

장방형 침전지에서 길이에 따른 슬러지 플럭의 형태에 관한 연구

김영철

한서대학교 환경공학과 교수

1. 서론

2차 침전지는 슬러지를 생물 반응조 처리수와 분리함으로써 침전지 유출수에 포함된 미생물 슬러지 농도(SS)가 최소로 되도록 하는 침강기능(clarification function)과 처리수와 분리되어 침전지 하부에서 농축된 슬러지를 반송과 폐기를 통해 미생물의 활성을 유지하고자하는 농축기능(thickening function)이 종합되어 수처리와 슬러지 처리를 연결하는 중요한 단위공정이다.

또 다른 2차 침전지의 중요한 기능은 중력에 의해 침전성이 양호한 슬러지를 선별하는 기능(selection function)을 가지고 있다. 그 동안 다른 두 기능에 비해 상대적으로 선별기능은 잘 알려지지 않았다. 침전성이 불량한 슬러지는 자연적으로 침전지로부터 처리수와 함께 유실되어 공정내에 축적 증식하는 것을 방지해 준다(Pipes, 1979). 2차 침전지 유출수의 SS 농도는 침전지의 크기와 형태, 구조에 관계없이 “Zero SS”는 있을 수 없다(Pipes, 1979). 그 이유는 2차 침전지에서 침전성이 양호한 미생물은 중력에 의해 확보되는 반면에 개별 cell 이나 침전성이 불량한 미생물은 자연스럽게 공정으로부터 유실되는 선별기능을 수행하기 때문이다. 따라서 설계업무에 종사하는 실무자 입장에서 추가적인 후속시설 없이 1년 365일 하수처리장의 2차 침전지 유출수의 순

간 SS 농도를 10mg/L 또는 5mg/L 이하로 장담하는 것은 2차 침전지에 대한 이해의 부족에서 기인한다.

슬러지 선별기능은 침전성이 매우 불량한 foam (일명 스킴)을 발생시키는 Nocardia나 Microthrix parvicella 등과 같은 사상균이 침전지에서 일반 침전성이 양호한 슬러지로부터 분리되어 침전지 표면에서 스킴을 형성한다든지 침전지 유출수와 함께 유실되는 것을 그 예로 들 수 있다. 이러한 침전지의 미생물 선별기능에 의해 자연적으로 분리된 사상균이 공정내로 다시 순환되어 축적 증식되지 않도록 하는 것은 스킴문제를 해결하는데 가장 효과적인 방안이다. 물론 매우 어려운 얘기이지만 방류수 기준을 만족하는 수준에서 침전성이 불량한 미생물이 처리공정으로부터 wash-out되도록 하는 것이 가장 간단한 해결방안이 될 것이다.

이러한 본질적인 2차 침전지의 기능과 역할을 고려하지 않고 무조건 침전시간을 길게 가져간다든지 또는 무조건 표면 부하율을 낮게 가져가서 지나치게 높은 SS 침전성능을 얻는 것 자체가 전체적으로 슬러지의 침전성을 악화시켜 종국에는 침전지의 성능을 떨어뜨리는 경우가 있다.

이론적으로 이상적인 독립입자의 침전에서 입자의 제거여부는 전적으로 표면 부하율(overflow rate)에 의해서 결정된다. 이것은 제공되는 침전지의 수표면적에 따라서 침전제거되는 입자의 분포와 침전지의 거리에 따

른 침전입자의 분포가 결정된다는 것을 의미한다. 만약에 활성 슬러지나 고도처리 공정의 2차 침전지에서 지역 침전과 함께 독립 또는 응결입자 침전지에서와 같은 현상이 지배적으로 일어난다면 침전제거하고자 하는 슬러지와 공정으로부터 배제하고자 하는 슬러지 입자의 침적하는 지점과 침전성능을 모델링할 수 있을 것이다.

독립입자의 침전이론을 그대로 적용할 수는 없지만 침전지 하부에서 일어나는 농축관점에서 지역침전이 일어나는 것으로 보는 2차 침전지에서도 지내 침전수와 포기조나 생물 반응조에서 유입된 슬러지 수류가 희석되어 침전지 수심별로 지역, 응결, 독립침전 현상이 일어난다. 따라서 2차 침전지의 설계에서 표면 부하율이 가장 중요한 설계인자의 하나로 설계에 이용되고 있는 것이다.

슬러지 floc은 형태적, 화학적, 물리화학적 특성으로 분류되고 있다. 이 중 floc의 성질을 규명하는데에 형태적 특성(morphological features)이 가장 널리 이용되고 있다. 형태적 특성은 주로 floc size, shape, 플럭에 포함된 filament의 길이를 말한다. 물론 슬러지 입자의 응결(flocculation) 과정을 규명하기 위하여 물리적인 슬러지의 표면 특성이나 화학적 구성물질의 분석을 통하여 심도있게 분석할 수도 있다(Andreadakis, 1993).

본 연구자는 길이가 긴 직사각형 침전지에서 슬러지 플럭의 침전양상에 관심을 갖게 되었다. 만약에 슬러지 침전성이 매우 나쁘고 침전지의 길이에 따른 침적된 슬러지 플럭의 입도를 평가할 수 있을 정도로 충분히 긴 직사각형 침전지에서 독립이나 응결입자의 침전이 일어나는 현상을 관측할 수도 있을 것이다. 본 논문에서는 침전지의 길이방향에 따른 슬러지 floc의 형태학적 특성을 규명하였다.

2. 실험방법

2.1 연구대상 2차 침전지

연구대상 침전지는 수도권의 A시에 위치하고 있으며

침전지에 관한 자세한 사항은 Table 1에 제시하였다. 침전대상 슬러지는 변형된 A₂O 계열 고도처리시설 슬러지이다. 침전지의 폭이 5.0m로 작은데 반하여 유효침전부의 길이는 63.0m로 대단히 길게 설계되어 있다.

유효수심(side water depth)은 약4.0m이다. 연구기간 동안 2차 침전지의 평균 운전 수리학적 체류시간은 8시간으로 매우 길게 운전되고 운전되고 있으며 표면 부하율은 설계기준에 절반에도 미치지 못하는 11.1m/일이었다.

Table 1. Long rectangular clarifiers used for this study.

Parameters	Values
Width(m)	5.0
Length(m)	63.0
Side water depth(m)	4.0
Number of clarifier	12.0
Surface area(m ²)	7,560
Volume(m ³)	30,240
Effluent flow(m ³ /d)	84,220
Return sludge flow (m ³ /d)	68,471
Overflow rate(m/d)	11.1
Solid loading(kg/m ² -d)	61.0
HRT(day)	8.6
MLSS to Clarifier(mg/L)	3,020
Return sludge to Pre-ax(mg/L)	7,460
Effluent SS(mg/L)	3.0
Effluent VSS(mg/L)	2.7

2.2 슬러지 블랑킷 슬러지의 채취

2차 침전지에서 슬러지 블랑킷의 측정과 침적 슬러지 층을 채취하기 위하여 integrated sludge core sampler를 사용하였다(Kim et al., 1997). 아래 Fig.1에 나타난 것처럼 슬러지 블랑킷(sludge blanket) 채취위치는 침전지에서 유효 침전부 유입부 부분(SBD #1), 침

전지의 중간 부분인 SBD #7, 그리고 유효침전부 유출부와 가까운 SBD #12 지점이었다.

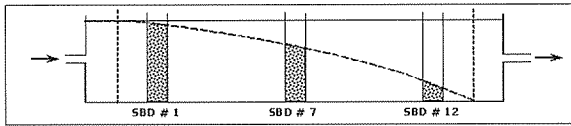


Fig. 1. Location of sludge blanket sampling.

2.3 슬러지 침전성

슬러지의 침전성을 평가하기 위하여 1 리터 실린더에서 30분 침전 후의 침전지 슬러지 부피(SV30)와 30분 침전 후 1gram의 슬러지가 차지하는 부피 ml, 즉 SVI를 측정하였다.

2.4 사상균 길이(filament length)와 Floc Size 분석

침전 슬러지의 형태학적 특성을 규명하기 위하여 슬러지 플러의 침전성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 Filament Length와 Floc Size를 분석하였다(Jin et al., 2003). 2차 침전지내 불량질 슬러지에 함유된 사상성 미생물의 양을 정량화하기 위하여 광학현미경과 디지털 카메라 이미지 분석을 통하여 조사하였다. 이미지 분석(x400)은 동일한 시료에 대해 10개 이상의 fields를 대상으로 image analyzer(i-solution, Korea) 프로그램에 의해 실시되었다(photo 1).

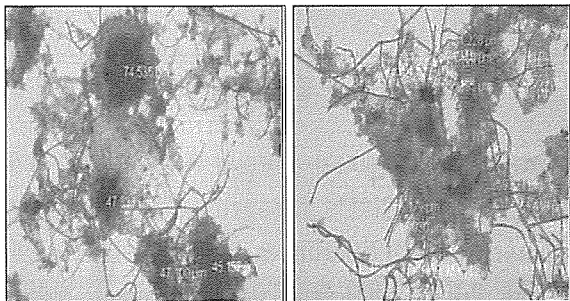


Photo 1. Measurement of the floc size and filament length.

3. 결과 및 고찰

3.1 Microthrix parvicella 벌킹

2005년 4월초 연구개시 당시 연구 대상 처리장은 심각한 Microthrix parvicella 벌킹문제를 겪고 있었다(Fig. 2). 벌킹상태를 나타내는 SVI 값은 300mL/g 이상을 나타내었다. Microthrix 벌킹은 아직 우리나라에서 알려지지 않은 문제로 주로 유럽이나 남아공 등지에서 빈번하게 발생하는 슬러지 침전문제이다. Microthrix parvicella의 가장 큰 특징은 심각한 벌킹뿐 만 아니라 포기조와 2차 침전지에서 심각한 거품과 스크럼문제를 발생 시킨다는 점이다(Hao et al., 1988).

이러한 사상균의 증식은 매우 긴 SRT 고도처리공정에서 유발되는 것이 특징이며(Madoni, 2000) 따라서 SRT의 단축은 가장 손쉬운 문제해결 방법이다. 그러나 고도처리공정에서 SRT의 단축은 곧바로 질산화 공정에 문제를 야기시키므로 단순하게 해결되는 문제는 아니다. Fig. 2에서 시간에 따른 슬러지 벌킹의 완화는 문제 해결노력에 의한 것이며 본 논문이 다루고자 하는 문제와 관련성이 적으므로 본 연구내용의 일부분인 다른 문헌을 참조하고 바란다.

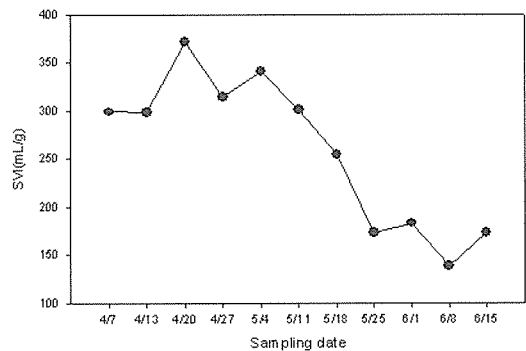


Fig. 2. Change of the sludge volume index during study period.

Fig. 3에는 2차 침전지로 유입되는 MLSS의 Filament Length 변화를 보여주고 있다. 대체로 SVI의 변화와 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4에서처럼

Filament Length는 Regression 결과 SVI와 밀접한 선형관계가 있었다.

이러한 결과는 Filament Length의 측정이 별킹의 척도로서의 유용성을 보여주고 있으며 아울러 이와 같은 접근법이 앞으로 본 논문에서 앞으로 제시할 결과에 대한 신뢰도를 반증해주고 있다. 연구기간동안 1gram의 MLSS에 함유된 Filament Length는 $10^6 \sim 10^7 \mu\text{m}$ 범위를 보였다.

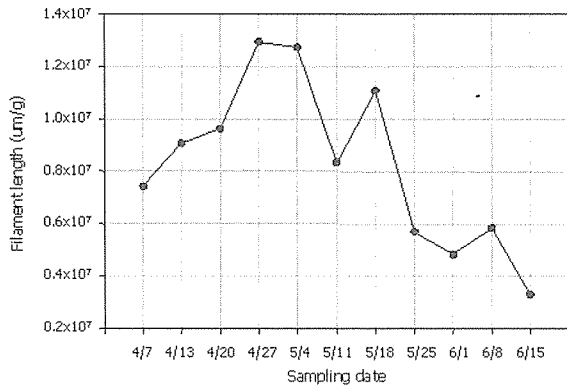


Fig. 3. Change of the filament length in MLSS

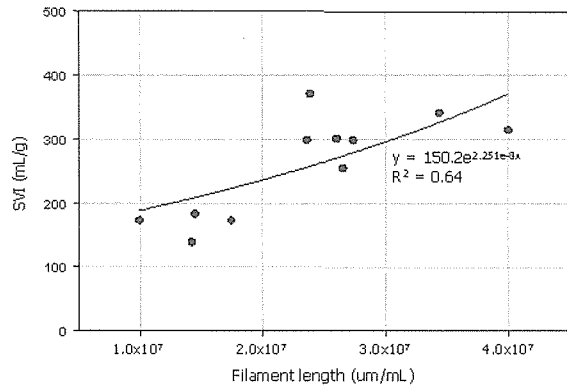


Fig. 4. Relationship between filament length and SVI values.

3.2 Floc Size의 분포

Fig. 5에는 침전지의 길이방향 즉 앞서 설명한대로 SBD #1, SBD #7, SBD #12 지점에서 채취한 블랑킷 슬러지의 Floc Size 분포를 누적확률 그래프로 나타내었

다. 그림에서 굵은 곡선은 10회에 걸쳐 수행된 결과의 평균분포 곡선을 나타내면 누적 발생확률 50%(median)의 Floc Size를 표시하였다.

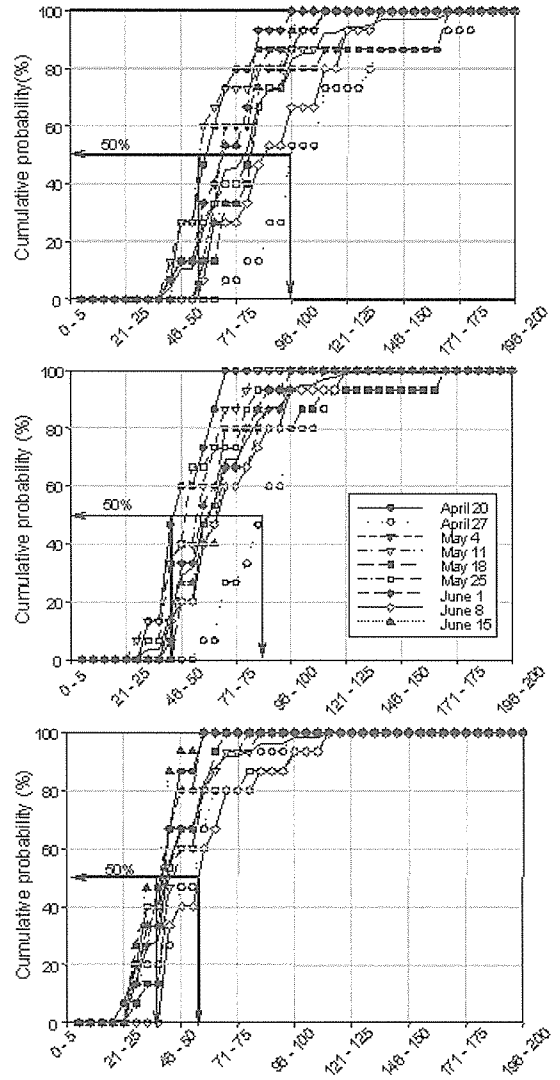


Fig. 5. Floc size distribution according to the length of rectangular settling tank.

Fig. 5에 따르면 침전지의 후단으로 진행할수록(즉 침전지의 면적이 증가할수록) Floc의 입도분포곡선이 왼쪽으로(작은 쪽으로) 진행되었음을 알 수 있다. 이것은 지역침전이 일어나는 2차 침전지에서도 독립 또는 응결

입자의 침전과 같은 형태의 침적현상이 일어나고 있음을 반증해주고 있다. 침전지의 선단부에는 침전이 잘되는 큰 플러크이 후반으로 방향으로 작은 크기의 플러크이 침전제거 된 것을 보여주고 있는 것이다. Fig. 6에는 지점 별 Median Floc Size를 시료채취 날짜에 따라 나타내었다. 침전지 유입부와 말단의 평균 floc size의 차이는 50um 이상을 보였다.

이전의 연구에 의하면 사상균을 포함하고 있지 않은 슬러지(SVI≤150ml/g)의 평균 Floc Size의 증가는 높은 SVI와 관련이 있는 것으로 보고되고 있다 (Andreadakis, 1993, Vesilind, 1968). Fig. 6의 슬러지 블랑킷 floc의 크기는 SVI 값의 변화에 큰 영향을 받지 않음을 보이고 있으므로 벌킹 슬러지에서는 Floc Size 보다는 floc에 함유된 filament의 양이 침전과 압밀에 지배적인 영향을 미치는 요인으로 사료된다.

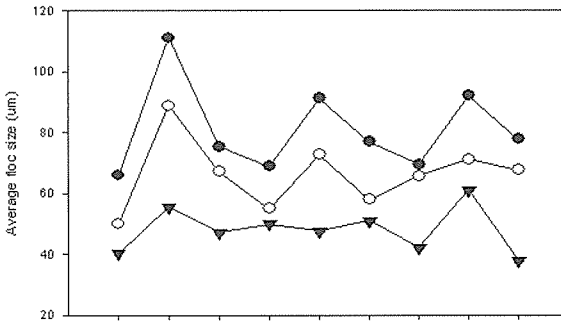


Fig. 6. Change of the average floc size according to the length of settling tank

침전성이 매우 불량한 벌킹 슬러지가 2차 침전지에서 독립이나 응집입자의 침적양상을 나타내는 이유는 2차 침전지에서 슬러지 블랑킷이 매우 높게 유지되기 때문이다. 벌킹 슬러지가 2차 침전지에 유입되었을 때 침전지 바닥방향으로 dense한 슬러지 수류(계면)를 형성하지 못하고 침전지의 전 수층으로 확산되어 농도가 낮은 블랑킷을 형성하고(Kim et al., 2003, Giokas et al., 2003) 슬러지 수류로부터 이탈된 개별 floc 입자의 수가 증가하였기 때문으로 판단된다.

수리학적 요인을 배제하면 슬러지 블랑킷의 깊이는 1리터 실린더에서 30분 침전 후의 슬러지 부피인 SV₃₀과 관련이 있다(Kim et al., 1997). 다시 말하면 높은 SV₃₀ 값은 저조한 압밀(compaction)을 초래하므로 필연적으로 2차 침전지에서 높은 블랑킷과 낮은 블랑킷 SS 농도와 관련이 있다. 본 연구결과에 따르면 연구기간중의 MLSS 농도가 3.0g/L 내외 였고 SVI 값이 300mL/g으로 보면 1리터 실린더에서 30분 침전 후의 슬러지 부피는 900mL/L(90%)임을 의미한다.

Fig. 7에는 연구대상 침전지에서 시료채취 시간에 따른 지점 별 슬러지 블랑킷 깊이(SBD)를 보여주고 있다. 최악의 벌킹때의 평균 슬러지 블랑킷 높이는 유효수심의 50% 이상을 차지하였다. 그러나 벌킹문제가 완화됨에 따라서 블랑킷 깊이는 크게 감소되어 안정화 되었다.

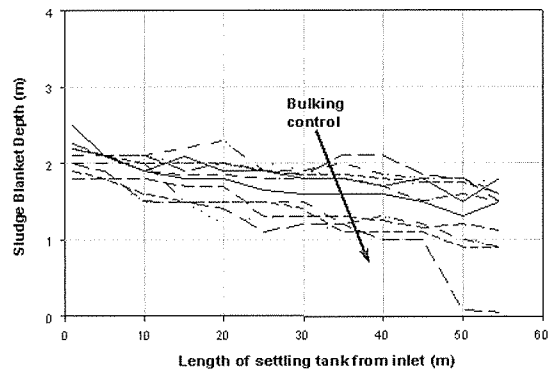


Fig. 7. Sludge blanket depth versus the length from inlet

Floc Size가 크면 클수록 독립침전 속도는 증가한다. 응집과 응결공정을 거쳐 생성되는 정수장 플러크는 그 밀도가 매우 낮으므로 이러한 침전지에서는 독립침전이 지배적으로 일어나므로 Floc Size는 매우 중요하다. 이와 반면에 고농도 슬러지 침전이 일어나는 2차 침전지에서 Floc Size의 역할은 훨씬 복잡하다. 2차 침전지의 운영평가나 설계를 위해 다양한 형태의 수리모형이 제안되고 있다. 이러한 모형에서는 슬러지 침전특성을 모델링하는데 여러가지 가정을 동원하고 있다.

대부분의 경우 슬러지 입자의 침전형태를 지역침전이나 독립입자의 침전으로 보고 유출수질을 모의하고 있

다. 본 현장 연구결과에 따르면 침전속도가 오로지 농도에 의해 결정된다는 가정에는 문제가 있는데 그 이유는 침전지 내부의 각 지점별 농도가 다를 뿐만 아니라 플럭의 크기에 따라 침전속도가 다르게 나타나기 때문이다.

실용적인 측면에서 보면 지역침전과 독립침전이 동시에 일어나지만 2차 침전지의 경우에는 저 농도영역 즉 독립침전이 지배적으로 일어나는 공간이 폭 넓게 제공되므로(Mazzolani et al., 1998) 지역침전과 독립침전 현상을 동시에 반영하는 침전모델이 필요하다.

3.3 지점 별 Filament length

지금까지 침전지 거리에 따른 Floc Size 분포를 살펴 보았다. 슬러지 floc은 floc former와 floc의 골격을 이

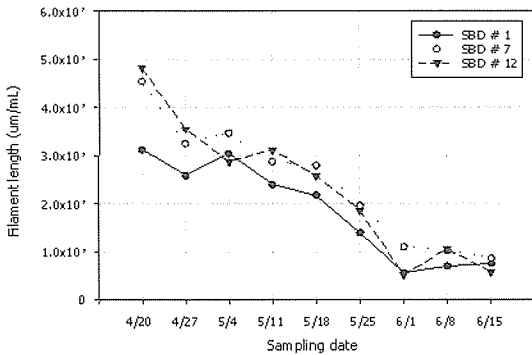


Fig. 8. Filament length per unit volume of the sludge blanket sludge.

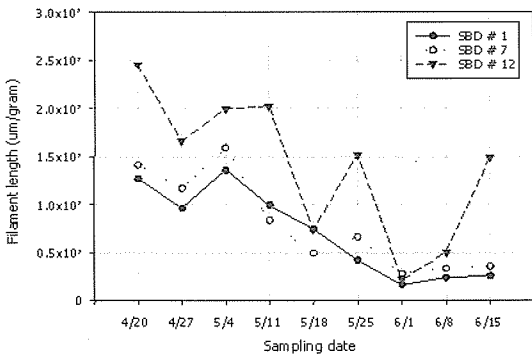


Fig. 9. Normalized filament length in the sludge blanket sludge.

루는 사상균으로 구성되어 있다. Floc에서 filament의 역할은 그것의 강도를 높이는 기능을 수행하므로 어느 정도의 filament는 양질의 견고한 플럭을 얻는데 반드시 필요한 조건이다(Pipes, 1979). Fig. 8에는 1ml의 슬러지 블랑킷에 함유되어 있는 Filament Length를 나타내었다. Filament Length는 전술한 데로 Fig. 2의 SVI와 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다.

그림에 나타난 것처럼 단위 슬러지 부피에 함유된 filament 길이는 지점 별로 큰 차이가 없었는데 그 이유는 채취한 지점 별 블랑킷의 슬러지 농도를 감안하지 않았기 때문이다. 2차 침전지 후단으로 갈수록 슬러지 블랑킷 깊이가 감소하므로 채취한 블랑킷의 SS 농도는 감소하기 마련이다.

슬러지 블랑킷의 농도를 감안하여 단위중량 당으로 길이를 나타낸 결과를 Fig. 9에 제시하였다. 그 결과 그림에 나타난 것처럼 SBD #12에서 단위중량 당 Filament Length, 즉 그 함량이 다른 두 지점과 30~40%로 큰 차이를 나타내었으며 슬러지 별킹문제가 완화될수록 이러한 경향은 줄어들었다.

3.4 floc의 형태

지금까지의 관찰결과를 종합하였을 때 bulking 슬러지는 2차 침전지의 거리에 따라 floc 입자의 크기가 작아지는 양상을 보였으며 동시에 침전지의 후단 방향으로 진행할수록 슬러지 블랑킷에 함유된 filament의 길이가 증가하는 경향을 갖는 것으로 집약할 수 있다.

이것을 연구기간동안 촬영한 플럭의 현미경 사진을 통하여 시각적으로 제시하면 Photo 1과 같다. 현미경 사진은 침전지 유입부(SBD #1)에 침착한 플럭은 크고 dense하며 filament 골격이 잘 형성되어 있으므로 침전속도도 빠를 것이라 추정 가능하다. 물론 동일한 크기의 floc이라면 filament의 양을 적게 함유할수록 당연히 침전속도가 더 빠르다. SBD #1에서 filament는 플럭 내부에서 단단하게 감싸고 있고 floc 주위로 뻗어나온 filament 길이가 짧은 것이 특징이다.

SBD #7과 SBD #12에 침적한 플러입자는 우선 플러 자체가 작다. 특히 SBD #7의 경우 floc이 분산되어 있고 loose한 상태로 많은 void가 있으므로 침전속도가 작을 것이다. 분산된 floc-floc 사이를 연결하는 filament가 존재하고 있다.

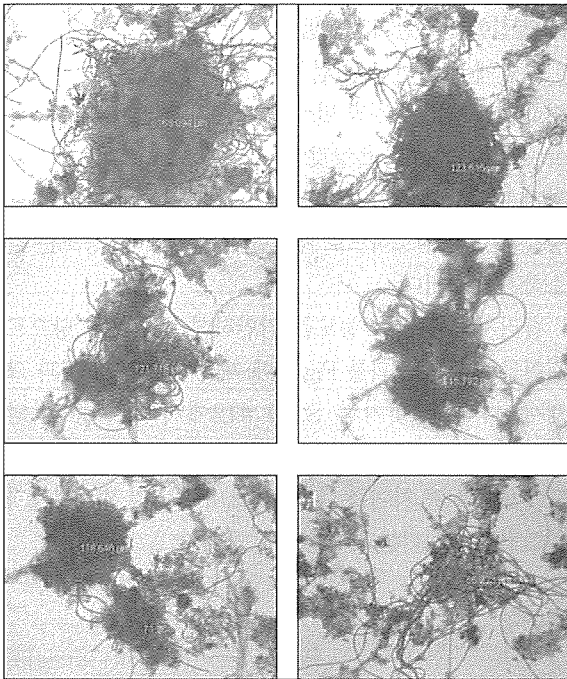


Photo 2. Typical shape and size of the flocs in the sludge blanket sludge: a, b - SBD #1, c, d - SBD #7, e, f - SBD #12

3.5 연구결과와 활용

플러의 size가 작으면 작을수록 그리고 floc을 형성하고 있는 floc former의 양이 filament의 수에 비해 작을 경우 또한 개별 filament와 같이 상대적으로 표면적이 큰 입자는 침전이 어려우므로 침전지의 말단에 침적한다고 말할 수 있다. 이러한 현상을 침전지의 물리적인 미생물 선발기능으로 언급한 바 있다.

본 연구대상 2차 침전지와 같이 길이가 수심에 비하여 과도하게 긴 침전지는 침전된 슬러지의 세굴 가능성이

있으므로 결코 바람직 하지 않다. 그러나 부지여건과 경제적인 측면에서 어쩔수 없이 길이가 긴 장방형 침전지의 설치해야 하는 경우가 있다. 우리나라 초창기 2차 침전지는 원형 침전지가 주종을 이루었다. 그러나 최근에 설치되는 침전지의 경우 대부분 직사각형 침전지로 설계되는 추세에 있는데 그 이유는 직사각형 침전지는 생물 반응조 후단과 침전지 전단의 벽면을 공유하므로 경제적이기 때문이다(이진우 등 2005). 그러나 2차 침전지의 폭이 생물 반응조의 폭과 같게 되므로 설계와 시공이 용이하나 침전지의 구조에 문제가 생길 수 있다. 현재 국내 하수처리장에 건설되는 처리장의 침전지 규격을 보면 유효수심은 3~4m 인데 반하여 50~60m이상의 긴 침전지를 설계하고 운영 중에 있는 침전지가 상당수에 이르고 있다. 이와 같이 장방형 침전지가 길어지는 이유는 생물 반응조 벽체를 공유하도록 설계하게 되면 침전지의 설계기준과 관계없이 이미 생물 반응조 설계단계에서 침전지의 폭이 결정되기 때문이다.

이 경우에 침전지에 Fig. 10에 나타난 것과 같이 2개의 호퍼를 설치하는 방안도 고려해볼 만 하다. 침전성이 불량한 플러와 사상균이 침전된 슬러지는 후단 호퍼에 수거한 후 반송시키기 보다는 공정으로부터 완전 폐기시키는 것이 오히려 전체적인 슬러지의 침전성을 향상시키는 방안이 될 수 있다.

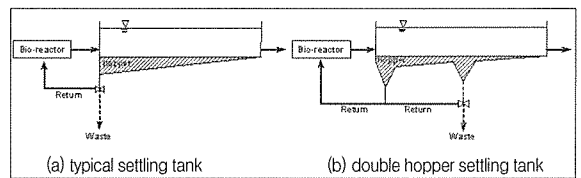


Fig. 10. Concept of double hopper secondary settling tank.

원형 2차 침전지의 경우 이러한 운전이 가능하기 위해서는 침전지의 직경이 매우 크거나 두개의 침전지를 조합으로 하는 직렬운전은 길이가 긴 이중 호퍼 침전지와 동일한 결과를 얻을 수 있다(Kim et al., 1998, 조선영 등 2003). 선단의 침전지에 침적한 슬러지는 반송하고 후단의 침전지에 침적한 침전성이 불량한 슬러지는 폐

기한다는 측면에서 직사각형 침전지와 동일하다.

과거에 수행된 실험실 규모의 직렬식 원형침전지 운전결과와 sludge bulking 문제를 성공적으로 제어한 적이 있다. 그러나 직렬식 침전지의 문제는 면적이 서로 다른 독립적인 침전지를 설치해야 한다는 문제점과 적정 표면 부하율을 어떻게 결정해야 하는지에 관련된 문제가 발생한다. 침전지의 직경을 증가시키는 방안은 먼저 바람의 영향과 스크레이퍼 구동에 문제가 발생되므로 원형 침전지에 침전지의 선별기능을 이용하여 슬러지 침전문제를 해결하기에는 문제가 있다.

4. 결론

본 연구를 통하여 얻은 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) Microthrix 벌킹문제를 안고있는 직사각형 침전지의 길이방향에 따라 슬러지 블랑킷의 floc 입경은 감소하였다. 아울러 슬러지 플럭에 함유된 filament 길이를 측정하고 결과 후단 방향으로 진행할수록 증가하였다.

(2) 이것은 floc이 크기가 작으면 작을수록 그리고 floc을 형성하고 있는 filament의 수가 작을 경우 또한 개별 filament와 같이 상대적으로 표면적이 큰 입자는 침전지 불리하므로 침전지의 후단부에 침전하였다.

(3) 이러한 결과는 2차 침전지에 유입된 슬러지는 지역침전과 함께 독립/응결침전이 함께 이루어진다는 가정과 단순한 물리적인 방법에 의해 벌킹이나 스킴문제를 해결할 수 있다는 가능성을 보여주고 있다.

5. 참고문헌

· 정팔진, 조선영, 정진필, 이은주(2003). 슬러지의 선택적 분리를 위한 침전지의 직렬운전에 관한 연구, 한국물환경학회지, 19, 6, pp. 615-622.
· 이진우, 김영철(2005). 2차 침전지의 효율개선 및 개량방안, 대한토목학회지, 53, 8, pp. 88-94.
· Andreadakis, A.(1993). Physical and chemical properties of activated sludge floc, Water Sci. Technol., 27, 12, pp. 1707-1714.

· Giokas, D. L., Daigger, 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 Research, 37, 16, pp. 3821-3836.

· Hao O. J., Strom P.F. and Wu Y.C.(1988). A review of the role of Nocardia-like filaments in activated sludge foaming, Water SA, 14, 105-110.

· Jenkins, D., Richard, M., Daigger, G.(1986). Manual on the causes and control of activated sludge bulking and forming, Ridgeline Press, Lafayette, CA.

· Kim, Y. et al.(1998). Control of activated sludge bulking by operating clarifiers in a series, Water Sci. Technol., 38, 8-9, pp. 1-9.

· Kim, Y. et al.(2002). A simple empirical model for activated sludge thickening in secondary clarifiers, Water Research, 36, 13, pp. 3245~3252.

· Kim, Y., Pipes, W.O., Chung, P.G. (1997). Estimation of suspended solids concentration in activated sludge settling tanks, Water Sci. Technol., 35, 8, pp. 127-135.

· Kim, Y., Pipes, W.O., Chung, P.G. (1998). Control of activated sludge bulking by operating clarifiers in a series, Water Sci. Technol., 38, 8-9, pp. 1-9.

· Madoni P., Davoli D., and Gibin G.(2000). Survey of filamentous microorganisms from bulking and foaming activated sludge plants in Italy, Water Research, 34, 6, pp. 1767-1772.

· Mazzolani G., Pirozzi F., and d'Antoni G.(1998). A generalized settling approach in the numerical modeling of sedimentation tanks, Water Sci. Technol., 38, 3, 95-102.

· Pipes, W.O.(1969). Types of activated sludge which separates poorly, Presented at the 40th Annual Meeting of the Central States Water Pollution Control Association, pp. 714.

· Pipes, W.O.(1979). Bulking of Activated Sludge Processes, in Advances in Applied Microbiology, Academic Press, New York, 9, pp. 185-234.

· Vesilind, P.(1968). Design of prototype thickeners from batch settling tests, Water Sewage Works, 115, pp. 302-307. 