

폭기/비폭기 상태의 기근기간이 활성슬러지의 물리적 특성 및 유기물 제거에 미치는 영향

오혜란 · 김상수* · 문병현 · 윤조희**†

창원대학교 환경공학과

*국립환경과학원 수질총량연구과

**경남대학교 환경공학과

Effects of Aerobic/non-aerobic Starvation Periods on the Physical Characteristics of Activated Sludge and Organic Removal Efficiency in SBR

Hye-Ran Oh · Sang-Soo Kim* · Byung-Hyun Moon · Cho-Hee Yoon**†

Department of Environmental Engineering, Changwon National University

*Environmental Cap System Research Department, National Institute of Environmental Research

**Department of Environmental Engineering, Kyungnam University

(Received 16 January 2010, Revised 1 February 2010, Accepted 5 February 2010)

Abstract

The objective of this study was to investigate the effects of starvation periods with aerobic or non-aerobic conditions on the organic removal efficiencies and physical characteristics of activated sludge for treating saline and non-saline wastewater. During the experiment, MLSS, MLVSS, sludge volume index (SVI), floc size and fractal dimension, COD_{Mn} removal efficiencies were monitored. The reductions of MLSS, MLVSS and SVI with maintaining the sludge under a non-aerobic condition during starvation periods were smaller than those under a aerobic condition. Floc size, fractal dimension and COD_{Mn} removal efficiencies were less decreased under non-aerobic condition than under aerobic condition. And SVI were strongly correlated with floc size and fractal dimension. Consequently, the result showed that maintaining the activated sludge under non-aerobic starvation conditions was better strategy than that under aerobic starvation conditions as it adapted and resisted to starvation.

keywords : Aerobic/non-aerobic Starvation, Floc size, Fractal dimension, Organics, Sludge Volume Index

1. 서 론

염색, 제지, 식품가공과 같이 다량의 물을 소비하는 산업 및 놀이공원, 경륜·경마장 등의 위락시설은 공정 또는 운영상의 특성 때문에 하폐수량 발생 및 오염물질 배출이 일정하게 일어나지 못하고, 일 또는 주간변동이 매우 뚜렷하다. 이러한 큰 변동특성 중의 하나로 청소 및 점검과 예상치 못한 사고발생, 작업중단, 비수기 등에 의한 장기간 하폐수의 발생이 중단되는 경우가 있다(CoelloOviedo et al., 2003). 생물학적 처리공법을 채택하고 있는 대부분의 폐수처리장에서 미생물은 단기간 또는 장기간의 기질유입 중단으로 인한 폐수처리장의 가동중단으로 생물학적 활성 및 생존유지에 중대한 영향을 받게 된다(Lopez et al., 2006). 일반적으로 폐수처리시, 미생물 대사작용은 공급되는 기질인 오염물질을 세포가 이용 가능한 에너지와 대사산물로 전환시키는 역할을 하게 되고, 이 에너지는 세포를 유지시

키고, 대사산물로부터 새로운 세포를 합성시키는 동화작용의 동력 역할을 수행하지만, 영양물질이 부족한 상태에서도 생존할 수 있는 능력을 가지고 있다. 기질 유입이 중단된 기근(이하 starvation) 상태에서 미생물들은 일반적으로 내생(endogenous)호흡 과정을 이용한다(Lopez et al., 2006; Lu et al., 2007). 그러나, 장기간 기질이 부족한 상태에서 활성슬러지를 유지할 경우, 전사수용체 이용의 증가와 미생물 대사과정의 파괴로 인한 슬러지 발생을 감소, 처리효율 저하를 가져오며, 특히 생물막의 외·내부 농도구배로 인한 기질 이용률 차이로 플럭의 내부응집력 변화를 가져온다(Lopez et al., 2006). 이러한 비정상 상태에서 활성슬러지 공법의 폐수처리장을 운전할 때 슬러지를 구성하는 플럭의 파괴, 미생물의 활성저하 또는 사멸 등 많은 내적요인이 발생하여 대부분의 경우 폐수의 재유입 시 고액분리 및 처리효율이 급속히 저하되어 기능을 회복하는데 많은 시일이 걸리거나 완전히 회복되지 않는 등 운영상에 문제가 발생하였으며, 이를 해결하고자 여러 연구자에 의해 연구가 진행되어 왔다. 그러나, 지금까지 폐수의 유입 중단 시 폐수처리 효율에 미치는 영향에 관한 연구들은 대부분 슬러지

† To whom correspondence should be addressed.
chyoon@kyungnam.ac.kr

의 생물학적 특성에 미치는 영향(Lopez et al., 2006; Salem et al., 2006; Yilmaz et al., 2007)에 대해 많이 다루고 있으며 폐수유입 중단과 같은 비정상상태에서의 플럭 크기 및 형태학적 특성(Jin et al., 2003; Wilen et al., 2003)과 같은 처리시설의 운영에 중요한 물리적 특성에 관한 연구는 미약한 실정이다.

따라서 본 연구는 일반폐수(이하 비염분 폐수)와 염분이 다량으로 함유된 폐수(이하 염분 폐수)를 처리하는 활성슬러지를 대상으로 starvation 동안에 폭기 상태와 비폭기 상태가 MLSS, MLVSS 및 SVI, 슬러지 플럭 크기 및 형태 특성을 나타내는 fractal dimension, 유기물 지표인 COD_{Mn} 제거 효율에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

2. 연구방법

실험장치는 전체 용적 20 L(유효용적 10 L)인 직육면체(200 mm × 200 mm × 500 mm)형태의 용기 중앙에 paddle형 교반기를 설치한 실험실 규모의 연속회분식 반응기(SBR; 문병현 등, 2002)로 2개의 반응기를 아크릴판으로 제작하여 사용하였다. 반응기내 용존산소(DO) 농도 유지는 하부에 설치한 산기관을 통하여 공급하고 3~3.5 mg/L가 되도록 조절하였다. HRT 및 SRT는 각각 20시간, 10일, 온도는 상온으로 설정하였고, MLSS는 3,500~4,000 mg/L로 유지하였다. F/M비는 0.17 kgCOD_{Mn}/kgMLSS·d로 운전하였다. 운전은 한 싸이클(cycle)을 12시간으로 하여 하루에 2회 반복 되도록 운전하였다. 1 cycle의 운전 모드는 유입 5분, 교반 5.5시간, 교반과 폭기 5.5시간, 침전 1시간, 배출 5분으로 설정하였다. 본 연구에 사용된 초기 슬러지는 염분 폐수의 경우 수산물 가공업체 처리장과 비염분 폐수의 경우 하수처리장의 반송 슬러지를 사용하였다. 약 70일 동안 운전하여 정상상태에 도달하였을 때 폐수유입을 중단시켜 starvation 기간을 1일에서 9일 동안 폭기 및 비폭기 상태에서 각각의 반응기를 운전하였다. 실험에 사용된 합성폐수는 문헌을 참고하여 제조하였다(Moon et al., 2002). 비염분 폐수의 오염물질농도는 COD_{Cr} 1,000~1,200 mg/L, COD_{Mn} 500~600 mg/L이고, T-N은 300~350 mg/L, T-P는 15~20 mg/L이다. 염분 폐수는 비염분 폐수에 NaCl 10,000 mg/L이 포함되게 제조하여 사용하였다. 운전기간 동안 분석항목은 MLSS, MLVSS, 플럭 크기 및 fractal dimension, SVI, COD_{Mn} 등을 측정하였다. MLSS, MLVSS, COD_{Mn}, SVI는 수질오염공정시험법에 따라 수행하였다. 염분폐수는 COD_{Mn} 측정 시 AgSO₄를 충분히 넣어 염분 농도에 의한 방해로 보정하였다. 플럭크기 및 fractal dimension 값은 입도 분석기(Mastersizer-E model, Malvern. Co.)를 이용한 SALLS 방법을 적용하여 분석하였다(Moon et al., 2002).

3. 결과 및 고찰

3.1. Starvation 기간 동안 폭기/비폭기가 MLSS 및 MLVSS 변화에 미치는 영향

Starvation 기간 동안 염분 폐수와 비염분 폐수를 대상으로 폭기 및 비폭기에 의한 MLSS 및 MLVSS의 변화를 Fig. 1 과 2에 나타내었다. Starvation 기간 동안 비염분 폐수의 MLSS농도 변화는 9일 후 폭기 상태에서는 40.9% 비폭기 상태에서는 25.5% 감소하여 폭기 상태에서 더 많은 감소가 일어났다. 염분 폐수는 폭기 상태에서 5일 후 17%, 비폭기 상태에서 9일 후 12% 감소하였다. 폭기 상태에서 비염분 폐수와 염분 폐수의 MLSS농도를 살펴보면 starvation이 진행될수록 MLSS가 감소하였으며, 특히 MLVSS 감소가 급격하게 나타났다. 비폭기 상태에서 비염분 폐수와 염분 폐수 슬러지의 MLSS 감소를 비교해 보았을 때 비염분 폐수 슬러지의 MLSS의 감소가 더 높게 나타났다. 이는 염분 폐수에서 발생하는 슬러지의 MLSS에는 염분과 미생물이 함께 포함되어 있어 starvation 기간 동안 미생물량은 감소되나 슬러지에 함유된 무기물질인 염분의 양은 감소되지 않았기 때문이다. 이는 MLVSS 변화를 보면 알 수 있다. Starvation 기간 동안 비염분 폐수의 MLVSS의 변화는 9일 후 폭기 상태에서 43.1%, 비폭기 상태에서 18.1% 감소가 관찰되었으며 염분폐수는 폭기 상태에서 5일 후 45%, 비폭기 상태에서 9일 후 22.9% 감소하였다. 비염분 폐수의 MLVSS 감소는 폭기 상태에서 비폭기 상태에 비해 급속한 감소를 나타내어 starvation 기간 동안 슬러지를 폭기 상태로 유지하는 경우가 미생물량을 더욱 감소시킬 수 있었다. 비폭기 상태에서 비염분 폐수와 염분 폐수의 MLVSS의 감소를 비교하였을 때 염분 폐수의 MLVSS의 감소가 컸다. 이는 기질의 유입이 중단되었을 경우 염분 폐수에 순유된 슬러지에 함유된 미생물의 자산화율이 비염분폐수에서 발생된 슬러지에 비해 높고 starvation 영향을 많이 받음을 알 수 있었다.

Fig. 3에 starvation 기간 동안 폭기 및 비폭기 상태에서 MLVSS/MLSS 비의 변화를 나타내었다. 비염분 폐수의 MLVSS/MLSS 비는 9일 후 폭기 상태에서 0.61에서 0.59로, 비폭기 상태에서 0.66에서 0.72로 변화하였다. 염분 폐수는 폭기 상태에서 5일 후 0.48에서 0.32로, 비폭기 상태에서 9일 후 0.51에서 0.36으로 변화되었다. 비염분 폐수의 MLVSS/MLSS 비의 변화는 비폭기 상태에서는 약간 증가하고 폭기 상태에서는 일정한 값을 나타내었다. 비폭기 상

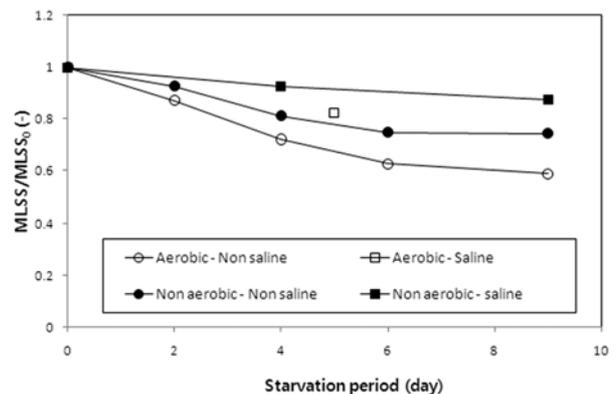


Fig. 1. Effect of aerobic and non-aerobic starvation on MLSS.

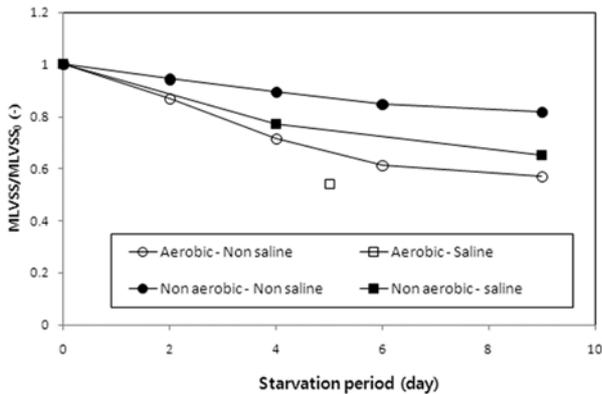


Fig. 2. Effect of aerobic and non-aerobic starvation on MLVSS.

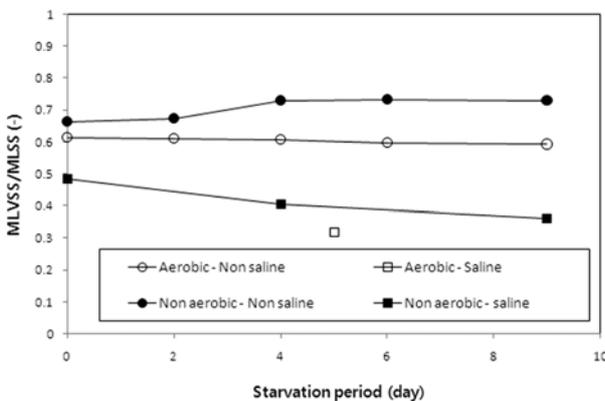


Fig. 3. Effect of aerobic and non-aerobic starvation on MLVSS/MLSS.

태에서의 비염분 폐수와 염분 폐수를 비교하여 보면 염분 폐수에서 MLVSS/MLSS 비가 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 MLSS에 비해 MLVSS가 starvation 기간 동안 크게 감소되었음을 의미한다. MLVSS의 감소는 기질의 유입이 중단되면서 미생물의 내생 호흡과 사멸에 의한 것으로 이러한 결과는 Lu 등(2007)의 연구 결과에서도 유사하게 보고되고 있다. 그들의 연구 결과에 따르면 starvation 기간 동안 폭기 상태로 슬러지를 유지하는 경우 MLVSS/MLSS 비가 일정하며 비폭기 starvation 시 MLVSS에 비해 MLSS의 감소가 더욱 빨리 일어나 MLVSS/MLSS 비가 증가하였는데, 이는 비폭기 starvation 후 슬러지에 함유된 인과 암모니아의 방출로 인해 MLSS의 농도가 급격히 감소되었기 때문으로 보고되고 있다. 따라서 starvation 기간 동안 비폭기 상태에서는 MLVSS 감소가 둔화되나 폭기 상태에서 슬러지를 운전하는 경우 MLSS와 MLVSS의 감소가 촉진되어 향후 반응기 재가동 시 회복시간이 더 요구될 것으로 사료된다.

3.2. Starvation 기간 동안 폭기/비폭기가 슬러지 침강 특성에 미치는 영향

Fig. 4는 정상적인 폐수 유입시와 폐수유입이 중단된 starvation 기간 동안에 폭기 및 비폭기 상태로 운전하였을

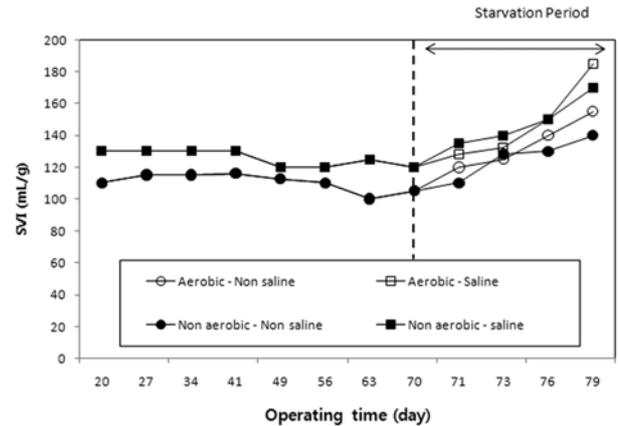


Fig. 4. Effect of aerobic and non-aerobic starvation on SVI.

때의 SVI 변화를 나타낸 그림이다. 정상적으로 폐수유입 시 슬러지의 SVI는, 비염분 폐수의 경우 평균 105 mL/g, 염분 폐수의 경우 평균 120 mL/g으로 염분 폐수의 SVI가 더 높은 것으로 나타났다. 비염분 폐수의 경우 9일간의 starvation 후 폭기 상태의 SVI는 105 mL/g에서 155 mL/g로, 비폭기 상태의 SVI는 105 mL/g에서 140 mL/g으로 증가하였다. 염분 폐수 경우 9일간의 starvation 후 폭기 상태의 SVI는 120 mL/g에서 185 mL/g로, 비폭기 상태의 SVI는 120 mL/g에서 170 mL/g으로 증가하여 침강성이 악화되었다. 이상의 결과로부터 starvation이 비염분 폐수보다 염분 폐수의 SVI에 더 큰 영향을 미치고 있었으며, 폭기 및 비폭기상태가 SVI에 미치는 영향은 비염분 폐수 및 염분 폐수 모두에서 비폭기 상태보다 폭기 상태가 더 높게 나타나, starvation 기간 동안 슬러지를 비폭기 상태로 유지하는 것이 반응기 재가동 시 슬러지 침강성의 악화를 줄일 수 있었다.

3.3. Starvation기간 동안 폭기/비폭기가 플러크기 및 fractal dimension에 미치는 영향

슬러지의 침전특성은 슬러지를 구성하는 플러크기 및 형태 특성인 fractal dimension의 변화와 밀접한 관련이 있다고 보고되고 있다(Govoreanu et al., 2003; Wilen et al., 2003). Fig. 5와 6에 starvation 기간 동안 폭기 및 비폭기에 따른 플러크 크기 및 fractal dimension의 변화를 나타내었다. 먼저, 정상상태에서 비염분 폐수와 염분 폐수에서 발생하는 슬러지의 플러크기는 각각 평균 177.59 μm , 185.21 μm 로 염분폐수에서 비염분 폐수에 비해 큰 플러크를 형성하였다. 이는 염분으로 인해 물의 밀도가 증가하게 되어 크기가 작고 밀도가 낮은 플러크는 정상상태에 도달하기 전 유출되어 크고 밀도 높은 플러크가 반응기에 남아 있으며(Moussa et al., 2006), 또한 염분으로 인해 이온세기의 증가로 응집이 촉진되어 큰 플러크가 형성된다고 보고되었다(Cousin and Ganczarczyk, 1998). Fig. 5와 같이 비염분 폐수의 경우 9일간의 starvation 동안 폭기 상태의 플러크 크기의 변화는 199.00 μm 에서 120.33 μm 로, 비폭기 상태의 플러크 크기의 변화는 199.00 μm 에서 132.00 μm 로 감소하였다. 염분 폐

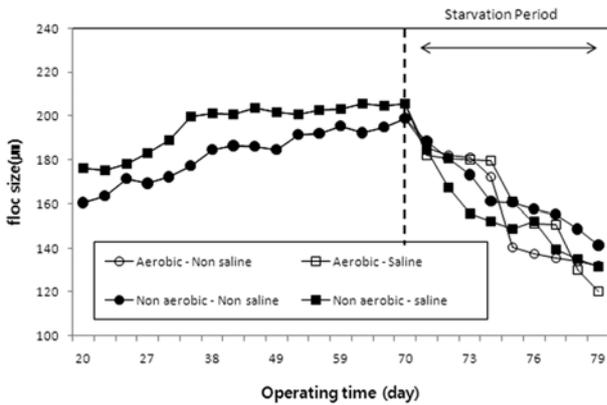


Fig. 5. Effect of aerobic and non-aerobic starvation on floc size.

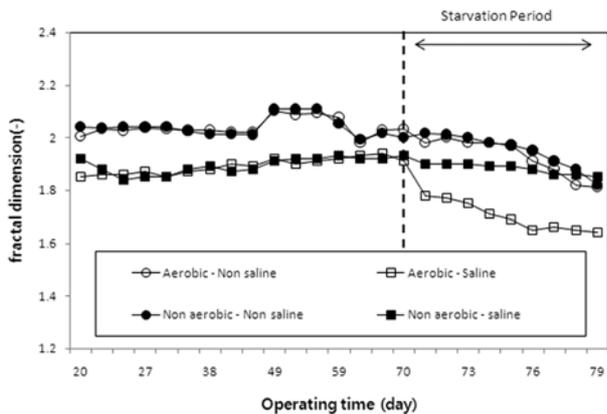


Fig. 6. Effect of aerobic and non-aerobic starvation on fractal dimension.

수의 경우 폭기 상태의 플럭 크기의 변화는 210.33 μm에서 115.33 μm로, 비폭기 상태의 플럭 크기의 변화는 205.81 μm에서 131.71 μm로 감소하였다. 염분 폐수는 비염분 폐수에 비해 플럭 크기가 더 감소하여 starvation의 영향을 더 많이 받았다. 이와 같이 플럭 크기의 변화와 SVI의 변화 경향이 유사한 결과를 보이고 있어 플럭의 크기와 침강성 사이에는 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

Fig. 6에 나타난 것과 같이 fractal dimension의 변화를 정상상태에서 살펴보면 비염분 폐수에서 2.05, 염분 폐수에서 1.91로 비염분 폐수에서 큰 값을 나타내었다. 이는 염분 폐수의 슬러지 플럭이 비염분 폐수의 슬러지 플럭에 비해 더 불규칙하고 표면적이 넓은 침강성에 불리한 형태 특성을 가지고 있음을 의미한다.

Starvation 기간 동안 비염분 폐수의 fractal dimension의 변화를 살펴보면 폭기 상태에서 2.03에서 1.98로, 비폭기 상태에서 2.00에서 1.82로 감소하였다. 염분 폐수의 fractal dimension은 폭기 상태에서 1.93에서 1.85로, 비폭기 상태에서 1.91에서 1.70으로 역시 감소하여 침강성이 악화되는 불규칙하고 표면적이 넓은 형태로 변화하였다. 따라서 비염분 폐수 및 염분 폐수 모두 starvation 기간 동안 폭기 상태보다 비폭기 상태로 운전하는 경우 플럭의 크기가 크고 불규칙한 형태의 플럭이 발생됨을 알 수 있었다. Martins 등(2004)의 연구결과, 기질과 산소가 결핍된 조건에서는 사상균이 다른 미생물에 비해 형태가 불규칙하고 비표면적이 넓어 성장에 유리하다고 보고되었다. 따라서 starvation 기간 동안 폭기 상태로 유지하면 미생물의 기질의 소비가 빠르고 기질의 결핍이 가속되어 플럭이 해체되고 자산화율이 높아져 작고 둥근 형태의 핀플럭(pin floc)이 형성된 반면 비폭기 상태에서는 비교적 크고 불규칙 형태의 플럭이 발생되며 플럭을 구성하는 미생물에 사상균이 많이 함유된 플럭이 발생된 것으로 사료된다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때 starvation 기간 동안 플럭 크기 및 fractal dimension 값이 감소하면 SVI 값이 증가하는 경향을 나타내고 있다. SVI와 플럭 크기, fractal dimension의 유사성을 찾기 위해 항목 간 상관관계를 분석한 결과를 Table 1에 나타내었다. 슬러지의 플럭 크기 및 fractal dimension과 SVI 사이의 상관계수를 살펴보면 비염분 폐수의 경우 폭기 상태에서 각각 81.9%, 85.9%이며, 비폭기 상태에서는 각각 96.5%, 90.9%이었으며, 염분 폐수의 경우 폭기 상태에서 각각 81.3%, 77.5%, 비폭기 상태에서 각각 95.3%, 89.3%로 비폭기 상태가 폭기 상태보다 높은 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 다른 연구자(Govoreanu et al., 2003; Wilen et al., 2003)들에 의해서도 본 연구결과와 유사한 연구 결과가 보고되었다. 따라서, SVI의 변화는 플럭크기 및 fractal dimension 변화와 밀접한 관계가 있으므로 활성슬러지의 운영에 중요한 유지관리인자로 이용할 수 있을 것이다.

3.4. Starvation 기간 동안 폭기/비폭기가 유기물 제거에 미치는 영향

Fig. 7에 starvation 기간 동안 폭기 및 비폭기 상태에서 비염분 폐수와 염분 폐수처리 시 유기물오염 지표인 COD_{Mn}

Table 1. Statistic results of simple linear regression between each physical characteristics of floc

		Non-saline wastewater			Saline wastewater		
		floc size vs dF [*]	SVI vs floc size	SVI vs dF	floc size vs dF	SVI vs floc size	SVI vs dF
Non-aerobic starvation	Multiple correlation coefficient	0.854	0.965	0.909	0.958	0.953	0.893
	Coefficient of determination	0.731	0.932	0.828	0.919	0.909	0.799
Aerobic starvation	Multiple correlation coefficient	0.986	0.819	0.859	0.980	0.813	0.775
	Coefficient of determination	0.974	0.672	0.739	0.962	0.661	0.602

* : dF: Fractal dimension

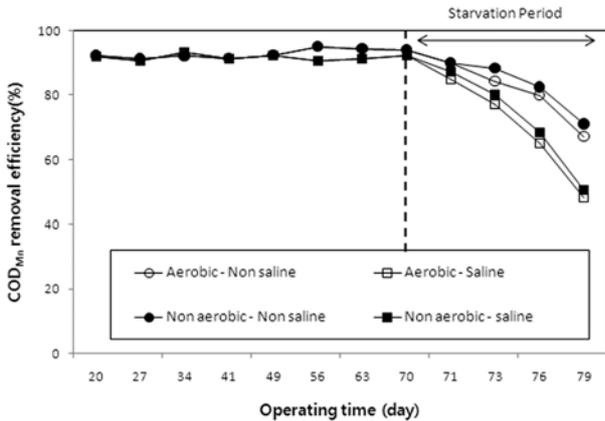


Fig. 7. Effect of aerobic and non-aerobic starvation on COD_{Mn} removal efficiency.

제거효율의 변화는 나타내었다. 정상상태에서 염분 폐수 및 비염분 폐수의 COD_{Mn} 제거효율을 비교하여 보면 비염분 폐수는 평균 92.7%, 염분 폐수는 평균 91.2%로 유기물 제거효율은 그다지 차이가 없었다. 그러나 Fig. 7에 나타난 바와 같이 9일 starvation 후 제거효율이 크게 차이가 있어 COD_{Mn} 제거효율은 비염분 폐수의 경우 폭기 상태에서 9일 후 95.1%에서 67.0%로, 비폭기 상태에서 94.1%에서 71.0%로 감소하였으나, 염분 폐수의 경우 폭기 상태에서 91.1%에서 48.3%로, 비폭기 상태에서 92.3%에서 50.2%로 감소하였다. 유기물 제거효율은 비염분 폐수의 경우보다는 염분 폐수의 경우가 현저하게 저하되었으며, 폭기 상태보다는 비폭기 상태가 더 저하되었다. 따라서 starvation 기간 동안 슬러지를 비폭기 상태로 유지하는 것이 플럭 크기 및 fractal dimension 감소 그리고 SVI의 증가에 의한 슬러지 침강성의 악화를 비교적 줄일 수 있을 뿐만 아니라 COD_{Mn} 제거효율의 감소도 줄일 수 있어 효과적인 운전방법이며 폐수유입이 다시 유입되어 재가동시 회복시간을 줄일 수 있음을 시사하고 있다.

4. 결론

생물학적 처리시 starvation 기간 동안 폭기/비폭기 상태가 슬러지의 물리적 특성 및 유기물 제거에 미치는 영향에 대하여 연구한 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) Starvation 기간 동안 비염분 및 염분 폐수 모두 비폭기 상태보다 폭기 상태에서 운전 시 MLSS 농도가 크게 감소하였으며, 폭기 및 비폭기 상태에서 비염분 폐수에 비해 염분폐수에서 MLVSS 농도가 보다 빨리 감소되어 염분 폐수에서 발생하는 슬러지에 함유된 미생물의 감소가 더 큰 것으로 나타났다.
- 2) Starvation 기간 동안 염분 폐수 및 비염분 폐수의 SVI가 증가되었으며 특히 SVI는 비폭기 상태에서보다 폭기 상태에서 크게 증가하여 침강성이 악화되었다.
- 3) 정상상태에서 비염분 폐수에 비해 염분 폐수에서 더 큰 플럭을 가졌다. 그러나 starvation 시 플럭 크기변화는 비염분 폐수보다 염분 폐수에서 크게 감소되어 starvation

의 영향을 크게 받은 것으로 나타났다. 염분/비염분 폐수 모두 비폭기 상태에서 플럭 크기 감소가 적게 나타났다.

- 4) Starvation 기간 동안 염분 폐수와 비염분 폐수를 비교해 보았을 때 염분 폐수에서의 플럭의 fractal dimension의 감소가 더 빠르게 나타나 플럭이 불규칙하고 비표면적이 큰 형태로 변화됨을 알 수 있다. 또한 비폭기 상태에서 폭기상태보다 fractal dimension이 더 감소하여 불규칙한 형태로 변화되었다. 플럭 크기 및 fractal dimension과 SVI 사이에 높은 상관성을 가지고 있어, 플럭 크기 및 fractal dimension이 침강성과 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.
- 5) 정상상태에서 비염분 폐수와 염분 폐수의 COD_{Mn} 제거효율은 거의 유사하였으나, starvation 기간 동안에 급속히 저하되었다. Starvation 기간 동안 COD_{Mn} 제거효율은 비염분/염분 폐수 모두 비폭기 상태가 폭기 상태보다 낮은 저하를 보였으며 슬러지의 물성 변화와 COD_{Mn} 제거효율 변화는 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국연구재단 지역대학 우수과학자 지원 사업(KRF-2007-521-D00268) 지원으로 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

참고문헌

문병형, 김상수, 이강춘(2002). 생물학적 고도처리에서 기질 주입 시간이 생물학적 flocculation 및 fractal dimension과 크기분포에 미치는 영향. *수질보전 한국물환경학회지*, **18**(6), pp. 637-645.

CoelloOviedo, M. D., Lopez-Ramirez, J. A., Sales Marquez, D., and Quiroga Alonso, J. M. (2003). Evolution of an activated sludge system under starvation condition. *Chemical Engineering*, **94**, pp. 139-146.

Cousin, C. P. and Ganczarczyk, J. J. (1998). Effect of salinity on physical characteristics of activated sludge flocs. *Water Quality Research J. Canada*, **33**(4), pp. 565-587.

Govoreanu, R., Seghers, D., Clercq, B. D., Saveyn, H., Capalozza, C., Van der Meeren, P., Nerstraete, W., Top, E., and Vanrolleghem, P. A. (2003). Linking floc structure and settling properties to activated sludge population dynamics in an SBR. *Water Science and Technology*, **47**(12), pp. 9-18.

Jin, B., Wilen, B. M., and Lant, P. (2003). A comprehensive insight into floc characteristics and their impact on compressibility and settleability of activated sludge. *Chemical Engineering Journal*, **95**, pp. 221-234.

Lopez, C., Pons, M. N., and Morgenroth, E. (2006). Endogenous processed during long-term starvation in activated sludge performing enhanced biological phosphorus removal. *Water Research*, **4**, pp. 1519-1530.

Lu, H., Keller, J., and Yuan, Z. (2007). Endogenous metabo-

- lism of *Candidatus Accumulibacter* phosphates under various starvation condition. *Water Research*, **41**(20), pp. 4646-4656.
- Martins, A. M. P., Pagilla, K., Heijnen, J. J., and van Loosdrecht, M. C. M. (2004). Filamentous bulking sludge-a critical review. *Water Research*, **38**, pp. 793-817.
- Moon, B. H., Seo, G. T., Lee, T. S., Kim, S. S., and Yoon, C. H. (2002). Effect of salt concentration on floc characteristics and pollutants removal efficiencies in treatment of seafood wastewater by SBR. *Water Science and Technology*, **47**(1), pp. 65-70.
- Moussa, M. S., Sumanasekera, D. U., Ibrahim, S. H., Lubberding, H. J., Hooigamans, C. M., Gijzen, H. J., and van Loosdrecht, M. C. M. (2006). Long term effects of salt in activity, population structure and floc characteristics in enriched bacterial cultures of nitrifiers. *Water Research*, **40**(7), pp. 1377-1388.
- Salem, S., Moussa, M. S., and van Loosdrecht, M. C. M. (2006). Determination of the decay rate of nitrifying bacteria. *Biotechnology and Bioengineering*, **94**(2), pp. 252-262.
- Wilén, B. M., Jin, B., and Lant, P. (2003). Impacts of structural characteristics on activated sludge floc stability. *Water Research*, **37**, pp. 3632-3645.
- Yilmaz, G., Lemaire, R., Keller, J., and Yuan, Z. (2007). Effectiveness of an alternation aerobic, anoxic/anaerobic strategy for maintaining biomass activity of BNR sludge. *Water Research*, **41**, pp. 2590-2598.