

호기성 입상화 슬러지를 이용한 SBR 운전의 동력학적 해석 및 설계분석 Bio-kinetic and Design Analysis of a Sequencing Batch Reactor by Aerobic Granular Sludge

최 성 우
Seong-Woo Choi

동아대학교 환경공학과
Department of Environmental Engineering, Dong-A University

(2010년 10월 1일 접수, 2011년 4월 27일 채택)

Abstract : In the present work, the aerobic particle's characteristics were enhanced. A polymer was used to make aerobic granular sludge in short period of time. And operation parameters were calculated for organic matter removal in domestic wastewater using a sequencing batch reactor (SBR). The experiment for sewage (Influent concentration of 63~72 mg COD/L) by using mature aerobic granular sludge showed the organic matter removal rate k and oxygen utilization coefficient a' , b' were 10.161 d^{-1} and 0.87 mg O_2 /mg COD_r , 0.11 mg O_2 /mg $MLVSS \cdot d$ respectively. Therefore, it was more effective than K value 5~8 d^{-1} of conventional activated sludge process. The sludge synthetic value and sludge auto-oxidation value were 0.45 mg $VSS/mg COD_r$ and 0.05 mg $VSS/mg MLVSS \cdot d$ respectively. Consequently, mortality rates of microorganisms was lower than conventional activated sludge process.

Key Words : Aerobic Granulation, SBR, Polymer, Organic Matter Removal Rate, Oxygen Utilization Coefficient

요약 : 고분자 응집제를 이용하여 짧은 시간에 형성된 입상형태의 슬러지를 연속회분식 장치에 주입하여 미생물의 호기성 입상화의 특성을 향상시키고, 제조한 입상화 슬러지를 하수에 적용하여 유기물 제거에 대한 운전인자를 도출하였다. 유입하수 COD 63~72 mg/L에 대한 유기물 제거속도 계수 k 는 10.161 d^{-1} 로 일반적 활성슬러지 공법의 k 값 5~8 d^{-1} 보다 효과적으로 나타났으며, 산소이용에 대한 a' , b' 값은 각각 0.87 mg O_2 /mg COD_r , 0.11 mg O_2 /mg $MLVSS \cdot d$ 이었다. 슬러지 합성계수와 자산화계수는 각각 0.45 mg $VSS/mg COD_r$ 과 0.05 mg $VSS/mg MLVSS \cdot d$ 로 일반적 활성슬러지 공법에 비해, 자산화 계수는 비교적 적은 값으로 나타나므로 미생물의 사멸율은 낮은 것을 알 수 있었다.

주제어 : 호기성 입상화, 연속회분식, 고분자 응집제, 유기물 제거속도, 산소이용계수

1. 서론

미생물의 자연적인 플럭의 형성은 활성슬러지법에 의한 폐수처리공정에서 가장 기본적인 특성이다. 1914년 활성슬러지 공정의 개념을 확립한 이후 연구자들은 보다 더 나은 생물입상화 공정을 연구하게 되었다. 미생물의 응집공정인 생물입상화는 활성슬러지 공법에서의 고액분리공정에 상당히 중요하다. 재래식 활성슬러지공법과 비교하면 생물입상화는 규칙적이고 조밀하며 고강도의 구조와 양호한 침강특성을 지니므로 반응조의 효율을 높일 수 있을 뿐만 아니라 운전이 용이하여 공정상의 운전비용이 적게 드는 장점이 있다. 또한, 반응조 조밀화, 온도 및 유기물 부하변동, 독성물질 유입 등과 같은 충격부하에 강한 특성을 가지고 있어 환경뿐만 아니라 식품공업, 생명기술분야, 생물산업에서 많이 적용되고 있다.

미생물 고정화는 1966년 Mosbach 등¹⁾에 의한 지의류 고정화 후 1970년대에 이르러 몇 가지 효소반응을 포함한 생체촉매로서 미생물이 주목받았으며 이로부터 미생물 고정화 연구가 시작되었다. 일반적으로 생물플럭은 순 음전하(net negative charge)를 가지는데 이는 미생물 체외분비 고

분자물질(exocellular polymeric substances : EPS)에 존재하는 작용기의 결과이다. EPS의 특성은 플럭의 음전하를 부여하는 글루타민산이나 아스파틱산과 같은 카르복실 그룹을 포함하는 아미노산에 풍부하게 존재하며, 단백질, 다당류, 휴민산 복합물, 핵산과 지질 등으로 구성되어 있다.²⁾ 생물플럭의 음전하 결과로 생물입상화에서의 특히 양이온의 역할은 많은 연구자들에 의해 연구되었다.³⁾

최근 미생물 자기고정화를 이용한 활성슬러지 입상화에 대한 연구는 호기성 입상슬러지에 대한 검토와 논의가 증가하고 있으며, 특히 고액분리에 대한 효율성 증대, 운전상의 유연성, 간단한 장치구성으로 인하여 연속회분식장치(sequencing batch reactor : SBR) 등이 호기성 입상형성에 장점으로 작용하고 있어 SBR 장치에 의한 호기성 입상화 연구가 증가하고 있다.^{4,5)} 그러나, 이 연구보고들은 반응기 내의 입상화 슬러지의 특징과 구조에 대한 연구보다는 입상화 슬러지에 의한 처리효율에 관심을 두었다. 최근 SBR 장치에 의한 호기성 입상화 연구결과를 보면 단기간의 입상슬러지 형성, 높은 COD 제거율, 높이/직경비(H/D)가 큰 깔럼 형태의 SBR 반응조가 특징을 이루고 있다.⁶⁻⁸⁾ 그러나 SBR 장치에 의한 호기성 입상화 연구는 운전상의 인자들

† Corresponding author E-mail: blue7931@hanmail.net Tel: 051-200-7674 Fax: 051-200-7683

의 변화, 반응기 실행과 입자의 물리화학적 특성들 사이의 관계에 대한 검토와 호기성 입자들의 분류를 위한 적절한 인자들에 대한 연구가 미미한 실정이다. 초기 설계는 체류 시간, 부유미생물농도, BOD₅ 제거 등의 관계에 대한 경험적 관찰결과에 근거하였다.⁹⁾ 그러나, 이러한 설계는 산업폐수, 특히 고농도 폐수의 경우 종종 실패하여 공정에 영향을 주는 인자들에 대한 보다 나은 이해가 필요해졌다.¹⁰⁾ 생물학적 폐수처리시설의 성공적인 설계 및 운전은 각종 운전 인자의 변화에 따른 미생물의 성장 변화와 상호작용의 생물학적 동력학계수를 이용하여 가능하다. 그러므로 반응조 운전조건 변화를 일으키는 구체적인 정보와 진보된 인자들에 바탕을 둔 운전조건들의 도출이 필요하다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 하폐수 처리공정에서 광범위하게 이용되는 고분자 응집제를 이용하여 입상형태의 슬러지를 생성한 후 연속회분식장치를 이용하여 호기성 입자생성에 따른 동력학적 고찰과 하수 중의 유기물 제거에 따른 운전 인자 도출, 기존 호기성 입상화 연구결과와 본 실험 결과 등을 검토하고 고찰한 내용을 기술하였다.

2. 실험방법

2.1. 실험장치 및 방법

하수처리장의 반송슬러지에 고분자 응집제(양이온성 유기고분자 응집제 : c-492 HMW, cytec, USA, 음이온성 무기고분자 : silica-sol)를 활성슬러지 중량 대비 0.7 % (w/w)가 되도록 첨가하고 400 rpm으로 2분간 교반하여 단기간에 입상화 형태를 만든 다음 COD : N : P의 구성비율이 100 : 6.2 : 1.1, COD 부하율 5.4 kg COD/m³ · d인 실험실 규모의 연속회분식 공정에 주입하여 호기성 입상화를 시도하고 최종 형성된 호기성 입자를 이용하여 하수처리를 시도하였다. 실험장치는 이 등¹¹⁾의 연구에서와 같이 내경 50 mm,

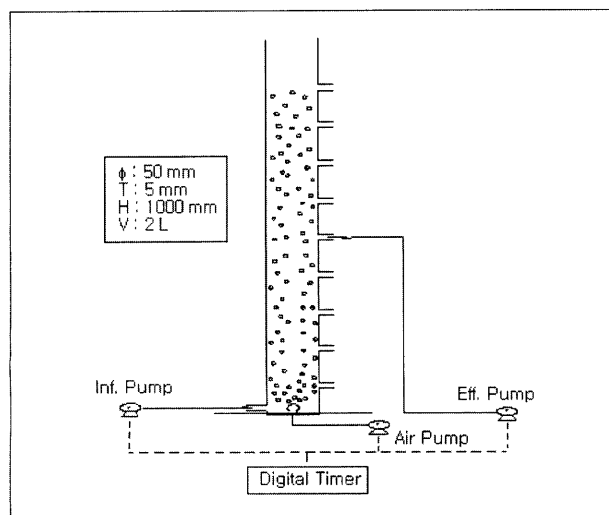


Fig. 1. Schematic diagram of lab-scale SBR for aerobic granulation sludge.

Table 1. Characteristics of domestic wastewater used in this study

Items	Concentration range (mg/L)	Average concentration (mg/L)
pH	6.4~7.4	7.2
COD _{Mn}	63~72	66.8
T-N	36~42	39.2
T-P	3.8~5.2	4.8
BOD	111~138	123.4
SS	132~178	150.6

두께 5 mm, 높이 1,000 mm로 유효용적 2 L의 SBR 장치를 사용했으며, 장치는 Fig. 1과 같다.

SBR 공정의 주기는 유입 4분, 폭기 230분, 침전 2분, 유출 4분으로 1주기를 총 4시간으로 구성하였다. 유입유량 대비 용량교환비는 60%로 정하였으며 칼럼하부의 공기공급 장치를 통하여 미세공기방울을 2 L/min(겉보기 상향류 공기속도 : 1.2 cm/s)의 속도로 주입하여 용존산소농도를 2 mg/L 이상으로 호기성 조건을 유지하였다.¹³⁾ 칼럼 하부로부터 10 cm 간격으로 샘플링 포트를 설치하여 시료를 채취하였으며 반응조 하부로부터 50 cm 높이의 포트에서 유출 펌프를 통해 유출수를 방류하였다. 유입유량 대비 수리학적 체류시간은 6.67시간이었다. 반응조 내 온도는 온도조절 장치를 이용하여 25℃로 유지하였으며 MLSS 8,000 mg/L로 실험장치에 투입하여 실험을 시작하였다.

2.2. 시료 및 분석

본 실험에 사용한 하수는 부산시 소재 S 하수처리장의 스크린을 통과한 하수를 채취하여 실험에 사용하였고, 시료의 분석은 전항목에 대하여 수질오염공정시험법¹⁴⁾과 Standard Method¹⁵⁾에 준하여 COD_{Mn}, T-N, T-P, ML(V)SS 등을 분석하였다. 연속회분식 장치실험을 통해 형성된 입상형태의 슬러지 특성을 파악하기 위해 건조중량과 부피를 이용하여 입자밀도, 디지털 줌 카메라와 화상분석기(image analysis : IA)를 이용하여 입자크기, 전극법에 의한 비산소소비율(specific oxygen utilization rate : SOUR), 침강속도, SVI 등을 분석하였다. 실험에 사용된 하수의 특성은 Table 1과 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 호기성 입상화 슬러지 형성

고분자 응집제만을 이용한 입상슬러지의 경우, 미생물과 부유물질의 단순한 가교역할을 수행하고 있어 반응조내에서 일정시간이 경과하면 플러키 해체되어 입상화의 의미를 감소시키므로, 이러한 단점을 극복하고 활성슬러지내의 미생물만의 결합체를 형성하기 위하여 이 등¹¹⁾의 연구에서와 같이 하수처리장의 반송슬러지에 응집제를 첨가하여 짧은 시간에 형성된 입상슬러지를 연속회분식 공정에 주입하여 호기성 입상화 슬러지를 형성하였다. 고분자 응집제를 이용

Table 2. Characteristics of aerobic granular sludge used in this study

Items	Value
Diameter (mm)	2~2.5
Settling velocity (cm/s)	1.3
Granular density (g/mL)	1.033
SVI (mL/g)	62
MLSS (mg/L)	8,000
MLVSS (mg/L)	6,200
SOUR (mg O ₂ /g MLVSS · hr)	346

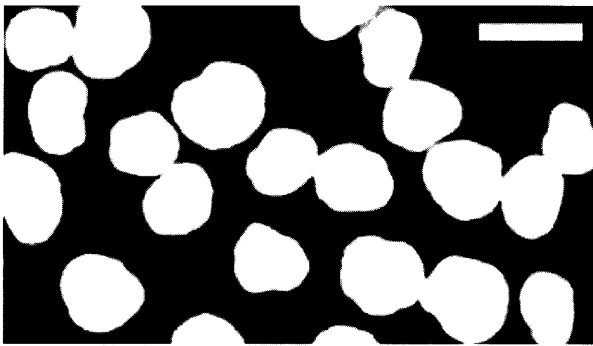


Fig. 2. Morphology of aerobic granule used in domestic wastewater treatment (bar = 2.5 mm).

하여 회분식 공정을 통한 입상화 슬러지의 특성을 Table 2에 나타내었으며, 화상분석기로 측정된 입자의 크기는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서와 같이 15일째부터 입자의 크기는 2~2.5 mm 정도를 유지하였고 침강속도는 1.3 cm/s, 밀도는 1.033 g/mL를 나타내었으며, MLVSS/MLSS 비는 0.78, SVI 값은 약 62 mL/g MLVSS로 고밀도 미생물군이 형성되었다. 활성슬러지 미생물은 대부분 그람 음성균으로 구성되어 있고 전체 활성슬러지 플럭 구조는 활성슬러지 미생물(주로 박테리아), 무기성 입자들(실리카이트, 칼슘, 인산염, 철 산화물 등), 세포 체외분비 고분자물질(EPS), 세포 파괴물(cell debris), 부유 고형물들로 구성되어 있다. 또한 EPS 물질과 무기성 입자들이 음전기적인 흡착부위(negative adsorption sites)를 제공하기 때문에 전체적으로 (-)전하를 띠고 있다. 이러한 활성슬러지에 3,000,000 이상의 분자량을 지닌 고분자 응집제를 주입하면 이 고분자 응집제가 개개의 박테리아, 무기성 입자들, 그리고 부유물질 형태의 유기물 입자들과 가교 역할을 수행하여 물리·화학적인 입상형태의 플럭을 형성하였기 때문이다. 본 연구의 경우 SBR 장치를 이용한 대부분의 실험^{4,5,12)}에서 60일~70일경에 1.5~3 mm 크기의 최종 호기성입자를 형성하는 것보다 상당히 빠른 시간에 입상화 및 안정화가 나타났다. 또한 입자의 크기가 증가할수록 미생물학적 활성을 표현하는 비산소 소비율(SOUR)이 증가하므로¹³⁾ 본 실험의 경우 346 mg O₂/g MLVSS · hr로 기존 호기성 입상화에 대한 연구결과^{13,16)} 200~300 mg O₂/g MLVSS · hr 정도의 값에 비해 높게 나타나므로 도시하수 및 산업폐수에 적용시 보다 향상된 COD 제거효율을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

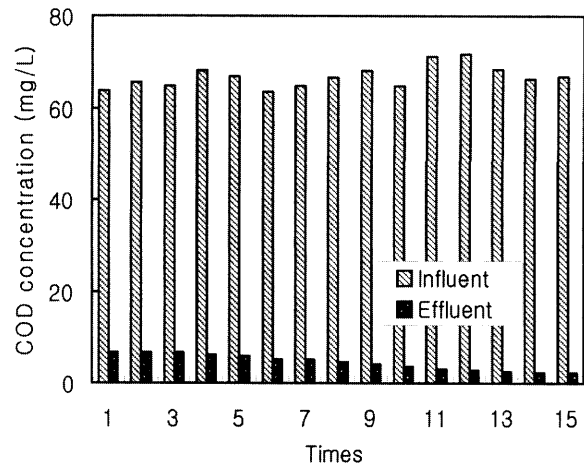


Fig. 3. Variation of COD_{Mn} in the SBR at HRT of 6.67 hr.

3.2. 호기성 입상화에 의한 유기물질 제거

호기성 입상화에 의한 유기물질 제거효율을 조사하기 위하여 부산시 소재 S 하수처리장의 하수를 이용하여 연속회분식 실험을 하였다. Fig. 3에서와 같이 유입하수의 COD_{Mn}는 63~72 mg/L의 범위를 나타내었고 유출수 COD_{Mn}는 2.2~6.8 mg/L로 COD 제거율은 89.4~95.6%로 나타났다. 호기성 입상화로 인해 입자의 크기가 커졌으며, 침강속도도 빨라졌다. 슬러지의 침강성 증가는 바이오매스 체류시간을 길게 할 수 있으며, 비산소 소비율의 상승으로 인해 미생물의 대사 활성도를 증가시켜 오염물질의 빠른 분해를 가능하게 한다.¹⁶⁾ Dorota와 Rusten 등^{17,18)}의 SBR 실험에서 COD 제거율이 67~79.6%, 도시하수에 대한 표준 활성슬러지 공법의 COD 제거율이 약 85% 정도이므로 본 연구의 호기성 입상화에 의한 유기물질 제거는 효과적임을 알 수 있다. 반응조내 MLVSS의 농도는 5,200~6,800 mg/L를 유지하였다.

3.3. 유기물질 제거속도 상수

생물학적 처리시스템에서 공정 내의 부유 고형물 형태의 유기물질은 생물학적 플럭을 형성하여 물리적 단위조작으로 제거되며, 콜로이드성 유기물질은 생물학적 플럭으로 응결되어 흡착제거된다. Tischler와 Eckenfelder¹⁹⁾ 등에 의해 제안된 활성슬러지 공정내의 혼합 유기물질 제거에 대한 전체적인 반응은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{dS}{dt} = kX_v \left(\frac{S}{S_0} \right)^n \quad (1)$$

식 (1)을 n = 1차 반응으로 가정하고 적분하면 다음과 같다.

$$\frac{S_e}{S_0} = e^{-\frac{kX_v t}{S_0}} \quad (2)$$

여기서, S₀ : 유입 COD 농도(mg/L)

S_e : 유출 COD 농도(mg/L)

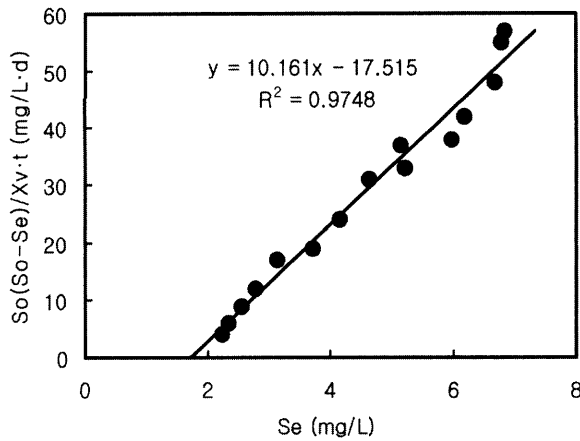


Fig. 4. Determination of removal rate coefficient for organic substrate.

X_v : 반응기내 MLVSS 평균농도(mg/L)
 t : 포기시간(day)
 k : 제거율 계수, 속도상수(day^{-1})

식 (2)은 회분식 생물-산화 공정을 설명한다. 완전혼합 반응조에서의 물질수지는 일정강도 폐수에 대해 다음과 같은 설계관계식으로 표현된다.²⁰⁾

$$\frac{S_0(S_0 - S_e)}{X_v t} = k S_e \quad (3)$$

속도상수 k 를 구하기 위하여 식 (3)을 이용한다. 속도상수 k 는 $S_0(S_0 - S_e)/X_v t$ 를 S_e 에 대해 도시한 직선의 기울기에서 구한다. 본 실험에서 얻은 자료값을 기준으로 속도상수 k 를 구하기 위해 나타낸 그림을 Fig. 4에 나타내었다.

$S_0(S_0 - S_e)/X_v t$ 와 S_e 의 상관관계를 도시하기 위하여 유기물질의 농도는 COD를 인자로 하여 실험하였다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 S_e 를 x축으로 $S_0(S_0 - S_e)/X_v t$ 를 y축으로 하여 그림을 도시하였더니 기울기가 10.161인 1차식의 형태를 나타내었고 상관관계(R)은 0.97이었다. 따라서, 호기성 입상화를 이용한 본 공정의 유기물질 제거속도 계수(k) 값은 10.161 d^{-1} 로 나타나므로 일반적 활성슬러지공정을 이용한 생활하수의 k 값이 5~8 d^{-1} 정도이므로²⁰⁾ 본 공정이 효과적임을 알 수 있었다.

3.4. 호기성 입자의 산소이용 및 슬러지 생산

생물학적 처리시스템 내의 총산소 필요량은 세포합성에 필요한 에너지를 제공하기 위해 소비된 산소와 내호흡에 의해 소비된 산소와 관계가 있다. 이것은 산소가 다음의 식에 의해 시스템에 공급되어야 할 산소요구량을 구할 수 있다.¹⁹⁾

$$R_r = a' S_r + b' x X_v + R_n + R_c \quad (4)$$

여기서, R_r : 총산소 이용량($\text{mg O}_2/\text{d}$)

a' : 세포합성을 위한 산소이용계수(이용된 $\text{mg O}_2/\text{제거된 유기물질 mg}$)
 S_r : 제거된 COD(mg/d)
 b' : 내호흡을 위한 산소이용계수(이용된 $\text{mg O}_2/\text{mg MLVSS} \cdot \text{d}$)
 x : MLVSS 중의 생물학적 분해가능한 분율
 X_v : 폭기조 내의 평균 MLVSS
 R_n : 암모니아를 질산으로 산화하는데 이용된 산소 ($\text{mg O}_2/\text{d}$)
 R_c : 순간 산소요구량 시험으로 측정된 COD ($\text{mg O}_2/\text{d}$)

COD 제거에만 산소가 이용된다고 하면 식 (4)는 다시 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{R_r}{x X_v} = a' \frac{S_r}{x X_v} + b' \quad (5)$$

식 (5)에 나타난 계수 a' 와 b' 는 비산소 섭취율 R_r/xX_v (이용된 $\text{mg O}_2/\text{mg MLVSS} \cdot \text{d}$) 대 COD 제거속도 S_r/xX_v 를 이용함으로써 결정할 수 있다.

총산소 이용량(R_r)은 DO 전극을 삽입하여 산소소비측정 장치를 통해 측정하였으며 생분해성 분율(x)은 0.7로 적용하였다. 비산소 섭취율 R_r/xX_v 대 COD 제거속도 S_r/xX_v 를 도시한 그림을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에 나타낸 그림과 같이 본 실험에서는 제거된 유기물질 mg 당 약 0.87 mg 의 O_2 가 세포합성을 위해 사용되었으며, 1 mg MLVSS 당 세포 내호흡을 위해 이용된 산소의 양은 0.11 mg 이었다. 따라서, 본 결과값을 이용하여 호기성 입상슬러지를 하수처리시설에 적용시 오염부하량에 따른 산소공급량을 결정할 수 있다.

생물학적 산화로부터 야기되는 생물학적 반응 시스템 내의 슬러지 축적은 세포의 합성, 유출수 SS에 기인하는 순슬러지, 생물학적으로 분해 불가능한 물질, 내호흡의 세포산화 등의 구성요소에 의해 결정된다. 폐기되는 생물학적

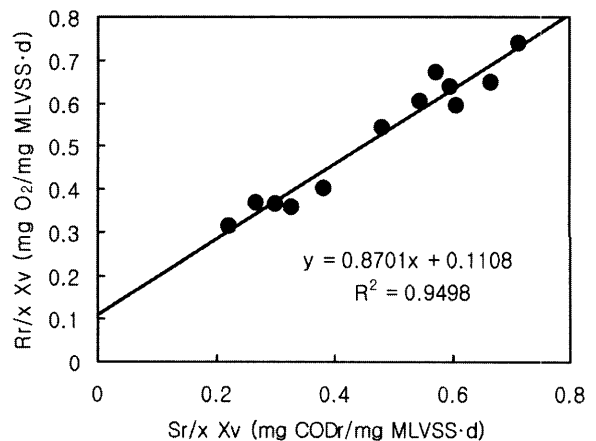


Fig. 5. Determination of oxygen utilization coefficient in this study.

휘발성 슬러지 생산량 ΔX_v 를 계산하기 위한 식은 아래와 같다.¹⁹⁾

$$\Delta X_v = a S_r - b x X_v \quad (6)$$

또한 총 잉여슬러지 생산량 ΔX 를 계산하기 위한 식은 아래와 같다.¹⁹⁾

$$\Delta X = f X_i + \frac{\Delta X_v}{f'} - X_e \quad (7)$$

- 여기서, ΔX_v : 잉여 생물학적 휘발성 슬러지 생산량 (mg VSS/d)
 a : 슬러지 합성계수(생산된 mg VSS/제거된 mg 유기물질)
 b : 슬러지 자산화계수(산화된 mg VSS/반응조 내의 mg MLVSS · d)
 ΔX : 총 잉여슬러지 생산량(mg SS/d)
 f : 유입수 부유 고형물의 생물학적 난분해성 분율
 X_i : 유입수 부유 고형물(mg SS/d)
 f' : 반응조 내의 MLSS의 휘발성 분율(mg MLVSS/mg MLSS)
 X_e : 유출수 부유고형물 (mg SS/d)
 x : MLVSS 중의 생물학적 분해 가능한 분율

생물학적 슬러지 생산만을 고려하고 유출수 부유고형물의 손실을 보정하면 다음과 같은 식이 완성된다.

$$\frac{\Delta X_v}{x X_v} = a \frac{S_r}{x X_v} - b \quad (8)$$

따라서, a와 b는 반응조 내의 슬러지 생산량 $\Delta X_v/x X_v$ (생산된 mg VSS/mg MLVSS · d) 대 반응조 내의 COD 제거 속도 $S_r/x X_v$ (제거된 mg COD/mg MLVSS · d)를 이용함으로써 구할 수 있다.

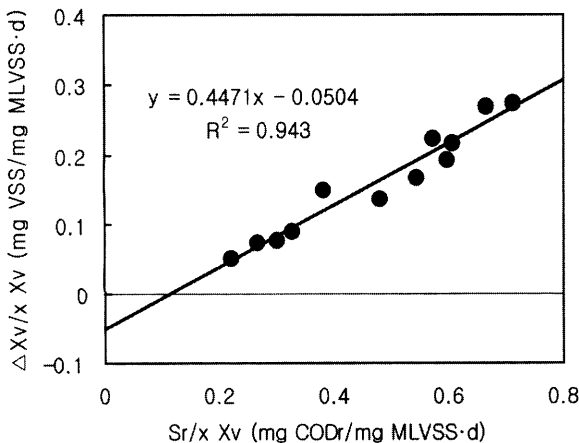


Fig. 6. Determination of sludge product coefficient in this study.

반응조로부터 잉여슬러지의 VSS량을 측정하고 식 (8)을 이용하여 슬러지 합성계수(a)와 슬러지 자산화 계수(b)를 도출한 그림을 Fig. 6에 나타내었다.

$\Delta X_v/x X_v$ 대 $S_r/x X_v$ 를 축으로 하여 도시한 Fig. 6에 나타난 바와 같이 슬러지 합성계수(a)는 0.45 mg VSS 생산/제거된 mg 유기물질을 나타내었고, 슬러지 자산화 계수(b)는 0.05 mg VSS 산화/반응조내의 mg MLVSS · d를 나타내었다. 일반적인 활성슬러지공정을 이용한 생활하수의 슬러지 합성계수 값이 COD를 기준으로 0.25~0.4 mg VSS/mg COD, 정도이므로²⁰⁾ 본 공법의 값이 0.45로 나타나 기존공법과 유사한 미생물 성장율을 보였으며, 자산화 계수는 비교적 낮은 값으로 나타나므로 미생물의 사멸율은 낮은 것을 알 수 있다.²¹⁾

4. 결론

본 연구에서는 고분자 응집제를 이용하여 짧은 시간에 형성된 입상형태의 슬러지를 연속회분식 장치에 주입하여 미생물의 호기성 입상화의 특성을 향상시켰으며, 제조한 입상화 슬러지를 하수에 적용하여 유기물제거에 대한 설계인자를 도출한 결과 다음과 같다.

- 1) 유입하수 COD 63~72 mg/L에 대한 유기물 제거속도 계수 k는 10.161 d⁻¹로 나타났다.
- 2) 제거된 유기물질 1 mg 당 0.87 mg의 O₂가 세포합성을 위해 사용되었으며, 1 mg MLVSS 당세포 내호흡을 위해 이용된 산소의 양은 0.11 mg이었다.
- 3) 슬러지 합성계수는 0.45 mg VSS 생산/제거된 mg 유기물질을 나타내었고, 슬러지 자산화 계수는 0.05 mg VSS 산화/반응조내의 mg MLVSS · d로 나타났다.
- 4) 따라서, 수식화된 생물학적 동력인자를 이용하여 여러 운전 변수가 폐수처리에 미치는 영향을 정성적 내지 정량적으로 비교 평가한다면 폐수처리시설 설계 및 운전엔 필요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

KSEE

참고문헌

1. Mosbach, K. and Mosbach, R., "Entrapment of Enzymes and Microorganisms in Synthetic Cross-linked Polymers and their Application in Column Techniques," *Acta Chem. Scand.* 20., 10, 2807~2810(1966).
2. Barber, J. B. and Veenstra, J. N., "Evaluation of biological sludge properties influencing volume reduction," *J. Water Pollut. Control. Fed.*, 58, 149~156(1986).
3. Higgins, M. J. and Novak, J. T., "Dewatering and settling of activated sludge : The case for using cation analysis," *Water Environ. Res.*, 69, 225~232(1997).

4. Yang, S. F., Liu, Q. S., Tay, J. H. and Liu, Y., "Growth kinetics of aerobic granules developed in sequencing batch reactors," *Let. Appl. Microbiol.*, **38**, 106~112(2004).
5. Beun, J. J., Hendriks, A., Morgenroth, E., Wilderer, P. A. and Heijnen, J. J., "Aerobic granulation in a sequencing batch reactor," *Water Res.*, **33**, 2283~2290(1999).
6. Schwarzenbeck, N., Erley, R., and Wilderer, P. A., "Aerobic granular sludge in an SBR-system treating wastewater rich in particulate matter," *Water Sci. Technol.*, **49**, 21~46(2004).
7. Zheng, Y. M., Yu, H. Q. and Sheng, G. P., "Physical and chemical characteristics of granular activated sludge from a sequencing batch airlift reactor," *Proc. Biochem.*, **40**, 645~650(2005).
8. Liu, Y., Wang, Z. W., Qin, L., Liu, Y. Q. and Tay, J. H., "Selection pressure-driven aerobic granulation in a sequencing batch reactor," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **67**, 26~32(2005).
9. 조용덕, 이상화, 김영일, "무산소 활성오니공정을 이용한 판지공장 폐수처리의 동력학적 해석 및 설계분석," 대한환경공학회지, **28**(10), 1090~1097(2006).
10. 배우근, 배재호, 양지원, 생물환경공학, 동화기술, pp. 345~716(2002).
11. 이봉섭, 최성우, "연속회분식 장치에서 응집제를 이용한 호기성 입상슬러지 생성 및 특성", 대한환경공학회지, **31**(12), 1143~1150(2009).
12. Liu, L., Wang, Z., Yao, J., Sun, X. and Cai, W., "Investigation on the formation and kinetics of glucose-fed aerobic granular sludge," *Enzyme Microb. Technol.*, **36**, 712~716(2005).
13. Qin, L., Tay, J. H. and Liu, Y., "Selection pressure is a driving force of aerobic granulation in sequencing batch reactors," *Proc. Biochem.*, **39**, 579~584(2004).
14. 환경부, 수질환경오염공정시험법, 환경부고시 제2009-9호(2009).
15. APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th edition, American Public Health Association, Washington DC. USA(1998).
16. Tay, J. H., Liu, Q. S. and Liu, Y., "The effect of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **57**, 227~233(2001).
17. Dorota, K., Ewa, K. and Drzewicki, A., "BOD₅ and COD removal and sludge production in SBR working with or without anoxic phase," *Bioresour. Technol.*, **98**, 1426~1432(2007).
18. Rusten, B. and Eliassen, H., "Sequencing batch reactors for nutrient removal at small wastewater treatment plants," *Water Sci. Technol.*, **28**, 233~242(1993).
19. Tischler, L. F. and Eckenfelder, W. W., "Linear substrate removal in the activated sludge process," *Advances in Water Pollution Research*. Pergamon, Oxford(1969).
20. 조영일, 이수구, 선용호, 박철휘, 권재혁, 산업폐수처리공학, 동화기술, pp. 235~237(2002).
21. Domey, W. R., "Design parameters and performance of biological systems for textile plant effluent," *Proc.*, 28th Prudue Ind., Waste Conf., 438(1973).