



탈기에 의한 심층포기 호기조 MLSS (Mixed Liquor Suspended Solid) 침전성 향상 방안 연구

Study to enhance the settleability of deep aeration tank MLSS (Mixed Liquor Suspended Solid) by air sparging

한지수¹ · 이제승¹ · 이병희^{2,*}

Jisoo Han¹ · Jeseung Lee¹ · Byonghi Lee^{2,*}

¹경기대학교 대학원 환경에너지공학과

²경기대학교 사회에너지시스템공학과

¹Department of Environmental Energy Engineering, Graduate School, Kyonggi University

²Department of Civil & Energy System Engineering, Kyonggi University

ABSTRACT

The dissolved air at the bottom layer of the deep aeration tank transforms into fine gas bubbles within the MLSS (Mixed Liquor Suspended Solid) floc when exposed to the atmosphere. MLSS floc flotation occurs when MLSS from the deep aeration tank enters the secondary clarifier for solid-liquid separation, as dissolved air becomes fine air within the MLSS floc. The floated MLSS floc causes a high SS (Suspended Solid) concentration in the secondary effluent. The fine air bubbles within the MLSS floc must be removed to achieve stable sedimentation in the secondary clarifier. Fine bubbles within the MLSS floc can be removed by air sparging. The settleability of MLSS was measured by sludge volume indexes (SVIs) after air sparging MLSS taken at the end of the deep aeration tank. MLSS settling tests were performed at MLSS heights of 200, 300, 400, and 500 mm, and compressed air was fed at the bottom of the settling column with air flow rates of 100, 300, and 500 ml/min at each MLSS height, respectively. Also, at each height and air flow rate, air was sparged for 3, 5, and 7 minutes, respectively. SVI was determined for each height, air flow rate, and sparging time, respectively.

Received 26 March 2024, revised 10 May 2024, accepted 16 May 2024.

*Corresponding author: Byonghi Lee (E-mail: bal@kyonggi.ac.kr; Fax: 031-249-9744, Tel. 031-249-9737)

1 한지수 (박사과정) / Jisoo Han (Ph. D. Student)

경기도 수원시 영통구 광교산로 154-42, 16227
154-42, Gwanggyosan-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 16227, Republic of Korea

1 이제승 (박사과정) / Jeseung Lee (Ph. D. Student)

경기도 수원시 영통구 광교산로 154-42, 16227
154-42, Gwanggyosan-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 16227, Republic of Korea

2 이병희 (정교수) / Byonghi Lee (Professor)

경기도 수원시 영통구 광교산로 154-42, 16227
154-42, Gwanggyosan-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 16227, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Experimental results showed that a 300 mm MLSS height, 300 ml/min air flow rate, and 3 minutes of sparging time were the least conditions to achieve less than 120 ml/g of SVI, which was the criterion for good MLSS settling in the secondary clarifier.

Key words: Air sparging, Deep aeration, Fine bubble, MLSS, Settleability

주제어: 탈기, 심층포기, 미세 공기, MLSS, 침강성

1. 서론

오늘날 처리장의 부지가 부족해짐으로써 용지이용률을 높이고자 심층포기조가 개발되었다 (MOE, 2022). 심층포기조는 산기 수심을 깊게 할수록 단위 송풍량당 압축동력은 증가하지만, 헨리의 법칙에 의해 산소 용해도 증가에 따라 반응조 산소 공급에 필요한 송풍기 공기 공급량은 감소한다 (Mueller et al., 2002). 산기 수심이 깊어질수록 송풍압 증가에 따라 동력비는 상승되지만, 산소 용해도 증가에 따라 필요 송풍 공기량 감소에 따른 동력비가 감소하여 송풍기 동력 측면에서는 반응조 산기 수심이 큰 영향을 주지 않는 것으로 파악되고 있다. 일반적으로 공기가 공급되는 호기조의 산기 수심은 5 m 내외로 설계되어 설치되고 있으나 처리장 설치 부지면적이 한계가 있는 곳에는 12 m의 산기 수심을 가지는 호기조가 설치되고 있다.

도시에서 발생하는 하수를 처리하기 위한 하수처리장은 도심에서 떨어진 지역에 설치되었으나 도시 발달에 따른 하수처리장 주변 개발로 하수처리장 확장 부지는 없어졌다. 그럼에도, 방류수 배출 기준 강화

에 따른 추가 반응조 설치 부지는 매우 강하게 요구되고 있다. 이 같은 하수처리장이 직면하고 있는 반응조 설치 부지 면적 문제를 해결하기 위해 심층포기가 대안으로 제시되고 있다. 이러한 이유로 도심 가운데 위치한 하수처리장의 경우 강화되는 방류수 수질 기준을 만족하기 위해 생물반응조 호기조를 산기 수심이 12 m인 심층포기로 설계하였다. 심층포기가 설치된 처리장은 460,000 m³/day의 하수처리용량을 가진 생물학적 고도처리 시설이다.

심층포기 호기조가 설치된 일 처리용량 460,000 m³/day 처리장은 운전 시작과 더불어 호기조의 MLSS (Mixed Liquor Suspended Solid)를 침전시키는 이차침전지에서 MLSS 플록 부상이 발생하였고, 이차침전지 처리수 (이하 이차처리수) SS(Suspended Solid, 부유물질) 농도가 급격히 상승하는 현상이 발생하였다. Fig. 1은 연구 대상 처리장 운전 초기의 이차침전지 상부 모습이다. 처리장의 생물반응조 및 이차침전지는 2계열로 나누어져 있으며 고액분리를 위한 MLSS는 2계열 이차침전지 중간을 통해 양 옆에 위치한 이차침전지로 유입되는데, 각 계열의 이차침전지 전단 부분의 색이 갈색

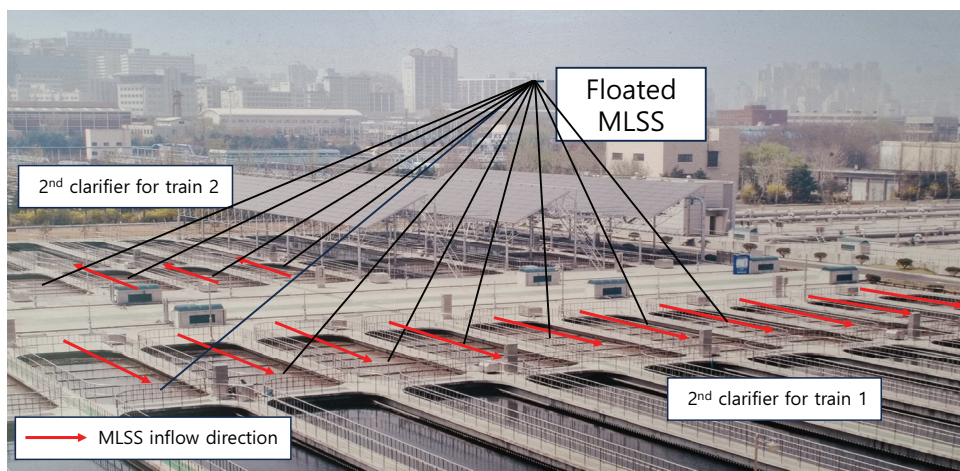


Fig. 1. Aerial view of secondary clarifier at the beginning of operation.



으로 MLSS 플록이 부상되어 있음을 보여주고 있다. 이 처리장의 이차침전지 중간 부분은 바닥 일부가 침수된 수중보(bar)가 설치되어 있어 부상된 MLSS 플록이 유출부로 이송되지 않도록 하여 이차처리수 SS 농도를 낮게 유지하도록 하였다. 하지만 부상된 MLSS 플록이 이차처리수 SS로 유출되어 생물반응조 목표 MLSS 농도 유지에 어려움을 겪고 있다. 이와 같은 이유로 현재 이 처리장은 동절기 운전 시 침전 MLSS 플록 부상 정도를 줄이기 위해 유입하수량을 감소시켜 운전 중이다. Seoul Water Circulation Safety Bureau (2020)에 의하면 2019년 일평균 유입 유량은 설계 하수량의 49.9%인 229,434 m³/day이었고, 유입하수량 변동에 따른 부유 SS 유출을 방지하기 위해 시간대별 유입 수량도 일정하게 유지시켜 운전하고 있다.

이차침전지에 MLSS 플록 부상에 대한 연구는 1940년대부터 진행되어졌고 (Sawyer and Bradney, 1945), 이후 모델링과 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용한 연구가 진행되어졌다 (Kim et al., 1993; Fan et al., 2021). MLSS 플록 부상은 탈질 과정에서 질산염과 아질산염이 질소 가스로 전환되고, MLSS에 부착된 질소 가스가 MLSS의 밀도를 감소시켜 발생한다 (Henze et al., 1993). 질소 가스 성분을 털어주는 탈기 공정을 도입하면 MLSS 플록 부상을 방지할 수 있다. 대표적인 탈기 공정은 탈질반응으로 통해 발생하여 MLSS 플록에 부착된 질소 가스를 털어 주는 Bardenpho 또는 Modified Bardenpho 공법의 제2호기조이다 (USEPA, 2008). 이 반응조의 주된 목적은 제2무산소조에서 탈질 반응으로 생성되어 MLSS 플록에 부착된 질소 가스를 털어주어 이후 이차침전지에서의 침전 MLSS 플록 부상을 방지하는 것이다. 제2호기조에 탈기를 위해 도입되는 시설은 공기압축기인데, 이 기기에서 반응조에 공기를 공급시켜 공기 혼합에 따른 탈기를 수행하고 이차침전지 MLSS 플록에 부착된 질소 가스에 의한 부상을 방지하고 있다.

지금까지의 이차침전지 MLSS 플록 부상에 대한 연구는 탈질에 의해 발생된 질소 가스에 의한 것으로 심층포기 호기조 MLSS 플록의 이차침전지 부상에 대한 연구는 수행되지 않았다. 심층포기를 수행하게 되면 헨리의 법칙에 의해 다량의 공기가 수중에 용존되는데 (Mueller et al., 2002), 용존된 공기가 대기 중으로 노출되면 가스 상태로 변하고 이 가스가 MLSS 플록에 부착되어 부상하는 현상이 발생한다. 본 연구에

서는 심층포기조의 MLSS를 대상으로 플록 부상 현상을 파악하고 공기압축기로부터 공급되는 공기를 이용한 MLSS 혼합을 통해 플록 부착 미세기포 탈기를 수행하여 MLSS 침전성 향상 조건을 제시하였다.

2. 연구방법

2.1 연구대상 하수처리장

본 연구는 수도권에 위치한 일 처리용량 460,000 m³/day의 심층포기 호기조 MLSS를 대상으로 하였다. 이 처리장은 A²O 공법+여과(MDF)+소독으로 구성되었는데, MDF 공법은 A²O 공법 이차처리수의 200,000 m³/day만 처리해서 하수처리수를 재이용하고, 나머지는 소독 후 방류하고 있다. 시설 현황은 Table 1에 제시하였는데, 이 시설은 이차침전지에서의 침전 MLSS 플록 부상으로 인해 동절기 실 처리하수량이 250,000 m³/day이다. 설계용량인 460,000 m³/day와 운전 용량인 250,000 m³/day에 대한 각 반응조의 수리학적 체류시간(HRT, Hydraulic Retention Time)과 일차 및 이차침전지 수표면 부하율(SOR, Surface Overflow Rate)을 제시하였다. 하수도설계기준에서는 연구대상 처리장과 같이 합류식 하수를 처리하는 경우 일차침전지 수표면 부하율을 25~50 m³/m²·day로 제시하였는데(MOE, 2022), 설계 용량인 460,000 m³/day의 경우에는 40.3 m³/m²·day로 설계 범위에 포함되나, 운전 용량인 250,000 m³/day에서는 21.9 m³/m²·day로 설계 범위에 벗어나 높은 안전율을 가지고 있는 것으로 나타났다. 이차침전지의 경우에는 연구대상 처리장과 같이 고도처리를 수행하는 경우에는 15~25 m³/m²·day로 제시하였는데, 설계 용량인 460,000 m³/day의 경우에는 29.9 m³/m²·day로 설계 범위에 벗어나 안전율이 없는 것으로 나타났으나, 운전 용량인 250,000 m³/day에서는 운전 용량에서는 16.3 m³/m²·day로 설계범위 안에 있는 것으로 나타났다. Metcalf and Eddy (2016)에서 제시한 이차침전지 미국 설계 기준에 의하면 생물학적 고도처리를 수행하는 경우 일최대 유량에 대해서 24~32 m³/m²·day, 시간최대 유량에 대해서는 40~64 m³/m²·day의 수표면 부하율을 제안하고 있어, 연구대상 처리장의 설계 용량인 460,000 m³/day에서의 이차침전지 수표면 부하율 29.9 m³/m²·day는 미국 설계 기준 범위 안에 포함되는 것으로 나타났다.

Table 1. Physical dimension of studying wastewater treatment plant

Type	Category	Specifications			
Flowrate	Design	460,000 m ³ /day			
	Operation	250,000 m ³ /day			
Primary Clarifier	Type	Rectangular			
	Dimension	W17.4 m×L82.0 m×He3.75 m×8 Tank			
	Volume	42,804 m ³ (5,350.5 m ³ /tank×8 Tank)			
	Surface area	11,414.4 m ² (1,426.8 m ² /tank×8 Tank)			
	Weir length	253.4 m (5,350.5 m/Tank×8 Tank)			
	SOR	Design	40.3 m ³ /m ² · d	Operation	21.9 m ³ /m ² · d
Anaerobic Tank	Type	Rectangular			
	Dimension	W17.2 m×L17.0 m×He12 m×8 Tank			
	Volume	28,070 m ³			
	Mixer	4.0 kW×17 unit(1 unit spare)			
	HRT	Design	1.46 h	Operation	2.7 h
Anoxic Tank	Type	Rectangular			
	Dimension	W17.2 m×L17.0 m×He12 m×8 tank			
	Volume	28,070 m ³			
	Mixer	Mixer/aerator (82 kg.O ₂ /hr)×7.5 kW×17 unit(1 unit spare)			
	HRT	Design	1.46 h	Operation	2.7 h
Aeration Tank	Type	Rectangular			
	Dimension	W17.2 m×L51.0 m×He12 m×8 Tank			
	Volume	84,211 m ³			
	Mixer	Submerged Aerator(180 kg.O ₂ /hr)×18.5 kW×17 unit(1 unit spare) Submerged Aerator(150 kg.O ₂ /hr)×15 kW×8 unit Submerged Aerator(130 kg.O ₂ /hr)×15 kW×17 unit(1 unit spare)			
	HRT	Design	4.4 h	Operation	8.1 h
Secondary Clarifier	Type	Rectangular			
	Dimension	W16.0 m×L60.0 m×He4.0 m×16 tank (1 tank 2 Stream)			
	Volume	61,440 m ³ (3,840.0 m ³ /Tank×Tank)			
	Surface area	15,360 m ² (960 m ² /Tank×16 Tank)			
	Weir length	2,400 m (150 m/Tank×16 Tank)			
	SOR	Design	29.9 m ³ /m ² · d	Operation	16.3 m ³ /m ² · d

2.2 탈기 실험

Bardenpho 공법에서는 제2무산소조에서 탈질된 질소 가스를 MLSS 플록으로부터 분리시키기 위해 제2 호기조를 설치하는데, 산소전달 효율을 높이기 위해 미세공기를 공급하는 제1호기조와 달리 제2호기조에는 컴프레서를 이용한 거대 기포를 공급해서 탈기 효율을 높였다. 본 연구에서는 Bardenpho 공법 제2호기

조에 사용되는 컴프레서를 이용한 거대 기포 공기 공급 장치를 심층포기 호기조 MLSS에 적용해서 탈기 정도를 파악하였다. 탈기 실험을 위해서 Fig. 2와 같은 장치를 이용하였는데, 컴프레서에서 배출되는 공기는 압력조절기를 통과한 후 유량계를 거치고 이후 수족관 산기돌(Air stone)을 통과하도록 하였다. 일반적으로 공기가 배출되는 산기돌의 구멍 직경은 0.5~2 mm 이다 (Amy, 2023).

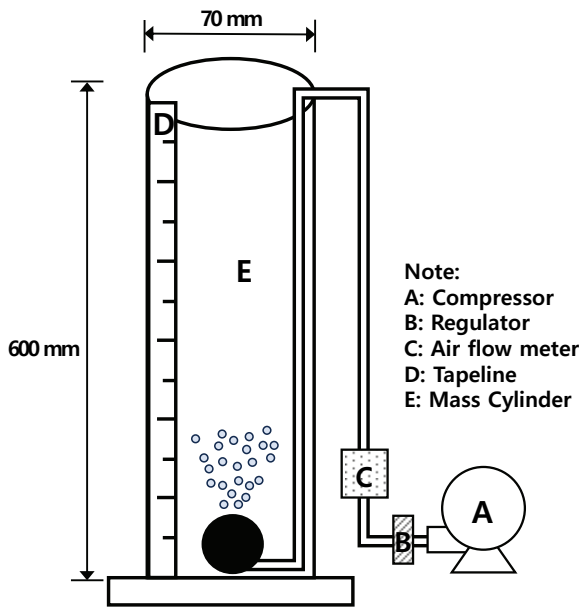


Fig. 2. Experimental apparatus for MLSS floc deaeration.

탈기 실험에 있어서 공기공급률, 포기 시간 및 탈기 대상 MLSS 높이가 중요한 요소이므로 동일한 아크릴 실린더에서 침층포기 호기조 MLSS 높이를 변화시켰다. 탈기 실험에 사용된 아크릴 실린더는 Fig. 2에서 제시된 바와 같이 내부 직경이 70 mm이고 유효 높이

는 600 mm이다.

탈기 실험을 위한 공기 공급은 STAR사의 3/4 HP (마력) 컴프레서를 이용하였으며, 압력 조정기(레귤레이터)의 공기공급률을 0~1,000 cm³/min까지 조정 가능한 제품을 사용하였다. 컴프레서의 압력은 4 bar로 설정되었으며, 레귤레이터 및 공기유량계 조절을 통해 공기공급률을 100, 300, 500 cm³/min로 조절하였다.

본 연구에서는 내경 70 mm, 유효 높이 600 mm의 아크릴 실린더 총 4개를 사용하였는데, 이는 총 4개의 실린더를 동시에 사용해서 동일한 공기공급률에서 포기시간 변화와 MLSS 높이 변화에 따라 포기 종료 후 SV30을 파악하기 위함이다. 포기 높이 변화는 실린더에 투입되는 MLSS 높이 변화를 통해 수행하였는데, 200, 300, 400, 500 mm MLSS 높이에 있어서의 포기 종료 후 SV30을 파악하였다. SV30은 침전 30분 후 침전 MLSS 플록이 차지한 부피 비로 실린더 측면에 부착된 줄자로 파악된 침전 MLSS 플록 높이를 통해서 파악하였다. Table 2는 본 연구에서 수행된 탈기 실험 조건을 제시한 것으로 공기공급률 100, 300, 500 cm³/min의 각각에 있어서 포기 시간을 3, 5, 7분으로 변화시키고, 그리고 각 공기공급률 및 포기 시간에 있어서 실린더에 투입된 MLSS 높이를 200, 300, 400, 500 mm로 변화시켰다. 이 같은 MLSS 높이 변화는 심

Table 2. Air sparging experiment conditions - air flow rate, aeration time and MLSS heights

Air flow rate cm ³ /min	100											
Aeration time min	3				5				7			
MLSS height mm	200	300	400	500	200	300	400	500	200	300	400	500
Air flow rate cm ³ /min	300											
Aeration time min	3				5				7			
MLSS height mm	200	300	400	500	200	300	400	500	200	300	400	500
Air flow rate cm ³ /min	500											
Aeration time min	3				5				7			
MLSS height mm	200	300	400	500	200	300	400	500	200	300	400	500

층폭기조에서 이차침전지로 MLSS를 이송하는 수로(channel)의 수심을 가정해서 설정해서 가장 경제적이면서 효과적인 수심을 파악하기 위함이다. 본 실험을 통해 공기공급률 및 포기 시간 그리고 MLSS 높이 변화에 따른 탈기 정도를 SV30을 통해 파악하고자 하였다. 또한 포기 되지 않는 경우에 있어서의 MLSS 침전성을 파악하기 위해 4개의 실린더에 높이 200, 300, 400, 500 mm 높이의 MLSS를 투입시킨 후 포기 없이 SV30을 파악하였다. 그리고 SVI₃₀ (Sludge Volume Index)를 파악하기 위해 투입되는 MLSS 농도를 측정하였다.

3. 연구 결과 및 고찰

이차침전지에서의 심층포기 호기조 MLSS 플록 부상을 확인하기 위해 호기조 말단에서 채수된 MLSS를 Fig. 2에 제시된 실린더에 투입 후 탈기 없이 SV30을 측정하였다. 4개의 실린더에 MLSS를 높이 200, 300, 400, 500 mm로 투입 후 30분 뒤 침전 MLSS 플록이 차지하는 높이를 측정하고자 하였으나, 일부 MLSS만 침전된 높이 500 mm를 제외하고 모든 경우에 있어서 MLSS는 전부 부상하였다. Fig. 3은 심층포기 호기조 MLSS가 높이 500 mm로 실린더에 투입된 후 30분 침전 후 상태를 보여주고 있는데, 이 그림에서 보여주고 있는 바와 같이 투입된 MLSS 일부만 침전되었고, 대부분이 부상되었다. 부상된 MLSS 플록 외부에는 탈질된 질소가스로 인한 미세기포가 관찰되지 않아 플록 내부에서 형성된 기체에 의해 부상된 것으로 파악된다 (Ra, 2019). Table 3은 비 포기상태에서 심층포기 호기조 MLSS 높이에 따른 30분 침전 후 부상 및 침전 MLSS 높이를 보여주고 있는데, MLSS 높이 500 mm를 제외하고는 침전 MLSS 플록이 없어, NO(Settled MLSS floc is not observed)로 표시하였다.

공기공급률을 100 cm³/min으로 설정하고 호기조 MLSS를 200, 300, 400, 500 mm 높이로 투입한 후 각 높이

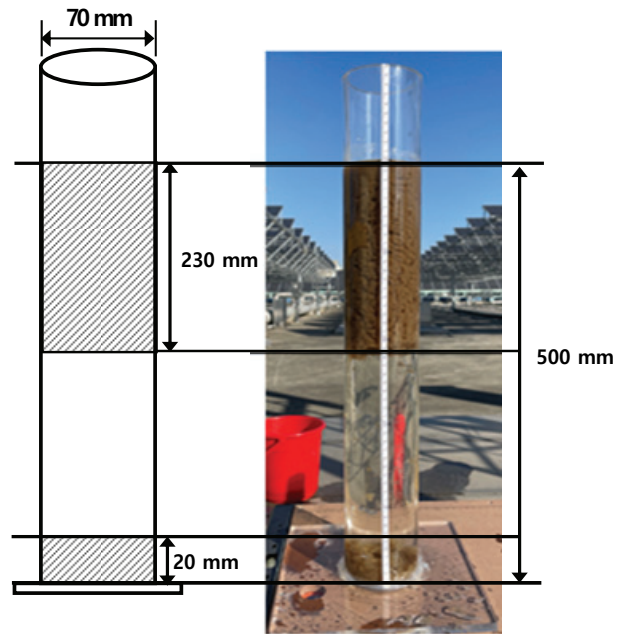


Fig. 3. Floated and settled MLSS floc heights after 30 minutes of settling with 500 mm of MLSS height without air sparging.

에 있어서 3, 5, 7분 동안 포기한 후 30분 지난 후 부상 및 침전 MLSS 플록의 높이는 Table 4에 제시되어 있다. 이 표에서 floated는 30분 침전 후 부상된 MLSS 플록 높이, 그리고 settled는 침전 MLSS 플록 높이를 제시한 것이다. 실험은 각 조건에 있어서 2회씩 수행하고 부상 MLSS 플록이 없고 침전 MLSS 플록이 있는 경우에 이를 근거로 평균 침전 MLSS 플록 높이를 기준으로 SVI₃₀를 계산하였다. 공기 공급 중단 30분 후 부상 MLSS 플록이 존재하면 이차침전지에서의 MLSS 침전을 담보하지 못하므로 MLSS 침전 실패로 판단해서 침전 MLSS 플록 높이를 0으로 표시하고 SVI₃₀를 계산하지 않았다. 이 표를 통해 공기공급률 100 cm³/min, MLSS 높이 500 mm, 포기시간 7분인 경우에만 부상 MLSS 플록이 없는 것을 알 수 있다.

Table 3. Floated and settled MLSS floc heights after 30 minutes of settling without air sparging

MLSS Height, mm		200	300	400	500
Floated	MLSS floc height mm	70	90	140	230
Settled	MLSS floc height mm	0	0	0	20



Table 4. Experimental results of floated and settled MLSS floc heights at 200, 300, 400 and 500 mm of MLSS heights and 3, 5 and 7 minutes of aeration time at each height with 100 cm³/min of air flowrate

Air flowrate cm ³ /min	Aeration time min	Try	Floc number	Floc height	MLSS height mm	200	300	400	500
100	3	1st		floated, mm	NO	NO	NO	NO	135
				settled, mm					110
		2nd		floated, mm	NO	NO	NO	NO	180
				settled, mm					60
	5	1st		floated, mm	NO	NO	NO	NO	40
				settled, mm					180
		2nd		floated, mm	NO	NO	NO	NO	10
				settled, mm					200
	7	1st		floated, mm	NO	NO	NO	NO	0
				settled, mm					240
		2nd		floated, mm	NO	NO	NO	NO	0
				settled, mm					240

Note: NO=settled MLSS floc is not observed

Table 5. Experimental results of floated and settled MLSS floc heights at 200, 300, 400 and 500 mm of MLSS heights and 3, 5 and 7 minutes of aeration time at each height with 300 cm³/min of air flowrate

Air flowrate cm ³ /min	Aeration time min	Try	Floc number	Floc height	MLSS height mm	200	300	400	500	
										height
300	3	1st		floated, mm	0	0	0	0	25	
				settled, mm					95	115
		2nd		floated, mm	0	0	0	0	0	80
				settled, mm						100
	5	1st		floated, mm	0	0	0	0	0	0
				settled, mm						100
		2nd		floated, mm	0	0	0	0	0	0
				settled, mm						95
	7	1st		floated, mm	0	0	0	0	0	0
				settled, mm						110
		2nd		floated, mm	0	0	0	0	0	0
				settled, mm						95

Table 5는 공기공급률을 300 cm³/min으로 설정하고 호기조 MLSS를 200, 300, 400, 500 mm 높이로 투입한 후 각 높이에 있어서 공기를 3, 5, 7분 동안 공급한 후 30분 지난 후 침전 및 부상 MLSS 플록 높이가 제시

되어 있다. 이 표에서 보여주는 바와 같이 포기시간 3분, 투입 MLSS 높이가 500 mm인 경우를 제외하고는 부상 MLSS 플록은 없는 것으로 나타나, 이 경우만 제외하고 평균 침전 MLSS 플록 높이를 근거로 SVI₃₀를

Table 6. Experimental results of floated and settled MLSS floc heights at 200, 300, 400 and 500 mm of MLSS heights and 3, 5 and 7 minutes of aeration time at each height with 500 cm³/min of air flowrate

Air flowrate cm ³ /min	Aeration time min	Try min	Floc number	MLSS height mm	200	300	400	500
					height			
500	3	1st	floatd, mm	0	10	0	0	
			settled, mm	85	130	160	230	
		2nd	floatd, mm	0	0	10	0	
			settled, mm	90	130	160	200	
	5	1st	floatd, mm	0	0	0	40	
			settled, mm	85	120	140	210	
		2nd	floatd, mm	0	0	0	0	
			settled, mm	85	120	155	240	
	7	1st	floatd, mm	0	0	0	0	
			settled, mm	80	120	170	220	
		2nd	floatd, mm	0	0	0	0	
			settled, mm	90	125	145	240	

Table 7. Average SVI vaules at each experimental condition

Air flowrate cm ³ /min	Aeration time min	MLSS height mm	200	300	400	500
100	3		-	-	-	-
	5		-	-	-	-
	7		-	-	-	126
300	3		139	121	113	-
	5		139	131	121	113
	7		146	164	125	116
500	3		125	124	114	123
	5		121	114	105	129
	7		121	117	113	131

계산하였다.

Table 6는 공기공급률을 500 cm³/min으로 설정하고 호기조 MLSS를 200, 300, 400, 500 mm 높이로 투입한 후 각 높이에 있어서 공기를 3, 5, 7분 동안 공급한 후 30분 지난 후 침전 및 부상 MLSS 플록 높이를 보여 주고 있다. 이 표와 같이 공기가 500 cm³/min 주입되는 경우에는 호기조 MLSS 높이와 포기시간과 관계없이 모든 경우에 있어서 부상 MLSS 플록이 없었다. 이

경우에도 평균 침전 MLSS 플록 높이를 기준으로 SVI₃₀를 계산하였다.

Table 7은 공기공급률 100, 300, 500 cm³/min, 그리고 각 공기공급률에서 MLSS를 200, 300, 400, 500 mm 그리고 각 투입 MLSS 높이에 있어서 포기시간을 3, 5, 7분으로 한 경우 평균 침전 MLSS 플록 높이를 기준으로 한 SVI₃₀를 제시하고 있다. SVI₃₀는 [수식 1] (Qasim, 1999)으로 계산할 수 있는데, 실험 당일 호기

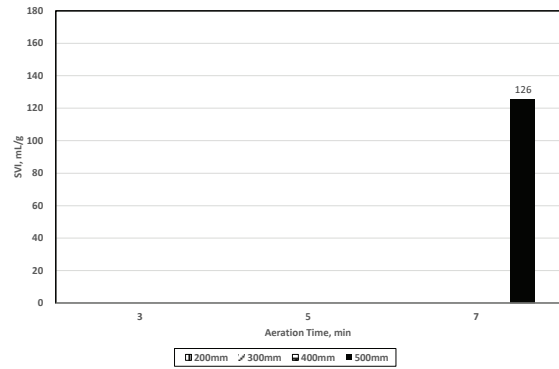


조 MLSS 농도는 3,500 mg/L로 분석되어 이를 사용하였고, SV30(%)과 평균 침전 MLSS 플록 높이를 근거로 계산하였다.

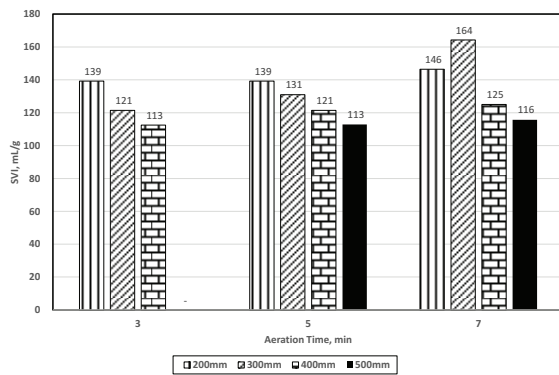
$$SVI_{30, mL/g} = \frac{SV30(\%) \times 10^4}{MLSS\text{농도}(mg/L)} \quad [\text{수식 1}]$$

Fig. 4는 공기공급률 (a) 100 cm³/min, (b) 300 cm³/min 와 (c) 500 cm³/min인 경우 포기시간 3, 5, 7분에 있어서의 각 포기시간에서의 호기 MLSS 높이 200, 300, 400, 500 mm에서의 SVI₃₀를 보여주고 있다. 공기공급률이 100 cm³/min인 경우에는 포기시간이 제일 긴 7분과, MLSS 높이가 제일 높은 500 mm인 경우에만 SVI₃₀가 계산될 수 있는 것으로 나타났다. 공기공급률이 300 cm³/min인 경우에는 포기시간이 3분, 그리고 MLSS 높이가 500 mm인 경우를 제외하고는 SVI₃₀가 계산되었는데, 포기시간 3, 5분의 경우에는 MLSS 높이가 증가할수록 SVI₃₀는 감소되었고, 포기시간이 7분인 경우에는 MLSS 높이가 300mm를 제외하고는 MLSS 높이가 증가할수록 SVI₃₀가 감소되는 것으로 나타났다. 이 그림을 통해서 공기공급률이 300 cm³/min인 경우에는 투입되는 MLSS 높이가 증가함에 따라 SVI₃₀가 감소하는 경향을 보여주었다. 공기공급률이 500 cm³/min인 경우에는 투입되는 MLSS 높이가 200, 300, 400 mm로 증가함에 따라 포기시간과 관계없이 SVI₃₀가 감소하는 경향을 보여주었다. MLSS 높이가 500 mm로 증가하면 포기시간과 관계없이 SV₃₀가 증가하는 경향을 보여주었는데, 이는 공기공급률이 500 cm³/min인 경우 500 mm의 호기 MLSS 높이는 포기되는 MLSS 체적 증가로 인해 탈기에 의한 MLSS 침전성 증가보다는 포기 체적 증가에 따른 MLSS 플록 해체 현상에 의해 발생된 것으로 판단될 수 있다.

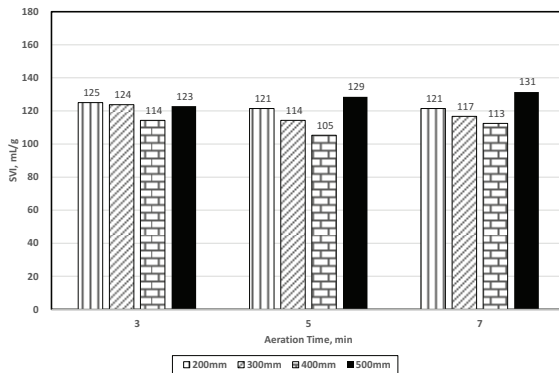
Fig. 5는 포기시간이 (a) 3분, (b) 5분, (c) 7분에 있어서 공기공급률 100, 300, 500 cm³/min의 각 경우에 있어서 투입 MLSS 높이 변화에 따른 SVI를 보여주고 있다. 포기시간 3분 그리고 공기공급률 100cm³/min인 경우 SVI₃₀는 측정이 안되고, 공기공급률이 300 cm³/min인 경우 투입 MLSS 높이가 500 mm인 경우에는 SVI₃₀는 측정이 안되었지만 투입 MLSS 높이가 증가할수록 SVI₃₀가 떨어지는 것으로 나타났다. 공기공급률이 500 cm³/min인 경우에는 투입 MLSS 높이가 400 mm까지는 높이가 증가함에 따라 SVI₃₀가 감소하다가 500 mm



(a) When airflow rate is 100 cm³/min



(b) When airflow rate is 300 cm³/min



(c) When airflow rate is 500 cm³/min

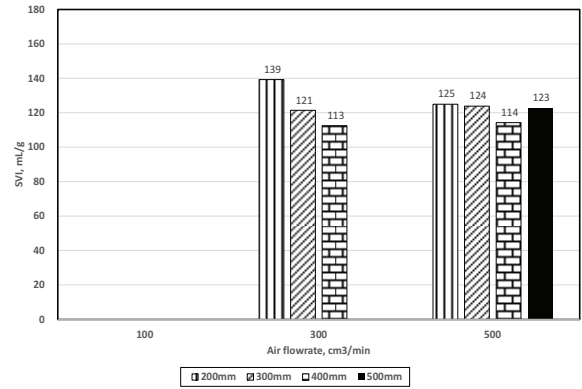
Fig. 4. Average SVI values at aeration times of 3, 5 and 7 minutes and MLSS heights of 200, 300, 400 and 500 mm at each aeration time and MLSS height with 100, 300 and 500 cm³/min of airflow rates.

인 경우에는 SVI₃₀가 증가해서 투입 MLSS 높이가 500 mm인 경우에는 포기되는 MLSS 체적 증가로 플록 형성이 약해져서 발생한 현상으로 추정된다. 포기시간 5분인 경우도 공기공급률이 100cm³/min인 경우 SVI₃₀는 측정이 안되고, 공기공급률이 300 cm³/min인 경우에는

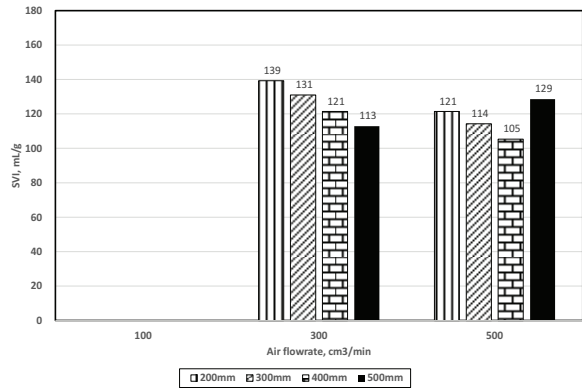
투입 MLSS 높이가 증가함에 따라 SVI₃₀가 감소되는 경향을 보여주었다. 공기공급률이 500 cm³/min인 경우에는 투입되는 MLSS 높이가 400 mm까지는 SVI₃₀가 감소하다가 500 mm에서는 증가하였는데, 이는 포기되는 MLSS 체적 증가로 플록 형성이 약해져서 발생한 현상으로 판단된다. 포기시간 7분인 경우 공기공급률이 100 cm³/min인 경우 투입 MLSS 높이가 500 mm인 경우에만 SVI₃₀ 측정이 가능하였다. 공기공급률이 300 cm³/min인 경우에는 투입 MLSS 높이가 300 mm를 제외하고는 MLSS 높이가 증가함에 따라 SVI₃₀가 감소하는 경향을 보여주었다. 공기공급률이 500 cm³/min인 경우에는 투입되는 MLSS 높이가 400 mm까지는 MLSS 높이가 증가함에 따라 SVI₃₀가 감소하는 경향을 보여주고 투입 MLSS 높이가 500 mm인 경우에는 SVI₃₀가 증가하는 경향을 보여주었는데 이는 포기되는 MLSS 체적 증가로 플록 형성이 약해져서 발생한 현상으로 파악된다.

Fig. 4와 Fig. 5 그리고 Table 7를 통해서 공기공급률, 포기시간 그리고 호기조 투입 MLSS 높이에 따른 SVI₃₀를 파악하였는데, 공기공급률이 100 cm³/min인 경우에는, MLSS 높이 500 mm, 그리고 포기시간 7분을 제외하고는 포기시간과 투입 MLSS 높이와 상관없이 실린더에 투입된 MLSS 플록 일부 또는 전부가 부상되는 것으로 관찰되어 SVI₃₀를 계산할 수 없었다. 공기공급률이 300 cm³/min인 경우에는 MLSS 높이가 높아짐에 따라 SVI는 감소하였고, 포기시간이 길어짐에 따라 SVI₃₀가 높아지는 경향을 보여주었다. 공기공급률이 500 cm³/min인 경우에는 투입 MLSS 높이가 400 mm까지는 높이가 증가할수록 SVI₃₀가 감소하다가 500 mm에서는 증가하였고, 포기시간에 따른 SVI₃₀는 MLSS 높이 별로 증감 경향이 변했는데, MLSS 높이가 400 mm, 포기시간 5분에서 본 연구에서 가장 낮은 SVI₃₀인 105 ml/g을 보여주었다.

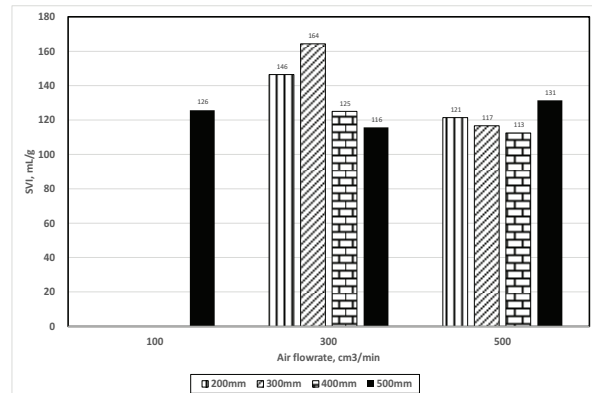
이차침전지에서의 안정적인 MLSS 침전을 위해서는 SVI₃₀가 120 ml/g이하인데 (Metcalf and Eddy, 2016), 이 조건을 안정적으로 충족하기 위해서는 공기공급률이 300 cm³/min인 경우에는 포기시간 3분에서 MLSS 높이는 400 mm, 포기시간 5분에서는 투입 MLSS 높이는 400과 500 mm, 그리고 포기시간 7분에서는 투입 MLSS 높이는 500 mm가 되어야 하는 것으로 나타났다. 그리고 공기공급률이 500 cm³/min인 경우 포기시간 3분에서는 투입 MLSS 높이가 400 mm,



(a) When aeration time is 3 minutes



(b) When aeration time is 5 minutes



(c) When aeration time is 7 minutes

Fig. 5. Average SVI values at airflow rates of 100, 300 and 500 cm³/min and MLSS heights of 200, 300, 400 and 500 mm at each airflow rate and MLSS height with 3, 5 and 7 minutes of aeration time.

포기시간 5분에서는 투입 MLSS 높이는 300과 400 mm 그리고 포기시간 7분에서는 투입 MLSS 높이는 300과 400 mm가 되어야 하는 것으로 파악되었다.



4. 결 론

호기조 수심이 12 m이고 MLSS 농도가 3,500 mg/L 인 심층포기 호기조 MLSS 대상으로 탈기를 위한 압축공기 포기 유무에 따른 침전성 그리고 압축 공기공급률, 포기시간 그리고 침전 실린더에서의 호기조 MLSS 높이에 따른 침전 실험을 통해 SVI₃₀를 파악해서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 심층포기 호기조 MLSS를 탈기 기작 없이 실린더에 투입시킨 경우 MLSS 일부는 침전되지만 대부분은 수표면에 부상되는 것이 확인되었는데, 이 같은 이유로 처리용량이 460,000 m³/day 인 하수처리장이 일평균 229,434 m³/day(2019년도)만 처리할 수밖에 없는 것으로 확인되었다.
- 이차침전지에서의 안정적인 침전을 위한 기준인 SVI₃₀ 120 ml/g 이하를 만족시키는 최소한의 조건은 공기공급률 300 cm³/min, 포기 시간 3분 그리고 MLSS 높이 400 mm로 파악되었다.
- 수심 10 m에 산기판이 설치된 심층포기 MLSS 플록의 이차침전지 부상은 용존 공기의 플록 내부 기포 전환으로 발생된 것으로 판단되며 본 연구결과를 기초로 추후 MLSS 플록 탈기 pilot plant 설치 및 운전을 통해 이차침전지에서의 MLSS 플록 부상 제어에 대한 연구 수행이 필요하다고 판단된다.

사 사

본 연구에 도움을 주신 수도권 J하수처리장 소장님과 관련 직원들, 그리고 (주) 유신 정승철 대리님께 감사사를 포함합니다.

References

- Amy, S. (2023). Air stones and diffusers oh my! <https://aquaculturemag.com/2023/03/20/air-stones-and-diffusers-oh-my/> (March 5, 2024).
- Fan, L., Xiao, Y., Liu, Q., Xu, N., Dong, Q., Shi, H. and Ding, A. (2021). Sludge rising and critical time prediction for denitrification in secondary clarifiers: experimental and computational fluid dynamics studies, *Environ. Eng. Sci.*, 38(10), 1001-1009.
- Henze, M., Dupont, R., Grau, P. and De, L.S. (1993). A rising sludge in secondary settlers due to denitrification, *Water Res.*, 27(2), 231-236.
- Kim, M.H., Al-Ghusain, I.A., Hao, O.J. and Lim, B.S. (1993). Modeling of nitrate disappearance and sludge rising in a settling column system, *Water Res.*, 28(9), 1861-1872.
- MOE(Ministry of Environment). (2022). Design standard of Korean Sewage, KDS 61 00 00 : 2022, 119-139.
- Metcalf and Eddy (2016). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery 5th edition*, Donghwa technology Publishing Co., 913-914.
- Mueller, J.A., Boyle, W.C. and Pöpel, H.J. (2002). *Water Quality Management Library Volume 11 Aeration: Principles and Practice*, CRC Press LLC 16-22.
- Qasim, S.R. (1999). *Wastewater Treatment Plants Planning. Design and Operation 2nd edition*, Technomic Publishing Company, Inc., 412-413.
- Ra, D.G. (2019). *Wastewater Treatment*. JWbooks, 205-206.
- Sawyer, C.N. and Bradney, L. (1945). Rising of activated sludge in final settling tanks, *Sew. Works J.*, 17(1), 1191-1209.
- Seoul Water Circulation Safety Bureau. (2020). Operation Manual for Seoul Water Recycling Centers, 29.
- USEPA(US Environmental Protection Agency). (2008). Municipal Nutrient Removal Technologies Reference Document Volume 1-Technical Report, EPA 832-R-08-006, 2-13, 2-51.