

# 응집·침전지 유입 분배수로 設計인자의 數値解析적 연구

## A numerical study on the Design factor of Inlet Distribution channel for Flocculation/sedimentation basin

○ 윤장근·김정현·오정우·하은정

### 1. 서론

정수장에서의 침전지는 건설비의 30%정도를 차지하며 넓은 공간을 필요로 하므로 침전공정의 개선과 최적화에 따른 효율 향상이나 비용 절감의 효과는 매우 크다고 볼 수 있다. 침전지내에서의 침전효율은 원수 및 전처리조건이나 特性에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있는데 이미 1977년 Larsen이 직각 활성슬러지 일차 침전지에 대한 수학적 모델을 제시한 이래  $\kappa-\epsilon$ 亂流모델 등을 이용한 이론적, 수치해석적 연구(Stamou등<sup>3)</sup>)가 이루어지는 등 많은 연구가 있었다.

효과적인 침전에서 가장 중요한 것은 원수 중에 포함되어 있는 탁질의 적절한 응집이라고 할 수 있으며 따라서 응집·침전지로 유입되는 유량을 분배수로에서 均等分配하는 것은 각 침전지의 침전효율을 最適化한다는 관점에서 중요하다고 할 수 있다.

물론 Chao와 Trussell(1980)은 흐름 조절을 위해 사용하는 웨어나 오리피스의 흐름특성이 분배수로의 하류 끝에서 상류 끝까지 단계적으로 결정되는 방법을 제안하였다<sup>5)</sup>. 본 연구에서는 eulerian방법에 의한 SS모델을 이용하여 침전지내 유입 負荷率의 변동에 따른 침전지에서 탁질의 분포와 침전양상을 보이고 분배수로의 수치해석을 통하여 유량균등분배에 영향을 미치는 중요 설계인자를 파악해 보았다. 분배수로의 설계인자에는 총 유입유량(flow rate), 수로폭(channel width), 그리고 tapered형태로 분배수로를 설계할 경우 감소정도 등을 들 수 있다.

### 2. 수학적 모델 및 지배방정식

분배수로 및 침전지를 수치해석하기 위한 일반지배방정식은 다음과 같다.

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

본 수치해석에서는 위와 같은 일반지배방정식을 검사체적(control volume)에 기초하여 적분하는 有限差分방법(finite difference method)을 사용하였다.

윗 식(1)에서  $\phi$ 는 단위 질량당의 물리량으로 수평속도성분  $u$ , 수직속도성분  $v$ , turbulent kinetic energy  $\kappa$ ,  $k$ 의 소산율인  $\epsilon$ , 질량분율인  $mix$  등이 해당되며  $\Gamma_{\phi}$ 와  $S_{\phi}$ 는 각각 난류 확산계수와 생성항을 나타낸다. 또한 난류발생율인  $G_{k1}$ 은 다음 식(2)로 나타낼 수 있다. 또한 난류모델은 standard  $\kappa-\epsilon$  모델의 발전된 형태인 RNG  $\kappa-\epsilon$  모델을 사용하였다. 다음의 표1은 종속변수에 따른 확산계수와 생성항을 나타낸 것이다.

표1. 종속변수에 따른 확산계수와 생성항

	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
Horizontal Velocity	$u$	$\mu_{eff}$	$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial p}{\partial x}$
Vertical Velocity	$v$	$\mu_{eff}$	$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial y}$
Turbulent Kinetic Energy	$k$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G_{kl} - \rho \epsilon$
Dissipation Rate of $k$	$\epsilon$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G_{kl} - C_2 \rho \epsilon) - \rho R$

$$G_{kl} = \mu_t \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

여기서,

$$C_1=1.42, C_2=1.68, \sigma_\epsilon=1.22, C_\mu=0.09, \sigma_k=0.9$$

$$\mu_{eff} = \mu \left[ 1 + 2 \left( \frac{\rho C_\mu}{\mu} \right)^2 \frac{k}{\epsilon^{0.5}} + \frac{\rho C_\mu k^2}{\epsilon} \right]$$

$$R(\text{Rate of strain}) = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k} \quad \eta = S \frac{k}{\epsilon}, \beta=0.015, \eta_0 = 4.38$$

또한 浮遊고형물질(SS)의 농도분포는 eulerian 지배방정식의 해를 구하는 방법을 사용하였으며 임의의 크기를 가진 浮遊고형물질의 질량분율을  $m_i$ 라 한다면 지배방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho m_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u m_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v m_i)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_i} \frac{\partial(m_i)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_i} \frac{\partial(m_i)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (v_i \rho m_i)$$

윗 식에서  $v_i$ 는 직경그룹 영역에 있는 SS의 終末 침강속도를 나타낸다.  $\frac{\mu_t}{\sigma_i}$ 는 고형물질에 대한 난류확산 계수를 나타내는 것이다. 윗 식에서 마지막 항은 SS의 침강에 따른 생성항을 나타내는 것으로 임의의 검사체적에 대해 SS가 운동할 때 농도의 증가는  $-\nabla \cdot$  (終末 침강속도에 의한 SS의 유동 flux)로 나타나며 본 연구에서는 y방향으로 침강할 때 flux는 음의 값을 가지므로  $\frac{\partial}{\partial y} (v_i \rho m_i)$ 으로 나타낼 수 있다. 또한 SS에 대한 경계 조건은 벽면에 대해서는 zero gradient 조건을 주었고 free surface에 대해서는  $\frac{\mu_t}{\sigma_i} \frac{\partial m_i}{\partial y} + \rho v_i m_i = 0$  으로 나타내었다.

본 연구에 대상으로 선정된 정수장은 시설용량 62,000m<sup>3</sup>/일이며 총 2개의 혼화지 중 1개의 혼화지에서 6개의 응집·침전지로 분배되어 유입되며 이를 對稱조건 가정(그림1)으로 3개의 응집·침전지를 해석하였다. 그림2는 OR값의 변화에 따른 SS침전효율의 변화양상을 해석하기 위한 침전지의 경계조건을 나타낸 것이다.

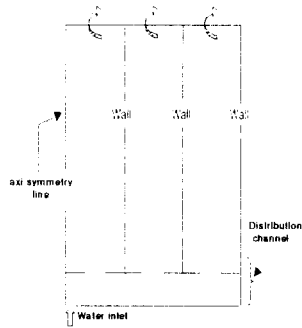


그림1. 대상 응집·침전지 분배수로 도식도

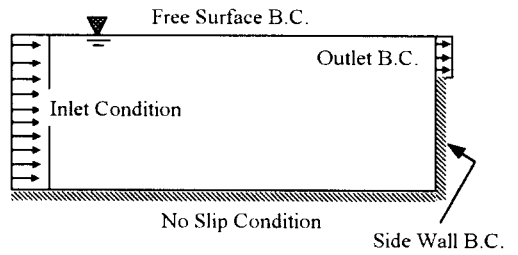


그림2. SS모델해석을 위한 침전지 도식도

다음 그림3은 각 조건별 流量 분배를 계산하기 위한 non-uniform 격자생성을 나타낸 것이다.

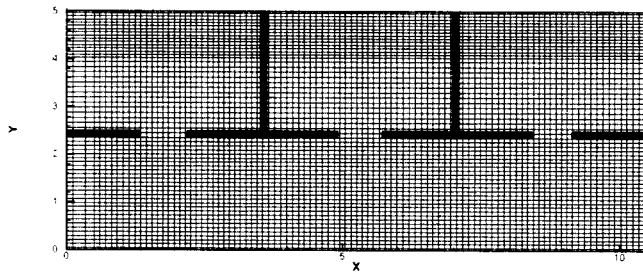


그림3. 계산영역의 mesh generating

본 수치해석을 수행하는데 있어 몇 가지 가정을 하였으며 다음과 같다.

- 실체는 시간에 따라 유량이 변하므로 unsteady로 해석해야 하지만 steady-state로 해석하였다.
- 바람의 영향이나 유입구에서 비대칭 문제로 3D로 해석해야 하지만 주운동방향을 고려해 2D로 해석하였다.
- 온도차이나 탁질의 밀도차에 의한 밀도류 영향은 무시하였다.
- SS모델에서는 flocculation에 의한 floc의 성장은 무시하였고 비응집성 입자로 가정하여 해석하였다.

### 3. 결론

그림4는 침전지에 유입되는 유량, 즉 OR값에 따른 침전효율의 변화를 나타내 주는 것으로 유입부분에서 100mg/l의 SS농도가 유입될 때 최대운전 OR값인 117m/d, 최대OR의 80%(93m/d), 50%(58m/d)에 따른 SS의 침전지내에서의 농도분포이다. 동일 조건에서 OR값이 증가할수록 전체적인 침전효율도 낮아질 뿐 아니라 오른쪽 하단부에서 SS농도가 유출부로 올라가는 것을 볼 수 있는데 이는 침전지 末端에서의 상승속도의 증가로 인한 것이다. 즉 분배수로에서 유량이 침전지로 균등분배되지 못하고 어느 한쪽의 침전지로 유량이 치우칠 경우에는 그 침전지 끝단에서 다른 침전지보다 높은 농도의 탁질이 월류될 수 있으며 각각의 침전지가 最適化에 방해요인이 될

수 있음을 보여주는 것이다.

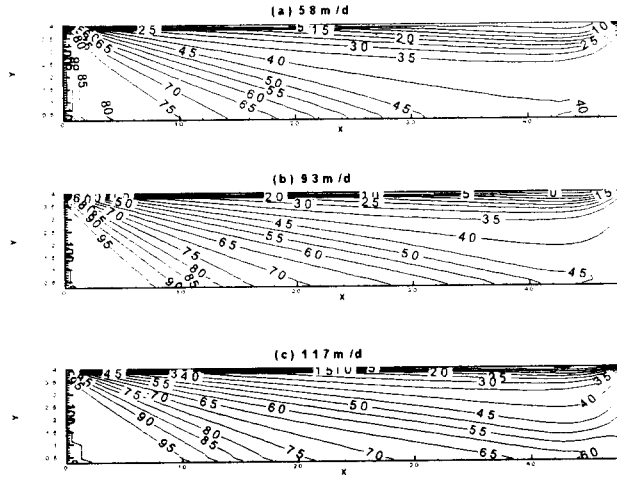


그림4. OR에 따른 침전지내 SS농도(mg/l)분포

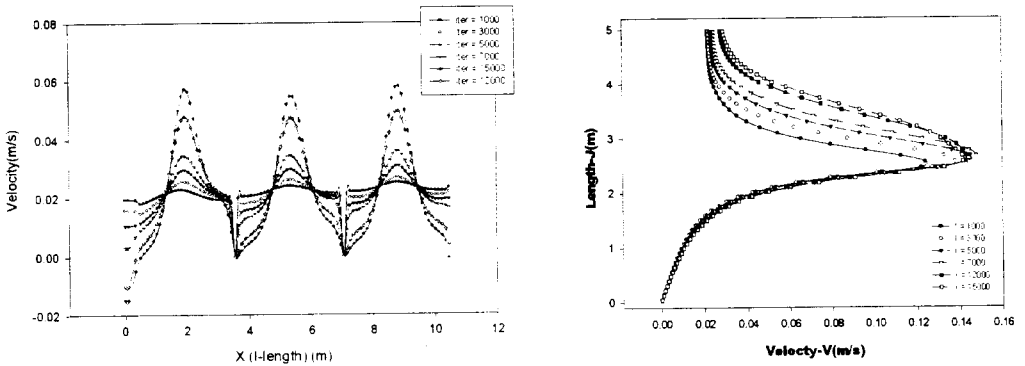


그림5. V-velocity convergence test with iteration at sedimentation basin inlet zone(j=45) & 2nd inlet channel (50,j)

그림5는 流量 均等分配 계산을 위한 수치해석시 반복계산을 하기 위한 iteration test로 1000, 3000, 5000, 7000, 12000, 15000번씩 반복계산하며 분배를 통해 각 응집·침전지로 들어가는 입구와 2nd basin 에서 j방향에 따른 v-속도를 계산해 본 것이다. 계산결과 두가지 모두 12000번 계산시 값이 收斂하고 있음을 알 수 있다.

그림6은 대상분배수로에서 유입속도 0.4m/s로 유입될 경우 각 응집·침전지의 입구에서의 속도벡터를 나타내며 각 응집·침전지 유입구에서 유입유량을 파악하였다.

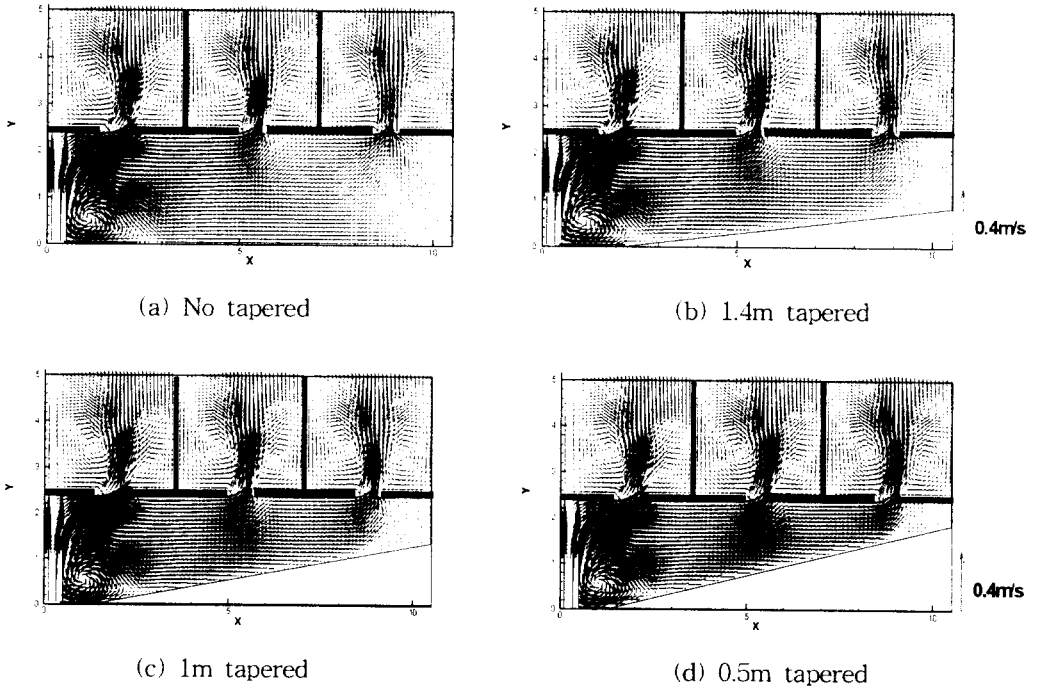
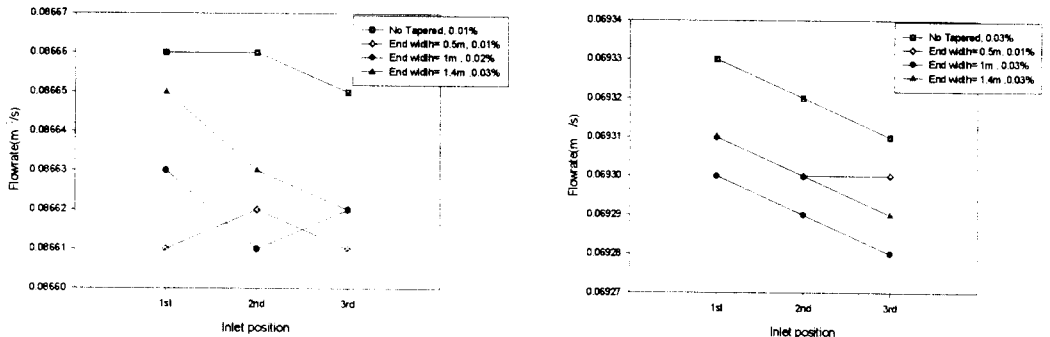


그림6. Vector plots of channel  
(Channel width = 2.4m ,  $V_{in} = 0.4m/s$ )

그림7은 수로폭이 2.4m일 경우 총 유입유량과 수로의 tapered 정도에 따른 양상을 나타낸다.



(a)  $V_{in}=0.4m/s$

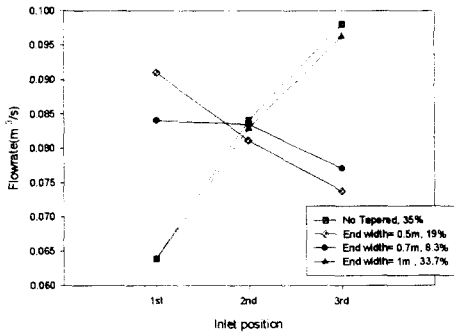
(b)  $V_{in}=0.32m/s$

그림7. Flow rate calculation with  $V_{inlet}$  & tapered type(channel width; 2.4m)

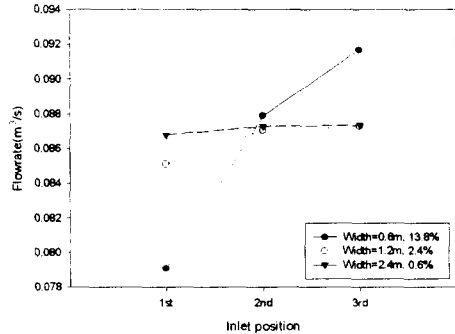
(a)는 0.4m/s로 유입되는 경우이고 (b)는 0.32m/s로 유입되는 경우 각 응집·침전지로 분배되어 유입되는 유량을 파악한 것으로 tapered 형태에 따라 1지, 2지, 3지로 들어가는 유량이 약간씩 차이가 있지만 그 유량차이가 0.01%~0.03%로 무시할 만하다. 즉 실제 대상 정수장의 수로폭인 2.4m일 때에는 유입유량과 tapered 정도에 상관없이 유량균등분배가 잘 이루어진다고 할 수 있다.

또한 수로폭을 1.4m로 임의로 줄인 상태에서 위와 같은 수치해석을 수행하여 보았으며 그림

8-(a)는 이 결과를 나타내는 그림으로 tapered를 0.7m로 하였을 경우 유량차이가 8.3%로 가장 좋았으며 tapered를 주지 않거나 작게 주었을 경우(수로 末端幅=1m)는 35%, 33.7%로 유량차이가 크게 나타났고 tapered를 너무 크게 주었을 경우(0.5m)는 오히려 1차로 들어가는 유량이 많음(19%)을 볼 수 있다. 그림8-(b)는 Chao와 Trussell이 제시한 에너지 방정식과 유량방정식의 시행착오법 계산에 의한 유량분배계산 수치해석<sup>5)</sup>에 의한 결과로 수로폭을 0.6m, 1.2m, 2.4m로 변화시켜가며 유량분배를 계산한 것이다. 여기에서도 수로폭이 작을수록 유량균등분배에 좋지 않은 영향이 있음을 알 수 있다.



(a)  $V_{in}=0.4m/s$ (channel width; 1.4m)



(b) Flow rate changes with channel width (Chao & Trussell)

그림8. Flow rate calculation with  $V_{inlet}$  & tapered type(channel width; 1.4m)

본 수치해석의 수행결과 응집·침전공정의 유량균등분배는 총유입유량, 분배수로의 경사정도보다는 수로폭의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있었다. 즉 어느정도 크기이상의 수로폭은 傾斜角을 주지 않아도 유량균등분배에 문제가 없다는 것이다. 하지만 과대한 수로폭의 크기는 분배수로 내에 고형물이 침전될 우려가 있으므로 설계유량에 따른 적정의 수로폭 결정이 필요하다고 생각된다. 또한 향후 분배수로 내의 고형물 침전문제와 바람과 침전지내의 밀도류나 偏流 등의 영향을 고려하는 것이 필요하다고 생각된다.

<참고문헌>

1. Camp, T.R. "Sedimentation and the design of settling tanks", Trans., ASCE Vol III, pp895-936 (1946)
2. 장동순 외 4인, "일차침전조 설계를 위한 수치해석적 연구:SS농도와 FTC", 대한환경공학회지 Vol.18 No. 11, pp1335-1346(1996)
3. Stamou, A.I., E.W. Adams and W. Rodi, "Numerical modeling of flow and settling in primary rectangular clarifiers", journal of Hydraulic Research, Vol.27, No.5 pp665-682(1989)
4. Suhas V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", (1980)
5. Chao, J. L. and Trussell, R. R., "Hydraulic Design of Flow Distribution Channels" journal of Environmental Engineering Division, ASCE. 106,321(1980)

<감사의 글>

본 연구는 환경부 환경기술연구개발사업(공공기술연구개발사업)의 "정수장 진단기술의 개발" 연구과제의 일부로 수행되었습니다.