

입자추적기법을 이용한 침전지의 효율 평가

Estimation of Settling Efficiency in Sedimentation Basin Using Particle Tracking Method

이길성* / 김상훈**

Lee, Kil Seong / Kim, Sang Hoon

Abstract

Sedimentation basin plays an important role in urban water treatment, and there are many complicated phenomena which need to be understood for efficient design and control of it. Especially, the study on the improvement of settling efficiency is required.

In this study, commercial CFD (Computational Fluid Dynamics) program, FLUENT, and particle tracking method were used to simulate the flow in sedimentation basin, and to predict the settling efficiency. Computational domain of real scale was made, and detail factors such as porous wall, and outlet trough were considered instead of being simplified. The simulation results were compared with the experimental data to calibrate the parameters of particle tracking method.

Sensitivity analysis showed that the particle diameter had more significant effects on settling efficiency than the particle density. The computation results gave the best agreements with the experimental data, when the value of particle diameter was 26.5 μm .

Keywords : Sedimentation Basin, CFD, FLUENT, Settling Efficiency, Particle Tracking Method

요 지

침전지는 수처리 공정에서 중요한 조작 중 하나이며, 침전지내에서는 응집과 침전이 일어남에 따라 입자의 크기 분포가 변하는 복잡한 현상이 발생한다. 따라서 침전지의 효율적인 설계나 운영을 위해서는 이러한 현상에 대해 이해해야만 하며, 침전효율의 극대화를 위한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 침전지내의 흐름을 모의하기 위하여 범용 CFD 프로그램인 FLUENT를 이용하였으며, 침전효율을 평가하기 위하여 FLUENT에서 제공되는 입자추적기법을 사용하였다. 또한 침전지의 형상을 지나치게 단순화시키는 기존의 연구와는 달리 본 연구에서는 실제 현장에서 사용되는 규모와 침전지내 인자들 (유입부 정류벽, 유출부 트랩프 등)이 수치모의에 최대한 반영되었으며, 현장실험의 결과를 바탕으로 민감도 분석을 수행해 수치모의에 사용되는 매개변수들을 보정하였다.

민감도 분석 결과 입자의 직경이 입자의 밀도에 비해서 민감도가 큰 것으로 나타났고, 침전효율이 실험결과와 가장 잘 일치할 때의 직경값을 결정해본 결과 입자의 직경값이 26.5 μm 로 나타났다.

핵심용어 : 침전지, CFD, FLUENT, 침전효율, 입자추적기법

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 02-880-7351
(E-mail : kilselee@snu.ac.kr)

** 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정, 02-880-8344,
(E-mail : ktsh77@hotmail.com)

1. 서 론

침전공정은 중력의 힘을 이용하여 고체와 액체를 분리하는 오래되고 간단한 수처리 방법이다. 그러나 침전지는 유입부와 정류벽, 유출부 등 다양한 구조물(세부인자)로 이루어져 있어서 국부적인 난류와 단락류, 사수부의 발생 등 복잡한 흐름 특성을 보이며, 각각의 세부인자의 형상에 의해 침전지 전체의 흐름 및 침전효율이 크게 좌우되는 것으로 알려져 있다 (Kreb 등 1996). 특히 침전지 내에서는 계속하여 물이 흐르는 동시에 입자들끼리 응집과 침전이 일어나면서 입자의 크기분포가 시간에 따라 변화하는 복잡한 현상이 발생하기 때문에, 침전지내 흐름의 해석을 위해서는 수리동역학과 입자의 거동을 동시에 연구하는 것이 반드시 필요하다.

침전지 내의 흐름양상에 대한 수치모의는, 1981년 Schamber와 Larock (1981)이 정류벽 등이 없는 간단한 사각형 침전지에서의 밀도차가 없는 유체의 흐름을 Galerkin 유한요소법을 사용하여 해석한 이래로 침전지의 성능 향상을 도모하기 위한 많은 연구가 이루어졌다. Imam 등 (1983)은 유한차분법을 통해 침전지내의 유속장을 계산하였으나, 일정한 와 확산능(Eddy diffusivity)를 가정하였거나 진보된 난류모형인 $k-\epsilon$ 모형 등을 사용한 경우에는 프로그램 검증과정이 제시되지 않았다. Abdel-Gawad 와 McCorquodale (1984)은 연속방정식과 운동량방정식의 편미분방정식을 상미분방정식으로 바꾸어 계산하는 Strip Integral Method를 제안하였다. 하지만 침전지에서의 흐름을 단락류 (Short-Circuiting)나 계순환 등을 고려하지 않고 균일 속도분포나 포물선 속도형태로 단순화하여, 침전지 설계에 있어서 큰 안전인자를 부여해야 하는 결과를 보였다.

DeVantier 와 Larock (1987)은 2차원 정상상태의 성층화된 난류흐름을 유한요소법을 사용하여 해석하였고, 원형 이차 침전지에서 미세한 입자들에 의해 발생하는 밀도류 (Sediment-Driven Density Current)를 모의하였다. 또한 계수들의 민감도 분석을 통하여 모형을 검증하였다.

Brouckaert 와 Buckley (1999)는 서로 다른 형상을 가진 두 가지의 침전지를 수치해석하여 유속장을 구하고 각각의 침전지를 최소한의 비용으로 최적화시키기 위해 정류벽 등의 여러 세부인자들을 변화시켜가며 수치모의를 수행하여 좀 더 이상적인 침전지의 형태와 흐름조건을 찾아내었다. 그러나 이들이 수치모의에 사용한 FLUENT는 매개변수의 보정과정을 거치지 않은 것이었으며, 입자의 거동을 파악하지 않은 상태에서 침전지의 최적조건을 찾고자 하였다. 노성진 (2001)의 연구에

서는 기존의 실험결과를 토대로 FLUENT에서 사용되는 난류모형의 매개변수를 보정하였으며, 다양한 수치기법을 적용하여 수치해석 결과의 변화를 관찰하였다.

한편, 종래에는 침전지 내 흐름의 유속장만을 수치모의하는 연구가 주류를 이루었으나 요즘에는 침전지 연구의 궁극적인 목적이 침전지의 효율을 파악하여 보다 효과적인 침전지의 설계 및 운영을 도모하는데 있다는 점을 감안하여, 유속장과 함께 입자의 거동에 대해 해석하는 연구가 활발히 진행되고 있다. Stamou 등 (1989)은 장방형 일차 침전지를 대상으로 수치해석을 통해서 얻어진 유속장, SS농도장, FTC (Flow Through Curve)의 값들을 실험치와 비교하였으며, Adams와 Rodi (1990)는 $k-\epsilon$ 난류모형을 사용하여 비부력류 (Neutrally Buoyant Flow)에 대한 유속장과 FTC를 구하여 이를 실험치와 비교하는 연구를 수행하였다. Stovin and Saul (1996)은 FLUENT를 통해 침전지의 효율을 예측하는 연구를 수행하였다. 이들은 침전지의 효율을 예측하기 위해 바닥전단력분포 (Bed Shear Stress Distribution)을 계산하는 방법과 입자추적기법 (Particle Tracking Method)의 두가지 방법을 사용하였으며 입자추적기법이 바닥전단력분포를 계산하는 방법보다 더 효과적으로 침전지의 효율을 예측할 수 있다는 결론을 도출하였다. 또한 Stovin과 Saul (1998)는 이전의 연구에서 사용했던 입자추적기법을 더 확장시켜서 여러 가지 입도분포와 경계조건 등에 대해 민감도분석을 수행하였으며, 대략적인 유사침전의 위치를 모의하였다. 이들은 침전지의 효율이 입도분포에는 크게 영향을 받지 않고 일부 경계조건에 민감하게 반응한다는 결론을 얻었다. 침전지 내의 입자거동을 파악하기 위한 실험적 연구도 활발히 진행되어, Deininger 등 (1998)은 원형 침전지에서 입자의 분포를 측정하는 실험적 연구를 수행하였고, Yoon 과 Lee (2000)는 직사각형 침전지에서 다양한 조건에서의 실험을 통해 FTC를 측정된 뒤 이를 이용해 정류벽의 위치와 침전지의 길이 등의 인자가 침전지의 효율에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 수치해석을 통하여 침전지에서의 흐름특성 및 입자의 거동을 파악하고 이를 바탕으로 침전 효율을 평가하였다. 또한 침전지의 형상을 지나치게 단순화시키는 기존의 연구와는 달리 본 연구에서는 실제 현장에서 사용되는 규모와 침전지내 인자들 (유입부 정류벽, 유출부 트라프 등)이 그대로 수치모의에 사용되었으며, 현장실험의 결과를 바탕으로 수치모의에 사용되는 매개변수들을 보정하였다.

2. FLUENT 수치모형의 개요

2.1 지배방정식

본 연구에서는 침전지에 대한 수치모형으로 범용 CFD 프로그램인 FLUENT를 선택하여 흐름을 모의하였다. FLUENT에서 사용하는 지배방정식으로 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

여기서, u_i 는 시간적분된 유속성분이다. 운동량 방정식은 Reynolds-Averaged Navier-Stokes 방정식으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right) + g_i \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, $\overline{u_i' u_j'}$ 는 Reynolds 응력항, ν 는 동점성 계수, g_i 는 중력이다. 지배방정식의 폐합은 난류모형을 통해 이루어지며, 일반적인 흐름조건에 대해 Boussinesq 근사는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$- \overline{u_i' u_j'} = \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3)$$

여기서, μ_t 는 난류 점성계수 (Turbulent or Eddy Viscosity)이고, k 는 난류 운동에너지, δ_{ij} 는 Kronecker Delta이다. 난류 모형 중에서 0-방정식, 1-방정식, 2-방정식 모형은 Boussinesq 근사에 의한 와 점성 개념을 사용하지만 Reynolds 응력 모형은 Eddy Viscosity 개념을 사용하지 않고 개별 Reynolds 응력의 이송방정식을 직접 푼다. 본 연구에서는 2-방정식 모형 중 하나인 표준 $k-\epsilon$ 모형을 난류 모형으로 선택하였다.

2.2 초기·경계조건

수치모의를 수행하기 위해서는 초기·경계조건이 요구되며 다음과 같이 정리할 수 있다.

2.2.1 초기조건

침전지의 유입부에 대해 일정한 속도를 부여하고 나머지 부분에 대해서는 속도를 0으로 놓았다. ϕ 를 지배방정식에서의 임의의 독립 변수라 하고 초기 조건을 수식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\phi(x, y, z, t_0) = \phi_0 \quad (4)$$

여기서 $\phi = [u, k, \epsilon]$ 이며, u 는 유체의 속도, ϵ 은 난류 에너지 소산율이다.

2.2.2 경계 조건

본 연구의 수치모의에서 사용된 경계조건은 크게 벽면에 부여된 No-Slip 조건과 유입부의 Velocity Inlet 경계조건, 유출부의 Outflow 경계조건, 그리고 공기층 윗면의 Pressure-Outlet 경계조건으로 나눌 수 있으며, 아래에 이를 간단히 정리하였다.

우선, 침전지의 벽면에 대해서 부여한 No-Slip 조건을 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$u(x_0, y_0, z_0, t) = 0 \quad (5)$$

유입부에 부여한 Velocity Inlet 조건은 유입부에서의 유입속도를 정의할 수 있으며, 아래와 같은 식으로 나타낸다.

$$u(x_0, y_0, z_0, t) = u \quad (6)$$

또한, Weir 유출부에는 Outflow 조건을 부여하고, 공기층의 윗면에는 Pressure-Outlet 조건을 부여하였다. 물리적으로 이는 No-Flux 조건을 의미하며 식 (7)과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

2.3 수치 기법

2.3.1 차분 과정

지배방정식의 차분에 앞서 임의의 스칼라량인 ϕ 의 정상상태에서의 보존방정식을 생각하면 임의의 검사체적 (Control Volume) V 에 대해 다음과 같다.

$$\oint \rho \phi v \cdot dA = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot dA + \int_V S_\phi dV \quad (8)$$

여기서 v 는 속도 벡터 (= $u\hat{i} + v\hat{j}$ in 2D)이고, A 는 표면 면적 벡터, Γ_ϕ 는 ϕ 에 대한 확산 계수, $\nabla\phi$ 는 ϕ 의 경사 (= $(\partial\phi/\partial x)\hat{i} + (\partial\phi/\partial y)\hat{j}$ in 2D), S_ϕ 는 단위 부피당 ϕ 의 생성항이다. 식 (8)은 계산영역내의 각각의 검사체적에 적용할 수 있으며, 이를 차분하면 다음의 식 (9)를 얻는다.

$$\sum_f^{N_{faces}} \rho v_f \phi_f A_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\phi (\nabla\phi)_n A_f + S_\phi V \quad (9)$$

여기서 N_{faces} 는 격자면의 계수이고, ϕ_f 는 면 f 를 통과한 ϕ 의 값, v_f 는 면을 통한 질량의 유동량, A_f 는 면의 면적, $(\nabla\phi)_n$ 은 면 f 에 직각 방향인 $\nabla\phi$ 의 크기, V 는 격자의 부피이다.

식 (9)의 이송항에서 요구되는 ϕ_f 를 구하기 위해서는 격자의 중앙값에서부터 내삽해야 한다. FLUENT에는 First-Order Upwind Scheme, Power Law Scheme, Second-Order Upwind Scheme, QUICK 기법 등의 기법을 지원하며, 본 연구에서는 모의 시간을 고려하여 First-Order Upwind Scheme을 사용하였다.

2.3.2 자유수면 해석

자유수면 해석은 다상 유체(Multiphase Fluid)의 거동을 해석하는 방법인 VOF (Volume Of Fluid) 방법을 사용한다. 이는 셀 내에서의 유체를 단위 체적당 각각의 유체 체적으로 나타내는 식 (10)의 Volume Fraction 방정식을 통해 계산된다.

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = S_{\alpha_q} \quad (10)$$

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (11)$$

여기서 α_q 는 q 번째 유체가 차지하는 상대체적을 나타내며, S_{α_q} 는 생성·소멸항을 나타낸다. n 은 다상유체의 총개수를 의미한다.

식 (10)의 Volume Fraction 방정식은 개별 유체에 대한 일종의 질량보존식이라 할 수 있으며 이는 식 (11)에 의해 폐합된다.

2.3.3 입자추적기법

입자추적기법은 유속장이 주어진 유체내에 구형의 입자가 주입되었을 때 이 입자의 궤적을 추적하는 기법으로써, 입자의 물리적 성질과 주입 위치, 경계조건이 주어지면 유속장을 따라서 움직이는 입자의 궤적을 계

산해준다. 이 기법의 기본적인 원리는 입자에 작용하는 외력과 입자의 관성이 같다고 보는데 있으며, 이러한 힘의 균형의 x 방향 성분만 관찰해 보면 다음과 같다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (12)$$

여기서, $F_D(u - u_p)$ 는 입자의 단위질량당 작용하는 항력이고, u_p , ρ_p 는 입자의 속도 및 밀도이다. F_x 는 체적력의 x 방향 성분으로서, 체적력에는 주변 유체를 가속시키기 위한 힘과, 유체의 압력차에 의한 힘, Shear에 의한 양력, Thermophoretic Force, Brownian Force 등이 존재한다. 또한, F_D 는 다음의 식과 같이 표현된다.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (13)$$

여기서, D_p 는 입자의 직경이고, C_D 는 항력계수 (Drag Coefficient), Re 는 다음식과 같이 표현되는 상대 레이놀즈 수이다.

$$Re = \frac{\rho D_p |u_p - u|}{\mu} \quad (14)$$

또한, C_D 는 다음과 같이 표현되며, 아래 식에서 계수 b_1 , b_2 , b_3 , b_4 는 경험에 의해서 산정된다.

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + b_1 Re^{b_2}) + \frac{b_3 Re}{b_4 + Re} \quad (15)$$

입자의 궤적은 위에 표현한 힘의 균형을 적분함으로써 계산된다. 특히, 입자추적기법은 입자의 특성이나 주입위치를 반영하기가 쉽고, 입자의 궤적을 관찰하기가 용이하여, 근래에 유속장내의 입자의 거동을 모의하기 위한 수단으로 널리 이용되고 있다. 그러나, 주입되는 입자가 구형이라는 가정을 해야하고, 유속장이 한번 주어지면, 입자가 주입된 후에도 유속장에 영향을 미치지 않는다는 전제가 있어야한다는 단점이 있다.

3. 수치모형의 구성

3.1 모의대상 침전지의 개요

침전지의 규모 및 세부인자의 형태는 성남정수장 내의 침전지 설계도면을 바탕으로 구성하였다. 유입부에

는 총 108개의 공으로 구성된 정류벽이 위치하고 있으며, 이를 통해 총류화된 물이 유입하게 된다. 현재 성남 정수장의 유입부 공의 단면적은 0.03 m^2 정도이며, 개구비가 약 4.17%이다. 침전지의 설계 기준에 따르면, 개구비는 5~6%가 일반적이고, 공의 크기가 작고 간격이 세밀할수록 침전 효율이 우수하다고 알려져 있다. 수치모의에서는 격자 구성의 편의를 위하여, 유입부 정류벽의 형상을 $0.20 \text{ m} \times 0.15 \text{ m}$ 크기의 정사각형 공 108개로 단순화하였다. 한편, 유입부를 통해 들어온 물은 침전지 유출부 트라프 측면의 작은 구멍들을 통해 빠져나가는데, 이 구멍들은 직경이 약 14 cm로 매우 작고, 트라프 1기당 양쪽 측면에 108개가 있기 때문에 정확한 모의가 힘들다. 따라서 본 수치모의에서는 이를 그림 1에서 보는 바와같이 $0.2 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 의 직사각형

구멍 20개로 단순화하였으며, 이 때의 총 흐름 단면적은 실제 유출부와 거의 일치한다. 침전지내의 평균유속은 체류시간을 고려해서 결정하게 되는데, 성남정수장의 체류시간은 약 3.5시간이며, 이를 통해 침전지내의 평균유속을 계산해 보면 약 0.0057 m/s 이다. 수치모의의 유입부 경계조건으로 입력되는 정류벽의 통과유속은 위에서 계산한 침전지내 평균유속을 통해서 계산할 수 있으며, 수치모의에서 적용한 유입부 정류벽의 형태에 대해 약 0.20 m/s 의 값으로 나타난다. 또한, 설계 도면상에 나타난 침전지 바닥의 스크레이퍼나 유입부 정류벽 아래의 호퍼 등은 바닥에 쌓인 침전물들을 제거하기 위해 일시적으로 사용하는 시설이기 때문에 수치모의에서는 고려하지 않았다.

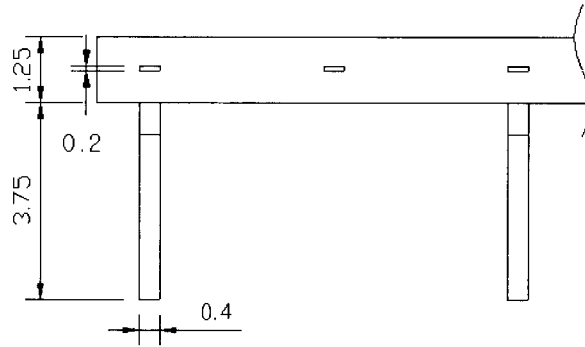
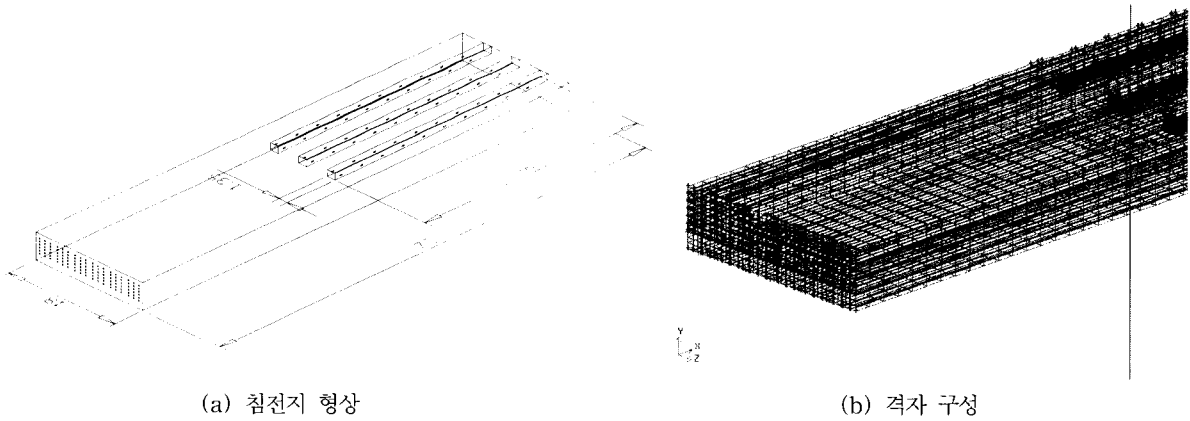


그림 1. 침전지 유출부 트라프의 단순화 (단위: m)



(a) 침전지 형상

(b) 격자 구성

그림 2. 침전지 형상 및 격자구성 (단위: m)

표 1. 수치모의 침전지의 자원

침전지	장방형 침전지 $72 \text{ m} \times 18 \text{ m} \times 5 \text{ m}$
유입부	정류벽 형식 $0.2 \text{ m} \times 0.15 \text{ m} \times 108$ 개 (개구비: 약 4%)
유출부	트라프 형식 $0.4 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 20$ 개

3.2 수치모의 개요

수치모의는 침전지의 형상과 세부 시설물들의 형태를 고려하여 3차원 모의로 수행되었으며, 72 m × 18 m × 5 m의 영역에 대해 100 × 56 × 17의 약 90,000개 사각형 격자를 구성하였는데, 시설물의 형태가 복잡한 곳에서는 시설물의 형상에 맞추어 격자를 배치시켜 불필요한 격자가 생기지 않도록 하였으며, 유속의 변화가 단조로운 부분에서는 최대한 격자의 수를 줄여 계산시간을 줄이도록 하였다. 아래의 그림 2에는 수치모의에 사용된 침전지 형상과 격자가 구성된 모습을 표시하였으며 표 1에는 수치모의 침전지의 재원을 표시하였다.

격자의 구성이 끝나면 각 면에 대한 경계조건을 입력해야 한다. 침전지의 수치모의에서 결정해야 할 경계조건으로는 침전지 벽면과 유입부, 유출부 및 자유수면에 대한 경계조건이 있는데, 본 연구에서는 앞서도 언급한 바와 같이 모의대상 침전지의 벽면에 대한 경계조건으로 No-Slip 조건을 부여하였다. 유입부에는 Velocity Inlet 조건, 유출부에는 Outflow 조건을 주었으며, 자유수면방향의 경계에는 침전지내의 압력에 의해서 공기가 밀려나갈 수 있도록 Pressure Outlet 조건을 부여하였다. FLUENT에서 자유수면은 VOF 기법을 사용하여 모의되며, 이때 공기의 밀도는 물의 밀도보다 약 1,000배 작은 1.225 kg/m³이 사용된다. 특히, 유출부에 부여한 경계조건으로 Pressure Outlet 조건 대신 계산시간이 오히려 더 많이 소요되는 Outflow 조건을 사용하였는데, 이는 침전지 유출부에서의 유속이나 압력을 알지 못하기 때문이다. (Fluent, 1998)

난류모형은 표준 $k-\epsilon$ 모형을 사용하였으며, 비정상 상태 모의를 하여 정상 상태로 수렴하도록 하였다. $k-\epsilon$ 난류모형의 매개변수는 $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, C_μ , σ_k , σ_ϵ 의 다섯 개가 있으며, FLUENT에서는 공기와 물에서 주로 사용되는 난류모형 매개변수의 기본 값을 다음과 같이 제시하고 있다.

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

노성진 (2001)의 연구결과에 따르면, 위 난류모형의 매개변수들 중 $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ 의 값이 침전지내 흐름에 있어서 C_μ , σ_k , σ_ϵ 에 비해 큰 민감도를 가지며, $C_{1\epsilon} = 1.57$, $C_{2\epsilon} = 1.81$ 일 경우 실험값과 가장 일치된 계산결과를 나타낸다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 난류모형의 매개변수를 위와 같이 보정된 값을 사용하였다. 시간간격

은 해가 발산하지 않고 수렴하는 범위 내에서 되도록 큰 값을 사용하여 계산시간을 최대한 단축시킬 수 있도록 하였으며, 침전지 형상에 따라 0.05 초에서 0.1 초 정도의 값을 사용하였다.

3.3 침전효율의 평가 방법

침전효율 평가를 위한 입자추적기법은 아래와 같이 초기·경계조건 및 물성치 등의 매개변수를 입력하여 수행할 수 있다.

- 입자의 직경, 밀도
- 입자의 주입위치 및 개수
- 벽 경계조건
- 벽 반사의 최대횟수
- 단계 길이 인자 (Step Length Factor)
- 단계 수

위에서 입자의 직경이나 밀도, 주입위치, 입자 개수와 같은 물리적 성질은 침전지 현장실험의 실제 상황과 최대한 근접시켰다. 그러나 입자의 직경과 밀도와 같은 경우 실제 침전지내의 입자를 정확히 구현하기 힘들뿐더러, 입자추적기법의 수행결과가 이들 값에 크게 좌우될 수 있기 때문에 현장실험 결과와의 비교를 통해 이들 매개변수 값을 결정하였다. 그 외의 매개변수들은 입자추적기법의 초기·경계조건들이며, 이들 조건들을 통한 입자추적기법의 수행과정을 아래에 간단히 정리하였다.

벽 경계조건은 침전지 벽면에 부여하게 되는 경계조건을 의미하며, FLUENT에서 제공하는 종류로는 Reflect, Trap, Escape 경계조건이 있다. 본 연구에서는 입자가 벽에 부딪혔을 때 일정한 각도로 다시 반사되는 조건인 Reflect 조건을 사용하였다. 벽 반사의 최대회수는 입자가 최대로 반사될 수 있는 회수를 말하며, 이 회수 이상 반사되었을 경우 입자는 더 이상 반사되지 않고 Aborted로 기록되면서 계산이 끝나게 된다. 또한 입자가 Trap 경계조건이 설정된 경계에 닿는 경우 Trapped라고 기록되고, 유출부 트라프와 같은 Escape 경계조건이 설정된 경계를 통해 빠져나가는 입자의 경우 Escaped라고 기록된다. 또한 단계 수가 끝날 때까지 Trapped 되거나 Escaped 되지 못한 입자는 Incomplete로 기록된다. 이렇게 분류된 입자의 상태를 이용하여 침전지의 효율을 평가할 수 있다. 침전지의 효율을 산정하는 식은 아래와 같다 (Stovin과 Saul, 1999).

침전효율

$$(\eta) = \frac{\text{Trapped} + \text{Aborted} + \text{Incomplete}}{\text{Trapped} + \text{Aborted} + \text{Escaped} + \text{Incomplete}} \quad (16)$$

3.4 입자추적기법의 매개변수 결정

매개변수의 결정 과정은 본 과업의 일환으로 성남정수장에서 실시한 현장실험의 결과 자료를 이용하여 수행하였는데, 실험결과와의 비교를 위하여 수치모의는 성남정수장 현장의 침전지 채원에 거의 근사한 조건을 사용하였다.

수치모의는 현장실험의 침전지 형상을 그대로 재현하여 수행하였고, 위 실험결과와의 비교를 통해 수치해석의 침전효율 평가에 사용되는 입자추적기법의 매개변수를 결정하였다. 입자추적기법에서 입력해야 하는 매개변수는 앞에서 설명하였듯이 주입 입자의 물리적 성질 및 초기·경계 조건 등 여러 가지가 있는데, 이들 중 민감도가 큰 매개변수들만을 선정하여 그 값을 변화시키면서 수치해석 결과를 실험결과에 맞추었으며, 민감도가 크지 않은 매개변수에 대해서는 기본적으로 제공되는 값을 사용하였다.

Stovin과 Saul (1999)의 연구결과에 따르면, 입자추적기법을 통한 침전효율의 산정결과가 단계 길이 인자

나 단계수와 같은 매개변수에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 특히 단계 수의 경우 너무 작은 값을 사용하면 입자가 미처 빠져나가지 못한 상태에서 계산이 종료되는 상황이 발생할 수 있으나, 50,000 이상의 충분히 큰 값을 부여하면 그 이후로는 거의 결과에 영향이 미치지 않았다. 따라서 본 연구에서는 단계 수의 값으로 충분히 큰 값인 50,000을 사용하였으며, Step Length Factor는 기본값인 20을 사용하였다. 또한, 벽 반사 최대회수의 경우는 민감도가 상당히 큰 것으로 나타났다. 이를 늘이거나 줄이면 실험결과에서 크게 벗어나는 침전효율을 산출하는 경향이 있기 때문에, 이 값 역시 기본값인 25를 사용하였다. 아래의 표 2에 입자추적기법에서 사용되는 매개변수들을 정리하였다. 따라서 본 연구에서는 민감도가 비교적 클 것으로 예상되는 입자의 직경과 밀도를 선정하여, 이들의 값을 적절히 변형하면서 침전효율의 변화를 관찰하였다. 매개변수 값의 결정과정은 두 개의 단계로 이루어지는데, 우선 선정된 두 매개변수에 대한 민감도 분석을 실시하여 민감도가 작은 것으로 나타나는 변수에 대해서는 일반적으로 사용되는 값으로 고정시켰다. 그 뒤, 나머지 매개변수를 변화하면서 모의를 수행하여 침전효율을 실험결과에 근사시키는 방법을 사용하였다.

표 2. 입자추적기법의 매개변수

입자의 직경	Variable
입자 밀도	Variable
Wall Boundary Condition	Reflect
Step Length Factor	20
Max. No. of Wall Reflections	25
Max. No. of Steps	50,000

3.5 현장실험의 개요

현장실험은 앞서도 언급하였듯이 성남정수장내의 침전지를 대상으로 수행하였으며, 아래에 실험의 결과를 간단히 정리하였다. 현장실험은 침전지내의 각 위치에서 입자의 개수 및 트라프를 통해 빠져나가는 입자의 개수를 카운트하는 방식으로 수행되었으며, 수치모의에서는 이들 자료 중 유입부 부근의 입자개수와 트라프를 통해 빠져나가는 입자개수를 이용해 침전효율을 개략적으로 산정한 후, 이를 수치해석의 비교대상으로 사용하였다. 그 결과로서, 유입부 부근의 입자의 개수가 약 1500개 정도로 나타나는 반면, 트라프 내의 입자 개수는 200에서 300사이에 분포하고 있음을 확인할 수 있었

는데, 이들로부터 산정된 침전지의 효율은 대략 0.85 정도이다. 따라서, 수치해석에서는 앞에서 설명한 방식으로 입자의 밀도 및 직경 등의 매개변수를 조정하여 효율을 0.85에 맞추도록 하였다.

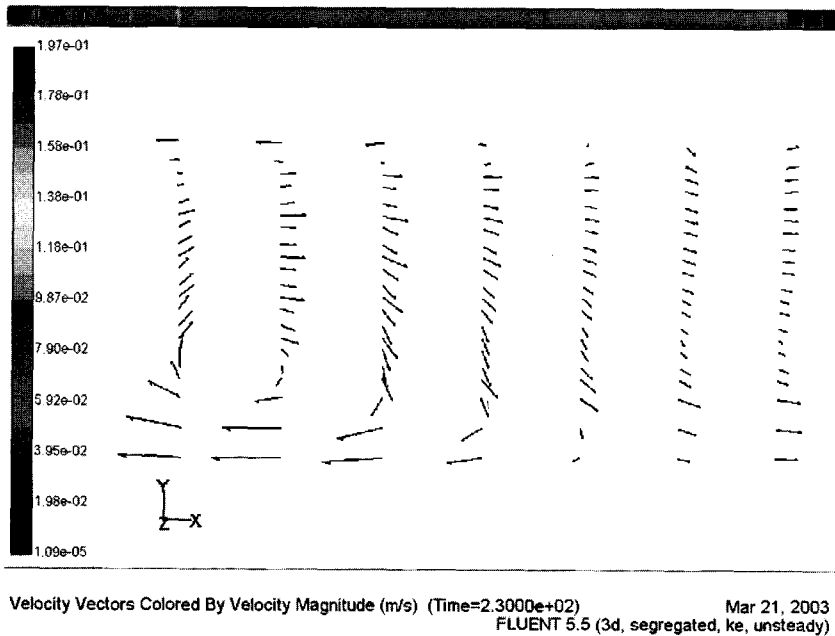
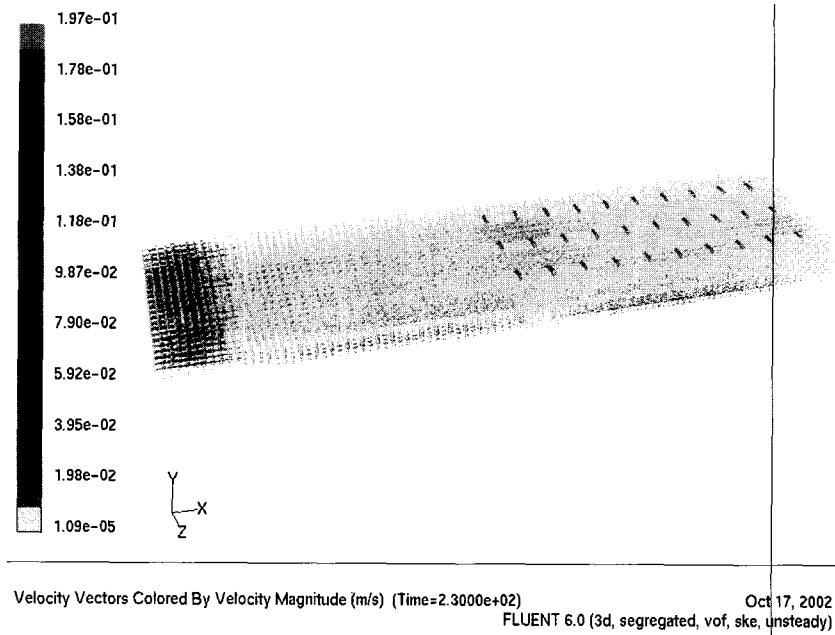
4. 수치모의 결과

4.1 유속장 및 입자의 궤적

다음의 그림 3에 수치해석의 결과로 얻은 유속장 및 입자의 궤적을 표시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 침전지내의 유속은 거의 평활화되어 있으며, 유입부 부근에서만 경계조건으로 부여한 0.20 m/s의 속도가 보일 뿐 나머지 대부분의 영역에서는 0.02 m/s 미만의 낮은

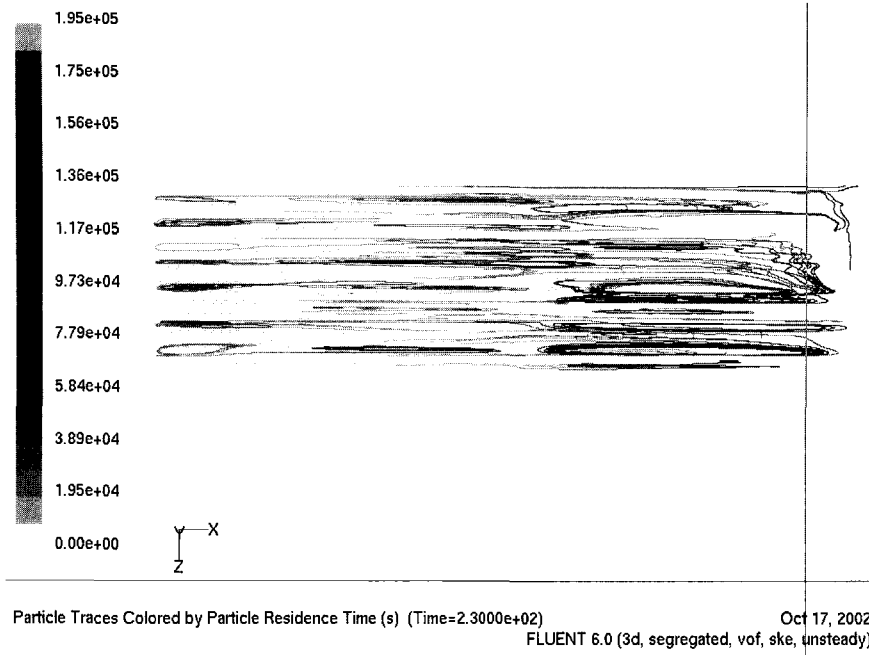
유속분포를 보이고 있다. 그러나 침전지 바닥쪽에서 0.03 m/s 정도의 약간 높은 유속분포를 볼 수 있는데 이는 재순환류의 영향일 것으로 판단된다. 트라프를 통해 빠져나가는 흐름의 유속은 약 0.05 m/s에서 0.10 m/s 정도로 나타났다. 입자의 궤적도 유속분포와 마찬가지로 평활한 움직임을 보이고 있으며, 유입부로부터 침전지 뒤쪽으로 서서히 이동하다가 일부 입자는 트라

프 부근에서 상향 유속의 영향을 받아 트라프 쪽으로 빠져나가는 모습을 관찰할 수 있다. 측면에서 본 그림에서는 유입부 부근에서 입자가 위 아래로 회전하는 모습도 볼 수 있는데, 이는 유입부의 빠른 흐름이 침전지 내로 유입되면서 느린 흐름을 만나 발생한 국부적인 순환류 때문일 것으로 판단된다.

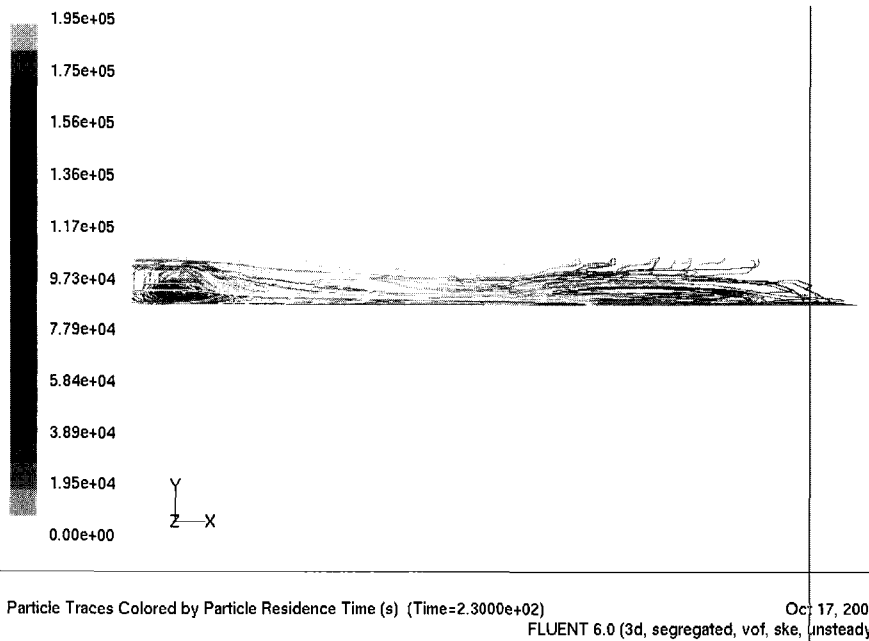


(a) 침전지내 유속 벡터도

그림 3. 침전지내 유속장 및 입자 궤적(계속)



(b) 침전지내 입자의 궤적 (평면도)



(c) 침전지내 입자의 궤적 (측면도)

그림 3. 침전지내 유속장 및 입자 궤적

4.2 민감도 분석 및 매개변수 결정

매개변수의 민감도 분석은 앞에서 설명한 바와 같이 입자의 밀도와 직경, 두 가지의 변수에 대해서 수행하였다. 침전지내에 존재하는 입자의 밀도는 $1,000 \text{ kg/m}^3$ 에서 $3,000 \text{ kg/m}^3$ 정도이고, 직경은 주로 $1 \mu\text{m}$ 에서 크게는 $100 \mu\text{m}$ 까지 분포한다. 따라서 이들에 대한 민감도 분석 역시 위와 같은 범위 내에서 수행하였으며, 각 변

수의 민감도 분석을 수행할 때 그 기준값은 아래와 같이 설정하였다.

- 입자의 직경 기준값: $15 \mu\text{m}$
- 입자의 밀도 기준값: $1,500 \text{ kg/m}^3$
- 매개변수 기준값에서의 침전효율: 0.509

다음의 그림 4에 각각 입자의 밀도, 입자의 직경에 대한 민감도 분석결과를 표시하였다. 그림에서 x 축은 위에서 설정한 기준값에 대한 매개변수의 상대적인 변화율이며, y 축은 기준값에서 산정된 침전효율 (여기서는 0.509)에 대한 침전효율의 상대적인 변화를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 입자의 직경에 대해서는 침전지의 효율이 약 0.3에서 거의 1.0에 이르기까지 매우 민감하게 변화하는 반면 입자의 밀도에 대해서는 그다지 큰 변동을 보이지 않는 것으로 나타났다. 이는 침전

지내의 입자 크기가 직경 1~100 μm 정도로 매우 작기 때문에 밀도가 어느 정도 크더라도 중력보다는 침전지내 흐름에 지배적인 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 실제로 침전지내의 입자의 거동은 입자들의 플러이 형성되고 깨지는 현상에 따라서 큰 폭으로 변하는 것으로 알려져 있는데, 이는 침전지의 효율이 입자의 크기에 매우 민감하게 반응한다는 사실을 반영하고 있으며, 위의 민감도 분석 결과도 이러한 맥락에서 생각할 수 있을 것이다.

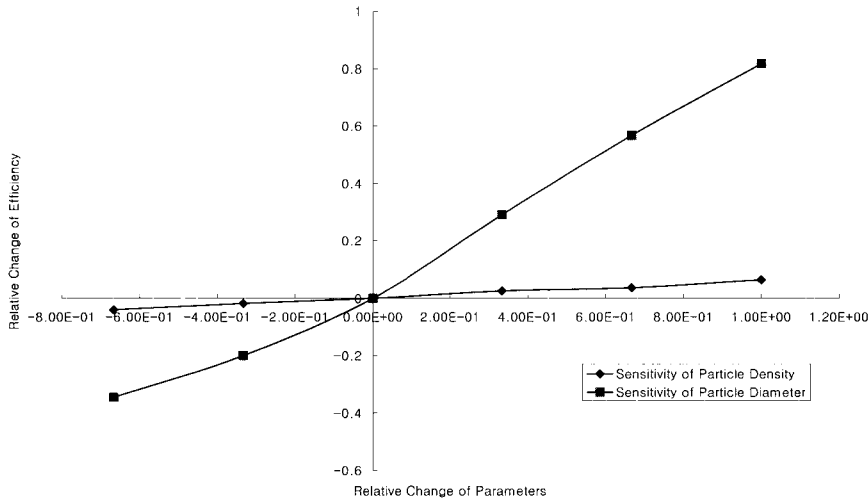


그림 4. 민감도 분석 결과

위의 민감도 분석 결과로부터, 민감도가 큰 것으로 나타난 입자의 직경을 매개변수의 결정 대상으로 선정하였다. 따라서 민감도가 작은 입자의 밀도에 대해서는 초기의 기본값인 $1,500 \text{ kg/m}^3$ 로 고정하고, 입자 직경의 값만을 변화시키면서 침전효율이 실험결과와 일치하도록

조정하였다. 실험결과로 나타난 침전효율은 앞에서 설명한 바와 같이 0.85 정도로 산정되었는데, 이는 입자의 직경이 25 μm 에서 30 μm 사이일 때의 침전효율임을 알 수 있다. 따라서 이 구간에서 입자의 직경값을 좀더 세분화하여 그에 대한 침전효율을 산정해 보았으며, 그 결과로 그림 5의 그래프를 얻어내었다.

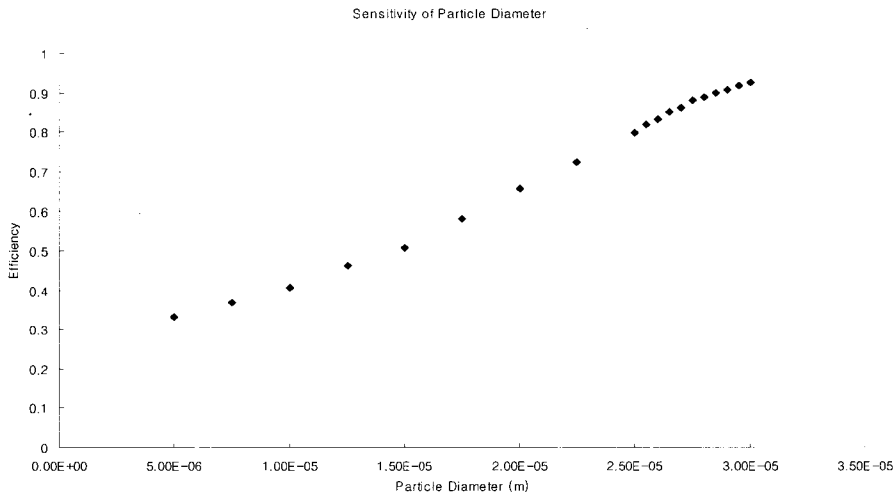


그림 5. 입자의 직경에 따른 침전효율의 변화

그림에서 앞부분은 기존의 민감도 분석에서 구했던 입자의 밀도 $1,500 \text{ kg/m}^3$ 에 대한 침전효율의 계산 결과이며, 뒤쪽의 세밀한 점으로 나타난 부분이 침전효율이 0.85가 될 때의 직경 값을 구하기 위해 세분화하여 모의한 결과이다. 그림에서 나타난 바와 같이 직경 값을 $0.5 \mu\text{m}$ 씩 변화하면서 모의를 수행하였다. 이들 자료로부터 침전효율이 실험값과 일치하는 0.85를 가질 때의 입자 직경값을 추정해보면 약 $26.5 \mu\text{m}$ 가 되며, 이 때의 수치모의로 인한 침전효율은 0.852이다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 선행 연구를 통해 검증된 수치모형인 FLUENT를 실제 침전지에 적용해 보았으며, 현장실험 결과와의 비교를 통해 침전효율의 산정을 위한 입자추적기법의 매개변수를 결정하였다. 매개변수 결정을 위해 민감도 분석을 수행해본 결과 입자의 직경이 입자의 밀도에 비해서 민감도가 큰 것으로 나타났고, 침전효율이 실험결과와 가장 일치할 때의 직경값을 결정해본 결과 입자의 직경값이 $26.5 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 이상에서 결정된 매개변수들을 이용하여, 향후에는 현장실험으로 구현하기 어려운 다양한 조건에서의 침전효율을 산정하는 연구를 수행할 수 있으며, 이 때 유속장이 입자거동에 미치는 영향을 파악하는 데 도움이 될 수 있을 것이라고 생각된다.

실제 침전지에서의 유동은 지내에 체류하고 있던 불과 새로 유입하는 물과의 온도차에 의하여 밀도류가 발생하는 등 외부적인 영향인자에 의하여 크게 영향을 받게 되므로, 향후에 연구해야 될 과제로서는 실험당일 외부적인 요인을 수치모의에 반영하고 민감도를 분석함으로써 실제 현장과 더욱 근접한 결과를 도출하고, 이렇게 결정된 입자추적기법의 매개변수를 이용하여 침전지내의 유량 변화나 유입부 개구비 및 트라프 형태 등의 변경에 대한 다양한 조건에서의 침전효율을 산정하여야 한다. 이를 통해 침전지의 최적운명을 위한 유량조건에 대한 연구나 침전효율의 향상을 위한 침전지내 세부인자의 설계에 대한 연구를 수행할 수 있을 것이다.

참고 문헌

노성진 (2001). CFD를 이용한 장방형 침전지내 흐름의 수치모의. 석사학위논문, 서울대학교. pp. 67-103.
 Abdel-Gawad, S.M., and McCorquodale, J.A. (1984). "Strip integral method applied to settling tanks." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 1, pp. 1-17.

Adams, E.W., and Rodi, W. (1990). "Modeling flow and mixing in sedimentation tanks." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 7, pp. 895-913.
 Brouckaert, C.J., and Buckley, C.A. (1999). "The use of computational fluid dynamics for improving the design and operation of water and wastewater treatment plants." *Water Science and Technology*, Vol. 40, No. 4-5, pp. 81-89.
 Deininger, A., Holthausen, E., and Wilderer, P.A. (1998). "Velocity and solids distribution in circular secondary clarifiers: Full scale measurements and numerical modeling." *Water Science and Technology*, Vol. 32, No. 10, pp. 2951-2958.
 DeVantier, B.A., and Larock, B.E. (1987). "Modeling sediment-induced density current in sedimentation basins." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 1, pp. 80-94.
 FLUENT5 user's guide. (1998). Fluent Inc.
 Imam, E., McCorquodale, J.A., and Bewtra, J.K. (1983). "Numerical modelling of sedimentation tanks." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 12, pp. 1740-1754.
 Krebs, P., Stamou, A I., Garcia-Heras, J.L., and Rodi, W. (1996). "Influence of inlet and outlet configuration on the flow in secondary clarifiers." *Water Science and Technology*, Vol. 34, No. 5-6, pp. 1-9.
 LeVeque, R.J. (1990). *Numerical methods for conservation laws*, Birkhauser.
 Schamber, D.R., and Larock, B.E. (1981). "Numerical analysis of flow in sedimentation basins." *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 107, No. 5, pp. 575-591.
 Stamou, A.I., Adams, E.W., and Rodi, W. (1989). "Numerical modelling of flow and settling in primary rectangular clarifier." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 27, No. 5, pp. 665-682.
 Stovin, V.R., and Saul, A.J. (1996). "Efficiency prediction for storage chambers using computational fluid dynamics." *Water Science and Technology*, Vol. 33, No. 9, pp. 163-170.
 Stovin, V.R., and Saul, A.J. (1998). "A computational fluid dynamics(CFD) particle tracking approach to efficiency prediction." *Water Science and Techno-*

logy, Vol. 37, No. 1, pp. 285-293.
Stovin, V.R., and Saul, A.J. (1999). "Field testing
CFD-based predictions of storage chamber gross
solids separation efficiency." *Water Science and
Technology*, Vol. 39, No. 9, pp. 161-168.
Yoon, T.H., and Lee, S.O. (2000). "Numerical mo-

deling of sedimentation basins with a baffle."
Journal of Civil Engineering, KSCE, Vol. 4, No.
4, pp. 227-232.

(논문번호:03-50/접수:2003.05.28/심사완료:2004.03.25)