이러한 결과로부터 옆벽에서 발생하는 보텍스의 강도가 다른 곳에서 발생하는 것보다 강하다는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 흡입관 중심에서 흡수정 입구로부터 흡입관으로의 유동방향 거리(유로방향 거리)에 따른 와도 값을 나타내고 있다. AVD를 적용한 경우, 뒷벽에서 생성되는 와도 값의 변화가 높게 나타났으나, AVD를 적용하지 않은 경우 유로방향으로의 와도 값의 변화가 크게 나타나지 않았다. 또한, 유로방향으로의 와도 값이 유로방향 축방향의 값보다 낮게 나타났다. 이는 흡입관 주위에서 발생하는 보텍스 중 옆벽에서 생성된 보텍스의 세기가 상대적으로 높다는 것을 알 수 있다. 전체적으로 AVD가 적용된 유동장의 와도값이 낮게 나타났다.

Fig. 7과 Fig. 8의 그래프에서 와도의 최대값과 평균값을 Table 1과 같이 나타내었다. 흡수정의 바닥 벽으로부터 100 mm일 경우 와도의 최대값이 다른 값보다 높게 나타났으며, 이것은 흡입관의 끝단에서 발생하는 와도의 값이다. 세부적인 결과 값의 검토를 위하여 z가 90 mm일 경우의 최대, 평균 와도 값도 같이 표시하였다. 데이터의 신뢰성을 위하여 흡입관 끝단에서 발하는 와도 값을 제외하면, AVD를 설치한 경우가 낮은

와도의 값을 갖는다. 그리고 AVD를 설치 않은 경우의 유로방향 축방향의 와도 값이 다른 값보다 높게 나타났다. 이러한 결과로부터 옆벽에서 보텍스가 강하게 발생한다는 것을 알 수 있다. AVD의 유무에 따른 전체적인 평균 와도 값은 AVD의 미설치 시 약 3배 높게 나타났다.

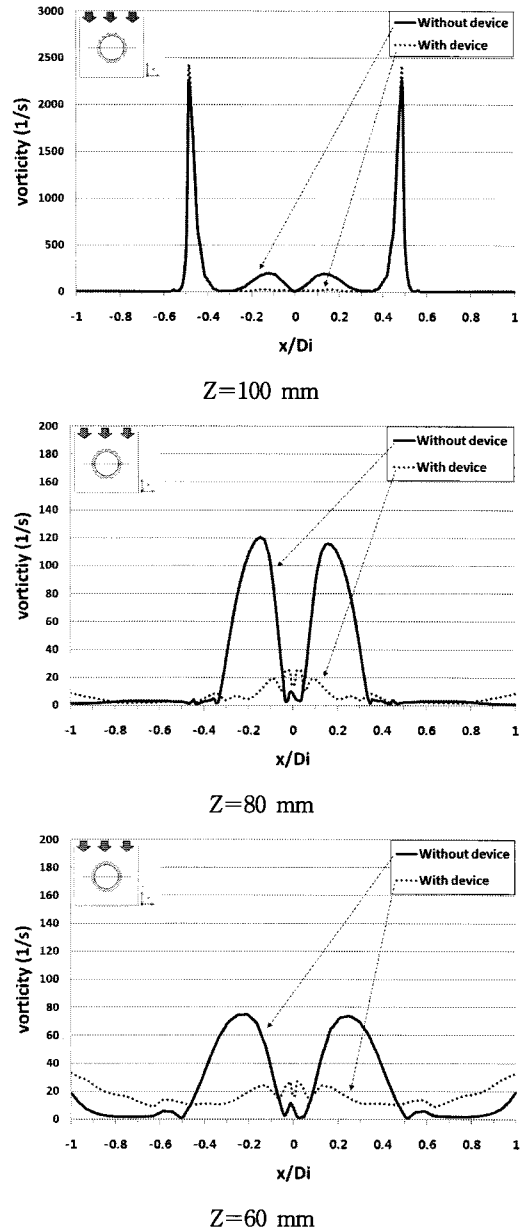


Fig. 7 Vorticity of flow axis direction

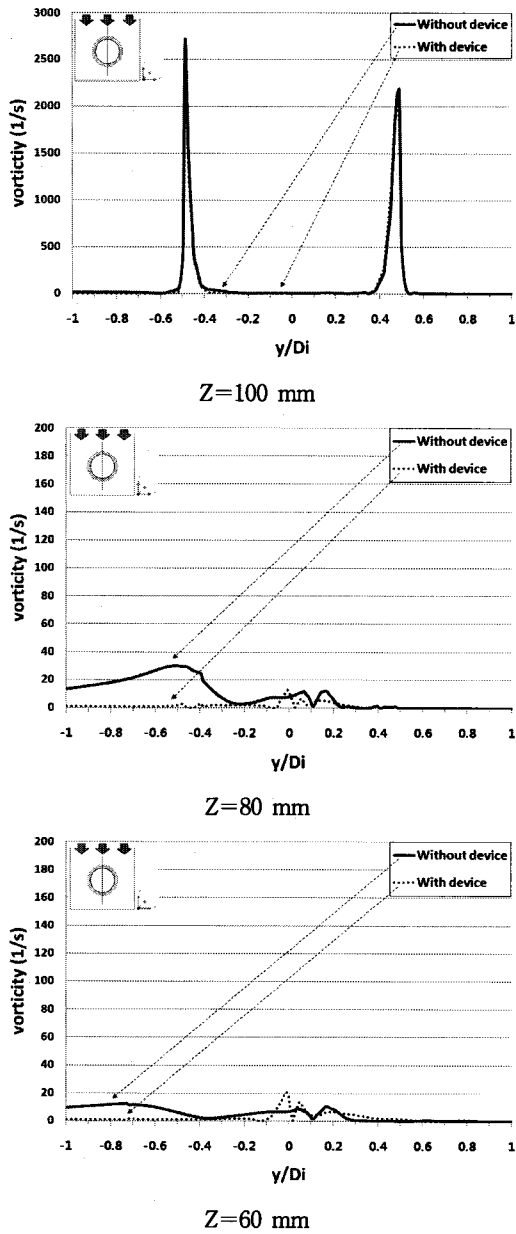


Fig. 8 Vorticity of flow direction

Table 1 Maximum & mean vorticity value of single-sump (Unit : s<sup>-1</sup>)

distance from bottom wall in the sump		with ADV	without ADV
유로방향 축방향	60 mm	33.2(16.9)	75.1 (23.4)
	80 mm	27.9(6.3)	120.7 (24.8)
	90 mm	27.9(6.2)	154.7 (28.0)
	100 mm	2394.2(22.4) (107.6)	2240.2(199.2) (132.8)
유로방향	60 mm	20.8(2.4)	12.8(4.7)
	80 mm	12.8(1.6)	30.2(9.2)
	90 mm	19.6(1.9)	66.1(13.5)
	100 mm	2416.9(95.8)	2683.4(102.7)

\*( ) : mean vorticity value, \*\*{ } : Second peak value

### 3.2 펌프장 모델의 유동해석

Fig. 9는 7개 흡수정을 갖는 펌프장 모델의 ADV를 적용한 흡입관 1~4 주위에서 발생하는 보텍스 형태를 나타낸 그림이다. 각 흡수정의 흡입관에서 발생하는 보텍스 형태는 상이하게 나타났으며, 흡수정 3에서 발생하는 보텍스의 형태가 다른 흡수정에서 나타나는 형태에 비해 넓게 분포하고 있다. Fig. 10는 바닥으로부터(z = 0 mm) 높이(z = 100 mm, 300 mm, 500 mm)에 따른 상류에서 흡수정의 흡입관까지 유입되는 유동장의 속도를 contour로 나타낸 그림이다. 펌프장 모델의 상류로부터의 속도는 각 흡수정 입구로 도달 시 각각 다른 속도 분포를 가지며, 흡수정 3과 5에서 흡수정 입구속도 분포의 변화가 가장 크게 나타났다. 그러나 흡수정의 뒷벽으로

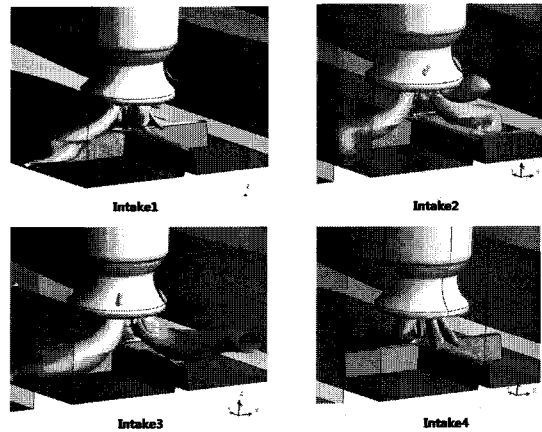


Fig. 9 Vortex core region of pump station

다중 흡수정을 갖는 펌프장 모델의 유동균일성 해석

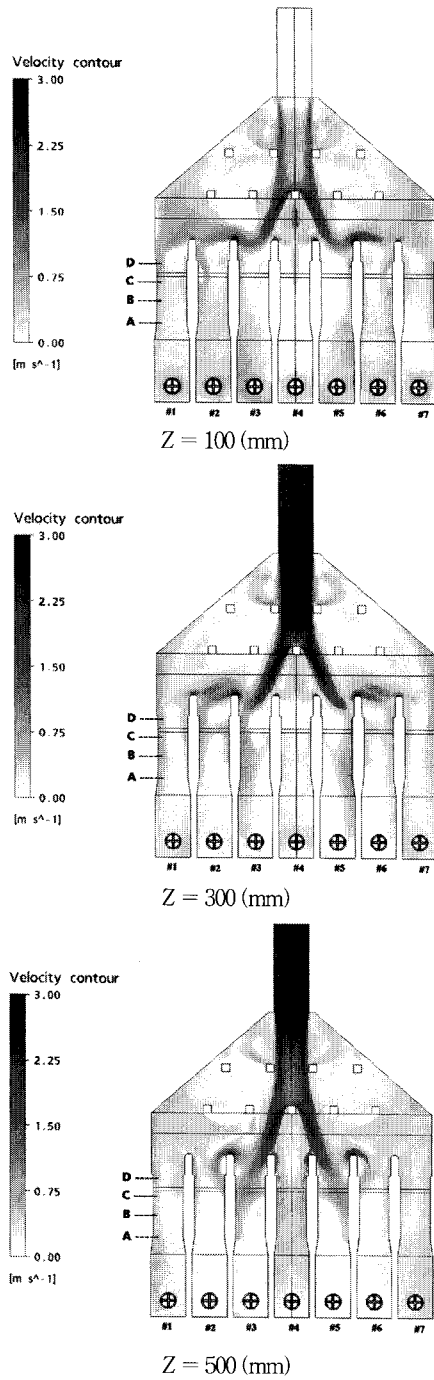


Fig. 10 Velocity contour of pump station

부터, Fig. 9에 표시한 A, B, C, D의 위치인 910 mm, 1100 mm, 1300 mm, 1500 mm 떨어진 곳에서의 유로방향으로의 흡수정의 흡입관 평균접근속도는 Table 2와 같이 모두 유사한 값을 갖는다. 또한, 각 흡수정의 입구에서 흡입관으로의 속도 분포를 알아보기 위하여 Fig. 11과 같이 유로 방향으로의 속도 프로파일을 나타내었다. 흡수정 1 ~ 4의 입구근처의 속도 프

Table 2 Approach mean velocity into intake pipe

(Unit : m/s)

distance from back wall in the sump	Sump1	Sump2	Sump3	Sump4
910 mm (A)	0.258	0.259	0.259	0.252
1100 mm (B)	0.259	0.259	0.259	0.253
1300 mm (C)	0.259	0.259	0.259	0.266
1500 mm (D)	0.259	0.259	0.259	0.262

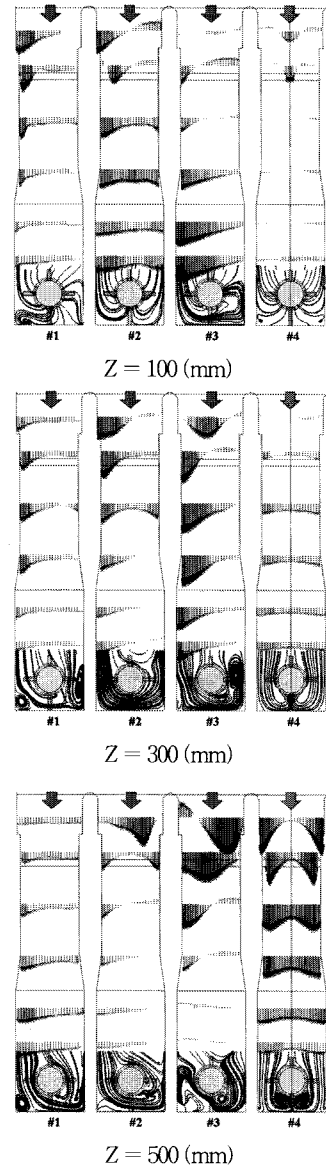


Fig. 11 Velocity profile & streamline of sump

로파일 중 흡수정 3의 속도 프로파일이 가장 비대칭적으로 나타났다. 흡수정 입구의 비대칭적인 속도유입으로 인하여 단일

Table 3 Flow uniformity of x-z plane from back wall in the sump  
(Unit : %)

distance from back wall in the sump	Sump1	Sump2	Sump3	Sump4
400 mm	43.6	86.7	123.6	32.3
500 mm	47.4	75.4	125.4	44.8
600 mm	49.2	70.9	126.3	53.2
1100 mm	47.1	77.1	125.4	62.9
1300 mm	51.8	82.3	141.9	69.5
1500 mm	60.4	103.3	156.6	80.9
Ave. value	49.9	82.6	133.2	57.3

흡수정의 흡입관 주위에서 발생하는 보텍스에 비하여 상이하게 나타난다.

흡수정 입구로부터 흡입관까지의 평균유속에 대한 유동분포의 균일성을 정량적으로 판단하기 위해 표준편차의 개념을 도입하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$S_v = \sqrt{\frac{\int (v - \bar{v})^2 dA}{A}} / \bar{v} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

여기서,  $v$ 는 국부 속도이며,  $\bar{v}$ 는 단면 A의 평균 속도이다. 식 (1)을 이용한 계산 결과를 Table 3에 나타내었다. Table 3은 각 흡수정 뒷벽에서 거리 1500 mm~400 mm 위치에 대한 단면의 유로 방향 유동 균일성을 나타내고 있다. 흡입관 3의 평균 유동 균일성 133.2%로 유로 채널단면에서 평균유속에 대한 국부 유속의 표준편차가 가장 크게 나타났으며, 이로 인하여 흡입관 3에서 가장 높은 와도와 선회류가 발생한다. 흡수정의 입구에서 흡입관으로의 유동의 균일성이 점차 증가하는 경향을 보이며, 흡수정의 입구에서 가장 높은 값을 갖는 이유는 흡수정으로 접근하는 비대칭적인 속도 분포로 인한 것으로 판단된다.

Fig. 12와 13은 각 흡수정의 흡입관 주위에서 발생하는 와도 값을 나타내고 있으며, 단일 흡수정의 흡입관 주위에서 발생하는 와도 값보다는 전체적으로 높게 나타났다. Fig. 11은 각 흡수정의 바닥 벽으로부터 높이에 따른 유로방향 축방향의 와도 값이며, 흡수정 입구 부분의 비대칭적인 속도분포로 인하여 흡입관 3에서 발생하는 와도 값이 가장 높게 나타났다. 또한 흡입관 4를 제외하고는 와도 값의 분포가 비대칭적으로 나타났으며, 이는 흡입관으로 유입되는 흡수정 입구부근의 속도 분포가 비대칭적 발생에 의한 것이다.

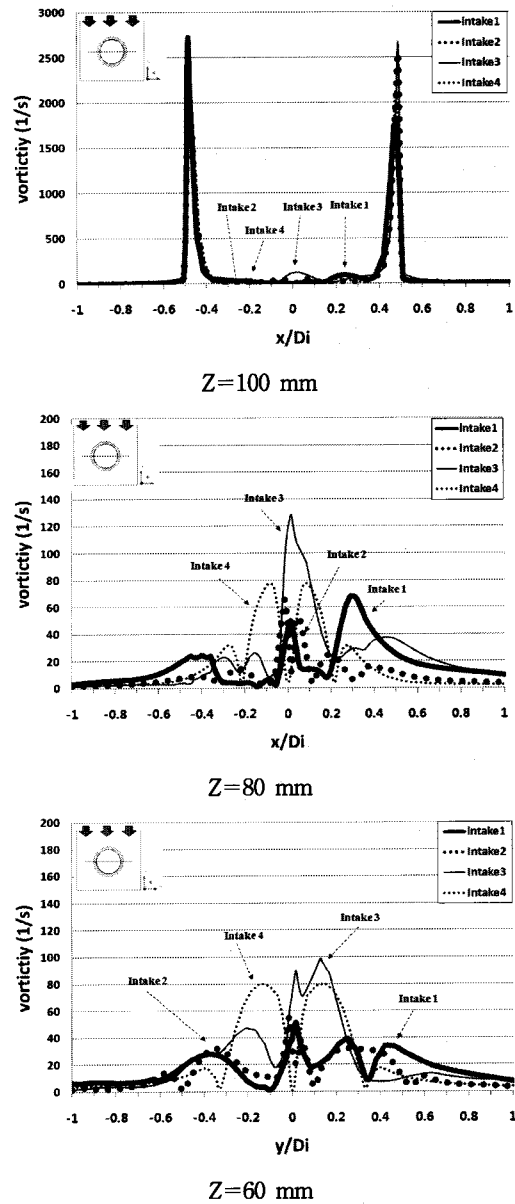


Fig. 12 Vorticity of flow axis direction

Fig. 12는 각 흡수정의 바닥 벽으로부터 높이 방향에 대한 흡입관 주위에서 발생하는 유로방향의 와도 값이며, 유로방향 축방향의 와도값 분포와 비슷하게 흡입관 3에서 가장 높은 와도 값을 가지고 있다. 흡입관 4에서의 와도 값이 가장 낮게 나타났으며, 흡수정 4의 경우 유로방향 축방향의 와도값이 유로방향 와도 값보다 높게 발생한다. 이는 뒷벽에서 발생하는 것보다 옆벽에서 발생하는 보텍스의 강도의 세기가 높다는 것을 알 수 있다.

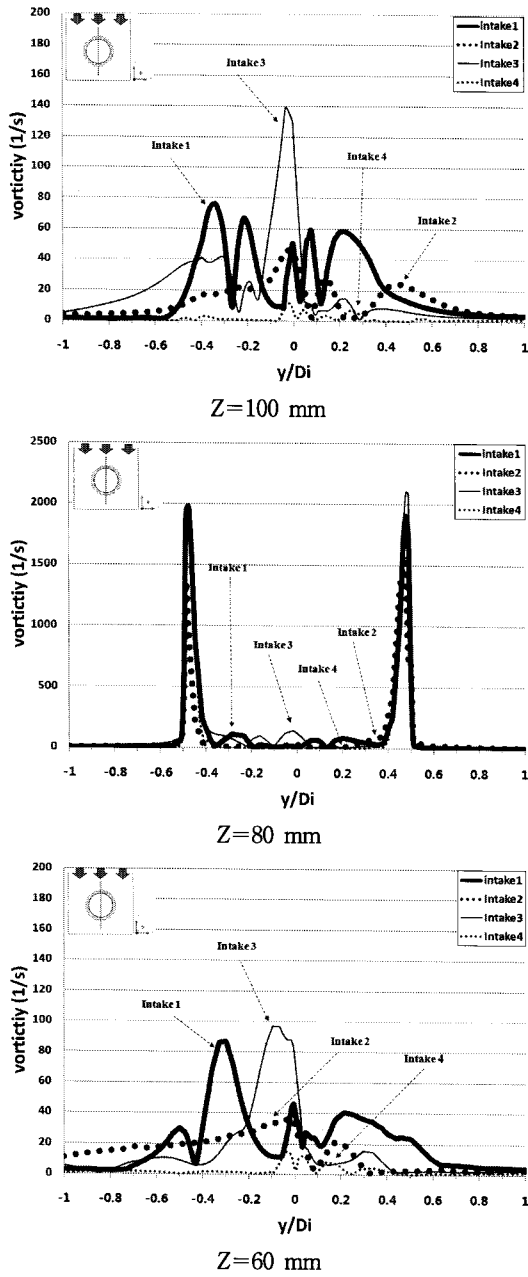


Fig. 13 Vorticity of flow direction

Table 4는 각 흡수정 바닥 벽으로부터 z방향으로 위치하는 면의 유로방향 축방향, 유로 방향의 최대 와도 값과 평균값을 나타내고 있다. 흡수정 흡입관 주위에서 발생하는 최대 와도 값은 유로방향 축방향 값이 유로방향의 값보다 높게 나타났다. Table 4의 데이터 중 가장 높은 값이 흡수정 3에서 나타났으며, 흡수정 1~4의 흡입관에서 발생하는 와도값 가운데 흡입관 3이 다른 흡입관에 비하여 평균적으로 1.5배 높은 와도 값을 갖는다.

Table 4 Maximum & mean vorticity value of multi-sump

(Unit : s<sup>-1</sup>)

distance from bottom wall in the sump		sump1	sump2	sump3	sump4
Flow-axis direction	60 mm	51.3 (17.3)	55.3 (14.2)	98.8 (23.3)	80.4 (23.2)
	80 mm	68.2 (17.3)	65.9 (9.8)	128.6 (22.4)	77.9 (17.2)
	90 mm	85.3 (19.4)	70.2 (14.0)	126.1 (25.3)	56.6 (12.9)
	100 mm	2671.7 {98.5} (118.5)	2504.5 {52.7} (114.0)	2626.9 {123.8} (119.1)	2126.7 {51.2} (121.0)
Flow direction	60 mm	86.8 (20.6)	36.9 (13.7)	96.7 (15.1)	14.7 (2.1)
	80 mm	76.0 (20.3)	46.3 (13.0)	123.9 (20.0)	11.4 (1.6)
	90 mm	108.2 (23.8)	57.2 (15.9)	158.3 (25.4)	46.1 (3.2)
	100 mm	1976.4 {110.2} (123.4)	1539.1 {26.4} (85.3)	2108.0 {138.1} (129.3)	1575.8 {17.4} (90.1)

\*(): mean vorticity value, \*\*{ }:Second peak value

#### 4. 결론

본 연구에서는 흡수정 7개로 구성된 펌프장 모델과 단일 흡수정의 AVD 유무에 의한 유동장의 영향을 수치해석 기법을 사용하여 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단일 흡수정에 AVD를 설치 시 흡입관 주위에서 발생하는 와도 값은 AVD 미설치 시에 비하여 평균적으로 약 3배 낮게 나타났다.
- 2) 흡수정으로 접근하는 비대칭적인 입구 속도 분포로 인하여 펌프장 모델의 흡입관 주위의 와도 값이 단일 흡수정의 와도 값에 비하여 전체적으로 높게 나타났다.
- 3) 펌프장 모델 흡입관 3에서의 채널단면에서 평균유속에 대한 국부 유속의 표준편차가 평균 133.2%로 가장 높게 나타났으며, 불균형 속도 분포가 다른 흡입관에 비하여 크게 나타남을 확인하였다.
- 4) 펌프장 모델에서, 각 흡수정 입구의 불균형 속도 유입이 가장 큰 흡수정 3과 5의 흡입관 주위에서 발생하는 와도 값이 다른 흡수정의 흡입관 주위에서 발생하는 와도 값보다 평균적으로 약 1.5배 높게 나타났다.
- 5) 펌프장 설계 시 상류로부터의 균일한 유동 유입분포를 고려한 펌프장 설계가 무엇보다 중요한 요소이다.



### 참고문헌

- (1) Padmanabhan, M., Hecker, G. E., 1984, "Scale Effects in Pump Models," J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 110(11), pp. 1540~1556.
- (2) Lajendran V. P., Constantinescu G. S., Patel V. C., 1998, "Experiments on Flow in Model Water-pump Intake Sump to Validate a Numerical Model," Fluids Engineering Division Summer Meeting, ASME, June 21-25, FEDSM98-5098.
- (3) Lee, T. S., 2001, "Visualization of Submerged and Attached Surface Vortices in Pump Sump," Asian Symposium on Visualization, ASV. pp. 97~99.
- (4) Nagahara, T., Sato, T., Okamura, T., 2003, "Measurement of the Flow around the Submerged Vortex Cavitation in a Pump Intake by Means of PIV," Fifth International Symposium on Cavitation, Cav03-OS-6-011.
- (5) Turbomachinery Society of Japan, 2005, "Standard Method for Model Testing the Performance of a Model Sump," TSJ S002.
- (6) 이영호 외, 2004, "모형실험을 통한 흡수정 형상결정 설계방향 수립", 한국수자원공사 연구용역최종보고서.
- (7) 김진영, 정경남, 김휴곤, 김영학, 2005, "펌프 흡입수조 모형 시험에서의 수중와에 대한 유동해석," 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 593~597.
- (8) 노형운, 김재수, 서상호, 2002, "CFD에 의한 펌프장 Sump내 유동해석," 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 89~94.
- (9) 최종웅, 2003, "PIV에 의한 펌프장 흡입수조내 흡입관 주위의 유동특성에 관한 연구", 한국해양대학교 학위논문.