

부유고형물질 제거를 위한 침전조 설계 연구

김혜숙 · 신미수 · 이상일* · 장동순

충남대학교 환경공학과

* 충북대학교 환경공학과

서론

폐수나 용수처리공정에서 널리 사용되는 일·이차 침전조는 부유물질을 중력에 의해 자연 침강시켜 고액을 분리·제거하는 장치이다. 이러한 침전조는 수처리 플랜트에 소요되는 비용의 약 30% 정도를 차지하므로 침전조의 부유물질 제거효율 향상을 위한 수많은 이론적·경험적 연구들이 행해져 왔다.

일반적으로 침전조의 효율은 전체적인 혼합패턴과 난류강도로 나타나는 침전조내의 유동 특성, 고�형입자의 크기와 그 분포 등으로 주어지는 부유물질의 특성에 의해 좌우된다. 침전조의 유동형태는 전체의 혼합형태를 좌우하게 되고 이것은 다시 부유고형물질의 침전과 이동패턴에 영향을 준다. 예를 들어 침전조내에 강한 폐쇄유동(short-circuiting)이 존재하면 바닥에 가라앉은 부유고형물의 재비산 가능성이 커지게 되고 침전효율의 감소로 이어진다.

침전조 유동장의 난류강도는 부유물질의 응집을 향상시킬 수 있는 반면 일정 임계값을 상회할 경우 응집된 입자를 파괴하기도 하고 이미 침전된 물질을 재부유시킬 수 있다. 결국 유동장의 난류특성 결정은 침전조의 효율을 예측하는데 필수적이며 침전조의 종횡비, 입구와 출구 위치 및 크기, 그리고 폐쇄유동 방지를 위한 배플의 형상과 위치 등과 같은 기하학적 요소와 유량이나 입구속도와 같은 수력학적 특성이 영향을 준다.

부유고형물질의 특성인 크기 및 이의 질량분율은 침전조내 침강속도(settling velocity)를 결정하며 유입되는 고�형물질의 농도와 온도차는 밀도에 영향을 준다. 고�형물질의 농도가 150~200 mg/l로 낮은 일차침전조의 경우 그 차이가 무시할 만하나 고�형물질의 부하가 크고 유입속도(~3cm/s)가 작은 이차침전조에서는 밀도류의 영향을 배제할 수 없다.

기존의 연구는 주로 밀도류를 고려하지 않은 침전조에서 유체유동과 물질이동에 대한 연구들이 주류를 이루어 왔다. 그러나 이차침전조와 같이 고농도와 낮은 수력학적 부하는 밀도류가 우세한 유동을 만들며 수력학적 효율과 부유고형물질 제거에서 이것의 영향은 중요한 제거기전으로 대두되고 있다. 유동장에서 밀도의 영향은 고�형물질의 유입농도, 수력학적 부하, 침전조 형상 등에 따라 그 정도가 달라진다.

침전조내 부유물질의 거동과 유체 유동양상에 따른 침전조의 효율향상을 도모하기 위해서는 보통 파이롯트 규모의 실험이 요구된다. 이러한 현장실험은 현실적인 실험자료를 확보할 수 있는 장점이 있으나 여러 변수에 대한 일관성 있는 자료 도출에는 경비가 시간축면에서 제약을 받는다. 또한 산출된 자료가 그 시스템에만 제한적으로 적용되는 사례가 많아 시스템의 상업용 scale-up에는 예기치 않은 문제가 노출되곤 한다. 본 연구에서는 시스템의

[연락처] (우)305-764 대전시 유성구 궁동 220 충남대학교 환경공학과 장동순,

Tel ; 042-821-6677, Fax ; 042-822-5610 e-mail ; sbpit@orgio.net

크기나 변수연구에 있어 매우 이상적이고 자유로운 장점을 가지 컴퓨터 프로그램을 이용하여 침전조의 유동형태를 파악하였다.

본 연구에서는 비압축성 유체, 정상상태, 수직 이차원 평면을 가정하였으며 캐나다 온타리오주 사리나시에 있는 장방형 침전조를 일차적인 모사대상으로 제시하였다. 난류는 k-ε 모델을 이용하였고 수력학 및 고형물질 부하 변수에 따른 밀도류를 고려한 침전조의 성능평가와 배플의 형상 및 위치에 따른 변수 연구를 수행하였다.

2. 수학적 모델 및 계산방법

2.1 일반지배방정식 및 해법

2차원 장방형 침전조를 수치해석하기 위한 일반지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{u}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \quad \dots\dots\dots(1)$$

위 식(1)에서 φ는 단위 질량당의 물리량을 Γ와 S_φ는 각각 난류확산계수와 생성항을 나타낸다. 일반속변수 φ는 x, y 방향의 속도 u, v, 난류에너지 k와 그의 소산율 ε 그리고 SS의 크기에 따른 질량분율을 각각 나타낸다. 이 일반지배방정식은 검사체적에 기초한 Patankar의 유한차분방법을 사용하였으며 특히 운동량 방정식에서 나타나는 속도와 압력의 연계는 SIMPLEC(Semi-Implicit Method Pressure Linked Equation-Consistent) 알고리즘을 사용하였다.[2]

입의 크기를 가진 부유고형물질의 농도분포에 대한 지배방정식은 아래 식(2)와 같이 나타내어진다.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial UC_i}{\partial x} + \frac{\partial VC_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_c} \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_c} \frac{\partial C_i}{\partial y} + V_{s_i} C_i \right) \quad \dots\dots\dots(2)$$

식 (2)의 마지막 항은 고형물질 침강에 따른 생성항으로 여기서 V_{s_i}는 i 직경그룹 영역에 있는 고형물질의 종말침강속도다. Table 1은 응집제를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우 측정된 실험값을 6개의 입경그룹으로 분류하여 제시한 것으로 본 연구에서 침강속도에 따른 침전조의 부유물질 제거효율을 평가하는데 사용하였다.

Table 1. 부유고형물질의 종말침강속도와 입경질량분율

구분 침강속도(mm/sec)	응집제를 사용한 경우 입경질량분율(%)	응집제를 사용하지 않은 경우 입경질량분율(%)
0.28	15	40
0.56	5	15
0.93	15	15
1.1	10	5
1.5	10	5
2.4	45	20

또한 ν/σ_c는 난류확산계수로 0.5, 0.7, 1.0 의 값을 각각 가정하여 민감도 연구를 이미 수행하였으나 그 영향은 크지 않았다.[3]

침전조내 전체 고형물질의 농도는 개별 농도 C_i와 비율 f_i의 가중합계로 식 (3)과 같다.

$$C = \sum_{i=1}^n f_i C_i \quad \dots\dots\dots(3)$$

2.2 경계조건

입구에서의 속도성분은 평행주입(parallel injection)을 가정하였으며 난류강도는 10%를, 난류에너지 소산율은 경험식에 준하였다. 벽면에서의 속도성분은 no slip 조건을 사용하였으며 평행속도성분에 대해서는 벽함수를 이용하였다. 출구 경계조건은 보통 Peclet 수가 크다는 가정하에 Outflow Boundary Condition 또는 Zero Neumann 조건을 사용하였다. 한편 자유 수표면은 Stamou 등과 마찬가지로 대칭면 조건을 사용하였다. Fig 1은 본 연구에서 적용한 장방향 침전조의 도식도와 경계조건을 보여준다.

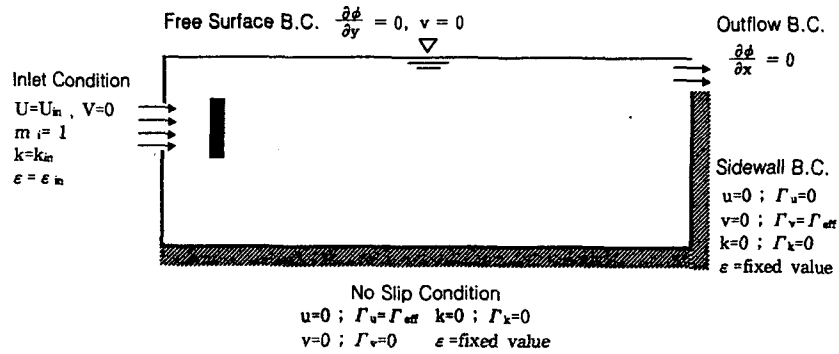


Fig. 1 장방향 침전조의 경계조건

3. 계산결과 및 고찰

본 장에서는 여러 가지 변수연구를 수행한 결과, 그 중 일부만을 제시하였다. Fig. 2는 유입속도에 따른 침전조의 효율을 보여주는 것으로 유선의 경우 응집제를 사용한 것이며 부유 고형물질의 유입농도는 200 ppm으로 가정하였다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 유입속도가 증가할수록 수력학적 부하에 의해 고형물질의 방출농도가 증가하였다. 즉 유입속도 증가는 침전조내 폐쇄순환이나 기존에 침전된 고형물질의 재부하를 유발시켜 침전조의 효율을 감소시킨다. 1cm/s 이하의 속도에서는 90% 이상의 제거효율을 보이며, 응집제를 사용하지 않은 경우 응집제를 사용한 3cm/s의 동일한 유입속도에 대해 15% 정도의 낮은 효율을 보였다. 결국 침전조의 효율은 유입속도를 감소시키고 응집제를 사용할 경우 높일 수 있다.

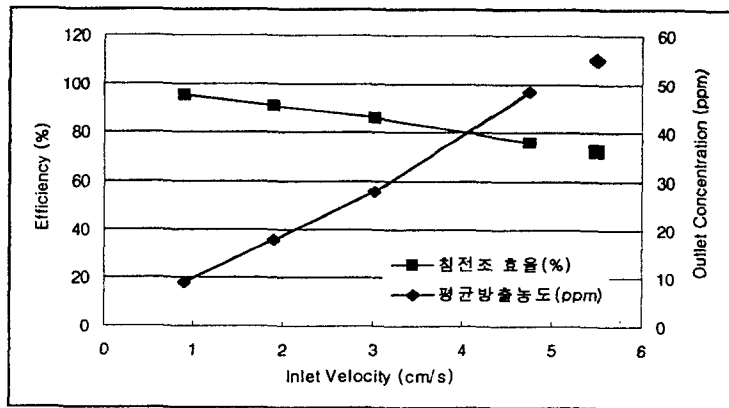
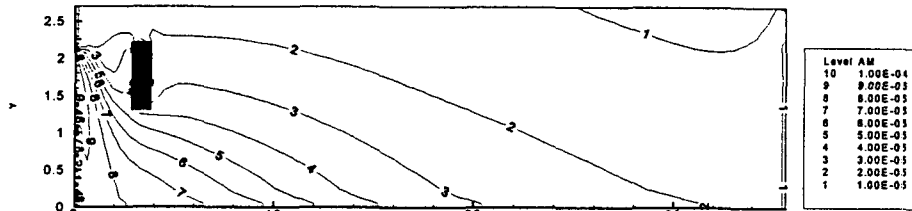


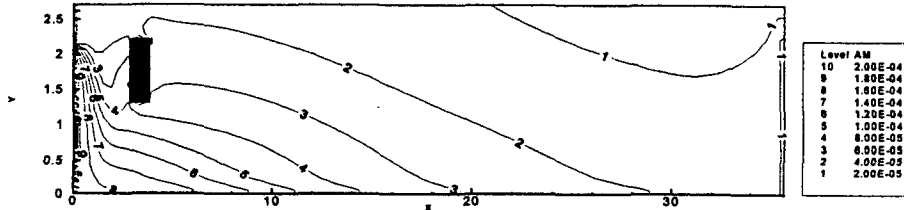
Fig. 2 유입속도에 따른 침전조의 평균방출농도와 효율

Fig. 3은 유입되는 부유 고형물질량에 따른 침전조의 농도분포를 보여준다. Fig. 3 (a)은 100ppm, (b)는 200ppm의 고형물질이 3cm/s로 유입되는 것으로 고형물질의 농도가 높은 (b)가 (a)에 비해 유입부에서 대부분 고형물질이 침전됨을 알 수 있다.

Fig.4 (a)는 배플이 없는 경우로 유입부 상부에 폐쇄유동이 보인다. (b)는 Fig.3의 배플 형상을 변화시켜 상부까지 확장한 것으로 (a)와 같이 유입부에서 보여지는 넓은 폐쇄유동은 보이지 않았다. 이와 같은 폐쇄유동에서는 혼합이 활발히 일어나게 되는데 이는 입자의 응집을 촉진시키는 반면 중력과 반대로 작용하여 입자를 부유하게 하거나 이미 침전된 입자를 재부상시키게 하므로 침전조에서 폐쇄유동이 발생하지 않도록 입구에 배플을 설치하여 수력학적 부하를 균등하게 분배하여야 한다. 결국 배플의 위치 및 형상은 침전조 내부 유동과 난류의 특성을 결정하며 또한 부유고형물질의 제거효율에 영향을 준다.

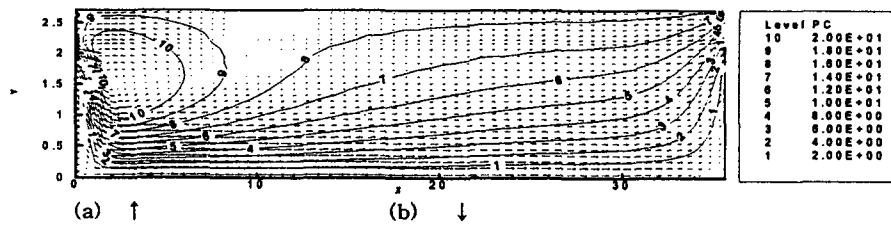


(a) $C_{in} = 100\text{ppm}$, $U_{in} = 3\text{cm/s}$, 응집제 사용



(b) $C_{in} = 200\text{ppm}$, $U_{in} = 3\text{cm/s}$, 응집제 사용

Fig. 3 부유고형물질의 유입량에 따른 침전조의 농도분포



(a) ↑ (b) ↓

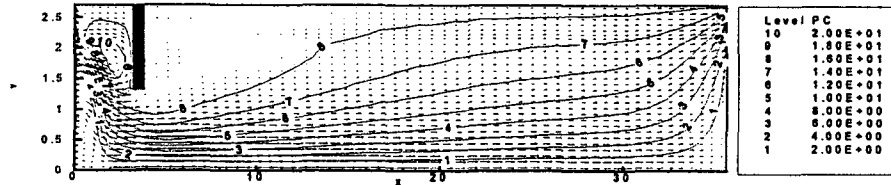


Fig. 4 침전조 유입부의 배플 존재 유무에 따른 유동장 변화

4. 결론

유한차분법을 사용한 컴퓨터 프로그램을 이용하여 비압축성 유체, 정상상태, 수직 이차원 평면을 가정한 장방형 침전조의 운전변수에 따른 유동특성과 침전조의 성능을 파악하였다. 연구결과를 요약하면 아래와 같다.

첫째, 유입속도가 낮을수록 침전조의 제거효율은 증가하였으며 응집제를 사용한 경우 고형물질의 제거효율이 15% 이상 증가하였다.

둘째, 부유고형물질의 유입농도가 높은 경우 대부분의 고형물질이 유입부에 침전되어 제거되었다.

셋째, 배플이 존재하지 않는 경우 침전조 입구부분에서 폐쇄유동이 형성되는 것을 볼 수 있었으나 배플이 존재하는 경우에는 입자 침강에 유리한 형태인 균일한 흐름을 유지하였다.

기타 다양한 침전조의 형상과 중횡비, 배플의 형상 및 위치, 유입속도와 농도에 따른 부유고형물질의 침강효율에 미치는 영향은 지속적인 연구과제이다.

5. 참고문헌

- [1] 박병수, 김경미, 송우영, 장동순, 권오현, "수체 열유동 수치해석 프로그램 개발 및 응용 : 호소, 일차침전조", 한국수자원학회지 제29권 제6호, 1996년 12월
- [2] 이은주, 박병수, 박지영, 장동순, 이상일, "일차침전조 설계를 위한 수치해석적 연구 : SS 농도와 FTC", 한국환경공학회 제18권 제11호, 1996년 9월
- [3] A. I. Stamou, W.Rodi, "Numerical modeling of flow and settling in primary rectangular clarifiers", J. of hydraulic research, Vol. 27, No. 5, 1989
- [4] By Siping Zhou, J. A. McCorquodale, Member, ASCE, Z. Vitasovic, "Influence of density on circular clarifiers with baffle", J. of env. engg., Vol.118, No.6, Nov., 1992