

장방형 흡입식 슬러지 수집기에서 수로의 최적설계 및 폐수 유동특성

용정권[†] · 최청렬^{*} · 김창녕^{**}

Optimal Design on a Channel of Rectangular Suction Sludge Collector and the Flow Characteristics of Wastewater

Jung Kwon Yong[†], Chung Ryul Choi^{*}, Chang Nyung Kim^{**}

Key Words: Sludge collector(슬러지 수집기), Numerical Analysis(수치해석), CFD(전산유체역학)

Abstract

Recently, the sludge suction collector is preferred rather than the scraper type sludge collector due to enhancement of the clarifier efficiency. The sludge suction collector is usually operated by the user's experience without any scientific and technical consideration. There are many factors that should be considered for higher quality of discharged water and stabilized flow in the rectangular sludge suction collector but, the optimal design on the inflow channel and orifices connecting with the inflow channel is needed for similar flow rates at the orifices. The 4 cases of channel geometry are considered and mass flow rates of each case at the orifices are evaluated using Computational Fluid Dynamics applied VOF(Volume of Fraction) model.

기호설명

\vec{g} : 중력가속도 [m/s^2]
 \vec{v} : 유체속도 [m/s]

그리스 문자

α_i : i 번째 유체의 체적분율
 μ : 점성계수 [kg/ms]
 ρ_i : i 번째 유체 밀도 [kg/m^3]

1. 서 론

침전지는 산업현장에서 버려지는 폐수들과 각

각의 가정에서 버려지는 생활하수를 정화하는 시스템에서 주로 사용되고 있다. 침전지의 주요 목적은 깨끗한 상징액을 분리해내는 것과 운반 및 처리에 손쉬운 농도의 슬러지(sludge)를 얻는 것이다.

침전지는 형태에 따라 장방형과 원형으로 나뉘는데 장방형으로는 체인 플라이트식 슬러지 수집기(chain flight-type sludge collector)가 일반적으로 사용되고, 원형으로는 원형 스크래퍼식 슬러지 수집기(circular scraper-type sludge collector)가 사용되고 있다.⁽¹⁾ 하지만 이러한 침전지는 슬러지 제거시 교란으로 인해 슬러지 농축을 방해하고 슬러지가 제대로 배출되지 못해 탈질현상이 발생하여 유출수의 수질불량을 야기하기도 한다.⁽²⁾

이러한 문제들이 개선 보완된 장방형 흡입식 슬러지 수집기의 특징은 다음과 같다. HRT(Hydraulic Retention Time) 즉, 수리학적 체류시간이 기존의 침전지보다 상대적으로 짧고 폭기조로 반송되는 슬러지의 양 조절이 편리하고 밀도류

[†] 책임저자, 종신회원, 경희대학교 테크노대학

E-mail : cnkim@khu.ac.kr

TEL : (031)021-2578 FAX : (031)202-9715

* 경희대학교 기계공학과

** 경희대학교 기계공학과

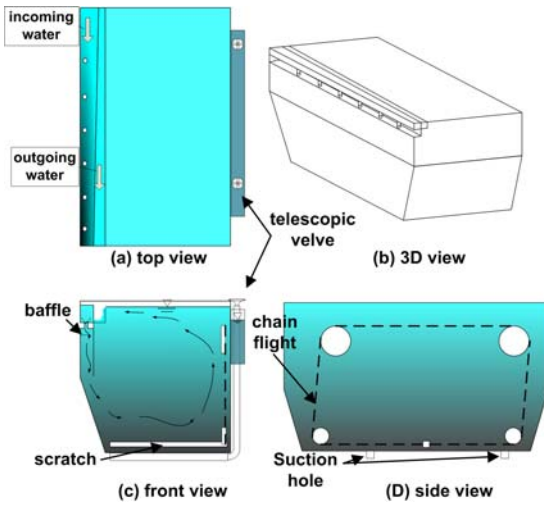


Fig. 1 The figure of a rectangular sludge suction collector and flow patterns.

(density current) 발생이 억제되어 유출수의 수질이 기존의 침전지에서보다 향상된다.

이상적인 침전지에서 침전입자 제거효율은 표면부하율과 관련되지만 실제 침전지는 유입부와 유출부의 형상, 단락류(short circuit), 슬러지의 침전속도, 압밀특성, 질산화 정도, 반송율 슬러지 깊이, 슬러지 제거 장치의 운전에 따른 교란현상 등 여러 가지 요인들의 영향을 받고 있다. 그러므로 유출수의 수질향상과 침전지에서의 안정된 유동흐름을 위해 객관적이고 과학적인 연구가 많이 수행되어야 하지만 실제 침전지가 운전되고 있는 대부분의 처리장에서는 관리자의 경험에 의존하고 있다.

하지만 최근, 컴퓨터의 기술이 발전함에 따라 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)을 이

용한 침전지 내의 유동 해석에 관한 활발한 연구가 진행되고 있다. 초기 수치해석적 연구는 2차원으로 묘사된 유동 패턴을 많이 제시하였으며 최근에는 3차원 유동 해석을 수행하여 좀 더 실제 유동과 근접한 결과를 얻고 있다.

본 연구에서는 장방형 흡입식 슬러지 수집기에서의 유동 안정화를 위한 최적설계값을 찾기 위해 CFD(Computational Fluid Dynamics)가 적용되었다. 특히 VOF(Volume of Fraction) 모델이 수치계산에 사용되어 실제 침전지에서 수두(pressure head) 차이에 의해 발생하는 유동이 묘사되었다. 실제 크기의 침전지에서의 유동을 수치계산하고 가시화함으로써 최적설계값을 얻는 것과 보다 향상된 슬러지 수집기의 성능을 입증할 수 있는 자료를 얻는 것을 연구목적으로 하였다.

2. Rectangular suction sludge collector

기본적인 장방형 흡입식 슬러지 수집기의 형상은 Fig. 1에 제시되었다. 침전지의 길이 방향으로 설치된 수로로 유입된 유체는 수로에 연결된 오리피스를 통과하게 된다. 오리피스를 통과한 유체는 오리피스 바로 아래 설치된 baffle로 인하여 분산되면서 침전지 하부로 내려가고 유체에 포함된 슬러지는 침전지 하부에서 침전된다. 하부로 내려간 유체의 일부는 서서히 상승하여 배출수로 흐르게 되고 일부는 슬러지와 함께 흡입구로 배출된다. 퇴적된 슬러지는 chain flight에 연결된 scraper에 의해 침전지의 바닥에 설치된 흡입구 쪽으로 이송되고 흡입구와 연결된 telescopic valve

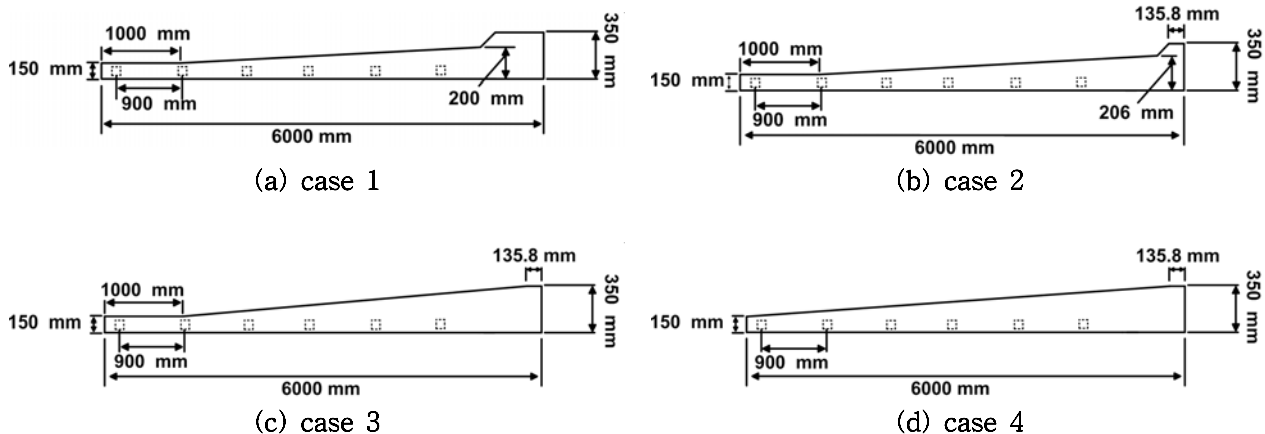


Fig. 2 The geometries of considered 4 channels.

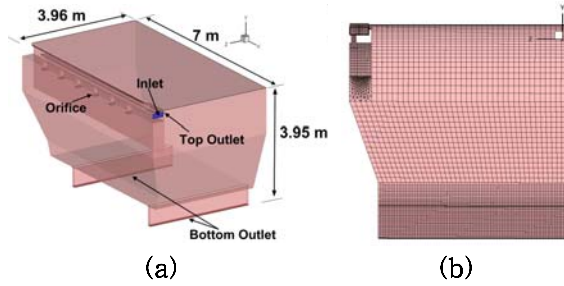


Fig. 3 Schematic and grid diagram of the sludge collector.

제어를 통해 발생된 수두차로 인하여 유체와 함께 포기조로 반송된다.

안정된 방류수질과 유동을 위해서 고려되어야 할 많은 요소들이 있지만 유입수로와 연결된 각각의 오리피스에서의 유량이 서로 비슷하도록 유입수로와 수로에 연결된 오리피스의 규격에 대한 최적설계가 요구된다. 본 연구에서는 4 가지의 유입수로 형상이 고려되었고 4 가지 유입수로의 수평단면들이 Fig. 2에 제시되었다. 유입수로의 높이는 198 mm로 4 가지 형상에 동일하게 적용되었고 각각의 오리피스에서 균등한 유량이 공급되기 위해 유입수로는 유체의 진행방향을 따라 단면이 축소되도록 설계된 것이 고려된 4가지 형상의 공통된 특징이다.

3. Numerical analysis

2.1 Numerical model

슬러지 수집기 내에서의 유동해석을 위하여 고려된 슬러지 수집기의 형상과 격자시스템이 Fig. 3에 제시되었다. 슬러지 수집기는 길이 7 m, 폭 3.96 m, 높이 3.95 m이고 침전지의 길이는 7 m이지만 수로의 길이는 6 m이다. Fig. 2에서 오리피스의 위치가 점선으로 표시되었는데 유입수로와 침전지를 연결하는 오리피스의 길이는 150 mm이고 오리피스의 단면은 정사각형이며 한 변의 길이는 88.6 mm이다. 6개의 오리피스들은 등간격으로 설치되었고 등간격 길이는 900 mm이다.

수치계산을 위해 수로영역과 넓은 침전지 영역이 접하는 부분을 제외한 모든 영역에서 정렬격자가 사용되었다. 형상이 복잡한 수로영역에서의 격자크기는 넓은 침전지 영역에서 격자보다 상대적으로 크기가 작다. 작은 격자크기가 모든 영역에 적용되면 격자수가 많아져 계산시간이 많이

Table. 1 Analysis conditions

inlet	mass flow rate	9.445 kg/s(800 m ³ /day)
	fluid species	water
bottom outlet	mass flow rate	3.542 kg/s (300 m ³ /day)
	fluid species	water
top outlet	pressure	gauge pressure = 0
	fluid species	water and air
wall	fluid	no-slip condition

소요되므로 이를 해결하기 위해 수로영역과 넓은 침전지 영역이 접하는 부분에서 비정렬격자가 사용되었고 수로 영역에서의 작은 격자와 침전지 영역에서의 큰 격자가 비정렬격자들을 통해서 연결되었다(Fig. 3).

2.2 Numerical method

본 연구에서는 실제 슬러지 수집기에서의 유동을 모사하기 위해서 3차원 유동해석을 실시하였고 VOF(Volume of Fraction) 모델이 적용되어 유입수로와 유출수로에서의 수면의 형상이 모사되었다. 각각의 오리피스에서 유량을 예측하기 위해서 유동은 정상상태로 수치계산되어야 하지만 VOF 모델의 수치적 특성 때문에 정상상태로 계산되기 어려우므로 비정상 유동이 고려되었다. 공기와 유체는 비압축성으로 가정되었다. 수치계산에 적용된 연속방정식, 운동량 방정식, volume fraction 방정식은 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{v}) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{v}) = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n (\alpha_i) = 1 \quad (4)$$

여기서, $\rho = \sum \alpha_i \rho_i$

연속방정식과 운동량방정식을 결합시켜 압력-속도해를 구하는 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)이 수치계산을 위해 사용되었다. 압력에 대한 이산화방식은 PRESTO(Pressure staggered option)가 적용되었고 대류항의 처리방법으로 QUICK(Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinetics)이 사용되었다.

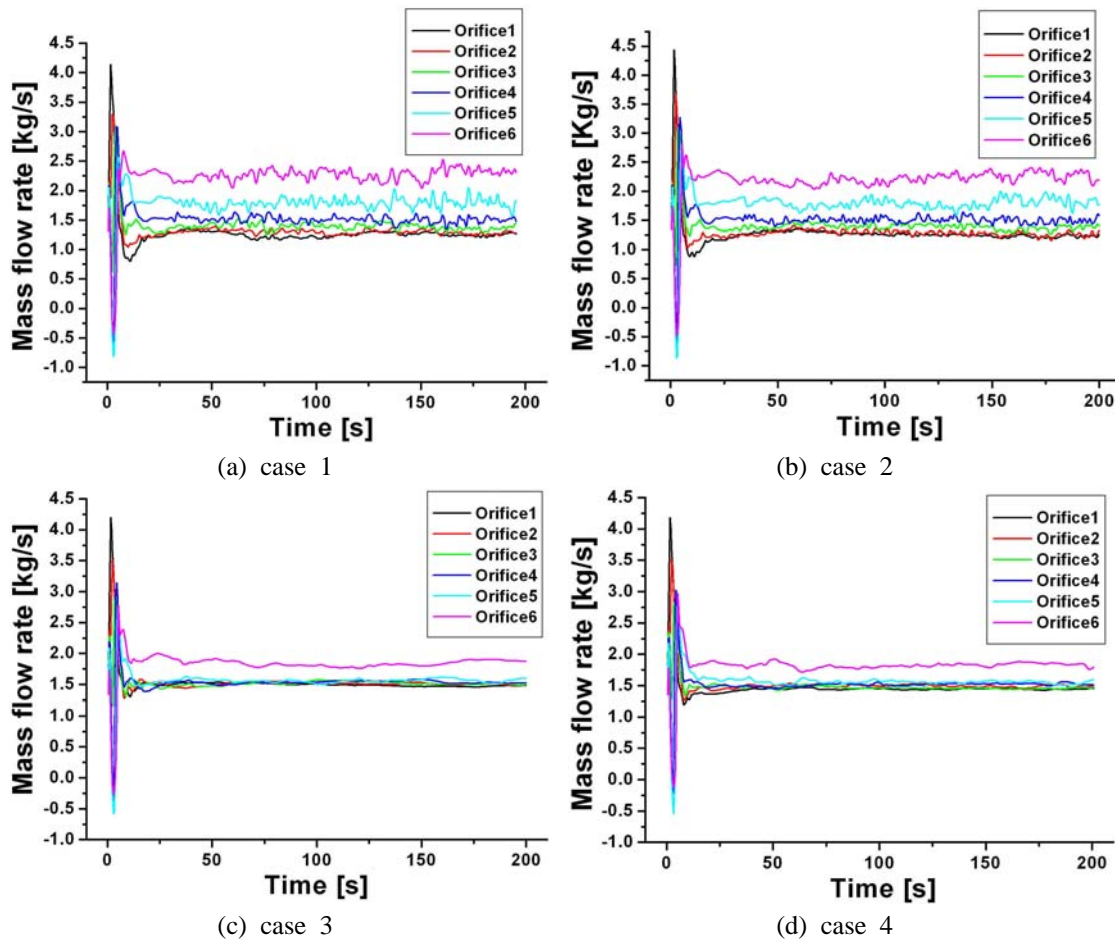


Fig. 4 The mass flow rates in the orifices with time.

2.3 Boundary conditions and initial conditions

공기와 유체의 밀도는 각각 1.225 kg/m^3 , 1020 kg/m^3 이고, 유체의 점성계수는 상온에서의 물의 점성계수인 $1.003 \times 10^{-3} \text{ kg/ms}$ 이다. 본 해석에서 슬러지 수집기의 입구 출구, 벽 부분에서 적용된 주요 parameter들이 table. 1에 제시되었다. 비정상 유동 해석에서는 초기조건이 어떻게 설정되느냐에 따라 유동 및 압력분포 등이 달라지므로 4 가지의 형상에 대한 각각의 수치계산에서 초기조건은 모두 동일하게 설정되었다. 초기조건은 다음과 같다. 모든 격자에서 x, y, z 방향의 속도가 0으로 설정되었고 슬러지 수집기에 물이 채워져 있는데 넓은 침전지 쪽에는 유출수로 물이 넘어가기 직전까지 물이 채워져 있는 상태이며 수로 쪽은 넓은 침전지 쪽보다 수위가 15 mm 더 높게 설정되었다. 이는 수치계산 상의 물리적 시간이 시작되면서 전체적으로 어느 정도 유체의 유동이 이뤄지도록 하기 위하여 설정되었다.

4. Results and discussion

본 연구의 수학적 모델에서, 서로 다른 격자수를 가진 격자시스템들에 대하여 여러 시간간격이 고려되어 수치계산되었고 그에 따른 결과들이 서로 비교되었다. 비교된 결과들을 토대로 격자수는 약 760,000 개이고, 시간간격 Δt 가 0.04 s로 계산된 결과가 제시되었다.

펜티엄 쿼드코어 2.4 GHz PC를 사용하여 물리적 시간 180 초를 계산하는데 약 4일이 소요되었고 수렴판정은 모든 격자에서 무차원 잔차가 10^{-4} 이하이면 수렴한 것으로 가정되었다. 모든 계산들은 수치해석 상용코드인 FLUENT 6.3을 통하여 수행되었다.

3.1 Fluid flow characteristics

4 가지 경우에 대해 시간에 따른 각각의 오리피스에서의 질량유량이 Fig. 4에 제시되었다. 오

Table. 2 Comparison of the calculated mass flow rates in the orifices at $t = 120$ s.

Unit : kg/s

	orifice1	orifice2	orifice3	orifice4	orifice5	orifice6	total	error	average	deviation
case 1	1.257	1.285	1.445	1.503	1.917	2.217	9.625	0.180	1.604	0.349
case 2	1.259	1.286	1.437	1.596	1.809	2.291	9.679	0.235	1.613	0.356
case 3	1.487	1.509	1.541	1.557	1.599	1.762	9.454	0.010	1.576	0.090
case 4	1.429	1.528	1.470	1.510	1.562	1.808	9.308	-0.137	1.551	0.122

(a) $t = 120$ s

	orifice1	orifice2	orifice3	orifice4	orifice5	orifice6	total	error	average	deviation
case 1	1.248	1.257	1.298	1.458	1.821	2.322	9.403	-0.041	1.567	0.391
case 2	1.196	1.237	1.334	1.415	1.820	2.164	9.166	-0.278	1.528	0.350
case 3	1.464	1.504	1.508	1.529	1.526	1.898	9.428	-0.016	1.571	0.147
case 4	1.439	1.510	1.457	1.497	1.535	1.867	9.306	-0.139	1.551	0.145

(b) $t = 180$ s

리피스의 변호는 유입수로에서 가까운 순서대로 1 ~ 6까지이다. 모든 경우에서 물리적 시간이 30 초 지난 이후부터는 시간이 흐름에 따라 각각의 질량유량들이 크게 변하지 않을 것으로 여겨진다. 하지만 case 1과 case 2에서 시간에 따른 질량유량의 변동(fluctuation)이 case 3과 case 4에서 보다 상대적으로 불안정하다. 그리고 case 1과 case 2에서 계산된 각각의 오리피스에서의 질량유량값들이 case 3과 case 4보다 상대적으로 넓게 분포되어 있다. case 3과 case 4에서 orifice1 ~ orifice5까지 질량유량이 거의 비슷하고 orifice6의 질량유량이 조금 더 큰 값으로 계산되었다.

Table. 2에 제시된 오리피스에서 측정된 질량유량의 총합은 입구에서의 질량유량과 비교하여 모든 경우에 대하여 최대 2.94% 정도 차이가 났다. 물

리적 시간이 120 초 경과된 시점에서 측정된 값들과 180 초 경과된 시점에서 측정된 값들이 크게 다르지 않으므로 시간에 따라 각 오리피스를 통과하는 유량이 크게 다르지 않을 것으로 여겨진다. 모든 경우에서 orifice6에서의 질량유량이 가장 컸고 orifice1에서의 질량유량이 가장 작았다. case 1과 case 2에서 각각의 오리피스에서 측정된 질량유량들이 수로를 통과하는 유체의 흐름 방향에 따라 증가하였다. case 3과 case 4에서도 오리피스에서 측정된 질량유량들이 유체의 흐름 방향에 따라 증가하고 있지만 그 증가량이 미소하다. Table. 2에 제시된 바와 같이 8 가지 경우에 대하여 평균 질량유량과 편차가 계산되었다. 모든 경우를 고려해 볼 때, case 3이 상대적으로 질량유량 편차가 가장 작았고 case 1에서 가장

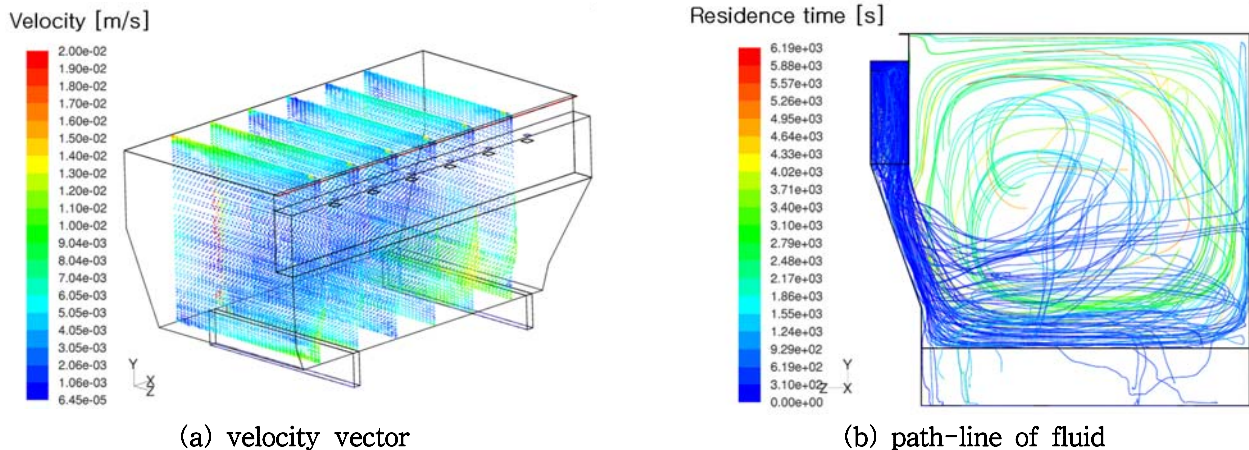


Fig. 5 The velocity vector and path-line of fluid in the sludge collector(case 3).

편차가 컸다. 그러므로 case 3의 형상에서 유체가 각각의 오리피스를 통과할 때 유량 차이 폭이 크지 않고 가장 안정되게 흘러갈 수 있을 것으로 판단된다.

물리적 시간 3 분 이후의 오리피스에서의 유량이 거의 변함 없을 것으로 판단되어 오리피스에서의 유량을 경계조건으로 하여 정상상태의 수치적 해가 얻어졌다. 수치계산으로부터 case 3에서 유체의 속도와 이동 경로가 Fig. 5에 제시되었다. 제시된 그림으로부터 오리피스를 통과한 유체가 벽면을 따라 침전지 하부로 내려가고 이중 일부는 흡입구 쪽으로 반송되고 나머지는 반대쪽 벽면 근처에서 위로 상승하는 것으로 사료된다. 넓은 침전지에서는 유체의 속도가 1 ~ 4 mm/s 정도로 느린 유동이 나타났으며 수로에 진입한 유체 입자가 침전지 위쪽 유출부를 통과할 때까지 요소시간은 약 1시간에서 2시간 정도 되는 것으로 여겨진다.

5. Conclusion

장방형 흡입식 슬러지 수집기의 수로에 대한 최적설계가 수치계산(CFD)를 통하여 수행되었다. 특히, VOF 모델이 적용되어 수로와 연결된 오리피스들에서의 유량들이 평가되었다. 4 가지 수로의 형상이 고려되었고 각각의 형상에 대하여 수

치계산한 결과, case 3에서 각 오리피스에서의 유량들이 다른 경우에서 보다 상대적으로 서로 비슷하였다.

또한 침전지 내에서의 유동이 수치계산되었다. 오리피스를 통과하는 유체의 속도는 상대적으로 큰 값이었지만 오리피스를 통과한 이후에는 확장된 공간 때문에 유체의 속도가 급격히 감소하였다.

본 수치계산에서 적용된 VOF 모델로 인하여 좀 더 믿을 만한 유동 결과가 얻어졌다고 판단된다. 본 연구에서 침전지 내의 유동이 모사되었지만 이 결과만으로 실제 유동을 설명하기에는 조금 부족한 것으로 사료되며 추후 모사된 넓은 침전지 내의 유체 유동과 실제 침전지 내에서 측정된 값과 비교 분석하는 연구가 수행되어야 한다.

참고문헌

- (1) Tchobanoglous, G. and Burton, F. L., 1991, *WASTEWATER ENGINEERING Treatment, Disposal and Reuse*, Metcalf and Eddy, New York.
- (2) M. Henze., R. Dupont., P. Grau., A. de la Sota., 1993, Rising sludge in secondary settlers due to denitrification., *Wat. Res.*, Vol. 27, No. 2, pp. 231 ~ 236.