

슬러지계면층높이변화모델에서 컬럼높이에 대한 영향

The Effect of Column Height on Sludge-Water Interface Height Change Model

박석균* · 강선홍

Park, Suk Gyun* · Kang, Seon-Hong

광운대학교 환경공학과

(2006년 1월 11일 논문 접수: 2006년 2월 8일 최종 수정논문 채택)

Abstract

While sludge settles down in a column, sludge settling characteristic is influenced by effect parameters, interparticle force, wall effect etc. As the height of a column changes, the settling velocity of sludge-water interface changes, too. At lower sludge concentration, particular effect was not observed by the difference of column height, however it was observed that settleability of sludge was greatly influenced by column height when sludge settling was poor or sludge concentration was high. It is therefore required to consider the effect of column height when the power model for sludge interface settling is established. In the tests, there was hardly any SVI_{15} (SVI after "t" minutes) difference in each column after 10min at $1.5\text{kg}/\text{m}^3$ of sludge concentration. When sludge concentration was at $2.5\text{kg}/\text{m}^3$, SVI_{15} tended to be constant after 20min. At $3.5\text{kg}/\text{m}^3$, SVI_{15} increased to 30minuets. The purpose of this work is to establish the correction factor that is able to compensate the errors derived from each different height of column.

Key words: Sludge Settling, Settling Velocity, Column Height, Sludge Interface, Correction Factor

주제어: 슬러지침전, 침전속도, 컬럼높이, 슬러지계면층, 보정계수

1. 서론

SBR공정은 단일 반응조에서 유기물, 질소 및 인을 제거하기위해서 개발되었다. SBR공정의 장점을 향상시키기 위해서 batch column에서의 슬러지침전특성을 이해하는 것은 중요하다. 슬러지의 물리적특성 및

컬럼높이는 슬러지계면층높이변화모델의 오차를 유발시키는 주요한 원인이다. 컬럼의 높이가 달라지면, 각 컬럼내 슬러지의 침전특성도 달라진다. 많은 학자들은 슬러지침전속도를 계산함으로써 슬러지의 침전특성을 파악하기 위한 노력을 해왔다. 슬러지용량 지표인 SVI, SSVI, 및 $SSVI_{3,5}$ 등은 슬러지침전속도계산에 이용되어 왔다. Koopman와 Cadee(1983)는

*Corresponding author Tel: +82-2-940-5075, FAX: +82-2-911-2033, E-mail: k2ljp@hanmail.net (Park, S.G)

DSVI(Diluted Sludge Volume Index)를 이용한 슬러지 침전속도모델을 제시하였다. Pitman(1984)은 SVI와 슬러지침전속도의 관계뿐만 아니라, SSVI_{3.5}와 슬러지침전속도의 관계에 대한 연구를 수행하였다. 이 연구에서 SVI는 SSVI_{3.5}에 비해 슬러지침전속도모델에 잘 맞지 않았다. Daigger와 Roper(1985)는 SVI와 슬러지최대침전속도(V_0)를 함께 이용한 슬러지침전속도모델을 제시하였다. 이외에 Wahlberg와 Keinath(1988)는 SSVI와 슬러지침전속도 관계를 보여주었으며, Daigger(1995)는 많은 자료들을 수집하여 이전에 제시한 슬러지침전모델 보다 개량된 모델을 제시하였다. 본 연구에서는 침전컬럼의 높이차에 의해 발생하는 슬러지계면층의 침전특성변화를 보다 정확하게 예측하기 위해서 보정계수를 이용하여 컬럼 특성에 따른 오차 보정방법을 제시하였다.

2. 실험재료 및 방법

J하수처리장의 호기조로부터 채취된 슬러지는 높이 30cm, 60cm 및 90cm의 각 컬럼속에 놓여졌다. Batch형 침전컬럼에 슬러지를 주입한 후 수중산기기를 이용하여 완전히 혼합시켰다. 그리고 슬러지는 수중산기기의 작동이 멈추고 동시에 정지상태에서 침전되었다. 컬럼속 슬러지계면층의 높이는 1분마다 측정되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 슬러지계면층 높이

박과 강(2006a)은 슬러지계면층의 높이를 예측하기 위해 Eq. 1과 같은 슬러지계면층높이모델을 제시하였다.

$$H_t = H_0 \frac{0.0444e^{0.5256X} + 0.87(1 - e^{-1.18(-X+5.56)})e^{(0.03X-0.178)t}}{0.9} \quad (1)$$

3.2. Consideration for the Effect on Sludge Characteristic

박과 강(2006b)은 슬러지계면층높이모델이 각 슬러지들에 적용되기 위해서는 Eq. 2, Eq. 3 및 Eq. 4 같이 보정계수를 이용하여 슬러지침전특성을 고려하

는 것이 필요하다고 하였다.

$$H_t = H_0 \frac{0.0444e^{0.5256X} + 0.87(1 - e^{-1.18(-X+5.56)})e^{(0.03X-0.178)t}}{0.9} Fa_{SVI} \quad (2)$$

$$H_t = H_0 \frac{0.0444e^{0.5256X} + 0.87(1 - e^{-1.18(-X+5.56)})e^{(0.03X-0.178)t}}{0.9} Fa_{SSVI} \quad (3)$$

$$H_t = H_0 \frac{0.0444e^{0.5256X} + 0.87(1 - e^{-1.18(-X+5.56)})e^{(0.03X-0.178)t}}{0.9} Fa_{SSVI3.5} \quad (4)$$

3.3. 컬럼높이에 의한 영향

슬러지가 batch column에서 침전하는 동안 슬러지의 침전특성은 슬러지상호간의 간섭 및 wall영향 등에 의해 영향을 받는다. 또한 컬럼의 높이가 변화되면 슬러지의 침전속도도 변화한다. 따라서 Eq. 1을 현장에 적용하기 위해서는 컬럼높이에 의한 영향도 고려되어야 한다. Dick와 Ewing(1967)은 슬러지계면층의 초기 높이는 슬러지침전에 중요한 인자이며, 초기 높이가 낮을 경우에는 하부에 침전된 슬러지에 의한 영향을 고려해야 한다.

Christopher(1998)는 높이 50cm, 100cm, 150cm 및 200cm의 컬럼을 이용하여 슬러지컬럼 높이에 따른 슬러지계면층의 최종높이를 예측하였다. 그는 각 침전컬럼속의 슬러지계면층이 30분 내에 최종계면층 높이(H_f)까지 침전하지 못하거나, 도달하지 못할 경우에는 Eq. 5를 이용하여 슬러지계면층높이를 예측하였다. 그리고 슬러지계면층이 30분 내에 H_f 에 도달될 경우에는 Eq. 5를 Eq. 6으로 간략화 시킴으로써 슬러지계면층높이를 예측하였다. 그러나 Christopher(1998)는 슬러지가 침전하는 동안 슬러지의 농도가 변하고, 이로 인해 슬러지의 침전속도가 변하지만 이 점을 고려하지 않았다.

$$SVI = \left(\frac{H_0 - (V_0 e^{-KX} (0.5 - t_f))}{XH_0} \right) \times 1000 \text{ (mL/g)} \quad (5)$$

$$SVI = \frac{1000}{X_m} \text{ (mL/g)} \quad (6)$$

다양한 크기의 컬럼내 슬러지들의 침전성을 파악하기 위해 농도가 1.5kg/m³, 2.5kg/m³ 및 3.5kg/m³인 슬러지와, 높이가 30cm, 60cm 및 90cm인 컬럼들을

Table 1. Range and typical values of SVI, according with five settleability ranges

Settleability	Sludge volume index (mL/g)	
	range	typical
Very good	0-50	45
Good	50-100	75
Fair	100-200	150
Poor	200-300	250
Very poor	300-400	350

본 실험에 이용하였다. 낮은 농도($X = 1.5\text{kg/m}^3$)에서는 컬럼높이에 따른 슬러지침전특성의 변화는 거의 발견되지 않았다.

슬러지농도가 1.5kg/m^3 , 2.5kg/m^3 및 3.5kg/m^3 일 때 측정된 각 SVI값은 237, 206 및 158이었다. Marcos와 Carla(1999)는 슬러지침전특성에 따른 SVI 값을 Table 1에서 보여주었다. Dick와 Vesilind(1969)는 좋은 침전성을 가진 슬러지의 경우 슬러지의 농도가 6kg/m^3 을 넘어서면 슬러지간섭에 의해 SVI가 심각하게 영향을 받으며, 슬러지의 침강성이 나쁠 경우에는 슬러지농도가 2kg/m^3 일때도 심각하게 영향을 받을 수 있다고 하였다. Table 1에 의하면 본 실험에 이용된 슬러지는 나쁜 침강성을 가지고 있다. 따라서 박과 강(2006b)이 제시한 슬러지농도와 SVI관계식(Eq. 7)에 의해 계산된 SVI값과, 직접 측정된 SVI값은 큰 차이를 보였다. 이들 SVI값의 차이로 인한 슬러지계면층 예측오차는 보정상수(F_{aSVI})를 이용하여 보정할 수 있다(박과 강 2006b).

$$SVI = 112.56645 + 81.1656e^{(-1.19665(X-4.9274)^2)} \quad (7)$$

슬러지의 침강성이 나쁘기 때문에 좁은 슬러지농도범위에서도 슬러지침강곡선의 여러 가지 패턴을 얻을 수 있었다. 슬러지농도가 1.5kg/m^3 인 경우 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 침전곡선은 "L" 형의 침전형태를 보여주었다. "L" 형의 침전형태는 일반적으로 슬러지가 좋은 침전성을 가지고 있을 때 관찰되는 침전곡선이다. 슬러지농도가 2.5kg/m^3 인 경우는 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 "S" 형 침전곡선을 보여주며, 컬럼높이에 따라 약간의 슬러지침전특성이 변하는 것으로 관찰되었다. 이 "S" 형 침전곡선은 정상적

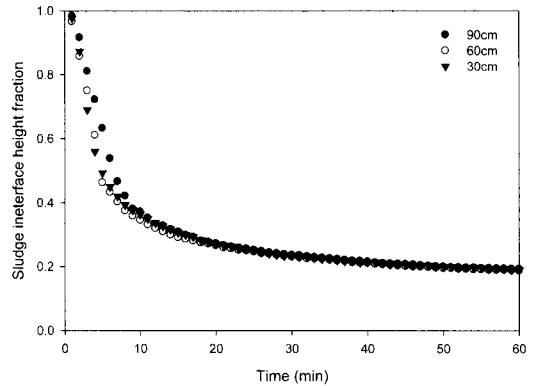


Fig. 1. Evolution of the sludge interface height fraction in function of time for each different column height at 1.5kg/m^3 of X.

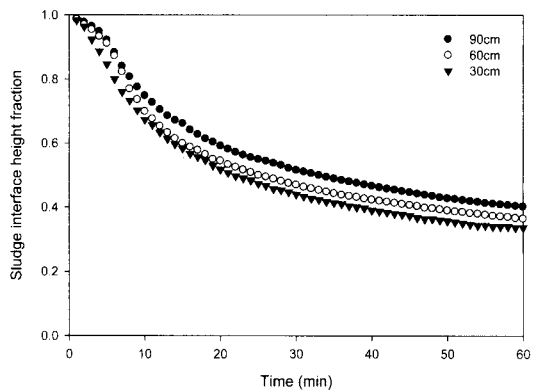


Fig. 2. Evolution of the sludge interface height fraction in function of time for each different column height at 2.5kg/m^3 of X.

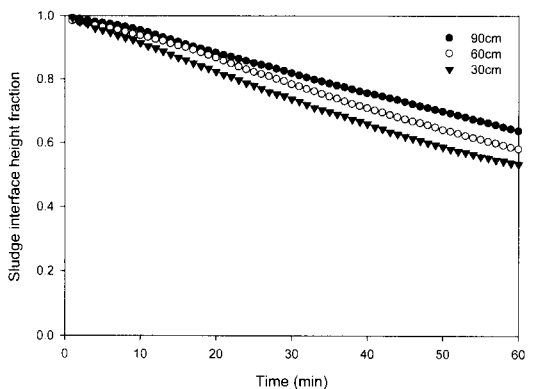


Fig. 3. Evolution of the sludge interface height fraction in function of time for each different column height at 3.5kg/m^3 of X.

으로 운전하는 활성슬러지공정 내 슬러지에서 보여주는 침전형태이다. 슬러지 농도가 3.5kg/m^3 이었을 때

침전곡선은 Fig. 3처럼 나쁜 침강성에 기인하여 transition point를 보이지 않은 선형의 형태를 보여 주었다. 이 농도에서 일반적인 슬러지는 Fig. 3과 같은 선형이 아니라 박과 강(2006a)에서 같이 "S"형 침전곡선을 보여준다.

각 컬럼에서 컬럼높이에 대한 슬러지계면층높이비 ($F_{r,t}$)의 차이는 침전시간이 진행됨에 따라 점점 감소하였다.

슬러지침전의 초기기간 동안에는 슬러지농도가 높아질수록 컬럼내 슬러지들이 상호간섭에 의해 쉽게 영향을 받기 때문에 각 컬럼의 $F_{r,t}$ 가 다른 값을 보인다. 따라서 SVI도 상기와 같은 간섭작용에 의한 영향을 받을 수 있다.

그러나 초기 구간에 슬러지농도에 기인해서 각 $F_{r,t}$ 가 다른 값을 보이기도 하지만 $F_{r,t}$ 은 슬러지농도에 상관없이 침전말기에 동일한 값을 보여 주었다. 슬러지의 침강성이 좋은 경우에는 각 컬럼의 $F_{r,t}$ 의 차이는 작아진다. 만약 슬러지의 침강성이 나쁠 경우에는 최종침전높이에 도달되는 시간이 오래 걸린다. 그리고 Fig. 1, Fig. 2 및 Fig. 3에 의하면 컬럼의 높이가 높을 경우 $F_{r,t}$ 는 높은 값을 보이며, 낮은 높이의 컬럼에서는 낮은 값을 보였다.

SVI는 일반적으로 1L 컬럼에서 30분 동안의 침전으로 측정된다. 하지만 SVI에 대한 30분이라는 시간이 적절한 시간인지 그리고 SVI가 컬럼높이변화에 영향을 받는지에 대한 의문점이 있다. 이와 같은 의문점을 풀기위해서 농도 1.5kg/m³, 2.5kg/m³ 및 3.5kg/m³의 슬러지를 30cm, 60cm, and 90cm의 컬럼에서 침전 시키면서 "t" 시간 후의 슬러지부피와 슬러지무게를 측정하여 SVI를 측정하였다. Fig. 4에서 보여주는 바

와 같이 슬러지농도가 1.5kg/m³일 경우 침전 10분후부터 각 컬럼의 SVI_t의 차이는 크지 않았다.

슬러지농도가 2.5kg/m³인 경우에는 Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 20분 이후부터 SVI_t가 일정해지는 경향을 보였다. 그리고 슬러지농도가 3.5kg/m³일때 SVI_t는 Fig. 6에서 보여주는 바와 30분 이후에도 약간의 증가가 나타났지만 증가율은 미미하므로 SVI_t가 약 30분 이후부터는 안정화되었다고 보아도 무방한 것으로 판단된다. 따라서 30분은 컬럼의 높이, 슬러지농도 및 슬러지침강성에 상관없이 SVI를 얻는데 적절한 시간인 것으로 판단되었다.

슬러지침전시간 30분이 SVI 측정에 적절한 시간으로 판단될 수 있지만, 컬럼높이에 관계없이 각 컬럼의 SVI가 동일한 값을 갖는 것은 아니다. 따라서 SVI₃₀이 일반적으로 사용되는 1L컬럼이 아닌 경우에는 용량변화상수나, 높이변화상수 등을 이용하여 SVI₃₀을 수정하는 것이 필요하다.

Eq. 8은 Fig. 7, Fig. 8 및 Fig. 9의 직선을 토대로 만들어 졌다. 컬럼높이변화실험으로부터 얻어진 변수 a와 b는 Table 2에 정리하였다.

$$F_{r,t} = a \cdot H_0 + b \quad (8)$$

슬러지농도가 3.5kg/m³인 경우 변수 a는 시간이 지남에 따라 증가하였지만, 슬러지농도가 2.5kg/m³인 경우에는 증가하는 시간과 반대로 감소하였다. 변수 b는 슬러지농도에 상관없이 시간의 흐름에 따라 감소하는 추세를 보인다. 슬러지농도가 낮은 경우에는 컬럼높이에 의한 영향이 작기 때문에 Table 2에 슬러지농도 1.5kg/m³에 대한 변수 a와 b는 표시되지

Table 2. Parameter a and b obtained for column height variation experiments

		$F_{r,t} = a \cdot H_0 + b$		
	time(min)	a	b	r ²
3500mg/L	15	0.0008	0.8463	0.9173
	30	0.0013	0.6983	0.9939
	45	0.0018	0.5539	0.8647
	60	0.0017	0.4793	0.9969
2500mg/L	15	0.0013	0.536	0.9024
	30	0.0013	0.3993	0.9834
	45	0.0012	0.315	0.9978
	60	0.0011	0.303	0.9937

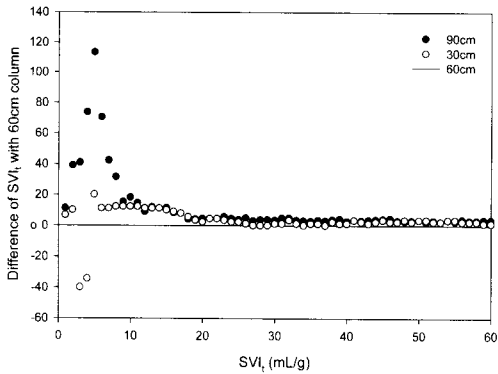


Fig. 4. Difference among SVI_I for each different column height at 1.5kg/m³ of sludge concentration.

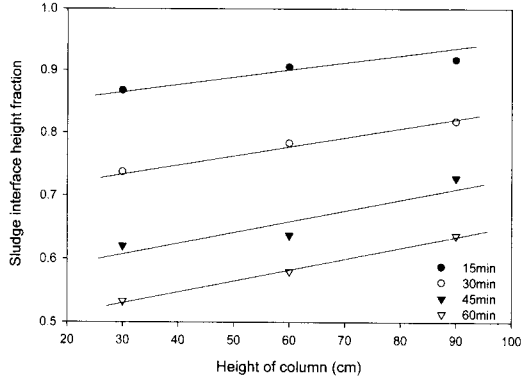


Fig. 7. The sludge interface height fraction-height of column line at different time with 3.5kg/m³ of X.

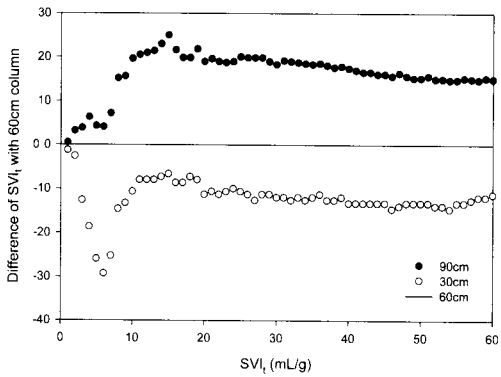


Fig. 5. Difference among SVI_I for each different column height at 2.5kg/m³ of sludge concentration.

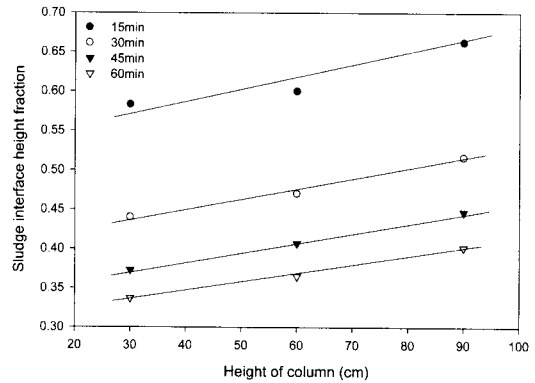


Fig. 8. The sludge interface height fraction-height of column line at different time with 2.5kg/m³ of X.

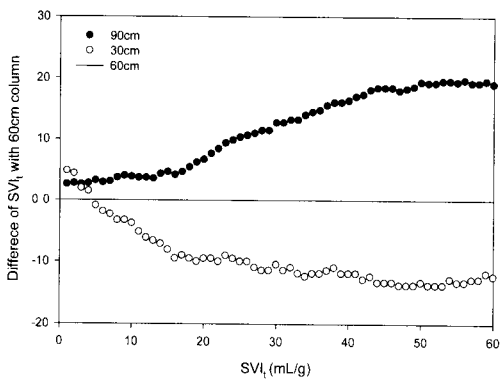


Fig. 6. Difference among SVI_I for each different column height at 3.5kg/m³ of sludge concentration.

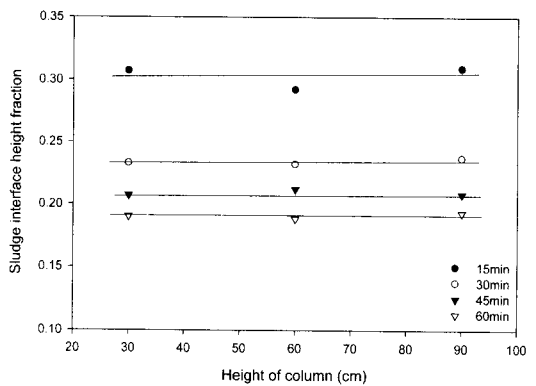


Fig. 9. The sludge interface height fraction-height of column line at different time with 1.5kg/m³ of X.

않았다.

농도 3.5kg/m³의 슬러지변수 a와 침전시간과의 관계를 보여주는 Fig. 10으로부터 Eq. 9($r^2 = 0.931$)가 도출되었다. 그리고 시간과 변수 b의 상관관계는 Fig. 11과 같으며 이들의 상관관계는 Eq. 10로 수식화 될 수 있다. 농도가 2.5kg/m³인 슬러지의 변수 a와 시간과의 관련성은 Fig. 12에 나타내었고, 이들의 상관관계는 Eq. 11($r^2 = 0.9$)로 수식화될 수 있다. 변수 b와 시간의 관계 및 관련식은 Fig. 13과 Eq. 12에 나타내었다.

$$a = 0.002(1 - e^{-0.0355 \cdot t}) \quad (9)$$

$$b = -0.0083 \cdot t + 0.9558 \quad (10)$$

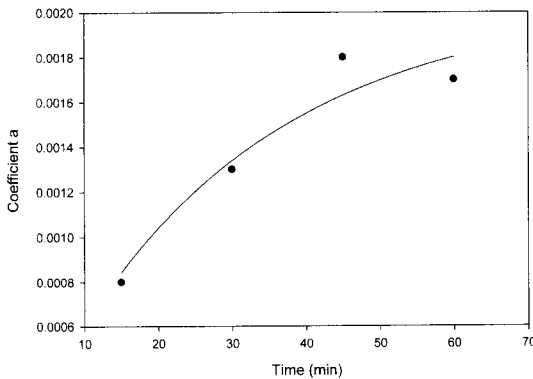


Fig. 10. Evolution of parameter a in function of time with 3.5kg/m³ of sludge concentration ($r^2 = 0.931$).

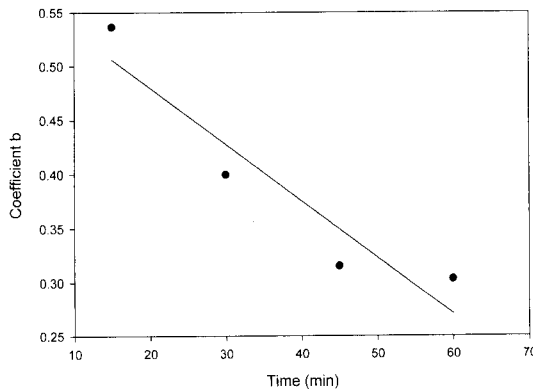


Fig. 11. Evolution of parameter b in function of time with 3.5kg/m³ of sludge concentration ($r^2 = 0.98$).

$$a = -1.11 \times 10^{-7} \cdot t^2 + 3.667 \times 10^{-6} \cdot t + 0.001275 \quad (11)$$

$$b = -0.0052t + 0.584 \quad (12)$$

킬럼높이에 의한 영향을 예측하기 위해서 도출한 Eq. 8에, 상기에서 언급된 변수 a와 b를 슬러지침전 특성에 따라 적용시킴으로써 보다 정확한 예측이 가능하다.

슬러지의 침전성이 나쁘고 슬러지곡선이 Fig. 3과 같이 transition point를 보이지 않는 선형에 가까울 경우에는 Eq. 9과 Eq. 10을 Eq. 8에 결합시켜서 Eq. 13을 도출하였다.

$$F_{t,t} = a \cdot H_o + b = 0.002(1 - e^{-0.0355 \cdot t}) \cdot H_o - 0.0083 \cdot t + 0.9558 \quad (13)$$

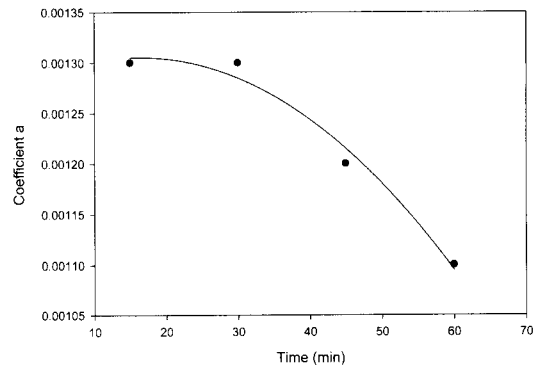


Fig. 12. Evolution of parameter a in function of time with 2.5kg/m³ of sludge concentration ($r^2 = 0.98$).

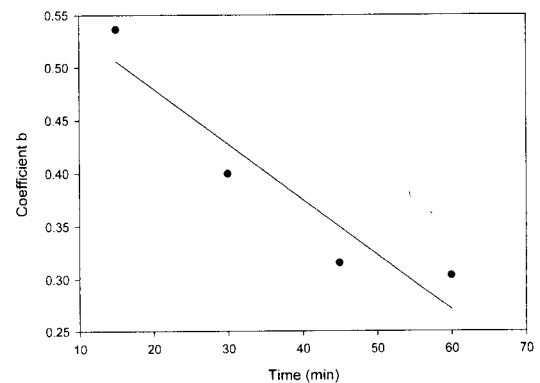


Fig. 13. Evolution of parameter b in function of time with 2.5kg/m³ of sludge concentration ($r^2 = 0.887$).

슬러지가 Fig. 2와 같이 “S” 형태로 침전된 경우에 Eq. 11과 Eq. 12를 Eq. 8에 결합시켜 Eq. 14를 도출하였다.

$$F_{r,t} = -1.11 \times 10^{-7} \cdot H_0 \cdot t^2 \cdot + (3.667 \times 10^{-6} \cdot H_0 - 0.0052) t + 0.001275H_0 + 0.584 \quad (14)$$

컬럼높이에 의한 침전영향을 고려하기 위해서 각 컬럼속 침전슬러지의 높이분율($F_{r,t}$)을 Eq. 1과 결합하면 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$H_t = H_0 \frac{0.0444e^{0.5256X} + 0.87(1 - e^{-1.18(X+5.56)}) \cdot e^{(0.03X-0.178)t}}{0.9} \times (1 + F_{r,t} \cdot H_0 - F_{r,t} \cdot 90) \quad (15)$$

3.4. 모델적용

컬럼높이에 의해 슬러지계면층의 높이가 영향을 받는 경우에는 슬러지계면층높이변화모델은 Eq. 2나 Eq. 3이나 Eq. 4중 실험조건에 따라 선택된 식과, Eq. 13이나 Eq. 14중 슬러지침전특성에 따라 선택된 식을 아래와 같이 결합하여 얻을 수 있다.

$$H_t = H_0 \frac{0.0444e^{0.5256X} + 0.87(1 - e^{-1.18(X+5.56)}) \cdot e^{(0.03X-0.178)t}}{0.9} \times (Fa_{SVI} \text{ or } Fa_{SSVI} \text{ or } Fa_{SSV130}) \times (1 + F_{r,t} \cdot H_0 - F_{r,t} \cdot 90) \quad (16)$$

또한 Eq. 16는 슬러지침전특성에 따라 아래와 같이 구분되며 적용될 수 있다.

a. 슬러지의 침전형태가 L형을 보이는 경우

$$H_t = H_0 \frac{0.0444e^{0.5256X} + 0.87(1 - e^{-1.18(X+5.56)}) \cdot e^{(0.03X-0.178)t}}{0.9} \times (Fa_{SVI} \text{ or } Fa_{SSVI} \text{ or } Fa_{SSV130}) \quad (17)$$

b. 슬러지의 침전형태가 선형을 보이는 경우

$$H_t = H_0 \frac{0.0444e^{0.5256X} + 0.87(1 - e^{-1.18(X+5.56)}) \cdot e^{(0.03X-0.178)t}}{0.9} \times (Fa_{SVI} \text{ or } Fa_{SSVI} \text{ or } Fa_{SSV130}) \times (1 + 0.002(1 - e^{-0.0355 \cdot t}) \cdot H_0 - 0.18(1 - e^{-0.0355 \cdot t})) \quad (18)$$

c. 슬러지의 침전형태가 S형을 보이는 경우

$$H_t = H_0 \frac{0.0444e^{0.5256X} + 0.87(1 - e^{-1.18(X+5.56)}) \cdot e^{(0.03X-0.178)t}}{0.9} \times (Fa_{SVI} \text{ or } Fa_{SSVI} \text{ or } Fa_{SSV130}) \times (1 - (1.11 \times 10^{-7} \cdot H_0 - 99.9 \times 10^{-7})t^2 + (3.667 \times 10^{-6} \cdot H_0 - 0.0003294)t + 0.001275H_0 - 0.11475) \quad (19)$$

4. 결론

슬러지가 침전하는 동안 슬러지의 침전특성은 계속 변하기 때문에 여러 학자들에 의해 제시되는 슬러지침전속도식만으로 슬러지계면층의 높이를 예측하기는 어렵다. 침전컬럼속 슬러지계면층의 높이 변화는 초기슬러지농도, 최대침전속도 및 슬러지용량지표(SVI 또는 SSVI 또는 SSVI_{3.5}) 등에 의해 수식화 될 수 있다. 슬러지특성을 고려한 새로운 경험식 모델은 실험결과를 바탕으로 $H_t = Y_0 + ae^{-bt}$ 과 같이 표현될 수 있다. 슬러지의 농도가 낮아서 슬러지간의 간섭이 작거나, 슬러지의 침강성이 좋은 경우에는 각 컬럼의 높이에 따른 슬러지계면층의 침전특성은 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 슬러지농도가 높거나, 슬러지침강성이 나쁜 경우에는 침전초기에 각 컬럼의 높이에 따라 슬러지계면층의 침전특성도 달라졌다. 따라서 슬러지계면층높이변화모델을 다양한 크기의 침전컬럼에 적용시키기 위해서는 컬럼높이에 대한 영향을 고려해야 한다. 이와 같은 문제는 보정계수($F_{r,t} = a \cdot H_0 + b$)를 이용함으로써 해결되었다.

보기

DSVI = 희석 슬러지 부피지표(mL/g)

Fa_{SVI} = SVI에 대한 보정계수

Fa_{SSVI} = SSVI에 대한 보정계수

Fa_{SSV130} = SSVI₃₀에 대한 보정계수

F_r = 최종침전슬러지의 높이분율

F_{r,t} = t분후의 침전슬러지 높이분율

F_{r,t,90} = 90cm컬럼에서 t분후의 침전슬러지 높이분율

H_f = 최종침전된 슬러지의 계면층높이(m)

H_t = 슬러지의 계면층 높이(m)

H₀ = 초기 슬러지계면층 높이(m)

SSVI = 교반된 슬러지 부피지표(mL/g)

$SSVI_{3.5}$ = 슬러지농도 3.5kg/m^3 에서의 $SSVI(\text{mL/g})$

SVI = 슬러지 부피지표(mL/g)

t_F = 슬러지침전이 발생되기 전까지의 시간

V = 간접침전속도(m/h)

V_0 = 최대침전속도(m/h)

X = 슬러지농도(kg/m^3)

X_m = 침전된 최대 슬러지농도(kg/m^3)

참고문헌

1. 박석균, 강선홍 (2006a), Batch column에서의 슬러지계면층 높이 변화예측, *상하수도학회지*, **20**(1), pp. 156-163.
2. 박석균, 강선홍 (2006b), 슬러지계면층높이모델에서 슬러지침전특성에 대한 영향, *상하수도학회지*, **20**(1), pp. 147-155.
3. Christopher, M. B. and Peter, L. D. (1998), Sludge Volume index Settleability measure: effect of solids characteristic and test parameter, *Wat. Env. Res.* **70**, pp. 87-93.
4. Daigger, G. T. and Roper, R. E., Jr. (1985), The relationship between SVI and activated sludge settling characteristics. *Journal Water Pollution Control Federation*, **57**(8), pp. 859-866.
5. Daigger, G. T. (1995), Development of refind clarifier operating diagrams using an updated settling characteristics database. *Water Environment Research* **67**(21), pp. 95-100.
6. Dick, R.I. and Ewing, B.B. (1967). Evaluation of activated sludge thickening theories. *J. San. Eng. Div. ASCE*, **93**, SA 4, Proc. Paper 5367, pp. 9-29.
7. Koopman, B., and Cadee, K. (1983), Prediction of Thickening Capacity Using Diluted Sludge Volume Index. *Water Res. (G.B.)*, **17**, p. 1427.
8. Marcos, V. S. and Carala, M. V. F. (1999), Determination of the required surface area for activated sludge final clarifiers based on a unified database, *Wat. Res.* **33**, pp. 1884- 1894.
9. Pitman, A. R. (1984), Settling of nutrient removal activated sludges. *Water Science and Technology* **17**, pp. 493-504.
10. Wahlberg, E. J. and Keinath, T. M. (1995), Development of settling flux curves using SVI : an addendum. *Water Environment Research*, **67**, p. 872.