미생물 촉매제를 이용한 슬러지 감량화에 관한 연구 A Study on Sludge Reduction in Sewage using Microbial Catalysts

신동철 · 양은지 · 이연구* · 박철휘[†]
Dong-chul Shin · Eun-ji Yang · Yun-koo Lee* · Chul-hwi Park[†]

서울시립대학교 환경공학과 · *SKC
Department of Environmental Engineering, University of Seoul · *SKC Co.

(Received January 5, 2018; Revised February 19, 2018; Accepted February 27, 2018)

Abstract : In this study, evaluation of sludge reduction and advanced treatment were performed using the batch test. Sludge reduction rate was checked by batch experiment on excess sludge and aerobic sludge. The maximum sludge reduction rate was 37% for excess sludge and 34% for aerobic sludge. As a result of the batch process, the SCOD_{Cr} 26%, S-N 62% and S-P 82% were removed. Therefore, it is possible to reduce the amount of sludge during the microbial catalyst injection and to remove the organic matter and nutrients simultaneously. In particular, the removal efficiency of S-P is higher than that of the conventional treatment. Especially, the removal efficiency of S-P was higher than that of conventional A₂O treatment. In order to evaluate sludge reduction ability after microbial catalytic agent injection, the yield of heterotrophic biomass (Y_H), decay coefficient of heterotrophic biomass (b_H) and observed or net biomass yield (Y_{obs}) were estimated. The yield of Y_H was 0.32 and 0.25, which was less than 50% of the Y_H (BOD based) value of general heterotrophic microorganisms. On the other hand, b_H was 0.232 day⁻¹, which is a general value. Therefore, it is considered that the main factor of sludge reduction using microbial agent is due to the decrease of biomass build-up rather than the death of sludge microorganisms.

Key Words : Microbial Catalyst, Microbial Activity, Sludge Reduction, Advanced Treatment

요약 : 본 연구는 batch-test를 통해 미생물 촉매제의 적정 주입량을 산정하고 슬러지 감량화에 대하여 검토하였다. 잉여슬러지와 호기조 슬러지를 대상으로 batch 실험을 통해 슬러지 감량화율을 확인하였으며 잉여슬러지는 최대 37%, 호기조 슬러지 최대 34%의 슬러지 감량화율을 나타내었다. Batch test를 통하여 고도처리 효율을 산정한 결과 SCOD_{Cr} 26%, S-N 62%, S-P 82% 제거되었다. 따라서 미생물 촉매제 주입 시 슬러지 감량화가 가능하고 유기물 및 영양염류의 동시제거가 가능한 것으로 나타났으며 특히 S-P의 경우 기존 처리공정의 인 제거효율보다 높은 제거효율을 보였다. 미생물 촉매제 주입 이후 슬러지 감량능을 평가하기 위하여 종속영양미생물 생산계수(Y_H), 종속영양미생물 사멸계수(b_H), 미생물 생산계수(Y_{obs})의 산정을 통해 분석하였다. Y_H 산정결과 0.32, 0.25으로 나타났으며 일반적인 종속영양미생물의 Y_H (BOD based) 값의 50% 이하의 값을 보였다. 반면에 b_H 는 0.232 day⁻¹로 일반적인 수치를 보여 미생물 촉매제를 이용한 슬러지 감량의 주 요인은 슬러지 미생물의 사멸이 아닌 증식 저하에 따른 것이라 판단된다.

주제어 : 미생물 촉매제, 미생물 활성도, 슬러지 감량화, 고도처리

1. 서론

물 사용량 증가에 따라 생활하수 및 폐수 발생량이 증가되고 이에 따라 방류수 수질기준 강화 및 하수슬러지의 발생량이 지속적으로 증가하고 있다.³⁾ 그러나 슬러지 처리·처분에 관한 규제가 지속적으로 강화되고 이로 인한 비용이 증가되고 있는 실정이다. 1996년 발효된 런던협약이 2011년부터 시행됨에 따라 슬러지의 해양투기가 전면 금지되었고 전량 육상처리를 실시하고 있다. 육상처리는 악취민원, 높은 처리비용, 매립지 공간 확보 등의 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점으로 인하여 슬러지 감량화가 대두되고 있는 실정이다.

슬러지 감량화는 크게 OSA(Oxic Settling Anaerobic) 공정과 같이 생산단계부터 감량화하는 방법과 슬러지 처리과정에서 초음파, 오존, 전기분해 등으로 전처리하여 감량화 방법, 소화조 내에서 미생물의 대사과정을 이용한 감량화

방법으로 나뉜다.⁴⁻⁷⁾ 그러나 공정구성을 이용한 방법은 운영 중인 하수처리시설에 적용하기에 한계점이 존재하며, 전처리를 이용한 방법의 경우 초기투자비용 및 유지관리비용이 과다하게 소요되는 단점이 있다. 또한 소화조는 대규모 하수처리장 이외에는 설치가 어렵기 때문에 저렴하고 2차적 오염이 없는 방법이 필요하다. 미생물 촉매제는 수계내 존재하는 미생물의 활성을 촉진시켜 슬러지를 감량화하는 방법으로 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 생물학적 폐수처리에 이용되는 미생물의 활성도를 높이기 위해 미생물 촉매제를 주입하고 미생물 촉매제를 통한 하·폐수 고도처리 및 슬러지 감량화에 대한 연구를 진행하고자 한다. 미생물 촉매제의 특성을 분석하기 위하여 미생물 촉매제의 주입량 및 주입조건의 산정, 미생물 촉매제의 유·무에 따른 슬러지 감량화 실험 등을 통해 미생물 촉매제의 처리효율 및 미생물 촉매제 주입 시의 제거효율을 분석하였다. 슬러지 감량화 가능성 평가

[†] Corresponding author E-mail: chpark@uos.ac.kr Tel: 02-6470-2863 Fax: 02-2244-2245

를 위하여 종속영양미생물 생산계수(Y_H), 종속영양미생물 사멸계수(b_H), 미생물 생산계수(Y_{obs})의 산정을 통해 분석하였다.

2. 연구방법

미생물 촉매제를 이용한 슬러지 감량능 평가 및 미생물 활성도를 측정하기 위해 동역학적인 계수에 대한 평가를 진행하였다. 미생물의 수율을 결정하는 종속영양미생물의 생산계수(Y_H)와 미생물의 life cycle 중에서 미생물의 사멸로 인한 영향을 알아보기 위하여 종속영양미생물의 사멸계수(b_H)를 측정하였다. 하수와 슬러지는 반응조의 F/M 비를 고려한 실험환경을 조성하여 실시하였다.

2.1. 미생물 촉매제 주입량 산정

미생물 촉매제는 Bio-organic Catalyst사의 촉매제를 이용하였으며 주요 특징으로는 특수한 바이오 계면 활성제(화합 및 생물학적 산물)로써 무독성 · 생분해성 제제로 황색계열의 액상형태로 다양한 물질과 작용할 수 있고 안정적이며 박테리아나 효모가 첨가되지 않은 상정액이다. 미생물 촉매제는 유기안정제 및 미네랄이 함유되어 있어 하 · 폐수처리 공정 내에 자연적으로 존재하는 미생물들의 유기물 분해능력을 증진시키며 박테리아의 분해속도를 가속화시킨다. 미생물 촉매제의 작용과정을 Fig. 1에 간략하게 나타내었다.

미생물 촉매제 주입량 산정은 batch test로 진행하였으며 대상 슬러지는 서울시 J 물재생센터(A2O 공법)의 잉여슬러지 및 호기조내 슬러지를 대상으로 하였다. 원수의 BOD 100 mg/L당 미생물 촉매제 주입량을 1 mL/L 기준으로 실험을 진행하였다. 원수 내에 미생물 성장과 관련된 유기물(BOD)이 존재하고 미생물이 BOD값으로 산출되기 때문에 BOD 기준으로 미생물 촉매제의 주입량을 선정하였으며, 슬러지 발생량을 SS와 유량으로 산정하기 때문에 SS 제거율을 기준으로 최적화를 평가하였다.

잉여슬러지 2 L를 기준으로 각 반응조 별 주입량(Table 1, Table 2)을 주입하여 4시간 동안 교반 후 시간별 슬러지 감량화 효율 실험을 실시하였다. 또한 미생물 촉매제의 특징

Table 1. Experimental conditions (excess sludge)

Reactor	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Injection dosage (mL/L)	Control	20	50	60	78	100	120

Table 2. Experimental conditions (aerobic sludge)

Reactor	B1	B2	B3	B4	B5
Injection dosage (mL/L)	Control	25	30	35	40

을 추가적으로 분석하기 위하여 미생물 촉매제 주입 전 · 후의 유기물 및 영양염류를 분석하여 고도처리 효율을 평가하였다.

2.2. 종속영양미생물 생산계수(Y_H) 산정

유입 하수(Table 3)를 대상으로 GF/C 여과지로 여과시켜 여액을 준비하였다. 반응조 내 질산화 방지를 위해 Allythiourea (ATU)를 20 mg/L로 주입한 후 5분간 혼합시켰다. SRT가 10일로 운전 중인 공정의 슬러지를 이용하여 증류수로 4~5회 정도 세척시킨 후 2시간 이상을 폭기시켜 잔류되고 있는 유기물에 대한 영향을 받지 않도록 하였다. 준비된 하수 여액과 슬러지는 반응조의 호기조 F/M 비인 0.3이 되도록 혼합하였다. 실험은 온도 20℃와 pH 중성범위로 설정하여 진행하였다. Y_H 산정 실험은 3시간 동안 20분 간격으로 시간에 따라 소모되어진 TCOD와 생성된 biomass COD (BCOD)의 농도를 측정하여 용존 COD (SCOD)의 농도를 계산하여 Y_H 를 산출하였다.

Table 3. wastewater concentration

	COD	BOD	T-N	T-P	SS
Concentration (mg/L)	501.33	150.12	106.90	1.185	130.39

2.3. 종속영양미생물 사멸계수(b_H) 산정

본 실험에서는 OUR(Oxygen Uptake Rate)을 통해 b_H 값을 산출하였다. 측정장치는 N-con사의 Comput-ox respirometer 4R을 사용하였다. Water-bath에 적절한 온도조건을 설정하고 500 mL bottle에 시료를 침지시킨 후 시간에 따라 소모

Fig. 1. Process of microbial catalyst.

되어진 용존산소의 양을 분석하였다. 슬러지와 혼합된 하수는 GF/C 여과지로 여과시켜 사용하였으며 질산화 방지를 위해 Allythiourea를 20 mg/L를 주입한 후 5분간 혼합하였다. 실험에 사용된 슬러지는 증류수를 사용하여 4~5회 정도 세척시킨 후 2시간 이상 폭기시켜 슬러지 내에 잔류하고 있는 유기물의 영향을 최소화 시키고자 하였다. 준비된 하수 여액과 슬러지는 반응조의 호기조 F/M비인 0.3이 되도록 혼합하여 OUR 실험용 bottle에 주입하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 미생물 촉매제 주입량 산정 결과

잉여슬러지를 대상으로 미생물 촉매제의 최적주입량 산정을 분석한 결과 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 초기 2시간까지는 A6가 대조군 대비 20.3%로 가장 좋은 SS 제거율을 보였으나 3시간 이후로는 A5 (BOD 100 mg/L 기준 1 mL/L)가 가장 높은 SS 제거율인 36.9%를 나타내었다. 대조군인 A1의 경우 내생호흡에 의한 자산화로 인하여 SS 제거율이 3.4%로 나타내었다. 이를 감안하여 재산정하면 34.7%로 최대 SS 제거율을 구할 수 있었다. A6와 A7의 경우 일정시간 이후 거품이 발생하여 과다 주입 시 문제점을 발견되어 추후 본 미생물 촉매제가 적용될 경우 적정 주입량 산정이 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 2. SS concentration with excess sludge using catalyst.

Fig. 3. SS concentration with aerobic sludge using catalyst.

실제 미생물 촉매제 주입지점인 호기조 내 슬러지 대상 실험은 잉여슬러지 실험결과를 토대로 총 5개 반응조로 실험을 진행하였다. 잉여슬러지와는 대조군인 B1은 SS 변화가 거의 없었으며 B3~B5의 SS 제거율이 유사하게 나타났다. 최적 주입율인 B3 (BOD 30 mg/L 기준 1 mL/L)는 초기 1시간일 때 1.3%의 제거율에서 5시간 후 최대 33.8%의 제거율을 보였다.

미생물 촉매제 주입에 따른 생물반응조 내 수질변화를 분석한 결과 Fig. 4~Fig. 6와 같이 나타났다. 대조군인 B1의 경우 SCOD_{Cr} 9.3%, S-N 8.6%, S-P 21.1% 저감되었으나 미생

Fig. 4. SCOD_{Cr} concentration using catalyst.

Fig. 5. S-N concentration using catalyst.

Fig. 6. S-P concentration using catalyst.

물 촉매제 주입 후 $SCOD_{Cr}$ 은 23.9%~25.6%, S-N 39.3%~61.6%, S-P 70.4%~82.4%로 제거율이 대폭 증가하였다. 이는 미생물 촉매제의 가장 큰 특징으로 유기물 분해능력 및 박테리아의 분해능력이 향상된 것에서 기인한다고 판단된다. 특히 B3(30 mL/L)의 경우 4시간 후 S-P의 농도가 5.14 mg/L에서 0.961 mg/L로 제거되었으며 S-N의 농도는 27.11 mg/L에서 10.41 mg/L로 제거되었다. 이러한 결과는 하수처리장 내 총인처리시설의 약품비 절감 및 향후 방류수 수질 기준(T-N)이 강화될 경우 도움 될 것으로 보인다.

3.2. 종속영양미생물 생산계수(Y_H) 산정

미생물 촉매제가 주입된 호기조에 대한 Y_H 의 실험 결과를 Fig. 7와 Fig. 8에 나타내었다. 식 (1)과 같이 BOD와 SCOD의 관계로 Y_H 를 구하며 총 2회 실험으로 1차 Y_H 는 0.32, 2차 Y_H 는 0.25의 값을 보였으며 이론적인 Y_H 값인 0.40(COD based)의 20% 낮게 나타났으며 BOD 기준의 Y_H 값인 0.67보다 50% 이하로 나타났다. 일반적인 Y_H 실험은 SCOD는 지속적으로 감소하면 BOD는 증가하는 반비례 관계를 나타내지만 본 연구의 경우 SCOD는 감소하나 BOD는 일정하게 유지되었다. 이는 미생물 촉매제 주입으로 인하여 미생물의 내생호흡이 이루어짐을 간접적으로

확인할 수 있다.

$$Y_H = \frac{\Delta BOD}{\Delta SCOD} \quad (1)$$

기존 슬러지 감량화와 관련된 공법인 OSA공법의 Y_H 값 범위인 0.13~0.29 kg SS/kg COD와 비교하면 유사한 값을 나타냈다¹⁾. OSA공법은 침전지 후단에 혐기조를 두어 반송되는 미생물의 luxury uptake를 유도하여 슬러지 감량화가 되는 반면에 본 연구는 기존 공정의 호기조에 미생물 촉매제를 주입하여 슬러지 감량화를 이루어지기 때문에 기존의 운영 중인 하수처리장에 손쉽게 적용 가능할 것으로 보인다.

3.3. 종속영양미생물 사멸계수(b_H) 산정

b_H 는 일정한 시간 동안 소모된 산소의 양을 측정하여 산정한다. 미생물 촉매제의 주입 전·후를 비교하기 위하여 두 가지를 대상으로 측정하였으며 그 결과는 Fig. 7(a)에 나타난 바와 같다. 미생물 촉매제를 주입한 경우 주입하지 않는 경우보다 초기 6시간까지 약 2배의 산소 섭취율을 보였다. 이는 미생물 촉매제에 의하여 미생물의 분해 능력이 증가한다는 것을 알 수 있다.

(a) 1st

(b) 2nd

Fig. 7. Estimating of Y_H using $\Delta BOD/\Delta SCOD$.

(a) OUR curve

(b) ln OUR curve

Fig. 8. catalyst with activated sludge for b_H .

Fig. 7(b)는 초기 1시간을 제외한 구간(감소구간)에 대하여 OUR 값을 자연로그 취하여 선형화한 그래프의 기울기로 b_H 를 산정하게 된다. 여기서 산정된 b'_H 을 식 (2)에 대입하여 b_H 를 산출하게 된다.

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

b_H : Decay coefficient for heterotrophic biomass
 f_p : Fraction of biomass leading to particulate products
 Y_H : Yield coefficient for heterotrophic biomass
 b'_H : Heterotrophic decay coefficient in traditional model

이때 f_p 의 값은 세포의 비활성 물질을 20%로 가정하여 일반적인 값인 0.08로 산출하였다.²⁾ 일반적인 슬러지의 사멸계수(b_H)는 0.24 ~ 0.43 day⁻¹으로 평균 0.32 day⁻¹이며 본 연구에서 산출된 사멸계수(b_H)는 0.21 day⁻¹과 0.23 day⁻¹으로 Ekama⁸⁾와 IWAPRC의 ASM No.1¹⁰⁾에서 제시된 0.24 day⁻¹과 같은 수치를 보였다.

3.4. 실제 미생물 생산계수(Y_{obs}) 산정

Y_{obs} (Observed heterotrophic yield coefficient)는 미생물의 최대증가량과 감소되어진 기질의 비율로 정의할 수 있으며, 다음의 식 (3)과 같다.

$$Y_{obs} = \frac{\Delta X_{max}}{\Delta S} \quad (3)$$

중속영양미생물의 생산계수(Y_H), b_H , SRT를 이용한 다음의 식(6)을 통해서도 나타낼 수 있다.⁹⁾

$$Y_{obs} = Y_H \cdot \frac{1}{1 + SRT \cdot m_s \cdot Y_H} \quad (4)$$

$$Y_{obs} = Y_H \cdot \frac{1}{1 + SRT \cdot k_e} \quad (5)$$

$$Y_{obs} = Y_H \cdot \frac{1}{1 + SRT \cdot b_H \cdot (1 - (1 - f) \cdot Y_H)} \quad (6)$$

b_H : Decay rate
 f : Fraction of inert material formed during decay/lysis (endogenous residue)
SRT : Solid retention time
 Y_H : Yield coefficient
 K_e : Endogenous respiration
 m_s : maintenance coefficient

앞서 구한 Y_H 와 b_H 를 대입하여 Y_{obs} 를 구한 결과 Table 4

Table 4. Biokinetic parameters estimation (aerobic sludge)

Experiment	SRT (day)	Y_H (mgCOD/mgCOD)	b_H (day ⁻¹)	Y_{obs} (day ⁻¹)
1 st	10	0.32	0.23	0.121
2 nd		0.25	0.21	0.095

에 나타내었으며 이때, SRT는 10일로 적용하였다. 산출된 Y_{obs} 값은 0.121과 0.095로 나타났으며 이러한 값은 이론적인 생산수율 값인 0.67의 18%와 15%에 해당하는 값이다. 따라서 결론적으로 미생물 촉매제 주입으로 인한 생산수율 Y_H 는 약 0.108임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 미생물 촉매제 주입에 따른 슬러지 감량화에 대하여 중속영양 미생물의 생산계수, 사멸계수 등을 산정하여 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Batch test를 통하여 SS 33.8%, SCOD_{Cr} 25.6%, S-N 61.6%, S-P 82.4%가 제거되었다. 미생물 촉매제 주입 시 하폐수 내 박테리아의 영양원이 증가하여 유기물 및 영양염류의 제거가 향상된 것으로 보인다. 미생물 촉매제 주입시 슬러지 감량화 뿐만 아니라 고도처리에도 효과적일 것으로 판단된다.

2) 미생물 촉매제 주입 후 동역학 계수의 산정을 통해 일반적으로 carbon source를 기질로 하는 중속영양미생물의 생산계수(Y_H) 및 사멸계수(b_H)를 분석하였다. Y_H 산정결과 0.32, 0.25으로 나타났으며 일반적인 중속영양미생물의 Y_H (BOD based) 값의 50% 이하의 값을 보였다. 반면에 b_H 는 0.232 day⁻¹로 일반적인 수치를 보여 미생물 촉매제를 이용한 슬러지 감량의 주요인은 미생물 촉매제가 미생물의 활성을 촉진하여 물질대사에 대부분의 에너지를 소모함으로써 증식이 상대적으로 감량화되는 효과가 있는 것으로 판단된다.

미생물 촉매제를 주입함에 따라 슬러지 감량화 효과가 있다는 것을 본 연구를 통해 확인하였다. 그러나 본 연구는 batch test로 진행을 하였기 때문에 다양한 공법에 따른 정확한 감량화 효과는 연속식 실험을 통하여 추가 검증이 필요할 것이다.

KSEE

References

- Nam, D.-H., Jang, H.-S., et. al., "Evaluation of Excess Sludge Reduction in the OSA Process using Kinetic Parameter and Mass Balance," *J. Korean Soc. Water Qual.*, **25**(4), 530~538 (2009).
- Park, J.-B., Hur, H.-W., et. al., "Assessment of the Organic and Nitrogen Fractions in the Sewage of the Different Se-

- wer Network Types by Respirometric Method,” *Korean Soc. Environ. Eng.*, **31**(8), 349~654(2009).
3. Fall, C., Silva-Hernandez, B. C., et. al., “Sludge reduction by ozone: Insights and modeling of the doseresponse effects,” *J. Environ. Manage.*, **206**, 103~112(2018).
 4. Brooks, R. B. and Gard, I., “Heat treatment of activated sludge,” *Wat. Poll. Control*, **67**, 592~601(1968).
 5. Frolund, B. T., Grie, P. and Nielsen, H., “Enzymatic activity in the activated-sludge floc matrix,” *Appl. Micro. Biotechno.*, **43**, 755~761(1995).
 6. Chen, G. H., An, K. J., et. al., “Possible cause of excess sludge reduction in an Oxidic-Settling-Anaerobic activated sludge process (OSA process),” *Water Res.*, **37**(16), 3855~3866(2003).
 7. Wang, Z., Yu, H. G., et. al., “Recent advances in membrane bio-technologies for sludge reduction and treatment,” *Bio-technol. Adv.*, **31**, 1187~1199(2013).
 8. Ekama, G. A., Dold, P. L. and Marais, G. V. R., “Procedures for determining influent COD fractions and the maximum specific growth rate of heterotrophs in Activated sludge system,” *Water Sci. and Technol.*, **18**, 91~114(1986).
 9. van Loosdrecht and Henze, “Activated sludge model No.2D, ASM2D,” *Water Sci. and Technol.*, **39**(1), 165~182(1999).
 10. APHA, AWWA and WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Ed., Washington, DC(1999).