

장방형 2차 침전지 유출부의 구조가 유동 및 성능에 미치는 영향에 대한 수치 해석적 연구

김영철[†] · 박무종* · 신동진**

한서대학교 환경공학과

*한서대학교 토목공학과

**한서대학교 항공기계공학과

Numerical Analysis of the Outlet Structure Effect on the Flow and Settling Performance of the Rectangular Clarifiers

Youngchul Kim[†] · Moo Jong Park* · Dong-Jin Sheen**

Department of Environmental Engineering, Hanseo University

*Department of Civil Engineering, Hanseo University

**Department of Aero Mechanics and Mechanical Engineering, Hanseo University

(Received 14 February 2006, Accepted 23 March 2006)

Abstract

Proper operation of clarifier partly depends on outlet conditions. Effluent has to be uniformly withdrawn to prevent scouring of settled sludge and carry over of settling sludge from the clarifier. In this paper, 3-D numerical model was employed to analyze the flow and settling performance of the rectangular clarifier. There were two simulation conditions of which in the same clarifier, the first one was assumed to have a 11.5 meter weir length and the second has 8.5 meters. Shape, location and placement of the weir structure were different, but both of those outlets meet weir loading design criteria. Simulation results indicate that clarifier with longer weir generally gave strong and unstable currents at the mid-stream where the weir starts while in the clarifier with short and relatively simple weir, uniform and stable flow was observed in most parts of the settling zone, and especially at the weir region. These flow conditions affected settling performance. Effluent SS concentration from clarifier equipped with the long and complicated placement of weir was 24.5 mg/L, but 7.0 mg/L from the clarifier having short weir length. From this study, it can be concluded that as reported from other studies, weir loading does not guarantee settling performance and 3-D numerical model can be a useful tool for determining and validating outlet structure.

keywords : Clarifier, Outlet, Settling, Sludge, Weir

1. 서론

슬러지를 생물 반응조 처리수와 분리함으로써 침전지 유출수에 포함된 미생물 부유물질(SS)을 최소로 생산하고자 하는 침강기능(clarification function) 이 2차 침전지의 설치 목적이다. 또한 2차 침전지는 침전 처리수와 분리되어 침전지 하부에서 농축된 슬러지를 반송과 폐기를 통해 미생물의 활성을 유지하고자하는 농축기능(thickening function)을 수행하며 하수처리장의 수처리와 슬러지 처리를 연결하는 중요한 단위공정이다(Dick et al., 1972). 이와 함께 2차 침전지는 일시적인 슬러지 침전성 악화나 수리학적 과부하 발생시 침전지내에 슬러지를 저장하는 기능(storage function)이 있다(Kim et al., 1996). 앞서 언급된 2차 침전지의 세 가지 기능 중 하나라도 실패하게 되면 유출수의 수질을

악화시킬 수 있다.

최근 고도처리가 시행되면서 생물 반응조에는 많은 새로운 공법 등이 적용되어 발전을 거듭하고 있다. 궁극적으로 2차 침전지의 기능과 역할이 원활하지 않게 되면 슬러지의 유출과 더불어 입자형태의 유기성 질소와 인, 그리고 BOD 등이 함께 유출되어 처리성능이 크게 저하된다.

2차 침전지 유출수의 SS 농도는 침전지의 크기와 형태나 구조에 관계없이 “zero SS”는 있을 수 없다. 그 이유는 2차 침전지는 침전성이 양호한 미생물을 중력에 의해 확보하고 개별 cell이나 침전성이 불량한 미생물은 자연스럽게 공정으로부터 유실되어 공정 내에 축적되는 일이 없도록 하는 기능을 수행하기 때문이다(Pipes, 1979). 따라서 설계 업무에 종사하는 실무자 입장에서 추가적인 후속시설 없이 1년 365일 하수처리장의 2차 침전지 유출수의 순간 SS 농도를 10 mg/L 이하로 보증하는 것은 무모한 일이다.

환경부 자료(2004)에 따르면 현재 운영되고 있는 처리장 231개소에서 당시 자료에 누락된 처리장 23개소를 제외하

[†] To whom correspondence should be addressed.

ykim@hanseo.ac.kr

고 208개 처리장 중 약 70여개소가 장방형(직사각형) 침전지 형태로 운영되고 있다. 우리나라의 경우에 초창기 2차 침전지는 원형 침전지가 주종을 이루었으나 최근에 설치되는 침전지의 경우 대부분 장방형 침전지로 설계되는 추세에 있다.

장방형 침전지는 생물 반응조 후단과 침전지 전단의 벽면을 공유하므로 비용이 절감된다(ASCE et al., 1992). 따라서 전체적인 부지활용 측면에서 소요부지면적이 원형 침전지와 비교하여 경제적이다. 또한 공동구를 활용하므로 원형 침전지와 같이 별도의 기계실이 필요 없고 동선이 비교적 짧은 것이 특징이다. 그러나 2차 침전지의 폭이 생물 반응조의 폭과 동일하게 되므로 침전지의 길이/폭 비, 길이/수심 비가 문제가 될 가능성이 매우 높다.

침전지는 기능에 따라 크게 유입부, 유효 침전부, 유출부, 슬러지 부로 분류된다. 침전지에서 유출부는 웨어가 설치되어 있는 부분을 의미하며 웨어부의 형상에 따라서 침전지 끝단의 플러를 교란시켜 침전효율을 저하시킬 수 있다. 따라서 이와 같은 문제를 방지하기 위해서는 웨어의 위치나 길이를 조절하여야 하며, 우리나라에서 건설된 대부분의 원형 침전지는 하수처리장 설계기준을 만족시킬 경우 구조적으로도 모든 수리조건을 만족시킨다(이 등, 2005). 그러나 장방형 침전지의 경우 유·출입부의 구조가 원형 침전지와 다르므로 웨어의 위치나 길이 등과 같은 유출부의 구조가 침전성능에 미치는 영향이 지배적일 수밖에 없다.

김 등(2005)은 침전지의 유동특성을 분석하기 위하여 x-y 수직평면에 대한 수리학적 모형을 적용하였으나, 2차원 모형은 침전지 벽면에서 발생하는 마찰력에 의한 영향을 고려하지 못할뿐 아니라 웨어의 형상을 전혀 고려하지 못하여 실제 유동과는 상이한 결과를 나타내는 문제점이 있다. 따라서, 복잡한 형태의 유출구조로 이루어진 침전지의 경우에는 3차원 수치해석모형을 이용한 흐름특성이 필요하다. 그러나, 3차원 모형은 방대한 입력자료와 장기간의 계산시간으로 인하여 국내외의 연구에서는 거의 적용되지 않은 실정이다.

본 연구에서는 장방형 침전지 유출부의 구조가 침전지 내부의 유동과 침전성능에 미치는 영향을 3차원 수치해석 모형을 통하여 평가하였다.

2. 수치해석방법

2.1. 모의대상 2차 침전지

모의대상 소규모 처리장의 설계조건은 Table 1과 같다. 처리방법은 재래식 활성슬러지 공법으로 포기조의 MLSS 농도는 3,500 mg/L, 반송유량은 일최대유량의 73%이다.

Table 2에는 모의대상 장방형 2차 침전지의 주요제원과 운전조건을 제시하였다.

2.2. 수치해석모형

2.2.1. 모형의 개요

유동분석을 위하여 3차원 유동모형인 Fluent 모형을 이용

Table 1. Design and operating conditions of the activated sludge processes

Parameters	Design values
Daily maximum flow rate(Q)	3,000 m ³ /day
Hourly maximum flow rate (Q _{max})	4,213 m ³ /day
Return sludge flow ratio (r)	73%
Waste sludge flow rate(Q _w)	44.2 m ³ /day
Design MLSS	3,500 mg/L
Design RAS	7,000 mg/L

Table 2. Design values of the activated sludge clarifiers

Parameters	Design values
Total length	18.0 m
Effective length	15.65 m
Width	4.0 m
Side water depth	4.0 m
Number of clarifier	2
Solid loading rate	105.2 kg/m ² -day
Overflow rate	20.3 m ³ /m ² -day
Hydraulic residence time	4.7 hours

하였다. Fluent는 미국에서 개발된 3차원 유동해석 모형으로 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)을 이용한 유체유동, 열전달해석용 범용코드으로써 환경, 화학 등의 분야와 자동차, 항공기, 선박 등의 분야에서 많이 사용되는 수치해석 프로그램이다.

수치모형은 모의 대상 침전지의 실제 도면을 CATIA V5의 Generative Shape Design을 이용하여 3차원으로 제작하였으며 격자는 이를 바탕으로 ICFM-CFD 사면체 격자 및 adaption 기법을 이용하여 구성하였다.

2.2.2. 모형의 기본방정식

Fluent에서 지원되는 난류모형은 Spalart-Allmaras 난류모델, $k-\epsilon$ 난류모델, $k-\omega$ 난류모델, RS(Reynolds Stress) 모델, 그리고 LES(Large Eddy simulation) 모델이 있다.

난류모형은 해석 모형의 물리적인 특성과 CPU 사용시간 및 비용 등을 고려하여 결정해야하는데, 본 논문에서는 유동의 속도 및 수치 모형의 형태 그리고 입자의 유동이라는 물리적인 특성을 고려하여 Navier-Stokes 방정식에 Standard $k-\epsilon$ 난류모형을 사용하였다.

가) Standard $k-\epsilon$ 난류모델

Standard $k-\epsilon$ 난류모델은 난류 에너지(k)와 이것의 점성 소산률(ϵ)을 기초로 하는 준경험적인 수송방정식으로 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] \quad (1)$$

$$+ G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

그리고

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

$$+ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon$$

여기서 G_k 는 평균속도구배에 의한 난류에너지이며, G_b 는 부력에 의한 난류에너지이다. Y_M 은 압축성 난류유동에서 정의되는 소산율로 다음과 같다.

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3)$$

식 (3)은 Boussinesq의 가정(Abott et al., 1990)으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (4)$$

여기서 S 는 평균압력 텐서로 다음과 같이 정의된다.

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (5)$$

또한 G_b 는 부력의해 발생하는 난류에너지로 다음과 같이 정의된다.

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (6)$$

여기서 Pr_t 는 난류 Prandtl수이고 g_i 는 i 방향의 중력 벡터이다. Standard $k-\epsilon$ 난류모델에서 Pr_t 는 0.85의 값을 가지며 β 는 다음 식으로 정의된다.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (7)$$

$C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ 는 상수이며, σ_k 와 σ_ϵ 은 k 와 ϵ 을 위한 Prandtl 수이고 난류점성인 viscosity인 μ_t 는 다음 식으로 정의된다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

여기서 C_μ 는 상수이다. 앞서 기술되는 모든 상수의 값은 Launder 등(1972)에 의해 정의되며 일반적으로 물과 공기에 대한 실험에 의해 결정된다. Launder 등(1972)의 연구에서는 $C_{1\epsilon}=1.44$, $C_{2\epsilon}=1.92$, $C_\mu=0.09$ 의 값을 제안하였다. 또한, Launder 등(1972)의 연구결과에 따라 k 와 ϵ 을 위한 Prandtl수인 σ_k 와 σ_ϵ 는 각각 1.0과 1.3을 적용하였다.

$C_{3\epsilon}$ 는 Henkes 등(1991)에 의해 다음 식으로 정의된다.

$$C_{3\epsilon} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right| \quad (9)$$

여기서 v 는 중력벡터에 평행한 흐름속도 벡터이고 u 는 중력벡터에 수직인 흐름속도 벡터이다.

나) 이산상형 모델(discrete phase model)

이론적으로 이상적인 독립입자의 침전에서 입자의 제거 여부는 전적으로 표면 부하율(overflow rate)에 의해서 결정된다. 이것은 제공되는 침전지의 수표면적에 따라서 침전 제거되는 입자의 분포와 침전지의 거리에 따른 침전입자의 분포가 결정된다는 것을 의미한다.

독립입자의 침전이론을 그대로 적용할 수는 없지만 침전지 하부에서 일어나는 농축관점에서 지역침전이 일어나는 것으로 보는 2차 침전지에서도 지내 침전수와 포기조나 생물 반응조에서 유입된 슬러지 수류가 희석되어 침전지 수심별로 독립, 지역, 응결침전 현상이 일어난다. 따라서 2차 침전지의 설계에서 표면 부하율이 가장 중요한 설계인자의 하나로 설계에 이용되고 있는 것이다(Metcalf et al., 2003).

슬러지 벌킹 등 비정상적인 슬러지 상황에서는 많은 연구자에 의해 제안된 다양한 동형분산, 이형분산 침전모델을 검토하여 적합한 모델을 적용하는 것이 타당하겠지만 (Mazzolani et al., 1998), 대부분의 경우 수리유동현상이 침전지의 성능을 결정한다. 유입되는 슬러지는 이산상형 모델(discrete settling model)을 사용하여 모사하였는데 슬러지 플럭은 구형입자로 입구유속과 동일한 속도로 유입되는 것으로 가정하고 해석하였다.

Fluent에서 사용되는 이산상 궤적에 대한 계산은 Lagrangian 수식화 과정을 적용하여 입자의 관성력, 유체역학적 항력 그리고 중력에 대한 영향을 steady와 unsteady에 대하여 계산할 수 있다. 또한 turbulent eddy에 의한 입자가 산란되는 정도를 관찰할 수 있다.

특히 난류유동에서 입자유동의 경우 확률모형(stochastic tracking model)을 이용하여 예측하며, 입자유동에서는 입자에 작용되는 힘과 관성력에 대한 평형방정식을 사용한다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (10)$$

여기서, 아래첨자 x 는 직교좌표의 방향을 나타내며, $F_D(u - u_p)$ 는 단위 입자질량당 항력이다.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (11)$$

여기서, u 는 유체의 속도 u_p 는 입자의 속도이다. 또한 μ 는 유체의 점성, ρ 는 유체의 밀도, ρ_p 는 입자의 밀도 그리고 d_p 는 입자의 직경이며, Re 는 Reynolds number이고 이는 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{\rho d_p^2 |u_p - u|}{\mu} \quad (12)$$

또한 항력계수 C_D 는 다음과 같이 정의된다.

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + b_1 Re^{b_2}) + \frac{b_3 Re}{b_4 + Re} \quad (13)$$

여기서 각 계수는 Haider 등(1989)에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581\Phi + 2.4486\Phi^2)$$

$$b_2 = 0.0964 + 0.5565\Phi$$

$$b_3 = \exp(4.905 - 13.8944\Phi + 18.4222\Phi^2 - 10.2599\Phi^3)$$

$$b_4 = \exp(1.4681 + 12.2584\Phi - 20.7322\Phi^2 + 15.8855\Phi^3)$$

여기서, $\Phi = \frac{s}{S}$ 이며, s 는 입자를 구로 보았을 경우 표면적이고 S 는 실제 입자의 표면적이다. 중력에 대한 영향을 고려할 경우 식(9)의 F_x 항에 중력항을 포함시키면 되며, 만일 가상의 질량에 의한 힘을 고려할 경우에는 F_x 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_x = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt} (u - u_p) \quad (14)$$

난류흐름을 고려할 경우는 식 (1)의 속도항에 평균유속 (\bar{u})을 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$u = \bar{u} + u' \quad (15)$$

특히 난류흐름의 경우 확률모형을 사용하는데 이때 사용되는 시간 적분식은 다음과 같다.

$$T = \int_0^\infty \frac{u'(t)u_p'(t+s)}{u_p'^2} ds \quad (16)$$

시간 적분은 입자산란율에 비례하며, 입자의 산란율은 $\frac{u_i' u_j'}{T}$ 에 의해 결정된다. 만일 유체를 따라 부유되는 경우 시간적분은 T_L 로 정의할 수 있다.

$$T_L = C_L \frac{k}{\epsilon} \quad (17)$$

식 (17)에서 C_L 값의 결정이 아주 어렵기 때문에 $k-\epsilon$ 난류모델의 경우 다음과 같은 근사식을 사용한다.

$$T_L \approx 0.30 \frac{k}{\epsilon} \quad (18)$$

또한 이산 Random Walk Model(eddy lift time Model이라고 하기도 함)을 사용하는데, 입자간의 분산에 영향을 미치는 난류점성은 다음과 같은 특성에 의해 결정된다.

- 가우스 분포를 갖는 속도 변동량 : u', v' 그리고 w'

- time scale : τ_e

여기서, u', v', w' 는 각각 Gaussian 확률분포에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$u' = \zeta \sqrt{u'^2} \quad (19)$$

여기서 ζ 는 정규난수이다. 만일 $k-\epsilon$ 난류모형을 사용할 경우는 다음과 같은 값을 가진다.

$$\sqrt{u'^2} = \sqrt{v'^2} = \sqrt{w'^2} = \sqrt{2k/3} \quad (20)$$

또한 시간비 τ_e 는 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_e = 2T_L \quad (21)$$

$$\tau_e = -T_L \log(r) \quad (22)$$

여기서 r 은 표준정규 난수로 0과 1사이의 값이다. 또한 입자의 와점성 이동시간은 다음과 같이 정의된다.

$$t_{cross} = -\tau \ln \left[1 - \left(\frac{L_e}{\tau |u - u_p|} \right) \right] \quad (23)$$

여기서, τ 는 입자의 이동시간, L_e 는 와점성 길이 비이다.

다) 플럭의 입도분포

입자의 분포는 침전성이 양호한 슬러지(SVI=120 mL/g)에 대해 수행된 침전관 시험결과를 통하여 얻었다(Fig. 1). 적용된 플럭의 입경범위는 Fig. 1에 나타난 것처럼 0.10~0.65 mm(100~600 μ m)이었다. 수온은 우리나라 동절기 하수처리장 평균 유출수 수온인 8°C를 기준으로 하였으며, 유체밀도는 슬러지 농도와 수온으로부터 경험적(McCorquodale et al., 1993)으로 계산하였다.

2.3. 대안의 설정

유출부의 구조는 슬러지 스크레이퍼 설치에 문제를 일으키지 않아야 한다. 대안의 설정은 먼저 요구되는 웨어의 길이를 산출한 후 결정하였다. 장방형 침전지에서 웨어의 길이는 아래의 조건을 만족시키는 폭 B의 n배의 길이로 결정된다(정 등, 2001).

$$Q/nB < 5H_{s0} \quad (24)$$

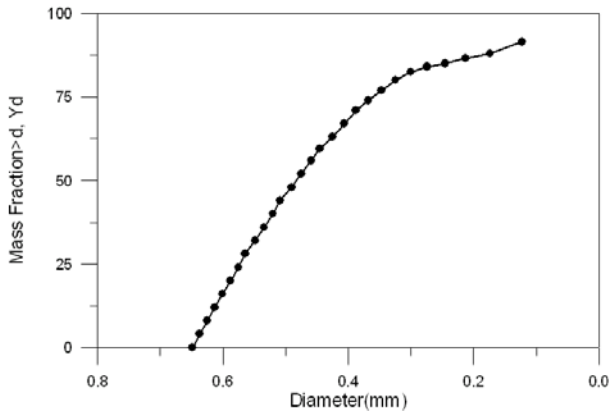
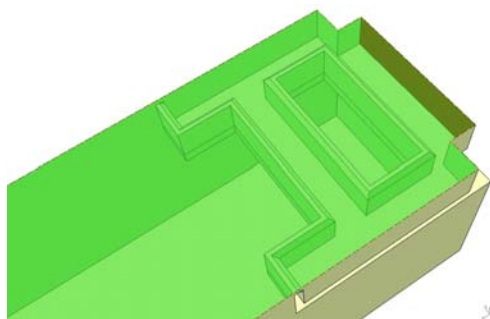
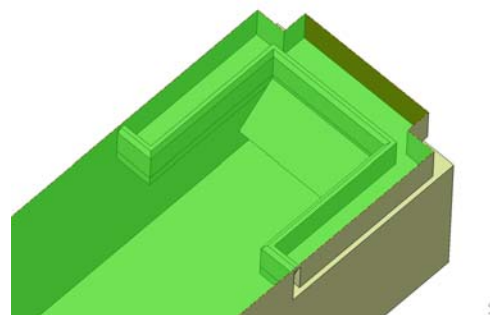


Fig. 1. Cumulative floc size distribution.

침전지 1지에 유입되는 시간최대 유량(Q) 0.025 m³/sec, 표면 부하율 s₀ = 0.0004 m/sec, 침전지 1지의 폭 B = 4 m, 수심 H = 2.0 m(4 m 수심 중 슬러지 블랑킷 깊이를 제외한 유효수심 2 m)로 보면 n = 1.85가 된다. 웨어길이는 침전지 폭 B의 약 2배 이상이 제공되어야 한다. 웨어의 설치위치와 앞서 산출한 웨어길이를 고려하여 Fig. 2에 나타난 것처럼 2가지의 대안을 설정하였다. 첫 번째 대안은 ㄷ자와 ㄱ자 형(총 웨어길이 11.5 m)으로 배치하였고 두 번째 대안은 벽체에 잇대어 ㄷ자형(총 웨어길이 8.3 m)으로 배치하였다. 침전지 유입부의 구조는 유공 정류벽으로 Fig. 3과 4에 나타내었다.



Option I weir length = 11.5 m



Option II weir length = 8.3 m

Fig. 2. Outlet structure hypothesized for simulation.

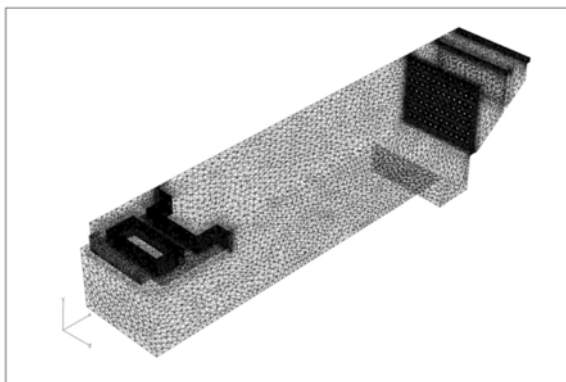


Fig. 3. Number of cells, faces and nodes for the outlet structure option I.

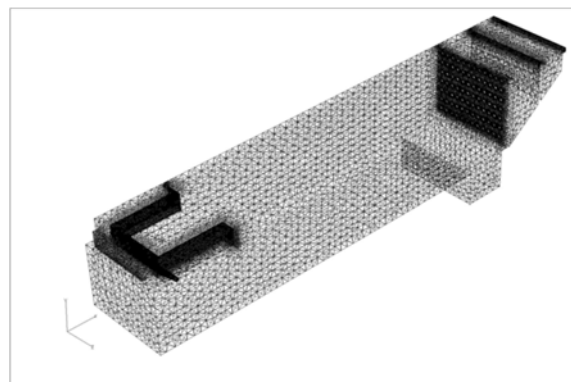


Fig. 4. Number of cells, faces and nodes for outlet structure option II.

2.4. 계산격자의 구성

계산을 위한 격자는 2개의 대안을 고려하여 2가지로 구분하였으며, 각각의 cell과 face, 그리고 node의 개수는 Table 3과 같다. Face의 개수는 대안 I, 대안 II가 각각 2,449,903개와 2,334,992개로 대안 I의 유출부 구조가 다소 복잡하나 대안 II에서는 Stamford baffle 설치에 의해 계산 격자의 개수는 거의 유사하다.

Table 3. Number of Cells, Faces and Nodes

option	Class	Cells	Faces	Nodes
option I	Number	1,192,987	2,449,903	233,981
	Class			
option II	Number	1,139,528	2,334,922	221,355
	Class			

2.5. 경계조건

수치모형을 적용하기 위하여 다음과 같은 경계조건을 부여하였다. 유입되는 부분에서 경계조건은 유입유량(유량 = 0.017 m³/sec)을, 침전 처리수가 유출되는 부분의 경계조건은 일정수심을 적용하였다. 또한 침전지 흐름의 유동특성을 고려하여 입자의 유동현상에 해석의 주안점이 있는 만큼 공기와 접촉하는 수면의 경계조건을 대칭으로 정의하여 이상유동(two phase flow)해석을 피하여 연산의 속도를 증가시켰다.

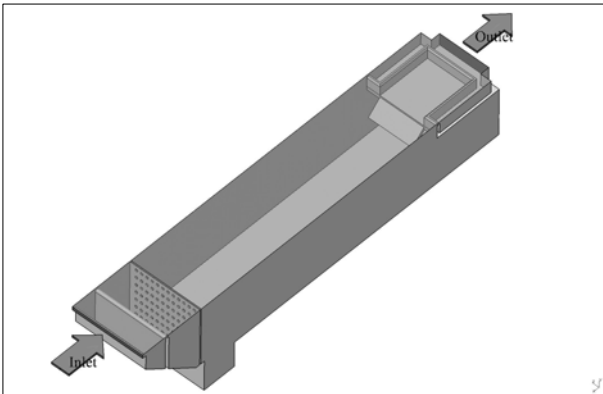


Fig. 5. Boundary condition.

3. 수치해석 결과 및 고찰

3차원 수치모형에 의한 해석결과는 매우 복잡한 형태를 나타낸다. 즉, 모든 node에서의 유동특성이 계산되므로, 결과를 도시하기 위해 침전지의 흐름방향을 기준으로 3개의 면으로 분할하여 결과를 도시하였다. 즉, 침전지의 중앙부, 중앙(폭 4 m 침전지의 center)으로부터 각각 0.7 m(측벽으로부터 1.3 m 떨어진 지점)과 1.7 m 떨어진 지점(측벽으로부터 0.3 m 떨어진 지점)에 대한 유동특성을 도시하였다 (Fig. 6 참고). 또한 웨어 유출부에 대한 상세 유동, 흐름방향 유속 분포를 함께 제시하였다.

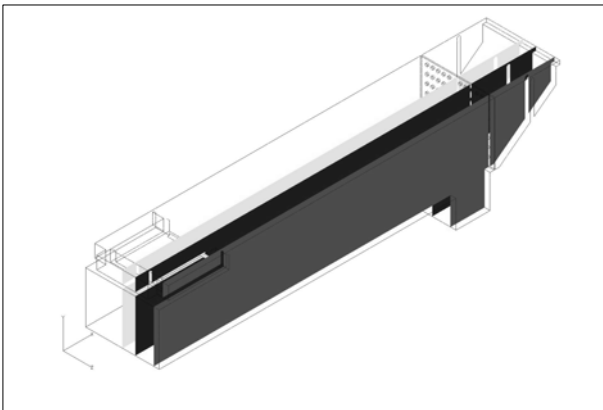


Fig. 6. Velocity position.

3.1. 대안 I과 같은 유출부 구조를 갖는 경우

대안 I의 조건에서 유동의 속도벡터를 분석한 결과 지내 최대유속은 0.046 m/sec, 침전지에서 흐름방향 유속은 약 0.012~0.07 m/sec 나타났다. 이러한 결과는, 시간최대 유량(Q) 0.025 m³/sec이고 흐름방향으로의 침전지 체원이 가로길이가 세로길이가 각각 4 m인 경우 연속방정식을 이용하여 추정된 유속 0.0015 m/sec와 비교하면, 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 이러한, 차이는 연속방정식에 의한 유량은 평균유속과 단면적을 곱하여 산정되어 흐름방향의 단면적은 동일하더라도 단면의 형상과 흐름의 방향이 변화하는 효과를 고려하지 못하는데 기인한다. 결과적으로 침전지의 유효길이 15.65 m에서 침전이 발생하는 것으로 계산되

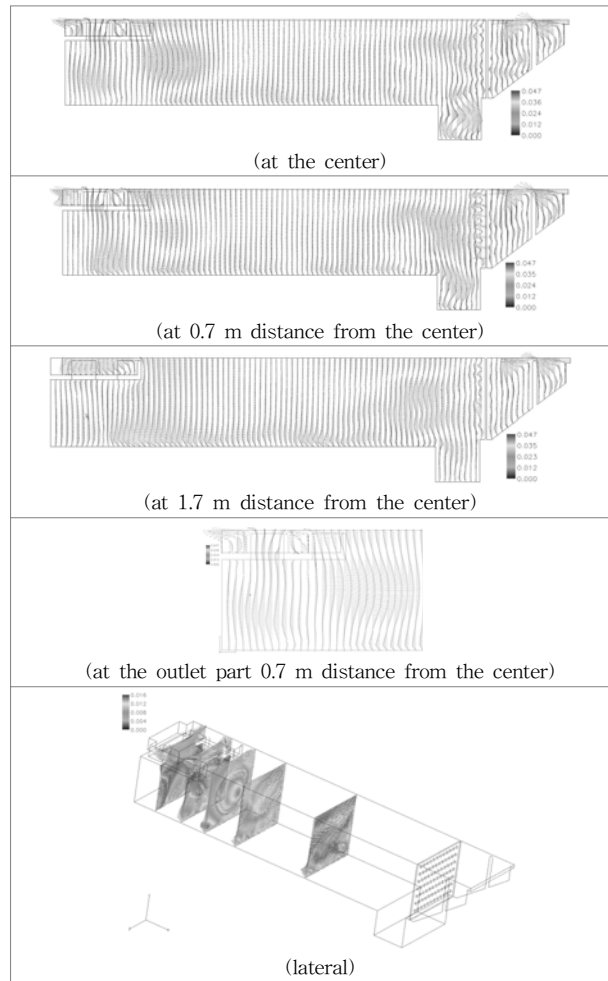


Fig. 7. Velocity vector fields for the outlet structure option I.

더라도 유입부에서의 난류와 유출부 웨어에서의 흐름단면 변화에 따른 영향이 고려되지 않았기 때문이다. 대안 I과 같은 유출부 단면이 설치된 경우 침전지의 중앙부, 중앙부에서 0.7 m 지점과 중앙부에서 1.7 m 떨어진 지점에서의 유속벡터는 Fig. 7과 같다. 즉, 중앙부는 유출부의 형상이 □+⊕ 자형태로 흐름방향의 중앙부에서는 웨어를 월류하는 흐름의 영향으로 인하여 바다 2-3 m 구간에서 강한 역류 흐름이 발생하고 있다. 이러한 역류흐름은 주변 유동에 영향을 미치게 되며, 중앙부에서 0.7 m 지점에서는 웨어하단에서 유속이 증가하는 형태를 보이고 있다. 즉, 웨어의 길이를 11.5 m를 확보하기 위해 □+⊕ 자형태로 설치된 결과는 인해 기대했던 효과와는 반대로 웨어부분 중 □자 형태 웨어의 영향으로 인하여 침전지내 유동이 중앙부에서는 흐름반대방향의 유동이 발생하고 침전지 벽부분에서는 반대방향 유동의 마찰력에 의한 2차흐름이 발생하고 있다. 이러한 유동특성은 침전지에서 발생될 것으로 예상한 슬러지의 침전특성에 영향을 미쳐 결과적으로 침전된 슬러지의 재부상이 예상된다.

이러한, 특성은 Fig. 8의 침전지내 플럭 입자의 이동궤적을 통하여 설명될 수 있다. 일반적으로 침전지에서 입자의 이동 궤적은 정확히 유체의 유동을 반영한다. Fig. 8은 플

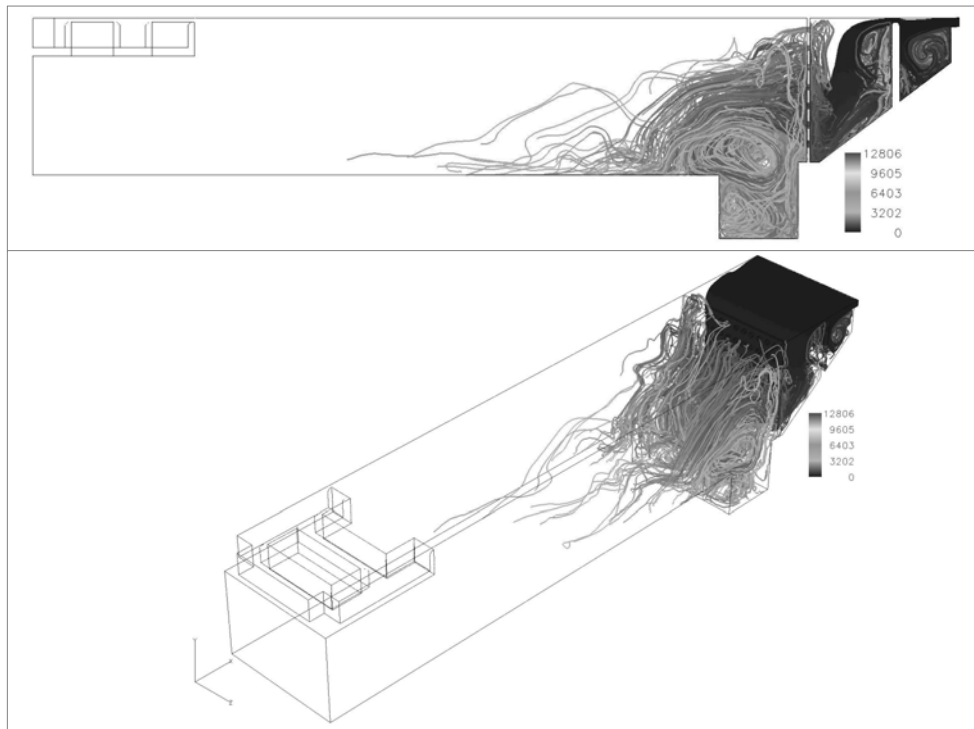


Fig. 8. Settling trajectories of the floc particles for the outlet structure option I.

력주입 후 3.5시간 동안의 이동 궤적을 나타낸다. 이론상 체류시간은 4.7시간으로 이는 침전지에 유입된 플럭은 유동을 따라 흐름방향으로 연행을 하면서 침강속도에 의해 침전을 하게 됨을 의미한다. 대안 I의 경우 복잡한 유출부 형태의 영향으로 인하여 침전지 중앙부분에서의 역방향 흐름과 이에 대한 2차 흐름이 발생함에 따라 플럭의 이동경로가 상대적으로 진행되지 못하고 있는 형태를 나타내고 있다. 이는 결국 침전지의 유효공간이 설계에서 계획한 것보다 훨씬 작게 이용되고 있음을 나타낸다. 이에 따라서, 이론상 체류시간 4.7시간을 초과한 이후 유출부의 농도는 24.5 mg/L 로 산정되었다.

대안 I은 웨어의 형상이 복잡하고 웨어가 차지하는 면적이 넓을 뿐만 아니라 웨어의 중앙 부분에 위치하는 □자형 유출부로 상대적으로 빠른 유속의 침전처리수가 유출되어 유동이 상부방향으로 상승하고 이로 인해 복잡한 유동분포를 나타낸 것으로 판단된다. 그러므로, □+□ 자형태의 웨어는 침전효율이 낮은 것으로 판단된다.

3.2. 대안 II와 같은 유출부 구조를 갖는 경우

대안 II에 대한 수치해석 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 침전지의 중앙에서 비교적 안정된 유동을 보이고 있으며 밀도류 유동도 거의 나타나지 않고 있다. 침전지 유입부에서부터 균일한 유속벡터 분포를 나타내고 있다.

중앙에서 0.7 m 떨어진 지점 침전지 유효 침전부 전체 영역에서 안정된 유동을 보이고 있다. 중앙에서 1.7 m 떨어진 지점에서는 유효 침전부 초반에 강한 밀도류 양상을 보이나 중간부에서 유출 웨어부로 방향전환하면서 안정되고 균일한 유속벡터 분포를 나타내고 있다.

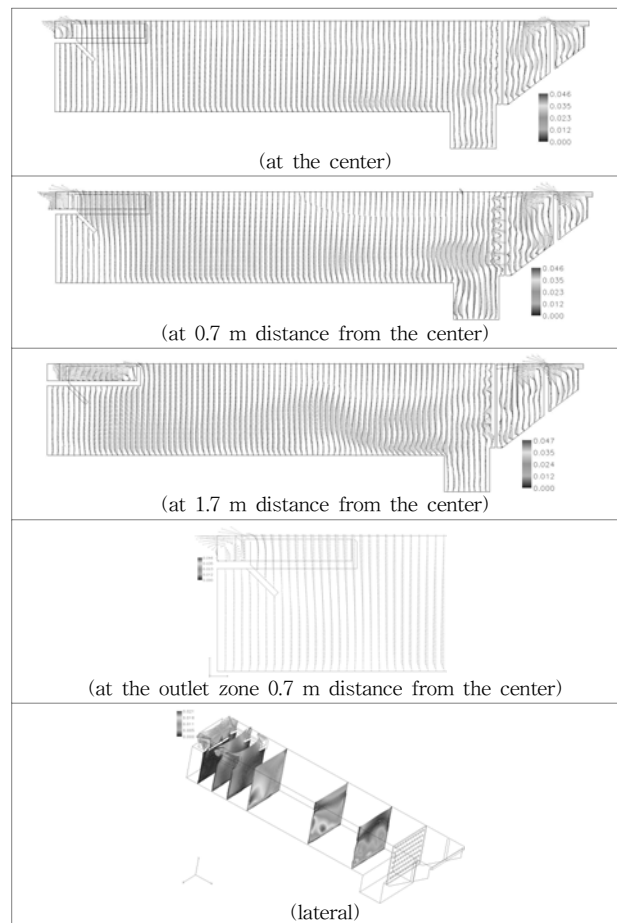


Fig. 9. Velocity vector fields for the outlet structure option II.

흐름방향 유속분포는 유효침전부의 일부영역에서 약한

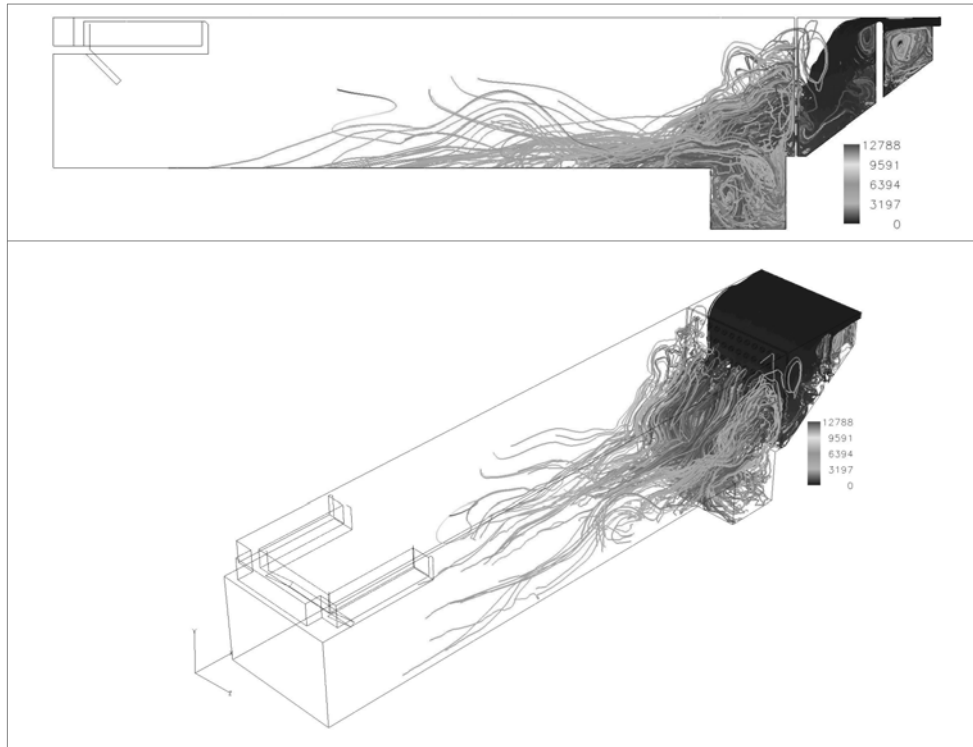


Fig. 10. Settling trajectory of the floc particle for the outlet structure option II.

유동을 보이고 있으나 웨어 유출부에서 흐름은 안정된 유동을 보이고 있다.

침전지 유입부 반대편 쪽에 밀도류 차단을 위해 설치한 Stamford baffle은 벽체에 부딪친 밀도수류를 효과적으로 차단하여 침전지 말단 반대쪽 바닥방향으로 유도하고 있음을 보여주고 있다. ㄷ 자형 유출부 구조는 지내 전체에서 유동을 안정화시키고 이로 인하여 안정적인 흐름을 나타낸 것으로 사료된다. 그러나 침전지내 유속분포는 대안 I 보다 안정적인 형태를 보인다.

수치모형에 의한 결과 대안 II의 경우 대안 I 보다 짧은 웨어의 길이를 확보하였음에도 불구하고 침전지의 성능은 훨씬 뛰어난 것으로 판단된다.

Fig. 10은 침전지내에서 플러립자의 침전궤적을 나타낸 것으로, 침전지 바닥에 효율적으로 포착되고 있다. 즉, 비교적 단순한 ㄷ 자형 침전지(대안 II)내의 흐름은 정류벽을 통과한 후 전단면에 걸친 안정적인 흐름이 유출웨어까지 유지되어 침전지내 난류에 의한 2차 흐름도 거의 발생하지 않는 것으로 평가된다. 또한, 유출부의 농도는 7.0 mg/L 로 산정되었으며, 대안 I에 비하여 안정적인 유동과 stamford baffle에 의한 재부상 방제효과에 의한 것으로 판단된다.

3.3. 유출부의 구조에 관한 고찰

원형 침전지의 경우 웨어가 원주에 위치하므로 웨어길이 확보에 고민할 필요가 없다. 그러나 장방형 수평류 침전지에서 주의해야 될 점은 유효 침전부는 침전지의 전체면적에서 유입부와 유출부를 제외한 부분이라는 점이다.

유출부의 시작점은 첫 번째 유출웨어가 있는 지점으로부터 침전지 깊이에 해당되는 길이만큼 앞선 지점이란 사실

이다. 따라서 웨어 부하율을 낮게 유지하고자 웨어의 길이를 늘리는 것은 그 만큼 유효침전부의 면적을 잠식하여 침전 성능에 영향을 미치게 된다.

2차 침전지에서 유출웨어의 기능은 침전지 내부에서 지역적인 고속류 흐름과 단회로를 방지하고 침전수를 균일하게 배출하는데 있다. 미국에서 하수처리장 관련 업무를 수행하는 많은 엔지니어와 설계종사자들이 공통적으로 내린 결론은 높은 월류 부하율과 침전 성능은 무관하다는 것이며 많은 장방형 침전지의 웨어가 침전지 유입부 끝단에 단순한 광폭웨어의 형태로 설치되고 있다(ASCE et al., 1992).

우리나라 하수도시설기준(2005)에 따르면 2차 침전지 웨어 월류 부하율을 190 m³/m·일 이하로만 규정하고 있어 설계자의 입장에서 보면 웨어 길이를 가급적 많이 확보하여 월류 부하율을 낮추는 것이 성능을 보장해줄 수 있다는 오해를 주기 쉽다. 이것은 비단 우리나라 뿐만 아니라 미국에서도 마찬가지이다. 본 연구에서 보여준 3차원 유동 해석 사례에서 보여주는 것처럼 웨어 길이가 증가하게 되면 유동이 복잡해져 오히려 성능을 떨어뜨리는 결과를 초래한다.

4. 결론

3차원 유동모형인 Fluent를 이용하여 침전지내에서의 수리특성을 분석하였다. 이론적인 침전지내 유속과 부하량은 유동이 1차원적이고 비점성적인 특징을 가지고 있는 것으로 가정된 결과이며, 실제 다공 유입부와 웨어를 통한 유출부에서는 3차원적인 흐름특성을 나타내므로 정밀한 해석을 위해서는 3차원 유동해석이 반드시 필요하다고 할 수 있다.

최근 연구에서 적용된 2차원 모형은 횡방향 평균(lateral average)된 특성으로 침전부의 평면적인 특성에 의해 상방향 흐름이 발생하는 경우에는 연직방향으로의 흐름특성을 파악하지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서 적용된 3차원 유동해석 결과는 유출부의 기하학적인 특징과 baffle에 의한 연직방향의 유동해석이 가능하였다. 유동해석 결과는 기본적으로 Hazen 이론 결과와 유사하나, 침전지내에서의 유동특성을 3차원으로 정밀한 결과를 나타내었다.

일반적으로 대안 I과 같이 □+□ 자형 웨어를 설치하여 유출웨어의 길이가 길면, 출구부에서의 유속이 작아져 침전지내의 유동이 2차류의 발생을 억제할 수 있다고 하나, 3차원 유동모형을 적용한 결과 오히려 복잡한 수리적인 특성에 의해 대안 II와 같은 □ 자형 웨어가 훨씬 효율적인 침전성능을 나타내었다.

사 사

본 연구(보고서)는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연C03-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참고문헌

김혜숙, 신미수, 장동순, 정성희, 강동효. 유입구 정류벽 최적설계에 의한 최종 침전지 성능 개선 연구, *대한환경공학회 논문집*, pp. 177-183 (2005).
이진우, 김영철, 2차 침전지의 효율개선 및 개량방안, *대한토목학회지*, **53**(8), pp. 88-94 (2005).
정남정, 정형기, 침전 및 부상 - 수리학적 계산을 중심으로, 한국수자원공사 수도건설처 기술자료 (2001).

환경부, 전국하수종말처리장 실태조사자료 (2004).
Abbott, M. B. and Basco, D. R., *Computational Fluid Dynamics*, John Wiley, New York, USA(1990).
ASCE and WEF Manual, *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*, ASCE, New York, NY (1992).
Dick, R. I. and Young, K. W., *Analysis of Thickening Performance of Final Settling Tanks*, *Proc. 27th Ind. Waste. Conf., Purdue University*, Indiana, Ann Arbor Science Lab., Ann Arbor, MI. pp. 33-54 (1972).
Haider, A. and Levenspiel, O., *Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles*, *Powder Technology*, pp. 63-70 (1989).
Henkes, R. A. W. M., Flugt, F. F. van der, and Hoogendoorn, C. J., *Natural Convection Flow in a Square Cavity Calculated with Low-Reynolds-Number Turbulence Models*, *International Journal of Heat Mass Transfer*, **34**, pp. 1543-1557 (1991).
Kim, Y. and Pipes, W. O., *Solid Routing in an Activated Sludge Process during Hydraulic Overloads*, *Water Sci. Technol.*, **34**(3), pp. 9-16 (1996).
Lauder, B. E. and Spalding, D. B., *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England (1972).
Mazzolani, G., Pirozzi, F. and d'Antoni, G., *A Generalized Settling Approach in the Numerical Modeling of Sedimentation Tanks*, *Water Sci. Technol.*, **38**(3), pp. 95-102 (1998).
McCorquodale, J. A. and Zhou, S., *Effect of Hydraulic and Solid Loading on Clarifier Performance*, *J. Hydraulic Research*, **31**(4), pp. 461-478 (1993).
Metcalf & Eddy, *Waterwater Engineering Treatment, Disposal, and Reuse*, 4th Edition, McGraw-Hill, p. 834 (2003).
Pipes, W. O., *Bulking, Deflocculation and Pin-point Flocculation*, *Journal WPCF.*, **51**, p. 62 (1979).