

Batch Column에서의 슬러지계면층 높이변화 예측

Prediction of Sludge-Water Interface Height Change in Batch Column

박석균* · 강선홍

Park, Suk Gyun* · Kang, Seon-Hong

광운대학교 환경공학과

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

Abstract

While sludge is settling in batch column, sludge concentration becomes high. Because the characteristic of sludge settling changes in function of time due to the sludge concentration change, the sludge settling velocity changes too. Also, because the sludge settling characteristic is influenced by a physical characteristic of sludge and a column height etc, it is difficult to exactly measure the sludge settling characteristic. Although the sludge volume indexes, SVI, SSVI and SSVI_{3,5}, are used to predict sludge settling characteristic, these indexes are not reliable values. Because the previously established models for sludge settling velocity predict the sludge settling velocity only, it is difficult to predict sludge-water interface height by using those models. The purpose of this experiment is to establish the empirical model which predicts the sludge interface height change with respect to the sludge physical characteristic and the settling condition.

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

주제어: 슬러지 계면층, 슬러지 침전, 컬럼 높이, 침전속도

1. 서론

폐수 내 유기물, 질소 그리고 인을 제거하기 위해 개발된 A2O 공정은 혐기조, 무산소조, 호기조와 같은 다단으로 구성되었기 때문에 넓은 부지 및 높은 건설비가 요구된다. 이런 A2O 공정의 단점을 보완하기 위해서 단일 반응조에서 유기물, 질소 및 인을 제거

하는 SBR공정이 A2O공정대신 사용하게 되었다. 이런 SBR공정들의 침전운전 동안 반응조내 슬러지들은 batch형태로 침전하게 된다. 따라서 batch형 반응조를 설계하고 운전하기 위해서는 슬러지의 침전형태를 파악하는 것이 무엇보다 중요하다.

Batch형 반응조내에서 정확한 슬러지계면층의 높이 변화를 예측하기 위해서 ZSV(Zone Settling Velocity)를 이용하지만, 현장에서 ZSV를 측정하기

*Corresponding author Tel: +83-2-940-5075, Fax: +82-2-911-2033, Email: k2ljp@hanmail.net (Park, S.G)

위해서는 많은 시간과 노력이 요구된다. 따라서 슬러지의 침전특성을 파악하기 위해 소비되는 시간과 노력을 절약하기 위해서 많은 학자는 실제 현장에서 많이 이용되는 SVI를 이용하여 슬러지침전속도 예측모델들을 개발하였다(Hartel와 Popel, 1992; Akca, 1993; Ozinsky와 Ekama, 1995; Mines, 2001). SVI이 외에 SSVI 및 SSVI_{3,5} 등을 이용한 슬러지침전속도 모델들도 여러 학자에 의해 제시되었다. Koopman와 Cadee(1983)는 DSVI(Diluted Sludge Volume Index)를 이용한 슬러지침전속도모델을 제시하였다. Pitman(1984)은 SVI와 슬러지침전속도의 관계뿐만 아니라, SSVI_{3,5}와 슬러지침전속도의 관계에 대한 연구도 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 사이의 관계를 연구하였고, Daigger(1995)는 많은 자료를 수집하여 이전에 제시한 슬러지침전모델보다 개량된 모델을 제시하였다.

Batch column에서 슬러지가 침전하는 동안 슬러지 농도가 변하기 때문에 슬러지농도변화에 민감한 슬러지인자들이 이용된 슬러지침전속도모델들은 슬러지계면층높이변화예측에 적합하지 않다. 따라서 본 연구에는 슬러지침전이론을 바탕으로 침전기간동안 변화하는 슬러지농도에도 불구하고 정확한 슬러지계면층높이 예측이 가능한 경험모델식을 제시하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

지름 0.15m, 높이 1m의 아크릴로 만들어진 batch형 침전컬럼에 슬러지를 주입한 후 수중산기기를 이용하여 완전히 혼합시켰다. 그리고 슬러지는 수중산기기의 작동이 멈추고 동시에 정지상태에서 침전되었다. 실험에 사용된 슬러지는 J 하수처리장, T 하수처리장 및 S 하수처리장의 호기조에서 채취하였다. 이들 각각의 슬러지들은 실온에서 저장되었으며, 실험에 이용되기 전에 슬러지의 침전성을 향상시키기 위해 유기물 투입 없이 12시간 정도 포기되었다. 슬러지침전실험에서 수중산기기가 작동을 멈추어 슬러지

혼합이 이루어지지 않는 시점을 $t = 0$ 으로 설정하였다. 슬러지계면층의 높이는 1분마다 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 슬러지침전특성

슬러지계면층의 침전특성을 파악하기 위해 농도별 transition point 도달시간이 측정되었다. Fig. 1, Fig. 2와 Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 슬러지농도가 1.967, 2.467, 2.966kg/m³일 때 각 transition point에 도달하는 시간은 13, 14 그리고 15분이었다. 그러나 슬러지농도가 3.69kg/m³보다 높은 경우에는 transition point에 도달하는 시간이 급격히 증가하였다(Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6). 따라서 슬러지의 농도가 약 4kg/m³을 넘으면 슬러지간에 간섭이 증가함을 파악할 수 있었다. Dick와 Vesilind(1969)은 좋은 침전성을 가진 슬러지의 경우 슬러지의 농도가 6kg/m³을 넘어서면 슬러지간섭에 의해 SVI가 심각하게 영향을 받으며, 슬러지의 침강성이 나쁠 경우에는 슬러지농도가 2kg/m³

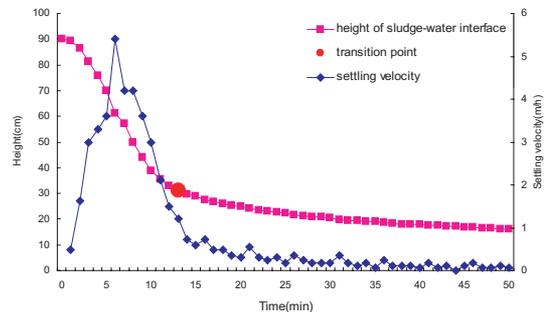


Fig. 1. The height and the settling velocity of sludge interface with initial sludge concentration of 1.967kg/m³.

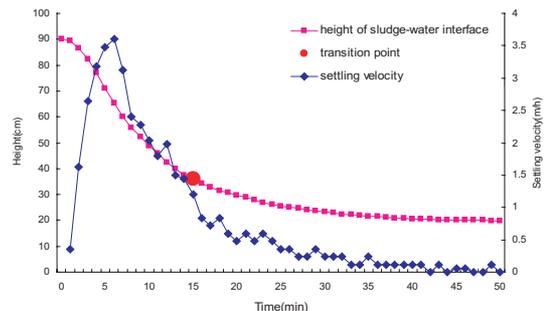


Fig. 2. The height and the settling velocity of sludge interface with initial sludge concentration of 2.467kg/m³.

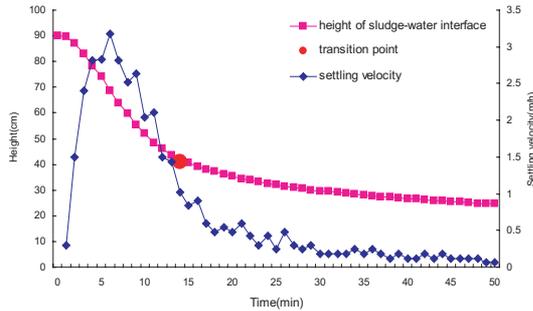


Fig. 3. The height and the settling velocity of sludge interface with initial sludge concentration of 2.966kg/m³.

보다 낮더라도 심각하게 영향을 받을 수 있다고 하였다. 따라서 SVI가 슬러지침전특성을 명확하게 제시하기에는 한계를 가지고 있다. 본 실험에 이용된 슬러지의 SVI는 110-120으로 약간 좋은 침전성을 가지고 있기 때문에 저농도(2-3kg/m³)에서는 SVI값은 큰 영향을 받지 않았다.

SVI는 슬러지의 농도뿐만 아니라 슬러지의 침전속도에 의해서도 영향을 받는다. 만약 30분 이내에 슬러지계면층이 침전을 멈추거나 침전슬러지 최종높이에 도달한다면 SVI는 시간에 대한 영향을 받지 않게 된다. 따라서 SVI는 상기에 언급된 이유 등에 기인해서 시간별 슬러지계면층의 높이 예측에 적합하지 않다.

침전컬럼의 형태도 슬러지침전특성에 영향을 준다. Vesilind(1968)은 슬러지농도가 낮은 경우 상향류 발생에 기인해서 컬럼의 지름이 작아질수록 슬러지의 침전속도가 더 빨라진다고 하였다. 반대로 슬러지의 농도가 높을 경우에는 슬러지간의 간섭 및 하부에 이미 침전된 슬러지층에 의한 영향으로 침전속도는 컬럼의 지름에 반비례한다고 하였다. 본 실험에 이용된 컬럼의 지름은 whiter(1976)가 제시한 10cm보다 크게 설계되어 wall 영향을 최소화시켰다.

슬러지가 침전하는 초기 짧은 시간동안 슬러지의 침전정도는 미미하였다. 이와 같은 현상은 이 기간 동안 침전컬럼 내에 혼합된 슬러지들은 응집되면서 슬러지계면층을 형성하기 때문이다. 상기 단계를 지나면서 슬러지계면층의 침전속도가 일정하게 되는 직선구간(간섭침전)이 발생하였다. 그리고 간섭침전과 압밀침전사이에 존재하는 transition상태를 거치면서 지역침전이 발생하였다. 이후, 중력에 의해 슬러지가

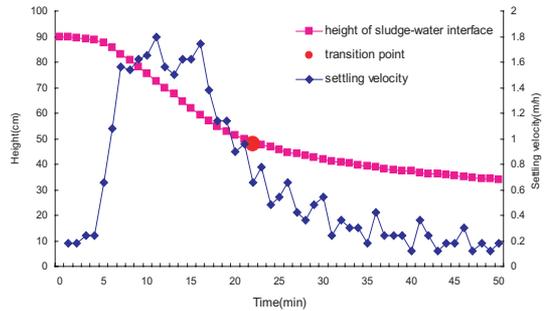


Fig. 4. The height and the settling velocity of sludge interface with initial sludge concentration of 3.69kg/m³.

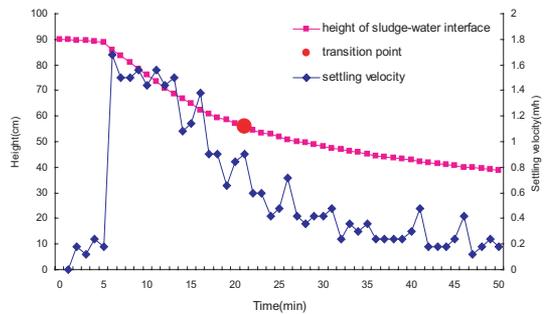


Fig. 5. The height and the settling velocity of sludge interface with initial sludge concentration of 4.108kg/m³.

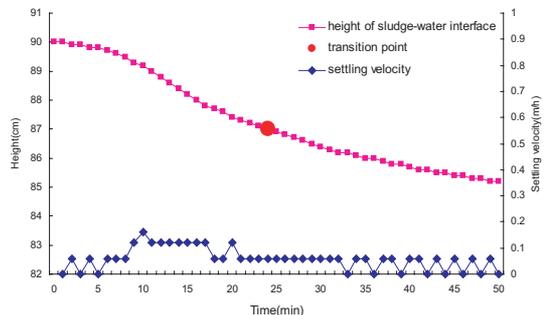


Fig. 6. The height and the settling velocity of sludge interface with initial sludge concentration of 5.52kg/m³.

농축되어 최종적으로 더 이상의 침전이 어려운 압밀 침전상태가 발생하였다. 따라서 슬러지침전곡선은 Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6에서 보여주는 바와 같이 초반에 급격히 감소하다가 나중에 천천히 감소하는 형태를 보인다. 그리고 Eq. 1은 이 슬러지침전곡선의 형태를 가장 잘 나타내는 모델식이다. 이 침전모델식 식(1)을 기준으로 침전실험에서 얻은 결과는 Table 1과 같다.

Table 1. Equations for sludge interface height at different concentrations (t = min)

Conc.(kg/m ³)	Equation(H _i)	r ²
1.967	0.1723+0.8959e ^{-0.1274 · t}	0.990
2.467	0.1920+0.8294e ^{-0.1027 · t}	0.994
2.966	0.2521+0.7576e ^{-0.1006 · t}	0.996
3.690	0.2677+0.7451e ^{-0.0507 · t}	0.984
4.108	0.3208+0.671e ^{-0.0471 · t}	0.990
5.520	0.8306+0.0785e ^{-0.0264 · t}	0.992

Renko(1996, 1997)는 슬러지침전형태가 1차 반응식과 유사한 형태로 보인다고 하였다. 따라서 그는 초기슬러지농도, 슬러지계면층높이 및 시간을 매계변수로 식(1)과 유사한 형태의 슬러지침전모델식을 제시하였다.

$$H_i = Y_o + ae^{-bt} \quad (1)$$

여기서, H_i = 슬러지계면층 높이(m)

Y_o, a 및 b = 상수

t = 시간(min)

3. 2. 침전슬러지 최종높이

Christopher(1998)는 슬러지농도(X)가 5kg/m³가 될 때까지 슬러지농도와 침전슬러지의 최종높이분율(F_r)의 관계는 Fig. 7에서 보여주는 바와 같이 좋은 선형을 보여준다고 하였다. 그러나 슬러지농도가 6kg/m³ 이상 높아지면 이들의 관계는 좋은 선형성을 보여주지 못한다.

슬러지농도가 1.967, 2.467, 2.966, 3.69, 4.108 및 5.52kg/m³이었을 때 농도별 침전슬러지의 최종높이(H_f)를 예측하기 위해 Fig. 7로부터 계산된 식을 이용하였다. Fig. 7로부터 얻어진 일차방정식(Christopher 식)에 의해 계산된 각 슬러지 농도별 침전슬러지의 최종높이는 0.1, 0.126, 0.151, 0.21 및 0.282m이었다. 그러나 실험으로 얻어진 침전슬러지의 최종높이는 Table 2에서 보여주는 바와 같이 Christopher식(F_r

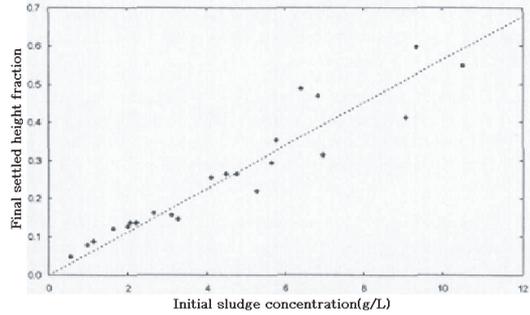


Fig. 7. Relationship between solids concentrations and final settled height fraction(Christopher, 1998).

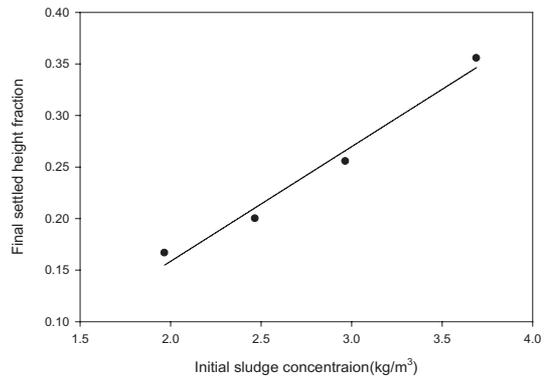


Fig. 8. Relationship between sludge concentrations and final settled sludge fraction.

= 0.567X)에 의해 계산된 침전슬러지의 최종높이보다 컸다.

예를 들면, Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 침전컬럼높이가 0.9m이고 슬러지농도가 1.967kg/m³ 경우 실험에 의해 측정된 침전슬러지의 최종높이는 0.15m이었지만, Christopher식에 의해 예측되는 침전슬러지의 최종높이는 0.1m이었다. 상기와 같이 실험결과와 Christopher식에 의해 도출된 결과가 다른 이유는 슬러지특성, 수온 및 기타 요인 등에 기인한다. Fig. 5과 Fig. 6에서는 슬러지계면층이 50분 동안 계속 침전하였기 때문에 정확한 침전슬러지의 최종높이를 측정할 수 없었다.

Table 2. Final settled height resulted by Christophe and from experiments

Conc.(kg/m ³)		1.967	2.467	2.966	3.69	4.108	5.52
Final settled height (m)	Data derived from Cristopher's equation	0.1	0.126	0.151	0.188	0.21	0.282
	Data resulted from experiment	0.15	0.18	0.23	0.32	-	-

Table 3. The final settled height in column at different concentrations

conc.(kg/m ³)	1.967	2.467	2.966	3.69	4.108	5.52
Final settled height(m)	0.155	0.21	0.266	0.346	0.393	0.55

본 실험의 슬러지최종높이분율(F_r)과 슬러지농도의 관계가 슬러지농도 5kg/m³까지 선형을 보일 것이라는 것은 Christopher식을 통해서 미루어 짐작할 수 있다. 따라서 상기 가정을 토대로 Fig. 8에서 보여주는 직선은 연장될 수 있다. 식(2)는 Fig. 8에서 얻어진 슬러지농도에 따른 침전슬러지의 최종높이분율식이다.

$$F_r = 0.1112X - 0.0639 \quad (2)$$

Fig. 5과 Fig. 6의 침전슬러지의 최종높이는 식(2)를 통해 유추해 볼 수 있다. 상기와 같은 방법으로 농도 4.108kg/m³과 5.52kg/m³의 슬러지에 대한 침전슬러지의 최종높이를 계산할 수 있다.

식(2)와 Table 2를 토대로 실험에 이용된 각 슬러지농도별 침전슬러지의 최종높이는 Table 3에서 보여준다.

3.3. 슬러지계면층 높이변화

슬러지의 침전특성은 컬럼높이, 초기슬러지농도 및 침전컬럼내의 교반기 설치 유무에 따라 영향을 받는다. 슬러지의 침전성을 정확하게 파악하기 위해서 많은 변수들이 이용되었다. 이 변수들을 얻기 위한 모든 실험은 두 가지의 방법을 기초로 이루어진다. 첫 번째는 일정시간 후의 슬러지침전량을 측정하는 방법이다. 이 방법은 교반기가 설치된 컬럼을 이용하지만, 경우에 따라 교반기를 설치하지 않고 실험한

다. 그리고 슬러지계면층의 높이변화를 기록한다. 두 번째 방법은 슬러지침전곡선의 직선 부분으로부터 얻어지는 슬러지 최대침전속도를 이용하는 방법이다. 본 실험은 두 가지 방법을 모두 접목하였다.

Fig. 1부터 Fig. 6에서 보여주는 슬러지계면층 변화곡선으로부터 얻어진 모든 결과는 Table 4에 요약하였다. 상기에서 언급된 바와 같이, 슬러지침전곡선은 매개변수(Y_o , a, b)와 시간(t)으로 표현될 수 있다. 그리고 이들 매개변수는 초기슬러지농도(X), 최대침전속도(V_o) 및 SVI 등과 높은 상관관계가 있다. 그러나 SVI는 슬러지농도에 따라 급격히 변할 수 있기 때문에 슬러지계면층높이변화모델의 매개변수에 이용하지 않았다.

슬러지농도와 최대침전속도의 관계는 Fig. 9에서 나타났고, 이들의 상관관계는 식(3)으로 표현될 수 있다. 초기슬러지농도와 최대침전속도는 반비례적인 성향을 보였는데, 슬러지농도가 1.967에서 5.52g/L로 높아짐에 따라 최대침전속도는 3.78에서 0.13m/hr로 감소하였다. Table 4에서 보여주는 바와 같이 매개변수 " Y_o "는 슬러지농도가 4kg/m³을 넘기면서 급격히 증가하였다. Fig. 10에서 보이는 매개변수(Y_o)과 슬러지농도(X)의 관계는 Eq. 4로 표현될 수 있다. 그리고 각 슬러지농도와 Y_o 의 r^2 은 0.98이었다. 매개변수 "a"는 높은 최대침전속도(V_o)에서는 높은 값을, 낮은 V_o 값에서는 낮은 값을 보여주었다. Fig. 11에서 보이는 "a"와 최대침전속도(V_o)의 관계는 식(5)처럼 표현될 수 있다. 슬러지농도(X)와 매개변수(b)의 관계는 Fig. 12과 같으며, 이들의 관계는 식(6)과 같은 일차방정식으로 표현될 수 있다.

$$V_o = -1.0325X + 5.5604 \quad (3)$$

Table 4. Parameters Y_o , a, b, V_o and r^2 obtained from experiments

$H_t = Y_o + ae^{bt}$						
Conc.(kg/m ³)	Y_o	a	b	V_o (m/hr)	r^2	
1.967	0.1723	0.8959	0.1274	3.780	0.995	
2.467	0.1920	0.8294	0.1027	3.142	0.994	
2.966	0.2521	0.7576	0.1006	2.262	0.996	
3.690	0.2677	0.7451	0.0507	1.515	0.984	
4.108	0.3208	0.6710	0.0471	1.141	0.995	
5.520	0.8306	0.0758	0.0264	0.130	0.992	

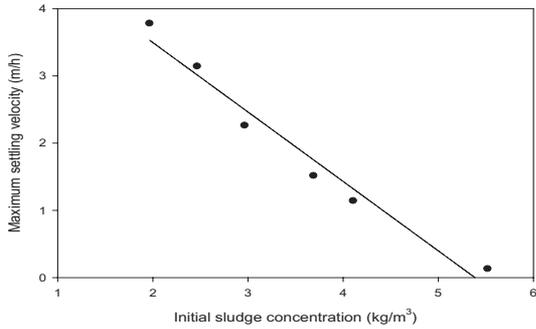


Fig. 9. Evolution of parameter V_o , in function of initial sludge concentration for all experiment and power model obtained ($r^2 = 0.967$).

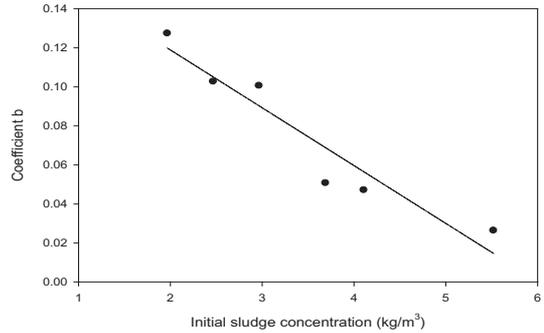


Fig. 12. Evolution of parameter b , in function of the initial sludge concentration for all experiment and power model obtained ($r^2 = 0.953$).

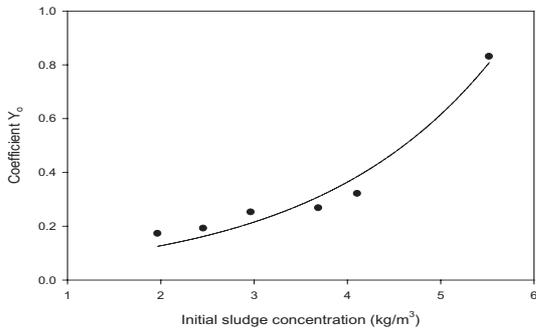


Fig. 10. Evolution of parameter Y_o , in function of initial sludge concentration for all experiment and power model obtained ($r^2 = 0.98152$).

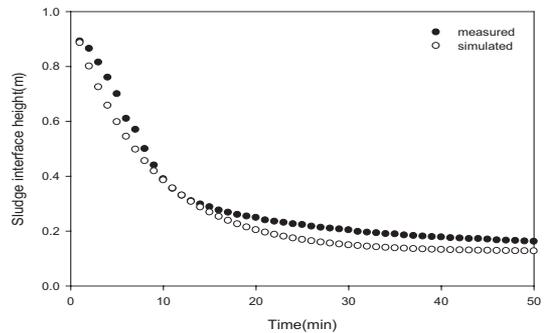


Fig. 13. Relationship between the measured sludge interface height and the simulated at $X=1.967\text{kg/m}^3$ ($r^2 = 0.988$).

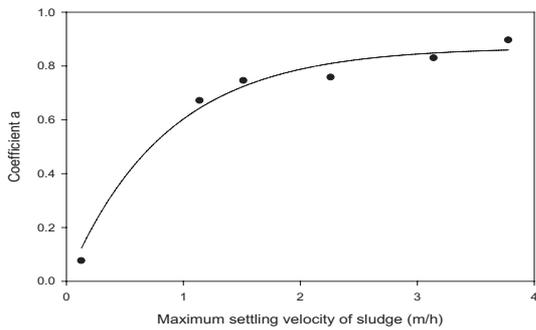


Fig. 11. Evolution of parameter a , in function of the maximum settling velocity of sludge for all experiment and power model obtained ($r^2 = 0.991$).

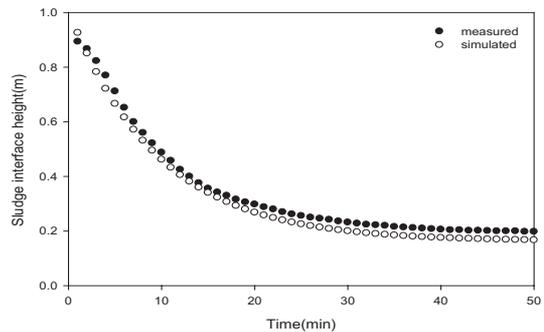


Fig. 14. Relationship between the measured sludge interface height and the simulated at $X=2.467\text{kg/m}^3$ ($r^2 = 0.998$).

$$Y_o = 0.0444e^{0.5256X} \quad (4)$$

$$a = 0.8695(1 - e^{-1.1818V_o}) \quad (5)$$

$$b = -0.03X + 0.1781 \quad (6)$$

슬러지계면층높이 변화를 예측하기 위해 제시된 식(1)에 상기에서 얻어진 최대침전속도(V_o) 및 매개 변수(Y_o , a , b)를 대입하면 아래와 같이 표현된다.

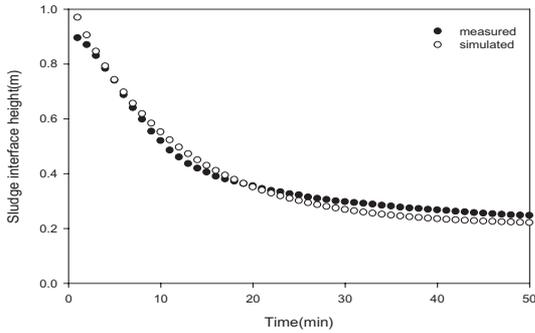


Fig. 15. Relationship between the measured sludge interface height and the simulated at $X=2.966\text{kg/m}^3$ ($r^2 = 0.992$).

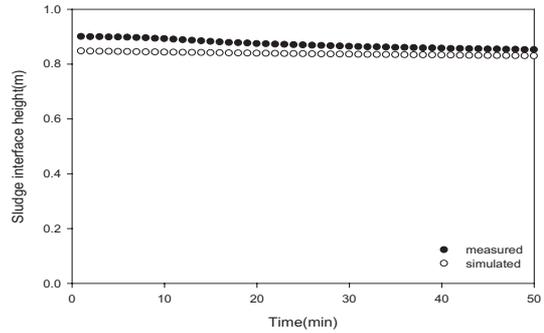


Fig. 18. Relationship between the measured sludge interface height and the simulated at $X=5.52\text{kg/m}^3$ ($r^2 = 0.982$).

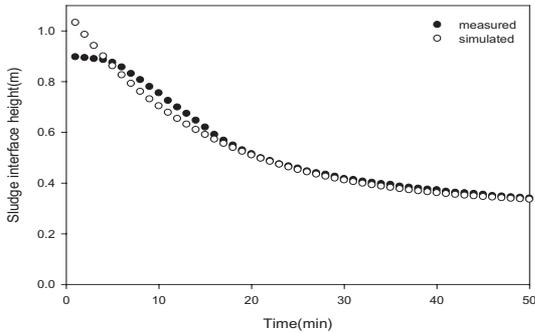


Fig. 16. Relationship between the measured sludge interface height and the simulated at $X=3.69\text{kg/m}^3$ ($r^2 = 0.976$).

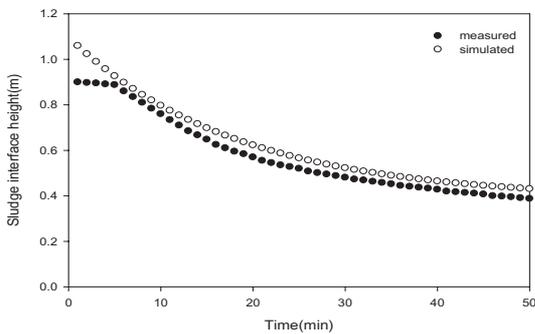


Fig. 17. Relationship between the measured sludge interface height and the simulated at $X=4.108\text{kg/m}^3$ ($r^2 = 0.988$).

$$H_{i,0.9} = 0.0444e^{0.5256X} + 0.87(1 - e^{-1.18(-X + 5.56)})e^{(0.03X - 0.178)t} \quad (7)$$

여기서

$H_{i,0.9}$ = 높이 0.9m 컬럼의 슬러지계면층 높이 (m)

식(7)이 다른 높이의 침전컬럼에 적용되기 위해서

는 식(8)과 같이 변형되어야 한다. 슬러지농도별 실험값과 상기 모델에 의해 도출된 결과는 Fig. 13에서 Fig. 18까지에 비교하였는데 실험값과 계산값이 모두 비슷한 결과를 보여주었다.

$$H_i = H_o \frac{0.0444e^{0.5256X} + 0.87(1 - e^{-1.18(-X + 5.56)}) \cdot e^{(0.03X - 0.178)t}}{0.9} \quad (8)$$

여기서, H_o = 초기 슬러지계면층 높이 (m)

4. 결론

슬러지가 침전하는 동안 슬러지의 침전특성은 변하기 때문에 기존의 슬러지침전속도식으로는 침전하는 슬러지의 침전특성을 파악하기가 어렵다. 침전실험결과를 바탕으로 침전하는 동안 변화하는 슬러지특성을 고려한 슬러지계면층높이예측모델($H_i = Y_o + ae^{-bt}$)은 초반에 급격히 감소하다가 나중에 천천히 감소하는 슬러지침전특성을 가장 잘 표현한 모델식이다. 그리고 이 모델의 매개변수(Y_o , a , b)들은 초기슬러지농도(X), 최대침전속도(V_o) 및 SVI 등과 높은 상관관계가 있다. 본 연구에 의해 제시되는 슬러지계면층높이예측모델식은 SBR공정같은 batch형 반응조의 슬러지계면층높이변화를 예측하는데 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Akca L, Kinaci C, Karpuzcu M. (1993) A model for optimum

- design of activated sludge plants. *Water Res*, **27**(9), pp 1461-1468.
2. 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.
 3. 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.
 4. Daigger, G.T. (1995) Development of refind clarifier operating diagrams using an updated settling characteristics database. *Water Environment Research*, **67**(21), pp. 95-100.
 5. Dick, R.I. and Vesilind, P.A. (1969) The sludge volume index - what is it? *J. WPCF*, **1**, pp. 1285-1291.
 6. Hartel L., Popel HJ. (1992) A dynamic secondary clarifier model including processes of sludge thickening. *Water Sci Technol* 1992, **25**(6), pp. 267-284.
 7. Mines Jr. R.O., Vilagos J.L., Echelberger Jr. W.F., Murphy R.J. (2001) Conventional and AWT mixed-liquor settling characteristics. *J Environ EngASCE*, **127**(3), pp. 249-258.
 8. Ozinsky A.E., Ekama G.A. (1995) Secondary settling tank modelling and design Part 1: review of theoretical and practical developments. *Water SA*, (4), pp. 325-332.
 9. Renko, E.K. (1996), A model for batch settling curve, *Wat. SA*, **22**(4), pp. 339-344.
 10. Renko, E.K. and Sirvio, H. (1997) Optimal Sampling Design for a sludge blanket interface settling model. *Wat. Res.*, **31**(5), pp. 1148-1154.
 11. Koopman, B., and Cadee, K. (1983) Prediction of Thickening Capacity Using Diluted Sludge Volume Index. *Water Res. (G.B.)*, **17**, p. 1427.
 12. Pitman, A.R. (1984) Settling of nutrient removal activated sludges. *Water Science and Technology*, **17**, pp. 493-504.
 13. Vesilind, P.A. (1968). Design of prototype thickeners from batch settling tests. *Water Sew. Works*, **115**, pp. 302-307.
 14. Wahlberg, E.J. and Keinath, T.M. (1988) Development of settling flux curves using SVI. *Journal Water Pollution Control Federation*, **60**(12), pp. 2095-2100.
 15. White, M.J.D. (1976) Design and Control of Secondary Settlement Tank, *Water Pollut. Control.*, **75**, p. 459.