

슬러지침전속도를 고려한 새로운 슬러지침전특성지표의 설정에 관한 연구

New Sludge Settling Characteristic Index Considering Sludge Settling Velocity

박석균^{1,*} · 강선홍¹ · 김동하²

Park, Suk Gyun^{1,*} · Kang, Seon-Hong¹ · Kim, Dong-Ha²

1 광운대학교 환경공학과

2 국민대학교 건설시스템공학부

(2006년 4월 25일 논문 접수; 2006년 6월 8일 최종 수정논문 채택)

Abstract

While sludge settles down in a batch column, sludge concentration becomes high. Sludge concentration change is one of the most critical causes of the sludge settling velocity variation. Therefore, sludge concentration change causes sludge index to change. SVI is more sensitive than other sludge indexes to the change of sludge concentration. And if sludge-water interface has reached final height within 30minutes, SVI is not suitable for prediction of sludge settling characteristic. Therefore, SVIs of each sludge are, in some cases, different although each sludge has the same settling velocity. But SVI has been widely used to interpret sludge settling characteristic by a simple testing method. This work has two purposes. The first purpose is to predict sludge settling velocity by using sludge-water interface settling velocity. And the second purpose is to develop new sludge settling characteristic index to exactly interpret sludge settling characteristic by overcoming the limit of SVI.

Key words: Sludge settling characteristic, Sludge settling velocity, Sludge-water interface, SVI

주제어: 슬러지침전특성, 슬러지침전속도, 슬러지계면층, SVI

1. 서 론

지금까지 슬러지의 침전속도를 간편하게 예측하기 위하여 여러가지 슬러지침강속도 모델들이 개발되어져 왔는데 대부분은 현장에서 측정이 간편한 SVI를 이용하였다(Hartel와 Popel, 1992; Akca 등, 1993;

Ozinsky와 Ekama, 1995; Mines 등, 2001). SVI는 측정이 간단하기 때문에 현재까지 여러 슬러지침전지표 중에서 가장 넓게 이용되고 있다. 이외에도 SSVI (Stirred Specific Volume Index)와 SSVI_{3,5}와 같은 지표들도 슬러지침강속도 모델에 이용되었다. Koopman와 Cadee(1983)는 DSVI(Diluted Sludge Volume Index)와 슬러지침전속도의 관계에 대한 연구를 수행

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

하였으며, Pitman(1984)은 $SSV_{1,5}$ 와 슬러지침전속도의 관계뿐만 아니라 SVI와 슬러지침전속도에 관한 연구를 수행하였다.

Batch형 침전컬럼에서 슬러지가 침전하는 동안 슬러지의 농도는 점점 높아지게 된다. 슬러지의 농도변화는 슬러지의 침전속도를 변화시키는 가장 주요한 원인이다. 따라서 슬러지의 농도변화는 슬러지의 침전특성을 나타내는 지표들도 변화시킨다. 특히, SVI는 다른 슬러지침전지표들보다 슬러지농도에 더 민감하게 변화한다. 각 슬러지들은 고유의 다른 물리적 특징을 가지고 있으며, 이들 특성에 기인하여 다양한 슬러지 침전특성들이 나타난다.

본 연구의 목적은 슬러지계면층의 침전속도를 이용하여 슬러지의 침전속도를 예측하고, 이를 이용하여 SVI의 한계를 극복한 새로운 슬러지특성지표를 개발함으로써 슬러지의 침전특성을 보다 정확하게 파악하는 데에 있다.

2. 실험재료 및 방법

지름 0.15m, 높이 1m의 아크릴로 만들어진 batch형 침전컬럼에 슬러지를 주입한 후 수중산기기를 이용하여 완전 혼합시켰다. 그리고 수중산기기의 작동을 멈추고 동시에 정지상태에서 침전시켰다. 실험에 사용된 슬러지는 J 하수처리장, T 하수처리장 및 S 하수처리장의 호기조에서 채취되었다. 이들 슬러지는 실온에서 저장되었으며, 실험에 이용되기 전에 슬러지의 침전성을 향상시키기 위하여 유기물 투입 없이 12시간 정도 포기시켰다. 슬러지침전실험에서 수중산기기의 작동이 멈추어서 슬러지의 혼합이 이루어지지 않는 시점을 $t=0$ 으로 설정하였다. 슬러지계면층의 높이는 1분마다 측정되었다. 슬러지는 컬럼의 각 sampling port에서 5분마다 채취되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 슬러지침전속도

Vesilind(1968)은 슬러지농도가 낮은 경우, 기인해서 컬럼의 지름이 작아질수록 상향류발생의 영향 때문에 슬러지의 침전속도가 더 빨라진다고 하였다. 반대로 슬러지의 농도가 높은 경우에는 슬러지간의 간

섭 및 하부에 이미 침전된 슬러지층에 의한 영향으로 침전속도는 컬럼의 지름에 반비례한다고 하였다. 본 실험에 이용된 컬럼의 지름은 wall 영향에 의한 영향을 최소화시키기 위해서 White(1976)가 제시한 10cm보다 크게 설계하였다.

슬러지의 침전은 낮은 농도에서 침전하는 자유침전과, 높은 농도에서 침전하는 간섭침전으로 나눌 수 있다. 슬러지침전모델이 자유침전 및 간섭침전에 모두 적용되기 위해서는 낮은 농도에서는 슬러지농도가 증가할수록 침전속도는 증가하고, 높은 농도에서는 슬러지농도가 증가할수록 침전속도는 감소해야 한다 (Jandel, 1992; Dupon과 Dahl, 1995). 그러나 일반적인 활성슬러지공법에서는 자유침전이 발생하지 않기 때문에 Table 1에서 보여주는 식들과 같이 슬러지농도가 증가할수록 슬러지의 침전속도는 감소하는 형태로 표현된다. Hultman 등(1991)은 Table 1에서 보여주는 침전속도식들을 비교한 결과, 이들 중에서 관련성이 좋고, 폭넓게 사용되는 Vesilind식을 추천하였다. 폭넓은 사용은 식의 변수가 다른 연구결과들과 비교될 수 있음을 의미하며, Vesilind식은 간단한 구조를 가지고 있다.

고형물이론을 좀 더 발전시키기 위해서 많은 학자들은(Pitman, 1984; Daigger와 Roper, 1985; Hartel과 Popel, 1992; Akca 등, 1993; Wahlberg와 Keinath, 1995; Daigger 등, 1995; Ozinsky와 Ekama, 1995; Mines 등, 2001) 간편하면서 쉽게 얻을 수 있는 SVI를 이용하여 슬러지침전속도를 예측하기 위한 노력을 기울여왔다. Table 2은 몇몇 학자들에 의해 제시된 슬러지농도와

SVI에 따른 슬러지침전속도식들을 보여준다. 이들은 상수 "a"와 "b"로 표현되는 Vesilind식을 기본으로 한다.

SVI는 슬러지의 침전성에 따라 Very Good(40-50),

Table 1. Sludge settling velocity models

| Model | Author |
|-------------------------|----------------|
| $V = a - bX$ | Bond(1961) |
| $V = a(1 - bX^{2/3})$ | Brown(1971) |
| $V = a(1 - bnX)^{4.65}$ | Michaels(1962) |
| $V = a e^{-bX}$ | Vesilind(1968) |
| $V = aX^{-b}$ | Dick(1972) |
| $V = a(1 - bX)^{1/X}$ | Cho(1993) |

Table 2. Equations for sludge settling velocity by using SVI

| Author | SVI range(ml/g) | Coefficients for the equation $v = ae^{-bx}$ | b (m ³ /kg) |
|-----------------------------|-----------------|--|-------------------------------------|
| Pitman (1984) | 45-360 | 10.5595e ^(-0.00229SVI) | 0.2751e ^(0.0017SVI) |
| Daigger and Roper(1985) | 36-402 | 7.8 | 0.148 + 0.0021SVI |
| Hartel and pope(1992) | - | 17.4e ^{-0.0113 · SVI} | 1.043-0.983e ^{-0.00581SVI} |
| Akca et al.(1993) | - | 28.1SVI ^{-0.2667} | 0.177+0.0014SVI |
| Daigger (1995) | 36-402 | 6.5 | 0.165+ 0.001586SVI |
| Wahlberg and Keinath (1995) | 48-235 | 18.2e ^(-0.00602SVI) | 0.351+ 0.00058SVI |
| Ozinsky and Ekama(1995) | - | 8.53094e ^{-0.00165SVI} | 0.20036+0.00091SVI |
| Mines et al.(2001) | 27-236 | 7.27 | 0.0281+0.00229SVI |

Table 3. Sludge settling velocity according sludge settleability

| V=a · e ^{-bX} | X= 2kg/m ³ | | | | X= 3kg/m ³ | | | | X= 4kg/m ³ | | | | X= 5kg/m ³ | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|------|------|-----------|-----------------------|------|------|-----------|-----------------------|------|------|-----------|-----------------------|------|------|-----------|-----|-----|-----|-----|
| | very good | fair | poor | very poor | very good | fair | poor | very poor | very good | fair | poor | very poor | very good | fair | poor | very poor | | | | |
| Pitman (1984) | 5.2 | 4.8 | 3.7 | 2.6 | 1.7 | 3.9 | 3.5 | 2.6 | 1.7 | 1.1 | 2.9 | 2.6 | 1.8 | 1.1 | 0.6 | 2.1 | 1.9 | 1.3 | 0.7 | 0.4 |
| Daigger and Roper(1985) | 4.8 | 4.2 | 3.1 | 2.0 | 1.3 | 3.8 | 3.1 | 2.0 | 1.1 | 0.6 | 3.0 | 2.3 | 1.2 | 0.5 | 0.2 | 2.3 | 1.7 | 0.8 | 0.3 | 0.1 |
| Hartel and pope(1992) | 5.9 | 3.4 | - | - | - | 4.3 | 2.3 | - | - | - | 3.3 | 1.5 | - | - | - | 2.5 | 1.0 | - | - | - |
| Akca et al.(1993) | 6.3 | 5.1 | 3.4 | 2.2 | 1.5 | 5.0 | 3.8 | 2.3 | 1.3 | 0.8 | 3.9 | 2.9 | 1.6 | 0.8 | 0.4 | 3.1 | 2.2 | 1.1 | 0.5 | 0.2 |
| Daigger (1995) | 4.0 | 3.7 | 2.9 | 2.1 | 1.6 | 3.2 | 2.8 | 2.0 | 1.2 | 0.8 | 2.5 | 2.1 | 1.3 | 0.7 | 0.4 | 2.0 | 1.6 | 0.9 | 0.4 | 0.2 |
| Wahlberg and Keinath (1995) | 6.5 | 5.3 | 3.1 | 1.5 | - | 4.5 | 3.6 | 2.0 | 0.9 | - | 3.0 | 2.4 | 1.3 | 0.6 | - | 2.0 | 1.7 | 0.8 | 0.3 | - |
| Ozinsky and Ekama(1995) | 4.8 | 4.4 | 3.5 | 2.4 | 1.7 | 3.7 | 3.3 | 2.5 | 1.5 | 1.0 | 2.9 | 2.5 | 1.8 | 1.0 | 0.6 | 2.3 | 1.9 | 1.3 | 0.7 | 0.4 |
| Mines et al.(2001) | 5.6 | 4.9 | 3.4 | 2.2 | - | 4.9 | 4.0 | 2.3 | 1.2 | - | 4.3 | 3.3 | 1.6 | 0.7 | - | 3.8 | 2.7 | 1.1 | 0.4 | - |

Good(50-100), Fair(100-200), Poor(200-300) 및 Very Poor(300-400)로 구분될 수 있다 Marcos와 Forecs(1999)는 슬러지침전특성에 대한 SVI의 전형적인 값을 제시하였다(Very Good: 45, Good:75, Fair: 150, Poor: 250, Very Poor: 350). Table 3은 여러 학자들에 의해 제시된 침전식에 SVI의 전형적인 값과 각 슬러지농도를 대입하여 계산한 슬러지의 침전속도들을 보여준다. 슬러지의 농도가 낮을(2kg/m³)경우 Daigger(1995)식으로부터 도출된 슬러지의 침전속도들은 다른 식으로부터 도출된 슬러지침전속도들 보다 작았다. 그리고 슬러지농도가 높을 경우(5kg/L) Mines(2001)식으로부터 도출된 슬러지의 침전속도들은 다른 속도들에 비해 컸다.

Table 3에서 보여주는 각 슬러지의 침전속도들의 평균값을 각 슬러지침전특성에 따라 구분하여 Fig. 1에 도식화 하였다. Fig. 1에서 보여지는 침전속도 곡선은 Vesilind식처럼 $V = a e^{-bx}$ 와 같은 수식으로 표현될 수 있다.

상기와 같은 과정으로부터 도출된 상수 "a"와 "b"는 각 슬러지의 침전특성에 따라 Table 4에서 정리되

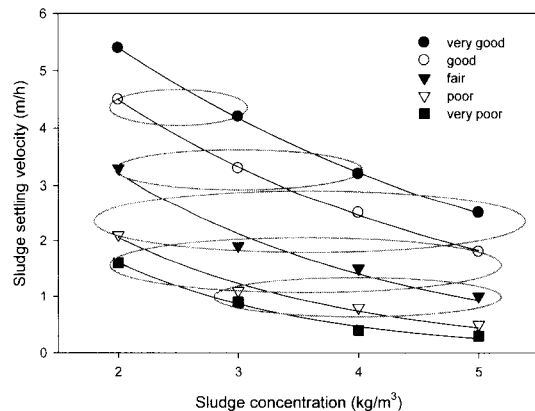


Fig. 1. Sludge concentration and sludge settling velocity with the five sludge settleability.

었다. "a"는 슬러지의 침전성이 나빠짐에 따라 감소하였고, "b"는 증가하였다.

Fig. 2은 "a"와 SVI의 관계를 보여준다. SVI가 증가함에 따라 "a"는 급격히 감소하였다. 예를 들면 SVI가 45에서 350으로 증가하는 동안 "a"는 9.1에서 5.5로 감소하였다. 그리고 이들의 관계는 Eq. 1로 수

Table 4. Coefficient a, b, and r² obtained from sludge settling velocity curves

| | a | b | r ² |
|-----------|-----|------|----------------|
| Very good | 9.1 | 0.26 | 0.999 |
| Good | 8.2 | 0.30 | 0.999 |
| Fair | 7.4 | 0.41 | 0.975 |
| Poor | 5.7 | 0.51 | 0.982 |
| Very poor | 5.5 | 0.62 | 0.992 |

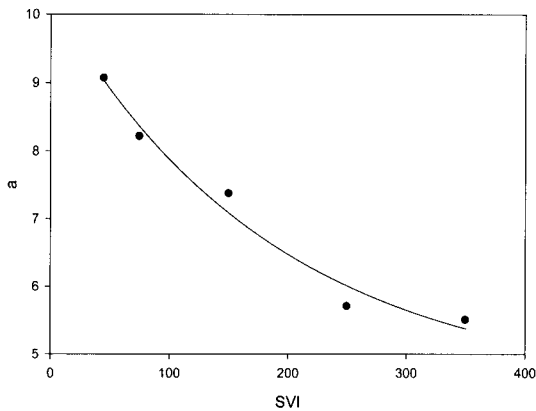


Fig. 2. Evolution of coefficient "a" in function of SVI ($r^2 = 0.98$).

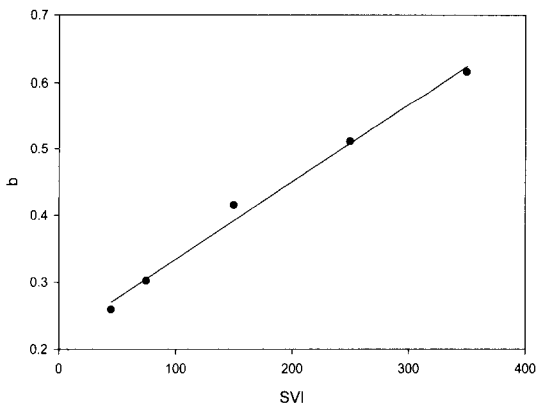


Fig. 3. Evolution of coefficient "b" in function of SVI ($r^2 = 0.99$)

식화될 수 있으며, 결정계수(r^2)는 0.98이었다.

SVI가 증가함에 따라 b는 비례적으로 증가되었으며, 이들의 관계는 Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 Eq. 2처럼 1차식으로 표현될 수 있다($r^2 = 0.99$). 그리고 Eq. 1와 Eq. 2을 통해 얻어진 상수 "a"와 "b"를 Vesilind식에 대입하여 슬러지침전속도식(Eq. 3)을 얻을 수 있었다.

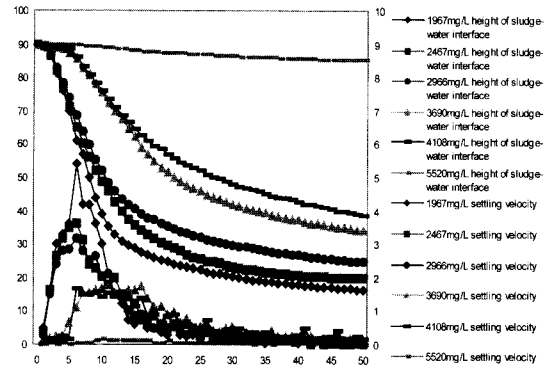


Fig. 4. The height and the settling velocity of sludge-water interface with initial sludge concentration.

$$a = 4.45 + 5.8e^{-0.0053SVI} \quad (1)$$

$$b = 0.0012SVI + 0.218 \quad (2)$$

$$V = (4.45 + 5.8e^{-0.0053SVI})e^{-(0.0012SVI + 0.218)X} \quad (3)$$

3. 2. 슬러지계면침전속도와 슬러지침전속도의 관계

슬러지의 침전특성을 파악하기 위해서 슬러지계면층 높이와 슬러지의 농도변화를 측정하였다. Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 슬러지계면층은 초기 침전단계를 거친 후 간섭침전지역에서 일정 속도로 침전하였다. 이후 간섭침전과 압밀침전사이에 존재하는 전이상태를 거치면서 슬러지가 농축되어 최종적으로 더 이상의 침전이 어려운 압밀침전이 발생하였다. 슬러지농도가 2, 3, 3.7 및 4.1kg/m³인 경우 슬러지계면층이 변곡점까지 도달되는 시간은 14, 16, 15, 22 및 22분이었다. 그리고 각 변곡점높이는 31, 40, 40 및 57cm이었다.

슬러지의 농도가 높을수록, 그리고 슬러지의 침강성이 나쁠수록 슬러지계면층이 변곡점에 도달하는 시간은 길어졌다. 본 실험에 이용된 슬러지는 좋은 침전성(SVI = 120)에도 불구하고 슬러지계면층이 변곡점에 도달하는 데 14분 이상 소요되었다. 서로 다른 침전특성을 가지고 있는 슬러지의 침전특성을 파악하는데 10분은 충분한 시간으로 판단된다.

슬러지가 침전하는 초기 짧은 시간 동안 슬러지의 침전 정도는 미미하였다. 이와 같은 현상이 일어나는 이유는 이 기간 동안 침전컬럼 내에 혼합된 슬러지들이 응집되면서 슬러지계면층이 형성되기 때문이다.

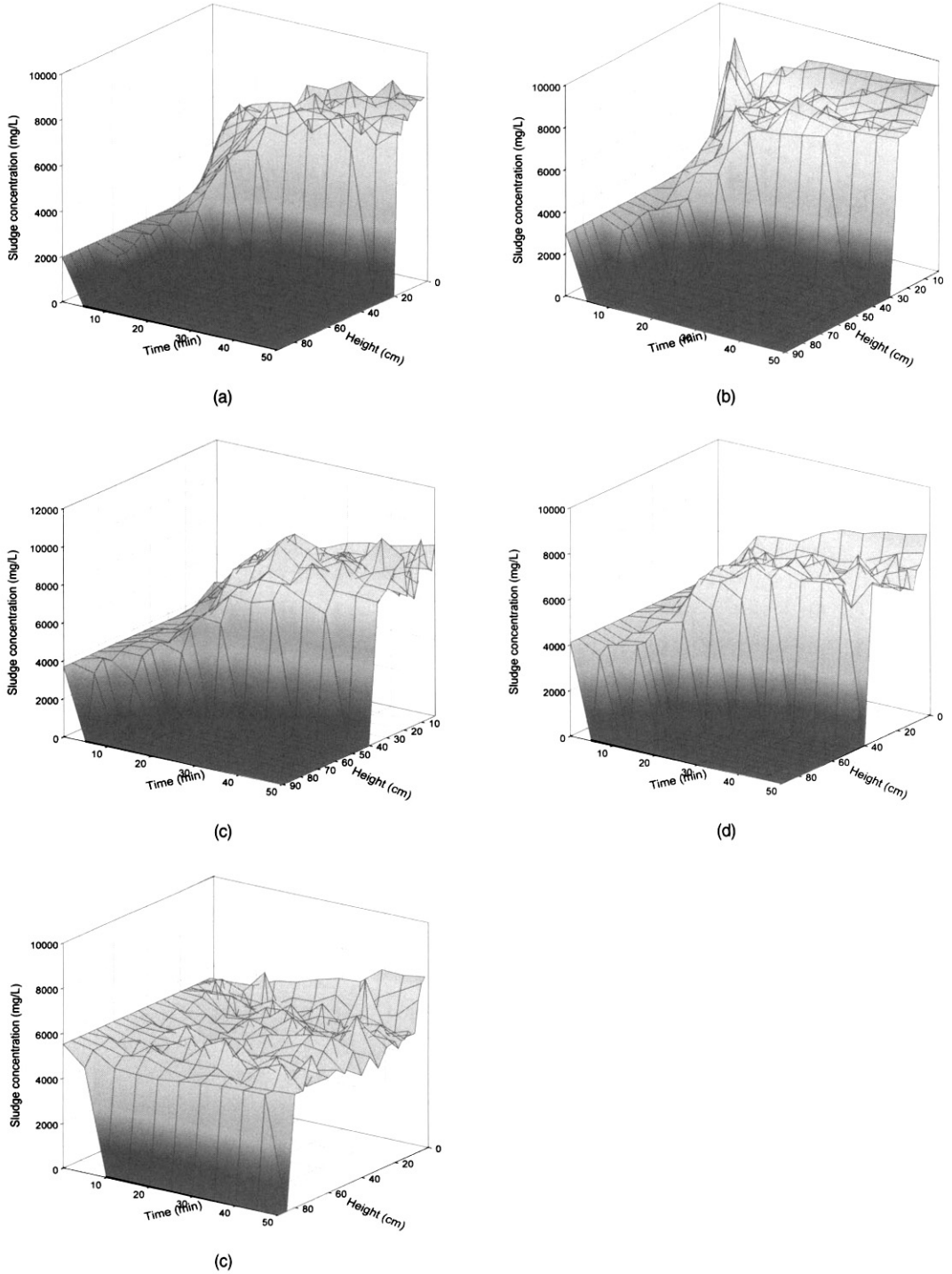


Fig. 5. Sludge interface height and sludge concentration change during batch settling (a) $X=2\text{Kg/m}^3$, (b) $X=2\text{Kg/m}^3$, (c) $X=3\text{Kg/m}^3$, (d) $X=4.1\text{Kg/m}^3$, (e) $X=5.5\text{Kg/m}^3$.

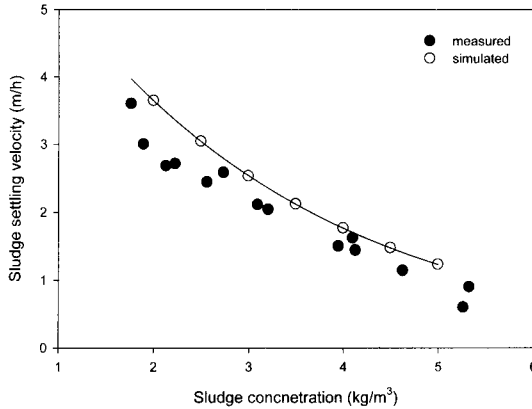


Fig. 6. Evolution of the settling velocity of sludge in function of initial sludge concentration and power model obtained ($r^2 = 0.98$).

슬러지계면층 아래의 슬러지농도는 초기슬러지농도와 큰 차이를 보이지 않았다. 시간의 흐름에 따라 슬러지계면층이 계속 침전되었지만, 슬러지계면층 아래의 슬러지농도는 변곡점에 도달할 때까지 거의 변하지 않았다(Fig. 5). 이와 같은 슬러지농도변화는 여러 학자에 의해 제시된 슬러지모델에서도 언급되어왔다(Tiller, 1981; Fitch, 1983; Font, 1988; Kim 등, 1994; Kazmi와 Furumai, 2000).

또한 Fig. 5로부터 슬러지농도가 급격히 증가하는 높이가 변곡점높이와 거의 비슷함을 확인할 수 있었다. 예를 들어, 슬러지농도가 2kg/m^3 일 때 슬러지계면층부터 변곡점 사이의 슬러지농도는 10에서 20분 사이에 증가하였으며, 이 시간 동안 슬러지계면층은 전이영역속으로 침전된 후 전이침전이 발생하였다. 전이침전동안 슬러지의 침전속도는 급격히 감소하였다. 따라서 간섭침전이 전이침전으로 변하기 전에 슬러지특성 및 슬러지침전속도를 파악하는 것이 중요하다.

침전초기에 슬러지간의 간섭작용이 미미하기 때문에, 침전초기의 슬러지계면층 침전속도가 슬러지침전속도와 같다고 가정했을 때, 침전실험으로부터 얻어진 슬러지계면층높이와 슬러지농도값을 이용하여 슬러지농도별 슬러지침전속도를 구할 수 있다. 이렇게 얻어진 침전속도와 슬러지침전모델식(Eq. 3)으로부터 계산된 침전속도는 Fig. 6에서 비교되었다. 그리고 이들 값은 좋은 상관관계를 보여주었다.

슬러지침전모델(Eq. 3)은 SVI를 기본으로 설립되

Table 5. Sludge settling velocity (a) before modification and (b) after modification

(a)

| X (kg/m^3) | sludge settling velocity(m/h) | | | | |
|--------------------------|-------------------------------|------|------|------|-----------|
| | very good | good | fair | poor | very poor |
| 2 | 5.4 | 4.5 | 3.3 | 2.1 | 1.6 |
| 3 | 4.2 | 3.3 | 1.9 | 1.1 | 0.9 |
| 4 | 3.2 | 2.5 | 1.5 | 0.8 | 0.4 |
| 5 | 2.5 | 1.8 | 1 | 0.5 | 0.3 |

(b)

| X (kg/m^3) | sludge settling velocity(m/h) | | | | |
|--------------------------|-------------------------------|------|------|------|-----------|
| | very good | good | fair | poor | very poor |
| 2 | 5.5 | 4.4 | 3.3 | 2.2 | 1.1 |
| 3 | 4.4 | 3.3 | 2.2 | 1.1 | 0.8 |
| 4 | 3.3 | 2.2 | 1.1 | 0.8 | 0.5 |
| 5 | 2.2 | 1.1 | 0.8 | 0.5 | 0.3 |

Table 6. Sludge settling velocity formulas resulted from Table 5(b)

| X (kg/m^3) | sludge settling velocity | | | | |
|--------------------------|--------------------------|------------|------------|-----------------|-----------------|
| | very good | good | fair | poor | very poor |
| 2-3 | $7.7-1.1X$ | $6.6-1.1X$ | $5.5-1.1X$ | $4.4-1.1X$ | $3.3-1.1X$ |
| 3-5 | $7.7-1.1X$ | $6.6-1.1X$ | $1.6-0.3X$ | $6.3e^{-0.54X}$ | $8.9e^{-0.49X}$ |

었기 때문에 슬러지의 농도가 높아질 경우 오차가 커질 수 있다. 박과 강(2006a)은 Fig. 7에서 보여주는 바와 같이 슬러지농도가 5kg/m^3 을 넘으면 SVI 값이 약 50-60% 정도 증가한다고 하였다. 따라서 Eq. 3은 슬러지농도가 높은 경우에는 슬러지의 침전속도예측에 적합하지 않지만, 일반 활성슬러지공정의 농도범위 내에서는 충분히 적용가능하다고 판단된다.

Fig. 1로부터 농도변화에 따른 슬러지침전특성별 슬러지침전속도에 관한 규칙성(Fig. 1에서 보여주는 회색의 타원부분)을 발견할 수 있었다. 그리고 타원속 침전속도들은 거의 선형에 가까웠다. 따라서 이 침전속도들의 규칙성을 찾기 위해서 Table 5에서와 같이 큰 영향이 없는 범위 내에서 수정하였다(Table 5(a) → Table 5(b)로 수정함). 그리고 Table 5(b)에서 보여주는 슬러지침전속도들을 이용하여 슬러지농도에 따른 슬러지침전특성별 침전속도식들을 도출하였다(Table 6). 그러나 Fig. 8에서 보여주는 바와 같이 슬러지의 농도가 높고, 슬러지의 침강성이 나쁜 경우

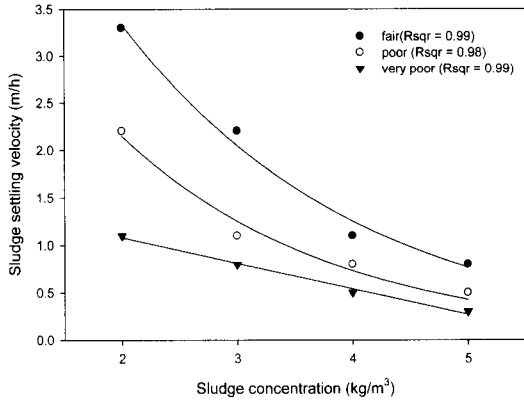


Fig. 8. Sludge concentration and sludge settling velocity with sludge settleability.

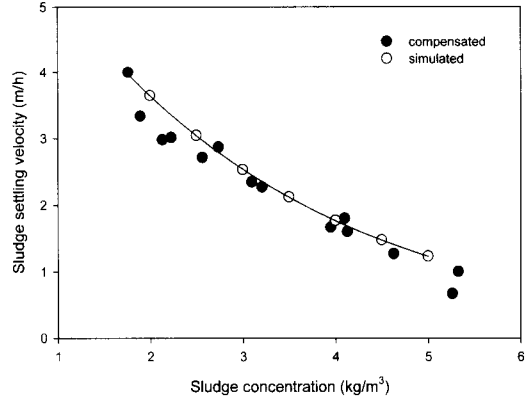


Fig. 9. Evolution of the settling velocity of sludge in function of initial sludge concentration and power model obtained.

에는 각 침전속도곡선의 상관성이 좋지 않기 때문에 정형화된 규칙을 찾을 수 없었다.

일반적인 활성슬러지공법의 슬러지농도 범위 (2-4kg/m³)에서는 위에서 언급한 바와 같이 침전시작 후 10분 이내에는 슬러지계면층 하부의 슬러지농도는 초기 슬러지농도와 큰 차이를 보이지 않았다. 그리고 슬러지계면층은 침전초기에 일정한 속도로 침전하였다. 이 기간 동안의 슬러지계면층의 침전속도가 슬러지의 침전속도를 의미하지 않지만 두 속도는 일정한 상관성을 가지고 있다. 따라서 침전초기의 슬러지계면층의 침전속도를 이용하여 슬러지의 침전속도를 예측할 수 있다.

박과 강(2006b)은 침전컬럼높이가 슬러지침전특성에 미치는 연구에서 침전컬럼의 높이는 슬러지침전특성을 거의 변화시키지 않았으며, 컬럼높이에 따라 슬러지계면층의 하강속도는 비례한다고 하였다. 따라서 슬러지계면층 높이(H_t)에 대한 컬럼높이(H₀)비는 컬럼의 높이가 다름에도 불구하고 비슷한 값을 보였다. 예를 들면, 1m 컬럼속 슬러지계면층의 침전속도는 0.5m 컬럼속 슬러지계면층 침전속도보다 약 2배 빨랐다.

박과 강(2006b)에서 얻은 결론을 바탕으로 본 실험에서 측정된 슬러지침전속도를 보정하여 Eq. 3에서도출된 침전속도와 같게 만들었다. 측정된 슬러지침전속도(Eq. 4)에 0.9를 나누어 줄 때 이와 같은 결과를 얻을 수 있었다(Fig. 9). 본 실험에서 측정된 슬러지침전속도는 0.9m 컬럼을 이용하여 도출되었기 때

문에 Eq. 3으로부터 계산된 슬러지의 침전속도는 1m 컬럼에서 얻어진 슬러지계면층의 초기 침전속도(Eq. 5)와 같다고 가정할 수 있다. 또한, 이런 가정을 토대로 컬럼높이가 1m 이상 되면 슬러지계면층의 초기 침전속도는 컬럼높이나 슬러지농도에 의한 영향이 적을 것이라고 추측할 수 있다.

본 연구에서는 침전초기에 발생하는 슬러지응집현상에 의한 영향을 배제하기 위해서 슬러지계면층 침전속도를 침전 후 10분에 측정하도록 권고한다. 그리고 이렇게 측정된 슬러지계면층의 침전속도는 새로운 슬러지침전특성지표에 이용될 수 있다.

$$V_z = \frac{H_0 - H_t}{t} \tag{4}$$

$$V_v = \frac{H_0 - H_t}{t \cdot H_0} \tag{5}$$

여기서 V_z = 슬러지계면층 침전속도(m/hr)

V_v = 1m 컬럼에서의 슬러지계면층 침전속도(m/hr)

H₀ = 컬럼높이(m)

H_t = 침전 t시간 후 슬러지계면층 높이(m)

t = 침전시간(hr)

3.3. 새로운 슬러지침전특성인자

슬러지의 침전특성을 파악하기 위해서 SVI가 넓게

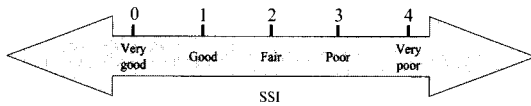


Fig. 10. Sludge settleability with SSI.

이용되고 있다. 그러나 SVI는 슬러지농도에 매우 민감하고, 슬러지계면층이 30분 이내에 침전층에 도달할 경우 슬러지의 침전특성을 잘 나타내지 못하는 단점이 있다. 따라서 다른 침전속도를 가진 슬러지가 동일한 SVI 값을 나타낼 수도 있다. 이와 같은 단점을 극복하기 위해서 앞에서 상기에서 얻은 결과 (Table 6과 Eq. 5)들을 이용하여 새로운 슬러지침전지표(SSI: Sludge Settleability Index)를 제시하였다. SSI는 Eq. 6에 의해 도출될 수 있다.

$$SSI = 7 - X - \frac{V_z}{1.1H_0} = 7 - X - \frac{V_v}{1.1} \quad (6)$$

Fig. 10에서 보여주는 SSI는 SVI에 비해 측정시간이 10분으로 매우 짧고, 측정컬럼의 크기나 모양에 큰 영향을 받지 않는 장점을 가지고 있다. 그러나 슬러지의 농도가 높고(4kg/m³ 이상) 침전성이 나쁜 경우에는 SSI의 적용은 적당하지 않다.

SSI의 적용가능성을 평가하기 위하여 슬러지농도 및 컬럼높이를 변화시키면서 SSI를 측정하였다. 이렇게 측정된 SSI를 Table 7에서 보여주는 바와 같이 SVI와 비교하였다. 대체로 SSI와 SVI는 슬러지농도 및 컬럼변화에 관계없이 비슷한 슬러지침전특성을 보여주었다. X가 2.5kg/m³이고, V_v가 1.8m/hr일 때 SVI는 보통, SSI는 불량을 보여주었지만 SVI 값은 거의 불량에 가까운 수치를 보였다. X가 2.5kg/m³이고 V_v가 1.96m/hr인 경우에도 상기와 같은 경향을 보여주었다.

Fig. 11은 Table 7에서 보여주는 SSI와 SVI가 각

Table 7. SSI and SVI

| | | | | | | | | |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| H ₀ (m) | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.6 | 0.6 | 0.3 | 0.3 |
| X(g/m ³) | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 1.5 | 2.5 | 1.5 | 2.5 |
| V _v (m/hr) | 3.8 | 3.4 | 1.5 | 2.5 | 3.9 | 1.8 | 3.82 | 1.96 |
| SVI | 158 | 113 | 206 | 110 | 154 | 188 | 156 | 176 |
| SSI | 2.1 | 1.9 | 3.1 | 1.7 | 1.9 | 2.9 | 2.0 | 2.7 |

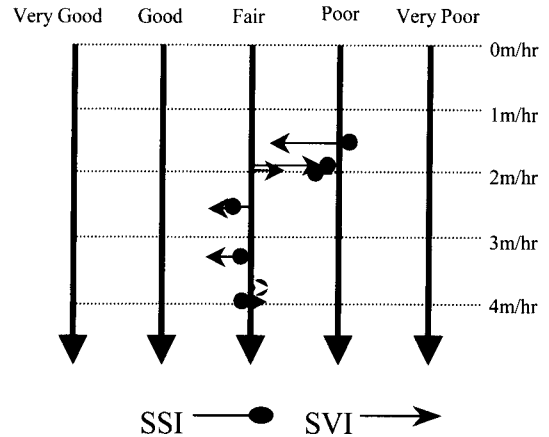


Fig. 11. Relationship between SSI and SVI according to sludge settleability.

슬러지침전특성과 어느 정도 상관성이 있는지 보여준다. 슬러지침전속도가 빠른 경우 SVI와 SSI는 거의 동일한 값과 침전특성을 보여주었다. 슬러지침전속도가 느린 경우 슬러지특성은 차이를 보이지 않았지만 경우에 따라 슬러지침전특성이 다르게 구분되기도 하였다. 이는 SVI가 SSI와 달리 슬러지침전속도에 대한 영향을 고려하지 않는다는 점에서 발생하는 오차로 사료된다. 상기에서 언급된 바와 같이 SVI는 다른 침전속도를 가진 슬러지가 동일한 값을 나타낼 수도 있다. 따라서 슬러지침전속도가 고려된 SSI는 일반 활성슬러지공법의 슬러지농도 범위내에서 SVI에 비해 더욱 정확한 슬러지침전특성값을 제시할 수 있다.

4. 결 론

침전초기의 슬러지계면층의 침전속도는 컬럼의 높이에 비례하며, 슬러지침전속도와 좋은 상관성을 가지고 있다. 따라서 침전초기의 슬러지계면층 침전속도를 측정함으로써 슬러지침전속도를 예측할 수 있다. 슬러지계면층의 침전속도는 높이가 1m 이상인 컬럼에서 침전된 슬러지계면층높이로부터 구할 수 있다. 컬럼의 높이가 1m가 되지 않는다면, 슬러지계면층의 침전속도는 컬럼높이 1m 이하에서 컬럼높이와 비례하므로 보정을 통해 얻을 수 있다. 그리고 슬러지침전속도를 이용하여 일반 활성슬러지공정에 쉽게 적용할 수 있는 새로운 슬러지특성지표(SSI)를 얻을

수 있다. SSI는 측정시간도 짧고 침전컬럼의 형태에 영향을 받지 않는다. 무엇보다 SSI는 슬러지침전속도를 고려했기 때문에 SVI같은 슬러지침전지표들보다 정확하게 슬러지침전특성을 대표한다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 광주대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- 박석균, 강선홍 (2006a), 슬러지계면층높이변화모델에서 슬러지침전특성에 대한 영향, *상하수도학회지*, **20**(1), pp.147-155.
- 박석균, 강선홍 (2006b) 슬러지계면층높이변화모델에서 컬럼높이에 대한 영향, *상하수도학회지*, **20**(2), pp.265-272.
- Akca, L., Kinaci, C., and Karpuzcu, M. (1993) A model for optimum design of activated sludge plants, *Wat. Res.*, **27**(9), pp. 1461-1468.
- Bond, A.W. (1961) Behaviour of suspensions, *Wat. Engrs.*, **15**(7), pp. 494 - 516.
- Brown, J.C., and LaMotta, E. (1971) Physical behaviour of flocculent suspensions in upflow, *Sanitary Eng. Div.*, **97**, SA2, pp. 209 - 224.
- Catunda, P.F.C., Van Haandel A.C., Araujo, L.S., and Vilar, A., (1989), Determinacao da sedimentabilidade de lodo ativado (Determination of the settleability of activated sludge), In Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e Ambiental, 15, pp. 53 - 85.
- Cho, S.H., Colin, F., Sardin, M., and Prost, C. (1993) Settling velocity model of activated sludge, *Wat. Res.*, **27**(7), pp. 1237-1242.
- 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
- Daigger, G.T. (1995) Development of refine clarifier operating diagrams using an updated settling characteristics database, *Wat. Env. Res.* **67**(21), pp. 95-100.
- Dick, R.I., and Young, K.W. (1972) Analysis of thickening performance of a final settling tank, Proceedings of the 27-th Purdue Industrial Waste Conference, Lafayette, Indiana, Purdue University, pp. 33-54.
- Dupon, R., and Dahl, C. (1995) A one dimensional model for a secondary settling tank including density current and short circuiting, *Wat. Sci. and Tech.* **31**(2), pp. 215 - 224.
- Ekama, G.A., and Marais, G.V.R., (1986), Sludge settleability in secondary settling tank design procedure, *Wat. Poll. Con.* **1**, pp. 101-114
- Fitch, B. (1983) Kynch theory and compression zones, *A.I.Ch.E.J.* **29**, pp. 940-947.
- Font, R. (1988) Compression zone effect in batch sedimentation, *A.I.Ch.E.J.* **34**, pp. 229-238.
- Froes, C. M. V. (1996) Avaliacao do desempenho da estacao de tratamento de esgotos do Conjunto Habitacional de Morro Alto, com enfase na teoria do fluxo de solidos limite (Evaluation of the performance of the Morro Alto wastewater treatment plant, with emphasis on the solids flux theory), Dissertacao de mestrado, UFMG
- Hartel, L., and Popel, H.J. (1992) A dynamic secondary clarifier model including processes of sludge thickening, *Wat. Sci. Tech.*, **25**(6), pp 267-284.
- Hultman, B., Lowen, M., Karlsson, U., Li, P.H. and Molina, L. (1991) Prediction of activated sludge sedimentation based on sludge indices, *Wat. Sci. Tech.*, **24**(7), pp. 33-42.
- Jandel (1992) Automated curve fitting software, User's manual, Jandel Scientific. 2591 Kernel Blvd. San Rafael, CA 94901.
- Kazmi, A. A., and Furumai, H. (2000) A simple settling model for batch activated sludge process, *Wat. Sci. Tech.*, **42**(3), pp. 9-16.
- Kim, M.H., Al-Ghusain, I.A., Hao, O.J., and Lim, B.S., (1994), Modeling of nitrate disappearance and sludge rising in a settling column, *Wat. Res.*, **28**(9), pp. 1861-1872.
- Koopman, B., and Cadee, K. (1983) Prediction of thickening capacity using diluted sludge volume index, *Wat. Res.*, **17**(10), pp. 1427-1431.
- Marcos, V.S. and Forres, C.M.V.C. (1999) Determination of the required surface area for activated sludge final clarifiers based on a unified database, *Wat. Res.*, **33**(8), pp. 1884-1894.
- Michaels, A.S., and Bolger, J.C. (1962) Settling rates and sedimentation volumes of flocculated kaolin suspensions, *Ind. Eng. Chem., Fundamentals*, **1**, pp. 24-33.
- Mines, J., Richard, O., Vilagos Jeffrey, L., Echelberger Jr. Wayne, F., and Murphy, R. Jerry (2001) Conventional and AWT mixed-liquor settling characteristics., *J. Envir. Eng.*, **127**(3), pp. 249-258.
- Ozinsky, A. E., and Ekama, G. A. (1995) Secondary settling tank modelling and design Part 1: review of theoretical and practical developments. *Wat. S.A.*, **21**(4), pp 325-332.
- Pitman, A. R., (1984), Settling of nutrient removal activated sludges. *Wat. Sci. and Tech.*, **17**, pp. 493-504.

26. Tiller, F. M. (1981) Revision of Kynch sedimentation theory, *A.I.Ch.E. J.*, **27**(5), pp. 823-828.
27. Vesilind, P.A. (1968) Design of prototype thickeners from batch settling tests, *Water Sew. Works*, **115**(7), pp. 302-307.
28. Von Sperling M. (1990) Optimal management of the oxidation ditch process, Ph. D. thesis, Imperial College, University of London, p.371.
29. Wahlberg, E.J., and Keinath, T.M. (1988) Development of settling flux curves using SVI, *J. Water Pollution Control Federation*, **60**(12), pp. 2095-2100.
30. Wahlberg, E. J., and Keinath, T. M. (1995) Development of settling flux curves using SVI: an addendum, *Wat. Env. Res.*, **67**(5), pp. 872-874.
31. White, M.J.D. (1976) Design and Control of Secondary Settlement Tank, *Water Pollution Control*, **75**, pp. 459-467.