

Batch Column에서의 슬러지농도변화에 대한 연구

Study on Sludge Concentration Change in Batch Column

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

For understanding sludge concentration profile as a function of time, sludge was sampled at each sampling port. When sludge concentration was 3g/L, the vertical sludge concentration distribution was similar to that of 2g/L of sludge concentration. During the early stage of sludge settling, sludge concentration increased remarkably as the sludge interface height in batch column became lower. The higher sludge concentration became, the worse sludge settleability became. Also, the type of sludge settling was influenced with sludge concentration gradient in batch column. In the same concentration, the greater sludge concentration gradient was, the faster sludge interface settled down. And the changing sludge concentrations in a batch settling or a continuous settling were simulated by using the equation of sludge interface height change model.

Key words: Sludge concentration, Sludge interface, Settling zone, Transition setting zone, Compression settling zone

주제어: 슬러지 농도, 슬러지 계면층, 침전지역, 변이침전지역, 압밀침전지역

1. 서 론

활성슬러지공정에서 슬러지유출을 방지하기 위해서는 슬러지 침전특성을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. Fig. 1은 슬러지의 일반적 침전특성을 보여준다. 침전시작시($t=0$) batch column의 전 영역은 동일한 슬러지농도를 유지하고 있다. 그러나 시간이 지

남에 따라 침전영역은 3개의 다른 영역(침전영역, 전이영역, 압밀영역)으로 나누어진다. 침전영역의 슬러지농도는 초기 슬러지 농도와 동일하다. 그리고 전이영역에서 슬러지의 침전속도는 시간에 따라 점점 감소한다. 전이단계는 전이영역의 마지막 층이 압밀영역으로 가라앉을 때 멈추게 된다. Batch column에서 침전시작과 동시에 압밀영역은 발생되지만 전이단계가 멈춘 후에야 눈으로 관찰할 수 있다. Batch column

*Corresponding author Tel: +82-2-940-5075, Fax: +82-2-911-2033, Email: k2lip@hanmail.net (Park, S.G)

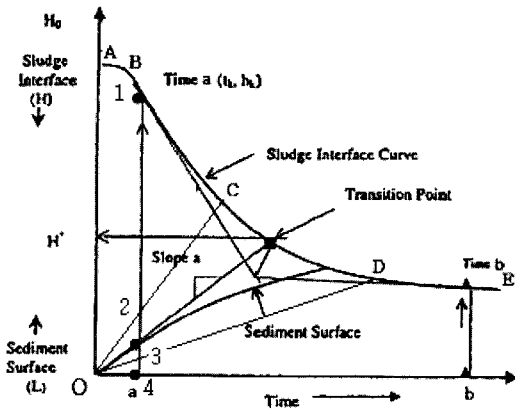


Fig. 1. Sludge sediment surface profile.

의 바닥에 도착한 슬러지는 침전 및 퇴적된 후 상부에 위치한 슬러지를 지지한다.

슬러지침전커브곡선을 이용하여 batch column 내 슬러지의 농도를 측정하기 위한 가장 기초적인 접근은 Kynch(1972)에 의해 이루어졌다. 그는 침전과정에 대한 현상을 수식으로 표현하였다. Kynch의 접근 방식이 중요한 이유는 침전실험을 통해 도출된 결과들이 여러 슬러지농도에서 슬러지가 침전하는 과정을 비교적 정확하게 묘사하고 있기 때문이다. 그러나 Kynch 모델은 압밀지역에서의 슬러지거동 및 영향을 고려하지 않았다. Tiller(1981)와 Fitch(1983)와 Font(1988)는 침전지역에서의 슬러지농도와 슬러지퇴적층표면에서의 슬러지농도와의 관계를 도출하기 위한 연구를 수행하였다. 그리고 Kim 등 (1994)은 Kynch와 Font의 이론을 병합한 모델을 제시하였다. 그러나 이 모델도 슬러지침전특성에 관해서 슬러지 압밀과정과 슬러지퇴적층표면 사이의 관계를 입증하지 못하였다.

본 연구에서 슬러지침전특성을 보다 정확하게 이해하기 위해서 슬러지침전과정 동안 변화하는 슬러지층의 농도를 관찰하였다. 그리고 슬러지계면층의 높이변화를 이용해서 단위시간 동안 변화하는 슬러지층의 농도를 예측하였다.

2. 실험재료 및 방법

지름 0.15m, 높이 1m의 아크릴로 만들어진 batch column(Fig. 2)에 슬러지를 주입한 후 수중 산기기를

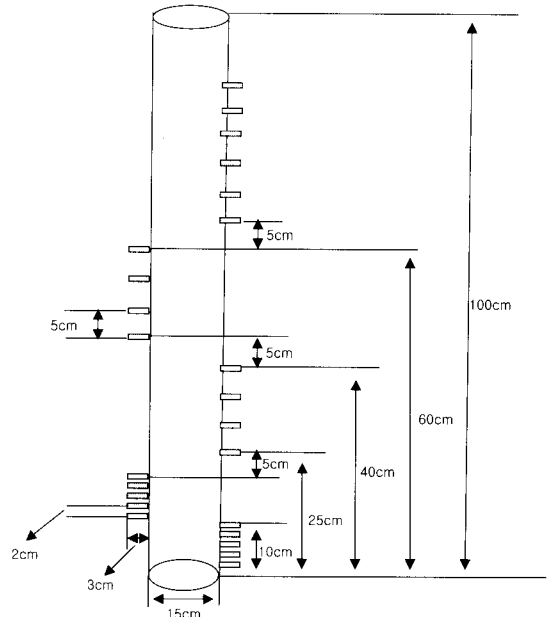


Fig. 2. Settling column.

이용하여 완전히 혼합시켰다. 슬러지는 수중 산기기의 작동이 멈추고 동시에 정지상태에서 침전되었다. 실험에 사용된 슬러지는 J 하수처리장, T 하수처리장 및 S 하수처리장의 호기조에서 채취되었다. 이들 각각의 슬러지들은 실온에서 저장되었으며, 실험에 사용되기 전에 슬러지의 침전성을 향상시키기 위하여 유기물 투입 없이 12시간 정도 포기시켰다. 슬러지침전실험에서 수중 산기기가 작동을 멈추어 슬러지 혼합이 이루어지지 않는 시점을 $t=0$ 로 설정하였다. 슬러지계면층의 높이는 1분마다 측정되었으며, 슬러지층의 농도는 각 sampling port에서 5분마다 측정하였다. 그리고 전이점의 높이 및 도달시간은 슬러지침전커브에서 침전영역과 압밀영역에서 접선을 그리고 두 직선이 만나는 점에서 두 직선을 이등분하는 새로운 직선을 그린 후, 이 직선과 슬러지침전곡선과 교차되는 지점을 통해 얻어졌다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 슬러지농도 변화

Batch column 내에서의 슬러지농도변화를 파악하기 위해서 슬러지를 5분마다 각 sampling port에 채취하였다. 슬러지가 침전되면서 두개의 침전지역(압밀

지역과 비압밀지역)으로 나누어지는데 이는 슬러지 농도차이를 통해 알 수 있었다(Fig. 3). 그리고 비압밀지역은 다시 침전영역과 전이영역으로 나눌 수 있다. 예를 들면, 슬러지농도가 2g/L이고 침전 후 5분일 때 침전영역은 batch column 높이 20-70cm에 위치했으며, 이 영역내 모든 슬러지층의 농도는 초기농도와 비슷하였다. 그리고 전이영역은 10-20cm 높이에 위치하며 슬러지농도는 하부로 내려갈수록 점점 증가하였다. 나머지 지역인 압밀영역의 평균 슬러지농도는 5.5g/L이었고, 이 영역내 슬러지들은 서로 물리적으로 접촉하고 있었다. 침전 후 10분일 때, 침전영역은 거의 사라지고 모든 슬러지들은 전이영역이나 압밀영역에 포함됐다. 침전시작과 동시에 column의 바닥에서는 이미 압밀이 진행되었지만, 슬러지의 높은 탁도 때문에 직접 눈으로 확인하는 것은 불가능하였다. 침전 후 15분일 때, 전이상태가 멈추고 전이영역이 사라진 후 압밀과정을 확인할 수 있었으며, 이 때의 평균 슬러지농도는 5.3g/L이었다. 15분 이후부터는 각 슬러지층의 농도는 큰 차이를 보이지 않았다. 그리고 침전 후 50분일 때 슬러지의 평균농도는 7.7g/L까지 증가하였다.

슬러지농도가 3g/L일 때 수직적슬러지농도분포는 Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 농도가 2g/L 경우와 유사하였다. 침전초기 슬러지계면층의 높이가 낮아짐에 따라 슬러지농도는 큰 폭으로 증가하였다. 이와 같은 현상은 Fig. 4(a), Fig. 4(b) 그리고 Fig. 4(c)에서 보여주는 바와 같이 침전후 15분까지 진행 되었다. 그리고 batch column의 가장 낮은 곳에 위치한 부분을 제외하고 각 슬러지층의 농도는 침전 20분일 때와 큰 차이를 보이지 않았다. 침전 시간 50분이 지나는 동안, 최하부 sampling port에서의 슬러지농도는 6.2g/L에서 7.5g/L까지 증가하였다.

슬러지농도가 높아질수록 슬러지간의 간섭효과에 의해서 슬러지의 침전성은 나빠졌다. 그리고 이들로 인해 슬러지의 농도분포는 일정한 패턴을 보이지 않는다. Dick과 Vesilind(1969)은 슬러지농도와 슬러지 침전성과의 상관관계를 보여주었으며, 박과 강(2006a)은 슬러지농도가 4g/L 이상이면 슬러지의 침전성이 나빠져서 SVI값이 증가한다고 하였다.

Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 슬러지농도가 3.7g/L인 경우, 침전시작 후 30분일 때까지 상기에서

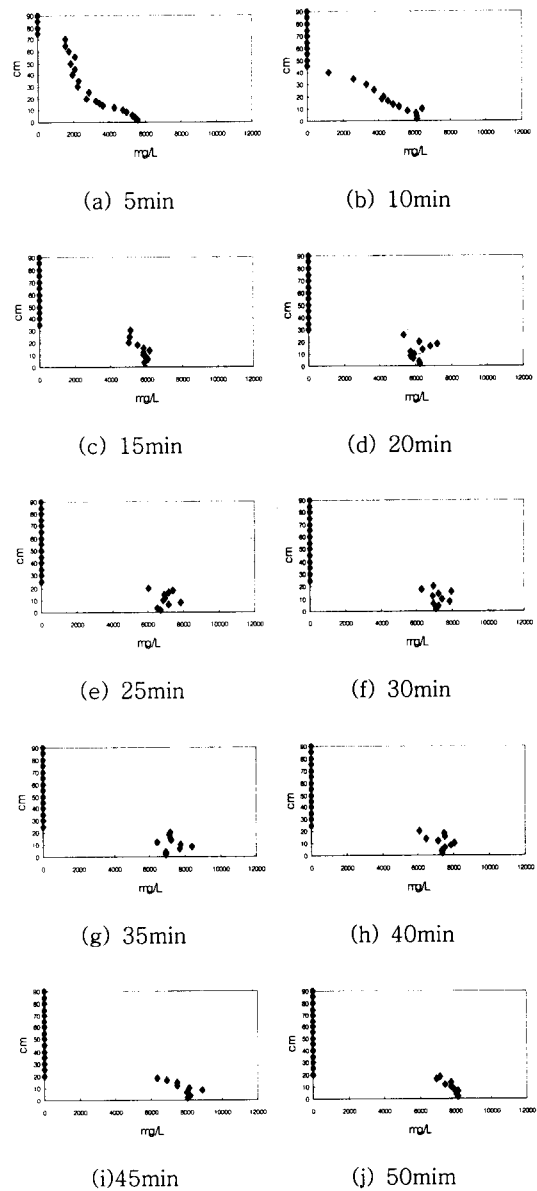


Fig. 3. Sludge concentration distribution at 2g/L of sludge concentration.

언급된 것과 비슷한 침전형태를 보였지만 침전 40분 이후부터는 슬러지의 농도분포는 균일한 형태를 보이지 않았다. 이는 높은 농도에서 슬러지가 침전하면서 서로간의 간섭에 의해 원활한 침전이 일어나지 않기 때문이다. 따라서 슬러지층의 여러 곳에서 침전이 정체되었으며, 이렇게 침전이 정체된 곳의 슬러지농도는 다른 곳에 비해 높은 값을 보였다. 침전 45분일 때

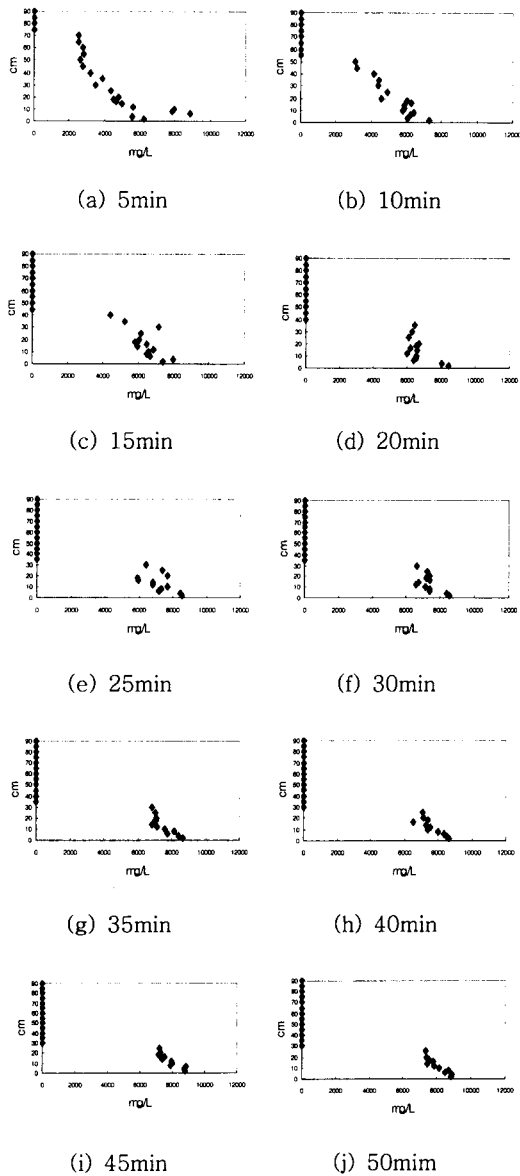


Fig. 4. Sludge concentration distribution at 3g/L of sludge concentration.

슬러지층 20cm 높이에서 슬러지 농도는 9g/L까지 증가되었다. 이 값은 batch column의 최하부지역의 슬러지농도(8.7g/L)보다 높은 수치였다. 침전 50분일 때 평균슬러지농도는 약 8g/L이었고, 최하부지역의 슬러지농도는 약 9g/L이었다.

슬러지농도가 4.1g/L인 경우 Fig. 6에서 보여주는 바와 같이 침전 10분 이후 원활한 슬러지침전이 이루어

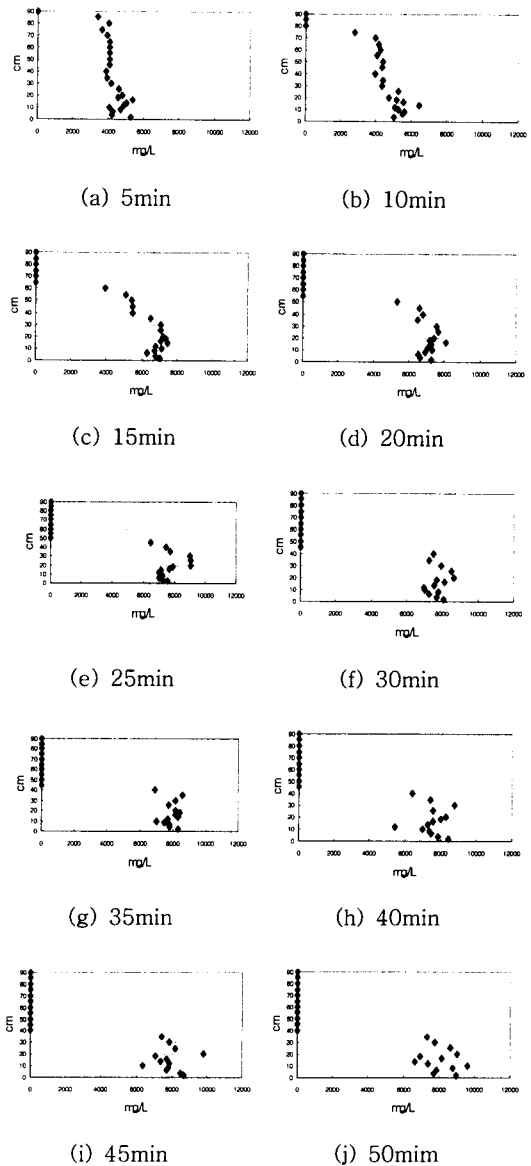


Fig. 5. Sludge concentration distribution at 3.7g/L of sludge concentration.

어지지 않았다. Batch column내 평균슬러지농도의 증가속도는 column 하부의 슬러지농도 증가속도에 비해 매우 완만하였다. 침전 50분일 때의 상부의 슬러지농도는 6.8g/L이었으며 하부의 슬러지농도는 8.5g/L이었다.

Fig. 3-Fig. 6에서 보여주는 바와 같이 슬러지계면층이 침전하면서 column내의 평균슬러지 농도는

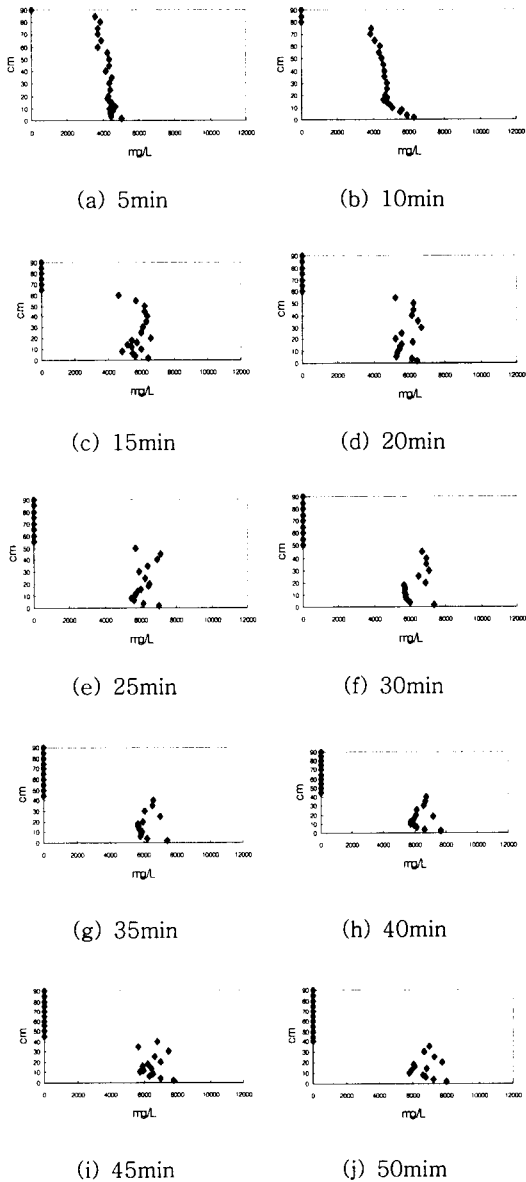


Fig. 6. Sludge concentration distribution at 4.1g/L of sludge concentration.

5.5g/L 이상으로 증가하였다. 그리고 이들 경우에 슬러지의 농도가 계속 높아짐에도 불구하고 슬러지계면 층은 계속적으로 완만하게 낮아졌다. 그러나 초기 슬러지농도가 5.5g/L인 경우에는 Fig. 7에서 보여주는 바와 같이 슬러지의 침전성은 좋지 않았다. 이와 같이 동일한 농도에서 다른 결과를 보이는 원인은 슬러지농도분포 또는 슬러지농도구배차이에 기인한다. 슬

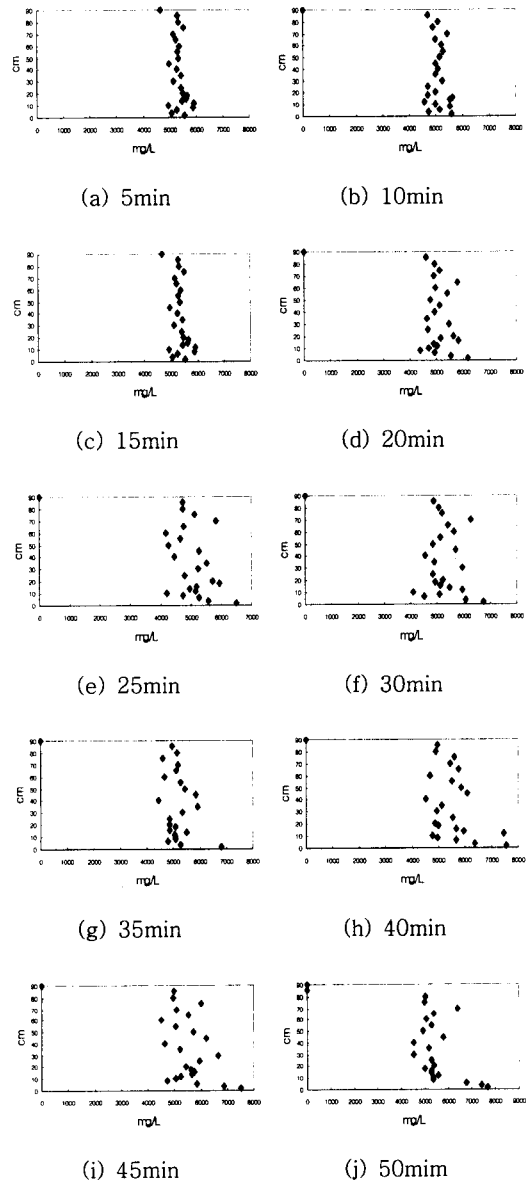


Fig. 7. Sludge concentration distribution at 5.5g/L of sludge concentration.

러지농도가 높을 때 균일한 슬러지농도는 슬러지의 침전을 방해한다.

몇몇 학자들은 고히용 플러스이론을 설립하기 위해 batch column내의 슬러지농도가 슬러지가 침전하는 동안 어떻게 변화하는지를 수식으로 표현하기 위한 연구를 수행하였다. Kynch(1972)는 column내에 밀도류가 발생하지 않고, 생화학적 작용이 없다는 가

정 하에 전이영역보다 위쪽에 위치한 지역의 슬러지 농도는 초기 슬러지농도와 동일하다고 주장하였다. 그리고 Font(1988)은 전이점에서의 슬러지농도는 Eq. 1로부터 도출될 수 있으며 일정한 값을 보인다고 하였다. 그리고 Roche 등 (1995)은 column 바닥 위의 슬러지농도에 대한 변화를 예측하기 위해서 경험식 (Eq. 2)을 제안하였다.

$$X_c = \frac{X_o H_o}{H^*} \quad (1)$$

여기서 X_c = 입계슬러지농도(mg/L)
 X_o = 초기슬러지농도(mg/L)
 H_o = 초기슬러지계면층 높이(cm)
 H^* = 전이점 높이(cm)

$$X_b = \alpha(t + \Delta t)^\beta \quad (2)$$

여기서 $\Delta t = 0.086X_o^{2.2234}$
 $\alpha = 2.065X_o^{0.382}$ (g/L)
 $\beta = 0.545SVI^{0.152}$

본 실험에서 얻어진 슬러지농도분포는 Kynch,

Font 및 Roche가 제시한 식으로부터 도출된 값들 (Table 1)과 약간의 차이가 있었다. 농도 2g/L일 때 슬러지계면층이 전이점 높이인 31cm에 도달하는데 걸린 시간은 14분이었다. 그리고 이 농도에서의 침전 영역과 전이영역의 농도는 문헌으로부터 도출된 값과 비슷하였다. 그러나 Eq. 2로부터 도출된 값은 최하부의 sampling port부터 측정된 슬러지농도보다 약 10% 정도 높았다.

농도가 3g/L일 때 전이영역의 농도는 슬러지계면 층이 침전함에 따라 Eq. 1로부터 도출된 값보다 작았으며, 최하부의 농도는 침전이 진행될수록 Eq. 2로부터 도출된 값과 동일해졌다.

슬러지농도가 3g/L 이상일 때 침전영역내 슬러지 농도는 침전이 진행될수록 Kynch(1972)이 제시한 값 보다 컸으며, 슬러지농도의 구배도 관찰되었다.

Eq. 2로부터 column 바닥의 슬러지농도는 Table 1에서 보여주듯이 슬러지농도가 높아질수록 계속 증가 했지만, 본 실험에서는 슬러지농도가 4g/L를 넘으면 더 이상 증가하지 않았다. 이와 같은 현상은 슬러지농도가 높을 때 일어나는 슬러지간의 간섭효과에 기인하는 것으로 Roche는 이 부분을 고려하지 않았다.

Table 1. Sludge concentration at each sludge zone resulted from the equations proposed by Kynch, Font, and Roche

Con.(g/L)	Division	Settling time									
		5min	10min	15min	20min	25min	30min	35min	40min	45min	50min
2	S.Z	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	T.S.Z	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
	bottom	4.2	5.0	5.5	6.0	6.3	6.6	6.9	7.1	7.3	7.6
3	S.Z	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	T.S.Z	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8
	bottom	5.0	5.9	6.5	7.0	7.4	7.8	8.1	8.4	8.6	8.8
3.7	S.Z	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
	T.S.Z	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7
	bottom	5.6	6.5	7.1	7.6	8.1	8.4	8.8	9.1	9.4	9.6
4.1	S.Z	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
	T.S.Z	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
	bottom	5.9	6.8	7.5	8.0	8.4	8.8	9.2	9.5	9.8	10.0
5.5	S.Z	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
	T.S.Z	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
	bottom	7.0	7.9	8.6	9.1	9.6	10.0	10.4	10.7	11.0	11.3

S.Z = settling zone, T.S.Z = transition settling zone

Table 2. Relationship between the measured sludge concentration and the simulated with time

Con.(g/L)	Division	Settling time									
		5min	10min	15min	20min	25min	30min	35min	40min	45min	50min
2.0	simulated	3.3	5.4	7.5	9.0	9.8	10.2	10.4	10.4	10.5	10.5
	measured	2.6	3.5	5.3	5.6	6.9	7.2	7.3	7.3	7.7	7.7
3.0	simulated	3.5	4.6	5.7	6.8	7.7	8.4	8.9	9.3	9.5	9.7
	measured	3.9	4.6	6.0	6.4	7.0	7.1	7.1	7.3	7.4	7.5
3.7	simulated	3.7	4.3	5.0	5.7	6.3	6.8	7.3	7.6	7.9	8.2
	measured	4.4	4.5	6.1	6.9	7.8	7.6	7.9	7.5	7.9	8.0
4.1	simulated	4.1	4.3	4.8	5.3	5.7	6.1	6.5	6.8	7.1	7.3
	measured	4.2	4.6	5.9	6.0	6.3	6.6	6.4	6.5	6.6	6.9
5.5	simulated	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.8	5.8	5.8	5.8
	measured	5.3	5.1	5.0	5.1	5.0	5.3	5.2	5.5	5.5	5.4

Table 3. The height of each sludge zone for unit time

t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	...	t_n
H_0	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	...	H_n
$H_0 \cdot H_1 (=A)$	$A \cdot H_1/H_0$	$A \cdot H_2/H_0$	$A \cdot H_3/H_0$	$A \cdot H_4/H_0$	$A \cdot H_5/H_0$	...	$A \cdot H_n/H_0$
	$H_0 \cdot H_2 - A \cdot H_1/H_0 (=B)$	$B \cdot H_1/H_0$	$B \cdot H_2/H_0$	$B \cdot H_3/H_0$	$B \cdot H_4/H_0$	...	$B \cdot H_n/H_0$
		$H_0 \cdot H_3 - A \cdot H_2/H_0 - B \cdot H_1/H_0 (=C)$	$C \cdot H_1/H_0$	$C \cdot H_2/H_0$	$C \cdot H_3/H_0$	...	$C \cdot H_n/H_0$
			$H_0 \cdot H_4 - A \cdot H_3/H_0 - B \cdot H_2/H_0 - C \cdot H_1/H_0 (=D)$	$D \cdot H_1/H_0$	$D \cdot H_2/H_0$	...	$D \cdot H_n/H_0$
					$H_0 \cdot H_5 - A \cdot H_4/H_0 - B \cdot H_3/H_0 - C \cdot H_2/H_0 - D \cdot H_1/H_0 (=E)$	...	$E \cdot H_n/H_0$
						...	∞
							$() H_1/H_0$

3.2. 슬러지 플럭스

박과 강(2006a, 2006b, 2006c)은 슬러지계면층의 높이를 예측하는 슬러지계면층 변화모델식(Eq. 3)을 제안하였다(FaSVI=1.2). 이 Eq. 3으로부터 도출된 평균 슬러지농도와 실험에서 얻어진 평균슬러지농도를 Table 2에서 비교하였다. 농도가 낮을수록 실측값과 식으로부터 도출된 값의 차이는 컸다. 이와 같은 이유는 도출된 슬러지층의 계면높이와 실측값에 차이가 있고, 무엇보다 sampling port의 최저 높이가 2cm로, 농도가 가장 높을 것으로 예상되는 2cm 이하의 슬러지농도가 고려되지 않았기 때문이다. 특히 슬러지농도가 낮을수록 슬러지계면층의 높이가 낮기 때문에

고도농에 비해 두 농도의 값 차이는 더 커졌다.

박과 강(2006c)은 슬러지의 침전성이 좋을 때 batch column 높이는 슬러지계면층의 높이에 영향을 주지 않는다고 하였다. 상부

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

$$\times Fa_{SVI}$$

에 위치한 슬러지가 하부에 위치한 슬러지의 농축에 큰 영향을 미치지 않는다고 가정하였다. 그리고 박과 강(2006c)이 보여준 결과를 바탕으로 단위 시간 동안

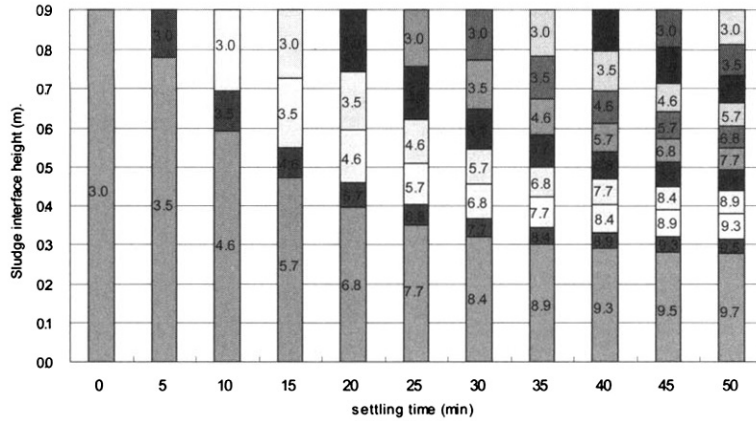


Fig. 8. The average sludge concentration in each sludge zone.

상부에서 슬러지가 계속 침전하는 경우 각 침전된 슬러지층의 높이를 Table 3에서 보여주는 방법을 통해 계산할 수 있다. 그리고 Table 3으로부터 얻어진 각 슬러지층의 높이를 이용하여 연속적 침전이 이루어지는 batch column 내 슬러지농도변화를 시간에 따라 예측할 수 있다. Fig. 8은 활성슬러지법에서 가장 넓게 적용되는 슬러지농도(3g/L)로 슬러지가 상부에서 계속 유입 및 침전될 때의 각 슬러지영역의 높이와 평균슬러지농도를 보여준다. 침전 10, 20, 30, 40, 및 50분에서 column내 평균슬러지농도는 4.1g/L, 5.2g/L, 6.1g/L, 6.8g/L 및 7.4g/L이었다.

4. 결 론

Batch column내 슬러지농도구배는 슬러지침전형태에 많은 영향을 주었다. 동일한 평균슬러지농도하에서 슬러지농도구배가 클수록 슬러지계면층은 원활하게 침전되었다. 초기 슬러지 농도가 4g/L 이상인 경우 슬러지농도가 높고 침전초기에 슬러지농도구배가 잘 형성되지 않아 슬러지계면층은 잘 침전되지 않았다. 또한 batch column 내 슬러지농도가 높아질수록 batch column의 여러 곳에서 침전정체가 관찰되었고 이들에 의해 슬러지농도분포는 균일한 패턴을 갖지 못하였다. 따라서 초기 슬러지농도가 높아진다고 column 하부의 슬러지농도가 비례해서 계속 증가하지는 않았다. 농도에 따른 슬러지계면층의 높이변화를 통해 batch 침전뿐만 아니라 연속침전에 대한 슬러지농도변화를 예측할 수 있었다. 따라서 이들 값을

활용할 경우 batch형 반응조 및 연속흐름반응조의 침전조내 슬러지농도분포를 예측하는데 많은 도움이 될 것이다.

참고문헌

1. 박석균, 강선홍 (2006a) 슬러지계면층높이변화모델에서 슬러지침전특성에 대한 영향, *상하수도학회지*, **20**(1), pp. 147-155.
2. 박석균, 강선홍 (2006b) Batch Column에서의 슬러지계면층 높이변화 예측, *상하수도학회지*, **20**(1), pp. 156-163.
3. 박석균, 강선홍 (2006c) 슬러지계면층높이변화모델에서 걸림높이에 대한 영향, *상하수도학회지*, **20**(2), pp. 265-272.
4. Dick, R.I., and Vesilind, P.A. (1969) The Sludge Volume Index-What Is It?, *J. Water Pollute. Control*, **41**, pp. 1285-1291.
5. Fitch, B. (1983) Kynch theory and compression zones, *A.I.Ch.E.J.*, **29**, pp. 940-947.
6. Font, R. (1988) Compression zone effect in batch sedimentation, *A.I.Ch.E.J.*, **34**, pp. 229-238.
7. 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.
8. Kynch, G. J. (1972) A theory of sedimentation, *Transaction Faraday Society*, **48**, pp. 166-176.
9. Roche, N., Vaxelaire, J., and Prost, C. (1995) A simple empirical model for hindered settling of an activated sludge, *Wat. Environ. Res.*, **67**(5), pp. 775-780.
10. Tiller, F. M. (1981) Revision of Kynch sedimentation theory, *A.I.Ch.E.J.*, **25**(5), pp. 823-828.