

동역학계수 및 물질수지를 이용한 OSA공정의 잉여슬러지 감량능 평가

남덕현[†] · 장형석 · 하금률 · 김준규 · 주재영* · 정인호* · 박철휘*

대림산업 기술연구소 환경연구지원팀

*서울시립대학교 환경공학부

Evaluation of Excess Sludge Reduction in the OSA Process using Kinetic Parameter and Mass Balance

Duck-Hyun Nam[†] · Hyung-Suk Jang · Kuem-Ryul Ha · Joon-Kyu Kim · Jae-Young Ju* · In-Ho Jung* · Chul-Hwi Park*

Environmental Research & Engineering Team, Technology Research Institute, Daelim Industrial Co., Ltd.

*Department of Environmental Engineering, University of Seoul

(Received 2 February 2009, Revised 27 April 2009, Accepted 29 May 2009)

Abstract

The Oxidation-Settling-Anaerobic (OSA) treatment process, a modified Conventional Activated Sludge (CAS) process, was developed for the purpose of sludge reduction. The insertion of a sludge holding tank into a sludge return line, an anaerobic reactor, forming an OSA process, may provide a cost-effective way of reducing excess sludge production during a process. The OSA process was evaluated for its sludge reduction ability by kinetic parameter and mass balance, with an observed excess sludge reduction of 63.5%, as $P_{X,VSS}$, compared with the conventional activated sludge process.

keywords : Excess sludge reduction, Kinetic parameter, Mass balance, Oxidation-Settling-Anaerobic (OSA)

1. 서론

활성슬러지 및 하수고도처리공정은 생물학적 물질대사를 이용하여 인공적으로 조성된 효율적 환경에서 하폐수를 처리하는 시스템이다. 기타 활성슬러지공법의 변법 역시 처리 효율향상과 안정성을 중심으로 개발되었으며 공정의 특성상 부산물로 잉여슬러지가 발생한다. 이러한 생물학적 처리공정은 물질대사인 이화작용과 동화작용이 활성화될 경우, 상대적으로 많은 잉여슬러지가 발생해 처리장의 슬러지 처리부담을 증가시킬 수 있다.

현재, 슬러지 처분 및 처리에 대한 적극적 대안으로 처리 시설 내 슬러지 발생을 억제하거나 물리·화학적 처리를 통해 잉여슬러지를 최소화하려는 시도가 활발히 수행되고 있다. 활성슬러지 공정의 변법으로 연구된 Oxidation-Settling-Anaerobic (OSA)공정 역시 시스템 외로 배출되는 잉여슬러지 감량을 유도한다는 점에서 계의 슬러지 감량기술과 공통점이 있지만 미생물의 물질대사 조건을 제어해 공정 내에서 슬러지 발생률을 근본적으로 제어한다는 점에서는 차별성을 갖는다. 다시 말해, OSA공정은 잉여슬러지를 혐기 및 낮은 F/M비 조건에서 미생물의 성장조건에 제약을 두어 슬러지의 감량을 유도하고자 하였다. 타 전처리방법에 비해 가용화효율은 낮으나 공정이 단순하고 슬러지 생산효

율이 낮아 운전유지비가 저렴하다는 장점을 가지고 있다. OSA공정은 호기조(oxic), 침전조(settling) 그리고 슬러지 외부반송라인에 추가된 혐기조(anaerobic)로 구성된다(Chudoba et al., 1992a, 1992b).

호기조는 CAS공정과 같이 원수로부터 유입된 유기물질이 종속영양체인 호기성 미생물에 의해 제거되며 독립영양체인 질산화 미생물 *Nitrosomonas* 및 *Nitrobacter* 속에 의해 질산화가 수행된다. 또한, Biological Nutrient Removal (BNR)공정의 aerobic조건에서와 같이 부가적으로 원수 내 포함되어 있는 인산염이 *Acinetobacter* 속으로 대표되는 인 축적 미생물인 PAOs에 의해 인의 과잉 축적이 이루어지는 반응형태이다. 침전조는 호기조 후단에서 MLSS를 고액분리하여 처리수를 안정적으로 생산하고 활성을 갖는 슬러지를 침전지 하단에 농축시킴으로써 반송슬러지를 혐기조로 이송할 조건을 형성한다. 또한, 경우에 따라 감량범위를 초과하여 발생한 잉여슬러지 인발의 기능을 갖는다. OSA공정에서 잉여슬러지 감량의 주요역할을 수행하는 혐기조는 기질수준과 슬러지농도 측면에서 생물학적 영양염류 제거공정인 BNR공정의 혐기조와 기능 및 배치가 다르다. 혐기조는 체류시간(SRT 및 HRT)에 따라 미생물의 낮은 활성상태를 유지하도록 하여 성장, 활동 그리고 증식을 최소화하는 기능을 담당한다.

OSA공정에서 외부탄소원은 이미 혐기조로 유입되기 전, 대부분 호기조에서 소모되기 때문에 저기질의 유입수를 공급받는 혐기조 내 종속영양체는 성장단계 중 내생 호흡단계

[†] To whom correspondence should be addressed.
dhnam@daelim.co.kr

에 도달한다. 일반적인 CAS의 슬러지수율 범위는 0.28~0.47 kgSS/kgCODremoved인 것에 비해 OSA 슬러지수율 범위는 0.13~0.29 kgSS/kgCODremoved인 것으로 보고되고 있다(Chen et al., 2001, 2003; Chudoba et al., 1992a, 1992b; Wei et al., 2003). 이러한 슬러지수율은 CAS공정의 약 50%에 해당하는 것으로 슬러지 감량 측면에 있어 효율적임을 알 수 있다. 대표적인 OSA의 공정도는 Fig. 1과 같다.

하지만, OSA공정 내 슬러지 감량화에 대한 메카니즘은 가설측면에서 여러 경로를 통해 연구가 진행되고 있다. 생물학적 하수처리공정에서 잉여슬러지 감량 기작은 아직까지 완전히 밝혀지지 않았으며 공정에 대한 정보 역시 정립되어 있지 않다. 다만, 슬러지 감량 가능성 원인이 uncoupling metabolism, So/Xo ratio, 미생물체의 분해 또는 사멸, 저성장체의 우점, 포식자의 기여 그리고 물리적 환경 측면에서 연구되고 있다(Chen et al., 2003; Low and Chase, 1999). 호흡조절 과정이 존재하지 않고, 생체합성과정이 제한되면 물질대사 저해(uncoupling metabolism) 현상이 발생하게 되는데, 이 경우 박테리아는 여분의 자유에너지를 동화작용에 상당량 이용할 수 없게 된다(Low and Chase, 1999). 특히, uncoupling metabolism에 대해 고찰한 연구자들에 의하면 물질대사 저해는 일반적으로 저해제의 존재 여부, 중금속, 과잉의 에너지원, 비정상적인 환경변화 그리고 영양물질의 제한으로 발생한다고 보고하고 있다(Liu and Tay, 2001; Strouthamer, 1979). Yang 등(2003)에 따르면 chlorophenol, nitrophenol을 물질대사 저해제를 이용하여 대조군에 비해 주입농도를 최대 20 mg/L로 주입한 결과, Y_{obs} (the observed growth yield)가 최대 85%이상 낮아짐으로써 화학적 저해제 주입에 따른 잉여슬러지 감량화 효과를 보고하였다.

본 연구에서는 동역학 계수와 물질수지 평가로 OSA공정을 재현한 실험실 규모의 반응조에서 단위 반응조인 호기

조와 혐기조의 공정 내 슬러지 감량능을 고찰하였다. OSA공정의 특성인 공정 내 슬러지 감량능 평가를 통해 향후 슬러지 저감형 하수고도처리공정 개발의 공학적 근거를 마련하고자 하였다.

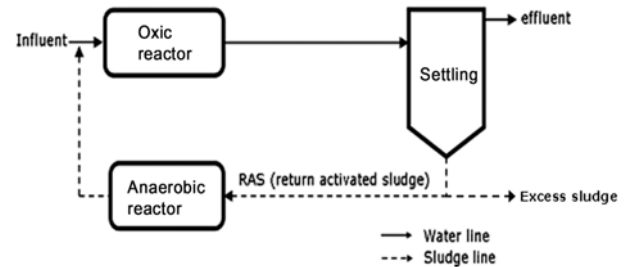


Fig. 1. Process flow diagram of the OSA system.

2. 연구방법

2.1. 실험계획

본 연구의 목표는 OSA공정의 공정 내 슬러지 감량능 분석과 각 단위반응조의 감량화 기작에 관한 관련성을 검토하는 것으로 운전방식은 반송(R1, R2, R3)경로에 따라 구분하였다. 공정의 사양, 실험계획 그리고 OSA공정 모식도를 Table 1, Fig. 2 그리고 Fig. 3에 각각 나타내었다.

2.2. 운전 mode

호기조와 혐기조로 연결된 반송라인 R1, 침전지에서 호기조로 연결된 반송라인 R2 그리고 처리수를 혐기조로 재유입하기 위한 반송라인 R3을 구성하였다. Mode 1에서 혐기조의 슬러지 체류시간은 반송율에 따라 7.6~22.8시간으로 유지하였다. 유기물(COD)과 입자성물질(SS) 제거능을 검토한 사전실험에서 mode 1 반송라인 R1의 반송비가 유

Table 1. Reactor specification of the OSA process

Item	Unit	Oxic	Settling	Anaerobic
Volume	L	18.9	10.5	34.9
Dimension	mm	290*290*225 ^{EH}	Φ400*300 ^{EH}	440*200*390 ^{EH}
HRT	hr	4	2.5	7.6~22.8
Appearance	-	Rectangular	Cylindrical	Rectangular
Material		Acrylic		

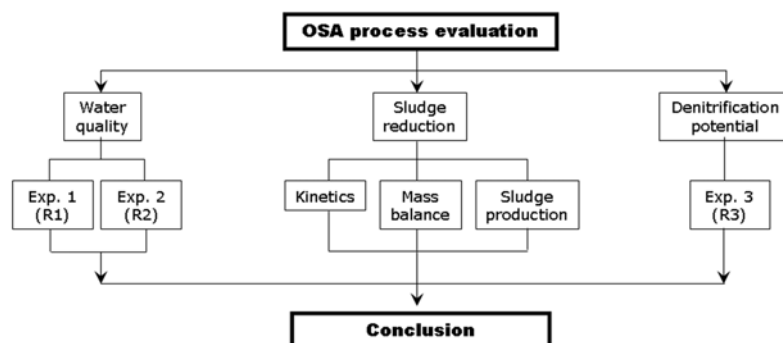


Fig. 2. Master plan for research.

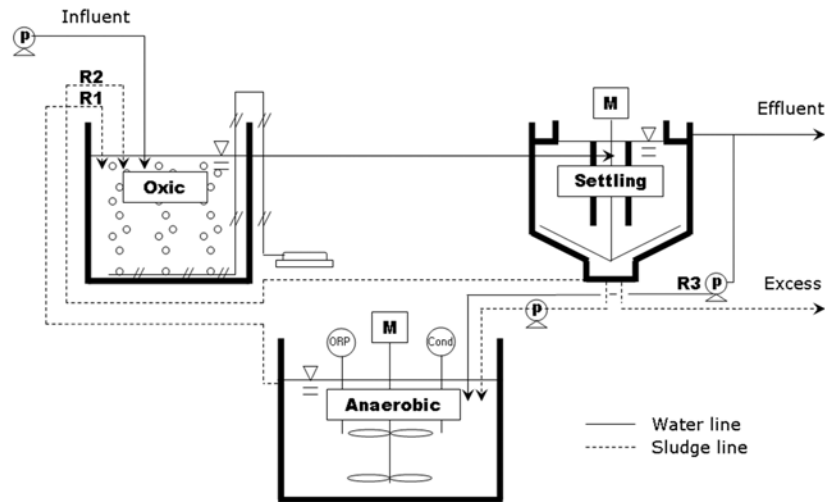


Fig. 3. Flow diagram of the OSA process.

Table 2. Operation conditions according to sludge return ratio for efficiency estimation of OSA process

OSA process Exp.	Return route	Return ratio
mode 1	R1*	0.5
		1.0
		1.5
Mode mode 2	R1	1.0
		0.5
		1.0
mode 3	R2	0.5
		1.0
		R3***

* Sludge return ratio from anaerobic reactor to oxic reactor

** Sludge return ratio from settling tank to oxic reactor

*** Effluent recycle ratio from discharge to oxic reactor

입수의 1.0Q일 경우, 적정 반송비로 결정되어 mode 2 운전에서는 R1을 1.0Q로 고정하고 반송라인 R2 반송비 0.5Q와 1.0Q에 대해 처리능을 비교하였다. Mode 2에서 처리능은 R2 0.5Q 일때 합리적 결과로 도출되었다. 이를 조건에서 mode 3은 처리수 내 포함된 NO₃-N을 대상으로 혐기조의 잠재적 탈질효율을 검토하기 위해 R1 1.0Q, R2 0.5Q를 반송비로 고정하고 처리수를 혐기조로 반송하는 R3가 1.0Q 주입되도록 설정하였다. Table 2에 반송비에 따른 실험조건을 정리하였다.

2.3. 동역학 계수실험(batch test)

Y_H는 반응기에 유입되는 하수를 GF/C여지로 여과한 여액 약 3 L를 준비하고 질산화를 방지하기 위해 allythiourea를 20 mg/L 주입한 후 약 5분간 혼합하였다. 슬러지는 세척 후 2시간 이상 포기상태로 두어 잔류된 유기물이 제거되도록 하였다. 준비된 여액과 슬러지는 반응조 운전상태의 F/M비가 호기조와 혐기조가 각각 0.3, 0.015가 되도록 혼합한 후 온도 20°C, pH중성범위 6.7~7.4 조건에서 20분 간격으로 3시간동안 분석하여 시간에 따른 total COD(TCOD)와 soluble COD(SCOD) 측정값으로부터 그 차이를 biomass COD

(BCOD) 농도로 계산해 식 (1)로부터 Y_H를 산출하였다.

b_H는 회분식 VSS측정이나 oxygen uptake rate(OUR)을 이용하여 산정하는데 본 연구에서는 OUR 측정을 이용하였다. 측정 장치로는 N-con사의 Comput-ox respirometer 4R이 이용되었다. Water-bath에 500 mL bottle에 준비된 시료를 침지하고 시간에 따라 소모된 용존산소의 양을 분석하도록 장치하였다. 슬러지와 혼합되는 하수는 GF/C여지로 여과하여 필요량을 준비하였다. 또한, 질산화를 방지하기 위해 allythiourea를 20 mg/L 주입한 후 약 5분간 혼합하였다. 각 반응조의 슬러지는 세척 후 2시간 이상 포기상태로 두어 잔류성 물질이 제거되도록 하였다. 준비된 여액과 슬러지는 반응조 운전상태의 F/M로 호기조 0.3, 혐기조 0.015가 되도록 혼합한 뒤 실험용 bottle에 주입하였다. 측정된 data를 시간에 따른 OUR값으로 plotting해 감소곡선을 보이는 구간을 시점으로 자연로그를 취하고 선형화된 graph로부터 b_H를 산출, f_p는 0.08로 가정해 b_H를 산정하였다.

2.4. 유입원수의 성상

실험조건 분석을 위해 인공하수를 조제하여 원수로 사용하였으며, 조성은 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Composition of synthetic wastewater

Chemicals	Concentration (mg/L)
C ₆ H ₁₂ O ₆	234.4 as COD _{cr}
NH ₄ Cl	95.5
KH ₂ PO ₄	22
NaHCO ₃	300 as CaCO ₃
MgSO ₄ · 7H ₂ O	34
MnSO ₄	1.7
FeSO ₄ · 7H ₂ O	2.2

3. 결과 및 고찰

3.1. 동역학 계수를 이용한 Y_H와 b_H 산정

Table 4. Experimental data for Y_H estimation of OSA oxalic sludge

Time (min)	1 st			2 nd		
	TCOD	SCOD	BCOD	TCOD	SCOD	BCOD
0	219.5	89.2	130.3	455.2	88.3	366.9
20	210.4	60.2	150.2	446.2	27.6	418.6
40	197.1	40.5	156.6	440.0	23.5	416.5
60	192.7	38.8	153.9	435.8	30.3	405.5
80	188.6	38.2	150.4	422.2	30.3	391.9
100	187.3	35.5	151.8	413.8	20.7	393.1
120	185.3	34.2	151.1	408.3	22.1	386.2
140	184.2	35.9	148.3	405.2	20.7	384.5
160	184.2	34.9	149.3	405.9	23.6	382.5
180	180.5	30.5	150.0	403.4	20.6	382.8

(Unit: mg/L)

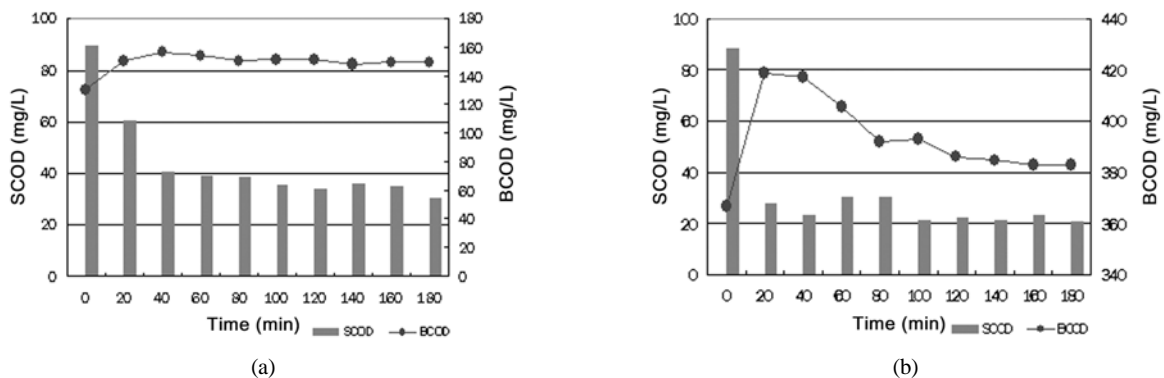


Fig. 4. Relation between BCOD and SCOD in oxalic reactor for estimating Y_H (a) 1st and (b) 2nd experiments.

Batch test로 OSA공정에서 혐기조의 반송만을 고려한 mode 1의 호기조 슬러지에 대해 종속영양미생물의 Y_H 및 b_H 를 각각 산정하기 위한 실험값을 Table 4에 나타내고 Fig. 4에 도식화하였다.

호기조의 Y_H 는 1차에서 0.34, 2차에서 0.23의 값을 보여 COD를 기준으로 한 활성슬러지 종속영양미생물의 일반적인 Y_H 값 0.4, 그리고 rbCOD를 기준으로 한 0.67에 비해 낮은 값으로 나타났다. 관계식은 식 (1)과 같다.

$$Y_H = \frac{\Delta \text{Biomass COD}}{\Delta \text{Soluble COD}} \quad (1)$$

여러 연구결과(Chen et al., 2001, 2003; Chudoba et al., 1992a, 1992b; Wei et al., 2003)에서 나타난 OSA 슬러지 수율 범위인 0.13~0.29 kgSS/kgCODremoved과 비교하여 유사한 측정범위를 보여줌으로써 OSA공정의 낮은 생산수율이 공정 내 슬러지 감량화에 직접적 원인이 되고 있음을 알 수 있다.

Y_H 는 일반적으로 소모된 SCOD가 증가함에 따라 BCOD가 증가하는 반비례 경향이 나타나지만 1차 실험인 Fig. 4 (a) 경우, 일정시간 이후 SCOD가 소모되는 동안에도 BCOD가 일정한 경향을 보여주고 있다. 이것은 혐기조의 내생 호흡단계 또는 기아상태 환경의 미생물이 상대적으로 기질이 풍부한 호기조로 유입되면서 증식보다는 기초대사 유지에 많은 SCOD를 소모하기 때문으로 판단된다.

또한, 1차 실험에 비해 약 2배의 TCOD기준으로 실시한 2차 실험에서도 Fig. 4(b)와 같이, 20분 이후 대부분의 SCOD가 소모되며 80분 이후에는 BCOD가 일정한 상태를 유지함으로써 혐기조의 내생 호흡단계 유도가 슬러지의 수율에 영향을 주고 있음을 확인할 수 있었다. Table 5는 본 연구에서 산정된 Y_H 값과 일반적인 하수슬러지의 수율을 보여준다.

Table 5. Comparison of OSA oxalic reactor Y_H value obtained from experiment 1 and 2 on conventional value of heterotrophs

Y_H oxalic (mgCOD/mgCOD)	Exp.1	Exp.2	Reference*	
	0.34	0.23	COD _{based}	0.40
		BOD _{based}	0.67	

* ASM No.1 by IWAPRC

b_H 의 산정을 위해 일정시간 간격으로 소모된 산소의 양을 측정하고 data의 OUR과 시간에 대한 graph는 Fig. 5와 같다. Fig. 6에서 graph의 감소경향을 보이는 구간을 대수적으로 선형화함으로써 b_H 를 산정하고 관계식에 따라 b_H 를 산출하였다.

b_H 산정 결과, b_H 는 0.065가 산출되었으며 f_P 의 값을 0.08로 가정하여 관계식에 대입하면 호기조의 b_H 는 Y_H 가 0.34인 경우, 0.095, Y_H 가 0.23인 경우, 0.082로 나타났다. 관계식은 식 (2)와 같다.

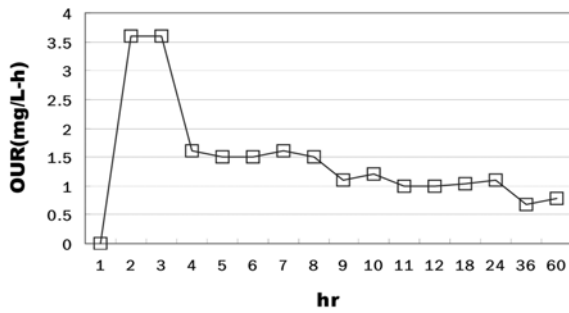


Fig. 5. OUR curve of OSA oxalic sludge for b_H .

$$b_H = \frac{b'_H}{1 - Y_H(1 - f_p)} \quad (2)$$

Table 6에서는 산출된 실험결과와 일반적인 하수슬러지의 b_H 를 비교하고자 하였다. 여러 연구자들이 보고한 측정값과 비교하여 일반적인 범위의 값에 해당하는 것으로 판단된다.

Table 6. Comparison of OSA oxalic reactor b_H obtained from experiments 1, 2 on conventional value of heterotrophs

b_H _{oxic} (Day ⁻¹)	Exp.1	Exp.2	Reference	
	0.095	0.082	Value	Range

Dold and Marais(1986)는 사멸계수 b 와 관련한 문헌고찰을 통해 일반적인 하수처리공정에서 종속영양미생물의 b 값은 0.01 hr⁻¹로 결론하였으나 Cobb and Murphy(1995)에 의하면 유사한 시스템에서 0.002 hr⁻¹의 낮은 값으로 보고하였고 사멸계수 b 는 다양한 범위의 값들이 존재함을 밝혔으며 독립영양미생물에 있어서도 b 값을 0.0002~0.007 hr⁻¹범위로 보고하였다. 일반적인 값으로는 Henze 등(1987)이 제시한 20°C에서 0.003 hr⁻¹가 고려되고 있다.

Y_H 와 b_H 의 실험적 결과를 보면 Y_H 의 경우, COD를 기준으로 한 값의 약 70%에 해당하는 수율로 나타났다. 하지만 실험에 이용된 하수가 인공하수인 점을 감안해 기질을 BOD로 가정하여 비교하면 약 42%에 해당하는 상대적 수율값이다. 따라서, 동역학 계수 산정으로 유기물의 대부분을 소모하며, 증식 및 물질대사를 수행하는 OSA공정의 호기조가 CAS에 비하여 상대적으로 낮은 슬러지 발생율을 보이게 될 것임을 알 수 있다. b_H 의 경우에 있어서는 유사한 값을 보이는 것으로 나타나 슬러지 감량의 주된 요인이 미생물의 사멸보다는 증식을 저하에 많은 관련성을 갖는 것으로 판단된다. Table 7은 동역학 계수산정실험을 통한 슬러지 감량화 가능성을 정리하여 나타낸 것이다.

3.2. 물질수지(mass balance)를 통한 호기조 Y_{obs} 평가

물질수지 평가로 반응조의 Y_{obs} 를 산출해 반응조 내 슬러지 감량능을 예측할 수 있었으며 batch test에서 측정된 Y_H 와 유사한 범위를 갖는 것으로 나타났다. 관련식은 식 (3)과 같다.

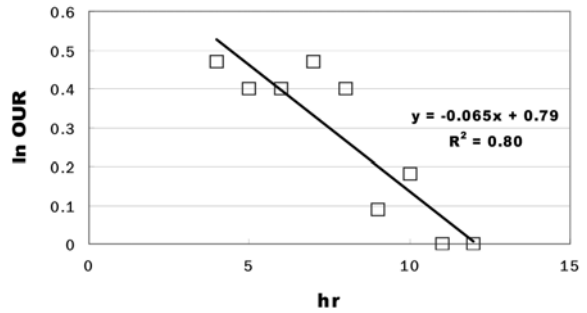


Fig. 6. ln OUR curve of OSA oxalic sludge for b_H .

Table 7. Possibility of sludge reduction according to kinetic parameters (Y_H and b_H) evaluation from OSA oxalic sludge

Items	Y_H _{oxic}	b_H _{oxic}	Remarks
Value	Average 0.28	0.088	BOD _{based}
	Reference 0.67	0.048~0.24	
Relative ratio (%)	41.7	-	

$$Y_{cls} = \frac{TSS_{out} - TSS_{in}}{SCOD_{in} - SCOD_{out}} = \frac{\Delta TCOD}{\Delta SCOD} \quad (3)$$

유입수는 하수처리장 1차 처리수에 해당하므로 관련식의 $X_{o,i}/S_0$ -S값은 문헌값 0.10~0.30 g/g을 이용하였다. 실험조건 mode1, mode 2 그리고 mode 3에 대하여 유입유량, SS 그리고 CODcr을 각각 측정하였다. Fig. 7~9는 호기조에서 유입과 유출되는 대상 물질의 측정값을 나타내었다. 호기조로 유입되는 인공하수 내 SS는 모두 용존성 물질로 0으로 가정하였다.

Mode1을 통해 산출된 인자값을 관련식에 대입하여 Y_{obs} 0.283으로 산출되었다. 이론적 Y_{max} 0.67의 약 42.3%에 해당하는 값이다.

Mode2를 통해 산출된 인자값을 관련식에 대입하여 Y_{obs} 0.275으로 산출되었다. Y_{max} 의 약 41.0%에 해당하는 값이다.

Mode3에서 Y_{obs} 0.306으로 산출되었다. Y_{max} 0.67 약 45.7%에 해당하는 값이다. 각 운전 mode로부터 산출된 Y_{obs} 값을 Table 8에 정리하였다.

Mode1, mode2 그리고 mode3에서 평균 Y_{obs} 값은 0.287로 나타났다. 이 결과는 batch실험을 통해 산출된 평균 Y_H 값 0.28의 근사치로써 본 연구의 조건에서 OSA공정의 생산수율 Y_H 가 약 0.29임을 알 수 있었다.

3.3. 혐기조 내 NH_4^+ -N의 변화

혐기조 유입슬러지 내에 포함된 NH_4^+ -N농도에 비해 체류 후 유출되는 슬러지의 NH_4^+ -N농도가 높게 나타났다. 이것은 cell lysis로 인해 미생물 체내 구성 물질이 수계에 유출된 것으로 보여진다. Fig. 10은 OSA 혐기조로 유입되는 슬러지의 NH_4^+ -N 농도를 50%로 기준하였을 경우 유출되는 슬러지의 NH_4^+ -N 농도가 모든 운전조건에서 50% 이상의 비율을 차지하고 있어 OSA 혐기조에서 미생물의 내생 호흡 유도는 물론 슬러지 해체로 직접적인 슬러지 감량이 진행

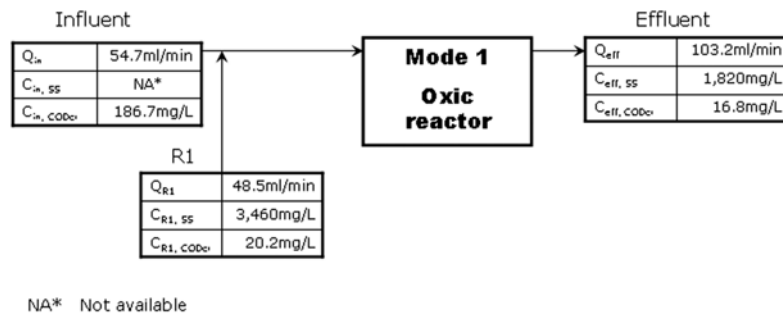


Fig. 7. MLSS mass balance in OSA oxic reactor under mode1 condition.

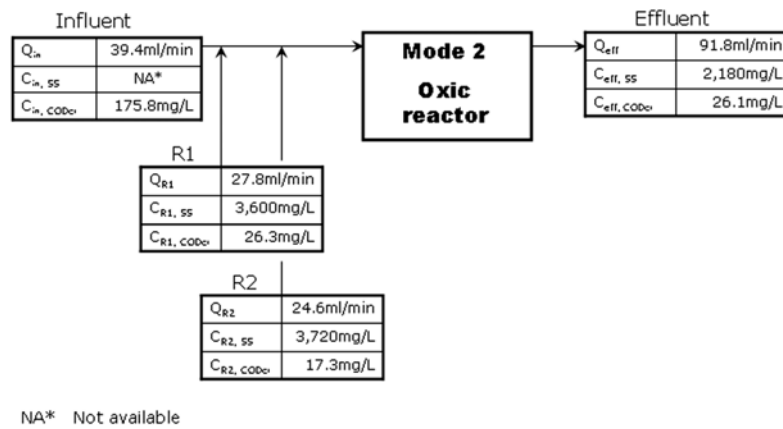


Fig. 8. MLSS mass balance in OSA oxic reactor under mode 2 condition.

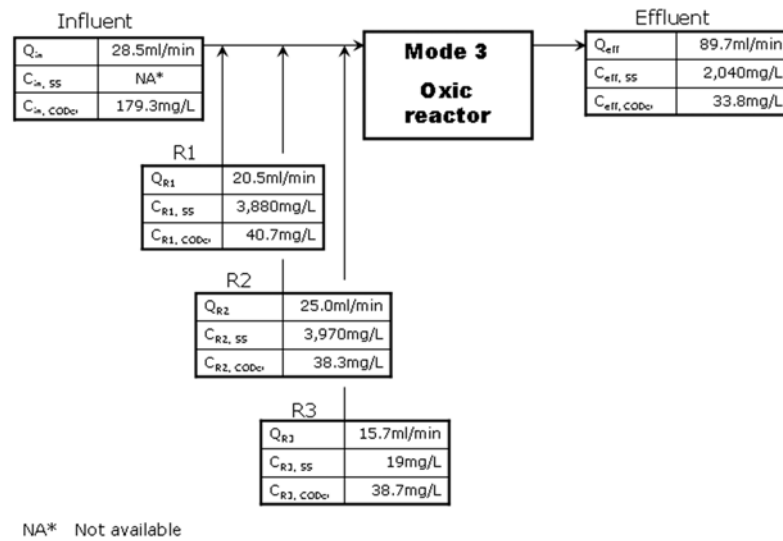


Fig. 9. MLSS mass balance in OSA oxic reactor under mode 3 condition.

Table 8. Y_{obs} value from each mode in oxic reactor

OSA process	Exp.	Return	Return ratio	Y_{obs}	Y_{obs} avg.
mode 1	R1	0.5	0.298	0.281	0.287
		1.0	0.271		
		1.5	-		
mode 2	R2	0.5	0.271	0.274	
		1.0	-		
mode 3	R3	0.5	-	0.306	
		1.0	0.306		

되고 있음을 보여준다. 반면, 슬러지 해체로 인한 NH_4^+-N 농도 증가는 공정 내 슬러지 감량이 질소부하 증가의 요인이 되고 있음을 알 수 있다. 이와 관련하여 Low and Chase(1999)는 연구에서 공정 내 슬러지 감량이 유출수의 질소농도 증가 원인이 될 수 있음을 지적한 바 있다. 본 연구에서도 TN과 TP의 제거율은 제한적이거나 변동율이 크게 나타남으로써 OSA공정이 영양염류 제거에 안정적이지 못한 것으로 나타났다. 따라서, OSA공정은 잉여슬러지 감량화가 특성으로 인정될 수 있으나 영양염류 부하의 증

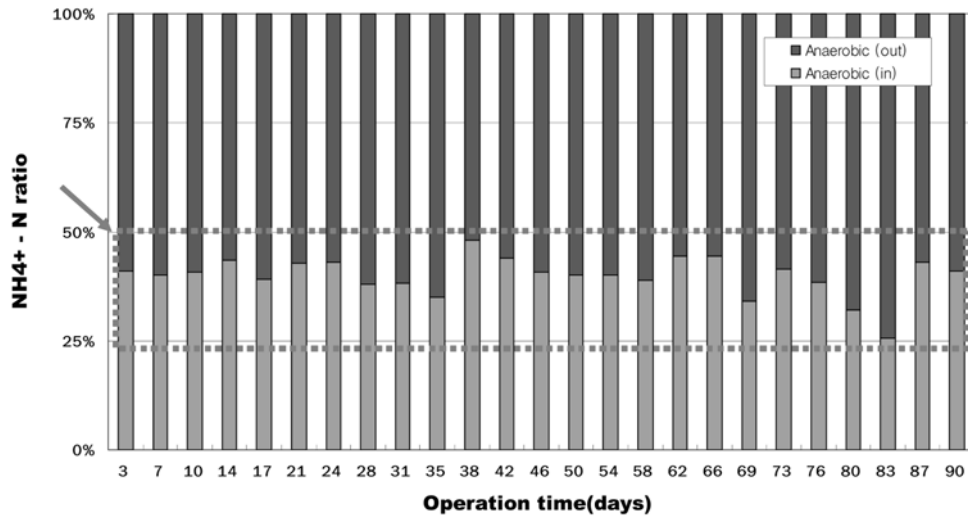


Fig. 10. Difference of NH₄⁺-N concentration between in and out sludge in OSA anaerobic reactor.

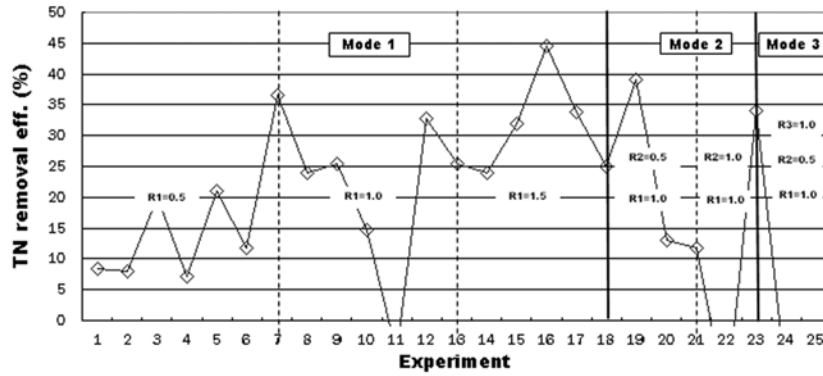


Fig. 11. TN removal efficiency in each mode.

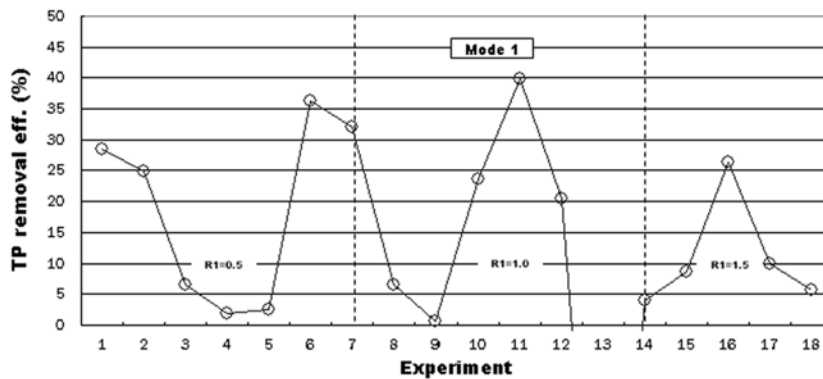


Fig. 12. TP removal efficiency in mode 1.

가가 예상되는 바, 고도처리공정 전환을 위한 대안이 요구된다고 할 수 있다.

3.4. 물질대사 저해평가(E_u)

기질에 의한 물질대사의 저해가 증식과 관련한 탄소원의 이용을 저해함으로써 슬러지의 생산량이 감소하게 됨을 Liu 등(1998)의 연구에서 E_u(energy uncoupling coefficient)의 개념을 통해 식 (4)로 가정하였다. 물질대사 저해가 있을 것으로 가정되는 호기조에 대하여 E_u를 산출하였다. 이

를 통해 물질대사에 사용되는 ATP순환에 저해가 있음을 보여주는 간접적 지표로 사용하였다.

$$E_u = \frac{(Y_{dls})_{max} - Y_{dls}}{(Y_{dls})_{max}} \tag{4}$$

각 실험에서 (Y_{obs})_{max}는 0.67이 이론값을 사용하였다. Table 9에는 실험조건별 E_u를 정리하여 나타내었다.

Mode2에서 E_u값은 ATP(Adenosine Triphosphate) 생성저

Table 9. E_U value from each operation condition in OSA oxic reactor

Oxic reactor	Y		E_U	
	Y_{obs}	$(Y_{obs})_{max}$		
mode 1	0.283		0.58	
Mode	mode 2	0.273	0.67	0.59
	mode 3	0.306		0.54

해가 상대적으로 높게 발생하고 있음을 의미한다. 호기조에서 발생하는 물질대사 저해는 내생단계의 미생물이 상대적으로 높은 기질농도를 보이는 호기조로 유입되면서 기질저해 또는 급격한 환경변화로 인한 것으로 판단된다. OSA공정에서 혐기조 미생물의 내생단계 유도가 슬러지 감량 원 인임을 알 수 있었다.

3.5. 슬러지 생산량($P_{X,VSS}$)

호기조에서 측정된 Y_H 와 b_H 산정값을 이용하여 OSA공정에서 발생하는 슬러지 생산량을 산출하였다. 사용된 관련 식은 식 (5)와 같으며 Table 10에는 각 실험조건에서의 슬러지 생산량을 정리하였다.

$$P_{X,VSS} = \frac{QY(S_o - S)}{1 + (k_d)SRT} + \frac{(f_d)(k_d)(Y)(Q)SRT}{1 + (k_d)SRT} + Q_{Xo,i} \quad (5)$$

Table 10. $P_{X,VSS}$ from each experimental condition in OSA oxic reactor

OSA process Exp.	Y_{obs}	SRT (day)	$P_{X,VSS}$ (g/D)
mode 1	0.283	102.2	1.68
Mode	mode 2	141.3	0.77
	mode 3	120.2	0.83

생산수율(Y)과 물질대사저해정도(E_U)를 감안하면 mode 1, mode 2의 조건에서 mode 3에 비해 낮은 생산량이 산출되어야 하지만 실험조건과 유입수의 기질로 선정된 CODcr 제거율과 SRT의 변화에 따라 $P_{X,VSS}$ 가 영향을 받는 것으로 판단된다. Fig. 13에는 CAS공정에서의 생산수율과 OSA공

정에서의 생산수율을 각각 적용하였을 경우, 발생이 예상되는 슬러지 생산량과 슬러지 저감정도를 나타냈다. CAS공정의 슬러지 생산을 예상하기 위해 적용된 생산수율 Y와 SRT는 각각 0.67과 15d이다.

90일 운전을 통해 슬러지발생량은 CAS와 OSA공정에서 각각 35.9 g, 98.4 g으로 나타났다. 기간 중 OSA공정에서 CAS 대비 63.5% 잉여슬러지 감량이 예상되었으며 일평균 0.69 g/day의 상대적 감량능이 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

- 1) Batch test을 통한 동역학 계수산정에서 잉여슬러지의 감량 요인이 미생물 사멸(b_H)보다는 증식율(Y_H) 저하에 밀접한 관련성을 갖는 것으로 나타났으며 연속식 운전에서 측정된 물질수지 분석에서도 mode 변화에 따라 유사한 범위의 Y_{obs} 값이 측정됨으로써 OSA가 안정적인 슬러지 감량능을 갖는 것으로 판단된다.
- 2) Y_H 측정에서 SCOD에 소모에 대한 낮은 BCOD 생성 그리고 기초대사 저해평가지인 E_U 산출결과로부터 OSA공정의 잉여슬러지 감량능을 확인할 수 있었다. 활성슬러지 공정에서 예상되는 $P_{X,VSS}$ 생산량과 비교하면 VSS 대비 약 63.5%의 잉여슬러지 감량능을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 혐기조의 유입, 유출 NH_4^+-N 농도 변화로부터 혐기조가 미생물의 내생호흡단계 유도는 물론 cell lysis의 역할도 병행하고 있음을 확인하여 OSA공정에서 혐기조가 잉여슬러지 감량에 효과적임을 알 수 있었으나 반응조 내 영양염류의 축적은 OSA공정과 같은 공정 내 잉여슬러지 감량공정이 해결해야 할 문제점으로 판단된다.

참고문헌

Chen, G. H., An, K. J., Saby, S., Brois, E., and Djafer, M. (2003). Possible Cause of Excess Sludge Reduction in an Oxidation-Settling-Anaerobic Activated Sludge Process (OSA process). *Water Res.*, 37(16), pp. 3855-3866.
 Chen, G. H., Saby, S., and Mo, M. H. M. (2001). New

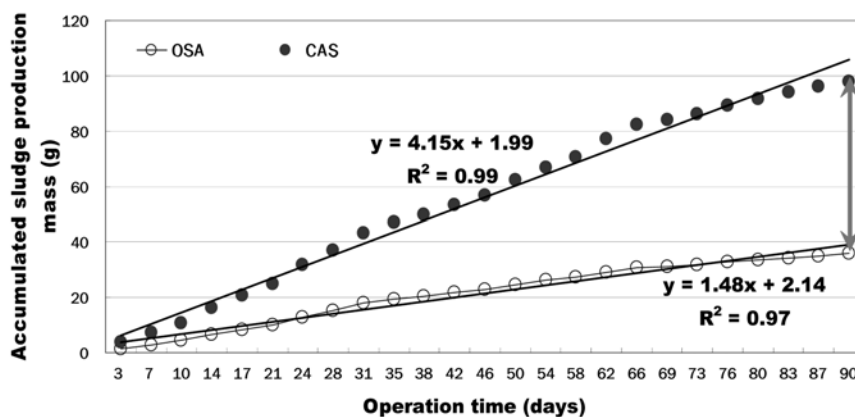


Fig. 13. Sludge reduction mass comparison on OSA process with CAS process.

- Approaches to Minimize Excess Sludge in Activated Sludge System. *Water Sci. Tech.*, **44**(10), pp. 203-208.
- Chudoba, P., Chpdeville, B., and Chudoba, J. (1992a). Explanation of Biological Meaning of the So/Xo Ratio in Batch Cultivation. *Water Sci. Tech.*, **26**(3-4), pp. 743-751.
- Chudoba, P., Chudoba, J., and Capdeville, B. (1992b). The Aspect of Energetic Uncoupling of Microbial Growth in the Activated Sludge Process: OSA system. *Water Sci. Tech.*, **26**(9-11), pp. 2477-2480.
- Cobb, J. B. and Murphy, K. L. (1995). Estimation of the active nitrifying biomass in activated sludge. *Water Research*, **29**, pp. 1855-1862.
- Dold, P. L. and Marais, G. v. R. (1986). Evaluation of the General Activated Sludge Model Proposed by the IAWPRC Task Group. *Water Sci. Tech.*, **18**(6), pp. 63-89.
- Henze, M., Grady, C. P. L. Jr., Ghjer, W., Marais, G. v. R., and Matsuo, T. (1987). Activated Sludge Model No. 1, *IWAPRC Scientific and technical Reports*.
- Liu, Y., Chen, G. H., and Paul, E. (1998). Effect of the So/Xo Ratio on Energy Uncoupling in Substrate-Sufficient Batch Culture of Activated Sludge. *Water Res.*, **32**(10), pp. 2833-2888.
- Liu, Y. and Tay, J. H. (2001). Strategy for Minimization of Excess Sludge Production from the Activated Sludge Process. *Biotechnolog*, **19**(2), pp. 97-107.
- Low, E. W. and Chase, H. A. (1999). Reducing Production of Excess Biomass during Wastewater Treatment. *Water Res.*, **33**(5), pp. 1119-1132.
- Strouthamer, A. H. (1979). Correlations of growth yield, In: J. R. Quayle (ed.), *Microbial biochemistry, International Review of Biochemistry*, Baltimore: University Park, **21**, pp. 1-47.
- Wei, Y., von Houten, R. T., Borger, A. R., and Eikelboom, D. H. (2003). Minimization of Excess Sludge Production for Biological Wastewater Treatment. *Water Res.*, **37**, pp. 4453-4467.
- Yang, X. F., Xie, M. L., and Liu, Y. (2003). Metabolic Uncouplers Reduce Excess Sludge Production in an Activated Sludge Process. *Process Biochemistry*, **38**, pp. 1373-1377.