흡입식 슬러지 수집기가 회전할 때의 유동특성 변화

진희남[†]·변종윤[*]· 노형운[**]·서상호[***]

Variation of Flow Characteristics in the Rotating Suction Sludge Collector

Hee-Nam Jin[†], Jong-Youn Byun[*], Hyung-Woon Roh[**] and Sang-Ho Suh[***]

Key Words: Suction Sludge Collector(흡입식 슬러지 수집기), Clarifier(침전지), Orifice(오리피스), Flow Characteristics(유동특성), Computer simulation(컴퓨터 시뮬레이션)

Abstract

Sedimentation phenomenon of suspended solids occurs by the gravitational force. Pollution particles are separated from slowly flowing wastewater in clarifier. 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 experiences without any scientific and/or technical consideration. To evaluate the performance of sludge suction collector, the three dimensional computer simulation was conducted by the finite volume method. To analyze the performance, the velocity vectors and the suction flow rates of the orifices were investigated. The result showed that each suction flow rate through out the collector was equivalent in the sludge suction collector and the efficiency of suction collector was good to remove high concentrated sludge in clarifier.

1. 서 론

침전현상이란 물보다 무거운 부유물질이 중력에 의해 물로부터 분리되어 가라앉는 것이다. 이 원리를 이용하여 오염물을 넓은 공간에 천천히 유입시켜 오염입자를 분리하는 것이 침전지이다. 침전지의 주요 목적은 깨끗한 상징액을 분리해내는 것이지만 운반 및 처리에 손쉬운 농도의 슬러지를 만들기 위한 목적도 가지고 있다.

침전지는 형태에 따라 장방형과 원형으로 나뉘는데 장방형은 체인 플라이트식 슬러지 수집기(chain flight-type sludge collector), 원형 침전지는 원형 스크레퍼식 슬러지 수집기(circular scraper-type sludge collector)가 일반적으로 사용된다[1)].

이중 원형침전지에서 스크레퍼식 슬러지 수집기의 경우 다수의 스크레퍼를 사용함으로서 슬러지 제거시간이 길어지고 제거시 교란으로 인한 슬러지 농축현상 저하 및 유출수의 수질불량 등이 야기될 수 있다. 또한, 스크레퍼식의 경우 침전지 하부토목구조가 경사형으로 시공이 어렵고, 바닥면과 스크레퍼의 마찰로 스크레퍼의 손상이 일어날 경우 사면(dead space)이 형성되어 슬러지 배출 성능의 저하가 일어날 수 있다. 슬러지가 제대로 배출되지 못한 경우 침전지 하부에 침전된 슬러지에서 탈질이 발생하고 이때 생성된 질소가스의 부상시 슬러지를 상승시켜 슬러지 부상(sludge rising)이 발생한다[2)].

이러한 문제들의 해결책으로 가능한 최단시간에 침전지로부터 슬러지가 인발되어 부패되지 않고 신선함을 유지하고, 슬러지층의 교란을 최소화하여 침전특성을 향상시키기 위하여 흡입식 슬러지 수집기가 개발되었다.

† 효림산업(주)
E-mail : jinhn@hyorim.co.kr
TEL : (031)781-6061 FAX : (031)781-6077
* 효림산업(주)
** 시립인천전문대학 기계과
*** 숭실대학교 기계공학과

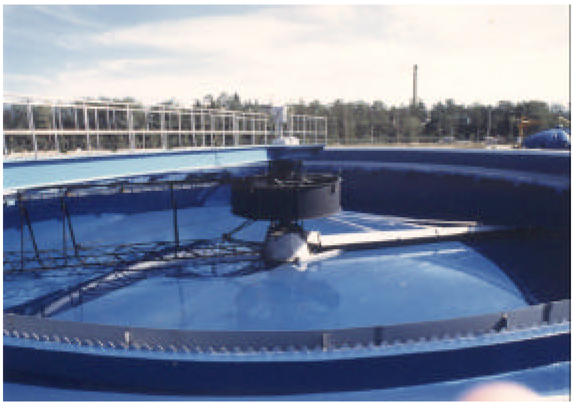
침전입자의 제거 효율은 이상적인 침전지에서는 표면부하율과 관련되지만 실제 침전지에서는 유입부와 유출부의 형상, 단락류(short circuit), 슬러지의 침전속도, 압밀특성, 질산화 정도, 반송율, 슬러지 깊이, 슬러지 제거 장치의 운전에 따른 교란현상 등 여러 가지 요인들의 영향을 받고 있다. 그러므로 침전공정에서 물이 유입되는 동시에 슬러지의 침전, 침전지 내의 기기 작동에 의한 침전된 슬러지의 유출, 침전지 상부에서 상징수의 유출이 이루어지므로 슬러지 입자의 움직임과 동역학적인 기기의 움직임이 함께 고려되어야 한다. 그러나 실제 슬러지 수집기가 운전되고 있는 대부분의 처리장에서는 슬러지 수집기의 운전상태에 대해서는 과학적인 실험이나 데이터에 의한 것이 아니라 관리자의 경험에 의존하고 있다. 또한, 국내 상수도, 하수도 시설기준에는 기존시설의 운영실적과 경험만을 토대로 한 자료가 있을 뿐이다[3-4].

본 연구에서는 흡입식 슬러지 수집기의 성능해석(유입 및 유출 유동양상, 슬러지 제거능력 등)을 하기 위해 수치해석(CFD)를 적용하였다. 특히 침전지에서 흡입식 슬러지 수집기가 회전할 때의 유동 형태를 해석함으로서 보다 객관적이고 실증적인 데이터를 구하여 그 성능을 입증하고, 보다 향상된 슬러지 수집기 개발을 위한 자료를 얻는 것을 연구목적으로 하였다.

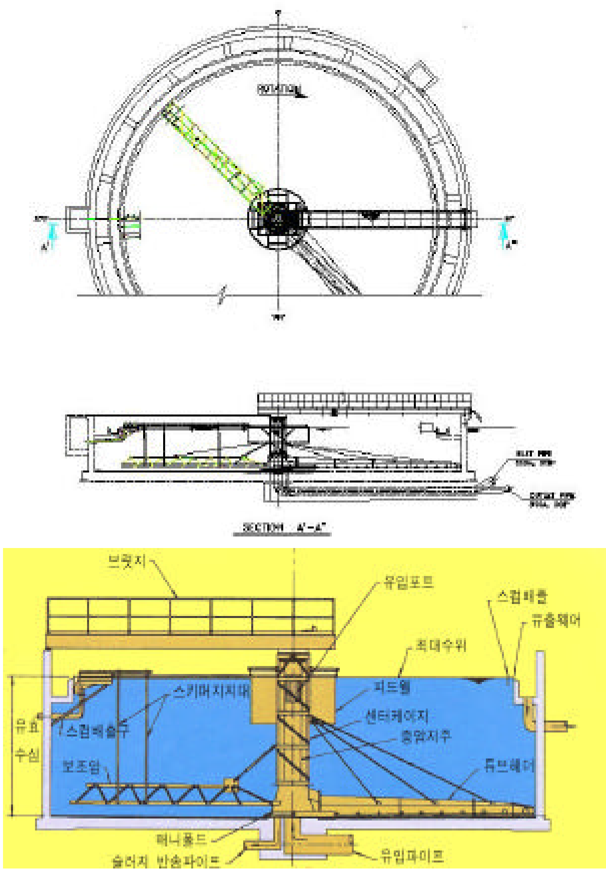
2. 흡입식 슬러지 수집기

흡입식 슬러지 수집기는 Fig. 1과 같이 기존의 스크레퍼식 슬러지 수집기에서 스크레퍼가 회전하면서 밑바닥의 슬러지를 긁어서 천천히 침전지의 중앙으로 모아서 배출하는 방식과 달리 오리피스가 달린 회전튜브로 구성되어 있으며, 회전튜브는 수평바닥면을 회전하면서 침전지의 수위와 슬러지 출구의 수위 차에 의해서 슬러지가 흡입되는 제거 방식이다.

흡입공이 부착된 튜브헤더는 회전시 침전물의 부상 및 저항을 최소화하도록 마름모형상의 단면을 갖으며 단면은 제거되는 슬러지 플럭스(flux)를 고려하여 침전지의 중심부에서 원주부위로 점차 단면이 감소하도록 제작된다. 이때 헤더의 크기에 따라 달라지지만 최소 오리피스의 크기는 50~75mm(2~3")정도로 하는 것이 일반적이다. 또한, 오리피스의 간격은 762mm(30") 이내인 등간격를 유지시키고 헤더단면은 유량과 유속을 고려하여 4각 단면의 테이퍼 형상으로 크기를 선정하였다. 제거된 슬러지는 침전지의 중심부로 이동되며 매니폴더내로 유입되어 배출 배관으로 배출



(a) Installed suction sludge collector in the sewage treatment facilities



(b) Cross section of the suction sludge collector

Fig 1. Descriptions section of the suction sludge collector

하게 된다. 슬러지 제거량은 침전지 수위와의 수두차에 따라 다르도록 제작되며 수두차를 작게 할수록 고농도의 슬러지를 얻을 수 있다.

3. 수치해석

3.1 지배방정식

기하학적 형상이 복잡한 흡입식 슬러지 수집기내 유동변수인 속도와 압력을 구하기 위하여 시간 평균화된 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 텐서형으로 나타내면 각각 식 (1) 및 식 (2)와 같다[5].

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_e\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] \quad (2)$$

여기서, u_i는 속도벡터이고, ρ는 밀도(density), μ_e는 유효점성계수(effective viscosity)이며, p는 각각 정압을 나타낸다.

흡입식 슬러지 수집기내 유동장 문제에 대한 지배방정식을 해석하기 위하여 유한체적법을 이용하여 비엇물림 격자계(non-staggered grid system)에 대한 이산화방정식을 구하였다. 지배방정식의 대류항은 HYBRID방법을 이용하였다. 또한, 운동량방정식의 압력항 처리는 압력수정방법을 이용하는 SIMPLE-C방법을 적용하여 압력수정에 관한 근사 이산화방정식을 압력과 속도의 상관관계를 고려한 연속방정식의 이산화방정식으로부터 구하였다[6-9]

3.2 적용된 모델

본 연구에 적용된 흡수식 슬러지 수집기의 시방은 아래와 같다.

- 슬러지 수집기 크기 : Φ28m × SWD 3.2 m
- 처 리 량 : 15,000m^3/day
- 반 송 슬 러 지 율 : 60~100 %
- 회 전 속 도 : 0.03~0.04 rpm
- 슬러지 유입 파이프 : Φ600mm
- 슬러지 유출 파이프 : Φ350mm
- 오리피스 크기 : Φ50mm 이상
- 튜브 헤더내 유속 : 0.15 m/sec 이상
- 헤 더 단 면 : 4각 단면의 테이퍼 형상

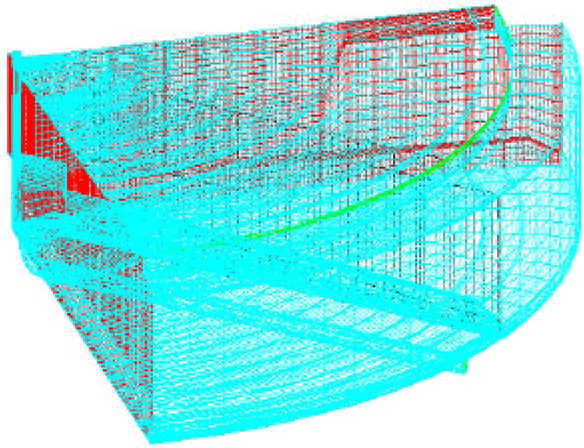


Fig. 2 Computational meshes of the suction sludge collector

컴퓨터시뮬레이션에 적용된 흡입식 슬러지 수집기의 격자계는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 볼 수 있지만 흡입식 슬러지 수집기의 모형은 실측으로 동일하게 하고 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만 모델링하였다. Fig. 2의 가운데서 반송량을 고려하한 24,000㎥/day의 유입량이 들어오는데 유동의 교란 및 단락류로 인한 슬러지의 부상을 막기 위하여 중심으로부터 2.285m에 피드웰(배플)이 설치되도록 하였다. 하루 동안 24,000㎥으로 유입된 유량은 weir로 60%, 그리고 오리피스로 40%정도 반송되도록 설치되어 있다. 수치해석시 흡입식 슬러지 수집기에 들어가는 구동장치, 중앙지주, 센터케이지, 피드웰, 보조암, 매니폴드 등은 무시하였다. 또한, 본 연구에서는 헤더가 0.03~0.04rpm으로 회전하는 것을 고려하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 흡입식 슬러지 수집기내 유동장

흡입식 슬러지 수집기내 유동장을 해석하기 위하여 먼저 청수(μ=1cp)인 경우의 유동장 해석 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3를 통해 전체적인 유동장을 살펴 본 결과 흡입식 슬러지 수집기내 유동장은 슬러지의 부상(sludge rising)을 억제시키고 있음을 알 수 있었다. 또한, 헤더내에서 슬러지가 쌓이지 않도록 0.15m/s 이상의 유속이

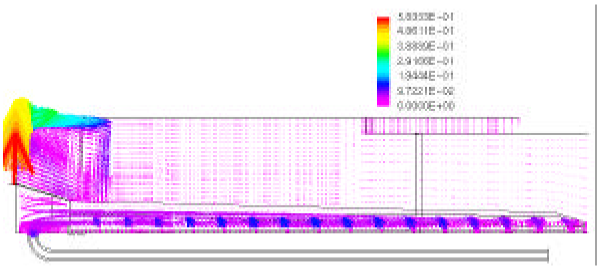


Fig. 3 Velocity vectors at the several sections in the suction sludge collector(60%:40%, 1cp)

유지되도록 설계를 하였는데, 이 결과를 확인하여 본 결과 속도가 0.18m/s이상이므로 예상 설계속도를 원활히 만족하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 유동장으로부터 슬러지가 침전지 단위면적당 균일하게 제거되며, 다양한 유량의 변화에서도 완전한 제거가 이루어짐을 알 수 있었다.

이점을 좀 더 자세히 관찰하기 위하여 Fig. 4와 같이 누계 흡입량을 백분율로 나타내었다. Fig. 4에는 흡입식 슬러지 수집기내에서 이론적으로 슬러지를 흡입 할 수 있는 능력을 반경비로 나타낸 것이다. 즉, 이론적인 슬러지 흡입량으로부터 헤더의 길이에 따른 오리피스의 개수와 직경을 계산할 수 있는 것이다. Fig. 4에서 ○로 나타낸 계산 결과는 이론값보다 좀 더 많이 흡입되고 있

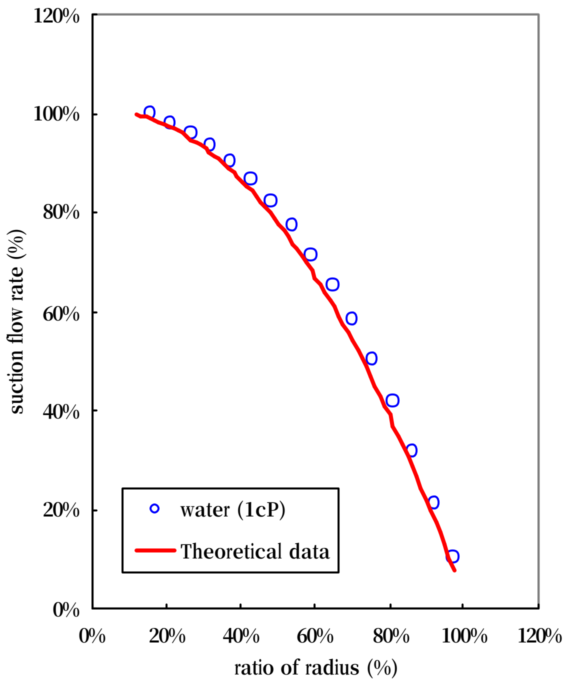


Fig. 4 Suction flow rates with the ratio of radius(%)

음을 알 수 있다. 이는 슬러지의 점성계수와 회전을 고려하지 않았기 때문으로 판단된다.

4.2 튜브헤더의 회전에 따른 흡수식 슬러지 수집기내 유동해석

4.1절은 튜브헤더가 고정된 경우를 해석한 것이다. 그러나 실제로 흡수식 슬러지 수집기내 튜브헤더는 0.03rpm으로 회전을 하면서 슬러지들을 빨아들이고 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 튜브헤더가 움직이도록 고려하여 해석하였다. Fig. 5에는 헤더가 시계방향으로 회전하였을 때 수치격자를 나타낸 것이다.

Fig. 5와 같이 튜브헤더가 회전할 때의 속도벡터를 Fig. 6에서 검토하여 보면 튜브헤더가 고정

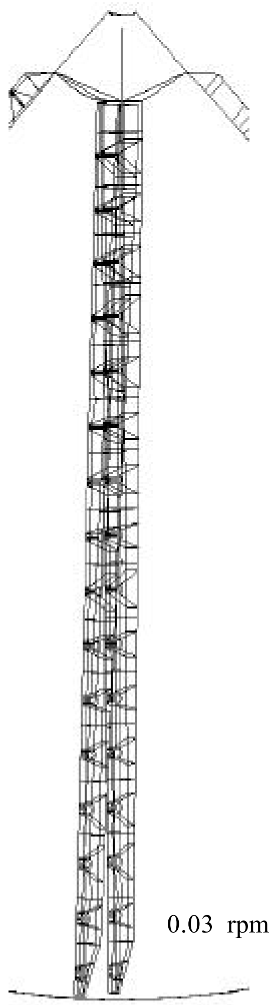
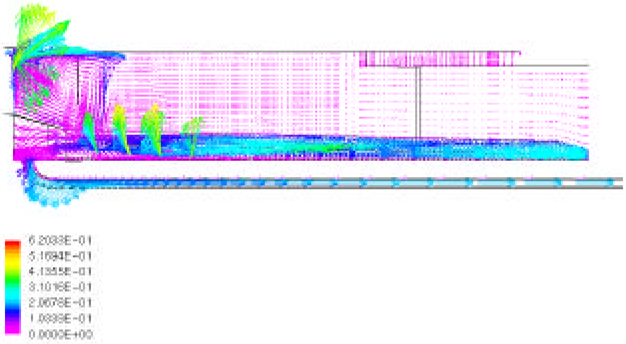
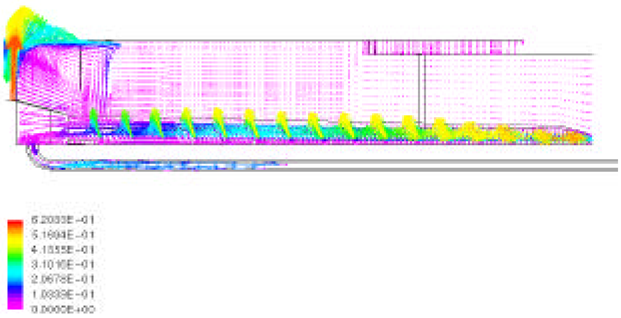


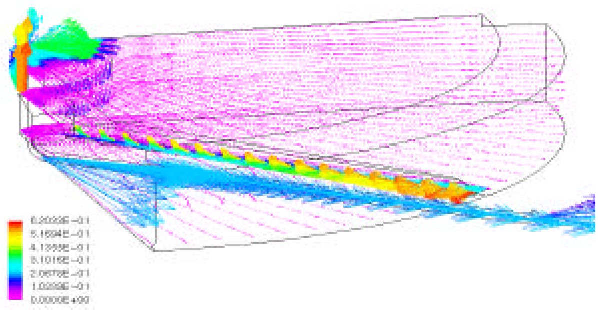
Fig. 5 Schematic of the rotating sludge header



(a) initial region



(b) moved region



(c) whole view

Fig. 6 Velocity vectors at the several sections in the suction sludge collector with rotating header

이 된 경우나 튜브헤더가 회전하는 것에 대한 침전지내에서의 유동특성의 차이는 없고 회전이 될 경우에도 마찬가지로 흡입식 슬러지 수집기내 유동장은 단락류가 없고, 유동이 안정하여서 침전에 적합함을 보여주고 있다. 또한 헤더내에서 슬러지가 쌓이지 않도록 0.15m/s 이상의 유속이 유지되도록 설계를 하였는데, 이 결과를 확인하여 본 결과 0.18m/s이상이므로 예상 설계속도를 원활히 만족하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 유동장으로부터 슬러지가 침전지 단위면적당 균일하게 제거되며, 다양한 유량의 변화에서도 완전

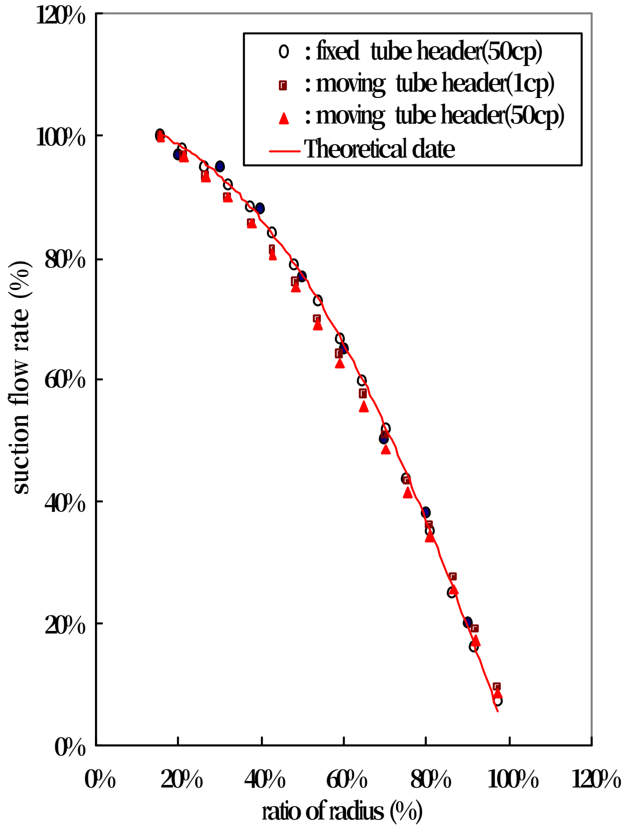


Fig. 7 Suction flow rates with the ratio of radius with moving tube header and fixed tube header

한 제거가 이루어짐을 알 수 있었다.

그러나 유동속도장에서 가장 큰 차이점은 시계방향으로의 회전으로 인하여 전체적으로 시계방향으로 큰 속도분포를 가지고 있음을 알 수 있다. 특히 튜브헤더의 끝 부분에 속도가 가장 큼을 알 수 있다.

이러한 유동특성을 정확히 살펴보기 위하여 Fig. 7에 헤더의 움직임에 따른 누계 흡입량을 백분율을 나타내었다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 점성계수가 50cp인 경우는 튜브헤더 회전시 튜브헤더가 고정되었을 경우의 유동결과에 비해서 튜브헤더 외곽 오리피스의 흡입율은 증가하지만 중앙 오리피스의 흡입율이 감소한 것으로로 판단된다. 점성계수가 1cp인 경우는 회전의 영향이 보다 적게 나타나서 이론값과 좀 더 근접하고 있음을 알 수 있다.

이러한 결과는 튜브헤더의 회전속도로 인해 각각의 오리피스 흡입량에 영향을 미쳤고, 점도가

커짐에 따라 그 영향도 커진다고 할 수 있다.

4. 결 론

흡입식 슬러지 수집기 튜브헤더의 유동을 평가한 결과는 다음과 같다.

1. 흡입식 슬러지 수집기내 가운데에서 유입된 유동은 피드웰을 만나 큰 재순환영역을 이루다가 튜브헤더의 오리피스를 통한 흡입으로 인하여 수집기 바닥에 유동이 흘러간다. 수집 헤더내에서는 0.18 m/s 이상의 유속으로 대체로 균일하게 유지되어 제거된 슬러지의 적체없이 배출되고 침전지 상부에서는 침전현상이 원활히 이루어짐을 알 수 있었다.

2. 회전을 하지 않았을 때, 고점도(50cp)인 슬러지로 가정하였을 경우에서도 비교적 이론값과 잘 일치하였다. 그러나 점도가 매우 커지는 경우(100cp이상) 바깥쪽의 오리피스의 크기를 확대시키고 안쪽 오리피스의 크기를 줄여주거나 튜브헤더의 크기를 커지는 게 하는 것이 바람직하다.

3. 회전을 주었을 때는 고점도(50cp)인 슬러지로 가정하였을 경우, 튜브헤더의 회전속도에 의해서 회전하지 않았을 경우 보다 외곽의 오리피스 흡입량이 증가하고 안쪽 오리피스의 흡입량은 감소함이 나타났다. 그러나 증감폭이 이론치에 비하여 크게 차이가 없음을 알 수 있다.

참고문헌

(1) Metcalf & Eddy INC., 1991, WASTEWATER ENGINEERING Treatment, Disposal and Reuse, Third Edition, McGraw-Hill Inc.

(2) Mogens Henze & Rene Dupont, 1993, Rising sludge in secondary settlers due to denirification, Wat. Res. Vol 27 No 2, pp. 231-236.

(3) 환경부, 1998, 하수도 시설기준, 한국수도협회 pp. 364-376.

(4) 환경부, 1997, 상수도 시설기준, 한국수도협회 pp. 258-259.

(5) Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, N.Y.

(6) Rhie, C. M. and Chow, W. L., 1983, "Numerical Study of Turbulent Past an Airfoil with Trailing Edge Separation", AIAA J. Vol. 21 pp. 1527 ˜ 1532.

(7) Spalding, D. B., 1972, "A Novel Finite Difference Formulation for Differential Expressions Involving Both First and Second Derivatives", Int. J. Num. Meth. Eng. Vol. 4, pp. 551 ˜ 559.

(8) Jang, D. S., Jetli, R. and Acharya, S., 1986, “Comparison of the PISO, SIMPLER, and SIMPLE -C Algorithms for Treatment of the Pressure- Velocity Coupling in Steady Flow Problems”, Numerical Heat Transfer, Vol. 10, pp. 209 ˜ 228.

(9) CFX4.4, User Manual, 1997, AEA Industrial Technology Harwell Lab., United Kingdom.