2003 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 415~420
선문대학교 아산캠퍼스, 2003. 12. 5~6

침전지의 흡입식 슬러지 수집기에 대한 성능해석

진희남* • 변종윤* • 서상호** • 노형운**

Performance Analysis for Sludge Suction Collector in Clarifier

Hee-Nam Jin*, Jong-Youn Byun*, Sang-Ho Suh**, Hyung-Woon Roh**

Key Words : Sludge Suction Collector(흡입식 슬러지 수집기), Clarifier(침전지), Orifice(오리피스), Performance Analysis(성능해석), 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[1]. 침전지의 주요 목적은 깨끗한 상징액을 분리해내는 것이지만 운반 및 처리에 손쉬운 농도의 슬러지를 만들기 위한 목적도 가지고 있다. 일반적으로 정수장의 경우 침사지, 침전지, 농축 공정으로 구분되고, 하수처리장에서는 침사지, 1차 침전지, 2차 침전지, 농축조, 그리고 경우에 따라 화학적 침전조로 구분된다. 보통 정수장이나 하수처리장에서 침천지가 상당한 면적을 차지하며, 전체적인 고액분리 공정에서 다른 공정과 공동으로 고형물의 부하를 줄여주게 되어 침전지의 효율은 전체 공정의 효율에 직접적인 영향을 주고 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. 원형 스크레퍼식 슬러지 수집기는 장방형 스크레퍼식 보다 효율이 높아 하수처리장이나 정수장에서 보다 많이 사용되고 있다[2,3].

침전지에서 슬러지 농축 및 제거 기능이 원활히 이루어지지 않을 경우, 농축 슬러지의 부패로 인한 포기조에서의 산소요구량 증가, 미생물 세포내에 함유한 인(P) 방출, 저농축 상태의 경우 폐슬러지내 함수율 증가로 인한 처리공정에서 비용의 증가, 침전지 하부의

* 효림산업(주) 기술연구소
** 숭실대학교 기계공학과
E-mail : jinhn@hyorim.co.kr

무산소 상태(anoxic condition)에서 탈질현상으로 인한 슬러지 부상(sludge rising) 현상, 그로 인한 유출수의 부유물질(suspended solid)증가 등의 문제점이 나타난다. 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 불균일한 경사면의 스크레퍼의 운전시 사면(dead space)이 형성되어 침전성능의 저하가 일어날 수 있다[4,5].

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

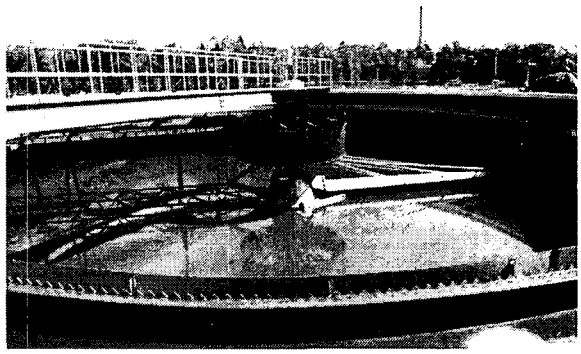
침전입자의 제거 효율은 이상적인 침전지에서는 표면부하율과 관련되지만 실제 침전지에서는 유입부와 유출부의 형상, 단락류(short circuit), 슬러지의 침전속도, 압밀특성, 질산화 정도, 반송율, 슬러지 깊이, 슬러지 제거 장치의 운전에 따른 교란현상 등 여러 가지 요인들의 영향을 받고 있다. 그러므로 침전공정에서 물이 유입되는 동시에 슬러지의 침전, 침전지 내의 기기 작동에 의한 침전된 슬러지의 유출, 침전지 상부에서 상징수의 유출이 이루어지므로 슬러지 입자의 움직임과 동역학적인 기기의 움직임이 함께 고려되어야 한다. 그러나 실제 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.

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

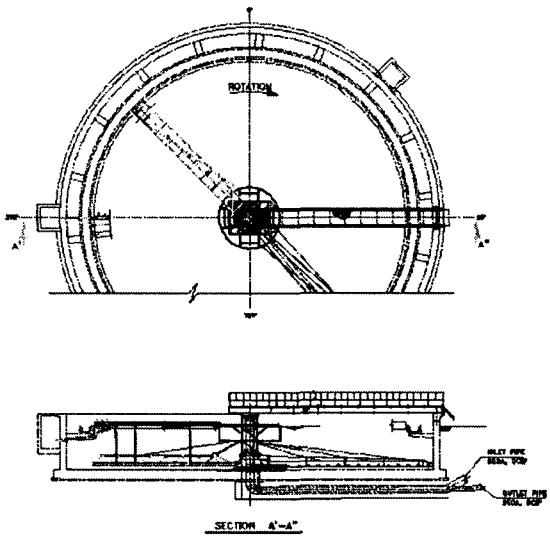
2. 흡입식 슬러지 수집기의 소개

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.

슬러지 수집기는 구동장치(Drive Unit), 중앙지주(Center Pier), 센터케이지(Center cage), 피드웰(Feed well), 보조암(Trust Arm), 매니폴드(Manifold), 튜브헤더(Tube Header) 등으로 구성되며 중앙지주상에 설치된 구동장치로부터 센터케이지를 통하여 하부에 부착된 매니폴드와 튜브헤더에 회전력을 전달하여 튜브헤

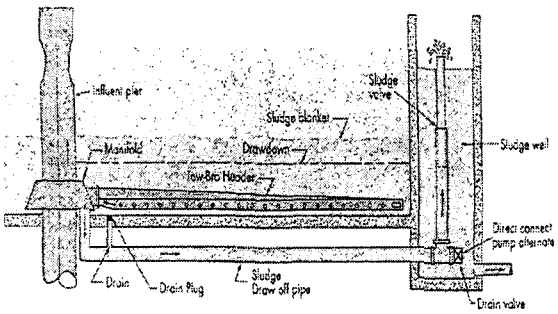


(a) Installed suction sludge collector in the "K" sewage treatment facilities

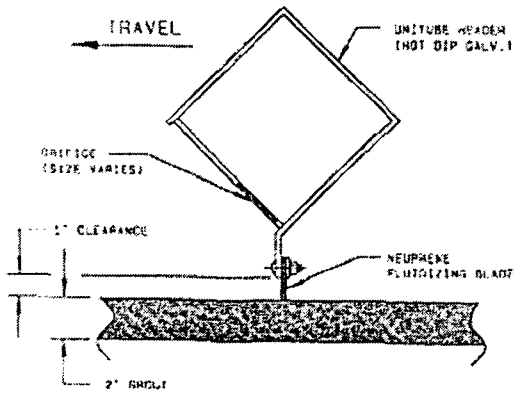


(b) Cross section of the suction sludge collector

Fig 1. Descriptions section of the suction sludge collector



(a) schematic diagram of suction sludge collector



(b) cross header of tube header

Fig. 2 Schematic diagram of the tube header with orifices

더가 회전하게 된다. 슬러지는 중앙지주의 상부로 유입되어 피드웰에서 하부로 정류시켜 침전을 유도하며 침전된 하부 슬러지는 일정한 간격의 Fig. 2와 같은 흡입공(Orifice)을 통하여 흡입, 배출하여 제거한다. 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 크기를 4각 단면의 테이퍼 형상으로 크기를 선정하였다. 제거된 슬러지는 침전지의 중심부로 이동되며 매니폴더내로 유입되어 배출 배관으로 배출하게 된다. 슬러지 제거량은 침전지 수위와의 수두차에 따라 다르도록 제작되며 수두차를 작게 할수록 고농도의 슬러지를 얻을 수 있다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

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[6].

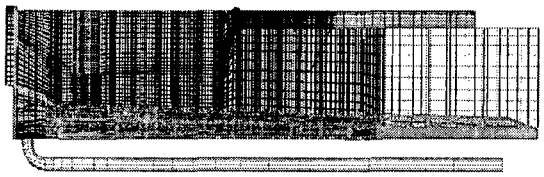
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

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

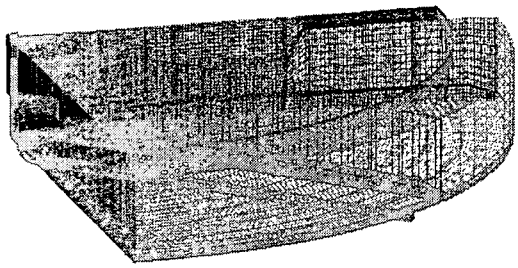
여기서, u_i는 속도벡터이고, ρ는 밀도(density), μ_e는 유효점성계수(effective viscosity)이며, p는 각각 정압을 나타낸다. 운동량 방정식의 유효점성계수를 계산하기 위해서 본 연구에서는 algebraic stress모델을 적용하였다.

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[7-10]

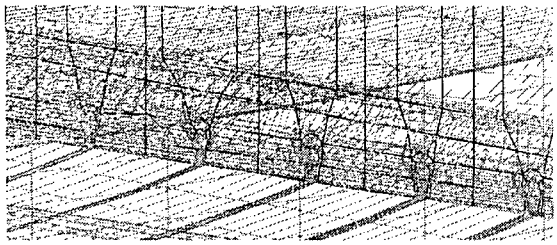
컴퓨터시뮬레이션에 적용된 흡입식 슬러지 수집기의 격자계는 Fig. 3과 같다. 흡입식 슬러지 수집기의 모형은 실측으로 동일하게 하고 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만 모델링 하였다. Fig. 3의 가운데서 24,000 ㎥/day의 유입량이 들어간 후 유동의 교란 및 단락류로 인한 슬러지의 부상을 막기 위하여 중심으로부터 2.285m에 피드웰(배플)이 설치되도록 하였다. 하루 동안 24,000㎥으로 유입된 유량은 Weir로 60%, 그리고 오리피스로 40%정도 반송되도록 설치되어 있다. 이때, 흡입식 슬러지 수집기에 들어가는 구동장치, 중앙지주, 센터케이지, 피드웰, 보조암, 매니폴드 등은 무시하였다. 또한, 본 연구에서는 헤더가 0.03~0.04rpm으로 회전을 하지만, 기초연구로서 헤더의 회전속도는 무시하였다.



(a) front view



(b) side view

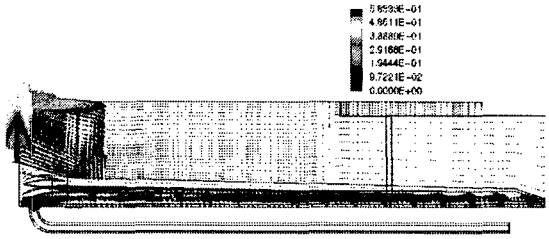


(c) detailed header section

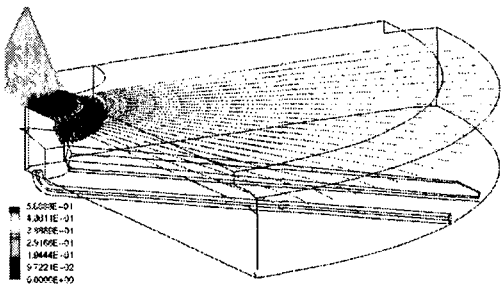
Fig. 3 Computational meshes of the suction sludge collector

4. 결과 및 검토

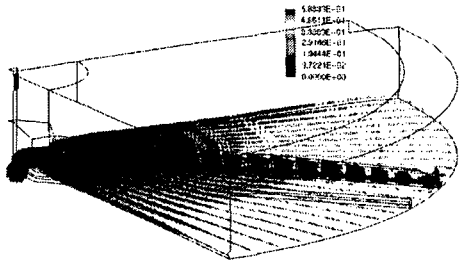
Fig. 4와 같이 흡입식 슬러지 수집기내 유동장을 여러 단면으로 나누어 살펴보았다. 슬러지 수집기 가운데에서 0.567m/s인 속도로 유입된 유동은 피드웰을 만나 아주 큰 재순환영역을 이루다가 헤더의 장착된 오리피스의 흡입으로 인하여 수집기 바닥으로 유동이 흘러가는 것을 Fig. 4 (a)에서 볼 수 있다. 이는 유입된 슬러지가 침전지 바닥 전체로 유출을 유도하기 때문에 최단거리로 방류되는 현상인 단락류 현상이 방지되는 것을 볼 수 있다. 이러한 유동현상은 슬러지가 포함된 유입량에서 적절하게 슬러지의 부상을 방지함을 증명하는 것이다. Fig. 4 (b)에서 보듯이 피드웰에서 1차적으로 속도가 큰 유동이 제거되고 피드웰을 지난 구간과 Weir사이에 속도는 전체적으로 안정된 약 0.1m/s의 속도를 가짐으로써 향상된 침전효과를 가짐을 알 수 있다. 또한, Fig. 4(c)처럼 튜브헤더의 길이 방향으로 설치된 오리피스를 통하여 슬러지 등이 원활하게



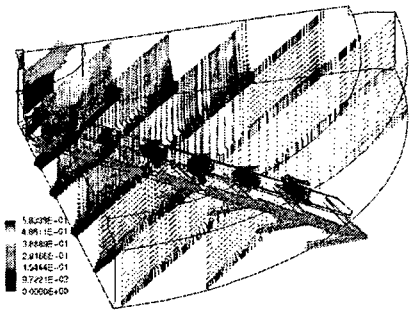
(a) front view



(b) side view1



(c) side view2 (near the orifice)



(d) side view

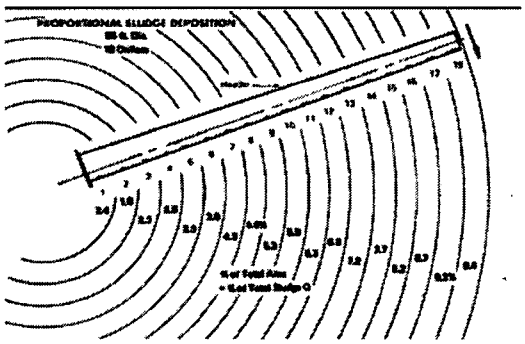
Fig. 4 Velocitiy vectors at the several sections in the suction sludge collector

흡입되고 있음을 알 수 있다. Fig. 4(d)에서 볼 수 있듯이 하루 동안 24,000m³으로 유입된 유량은 전체적으로 바닥의 오리피스를 통해 40% 반송되고, Weir를 통하여 60%의 유량이 빠져나게 된다. 그러나 오리피스 출구의 속도가 weir의 유출속도가 상대적으로 큰 이유는 단면적이 적기 때문이다.

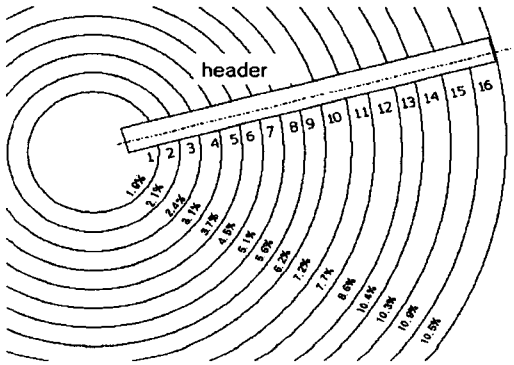
Fig. 4를 통해 전체적으로 유동장을 살펴 본 결과 흡입식 슬러지 수집기내 유동장은 슬러지의 부상(sludge rising)을 억제 시키고 있음을 알 수 있었다. 또한 헤더내에서 슬러지가 쌓이지 않도록 0.15m/s 이상의 유속이 유지되도록 설계를 하였는데, 이 결과를 확인하여 본 결과 0.18m/s이상이므로 예상 설계속도를 원활히 만족하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 유동장으로부터 슬러지가 침전지 단위면적당 균일하게 제거되며, 다양한 유량의 변화에서도 완전한 제거가 이루어짐을 알 수 있었다.

이런 현상을 엄밀히 살펴보기 위하여 Fig. 5와 같이 헤더의 오리피스를 통과하는 슬러지량의 백분율을 선진국의 "E"사의 자료와 비교하여 보았다. Fig. 5의 (a)는 "E"사의 자료이면서, 오리피스가 헤더에 18개가 설치된 경우이다. 그러나 Fig. 5(b)와 같이 본 연구의 대상인 흡입식 슬러지 수집기의 오리피스는 16개로 약간 상이한 점은 있으나 전반적으로 흡입되는 성능을 파악할 수 있다. 단, 주의할 점은 "E"사의 중심부근 오리피스(No.1)에서 흡입량이 2.4%로 No. 2의 오리피스(1.8%)보다 많은 양이 흡입됨을 알 수 있다. 이는 중심부근에서 슬러지의 중량 때문에 침전되는 양이 많기 때문에 오리피스의 면적을 크게 설정해준 영향이다. 이 점만 제외한다면 "E"사의 No. 2와 연구대상인 수집기의 No. 1번의 흡입량은 1.9%와 1.8%로 거의 유사하였으며, "E"사의 No. 18과 연구대상인 수집기의 No. 16과의 흡입량은 9.4%와 10.5로 전체적으로 두개의 data가 1% 이내의 오차범위에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 헤더의 길이와 상관없이 즉, 헤더의 길이에 따라 오리피스의 개수가 변경되지만 슬러지 수집기 끝부터 중심부근까지의 흡입량이 비슷하여야 한다.

이점을 좀 더 자세히 관찰하기 위하여 Fig. 6과 같이 누계 흡입량을 백분율로 나타내었다. Fig. 6에는 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. 또한 Fig. 6에는 "E"사의 실제 슬러지 흡입량을 백분율로 나타내었다.



(a) data of the "T" company (No of orifice : 18)



(b) calculated results (No of orifice : 16)

Fig. 5 Passed suction percentage rate through the orifices at header

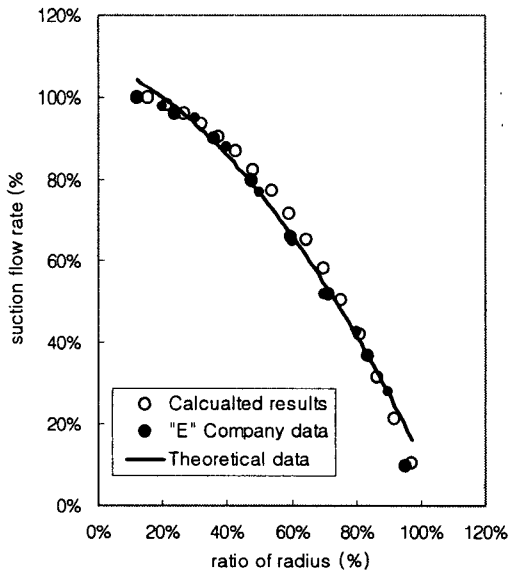


Fig. 6 Suction flow rates with the ratio of radius(%)
(○ : calculated results, ● : data of E company;
— : theoretical data)

Fig. 6에서 ○로 나타낸 계산 결과는 비교적 이론값은 물론 "E"사의 실제 슬러지 흡입량과 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 단 반지름의 비가 40%와 60%에서의 이론값보다 약간 크게 결정되었지만 그 오차는 미미함을 알 수 있다. 40%와 60%에서 발생된 오차는 Fig. 7에서 볼 수 있다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 계산된 오리피스 면적(No. 9, No. 10, No. 11)의 경향이 일정하지 못하면서 약간 불규칙하게 분포되고 있음을 알 수 있었다.

또한, Fig. 7은 튜브헤더의 오리피스가 흡입식 슬러지 수집기의 설계에 있어 가장 중요한 인자가 됨을 알 수 있다. 즉, 튜브헤더에서 오리피스에 위치에 따라 슬러지가 흡수되는 양이 2차곡선을 나타내려면 오리피스의 면적을 다음과 같이 정해주어야 함을 알 수 있다.

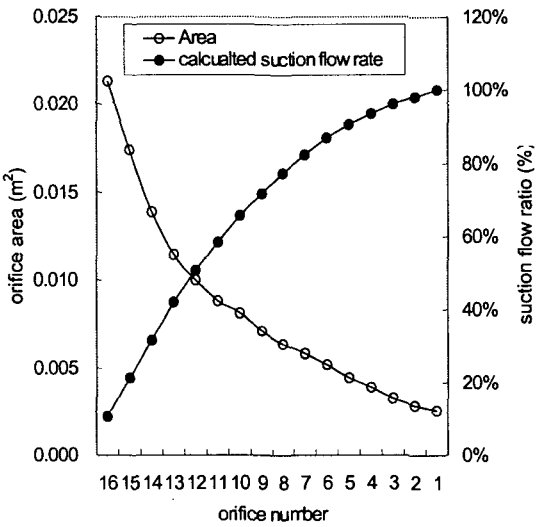


Fig. 7 Relationships between the orifice area and orifice number (○ : orifice area, ● : calculated suction flow rate)

5. 결 론

흡입식 슬러지 수집기의 성능해석을 평가하기 위하여 컴퓨터시뮬레이션을 수행한 결과, 전체적으로 흡입식 슬러지 수집기내 유동장의 형태를 보면 슬러지 수집기 가운데에서 0.567m/s인 속도로 유입된 유동은 피드웰을 만나 아주 큰 재순환영역을 이루다가 헤더의 장착된 오리피스의 흡입으로 인하여 수집기 바닥으로 유동이 흘러가 단락류 현상이 없음을 볼 수 있으며, 수집 헤더내에서는 0.18m/s 이상의 유속이 대체로 균일하게 유지되어 제거된 슬러지가 침강없이 배출됨을 알 수 있었다. 침전지 바닥 슬러지는 침전지 단위면적당 균일하게 제거되며, 다양한 유량의 변화에서도 완전한 제거가 이루어짐을 알 수 있었다. 또한 수집 헤더 상부에서는 비교적 느린 유속 분포를 나타내어 슬러지의 침전현상이 원활히 이루어져 고농축 슬러지를 배출시키는데 적합함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

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

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

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

(4) Water Polution Contral Federation, 1985, Clarifier Design, Manual of Practice FD No 8.

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

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

(7) 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.

(8) 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.

(9) 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.

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