

국내 하수처리장 활성 슬러지의 침전특성에 관한 연구

이환구 · 김영철* · 최의소**

현대건설
*한서대학교
**고려대학교

Characterization of Activated Sludge Settling in Korea

Hwangu Lee · Youngchul Kim* · Euiso Choi**

Hyundai Engineering and Construction Co., Ltd

*Department of Environmental Engineering, Hanseo University

**Department of Civil Engineering, Korea University

(Received 20 August 2009, Revised 28 September 2009, Accepted 29 September 2009)

Abstract

In this paper, activated sludge settling was characterized based on field trip and zone settling tests. Plants used for this study include 5 conventional activated sludge processes and 3 A2O type treatment processes. The treatment capacities are in the range from 12,000 to 250,000 m³/day. Total number of zone settling tests were 188 set and SVI values representing settling characteristics were from 100 to 300 mL/g. It was found out that zone settling velocity of these examined plant sludges can be approximated by mean values calculated by Keinath and Daigger/Roper models. Based on these three models, solid flux analysis were carried out in order to compare design criteria (3.96~6.04 kg/m²-hr) recommended by Korea Sewage Facility Design Guideline with two models used in USA. The results show that design criteria are only applicable for normal condition in settling characteristics (below SVI 100 mL/g). Solid flux analysis of surveyed plants indicates that most of the plants are operated underload conditions except several plants experiencing poor sludge settling problem. Most of the plants are operated under high sludge blanket depths (SBD).

keywords : Daigger/Roper model, Keinath model, Solid flux, Zone settling

1. 서론

활성 슬러지 공법에서 이차 침전지의 역할과 기능에 대한 수많은 연구가 수행되었다. Dick과 Ewing에 의해 발굴되어 적용된 고행물 플럭스 이론(solid flux theory)은 이 분야에서 기술적 발전을 이루는데 상당한 기여를 하였다. 최근에 적용되고 있는 이차침전지 모델은 복잡한 형태를 가지고 있지만 기본적으로 고행물 플럭스 이론에 기초하고 있다.

고행물 플럭스 이론에 따르면 주어진 침전지에서 단위시간 동안 단위면적을 통해서 최대로 이송될 수 있는 슬러지 중량이 정해져 있다는 것이며 이 값을 한계 고행물 플럭스라고 할 때 이 값을 초과하게 되면 결국 침전지의 가장 중요한 기능 즉 농축/침강기능의 실패를 가져오게 된다. 미국 Cornell 대학의 Dick 교수는 Delaware 대학 재직 시 필라델피아 하수처리장(순 산소 활성슬러지 공정)에서 한계고행물 플럭스가 존재함을 세계 최초로 실험적으로 규명한

바 있다(Dick and Young, 1972).

그러나 고행물 플럭스 이론을 적용하기 위해서는 슬러지 농도(X)와 침전속도(V)와의 관계가 실험을 통해서 규명되어야 한다. Dick and Young(1972)은 침전속도와 슬러지 농도 관계를 아래와 같은 Log - Log 식을 제안하였다.

$$V = mX^n \quad (1)$$

여기서 m, n은 침전모델 상수이며 m은 슬러지 침전특성을 그리고 n은 농도효과를 반영하는 상수이다. Vesilind (1968)는 Dick의 모델과 유사한 아래 지수함수모델을 제안하였다.

$$V = V_0 e^{-kX} \quad (2)$$

V₀는 지역침전속도를 나타내는 슬러지 농도 X가 최소로 될 때 슬러지가 갖는 최대 침전속도를 나타내며 k는 침전에 미치는 농도효과를 나타낸다. Daigger and Roper (1985)는 다양한 침전특성을 갖는 슬러지에 보편적으로 설계 및 운전 목적으로 적용될 수 있는 Vesilind 변형모델을 제안하였다.

* To whom correspondence should be addressed.
ykim@hanseo.ac.kr

$$V = 7.80e^{-[0.148 + 0.0021(SVI)]X} \quad (3)$$

그 후에 Keinath(1990)는 Daigger와 Roper 식이 실제 슬러지의 침전속도를 과대하게 산정하는 단점을 보완하기 위하여 아래와 같은 수정된 식을 제안하였다.

$$V = \{15.3 - 0.061(SVI)\} e^{-[0.426 + (0.00384)(SVI) - (0.000054)(SVI)^2]X} \quad (3)$$

최근 고도처리(질산화)가 시행되면서 생물 반응조에는 많은 새로운 공법 등이 적용되어 발전을 거듭하고 있다. 전 세계적으로 고도처리에서는 2차 처리에서보다 SRT (solid retention time)가 매우 길게 설계되므로 근본적으로 증식속도가 매우 낮아 2차 처리공정에서 등장하지 않는 *Nocardia*나 *Microthrix parvicella*와 같은 사상성 미생물이 생물 반응조와 이차침전지에서 벌킹, 거품(foam)과 스크(scum) 등 각종 침전문제를 야기하고 있다(강민기 등, 2006; Pitt and Jenkins, 1990; Pujol et al., 1991).

또한 2차 처리시설의 포기조와 달리 반복적인 공기공급 유무나 과도한 포기(aeration)에 의한 Deflocculation 등에 의해 침전성은 양호한 반면에 침전지 유출수의 수질이 나쁜 경우가 종종 있다(Pipes, 1969).

이러한 각종 슬러지 침전문제의 발생은 우리나라에서도 예외가 아니어서 고도처리시설을 신설했거나 개량한 처리장에서 이차침전지의 심각한 운전문제를 야기하여 전체적인 처리성능을 저하시키고 있다. 따라서 고도 처리시 필연적으로 나타날 수밖에 없는 슬러지 침전특성의 변화를 예상하여 계획과 설계단계에서부터 반영하여야 할 것이고 이미 건설된 처리시설에서는 이에 대처할 수 있는 적절한 운전전략을 수립하여야 할 것이다.

본 논문에서는 우리나라에서 운전 중인 하수처리장 생물 반응조 슬러지의 침전특성을 분석하여 제시하였다.

2. 연구방법

2.1. 조사대상 하수처리장

본 연구를 위하여 2005년 3월부터 2006년 7월까지 우리나라 Table 1에 제시된 전국 8개 하수처리장을 방문하여 활성 슬러지 침전특성을 조사하였다. 조사대상 하수처리장은 표준 활성슬러지 처리장 5개소, A2O계열 고도처리시설

3개소였으며, 일일 처리용량 범위는 12,000 ~ 250,000 m³/일이었다.

2.2. 슬러지 침전특성분석

1리터 매스실린더를 이용하여 5~6개 세트의 농도에 대해 침전시험을 실시하였다(APHA et al., 1998). 슬러지 농도는 이차 침전지 유출수를 가지고 MLSS(mixed liquor suspended solid)와 반송 슬러지를 연속적으로 희석하거나 MLSS 슬러지를 농축하여 사용하였다. 침전시험은 초기 10분 동안에는 2분 간격, 그 후로는 5분 간격으로 실린더 부피를 측정 한 후 높이로 환산하였다. 그리고 30분 침전 후에 MLSS의 SVI(sludge volume index) 값을 산출하였고 이 슬러지가 1리터 매스 실린더에서 달성할 수 있는 최대 슬러지 농도(MxSS, maximum suspended solids)를 산출하였다. 일반적으로 현장 처리장에서 실시하고 있는 침전시험과 마찬가지로 혼합 없이(unstirred) 침전시험을 수행하였다.

2.3. 현장분석

현장에서는 이차침전지의 성능을 평가분석하였다. 평가내용은 농축, 침강, 저장기능으로 MLSS 농도와 반송 슬러지 농도, 유출수 SS 농도, 침전지내 슬러지 블랑킷 깊이(sludge blanket depth, SBD)와 그 농도를 측정하였다.

2.4. 슬러지 침전시험의 구성

Table 2에는 농도별, 슬러지 침전특성별 침전횟수 분포를 보여주고 있다. 수행된 총 침전시험회수는 188회였다. SVI에 따른 시험회수는 침전성이 매우 양호한 100 mL/g 이하부터 침전성이 매우 불량한 300 mL/g 이상까지 망라되도록 하였다.

Table 2. Sludge settling tests

Concentration (X)	Sets	SVI Range	Sets
below 1.0 g/L	14	below 100 mL/g	12
1.0 ~ 2.0 g/L	39	100 ~ 150 mL/g	57
2.0 ~ 3.0 g/L	40	150 ~ 200 mL/g	53
3.0 ~ 4.0 g/L	27	200 ~ 250 mL/g	12
4.0 ~ 5.0 g/L	21	250 ~ 300 mL/g	20
5.0 ~ 6.0 g/L	19	300 ~ 350 mL/g	27
6.0 ~ 7.0 g/L	12	above 350 mL/g	7
above 7.0 g/L	16	-	-
Total	188	Total	188

Table 1. Plants used for characterizing activated sludge settling

Process	Plant	Wastewater	Capacity (m ³ /d)	Types of clarifiers
Conventional AS process	S city	Domestics	30,000	Circular
	D county	Domestic	15,000	Circular
	U city	Domestic+Industrial	250,000	Rectangular
	K city	Domestic	20,000	Circular
	S city	Domestic	220,000	Circular
A2O type	I city	Domestic	12,000	Rectangular
	A city	Domestic+Industrial	149,000	Rectangular
	C city	Domestic	150,000	Circular

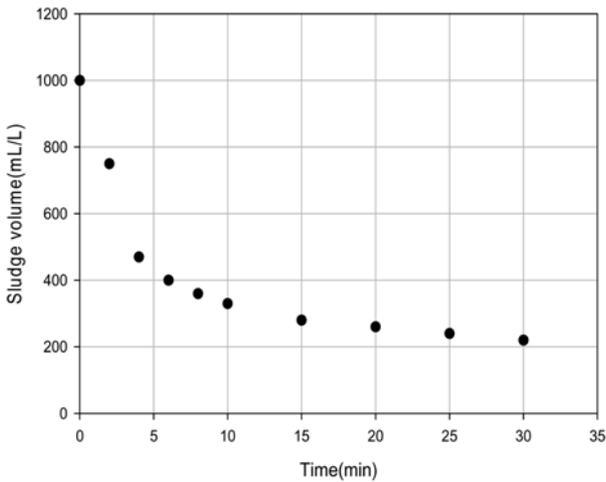


Fig. 1. Sample zone settling curve of a specific sludge concentration.

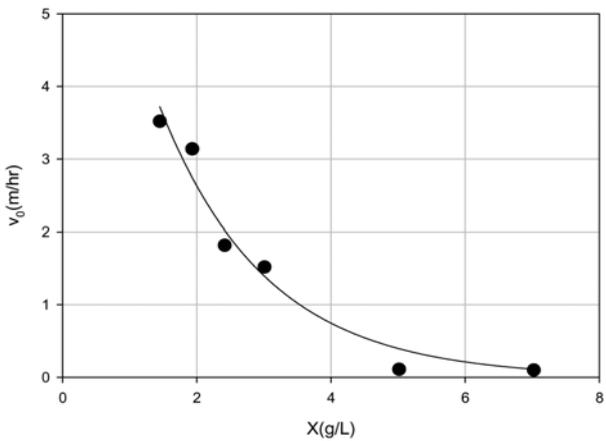


Fig. 2. Change of zone settling velocity (V) with respect to the sludge concentration (X).

Fig. 1에는 슬러지 침전실험결과 얻은 침전곡선을 예로 나타내었다. 슬러지의 초기(지역) 침전속도(initial settling velocity)는 아래 침전곡선에서 초기에 침전속도가 일정했던 부분의 침전자료를 추출하여 산출하였다.

Fig. 2에는 각각의 슬러지 농도에 대해 Fig. 1과 같이 구한 침전속도를 1개 세트의 슬러지 농도(X)-침전속도(v) 관계를 예를 들어 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 조사결과

Fig. 3에는 조사기간 동안 슬러지 침전실험을 통하여 획득한 188개의 자료를 슬러지 침전특성에 관계없이 농도-속도(X-V) 관계를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 동일한 농도에서 침전속도의 차이는 처리장별 침전특성의 차이에 따른 것이다. 그러나 슬러지 농도가 증가할수록 처리장 별 침전속도의 차이가 작아지는데 그 이유는 슬러지의 농도효과(물리적)가 침전특성 즉 슬러지를 구성하고 있

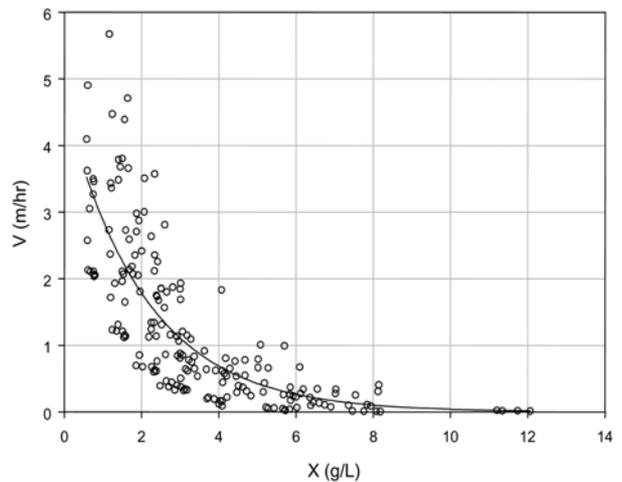


Fig. 3. The X-V relationship of the sludges examined.

는 생물학적·화학적 특성에 의한 영향보다 크게 작용함을 알 수 있다.

3.2. Vesilind와 Dick 침전모델 상수

Table 3에는 조사대상 하수처리장 슬러지의 Vesilind와 Dick 침전모델(식 (1), (2)) 상수 V_0 , k , m , n 값을 구하여 제시하였다. Dick 침전모델의 모델상수 m 값은 4.30~33.86, n 값은 2.42~3.49이었다. 한편 Vesilind 모델에서 최대침전속도를 나타내는 모델상수 V_0 는 4.87~16.57, k 값은 0.60~1.18이었다.

Table 3. Settling model parameters

Plant	Dick's parameters		Vesilind's parameters	
	m	n	V_0	k
S city	10.64	3.1186	16.565	1.1807
D county	9.91	3.2826	4.8690	0.8661
U city	11.23	2.4212	10.147	0.7270
K city	24.89	2.9993	5.6358	0.5981
S city	33.86	3.4898	5.1746	0.6293
I city	4.30	3.2637	1.9621	0.7919
A city	10.39	2.5337	10.329	0.7393
C city	9.24	2.3560	9.023	0.6980

3.3. Keinath와 Daigger/Roper 모델에 의한 침전속도와 비교

Fig. 4에는 침전실험결과 얻은 모든 자료를 X-V 관계 그래프에 도시하였다. 또한 Daigger/Roper와 Keinath 모델로 계산된 침전속도를 함께 제시하였다. 그림에 따르면 본 연구의 현장조사 결과는 Keinath 모델결과와 Daigger/Roper의 결과의 중간경도를 보였다. 회귀분석결과 아래 식 (4)와 같이 조사대상 활성 슬러지의 침전특성은 두 가지 방법에 의해 계산된 침전속도 값의 평균값에 접근하는 것으로 분석되었다.

$$V = 0.48 \{ 7.80e^{-0.148+0.0021(SVI)X} + \{ 15.3-0.061(SVI) \} e^{[-0.426+(0.00384)(SVI)-(0.000054)(SVI)^2]X} \} \quad (4)$$

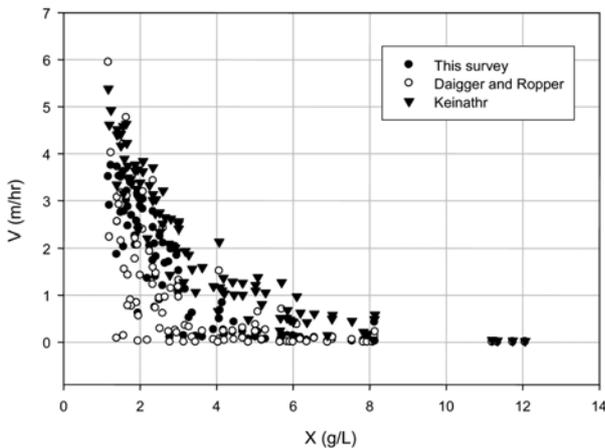


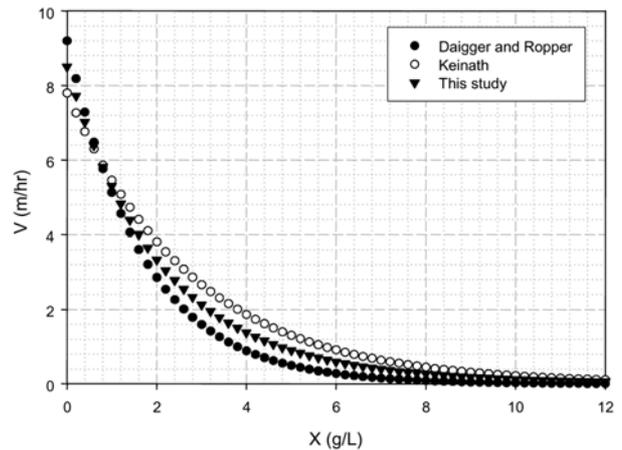
Fig. 4. Comparison between Keinath and Daigge/Roper's models.

3.4. 각각의 모델과 실측치 비교

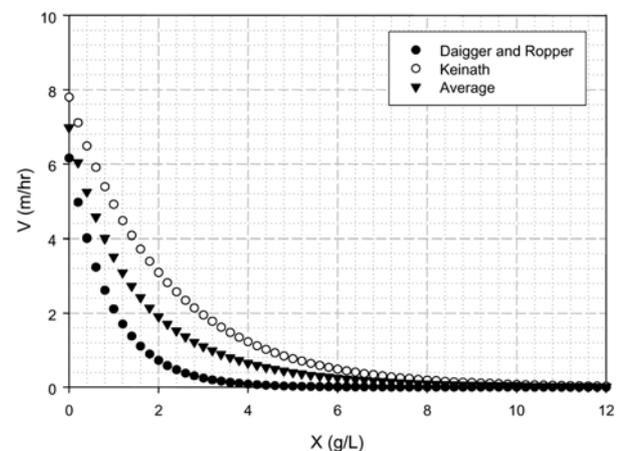
Fig. 5에는 SVI 100 mL/g, 150 mL/g, 200 mL/g 에서 각각의 방법에 의해 구한 X-V 관계를 보여주고 있다. 그림의 자료에 따르면 정상적인 침전특성으로 여겨지는 SVI 100 mL/g에서는 저농도와 고농도에서는 거의 동일한 침전특성을 보이고 있으며 대체로 3가지 방법에 의한 침전속도에 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 침전성이 악화될 때는 3가지 방법에 의한 침전속도 계산결과가 큰 차이를 보였다.

먼저 Daigge 모델과 Keinath 모델과의 차이는 두 가지 방법에 적용된 실험방법의 차이에서 기인하는 것으로 보고되고 있다(ASCE and WEF, 1992). Daigge 모델은 2개소의 현장 처리장 슬러지와 6개의 pilot 처리장 슬러지를 대상으로 unstirred 침전실험으로부터 개발된 반면 Keinath 모델은 21개소의 현장처리장 슬러지를 대상으로 stirred(1 rpm) 침전실험에서 개발된 것이다. 따라서 현장 침전지 내부의 수리학적 흐름조건을 반영한 Keinath 모델이 동일한 농도와 SVI에서 큰 침전속도를 보이는 것이다.

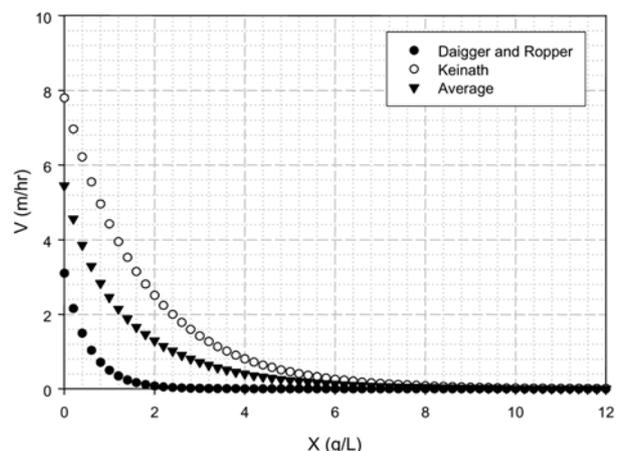
Daigge 등이 수행한 침전실험과 마찬가지로 unstirred 조건에서 수행한 우리나라 슬러지가 동일한 농도와 침전특성에서 미국의 슬러지에 비하여 큰 침전속도를 보이고 있는데 입증할 자료는 충분하지 않지만 우리나라의 슬러지가 반류수의 영향으로 FSS 함량이 크기 때문으로 추정된다. Fig. 6에는 각각의 계산방법에 따라 산출된 슬러지의 중력 플럭스 값($G_g = X_i V_i$)을 그래프로 나타내었고 우리나라 하수도설계 기준(환경부, 2005)에서 제시하고 있는 설계 고형물 플럭스(부하율) 3.96~6.04 kg/m²-hr(95~145 kg/m²-일)를 나타내었다. 일반적인 관점에서 하수처리장 이차 침전지 유입 고형물 부하량이 중력 플럭스 곡선 하단에 위치할 경우 저부하(underload), 상단에 위치할 경우 과부하(overload)로 판단하게 된다. 과부하 상태에서는 유입 슬러지의 양이 농축과정을 거쳐 하루로 배출되는 슬러지 양보다 크므로 그 차이만큼 침전지에 축적되어 슬러지 불량률이 상승하여 대량의 슬러지 유실의 원인이 되고 처리수의 수질을 크게 악화하게 되는데 이것을 농축실패(thickening failure)라고 부른다



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Calculated and measured settling velocity. (a) SVI = 100 mL/g (b) SVI = 150 mL/g (c) SVI = 200 mL/g

(Keinath et al., 1977). 이와 같은 논리로 Fig. 6에서처럼 3가지의 슬러지 침전성을 가정하고 3가지의 서로 다른 모델에 의해 계산된 플럭스 곡선과 우리나라 이차 침전지 설계 기준과 비교해보면 SVI 값이 100 mL/g 이하(슬러지 침전성을 정상으로 보는 수치)의 경우에는 모든 방법에서 설계 기준을 만족하고 있으나 그 이상의 악화된 침전성에서는

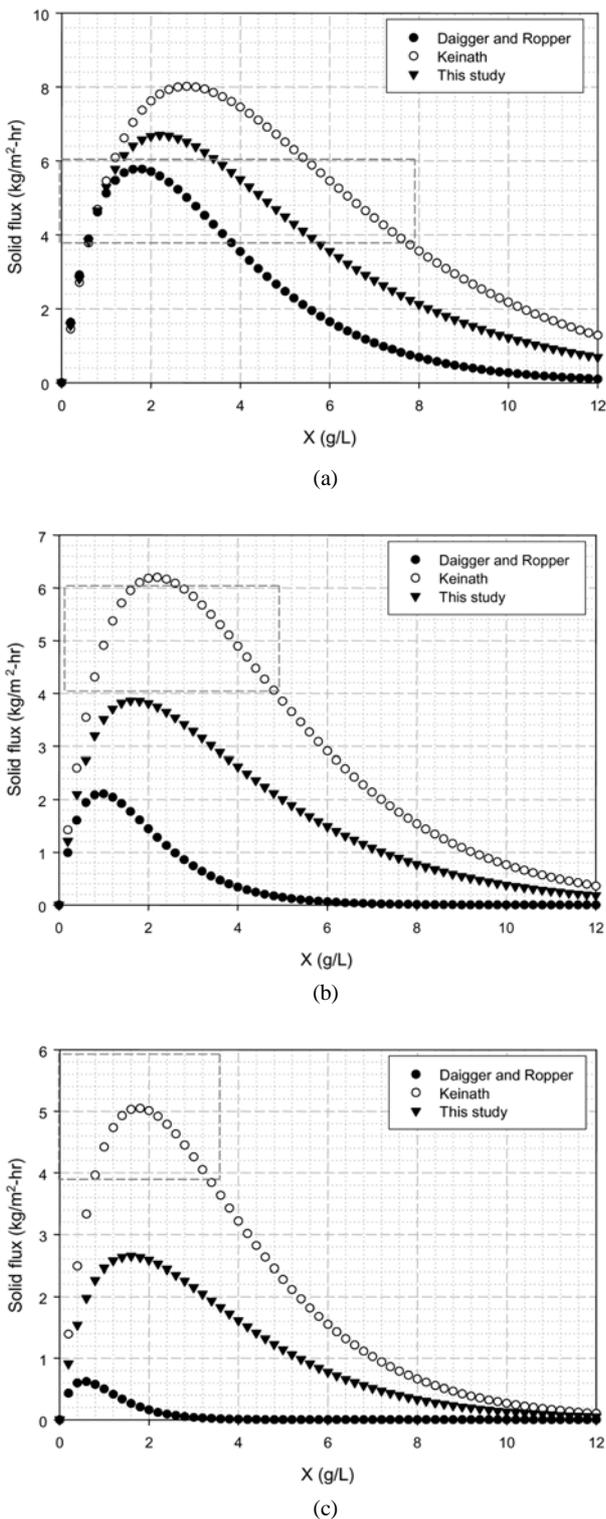


Fig. 6. Comparison between gravitational flux curves by Keinath, Daigger and this study (a) SVI = 100 mL/g (b) SVI = 150 mL/g (c) SVI = 200 mL/g.

Keinath 모델만이 전체 부분적으로 하수도 설계기준에서 제시하고 있는 설계기준 범위에 해당됨을 알 수 있다.

이와 같은 결과를 3가지 모델과의 정량적 비교 또는 옳고 그름을 입증하는데 활용하자는 의도는 전혀 없고 우리나라 하수도 설계기준에서 제시하고 있는 기준이 실제 미

국의 하수도 설계기준(ASCE and WEF, 1992)에서 사용을 제안하고 있는 모델들과 우리나라 슬러지 침전특성을 반영한 모델에서 어느 지점에 위치하고 있는지를 살펴보기 위함이다.

3.5. 침전지 성능 현장조사

우리나라 몇몇 하수처리장 이차침전지 성능평가결과를 아래 Table 4에 나타내었다. 일부 조사대상 하수처리장의 가장 큰 특징은 슬러지 블랑킷 깊이(Sludge Blanket Depth)를 높게 운전한다는 것이다. 이러한 문제는 대부분의 우리나라 하수처리장이 안고 있는 높은 SVI에 의한 이차침전지의 농축문제와 탈수능력부족과 관련이 있다.

먼저 D와 I 하수처리장의 경우 심각한 슬러지 벌킹상태에서 운전되고 있었으며 K 하수처리장은 2차 처리시설임에도 불구하고 MLSS 농도가 3.0~6.4 g/L로 매우 높게 운전되고 있는데 이는 잉여 슬러지 탈수능력 부족 때문이다.

전자의 경우 높은 SVI 값 즉 1 리터 실린더에서 30분 침전 후의 슬러지 부피(SV₃₀)가 크므로 당연히 이차침전지에서 높은 SBD를 보이는 것은 당연한 귀결이라 할 수 있다(Kim et al., 2002).

후자의 경우 이차침전지에 가해지는 슬러지 부하율이 높은 MLSS 농도로 인하여 증가하게 되며 이 경우 부하율이 한계고형물 플럭스를 초과하게 되면 이차침전지에서 슬러지가 축적하게 되어 블랑킷 깊이가 증가하게 된다(Giokas et al., 2003). 높은 SBD가 반드시 이차침전지의 성능에 부정적인 영향을 미친다고는 볼 수 없지만(Kim, 1995) 시간 최대유량이나 강우시 발생하는 수리학적 과부하시 대량의 슬러지 유실로 이어질 가능성이 매우 높다.

전체 조사대상 하수처리장 슬러지 부하율(solid loading rate)은 2.67~8.06 kg/m²·hr 범위에서 운전되고 있으며 일부 하수처리장을 제외하고는 하수도 시설기준(환경부, 2005)에서 제시하고 있는 최대 부하율 6.04 kg/m²·hr 이하로 운전되고 있다. 그러나 운전 부하율이 7.0 kg/m²·hr 이상이 되면 이차침전지 내부의 SBD 증가로 처리성능이 크게 저하되는 것으로 사료된다. 표면 부하율(overflow rate)은 0.43~1.21 m/일로 운전되고 있으며 이 범위에서는 SBD가 높은 경우를 제외하고는 높은 O.R로 인하여 처리성능이 저하되는 것으로 보이지 않는다.

Fig. 7에는 조사대상 하수처리장 이차 침전지의 상태점(state point)을 분석한 결과를 제시하였다. 고형물 플럭스 곡선에 표면 부하율을 나타내는 직선과 MLSS 운전농도, 운전 고형물 부하량이 교차하는 지점이 고형물 플럭스 곡선 하부에 존재하면 저부하 상태(underload), 상부에 존재하면 과부하(overload) 상태로 판정하게 된다(Keinath et al., 1977). Fig. 7에 따르면 S-S, S, U, A, I시 하수처리장 이차 침전지는 저부하 상태에서 운전되고 있으며, K, D 시의 경우는 과부하 상태에서 운전되고 있다.

과부하 상태에서 운전은 이차침전지로 유입되는 슬러지의 양이 반송 슬러지를 통해서 하부로 배출되는 슬러지의 양보다 크기 때문에 침전지 내부에 슬러지가 축적하여 결국

Table 4. Secondary clarifier operational data

Plant	Flow rate m ³ /hr	Return %	X g/L	XR g/L	S.L. kg/m ² -hr	O.R. m ³ /m ² -hr	SVI mL/g	Depth m	SBD m	EfSS mg/L
S-S city	1,152	42	2.4	5.2	3.54	1.04	138	3.50	0.9	9.0
D county	380	117	3.1	6.9	4.21	0.62	204	3.50	2.4	5.0
U city	10,448	26	2.6	10.2	3.86	1.18	92	3.80	0.6	8.0
	10,594	26	2.4	10.0	3.63	1.19	116	3.80	0.8	11.5
	9,608	28	2.5	8.4	3.48	1.08	128	3.80	0.6	10.5
	10,701	26	2.3	9.4	3.54	1.21	115	3.80	0.7	10.2
	10,453	26	2.1	10.0	3.07	1.18	106	3.80	0.6	10.7
	7,406	37	2.3	8.8	2.67	0.83	124	3.80	0.4	6.2
K city	335	146	6.4	11.2	6.77	0.43	148	3.70	2.6	10.0
	561	88	5.8	11.7	7.93	0.72	151	3.70	3.0	20.3
	566	87	5.9	12.1	8.06	0.73	155	3.70	2.9	19.7
	541	82	3.2	4.7	3.67	0.58	138	3.70	0.5	2.3
	759	65	3.4	6.0	5.42	0.97	158	3.70	0.9	2.3
	656	71	3.0	7.5	4.33	0.85	110	3.70	1.1	4.0
S city	258	45	3.9	11.3	2.97	0.53	158	4.25	0.9	27.0
I city	3,680	38	2.8	8.1	2.79	0.49	302	4.00	1.9	10.0
A city	2,578	36	2.3	8.1	2.92	0.92	81	3.60	0.8	14.3

RAS: Return activated sludge, EfSS: SS in the effluent from clarifier, S.L.: Solid loading rate, O.R.: overflow rate

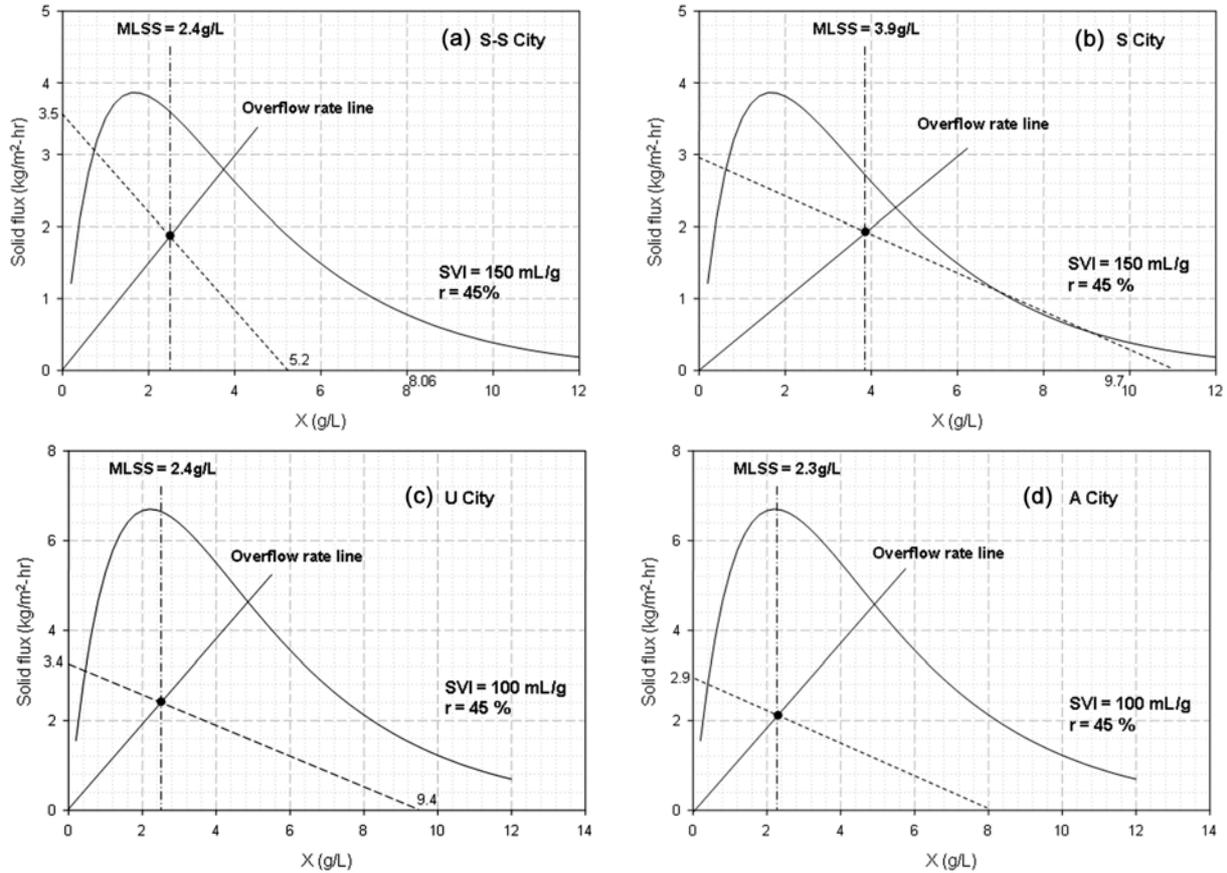


Fig. 7. Application of solid flux diagram to the field secondary clarifier.

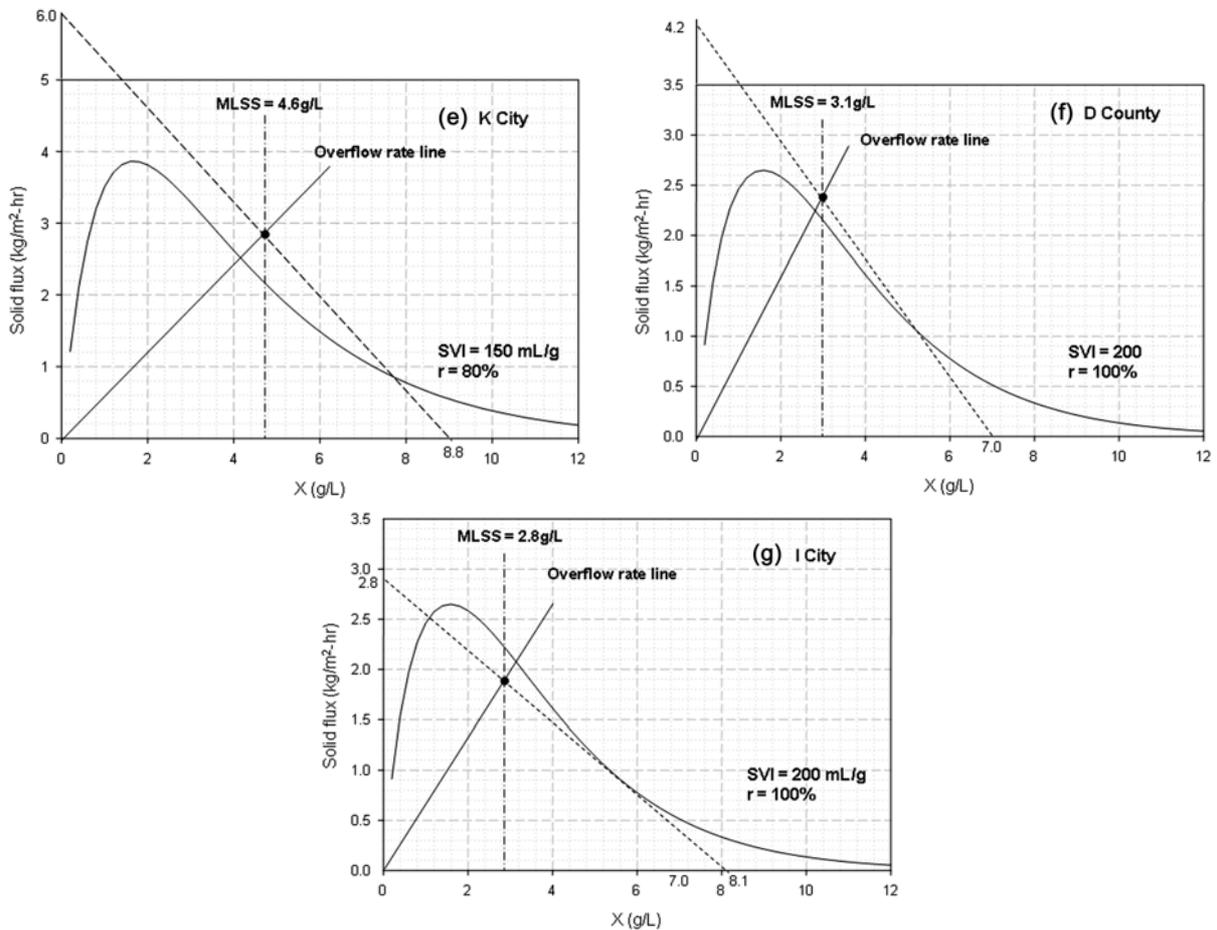


Fig. 7. Application of solid flux diagram to the field secondary clarifier (continued).

에 슬러지 블랑킷의 상승으로 연결되어 수리학적 과부하시 대량의 슬러지 유실로 이어질 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다(Kim et al., 1997).

4. 결론

본 논문에서는 국내 8개 하수처리장(2차 처리 5개, 고도 처리 A2O 계열 3개, 처리용량범위 = 12,000~250,000 m³/일)을 방문하여 채취한 활성 슬러지 침전실험을 기초로 국내 슬러지의 침전특성을 평가하였다. 총188 세트의 침전실험을 수행하였으며 슬러지 침전성은 SVI 기준으로 100~300 mL/g 범위였다. 본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) Vesilind와 Dick 침전모델상수 V₀, k, m, n 값을 구한 결과 Dick 침전모델의 모델상수 m 값은 4.30~33.86, n 값은 2.42~3.49이었다. 한편 Vesilind 모델에서 최대침전 속도를 나타내는 모델상수 V₀는 4.87~16.57, k값은 0.60~1.18이었다.
- 2) 침전실험결과 얻은 모든 자료를 슬러지 침전성을 나타내는 SVI와 슬러지 농도-침전속도 관계를 회귀분석한 결과 Daigger/Roper와 Keinath 방법에 의해 계산된 침전 속도 값의 대략 평균값에 접근하는 것으로 분석되었다.

$$V = 0.48\{7.80e^{-[0.148+0.0021(SVI)]X} + \{15.3-0.061(SVI)\} e^{-[0.426+(0.00384)(SVI)-(0.000054)(SVI)^2]X}\}$$

- 3) 고형물 플럭스 분석결과 대부분 국내 하수처리장의 경우 저부하 상태에서 운전되고 있고 일부 심각한 슬러지 별킹 문제나 탈수용량부족에 시달리고 있는 처리장에서는 과부하 상태에서 운전되고 있다.

참고문헌

강민기, 김영철, 방성호, 이진우, 하준수(2006). Microthrix parvicella에 의한 슬러지 별킹과 거품문제 해결. *대한환경공학회지*, **28**(4), pp. 376-383.

환경부(2005). 하수도시설기준, 한국상수도협회.

APHA, AWWA and WEF (1998). Standard Methods for Examinations of Water and Wastewater. 20th edition, Washington D.C., USA.

ASCE and WEF (1992). Design of Municipal Wastewater Treatment Plants, WEF and ASCE, Alexandria, VA.

Daigger, G. T. and Roper, R. E. (1985). The relationship between SVI and activated sludge settling characteristics. *J. Water Pollut. Control Fed.*, **57**, pp. 859.

Dick, R. I. and Young, K. W. (1972). Analysis of thickening performance of final settling tanks, In *presented at the Purdue Ind. Waste Conf., 27th Meeting*, Lafayette, Ind.

- Giokas, D. L., Diagger, G. T., von Sperling, M., Kim, Y., and Paraskevas, P. A. (2003). Comparison and evaluation of empirical zone settling velocity parameters based on sludge volume index using a unified settling characteristics database. *Water Res.*, **37**, pp. 3821-3836.
- Keinath, T. M. (1990). Diagram for designing and operating secondary clarifiers according to the thickening criterion. *J. Water Pollut. Control Fed.*, **62**, pp. 254.
- Keinath, T. M., Hofer, D. A., Dana, C. H., and Ryckman, M. D. (1977). Activated sludge-unified system design and operation. *Journal of Environmental Engineering Division, ASCE*, **103**, pp. 829-847.
- Kim, Y. (1995). Solid Storage Function of Activated Sludge Secondary Settling Tanks during Hydraulic Overloads, Ph.D. dissertation, Drexel University.
- Kim, Y., Giokas, D. L., and Paraskevas, P. A. (2002). A simple empirical model for activated sludge thickening in secondary clarifiers. *Water Research*, **36**(13), pp. 3245-3252.
- Kim, Y., Pipes, W. O., and Chung, P. (1997). Estimation of suspended solids concentrations in activated sludge settling tanks. *Wat. Sci. Technol.*, **35**(8), pp. 127.
- Pipes, W. O. (1969). Types of activated sludge which separate poorly. *J. Water Pollut. Control Fed.*, **41**(5), pp. 714-724.
- Pitt, P. and Jenkins, D. (1990). Causes and control of Nocardia in activated sludge. *Journal WPCF.*, **62**, pp. 143-150.
- Pujol, R., Duchene, P., Schetrite, S., and Canler, J. P. (1991). Biological foams in activated sludge plants: characterization and situation. *Water Res.*, **25**, pp. 1399-1404.
- Vesilind, P. A. (1968). The Influence of Stirring in the Thickening of Biological Sludge, Ph.D. dissertation, University of North Carolina.