

OSA 공정을 이용한 하수슬러지 감량화 및 질소제거 가능성 평가

Estimation of Sludge Reduction and Nitrogen Removal Possibility using OSA Process

주재영¹ · 윤수철¹ · 남덕현² · 박철휘^{1,*}

Joo, Jae-Young¹ · Yoon, Su-Chul¹ · Nam, Duck-Hyun² · Park, Chul-Hwi^{1,*}

1 서울시립대학교 환경공학부, 2 대림산업기술연구소

(2008년 2월 5일 접수; 2008년 4월 7일 1차수정; 2008년 9월 1일 2차수정; 2008년 9월 5일 채택)

Abstract

The Oxidation-Settling-Anaerobic(OSA) process is a modified activated sludge processes for sludge reduction. It is evaluated that the sludge production in OSA process can decrease to 88% because of biomass decay and kinetic parameter(Y_H 0.237mgVSS/mgCOD, b_H 0.195d⁻¹) in anaerobic reactor, when compared with CAS process. However, it has problems caused by sludge reduction such as increase of nutrient loading. In case that the anoxic condition through the introduction of the intermittent aeration for the enhancement of nitrogen removal ability build up and enough rbCOD is supplied, maximum 88% of nitrogen is removed in the OSA process.

If the OSA process optimizing the intermittent aeration cycle is applied to the separate sewage system with high rbCOD fraction, it can be converted to advanced process in terms of the sludge reduction and nitrogen removal, simultaneously.

Key words : OSA, sludge reduction, nitrogen removal, intermittent aeration

주제어 : 슬러지 감량, 질소제거, 간헐폭기

1. 서론

대부분의 하수처리장에 적용되고 있는 생물학적 처리공정은 필연적으로 슬러지가 발생하며, 발생된 슬러지를 처리하기 위한 비용은 전체 하수처리비용의 약 60%를 차지하는 것으로 알려져 있다(Hornal, 1990). 기존의 슬러지 처리방법은 크게 생분해성을 향상시켜 부피감소 및 혐기성 소화효율의 향상을 통한 슬러지 저감을 유도하거나 파쇄, 초음파

등과 같은 물리적 처리, 오존산화, 열처리, 알칼리액 등을 이용하는 화학적 처리를 이용하였다.

그러나 이러한 방법들은 이미 발생한 슬러지를 처리하거나 이용하는 방법으로 근본적인 잉여 슬러지 발생량 자체를 감소시키는데 한계가 있다. 또한 공정 내 슬러지 저감을 위한 대안으로 물질대사 저해제(metabolic uncoupler) 등과 같은 화학물질을 이용하여 슬러지 생성을 제한/제약하는 방법이 있다(Low E.W. et al., 1998; 2000, G.H. Chen,

Table 1. Operation conditions for each mode

Mode	Run	Classification	Characteristics
I	1	Synthetic wastewater	Synthetic wastewater injection
	2		Sludge return line addition(settling reactor → aerobic reactor)
	3	Domestic sewage	Real domestic sewage injection
	4		Effluent return to the aerobic reactor
II	5	Domestic sewage	Intermittent aeration(aerobic : 30min, anaerobic : 10min)
	6		Intermittent aeration(aerobic : 30min, anaerobic : 30min)
	7		Intermittent aeration(aerobic : 60min, anaerobic : 30min)
	8		Intermittent aeration(aerobic : 60min, anaerobic : 60min)

Table 2. Operation conditions at each reactor

Specification	Value	
Inflow	74 ± 20 L/day	
Internal recycle ratio	0.5Q~3.0Q	
	Oxic	Anaerobic
Volume	18.9L	34.9L
HRT	2~8hrs	8~24hrs
Temp.	15±3°C	18±3°C
D.O.	3~7mg/L	0.1~0.3mg/L
pH	7.5 ± 1	7.3 ± 1.3

2000; 2002). 하지만 이러한 방법은 화학약품 첨가에 따른 독성 및 경제적 비용 상승과 공정 내 영양염류 부하 증가라는 단점이 있다.

Oxic-Settling-Anaerobic (OSA)공정은 호기조, 침전조, 혐기조로 구성되어 있으며(Chudoba et al., 1992; Saby S et al., 2003), 혐기조는 미생물의 기질제한을 통하여 미생물의 사멸과 내생효율을 유도한다. 이는 SRT와 HRT에 따라서 미생물의 낮은 활성상태를 유지하도록 한다는 점에서 BNR 공정에서의 혐기조와 기능적인 차이가 있다.

본 연구에서는 잉여슬러지 감량을 목적으로 슬러지 외부 반송라인에 혐기조를 추가하여 구성된 OSA공정을 이용해 간헐폭기 적용을 통한 슬러지 감량 및 질소 동시제거 가능성을 평가하고자 하였다.

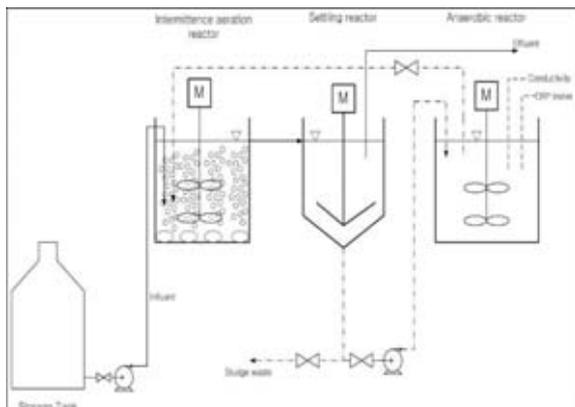


Fig. 1. Schematic diagram of the modified OSA.

2. 실험장치 및 방법

2.1 OSA 공정

실험에 사용된 반응조는 아크릴로 제작하였고 호기조, 침전조, 혐기조의 유효용적은 각각 18.9, 10.5, 34.9L이다. 식중 슬러지는 서울시 J물재생센터의 반송슬러지를 이용하였고 온도의 영향을 배제하기 위하여 20°C 항온실에서 실험을 진행하였다. 호기조의 DO농도는 3mg/L 이상 유지하도록 공급하였고 혐기조는 슬러지의 완전 교반을 위하여 교반기를 설치하여 50-60rpm으로 교반하였다.

2.2 Modified OSA공정

Modified OSA 공정은 호기조에 간헐폭기를 적용하였으며, 이 공정에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 간헐폭기는 호기조건과 무산소 조건을 단일 반응조 내에서 제공하고자 적용하였으며 간헐폭기 cycle에 따라 운전조건을 구분하여 연구를 진행하였다.

2.3 운전조건

OSA 공정의 하수고도처리 적용 가능성 평가에서는 초기 유입수로 인공하수를 사용하였으며, 실제 하수처리능을 평가하기 위해서 J 물재생센터의 1차 침전조의 상등수를 원수로 주입하였다. OSA 공정의 간헐폭기 도입 전·후를 mode I 과 mode II 로 구별하였으며, 각 mode의 운전특성에 따라 run 1~8을 구분하였다. Table 1, 2에는 각 mode에 따른 운전조건을 정리하여 나타내었다.

2.4 유입하수 성상

인공하수는 글루코오스를 이용하여 CODcr 250mg/L로 일정하게 유지하였으며, 실제 하수는 서울시 소재의 J 물재생센터의 1차 침전지의 상등수를 원수로 이용하였고 200L의 저장용기에 저장하여 정량펌프를 통해 반응조로 공급해주었다. 각 하수의 성상은 Table 3과 Table 4와 같다.

2.5 실험방법

2.5.1 분석항목

단위 반응조의 성능평가를 위해 Table 5와 같이 온도, pH, DO, CODcr, T-N, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, NO₂⁻-N, T-P, PO₄³⁻-P, MLSS, BOD₅를 공정시험법과 Standard Methods에 준하여 분석하였다.

2.5.2 혐기성 미생물의 질소제거 가능성 평가(Batch test)

OSA공정 내 혐기조 미생물을 대상으로 질소제거 가능성을 평가하기 위해 Fig 2의 반응조를 이용하여 Table 6의 운전조건으로 회분식 실험을 실시하였다. 실험계획에 따라 phase 1, 2, 3는 OSA 공정의 혐기조로 유입되는 슬러지와 방류수를 각각 1 : 1, 1 : 0.5, 1 : 0.2의 비율로 혼합하여 회

분식 실험을 진행하였다. 적정 C/N비 조건에서 혐기조 미생물의 탈질능을 평가하기 위하여 phase 3을 대조군으로 메탄올을 첨가한 phase 4, phase 5의 결과를 비교 평가하였다. 실험 조건은 온도 12℃, pH 6.8~7.3, 교반속도 15rpm을 유지하였으며, 반응 시간별로(0hr, 1hr, 1.5hr, 2hr, 3hr, 5hr, 7hr) MLSS, CODcr, T-N, NH₃, NO₃⁻-N의 변화를 각각 측정하였다.

2.5.3 동역학 계수 산정

동역학 계수 산정을 위해 OUR 실험을 진행하였으며, 호기조 및 간헐조 내의 슬러지를 대상으로 하였다. OUR 실험은 500mL 병 내에 소비되는 용존산소를 연속적으로 측정하였으며, 측정된 데이터를 컴퓨터로 저장하여 분석하였다.

Table 3. Synthetic wastewater composition (mg/L)

Composition	Concentration
Glucose	234.4
NH ₄ Cl	95.5
KH ₂ PO ₄	22
NaHCO ₃	300
MgSO ₄ · 7H ₂ O	34
MnSO ₄	1.7
FeSO ₄ · 7H ₂ O	2.2

Table 4. Domestic wastewater characteristics (mg/L)

Items	Range
CODcr	113~598
SS	22~350
T-P	0.2~4
DO	0.3~7.8
T-N	12.5~63.8
NH ₄ ⁺ -N	4.1~39.6
Temp.	5.8~24.5℃
pH	6.5~7.7

Table 5. Analysis methods for each item

Items	Analysis methods	Equipments
Temp.	Electrode methods	YSI 6920
Flow	Volumetric methods	-
DO	Membrane electrode methods	YSI 55
pH	Electrode methods	YSI 6920
BOD ₅	Standard methods	-
CODcr	Close reflux methods	-
T-N	Violet Absorptiometric Analysis	Cecil instrument CE 4004
T-P	Absorptiometric Analysis(Ascorbic acid method)	Cecil instrument CE 4004
NH ₄ ⁺ -N	HACH methods	DR-2010
NO ₃ ⁻ -N	Ion chromatography	SHIMADZU HIC-20A
NO ₂ ⁻ -N	Ion chromatography	SHIMADZU HIC-20A
PO ₄ ³⁻ -P	Ion chromatography	SHIMADZU HIC-20A
SS	Glass fiber filter method	-

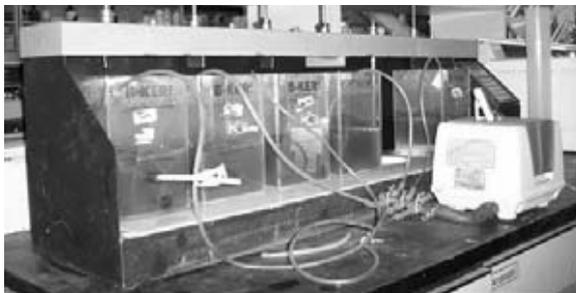


Fig. 2. The batch test equipment.

Table 6. Experimental condition for nitrogen removal possibility in OSA anaerobic reactor

Phase	Dilution ratio (sludge : effluent)	Carbon Source (methanol)
1	1 : 1	-
2	1 : 0.5	-
3	1 : 0.2	-
4	1 : 0.5	1 mL
5	1 : 0.5	2 mL

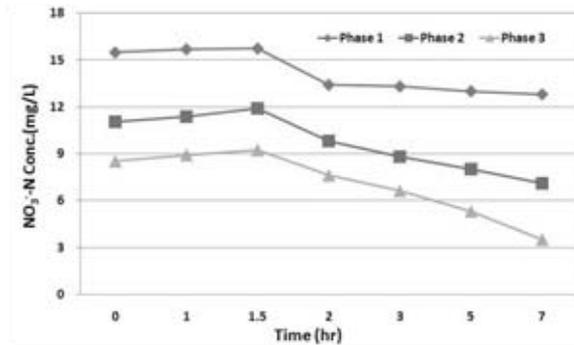


Fig. 3. Change of NO₃⁻-N concentrations at phase 1, 2, 3.

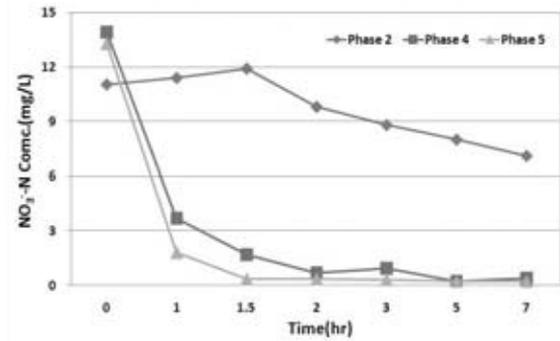


Fig. 5. Change of NO₃⁻-N concentrations at phase 2, 4, 5.

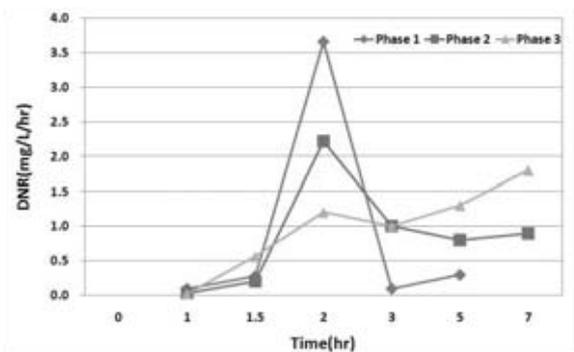


Fig. 4. Change of DNR values at phase 1, 2, 3.

OUR 측정 장치는 미국 N-con사의 Comput-OX Respirometer 4R을 사용하였으며, 실험에 사용되는 슬러지는 세척 후 2시간 이상 포기시켜 슬러지 내 포함된 잔류 COD 및 기타 성분들을 제거하였다. 또한 세척으로 인하여 부족할 수 있는 인 성분과 알칼리도는 KH₂PO₄(5mg-P/L)와 NaHCO₃(200mg as CaCO₃/L)로 보충하였다. Y_H와 b_H에 있어 F/M비 0.3을 기준으로 하였으며 각 시료는 0hr, 1hr, 1.5hr, 2hr, 3hr, 5hr, 7hr에서 TCOD와 SCOD를 Standard methods에 따라서 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 OSA공정의 질소제거 가능성 평가(Batch test)

OSA 공정의 질소제거 가능성을 평가를 위해 방류수를 각각 1, 0.5, 0.2Q로 반송하여 주입한 결과, Fig. 3과 같이 1.5hr 이후에 NO₃⁻-N의 제거경향이 phase 1, 2, 3에서 관찰되어 NO₃⁻-N을 포함한 방류수를 반송할 경우 공정 내 추가적인 탈질을 기대할 수 있을 것으로 판단하였다. phase 1, 2, 3에서의 탈질율은 각각 0.9mg/L · hr, 0.7mg/L · hr, 0.7mg/L · hr였다. phase 3의 경우에 Fig. 4에서 나타난 것과 같이 시간 경과에 따라 탈질율의 추가적인 상승을 확인할 수 있었다.

적정 C/N비가 충족된 경우에 혐기조 내의 미생물의 탈질능을 평가하기 위하여 phase 2, 4, 5를 비교한 Fig. 5의 결과, phase 4, 5에서 2hr안에 탈질율이 약 85%까지 증가하여, 혐기조 내 미생물의 잠재적인 탈질능을 확인할 수 있었다.

3.2 OSA 공정의 성능평가

Mode I 과 Mode II 의 MLSS 농도변화를 나타낸 Fig. 6 과 같이 Mode I 의 MLSS 농도는 호기조에서 약 2,580mg/L까지 증가한 이후 안정적으로 유지되었고, 혐기조에서의 경우에는 약 4,000mg/L에서 유지되었다. Mode II에서는 슬러지 반송비를 1.5Q에서 3Q로 증가시킴에 따라 호기조의 MLSS 농도는 약 2,600mg/L에서 3,000mg/L까지 증가하였다. 인공하수를 사용한 운전초기 SVI는 약 450으로 상당히 높은 값을 보였지만 침전조에서 슬러지 부상과 같은 문제는 발생하지 않았다. 이후 실제 하수를 주입한 경우 SVI는 약 150~200로 안정된 범위를 보였다.

CODcr과 SS 농도변화를 나타낸 Fig. 7에서, Mode I 의 인공하수를 주입한 경우, CODcr의 제거율을 약 92%로 나타냈지만 실제 하수를 주입한 후에 제거효율은 약 80%로 감소하였다. Mode II에서 CODcr 제거율은 92%이상으로 안정적으로 나타났다. 이것은 간헐포기 적용에 의한 효율상승으로 판단되며 Mode I 과 Mode II의 SS 제거효율은 평균 93%로 안정적인 효율을 보였다.

Fig. 8은 T-N 제거효율과 질산화율을 나타내었다. Mode I에서의 질소제거효율은 약 28%로 제한적인 질소제거 효율을 보이는 것으로 나타났다. 반면 간헐포기를 도입한 Mode II의 경우 질산화율은 92% 이상으로 안정된 효율을 보였으며, 질소제거효율이 평균 40%로 간헐포기 주기에 따라 증가하는 경향을 보였다. 또한 Mode II에서 초기 유입하수 중의 BOD₅/CODcr 비가 약 0.15로 낮은 경우에 비하여 BOD₅/CODcr가 0.33인 경우, 질소제거 효율은 최대 88%까지 증가하였다.

Mode별 각 반응조의 SDNR을 나타낸 Fig. 9에서 Mode I의 호기조와 혐기조 SDNR은 각각 -7, 21mgNO₃⁻

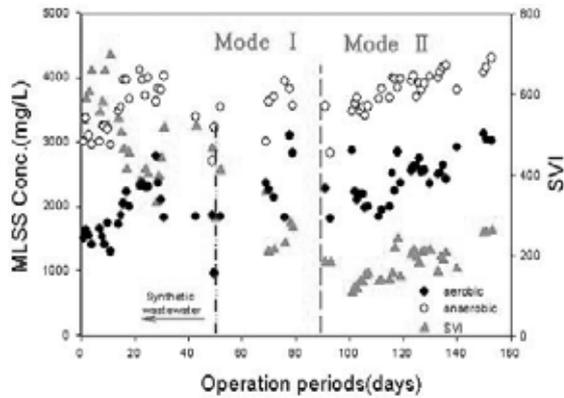


Fig. 6. Change of MLSS and SVI during the periods .

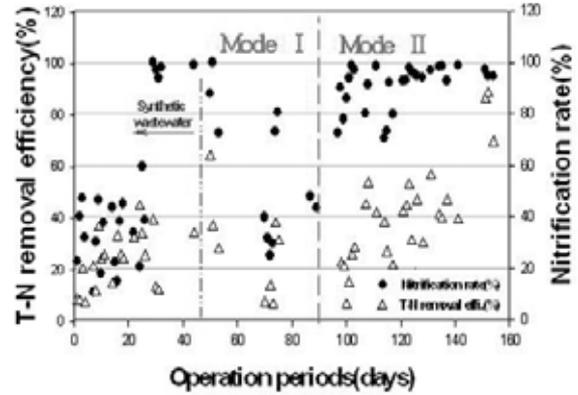


Fig. 8. Change of nitrogen performances at Mode I , II .

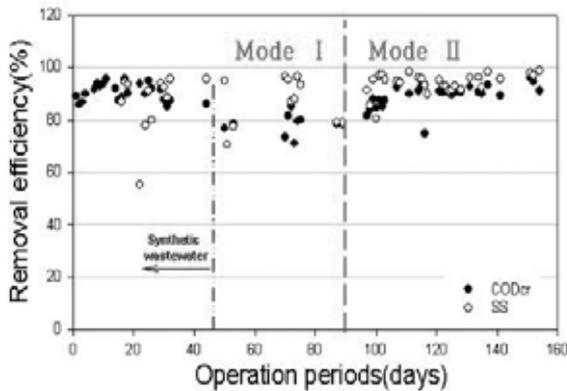


Fig. 7. Change of CODcr and SS removal efficiency during the periods.

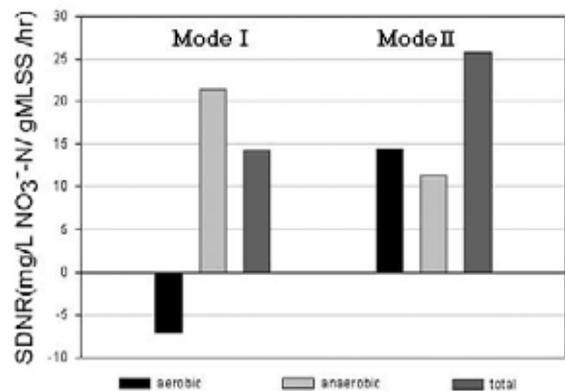


Fig. 9. SDNR in aerobic and anaerobic reactor with Mode I , II .

N/gMLSS · hr 이었으며, 공정전체의 SDNR은 약 14.3mgNO₃⁻-N/gMLSS · hr로 평가되었다. Mode II에서 호기조와 혐기조의 SDNR은 각각 14.4, 11.3mgNO₃⁻-N/gMLSS · hr였으며, 공정전체 SDNR은 25.8mgNO₃⁻-N/ gMLSS · hr이었다. Mode I, II에서 호기조와 혐기조의 SDNR을 비교한 결과, Mode II의 혐기조에서 SDNR은 Mode I의 혐기조에 비해 상대적으로 감소하였지만, Mode II에서 간헐포기의 도입으로 인한 호기조의 SDNR 증가를 확인하여 OSA 공정의 간헐포기 도입이 추가적인 탈질능 향상을 가져온 것으로 판단된다.

3.3 슬러지 감량화 평가

3.3.1 동역학 계수의 산정

회분식 실험을 통하여 산정된 Y_H와 b_H를 나타낸 Fig. 10, 11과 같이 Y_H는 0.237mgVSS/gCOD로 활성슬러지 공정의 일반적인 Y_H 값인 0.4~0.67mgVSS/gCOD에 비하여 낮은 값을 보였다. 이는 혐기조로 유입된 슬러지가 내생호흡단계 또는 기아상태로 유도되어 호기조 유입 시 미생물 증식보다는 기초대사 유지에 보다 많은 에너지를 소모하였기 때문인 것으로 판단된다. 혐기조의 b_H 값은 0.195d⁻¹로 일반적인 활성슬러지 공정에서의 b_H 값이 가지는 범위인 0.1~0.15d⁻¹에 비해 높은 값으로 나타났다. 결과로부터 활성슬러지 공정에서 대부분의 에너지가 미생물의 증식과 물질대사를 위하여 소모되는 것과는 달리 슬러지의 내생 및 기아상태 유도를 위한 긴 SRT와 혐기조를 슬러지 반응라인에 추가한 OSA 공정에서는 증식보다는 미생물의 기초물질대사에 상

Table 7. Y_H and b_H values in CAS* and OSA

	Contents	Value	Reference(CAS)	
Y _{H,oxic}	Yield for heterotroph(mgVSS/mgCOD)	0.237	CODbased	0.4
			BCODbased	0.67
b _H	Decay coefficient for heterotroph(d ⁻¹)	0.195	Range	0.06~0.15
			Value	0.10

* : Conventional Activated Sludge

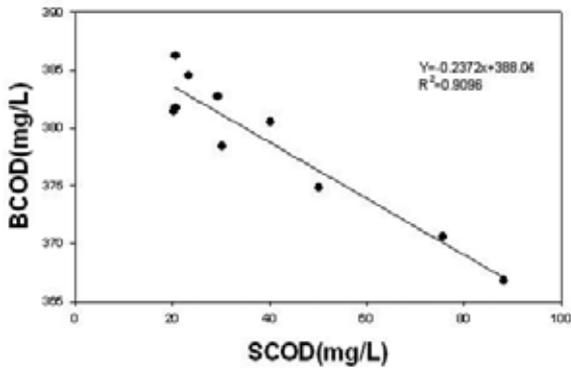


Fig. 10. Y_H determination of aerobic reactor.

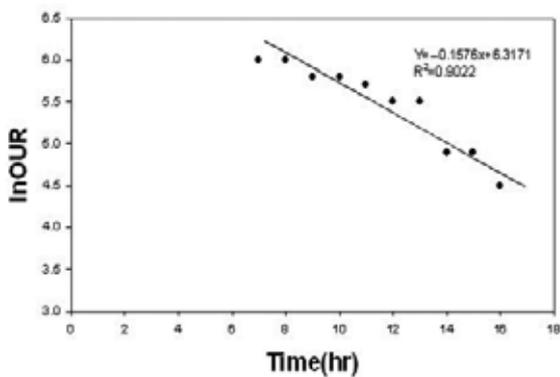


Fig. 11. b_H determination of aerobic reactor.

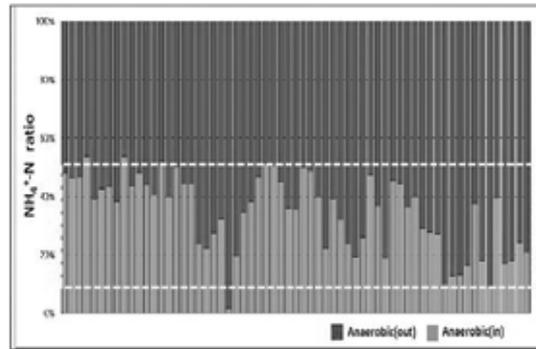
대적으로 많은 에너지를 소모하기 때문에 낮은 슬러지 수율을 보이는 것으로 사료된다.

3.3.2 혐기조 내에서의 NH_4^+-N , COD_{Cr} 농도의 변화

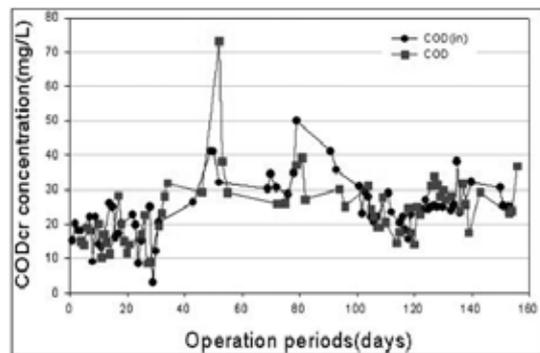
혐기조 내의 미생물 사멸은 식(1)에서 나타난 것과 같이 세포 내의 암모니아성 질소 성분이 수계로 방출됨에 따라 NH_4^+-N 의 농도 증가를 나타내게 된다(C. P. Leslie Grady, Jr. et al., 1999)

$$Biomass\ N \rightarrow NH_3 - N + biomass\ debris\ N \quad \text{식(1)}$$

Fig. 12 (a)는 혐기조로 유입되는 반송슬러지 내의 NH_4^+-N 농도와 혐기조 내의 NH_4^+-N 농도를 나타내었으며, 혐기조로 유입되는 NH_4^+-N 농도를 50%로 기준하였을 경우 유출되는 슬러지의 NH_4^+-N 의 농도가 50% 이상의 비율을 차지하고 있어 혐기조가 미생물의 내생단계 유도는 물론 사멸에 의한 슬러지 저감에 직접적인 영향을 미치고 있음



(a)



(b)

Fig. 12. Change of NH_4^+-N and COD_{Cr} concentrations in the anaerobic reactor.

을 알 수 있다. 미생물의 사멸로 인한 NH_4^+-N 증가에 따라 유기물 부하의 증가도 병행될 것으로 판단하였으나 Fig. 12(b)에서와 같이 유기물 부하 증가 경향은 관찰되지 않았다. 이것은 Fig. 9의 결과처럼 혐기조에서의 탈질과 내생상태에서의 물질대사에 유기물이 이용되었기 때문으로 사료된다.

3.3.3 슬러지 감량 산정

간헐폭기조의 SDNR과 SRT와의 관계를 통해서 적정 SRT를 결정하고자 하였다. 다음의 Fig. 13에서 나타난 것과 같이 SRT가 증가할수록 SDNR의 값은 감소하여 약 SRT 120d 정도에서 음수값으로 나타났다. SRT 120d 이상으로 운전하는 것이 슬러지 감량에는 유리하지만 간헐폭기조에서 안정적인 탈질을 위해서는 SRT 80~110d 정도에서 SRT가 결정되어야 할 것으로 판단되며, 이를 슬러지 발생량 산정에 적용하였다.

실험을 통해 산정된 동역학 계수를 이용하여 슬러지 발생량을 계산한 후 활성슬러지 공정과 비교 평가하였다. 슬러지 발생량을 산정하기 위해 식(2)을 사용하였으며, 계산결과는

Table 8. Sludge production comparison between CAS and OSA

Process	Y_H (gVSS/gCOD)	b_H (gVSS/gVSS · d)	SRT(day)	$\Delta Px, vss$ (mg/day)	Reduction ratio (%)
CAS	0.6	0.2	6	6,957	-
OSA	0.237	0.195	110	838	88(as VSS)

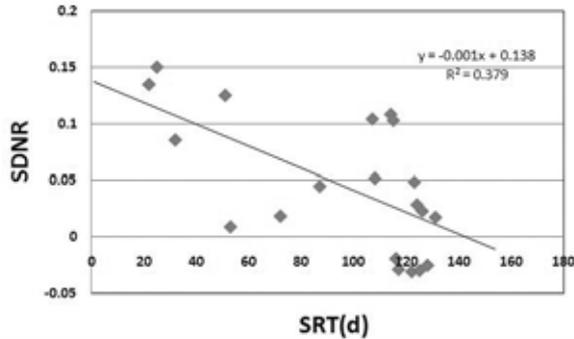


Fig. 13. Relationship between SDNR and SRT in the intermittent aeration reactor.

Table 8에 나타난 것과 같이 OSA 공정이 활성슬러지 공정에 비해서 최적운전조건에서 최대 약 88%까지 슬러지 감량이 가능한 것으로 계산되었다.

$$P_{x,uss} = \frac{QY_H(S_0-S)}{1+b_H SRT} + \frac{(f_d/b_H)QY_H(S_0-S)SRT}{1+b_H SRT} + \frac{QY_A(NOX)}{1+b_A SRT} + Q(nbVSS) \quad \text{식(2)}$$

4. 결론

혐기조에서의 미생물 사멸 및 동역학계수 (Y_H 0.237mgVSS/mgCOD, b_H 0.195d⁻¹) 결정을 통해 슬러지 발생량을 산정한 결과, OSA공정은 최적조건에서 활성슬러지 공정에 비해 약 88%의 슬러지 감량을 갖는 것으로 나타났다. 하지만 슬러지 감량에 따른 영양염류 부하 증가라는 문제점을 보였다. 영양염류 중에서 질소의 제거능 향상을 위한 간헐포기를 도입하면 무산소 조건의 조성과 rbCOD가 충족되는 경우 OSA 공정에서도 최대 88%의 질소제거효율을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 간헐폭기 OSA공정을 이용하여 유기물, 질소제거와 동시에 수처리 반응조내에서 슬러지 감량화가 가능한 고도처리 공정을 제안하므로써 기존 활성슬러지 공법의 개선이 가능할 것으로 판단된다.



사사

본 연구는 2007년도 서울시립대학교 교내 학술 연구 조성비에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

1. 김동민, 김선희, 박철휘, 신현곤, 이병인, 이상혁, 이영신, 최훈근, 홍성철 (2001) *폐수처리공학*, 동화기술, 서울.
2. 박철휘, 서정원, 박종운, 박종환 (2005) *하수처리 설계*, 동화기술, 서울.
3. C. P. Leslie Grady, Jr., Glen T. Daigger and Henry C. Lim, (1999) *Biological Wastewater Treatment*, Second Edition, Marcel Dekker inc., New York.
4. G.H. Chen (2000) Minimization of activated sludge production by chemically stimulated energyspilling, *Water sci. tech.*, **42**, pp.405-412.
5. G.H. Chen (2002) Utilization of a metabolic uncoupler 3,3',4',5-tetra chlorosalicylanilide(TCS) to reduce sludge growth in activated sludge culture, *water research*, **36**, pp.2077-2083.
6. Guang-Hao Chen, Kyoung-Jin An, Sébastien Saby, Etienne Brois and Malik Djafer (2003) Possible cause of excess sludge reduction in an oxic-settling-anaerobic activated sludge process(OSA process), *Wat. Res.*, **37**, pp.855-886.
7. Hornal, N. J. (1990) *Biological Wastewater Treatment Systems: Theory and Operation*. John Wiley & Sons, New York.
8. Low, E.W., Chase, H.A. (1998) The use of chemical uncouplers for reducing biomass production during biodegradation, *Water Sci. Tech.*, **37**, pp.399-402.
9. Low, E.W., Chase, H.A., Milner, M.G., Curtis, T.P. (2000) Uncoupling of metabolism to reduce biomass production in the activated sludge process, *Water Res.* **34**, pp.3204-3212.
10. P. Chudoba, A Morel and B. Capdeville (1992 a) The case of both energetic uncoupling and metabolic selection of microorganisms in the OSA activated sludge system, *Environ. Tech.*, **13**, pp.761-770.
11. P. Chudoba, J. Chudoba, and B. Capdeville (1992 b) The aspect of energetic uncoupling of microbial growth in the activated sludge process : OSA process, *Water Sci. Tech.*, **26**, pp. 2477-2480.
12. Saby S, Djafer M, Chen GH. (2003) Effect of low ORP in anaerobic sludge zone on excess sludge production in oxic-settling-anaerobic activated sludge process. *Water Res*, **37**, pp.11-20.