

Numerical Model for SBR Aerobic Digestion Combined with Ultrasonication and Parameter Calibration

초음파 결합형 SBR 호기성 소화의 모델과 매개변수의 보정

Sunghong Kim¹ · Inho Lee¹ · Jeongwon Yun^{1*} · Dongwoo Lee²

김성홍¹ · 이인호¹ · 윤정원^{1*} · 이동우²

¹조선대학교 토목공학과 · ²뉴엔텍(주) 기술연구소

Abstract : Based on the activated sludge model(ASM), a mathematical model which represents the aerobic sludge digestion by sequencing batch reactor(SBR) combined with ultrasonic treatment was composed and performed in this study. Aerobic digestion using sequencing batch reactor(SBR) equipped with ultrasound treatment was also experimented for the purpose of parameter calibration. Most of the presented kinetic parameters in ASM or ASM2 could be used for the aerobic digestion of sludge but the parameters related in hydrolysis and decay rate needed modification. Hydrolysis rate constant of organic matter in aerobic condition was estimated at 0.3 day⁻¹ and the maximum growth rate for autotrophs in aerobic condition was 0.618 day⁻¹. Solubilization reactions of particulate organics and nitrogen by ultrasonication was added in this kinetic model. The solubilization rate is considered to be proportional to the specific energy which is defined by specific ultrasound power and sonication time. The solubilization rate constant by ultrasonication was estimated at 0.202(W/L)⁻¹day⁻¹ in this study. Autotrophs as well as heterotrophs also decomposed by ultrasonic treatment and the nitrification reaction was limited by the lack of autotrophs accumulation in the digester.

Key words : aerobic digestion, SBR, ultrasonic treatment, activated sludge model

주제어 : 호기성 소화, 연속회분식반응조, 초음파, 활성슬러지 모델

기호설명

수질 요소

XI : Inert particulate organics(as COD)

XP : Inert particulate organics produced in cell decay(as COD)

XH : Heterotrophic biomass(as COD)

XA : Autotrophic biomass(as COD)

XS : Slowly biodegradable substrate(as COD)

XN : Slowly biodegradable organic nitrogen(as N)

SI : Inert soluble organics(as COD)

SS : Soluble substrate(as COD)

SNH : Ammonium plus ammonia nitrogen(as N)

SNO : Nitrite plus nitrate(as N)

SN : Soluble organic nitrogen(as N)

SO : Dissolved oxygen(as O)

SALK : Bicarbonate alkalinity (as Mol HCO₃⁻)

* Received 13 June 2013, revised 9 August 2013, accepted 12 August 2013.

* Corresponding author: Tel : +82-62-233-9066 Fax : +82-62-652-9066 E-mail : yjw38@nate.com

생화학적 분해의 분해상수와 계수

- μ_{mH} : Maximum growth rate for heterotrophs in aerobic growth(day⁻¹)
- K_s : Saturation coefficient of SS on aerobic growth of heterotrophs(mg/L)
- K_{OH} : Saturation coefficient of oxygen on aerobic growth of heterotrophs (mg/L)
- b_H : Decay rate constant for lysis of heterotrophs(day⁻¹)
- K_{NHH} : Saturation coefficient of ammonia on aerobic growth of heterotrophs (mg/L)
- k_H : Hydrolysis rate constant of organic matter in aerobic hydrolysis(day⁻¹)
- K_X : Saturation coefficient of particulate matter in aerobic hydrolysis(-)
- k_a : Ammonification rate constant ((mg/L)⁻¹ day⁻¹)
- K_{La} : Overall O₂ transfer rate(day⁻¹)
- K_{NO} : Saturation coefficient of nitrate on anoxic growth of heterotrophs (mgN/L)
- K_{OA} : Saturation coefficient of oxygen on anoxic growth of heterotrophs (mg/L)
- η_h : Correction factor for anoxic hydrolysis(-)
- η_g : Correction factor for anoxic growth (-)
- μ_{mA} : Maximum growth rate for autotrophs in aerobic growth (day⁻¹)
- K_{NHA} : Saturation coefficient of ammonia on aerobic growth of autotrophs (mg/L)
- b_A : Decay rate constant for lysis of autotrophs(day⁻¹)
- f_p : Fraction of inert COD generated in biomass lysis(-)

- i_B : Nitrogen content of biomass (mgN/mgCOD)
- f_{SI} : Production of SI in XS hydrolysis (-)
- Y_H : Yield coefficient of heterotrophs(-)
- Y_A : Yield coefficient of autotrophs (mgCOD/mgN)
- SO_{SAT} : Saturation concentration of dissolved oxygen (mgO₂/L)

초음파 분해의 분해상수와 계수

- k_{UH}, k_{UA} : Decay rate constant for lysis of XH and XA on ultrasonication ((W/L)⁻¹day⁻¹)
- k_{UX}, k_{UN} : Decay rate constant for lysis of XS and XN on ultrasonication ((W/L)⁻¹day⁻¹)
- f_{UD} : Fraction of disintegrable XS, XH, XNB by ultrasonication(-)
- f_{XI} : Production of XP in XH, XA lysis by ultrasonication (-)
- E_s : Specific energy (W/L day)
- P_U : Ultrasonic power (W)
- V : Reactor volume (L)
- D_U : Ultrasonic power intensity (W/L)

수치모델 구성에 사용된 기호

- C_i : Concentration of water quality component i (mg/L)
- $C_{i,in}$: Influent concentration of component i (mg/L)
- Q_{in} : Influent flowrate (L/day)
- Q_{out} : Effluent flowrate (L/day)
- $r(i)$: Reaction rate equation of i component described in eq.(16) - (27)
- i : 12 water quality component such as XP, XH et al.

1. 서론

하수처리장에서 발생하는 1차 및 잉여슬러지는 보통 소화 과정을 거쳐 감량화, 안정화되는데, 소화 방법은 크게 혐기성 소화와 호기성 소화로 대별된다. 이 중 호기성 소화는 슬러지를 장기포기하여 고형물의 분해와 미생물의 내생 호흡을 유도하므로써 유기성분의 분해를 도모하는 과정이다. 소화 효율 향상을 위해 초음파나 열처리, 산·알칼리 혹은 효소를 주입하는 등의 전처리를 하기도 하는데, 이러한 전처리를 통해 소화 시간을 단축하고 고형물 감소율을 높임으로서 최종 처분 대상이 되는 소화슬러지의 발생량을 줄이고 있다. 슬러지의 호기성 소화 과정은 고형물의 가수분해(hydrolysis)와, 유기물을 섭취하는 종속영양세균(heterotrophs)의 증식(synthesis)과 질산균과 같은 독립영양세균(autotrophs)의 증식 그리고 이들 미생물의 사멸(lysis)이 서로 복합적으로 관계하는 반응이다. 여기에 초음파 처리와 같은 물리적 처리가 가해지는 경우 그 분해 반응은 더욱 복잡해진다. Kim 등(2012)은 유기물의 분해와 biomass 증식 반응만을 고려한 간단한 수학적 모델을 구성하고 여기에 초음파 처리를 추가하여 수치실험을 한 결과, 초음파를 전처리로 활용하는 것 보다는 반응조 내에 초음파를 직접 조사하는 것이 고형물이나 TCOD 분해율 면에서 더 유리할 것임을 예측한 바 있다.

본 연구에서는 초음파 결합형 SBR 호기성 소화조를 위해 유기물과 biomass, 질소 성분과 알칼리도까지 포함한 동력학식을 구성하고 여기에 초음파 처리를 결합한 새로운 모델을 개발하였다. 개발한 모델의 활용을 위해 실험실 규모의 호기성 소화조를 운전하고 운전 결과를 이용하여 모델에 관련된 계수와 매개변수를 보정(calibration)하여 제시하였다.

2. 이론적 고찰

수정과 같은 압전성 물질에 전기를 가하면 진

동이 생긴다. 압전성 물질에 전기적 스파크를 가하면 이 물질은 진동하게 되는데, 20 kHz 이상의 주파수를 갖는 파동을 초음파라 한다. 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(Kim et al., 2012).

호기성 상태에서 생물학적으로 '이용 가능한 용존 유기물'이나 '이용 가능한 입자상 유기물'이 존재하는 경우에는 미생물이 증식하고, 유기물이 고갈되면 미생물의 증식보다 미생물의 분해(lysis)가 더 활발히 일어나게 되어 총 고형물량은 감소하게 된다. 세포의 분해에 따라 용출된 유기물은 다른 미생물의 에너지로 사용(oxidation)되거나 세포 합성(synthesis)에 이용된다. 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. 활성슬러지법의 수학적 모델은 1987년 IAWPRC의 한 Task Group이 개발하여 발표한 활성슬러지 모델 1(ASM1, Activated sludge model No. 1)(Gujer and Henze, 1991)이 있다.

호기성 소화의 반응이 활성슬러지법에서의 생물학적 처리와 크게 다르지 않으므로 본 연구에서는 ASM1 모델을 사용할 수 있을 것으로 판단하였다. Warner 등(1986)은 ASM1 모델 및 ASM1에서 사용한 화학양론계수, 속도상수를 연속식의 무산소-호기 소화 실험에 적용한 결과 계수나 상수를 크게 바꾸지 않아도 충분히 해석할 수 있음을 보였다. ASM1 모델은 종속영양 미생물의 증식과 사멸, 종속영양 미생물에 의한 질산화 반응, 입자상 유기물의 가수분해 반응이 모두 포함되어 있다. 또한, 무산소 상태에서의 분해를 포함하고 있어 탈질 반응도 모의할 수 있다.

ASM2(Activated sludge model No. 2) 모델은 ASM1 모델에 생물학적 인제거 기작을 더 포함한 것으로서 인축적미생물에 의한 인 방출 및 과잉섭취 반응을 모의할 수 있다(Gujer and Henze, 1991; Kim and Chung, 1999). 하지만 호기성 소화에서 인 용출율은 고형물 분해율에 비례하고 인 용출은 고형물 분해율로 충분히 계산 가능하므로 본 연구에서는 ASM1을 사용하였다. 모델에 사용된 수질 요소는 생물학적으로 분해 불가능한 입자상 유기물(이하 XI)를 포함하여 입자상 물질 6항목, 생물학적으로 분해 불가능한 용해성 유기물(이하 SI)을 포함하여 용존성 물질 7항목의 총 13항목을 구성하였다. 자세한 항목 이름을 앞의 ‘기호설명’에 정리하였다.

생물학적 분해와 합성에 관련된 동력학식은 Fig. 1의 (a)와 같이 SS에 의한 호기성 종속영양 미생물의 증식(r(1)) 등 총 10개의 반응식이 사용된다. 여기에는 무산소성 가수분해(anoxic hydrolysis)나 미생물의 사멸·분해(r(3), r(5)) 반응, 포기 반응(r(10)) 등이 포함된다. 반응속도식은 ‘Monod type’으로서 다음 식 (1) - (10)과 같다.

동력학식;

종속영양 미생물의 호기성 증식

$$r(1) = \mu_{mH} \cdot \frac{SS}{K_s + SS} \cdot \frac{SO}{K_{OH} + SO} \cdot \frac{SNH}{K_{NH} + SNH} \cdot XH \quad (1)$$

종속영양 미생물의 무산소성 증식(탈질)

$$r(2) = \mu_{mH} \cdot \frac{SS}{K_s + SS} \cdot \frac{K_{OH}}{K_{OH} + SO} \cdot \frac{SNH}{K_{NH} + SNH} \cdot \frac{SNO}{K_{NO} + SNO} \cdot \eta_h \cdot XH \quad (2)$$

종속영양 미생물의 사멸

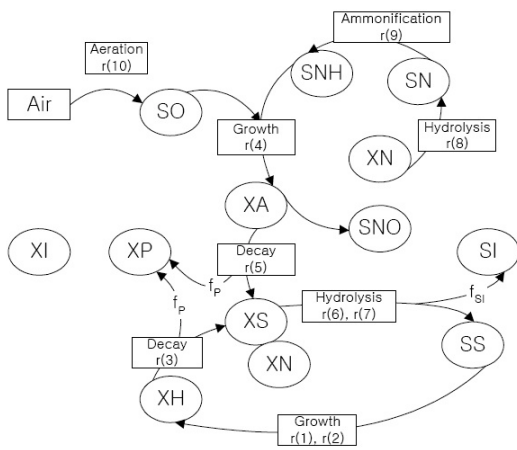
$$r(3) = b_H \cdot XH \quad (3)$$

독립영양 미생물(질산화균)의 호기성 증식

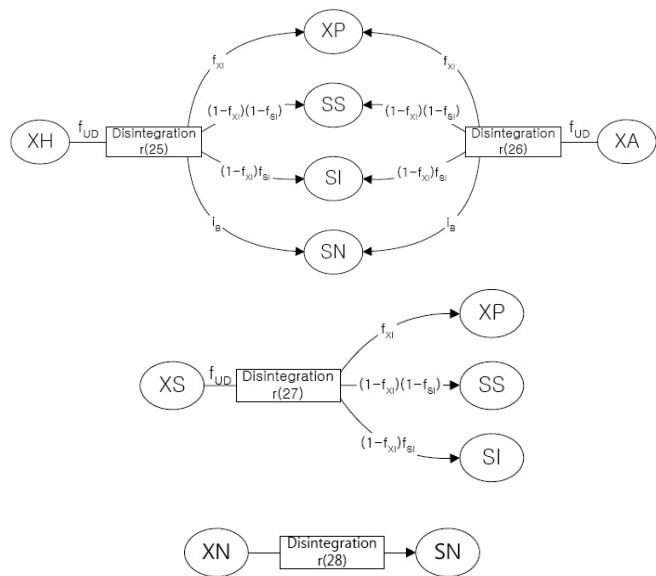
$$r(4) = \mu_{mA} \cdot \frac{SNH}{K_{NHA} + SNH} \cdot \frac{SO}{K_{OA} + SO} \cdot XA \quad (4)$$

독립영양 미생물의 사멸

$$r(5) = b_A \cdot XA \quad (5)$$



(a) Flow of components in ASM1



(b) Newly added reaction in this study

Fig. 1. Flow of organics and nitrogen in this model

입자상 유기물질의 호기성 가수분해

$$r(6) = k_H \cdot \frac{(XS/XH)}{K_X + (XS/XH)} \cdot \frac{SO}{K_{OH} + SO} \cdot XH \quad (6)$$

입자상 유기물질의 무산소성 가수분해

$$r(7) = k_H \cdot \frac{(XS/XH)}{K_X + (XS/XH)} \cdot \frac{K_{OH}}{K_{OH} + SO} \cdot \frac{SNO}{K_{NO} + SNO} \cdot \eta_g \cdot XH \quad (7)$$

유기성 질소의 호기 및 무산소성 가수분해

$$r(8) = (r(6) + r(7)) \cdot \frac{XN}{XS} \quad (8)$$

암모니아화

$$r(9) = k_a \cdot SN \cdot XH \quad (9)$$

포기

$$r(10) = K_{La} \cdot (SO_{SAT} - SO) \quad (10)$$

초음파 조사로 XS와 XH는 분해될 수 있는데 분해율은 비에너지에 비례하는 일차반응으로 간주할 수 있다. 비에너지는 초음파 조사로 인해 가해지는 에너지로서 초음파 강도와 초음파 조사 시간의 곱으로 식 (11)과 같이 표시할 수 있으며, 초음파 강도는 단위 체적 혹은 단위 고형물량 당 가해지는 초음파의 동력을 말한다(Bougrier et al., 2006). 따라서, XS, XH, XA, XN 성분의 분해상수를 각각 k_{UH} , k_{UA} , k_{UX} , k_{UN} 으로 놓으면 초음파로 인한 XS, XH, XA, XN의 분해율을 다음 식 (12) - (15)와 같이 쓸 수 있다.

$$E_s = \frac{P_U \cdot t}{V} = D_U \cdot t \quad (11)$$

초음파 분해;

중속영양 미생물의 분해

$$r(25) = k_{UH} \cdot D_U \cdot XH \quad (12)$$

독립영양 미생물의 분해

$$r(26) = k_{UA} \cdot D_U \cdot XA \quad (13)$$

입자상 유기물질의 분해

$$r(27) = k_{UX} \cdot D_U \cdot XS \quad (14)$$

유기성 질소의 분해

$$r(28) = k_{UN} \cdot D_U \cdot XN \quad (15)$$

초음파 분해시 슬러지의 질소 성분도 용출된다. 용출되는 질소는 주로 유기성 질소(XN)의 형태이며, 암모니아성 질소(SNH)가 그 다음을 차지한다(Wang et al., 2010). 반응속도식은 앞의 동력학식 및 이와 관련된 화학양론계수의 곱으로 표현되며, 각 수질 요소와 연관된 동력학식을 조합하여 결정된다. XI는 유입수에 포함된 생물학적으로 분해 불가능한 입자상 유기물로서 반응에는 관여하지 않으므로 실제 생화학적 반응에 연관된 수질 항목은 12개이며, 이들 입자상 및 용해성 수질 요소의 반응속도식은 다음과 같다.

반응속도식;

$$1) XP \quad (16)$$

$$r(XP) = f_p(r(3) + r(5)) + f_{UD} f_{XI} (r(25) + r(26) + r(27))$$

$$2) XH \quad (17)$$

$$r(XH) = r(1) + r(2) - r(3) - f_{UD} r(25)$$

$$3) XA \quad (18)$$

$$r(XA) = r(4) - r(5) - f_{UD} r(26)$$

$$4) \text{ XS} \quad (19)$$

$$r(\text{XS}) = (1 - f_p)(r(3) + r(5)) - r(6) - r(7) - f_{UD}r(27)$$

$$5) \text{ XN} \quad (20)$$

$$r(\text{XN}) = i_B(r(3) + r(5)) - r(8)$$

$$6) \text{ SI} \quad (21)$$

$$r(\text{SI}) = f_{SI}(r(6) + r(7)) + f_{UD}(1 - f_{XI})f_{SI}(r(25) + r(26) + r(27))$$

$$7) \text{ SS} \quad (22)$$

$$r(\text{SS}) = -\frac{1}{Y_H}(r(1) + r(2)) + (1 - f_{SI})(r(6) + r(7)) + f_{UD}(1 - f_{XI})(1 - f_{SI})(r(25) + r(26) + r(27))$$

$$8) \text{ SNH} \quad (23)$$

$$r(\text{SNH}) = -i_B(r(1) + r(2) + r(4)) - \frac{1}{Y_A}r(4) + r(9)$$

$$9) \text{ SNO} \quad (24)$$

$$r(\text{SNO}) = \frac{1}{Y_A}r(4) - \frac{1}{2.86} \frac{1 - Y_H}{Y_H} r(2)$$

$$10) \text{ SN} \quad (25)$$

$$r(\text{SN}) = r(8) - r(9) + i_B f_{UD}(r(25) + r(26))$$

$$11) \text{ SO} \quad (26)$$

$$r(\text{SO}) = -\frac{1 - Y_H}{Y_H} r(1) - 4.57 \frac{1}{Y_A} r(4) + r(4) + r(10)$$

$$12) \text{ SALK} \quad (27)$$

$$r(\text{SALK}) = -i_B \frac{1}{14}(r(1) + r(2) + r(4)) + \frac{1}{40} \frac{1 - Y_H}{Y_H} r(2) - \frac{1}{7} \frac{1}{Y_A} r(4) + \frac{1}{14} r(9)$$

화학양론계수는 각 성분들의 변환 과정에서 나타나는 비율로서 기존 연구 결과를 바탕으로 Table 1과 같이 적용하였다.

3. 모델의 플이와 보정

3-1. 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 있

Table 1. Stoichiometric coefficients

Coefficient	this study	Unit	reference value*			
			ASM1	ASM2	ASM2d	ASM3
Y_H	0.63	gCOD/gCOD	0.67	0.63	0.625	0.63
Y_A	0.24	gCOD/gN	0.24	0.24	0.24	0.24
f_p	0.10	gCOD/gCOD	0.08	0.10	0.10	0.20
i_B	0.07	gN/gCOD	0.086	0.07	0.07	0.07
f_{SI}	0.05	gCOD/gCOD	-	0	0	0
f_{UD}	0.54**	gCOD/gCOD				
f_{XI}	0.1***	gCOD/gCOD				

* Henze et al, (2007)
 ** calculated value from Fig. 5
 *** Assumed value that is similar to f_p

다. SBR 반응조를 이용하여 슬러지를 호기성으로 소화하는 경우도 마찬가지이며, 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 알칼리도 부족으로 질산화가 저해받아 암모니아성 질소가 축적되는 것을 방지하는 잇점도 있다(Kim et al., 2002). 연속회분식 반응조에서 물질수지식은 유입, 유출, 반응항이 포함되며 다음 식 (28)과 같다. 그리고 반응조의 체적 변화는 유출입에 의해 달라지며 식 (29)와 같다.

$$\frac{dC_i}{dt} = (C_{i,in} - C_i) \frac{Q_{in}}{V} + r(i) \quad (28)$$

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (29)$$

모형에는 12 개의 수질 요소의 변화 과정을 표현하는 12 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. 반응조 운전

수립한 모델의 보정을 위해 초음파 결합형 SBR 호기성 소화반응조를 운전하였다. 반응조는 Fig. 2와 같이 약 5 L 용적의 원통형 반응조로서 교반장치와 포기장치가 구비되었다. 포기는 24시간 동안 연속해서 실시하며, 별도로 침전모드를 두지 않기 때문에 완전혼합 상태에서 유출이 이루어진다. 반응조 상부에 직접 초음파 진동자(혼)를 설치하여 주기적으로 초음파 처리

를 하였는데, 1회 당 10분씩, 한 주기 동안 총 6회 초음파 조사하였다. 초음파의 출력을 140 W로 하였으므로 슬러지 단위 부피 당 초음파 강도는 56 W/L이었다. 운전 방식은 24시간을 1 주기로 하는 간헐유입, 간헐배출의 SBR 방식이다. 유출모드가 끝난 후 반응조의 부피는 2.0 L이며, 유입은 0.05 L/min의 유량으로 처음 10분 동안 진행된다. 유출은 1주기가 끝나기 10분 전부터 10분간 동안 유입 모드와 같은 0.05 L/min 유량으로 이루어진다. 따라서 반응조의 부피는 2.0 L에서 유입 모드 이후 2.5 L까지 증가하였다가 유출 모드 후에는 다시 2.0 L가 된다.

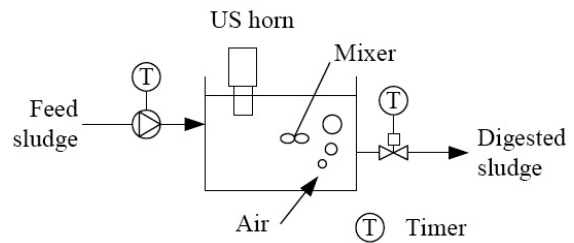


Fig. 2. SBR aerobic digestion combined with ultrasonication - USSBR

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

Fig. 3. USSBR operation mode

처리 대상 슬러지는 하수처리장에서 발생하는 일차 슬러지와 잉여 슬러지의 혼합 슬러지로서 SCOD 550 mg/L, TCOD 20,000 mg/L이며, 암모니아성 질소 80 mg/L, 질산성질소 10 mg/L, 유기성질소 760 mg/L이었다. 운전은 약 20일(20주기) 동안 지속하였는데, 유입슬러지의 성상과 수질 요소를 Table 2에 표시하였다. 유입 슬러지의 유기물 성분 조성을 실험적으로 구분하기는 어려웠으므로 본 연구에서는 TCOD 및 SCOD 그리고 주기 거동과 비교하여 적절히 분할하였다.

Table 2. Sludge components in the experiment and simulation

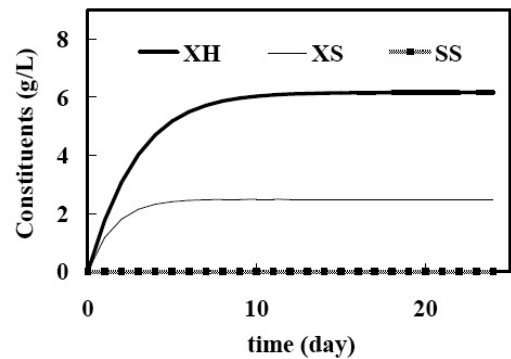
Component	Unit	Influent	Initial conditions
XI	mgCOD/L	2,000	1
XH	mgCOD/L	9,000	1
XA	mgCOD/L	0	1
XS	mgCOD/L	8,450	1
XN	mgN/L	130	1
SI	mgCOD/L	450	1
SS	mgCOD/L	100	1
SNH	mgN/L	80	1
SNO	mgN/L	10	1
SN	mgN/L	0	1
DO	mgO ₂ /L	0	1
SALK	mM HCO ₃ ⁻ /L	100	1

4. 결과 및 고찰

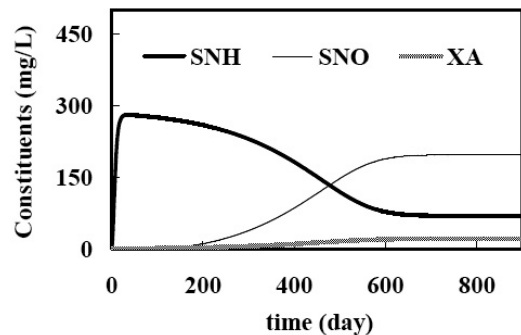
4-1. 비정상상태의 모의

SBR 운전은 유입과 유출이 간헐적으로 이루어지기 때문에 물질의 양이나 농도가 시간에 따라 주기적으로 변하게 되어 일반적인 의미의 정상상태(steady state)는 존재하지 않는다. 그렇지만, 운전 환경이나 유입수질 등의 조건을 일정하게 장기간 유지하면 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 간주하고 격자 간격을 0.5분으로 하여 비정상상태 모의를 실시하였다. 시간 경과에 따라 수질 요소 값이 변화하는 과정을 모의하였는데 유기물 변화와 관련된 종속영양미생물(XH), 생분해성 입자상 유기물(XS) 그리고 생물학적으로 쉽게 이용 가능한 용해성 유기물(SS)의 처음 25일의 수질 항목 농도 변화를 Fig. 4(a)에 표시하였다. 유입 슬러지의 입자상 유기물이 가수분해하여 용해성 유기물이 증가하고, 다시 이 용해성 유기물을 이용하여 종속영양미생물이 점차 증식하는 반응이 주기적으로 반복되어 나타난다. 또한 약 20주기(20일) 이

후에는 3 항목 모두 큰 변화없이 주기적인 안정상태를 보이므로 시스템은 안정되고, 모델은 수렴없이 잘 수렴되고 있음을 알 수 있다. 질소 성분인 암모니아성 질소(SNH), 질산성 질소(SNO) 그리고 질산화 반응과 관련된 독립영양미생물(XA)의 변화를 Fig. 4(b)에 함께 표시하였다. 장시간의 운전에 의해 시스템은 주기적인 안정상태를 보이며 암모니아성 질소가 질산성 질소로 산화하는 반응이 잘 묘사되고 있고, 모델은 잘 수렴하는데 다만 안정상태에 도달하는데 필요한 시간은 약 800주기(800일) 이상으로 매우 길다. 이는 질산화미생물의 성장률이 낮아데다 초음파 조사로 인해 질산화미생물이 자꾸 분해되어 반응조 내에 독립영양미생물의 확보가 더디기 때문이다. 빠른 시스템 안정과 충분한 질산화를 위해서는 질산화미생물이 초음파의 영향을 받지않도록 하는 방안도 요구된다.



(a) XS, SS, XH



(b) SNH, SNO, XA

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

4-2. 매개변수의 보정

실측값과 일치하게 모사하는 경우가 완전한 모델링이라 할 수 있다. 그렇지만 실험오차나 모델링 과정에서의 가정들, 각 매개변수들이 갖는 한계성 등으로 인해 실측값을 완벽히 재현하는 모델링은 불가능하다. 이 경우, 타당한 범위 안에서 매개변수 값을 조정하므로써 실측값에 최대한 근접하게 모사하도록 보정할 수 있다. 본 연구에서 행한 보정 방법은 다음과 같다. 동력학적 매개변수 중 K_S 와 같은 반포화상수들은 ASM1이나 ASM2에서 사용한 값을 그대로 사용하였다(Gujer et al., 1995; Henze et al., 2007). 그리고 먼저 종속영양미생물의 증식과 밀접하게 관련된 매개변수인 μ_{mH} 와 b_H 를 기존 문헌에 제시된 값을 기초로 점차 변화시켜가면서 용존 유기물인 SS 변화를 가장 잘 모사하는 값을 추정

하였다. 그 다음 독립영양미생물의 증식과 관련된 매개변수인 μ_{mA} , b_A , k_a 등을 변화시키면서 질산화와 관련된 수질 항목인 SNH, SNO의 실측값과 가장 유사하게 모의하는 매개변수 값을 추정하였다. 독립영양미생물의 거동에 따라 종속영양미생물의 거동도 영향을 받으므로, 다시 종속영양미생물과 관련된 보정을 실시하는데 실측값과 예측값이 충분히 일치하는 수준까지 이 과정을 반복하였다. 보정 작업을 통해 실험 결과와 가장 잘 일치하는 매개변수 값을 Table 3에 표시하였다.

호기성소화는 미생물을 내생호흡단계로 유지하여 세포 내 유기물을 산화시키는 반응으로서 입자상물질의 분해상수(k_H)와 미생물의 자기 분해상수(b_A)가 매우 중요하다. 슬러지 농도나 pH, 소화 온도 등에 따라 다르지만 COD 감소를 소화 효율의 지표로 보았을 때 분해상수; k_d (Net decay rate)는 실제 처리장 운전 조건에서 0.2 - 0.335day⁻¹ 정도이고(Bhargava and Dattar, 1988), 이 값은 ASM1이나 ASM2에서 사용한 표준환성슬러지법 모델의 값; $k_H = 3\text{day}^{-1}$ 과 많은 차이가 있다. 본 연구에서는 여러 번의 모의를 거쳐 실측 데이터와 가장 잘 일치하는 값으로 $k_H=0.3\text{day}^{-1}$, $b_H=0.2\text{day}^{-1}$ 를 도출하였다.

초음파 처리에서 용해율은 초음파 강도나 pH, 초음파 밀도, 슬러지 농도 등의 영향을 받는데, 여러 실험 결과와 이들 변수에 대한 다중회귀분석 결과, 반응 차수는 초음파 강도에 대해서는 0.5436차(Wang et al., 2005), 초음파 밀도/초음파 강도에 대해 0.9336차(Li, et al., 2010)에 비례하는 것으로 보고된 바 있다. 본 연구에서는 초음파에 의한 PCOD의 감소율을 계산하기 위해 동일한 슬러지를 대상으로 연속적으로 초음파를 조사하며 유기물의 변화를 측정하는 별도의 회분실험을 실시하였다. 조건을 단순화하기 위해 초음파 조사율만을 변수로 하였는데, 회분실험에서 초음파 조사율 56 W/L로 연속 조사하여 초음파 조사량과 TCOD 및 SCOD

Table 3. Kinetic parameters

Parameter	Value	Unit	reference value*
K_{OH}	0.2	mgO ₂ /L	0.2
K_S	20	mgCOD/L	20
K_X	0.1	gCOD/gCOD	0.03, 0.1
k_H	0.3	day ⁻¹	3
μ_{mH}	2	day ⁻¹	6
K_{NH}	1	mgN/L	1
b_H	0.2	day ⁻¹	0.62, 0.4
k_a	0.01	(mgCOD/L) ⁻¹ day ⁻¹	0.08
K_{NO}	0.5	mgN/L	0.5
K_{OA}	0.5	mgO ₂ /L	0.4, 0.5
η_b	0.6	-	0.4, 0.6
η_k	0.8	-	0.8
μ_{mA}	0.618	day ⁻¹	0.8, 1
K_{NHA}	1	mgN/L	1
b_A	0.1	day ⁻¹	0.15
K_{La}	2000	day ⁻¹	-
SO_{SAT}	9.1	mgO ₂ /L	-
K_{UH}	0.202	(W/L) ⁻¹ day ⁻¹	-
K_{UA}	0.202	(W/L) ⁻¹ day ⁻¹	-
K_{UX}	0.202	(W/L) ⁻¹ day ⁻¹	-
K_{UN}	0.065	(W/L) ⁻¹ day ⁻¹	-

* used in ASM1 and ASM2

의 변화를 측정하였다. 실험 결과 Fig. 5와 같이 3.5시간 동안 입자상 COD(PCOD, particulate COD)가 20,000 mg/L에서 12,300 mg/L로 지수함수 형태로 감소하였다. 따라서, 자외선 주입율(dose)에 대한 PCOD의 감소율을 식 (30)과 같은 '3개의 변수를 가진 지수함수'로 보고 회귀분석하였는데, 이렇게 함으로써 초음파에 의해 분해되지않는 PCOD(a)와 분해상수(b)를 동시에 얻을 수 있다.

$$y = a + (1 - a)e^{-bx} \quad (30)$$

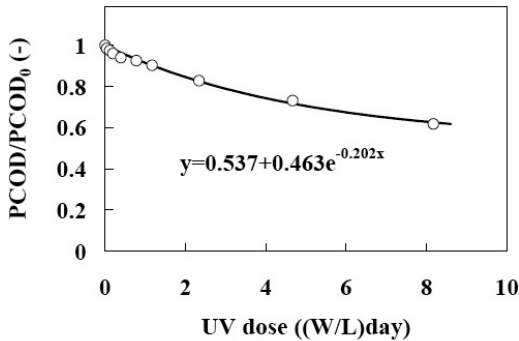
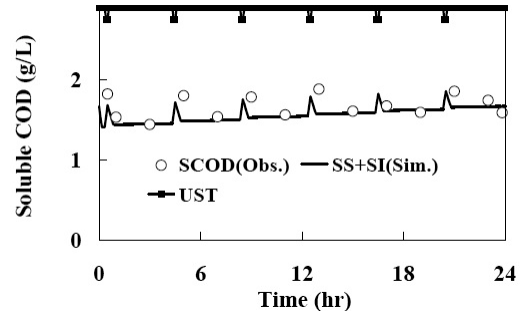
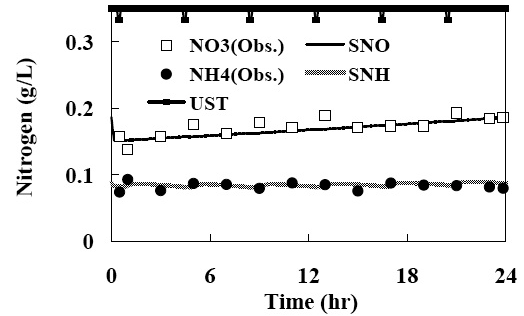


Fig. 5. Batch ultrasonication and the reduction of PCOD

여기에서 a는 초음파에 의해 분해되지않는 PCOD 비율, (1-a)는 초음파에 의해 분해되는 PCOD 비율, b는 분해상수를 의미한다. 회귀분석 결과 a=0.54, b=0.202가 얻어졌고, 결정계수; r²값은 0.988로 나타났다. 즉, 초음파에 의해 분해되지않는 PCOD(f_{UD})는 54 %, 분해상수; k_U는 0.202(W/L)⁻¹day⁻¹로 계산된다. 이것은 56 W/L로 초음파를 조사하면 PCOD 분해율은 약 11day⁻¹ 정도임을 의미한다. 한편, 종속영양세균, 독립영양세균, 입자상 유기물 각각의 분해율을 산정하는 것은 불가능하였으므로 본 연구에서는 초음파에 의한 종속영양세균, 독립영양세균, 입자상 유기물의 분해율을 모두 같은 값; 0.202 (W/L)⁻¹day⁻¹로 간주하였다. 그리고, 초음파에 의한 입자상 질소의 분해율; k_{UN}은 유입 질소 농도와 정상상태의 거동을 감안하여 0.065day⁻¹로 가정하였다.



(a) Soluble organics



(b) Ammonia(NH₄) and Nitrate(NO₃)

Fig. 6. Calibration of the model and periodic response

Fig. 6에 한주기동안의 용해성 유기물과 용해성 질소의 거동을 표시하였다. Fig. 6(a)와 같이 반응조의 SCOD 농도는 슬러지 유입 및 초음파 분해로 인해 한 주기동안에도 증가와 감소를 반복하는데 1,400 - 2,100 mg/L(평균 1,700 mg/L)로 나타났다. 이것은 유입 슬러지의 SCOD 농도 550 mg/L와 비교해서 매우 높은 농도인데 이는 생물학적으로 분해가 불가능한 용존 유기물(SI)의 축적에 따른 것이다. 즉, 유입 SCOD의 일부 및 호기성 소화 반응에서 용출되었으나 생물학적으로 분해되지 않고 축적되는 SCOD가 합해진 것이다. 한 주기동안 총 6번의 초음파 조사가 이루어졌는데 이 단계에서 SCOD의 증가가 뚜렷하였고, 모델링은 이 현상을 잘 반영하고 있다.

Fig. 6(b)에는 암모니아성 질소와 질산성 질소의 농도 변화가 나타나 있다. 슬러지의 용해와 초음파 분해에 따라 암모니아성 질소가 용출되지만 질산화 미생물에 의한 질산화 반응으로 질산성 질소로 산화되어 조 내에 축적된다. 조건

에 따라 다르기는 하지만 호기성 소화에서 질산성 질소 뿐만 아니라 암모니아성 질소도 축적되는데 이러한 암모니아성 질소의 축적은 알칼리도 부족으로 인해 질산화 반응이 제한되기 때문이다(Kim and Hao, 1990). 본 연구에서도 암모니아성 질소와 질산성 질소의 축적이 함께 나타났는데, 모의 결과 질산화 미생물의 농도는 약 20 mg/L로 매우 낮게 예측되어 질산화 미생물 부족이 암모니아성 질소의 축적에 직접적인 원인으로 생각된다. 초음파 처리에 의해 종속영양 미생물 뿐만 아니라 질산화 미생물도 분해되어 반응조 내에 축적되지 못하였기 때문이다. 따라서, 슬러지 소화와 더불어 질산화와 탈질까지도 모하고자 하는 경우라면 질산화 미생물을 반응조 내에 보전할 수 있는 방법이 강구되어야 할 것이다.

5. 결론

슬러지의 호기성 소화 효율을 높이기 위해 호기성 소화조에 간헐적으로 초음파 처리를 하는 조건을 수학적 모델링하였으며, 실험실 규모의 실험 결과를 바탕으로 보정을 실시하였다. 활성슬러지법 모델(ASM1, ASM2)에서 사용한 화학양론계수와 매개변수값을 슬러지의 호기성 소화에도 대부분 사용할 수 있지만 고형물의 가수분해나 종속영양세균의 자기분해상수 등 슬러지 소화에 직접 영향을 미치는 매개변수값은 보정이 필요하였다. 본 연구의 실험 조건에서는 고형물의 호기성 가수분해상수(k_{HH})는 0.3day^{-1} , 종속영양세균의 자기분해상수(b_H)는 0.2day^{-1} 가 얻어졌다. 호기성 소화에서 입자상 질소나 세포 내 질소는 분해되거나 용출하여 암모니아성 질소로 전환된 후 질산성 질소로 점차 산화되는데, 실험 결과와 가장 일치하는 암모니아화율(k_A)은 $0.01(\text{mg/L})^{-1}\text{day}^{-1}$, 질산화균의 최대비증식율(μ_A)은 0.618day^{-1} 로 계산되었다.

초음파 처리는 입자상 물질의 용해에 직접 영향을 미치며, 회분실험에서 얻은 초음파 처리에

의한 입자상 유기물 또는 미생물의 분해상수, $0.202(\text{W/L})^{-1}\text{day}^{-1}$ 을 적용한 결과 실측값과 잘 일치하였다. 초음파에 의해 종속영양세균 뿐만 아니라 독립영양세균인 질산화균도 함께 분해되므로써 소화조 내에 질산화균의 증식은 매우 제한적이었고, 이 때문에 암모니아성 질소가 충분히 질산성 질소로 산화되지 못하고 유출하였다. 따라서, 생물학적 질산화와 탈질을 도모하고자 하는 경우 질산화 미생물을 반응조 내에 보전하기 위한 방안이 도입되어야 한다.

사 사

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

참고문헌

- Bhargava D.S. and Datar M.T. (1988) Progress and kinetics of aerobic digestion of secondary sludges, *Water Research*, 22(1), pp.37-47.
- 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., 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.
- 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.
- 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 M.H. and Hao O.J. (1990) Comparison of

- activated sludge stabilization under aerobic or anoxic condition, *J. WPCF*, 62(2), pp.160-168.
- 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 S.H., Lee D.W. and Kim D.H. (2012) Performance evaluation of hybrid SBR aerobic digestion combined with ultrasonication by using a mathematical model, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 26(6), pp.897-905.
- Li C., Liu G., Jin R., Zhou J. and Wang J. (2010) Kinetics model for combined (alkaline+ultrasonic) sludge disintegration, *Bioresource Technology*, 101, pp.8555-8557.
- Wang F., Wang Y. and Ji M. (2005) Mechanisms and kinetics models for ultrasonic waste activated sludge disintegration, *Journal of Hazardous Materials*, B123, pp.145-150.
- Wang X., Qiu Z., Lu S. and Ying W. (2010) Characteristics of organic, nitrogen and phosphorus species released from ultrasonic treatment of waste activated sludge, *Journal of Hazardous Materials*, 176, pp.135-140.
- Warner A.P.C., Ekama G.A. and Marais G.V.R. (1986) The activated sludge process-IV. Application of the general kinetic model to anoxic-aerobic digestion of waste activated sludge, *Water Research*, 20(8), pp.943-958.