

Performance Evaluation of Hybrid SBR Aerobic Digestion combined with Ultrasonication by using a Mathematical Model

초음파 결합형 SBR 호기성 소화 모델과 영향 예측

Sung Hong Kim¹ · Dong Woo Lee² · Dong Han Kim^{3†}

김성홍¹ · 이동우² · 김동한^{3†}

1 조선대학교 토목공학과 · 2 뉴엔텍(주) 기술연구소 · 3 서원대학교 환경건설정보학과

Abstract : Based on the activated sludge model, a simple aerobic digestion model which represents the aerobic sludge digestion by sequencing batch reactor(SBR) equipped with ultrasonicator was composed and performed in this study. The results are as follows. Aerobic digestion efficiency can be increased by adopting ultrasonic pretreatment. For the 5 days of SRT, 24 % of particulate component is predicted to be removed by ultrasonic pretreatment and aerobic digestion. This is 7 %p higher than that of conventional aerobic digestion. A Hybrid SBR aerobic digestion combined with ultrasonication shows higher digestion efficiency than aerobic digestion and ultrasonic pretreatment system. In case of this hybrid system, the digestion efficiency was predicted up to 49 % when the ultrasonication was performed every 2 hours, repeatedly. However, excessive treatment like every hours of ultrasonication in an aerobic digestion process results in adverse effect on TCOD removal because biomass disintegrated completely and the solubilized COD can not be used for the biomass synthesis again.

Key words : aerobic digestion, SBR, ultrasonication, activated sludge model

주제어 : 호기성 소화, 연속회분식반응조, 초음파, 활성슬러지 모델

1. 서론

2009년 말 기준으로 우리나라 전체의 하수처리장에서 발생하고 있는 슬러지는 연간 266만 톤 정도이며, 육상매립 1.6 %, 소각 11.6 %, 재활용 12.6 %, 기타 1.6 %를 제외한 나머지 72.6 %는 전량 해양투기하고 있다. 그렇지만, 1996년의 런던협약 이행으로 2012년부터는 해양투기도 전면 중단할 예정이므로 슬러지의 감량화 및 재활용을

증대는 당장 시급한 문제가 아닐 수 없다(Ministry of Environment, 2010). 슬러지의 처리 방법은 주로 일차슬러지나 잉여슬러지 혹은 이들의 혼합슬러지를 대상으로 초음파나 오존처리, 산·알칼리 처리, 열처리, 효소처리, 기계적 분쇄, 염소처리, 냉동처리 등의 전처리를 한 후 혐기성으로 소화하여 슬러지를 감량하고 동시에 유효 자원인 메탄가스를 회수하는 기술들이 많이 연구되고 또한 실용화되고 있다(Kim et al., 2011). 이러한 상황에서 고효율의 슬러지 감량화 기술을 개발하고자 하였고, SBR 반응조를 이용한 슬러지 호기성 소화에 초음파 처리를 결합한 형태의 소화 공

* Received 6 November 2012, revised 5 December 2012, accepted 12 December 2012.

* Corresponding author: Tel.: +82-43-299-8721, Fax: +82-43-299-8720, E-mail: kdh@seowon.ac.kr

정을 구상하였다. 본 연구는 이 방법에 대한 타당성을 알아보기 위해서 먼저 호기성 소화와 초음파 분해에 대한 수학적 모델을 수립하고, 모델의 시뮬레이션을 통해 초음파 처리가 호기성 소화 효율에 미치는 영향을 예측하며, 구체적인 운전 전략을 수립하는 도구로 사용하고자 하였다.

2. 이론적 고찰

초음파는 20 kHz 이상의 주파수를 가진 파장(소리)을 말한다. 수정과 같은 물질에 전기를 가하면 진동이 생기는데 이러한 성질을 압전성(piezoelectricity)이라 한다. 압전성 물질에 초당 20,000번의 전기적 스파크를 가하면 이 물질은 초당 20,000번 진동하여 20 kHz 주파수의 진동이 발생하는 것이다. 주파수가 크면 파장은 짧아져서 먼 데까지 진행할 수 있는데 이를 이용하면 의료용 초음파 검사기나 어군탐사 등에 이용되는 초음파 탐지기가 되고, 반대로 주파수를 줄이면 파장은 커져서 비록 먼데까지 도달하지는 않지만 큰 파동에너지가 생긴다. 이 에너지를 이용하면 세포의 분해나 분쇄, 지방의 용해가 가능하게 된다(Bougrier et al., 2005).

하수처리장에서 발생하는 슬러지에는 유기물과 무기물이 혼재되어 있으며, 하수처리 과정에서 미생물을 이용하므로 미생물이 고농도로 혼합되어 있다. 유기물은 생물학적으로 쉽게 분해하기 쉬운 유기물도 있지만, 미생물 슬러지는 자체적으로 세포막에 둘러싸여 있으므로 생물학적으로 쉽게 분해되지 않는다. 하수 슬러지에 초음파를 조사하면 생물학적 분해 속도가 느린 입자상 유기물이 용해됨으로써 호기성 소화가 훨씬 용이하게 되고, 미생물 슬러지는 세포벽이 파괴되어 세포물질이 세포 밖으로 용출되어 이 또한 분해가 쉬워진다.

슬러지의 소화는 크게 혐기성 소화와 호기성 소화로 대별되며, 혐기성 소화는 가온에 따른 에너지 소비 등의 단점이 있는 반면, 유효자원인

메탄 가스를 회수하여 에너지원으로 사용할 수 있는 잇점이 있다. 호기성 소화는 슬러지를 장기 포기함으로써 미생물을 내생성장단계로 유도하여 슬러지를 구성하는 유기물을 산화시키고 고형물을 분해하는 과정이다(MetCalf & Eddy, 2004). 호기성 소화를 이용하면 세포 조직의 75 - 80 % 정도가 산화될 수 있는데, 나머지 20 - 25 %는 불활성 성분과 생물학적으로 분해 불가능한 유기물이 남게 된다(Kim et al., 2002). 혐기성 소화와 비교하여 메탄 가스와 같은 유효자원의 회수는 없지만 상대적으로 소화기간이 짧기 때문에 비교적 중소규모 하수처리장에서 발생하는 하수의 처리에 적합한 것으로 알려져 있다. 호기성 소화의 영향 인자로는 소화온도, 고형물 감소율, 소화조 용량, 유입 슬러지의 농도, 산소 요구량, 교반 등으로 알려져 있으며, 고형물 감소율은 고형물 체류시간과 소화온도의 곱인 $\text{Temperature, } ^\circ\text{C} \times \text{sludge age, days}$ 의 함수로 계산한다(MetCalf & Eddy, 2004).

호기성 상태에서 용존 유기물이나 생물학적으로 분해 가능한 입자상 유기물이 존재하는 경우에는 미생물이 증식하고, 유기물이 고갈되면 미생물은 세포 내 저장된 에너지를 사용하여 생명을 유지한다. 이러한 상태가 지속되면 세포의 분해(lysis)가 일어나고, 세포의 분해에 따라 용출된 유기물은 다른 미생물의 에너지로 사용된다. 호기성 소화 과정은 유기물의 산화 및 세포 합성 그리고 내생호흡에 의한 세포의 분해 반응이 모두 일어나기 때문에 활성슬러지법 모델의 유기물 분해 및 미생물 증식 모형을 적용할 수 있다. 하수처리장의 생물학적 처리를 묘사하는 수학적 모델은 1987년 IAWPRC의 한 Task Group이 개발하여 발표한 활성슬러지 모델 1(ASM1, Activated sludge model No. 1)(Gujer and Henze, 1991)을 기초로 형성되고 있다. ASM1에 생물학적 인 제거 기작을 포함한 모델이 ASM2(Activated sludge model No. 2)의 이름으로 발표되었고(Henze et al.,

1995), ASM3는 ASM2의 생물학적 인 제거 기작은 제외하였지만 세포 내 저장되는 유기물질과, 총부유고형물(TSS)을 항목에 추가하여 세포 합성 및 가수분해 반응을 보다 쉽게 묘사하였고, 실제 처리장의 측정 항목을 모델링에 대입하기 쉽도록 재구성하였다(Gujer et al., 1999; Henze et al., 2007).

본 연구에서는 호기성 소화의 유기물 분해와 세포 합성 및 분해를 해석하기 위해 ASM2 모델을 기본으로 하여 유기물의 분해 및 biomass 증식을 표현하는 비교적 간단한 수학적 모델을 구성하였다. 즉, ASM2 모델에는 질산화 반응, 생물학적인 제거 반응 및 탈질 반응, 무산소성 분해 등이 모두 포함되어 있으나 본 연구에서는 호기성 소화의 1차적인 목적이 고형물 감량에 있으므로 이와 관련된 항목만을 선정하였다. 사용된 수질 요소는 용존산소(DO), 생물학적으로 쉽게 분해 가능한 용해성 유기물(이하 SS), 생물학적으로 분해 불가능한 용해성 유기물(이하 SI), 생물학적으로 천천히 분해되는 입자상 유기물(이하 XS), 종속영양미생물(이하 XH) 그리고 생물학적으로 분해 불가능한 입자상 유기물(이하 XI)의 6가지이다.

수질 요소;

- S1 : DO, Dissolved Oxygen
- S2 : SS, Readily biodegradable soluble COD
- S3 : SI, Non-biodegradable soluble COD
- S4 : XS, Slowly biodegradable particulate COD
- S5 : XH, Heterotrophic microorganisms
- S6 : XI, Non-biodegradable particulate COD

호기성소화와 관련된 동력학식은 Fig. 1과 같이 호기성 가수분해(Aerobic hydrolysis), SS에 의한 호기성 미생물(Heterotrophs)의 증식, 호기성 미생물의 분해(Lysis) 그리고 포기 반응으로서 다음 식 (1) - (4)와 같다.

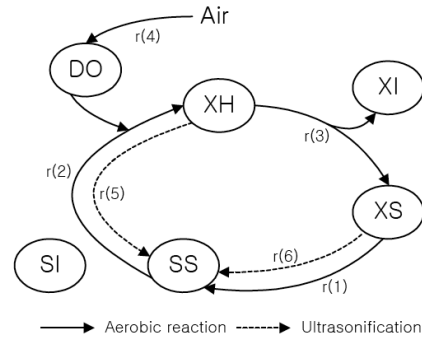


Fig. 1. Flow of COD in this model

동력학식;

aerobic hydrolysis of XS

$$r(1) = K_H \left(\frac{S1}{K_O + S1} \right) \left(\frac{S4/S5}{K_X + S4/S5} \right) \cdot S5 \quad (1)$$

biomass(XH) growth on SS

$$r(2) = \mu_{H1} \left(\frac{S1}{K_O + S1} \right) \left(\frac{S2}{K_S + S2} \right) \cdot S5 \quad (2)$$

biomass(XH) lysis

$$r(3) = b_H \cdot S5 \quad (3)$$

aeration

$$r(4) = K_{La} \cdot (S1_{sat} - S1) \quad (4)$$

초음파 조사로 XS와 XH는 분해될 수 있는데 분해율은 초음파 강도와 초음파 조사 시간의 곱에 비례한다. 그러므로 분해 반응은 이 두 변수에 대한 1차 반응으로 간주할 수 있으며 미생물의 분해 반응식과 입자상 유기물의 분해 반응식(분해 상수를 각각 k_{u1} 과 k_{u2} 라 가정함)은 다음과 같다.

초음파 분해;

biomass(XH) disintegration by ultrasonication

$$r(5) = k_{u1} \cdot S_5 \quad (5)$$

XS disintegration by ultrasonication

$$r(6) = k_{u2} \cdot S_4 \quad (6)$$

반응속도식은 앞의 동력학식 및 이와 관련된 화학양론계수의 곱으로 표현되며, 각 수질 요소와 연관된 동력학식을 조합하여 결정된다. 수질 요소별 반응속도식은 다음과 같다.

반응속도식;

$$1) \text{ DO}; \frac{dS1}{dt} = (Si(1) - S1) \frac{Q_{in}}{V} - \frac{(1 - Y_H)}{Y_H} \cdot r(2) - (1 - FI) \cdot r(3) + r(4) \quad (7)$$

$$2) \text{ SS}; \frac{dS2}{dt} = (Si(2) - S2) \frac{Q_{in}}{V} + r(1) - 1/Y_H \cdot r(2) + r(5) + r(6) \quad (8)$$

$$3) \text{ SI}; \frac{dS3}{dt} = (Si(3) - S3) \frac{Q_{in}}{V} \quad (9)$$

$$4) \text{ XS}; \frac{dS4}{dt} = (Si(4) - S4) \frac{Q_{in}}{V} - r(1) + (1 - FI) \cdot r(3) - r(6) \quad (10)$$

$$5) \text{ XH}; \frac{dS5}{dt} = (Si(5) - S5) \frac{Q_{in}}{V} + r(2) - r(3) - r(5) \quad (11)$$

$$6) \text{ XI}; \frac{dS6}{dt} = (Si(6) - S6) \cdot \frac{Q_{in}}{V} + FI \cdot r(3) \quad (12)$$

여기에서, Si(i)는 각 수질 요소의 유입 농도 (mg/L), Q_{in} 는 유입 유량(m^3/day), V는 반응조 부피(m^3)이다. 본 연구에서는 Henze 등(2007)에서 제안한 값을 기초로 하여 반응속도식의 화학양론계수는 Table 1과 같이 적용하였으며, 동력학식의 매개변수는 Table 2와 같이 적용하였다(Kim and Chung, 1999).

Table 2의 k_{u1} 과 k_{u2} 는 초음파 출력이나 조사 강도에 따라 달라지며, 본 연구에서는 타 연구자들의 실험 결과(Kim et al., 2011; Bougrier et al., 2005)를 1차 반응으로 해석하여 분해상수를 산정하였다.

Table 1. Stoichiometric coefficients

Coefficient	Value	Unit	Definition
Y_H	0.67	gCOD/gCOD	Yield coefficient
FI	0.07	gCOD/gCOD	Fraction of inert COD generated in biomass lysis

Table 2. Kinetic parameters

Coefficient	Value	Unit	Definition
K_O	0.5	mgO_2/L	Half-velocity constant for DO
K_S	5	$mgCOD/L$	Half-velocity constant for growth on SS
K_X	0.1	$gCOD/gCOD$	Half-velocity constant for XS
K_H	0.8	1/d	Hydrolysis rate constant
u_H	4	1/d	Maximum growth rate on SS
b_H	0.3	1/d	Rate constant for lysis
K_{La}	500	1/d	Overall oxygen transfer rate
sat. DO	9.1	mgO_2/L	Saturation DO
k_{u1}	16'	1/d	Rate constant for biomass disintegration on ultrasonication
k_{u2}	16'	1/d	Rate constant for particulate COD disintegration on ultrasonication

3. 모델의 적용

3-1. 반응조 운전과 수치해법

연속회분식반응조(SBR)는 단일 반응조를 사용하고, 정해진 주기 시간 내에 다양한 운전 조건으로 쉽게 변형할 수 있어 유기물 제거 뿐만 아니라 경우에 따라서는 질소나 인 제거와 같은 고도처리공정으로 쉽게 전환이 가능한 잇점이 있다. SBR 반응조를 이용하여 슬러지를 호기성으로 소화하는 경우도 마찬가지로, 연속 포기로 운전할 수도 있고, 간헐 포기 방식으로 운전할 수도 있다. 반면에 간헐 포기 방식으로 운전할 경우 소화 시간은 더 길어지지만 포기에 따른 동력비를 절감하고, 내생탈질에 의한 질소의 제거도 가능하며, 탈질 반응에서 회복되는 알칼리도에 의해 소화조가 산성화되고 알칼리

도 부족으로 질산화가 저해받아 암모니아성 질소가 축적되는 것을 방지하는 잇점도 있다(Hao and Kim, 1990). 연속회분식 반응조에서 물질수지식은 유입, 유출, 반응항이 포함되며 다음 식 (13)과 같다.

$$\frac{dC_i}{dt} = (C_{in,i} - C_i) \cdot \frac{Q_{in}}{V} + r_i \quad (13)$$

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (14)$$

여기에서, C_i = 수질 요소 i 의 농도 (mg/L), $C_{in,i}$ = 유입수의 수질 요소 i 의 농도 (mg/L), Q_{in} = 유입 유량 (m^3/day), Q_{out} = 유출 유량 (m^3/day), V = 반응조 부피 (m^3), r_i = 수질 요소 i 의 반응속도식이다.

모형에는 6 개의 수질 요소의 변화 과정을 표현하는 6 개의 1계 상미분방정식이 포함되어 있다. 이들 상미분방정식은 비선형이고 서로 연관되어 있으므로 수학적 해석해를 구하기는 어려우며 미분방정식의 수치해법을 이용하면 쉽게 해를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 Microsoft Excel VBA에서 프로그램을 작성하고 시뮬레이션을 실시하였다. 이 방정식의 풀이에 정확성과 안정성이 인정된 4차 Runge-Kutta법을 사용하였다.

3-2. 모의(운전) 조건

운전 방식은 24시간을 1주기로 하는 SBR 방식이다. 유출모드가 끝난 후 반응조의 부피는 $2.0 m^3$ 이며, 유입은 $0.5 m^3/hr$ 의 유량으로 처음 1시간 동안 진행된다. 유출은 1주기가 끝나기 1시간 전부터 1시간 동안 유입 모드와 같은 0.5

m^3/hr 유량으로 이루어진다. 따라서 반응조의 부피는 유입 모드 직전 $2.0 m^3$ 에서 $2.5 m^3$ 까지 증가하였다가 유출 모드 후에는 다시 $2.0 m^3$ 이 된다. 포기는 24시간 동안 연속해서 실시하며, 별도로 침전모드를 두지 않기 때문에 완전혼합 상태에서 유출이 이루어진다.

처리 대상 슬러지는 하수처리장에서 발생하는 일차 슬러지와 잉여 슬러지의 혼합 슬러지로서 $SS = 2,000 mg/L$, $SI = 2,000 mg/L$, $XS = 11,000 mg/L$, $XH = 0 mg/L$, $XI = 5,000 mg/L$ 로 가정하였다. 또한, 초음파 전처리하는 경우 XH 와 XS 는 각각 20% 씩 용해되는 것으로 가정하였다. 반응조의 운전은 Fig. 3과 같이 (a) 보통의 SBR 호기성 소화조, (b) 초음파 전처리가 구비된 SBR 호기성 소화조 그리고, (c) 반응조 안에 초음파 발생 장치가 구비된 SBR 호기성 소화조의 3 가지를 가정하였다.

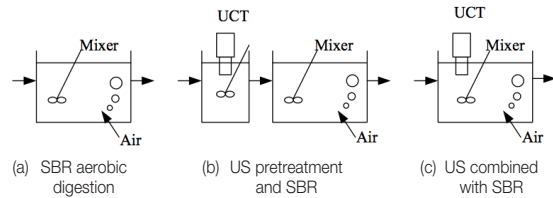


Fig. 3. Combination type of ultrasonication(US) and SBR aerobic digestion

Table 3. Components of inflow sludge

Components	Raw sludge (mg/L)	US pretreatment sludge (mg/L)
DO	0	0
SS	2,000	4,200
SI	2,000	2,000
XS	11,000	8,800
XH	0	0
XI	5000	5,000

Time (hr)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Inflow pump	■											
Aeration	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Discharge pump												■

Fig. 2. SBR operation mode

4. 모의 결과 및 고찰

4-1. 비정상상태 모의

SBR 운전은 간헐유입, 간헐배출 방식이므로 물질의 양이나 농도가 시간에 따라 주기적으로 변하게 되어 일반적인 의미의 정상상태(steady state)는 존재하지 않는다. 그렇지만, 긴 시간의 운전에서 운전 환경이나 유입수질 등의 조건이 일정하게 유지된다면 반응조는 주기적 정상상태(periodic steady state)의 거동을 보이게 된다. 비정상상태 모의에서 주기적 정상상태로 안정화되어가는 과정을 알아보기 위해 모든 수질 요소의 초기값을 1 mg/L로 간주한 상태에서 격자 간격을 0.005 일 (7.2 분)으로 하여 비정상상태 모의를 실시하였다. 60 주기 (60 일) 동안 시간 경과에 따라 수질 요소 값이 변화하는 과정을 모의하였는데 격자 간격 7.2분과 60일의 모의 기간은 안정적으로 해를 찾는데 충분하였고, 주기적 정상상태에 도달할 수 있었다. 한 예로서 종속영양미생물(XH)의 시간적

변화를 Fig. 4에 표시하였다. 초기 조건으로 XH의 농도를 1 mg/L로 간주하였는데 유입 슬러지의 유기물을 이용하여 점차 증식하면서 증가하고, 약 20 주기(20일) 후에는 안정적인 주기 반복이 이루어지고 있음을 볼 수 있다. 주기적 정상상태에 도달한 후, XH는 유입 모드 직후 3,420 mg/L로 가장 낮고, 증식에 의해 XH가 점차 증가하여 유출 모드에서 4,020 mg/L로 가장 높게 나타난다. 이

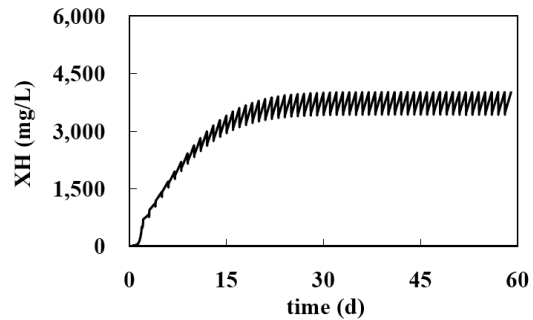
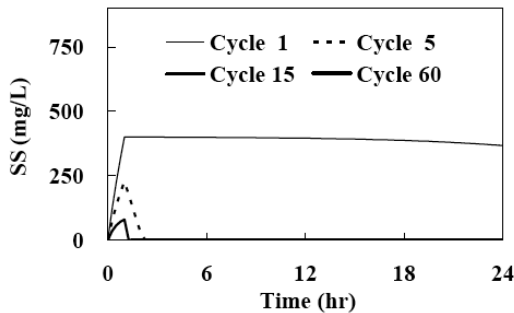
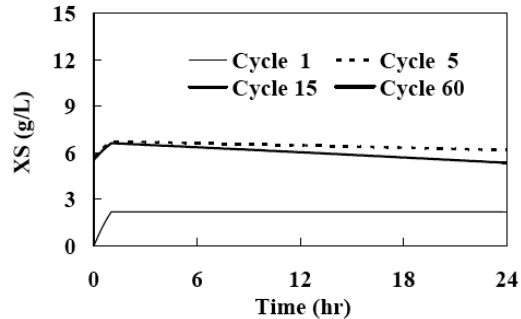


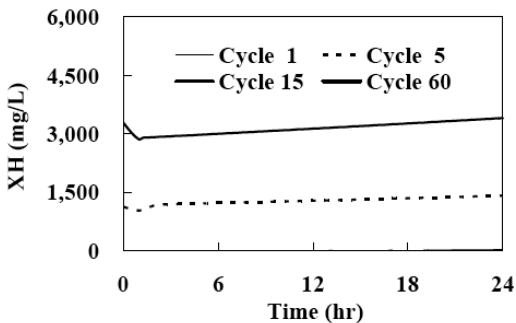
Fig. 4. Non-steady state simulation and the convergence of the equations



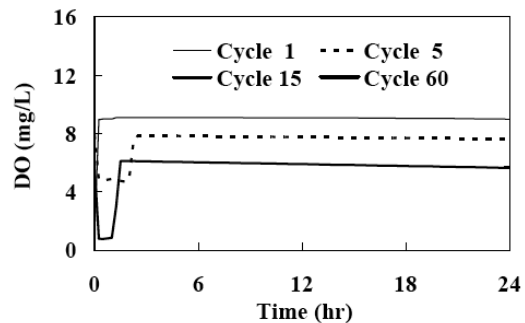
(a) Readily biodegradable soluble COD (SS)



(b) Slowly biodegradable particulate COD (XS)



(c) Heterotrophic microorganism (XH)



(d) Dissolved oxygen (DO)

Fig. 5. Simulation results of components during a cycle

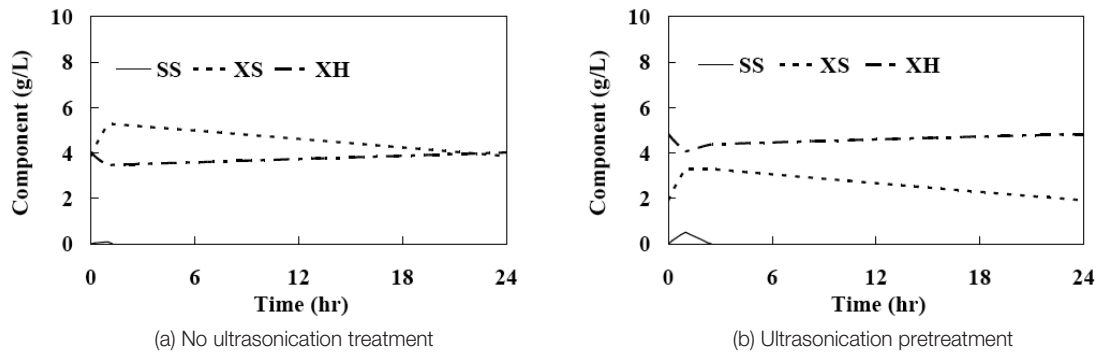


Fig. 6. Ultrasonication pretreatment effect on SBR aerobic digestion

리한 패턴은 매 주기마다 반복하여 나타난다.

Fig. 5에 모의 주기가 증가하면서 각 수질 요소들이 한 주기 동안에 변화하는 농도를 몇 개의 주기에 대해 표시하였다. 각 수질 요소들이 서로 연관되어 있고, 또한 초기조건에 따라 정상상태에 도달하는데 걸리는 시간은 서로 다를 수 밖에 없는데, SS는 약 10 cycle 만에 주기적 정상상태에 도달하고, XS는 약 15 cycle 후에 정상상태에 도달하는 것으로 나타났다. 유입 모드 동안 유입된 SS는 반응조에서 완전 혼합되고 희석되어 농도가 감소하며 XH에 동화되어 0.7 mg/L 이하로 낮게 유출된다. XH, XS와 DO는 SS 보다 늦게 정상상태에 도달하지만 약 30 cycle 정도 후에는 주기적 정상상태에 도달하였으며, 해는 발산하지않고 잘 수렴하였다.

4-2. 유입슬러지를 초음파로 전처리한 후 SBR 반응조에 주입하는 경우

초음파 처리 유무에 따른 반응조의 한 주기 동안의 거동을 모의하여 Fig. 6에 표시하였다. 초음파 처리를 하지않고 SBR 호기성소화를 하는 경우(Fig. 6의 (a)), SS는 대부분 제거되고 XS 3,860 mg/L, XH 4,020 mg/L 정도로 유출되며, XI는 약 5,390 mg/L로 증가하여 입자상 물질(XS + XH + XI)의 총 제거율은 17 % 정도로 예상되었다. 반면에, 초음파로 전처리를

한 다음 SBR 호기성소화를 하는 경우(Fig. 5의 (b)), XS, XH, XI가 각각 1,920 mg/L, 4,840 mg/L, 5,480 mg/L로 변화하여 입자상 물질의 총 제거율은 24 %로 증가할 것으로 예측되었다. 이것은 초음파에 의해 입자상 물질이 분해되어 미생물이 이용하기 쉬운 유기물(SS)로 전환되고 미생물의 대사가 더 쉽고 빨라졌기 때문이다.

4-3. SBR 반응조 내에 초음파 장치를 설치하여 간헐적으로 초음파 처리 하는 경우

초음파 처리를 하지않는 경우의 유입 슬러지의 입자상 물질(XH + XS + XI) 농도는 16,000 mg/L이며, 초음파 처리 및 SBR 호기성 소화를 통해 분해되어 감소하게 된다. 한 주기 동안(24 시간)에 4회 초음파 조사를 하는 경우는 XS 930 mg/L, XH 3,080 mg/L, XI 6,020 mg/L로 변화하며, 입자상 물질의 제거율은 37 %로 예측되었다(Fig. 7의 (a)). 이것은 용존 유기물 및 입자상 유기물의 가수분해에 따라 증가하는 중속영양미생물이 초음파에 의해 다시 분해되고, 분해 과정에서 생성되는 용존 유기물이 미생물 합성에 재이용되는 과정이 반복되면서 분해율이 증가하였기 때문이다. 6회 초음파 조사를 하는 경우에는 이러한 분해 주기가 더 빨라져서, 총 입자상 물질 제거율은 42 %로 증가하였고, 12회 초음파 조사를 하는 경우에 총 입자상 물질 제거

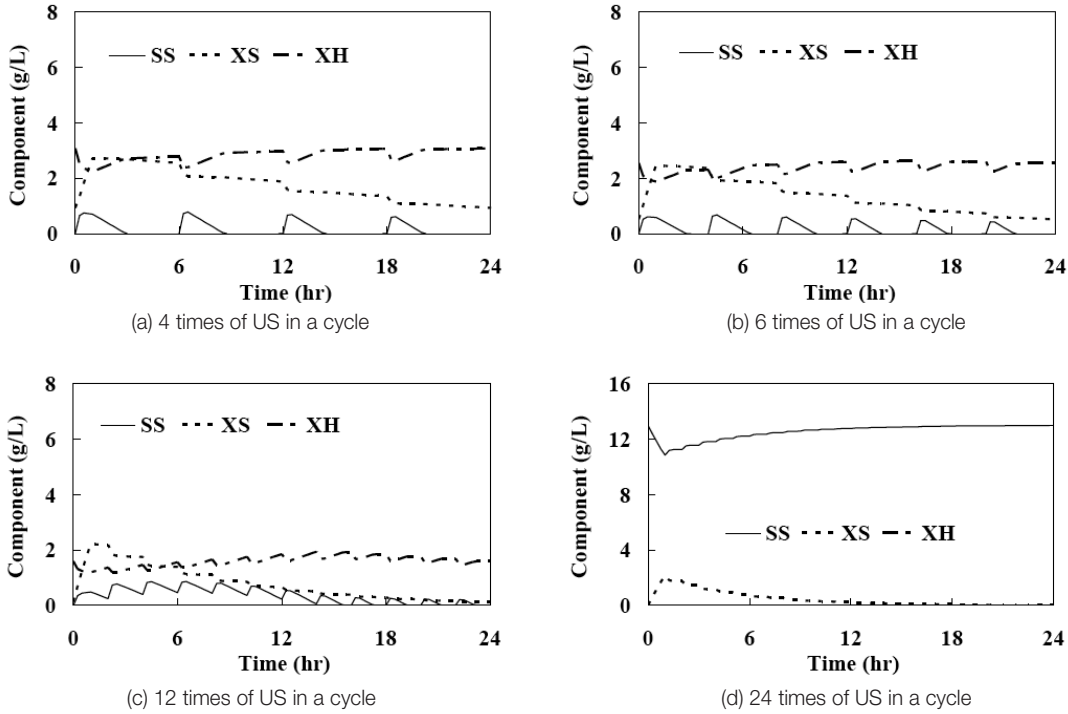


Fig. 7. Effect of ultrasonication frequencies on SBR aerobic digestion combined with ultrasonication system

율은 49 %로 증가하였다. 하지만, 초음파 조사 횟수를 24회로 증가시킨 경우에는 유입하는 XS가 초음파에 의해 SS로 분해되어 SS가 13,000 mg/L까지 증가하기는 하지만 중속영양미생물(XH)까지 모두 분해되어 없어지기 때문에 미생물 부족으로 SS는 더 이상 세포 합성에 이용되지 못하고 그대로 방출되는 것으로 나타났다(Fig. 7의 (d)). 슬러지 소화의 목적이 입자상 물질의 제거 뿐만 아니라 유기물을 분해하여 안정화시키는 것이므로, 초음파를 이용하여 호기성 소화의 효율을 높이고자 하는 경우에 지나치게 많은 초음파 조사는 오히려 소화 효율이 나빠지는 결과를 초래할 수 있다. Fig. 8에 모델의 모의를 통해 예측된 소화 방법별 소화 효율을 계산하여 표시하였다. 고형물 제거율과 유기물 제거율 면에서 모두 초음파 전처리를 하지 않은 경우보다는 초음파 전처리를 하는 경우에 소화 효율이 더 증가하며, 초음파 전처리 보다는 SBR 반응조에 직접 초음파를 조사하는 경우가 더 효율적이다. 유

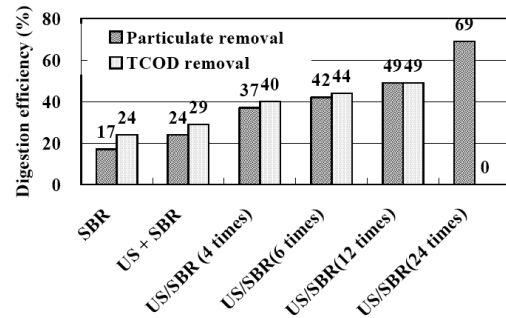


Fig. 8. Comparison of digestion efficiencies of ultrasonication(US) and SBR aerobic digestion system (US+SBR indicates SBR with US pretreatment and US/SBR indicates hybrid SBR combined with US system, Numbers in bracket mean number of US treatment in a cycle)

기물 제거율은 보통의 SBR 호기성 소화에서 24 % 제거되는 것으로 나타난 반면 초음파 전처리한 후 SBR 호기성 소화를 하면 29 %로 제거율이 증가하고, 초음파 결합형 SBR 호기성 소화의 경우에는 최대 49 %까지 제거율이 향상됨을 알 수 있다.

5. 결론

활성슬러지 모델을 기초로 한 초음파 결합형 SBR 호기성 소화 모델을 구성하고 모델의 모의를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

초음파 전처리를 한 후 호기성소화를 하면 소화효율이 증가한다. 입자상 물질 제거율을 호기성소화의 소화효율 지표로 보았을 때 소화효율은 초음파 전처리를 하는 경우가 24 %로서 그렇지 않은 경우의 17 % 보다 약 7%p 더 높게 나타났다.

초음파를 전처리로 사용하는 것 보다 SBR 호기성소화조 내에 초음파를 직접 조사하면 소화효율이 높아진다. 초음파 조사 빈도가 높을수록 소화효율도 증가하며, 2시간 간격의 초음파 조사에서 최대 약 49 %의 소화효율이 얻어졌는데 이는 증식된 종속영양미생물이 초음파에 의해 분해되고 분해산물이 다시 종속영양미생물의 세포합성에 이용되는 과정이 반복됨으로써 가능하다. 그렇지만, 1시간 간격의 초음파 조사는 오히려 종속영양미생물의 완전 분해를 초래하여 용해성 유기물이 제거되지 못하고 방류수에 잔류하는 결과를 초래하였다.

이 결과는 호기성소화의 가장 중요한 요소인 용존 유기물과 산소, 입자상 유기물과 종속영양미생물의 증식 및 분해 만을 고려한 간략한 활성슬러지 모델과 초음파 분해 모델을 결합한 결과로서 개략적인 반응조 설계와 성능 예측에 참고할 수 있을 것으로 생각된다. 앞으로 질산화나 인 대사, 알칼리도 변화 등의 동력학 반응을 추가하고, 보다 엄선된 매개변수를 사용하면 더 정확한 모델이 될 수 있을 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 차세대에코이노베이션기술개발사업 (E212-40005-0046-1)으로 진행되었습니다.

참고문헌

- Kim D.H. and Chung T.H. (1999) Modeling and dynamic simulation for biological nutrient removal in a sequencing batch reactor(I), *Journal of Korean Society of Water and Wastewater.*, 13(3), pp.42-55.
- Kim S.H., Kim H.J. and Chung T.H. (2002) Aerobic sludge digestion by intermittent aeration, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 22(2-B), pp.245-252.
- Kim J.H., Lee K.H., Nguyen Hai and Yeom I.T. (2011) Effects of ultrasonic pretreatment on sludge biodegradability, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 25(4), pp.611-616.
- Ministry of Environment (2010) *2009 statistical yearbook*, Korean Ministry of Environment.
- Bougrier C., Carrere H. and Delgenes J.P. (1995) Solubilisation of waste-activated sludge by ultrasonic treatment, *Chemical Engineering Journal*, 106, pp.163-169.
- Gujer W. and Henze M. (1991) Activated sludge modelling and simulation, *Wat. Sci. Tech.*, 23(Kyoto), pp.1011-1023.
- Gujer W., Henze M., Mino T. and Loosdrecht M. (1999) Activated sludge model No. 3, *Wat. Sci. Tech.*, 39(1), pp.183-193.
- Gujer W., Henze M., Mino T., Matsuo T., Wentzel M.C. and Marais G.v.R. (1995) The activated sludge model no. 2: biological phosphorus removal, *Wat. Sci. Tech.*, 31(2), pp.1-11.
- Hao O.J. and M.H. Kim (1990) Continuous pre-anoxic and aerobic digestion of waste activated sludge, *ASCE, Env. Eng. Div.*, 116(5), pp.863-879.
- Henze M., Gujer W., Mino T. and Loosdrecht M. (2007) Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3 - Ed. by IWA task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment, IWA publishing, UK.
- Henze M., Gujer W., Mino T., Matsuo T., Wentzel M.C. and Marais G.v.R. (1995) Wastewater and biomass characterization for the activated sludge model No. 2: Biological phosphorus removal, *Wat. Sci. Tech.*, 31(2), pp.13-23.
- MetCalf & Eddy (2004) *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse - 4th ed.*, McGrawHill, pp.1533-1546.