

## 생물학적 하·폐수 처리 공정에서 생물촉진제 첨가의 영향

이석헌 · 정진영 · 박기영<sup>\*,†</sup>

한국과학기술연구원 수질환경 및 복원 연구센터  
<sup>\*</sup>건국대학교 사회환경시스템공학전공/차세대환경기술센터

### Effects of Bio-stimulant Addition on Biological Wastewater Treatment Processes

Lee, Seockheon · Jung, Jin Young · Park, Ki Young<sup>\*,†</sup>

Water Environment & Remediation Research Center, Korea Institute of Science and Technology

<sup>\*</sup>Department of Civil & Environmental System Engineering and iETC, Konkuk University

(Received 14 April 2005, Accepted 18 May 2005)

#### Abstract

The enzyme Xeronine was investigated as a microbial activating substance in biological wastewater treatment processes. Xeronine as bio-stimulant was injected in the anaerobic sludge and the activated sludge treating wastewater in order to examine the effect of hidden benefits. Bio-stimulant did not show significant improvement of anaerobic treatability. In the aerobic system, higher bio-stimulant dose condition resulted in slightly more removal of nitrogen and phosphorus. Floc aggregation and zone settling velocity as solid-liquid separation factors in activated sludge systems was enhanced by bio-stimulant. Effects of bio-stimulants injection on improvement of water quality and microbial activity did not clear in terms of normal operation conditions.

**keywords** : Biological treatment, Bio-stimulant, Methane production, Microbial activity, Settleability

## 1. 서론

하·폐수처리 및 슬러지처리에 가장 많이 이용되고 있는 것은 미생물에 의한 생물학적 처리 공법이다. 활성슬러지 공법은 하수처리에 가장 폭넓게 적용되고 있는 공정으로 폭기조에서 미생물에 의하여 오염물을 산화시키고 침전지에서 고액분리가 일어난다. 또한 고농도 폐수 및 슬러지 처리에서는 혐기성 처리 공법이 일반적으로 이용되어 왔다 (Metcalf and Eddy, Inc., 2003). 이 때 가장 중요한 역할을 하는 미생물의 건강 또는 활성은 산화속도라든지 바이오매스의 성장과 생산 및 바이오매스와 처리수의 분리에 영향을 미치므로 성공적인 공정의 운영을 위해서 미생물의 성장촉진은 매우 중요 인자 중의 하나라고 할 수 있다.

생물 또는 미생물 촉진제 주입기술은 세균의 성장에서 영양관계에 변화를 줌으로써 미생물을 활성화시키는 방법이다(Singh et al., 2001). 그동안 다양한 형태의 생물촉진제를 사용하여 미생물의 성장등의 촉진을 통하여 생물처리시스템의 변화를 준 연구가 있었다(Kumar et al., 1987; Singh et al., 2001; Parker, 1996). Kumar 등(1987)에 따르면 축산폐기물의 혐기성 소화시 목탄(charcoal)의 주입은 가스생산량을 크게 증가시킨다고 한다. 이러한 하·폐수

미생물의 촉진제 중 식물로부터 추출된 몇 가지 천연 스테로이드성 촉진제가 하·폐수처리의 미생물에 성공적으로 적용되어 왔다고 한다(Singh et al., 2001).

Heinicke(1977)은 식물로부터 추출된 천연 효소인 제로닌(Xeronine)은 분자량 413-518의 물질로서 동물이나 식물의 세포를 활성화시키고 하·폐수의 혐기성 처리에서 세포성장 촉진제로 상당한 효과가 있다고 보고하였다. 그 후 제로닌은 하수처리시설, 산업폐수처리시설 및 축산폐기물산화지 등에 적용되어, 수지제거 및 냄새제거 등에 효과가 있었다(Parker, 1996). 특히 미생물 처리시설의 고형물 발생량을 크게 감소시키는 것으로 보고 되고 있다(Sorber et al., 1994; Miller et al., 1996).

본 연구에서는 혐기성 처리법 및 호기성인 활성슬러지 공정에 미치는 제로닌과 같은 생물촉진제의 영향을 살펴보고 유입수로 실제 생활하수를 사용한 활성슬러지법에서 처리효율 및 공정운영의 영향인자에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 혐기성 실험

혐기성 회분식 실험은 크게 Biological Methane Potential (BMP)시험과 Anaerobic Toxicity Assays(ATA)로 대별할 수 있으며, BMP는 혐기성 상태에서 혐기성 분해 가능한

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
kypark@konkuk.ac.kr

유기물의 잠재적인 메탄발생량을 조사하는 것이고 ATA는 중금속, 유독화학물질, H<sub>2</sub>S 등의 저해물질이 존재할 때의 메탄균의 활성도를 조사하는 것이다. 본 실험에서는 ATA의 변법으로서 기지의 기질농도를 첨가한 혐기성 회분식 실험에서 미생물 활성제로 알려진 Xeronine을 단계적 또는 연속적으로 첨가하여 메탄발생량과 총가스 발생량을 비교·평가하고자 하였다.

Table 1과 같이 혐기성 회분식 실험에서 0.5, 1, 3 ppm으로 첨가하여 아세트산을 기질로 한 메탄생성균의 활성도의 평가와 복합기질인 탈지분유(skimmed milk)를 첨가하여 총 혐기성 미생물의 활성도를 평가하였다.

식중미생물은 서울에 소재한 중앙천 하수처리장의 혐기성 소화 슬러지를 사용하였다. 혐기성 회분식 실험의 순서 및 혐기성 미생물의 배지는 Young 등(1993)에 제시된 방법을 참고로 하여 수행하였다. 실험은 배지와 미생물, 기질 및 생물촉진제를 첨가한 후 35°C, 200 rpm의 조건에서 배양하였다. 발생한 가스는 유리주사기를 사용하여 주기적으로 배출시킴으로서 반응시간에 따른 발생가스량을 산정하였다.

회분식 혐기성 실험에서 시료의 총가스와 메탄가스의 생산량은 식 1과 같이 시료의 가스발생량에서 공시험의 가스발생량을 빼줌으로서 산정하였다. 발생한 가스는 가스크로마토그래프(HP 5890)를 이용하여 가스성분을 분석하였으며, 발생한 가스에 메탄함량을 곱하여 발생한 메탄량을 계산하였다. 35°C의 반응조건에서 발생한 총가스와 메탄가스의 발생량은 식 (2)와 같이 0°C, 1기압의 STP 조건의 값으로 보정하였다.

$$V_{test} = V_{sample} - V_{blank} \quad (1)$$

여기서, V<sub>test</sub>는 35°C에서 가스 부피(mL), V<sub>sample</sub>는 시료병속의 발생한 가스의 평균 부피(mL), V<sub>blank</sub>는 공시험 시료병속의 발생한 가스의 평균 부피(mL)이다.

$$V_{STP} (mL) = V_{test} \times 273/(273 + T) \quad (2)$$

여기서, V<sub>STP</sub>는 STP 조건에서 가스 부피(mL)이다.

pH, DOC, MLSS, MLVSS, NH<sub>3</sub>-N 등의 시료의 분석은 Standard Methods와 수질오염공정시험법에 따라 분석하였다. 발생가스내의 가스함량은 TCD(Thermal Conductivity Detector)를 장착한 가스크로마토그래프를 이용하여 분석하였다. 이 때 사용한 칼럼은 Porapak Q(80/100)를 충전한 1/8인치 구경과 6피트길이를 가진 스테인레스 칼럼을 사용

하였고 아르곤가스를 캐리어가스로 사용하였다.

## 2. 호기성 실험

호기성 실험은 Fig. 1과 같은 fed batch reactor를 사용하여 실험하였다. 본 반응조시스템은 처리효과뿐만 아니라 슬러지의 발생 및 유실을 정확히 측정할 수 있는 장점이 있다. 반응조운전은 그림에서 보듯이 하수의 유입, 반응, 배출 등의 단계로 이루어져 있으며 이러한 각 단계를 1일 단위로 반복하며 start-up 기간을 포함하여 50일 이상 실험하였다. Table 2는 유입되는 하수의 성상으로 경기도내 한 하수처리장 유입수를 원수로 사용하였다. 하수원수 주입시 생물촉진제를 각각 0, 0.5, 1, 3 ppm씩 넣은 네 개의 반응조를 사용하여 실험하였다. 또한 실험 말미에 질산화 활성도를 측정하기 위하여 회분실험을 실시하였다. 액상 시료의 SS, COD, T-N 및 T-P를 분석하였고 슬러지의 혼합액 고형물 농도(MLSS), 슬러지 부피지수(SVI), 지역침강속도(ZSV) 및 TTF(time to filter) 등이 분석되었다. 한편 활성 미생물의 실험을 위하여 Bartosch 등(2003)이 제시한 5-cyano-2, 3-ditoyl tetrazolium chloride(CTC) 및 -4', 6-diamidino-2-phenylindole(DAPI) 염색 방법이 도입되었다.

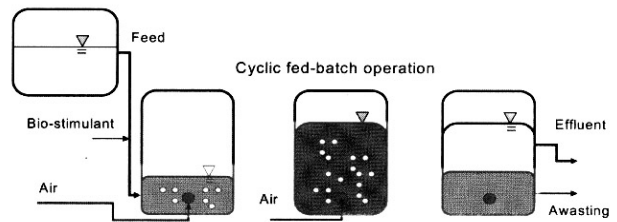


Fig. 1. Scheme of aerobic bio-reactor system.

Table 2. Characteristics of influent

	SS	COD	T-N	T-P
Concentration (mg/L)	187.5 (19.1)	389.6 (39.6)	52.5 (4.5)	4.5 (0.5)

\* ( ) : Standard Deviation

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1. 혐기성 실험결과

먼저 생물촉진제 첨가에 따른 메탄생성미생물의 활성도를 평가하기 위해 생물촉진제의 농도를 0, 0.5, 1.0, 3.0 ppm으로 단계적으로 증가시켰을 때 Table 3과 같이 총가스 발생량과 총메탄 발생량은 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 또한 반응시간에 따른 총가스와 메탄가스 발

Table 1. Anaerobic batch test

Substrate	Activity test for methanogens				Activity test for anaerobes			
	Acetate: 1,000 ppm				Skimmed Milk: 1,000 ppm			
	Sample	A-0	A-1	A-2	A-3	M-0	M-1	M-2
Biostimulant addition (ppm)	0	0.5	1	3	0	0.5	1	3

생량도 큰 차이를 보이지 않았다. 혐기성 회분식 반응 종료 후의 시료의 pH와 TOC(Total Organic Carbon)의 농도는 각각 7.3과 23 mg/L로 나타났으며, 기질을 첨가하지 않은 공시험(Blank)의 회분식 반응 종료후의 pH와 TOC농도는 각각 7.9와 9 mg/L로 나타나 기질을 첨가한 시료보다는 다소 낮은 TOC 값을 나타내어 반응물내에 일부의 기질이 메탄가스화되지 않은 채 남아있음을 알 수 있다. 그러나 초기 시료의 TOC 값이 약 400 mg/L이므로 대부분의 유기물은 메탄가스로 전환되었음을 알 수 있다. 이 때의 식종 미생물의 농도는 MLSS로서 약 1700-1900 mg/L의 범위를 나타내었고, MLVSS는 1000-1100 mg/L로 나타났으며 MLVSS/MLSS의 비는 약 0.6이었다.

생물축진제 첨가시 산형성균과 메탄형성균의 복합미생물로 구성된 혐기성 미생물의 영향을 조사하기 위하여 복합기질인 탈지분유 1000 ppm을 주입하였다. Table 4에 나타난 바와 같이 총가스발생량과 메탄발생량은 활성제의 첨가에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 시료의 경우, 반응 종료후의 pH도 7.4-7.7의 범위를 나타내었고 회분식반응 종료후 잔류하는 유기물의 농도(DOC)도 10 mg/L이하로 나타나 대부분의 유기물이 혐기분해되어 메탄과 이산화탄소로 전환된 것으로 판단된다. Serum 병내의 미생물 농도도 MLSS로서 1800-1900 mg/L를 나타내었고 MLVSS로서 1000-1100 mg/L를 나타내어 VSS/TSS의 비는 약 0.6으로 나타났다. 반응시간에 따른 총가스 발생량 및 메탄가스의

발생량도 특별한 차이를 보이지 않은 것으로 나타났다.

3.2. 호기성 반응조의 영향

약 2-3주 동안의 start-up 기간을 거쳐 처리시스템이 정상 상태 도달한 후 처리효율 및 운전인자에 관한 실험을 수행하였다. Table 5는 처리효율에 대하여 정리한 것이다. 표에서 보듯이 SS를 제외한 다른 수질인자가 1 ppm 주입에서 가장 양호한 것으로 조사되었다. 그러나 실험조건에서 대조 반응조를 비롯하여 모든 반응조에서 처리가 잘 수행되고 있는 것으로 보이며 생물축진제의 주입에 따라 전반적인 처리 효율에는 현저한 차이가 없는 것으로 생각된다.

Table 5. Overall performance of each reactor

Doage (ppm)	SS (%)	COD (%)	T-N (%)	T-P(%)
0	72.1 (4.6)	84.6 (1.0)	23.2 (7.3)	31.3 (13.7)
0.5	75.3 (6.2)	85.8 (1.4)	24.1 (4.0)	36.3 (9.1)
1	77.2 (5.0)	87.1 (2.0)	34.7 (4.2)	40.5 (9.7)
3	77.6 (8.8)	85.2 (1.6)	29.4 (4.5)	36.6 (9.5)

\* ( ) : Standard Deviation

Fig. 2는 반응공정의 유출수의 부유입자(SS)를 나타내는 것으로 주로 스크럼등의 방생에 따라 크게 좌우된다. 따라서 그림에서 보듯이 생물축진제는 부유입자의 발생을 저감할 수 있을 것으로 생각된다.

Table 3. Results of anaerobic batch test with acetate

Sample	Blank	A-0	A-1	A-2	A-3
Bio-stimulant addition, ppm	0	0	0.5	1.0	3.0
Gas production, ml	16.5	64.6	62.2	66.0	66.6
pH	7.9	7.3	7.3	7.3	7.3
<sup>1)</sup> DOC, mg/L	9.1	23.4	23.1	23.0	22.2
<sup>2)</sup> MLSS, mg/L	1975	1705	1790	1775	1690
<sup>3)</sup> MLVSS, mg/L	1070	1010	1045	1030	975
VSS/TSS	0.54	0.59	0.58	0.58	0.58
NH <sub>3</sub> -N, mg/L	380	323	335	308	305

- 1) DOC: Dissolved Organic Carbon
- 2) MLSS: Mixed Liquor Suspended Solids
- 3) MLVSS: Mixed Liquor Volatile Suspended Solids

Table 4. Results of batch test with skimmed milk

Sample	Blank	M-0	M-1	M-2	M-3
Bio-stimulant addition, ppm	0	0	0.5	1.0	3.0
Gas production, ml	16.5	67.1	64.8	68.5	64.3
pH	7.9	7.5	7.7	7.7	7.4
<sup>1)</sup> DOC, mg/L	9.1	9.8	9.5	11.4	11.0
<sup>2)</sup> MLSS, mg/L	1975	1895	1890	1910	1825
<sup>3)</sup> MLVSS, mg/L	1070	1175	1140	1130	1050
VSS/TSS	0.54	0.62	0.60	0.59	0.58
NH <sub>3</sub> -N, mg/L	380	339	326	322	317

- 1) DOC: Dissolved Organic Carbon
- 2) MLSS: Mixed Liquor Suspended Solids
- 3) MLVSS: Mixed Liquor Volatile Suspended Solids

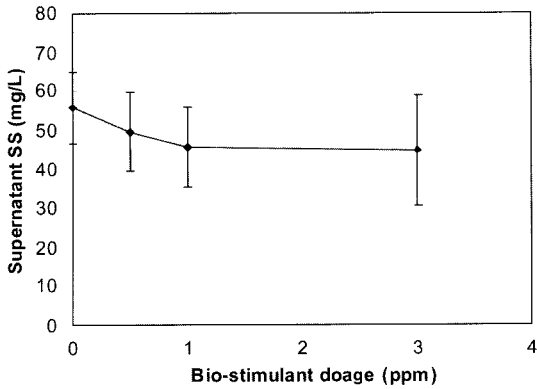


Fig. 2. Effect of the bio-stimulant on supernatant in settling mode.

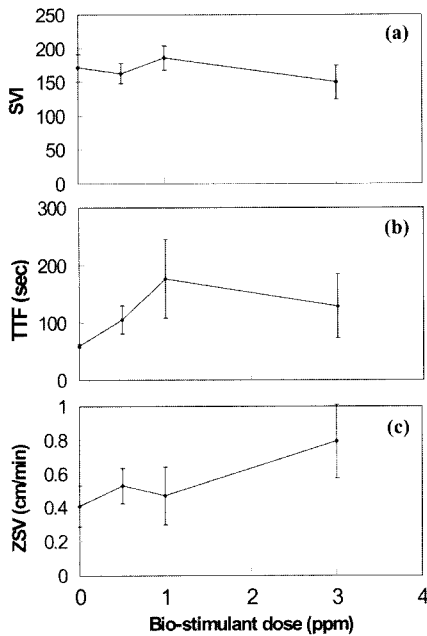


Fig. 3. Solids-liquid separation characteristics: (a) SVI, (b) TTF, and (c) ZSV.

Fig. 3은 공정운전의 중요한 인자인 고액 분리 특성에 대하여 실험한 것이다. Fig. 3(a)에서 일반적으로 최종침전지에서의 침강성을 나타내는 인자인 Sludge Volume Index (SVI) 대해서는 네 반응조가 큰 차이를 보이지 않았는데 이것은 네 반응조의 운전상태가 좋았기 때문이라고 생각된

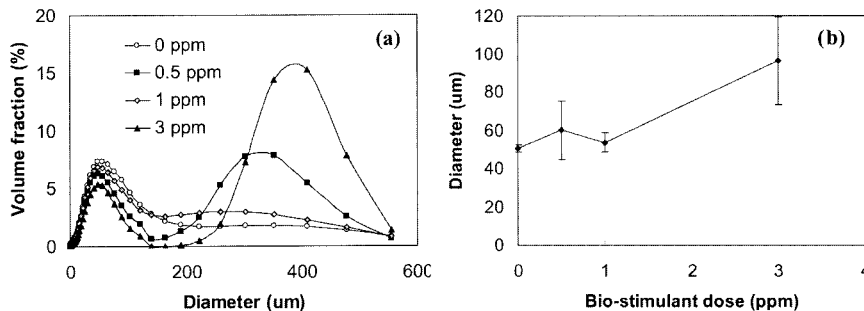


Fig. 4. Size distribution of activated sludge: (a) distribution and (b) mean diameter.

다. 또한 탈수성을 나타내는 Time to Filter (TTF)는 주입 농도가 1 ppm에서 가장 나쁘고 다시 좋아지는 경향을 보였다. 한편 Fig. 3(c)에서 침강하는 슬러지층의 하강속도 (Zone Settling Velocity: ZSV)가 생물촉진제를 투여할수록 빨라져 침강성이 나쁜 처리장에서의 효율개선에 기여할 수 있는 가능성을 볼 수 있다. 이것은 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 활성슬러지입자의 분포를 보면 생물촉진제를 투여할수록 크기가 큰 입자가 관측되는데 생물촉진제가 미생물의 표면을 개질하여 플록 형성에 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

### 3.3. 호기성 공정에서 미생물에 대한 영향

많은 연구에 보이듯이 생물촉진제의 투입은 처분하여야 할 폐기물인 생물처리 시스템의 고형물생성량을 줄일 수 있다고 하였다(Sorber et al., 1994; Miller et al., 1996). 생성되는 고형물 즉 생체 생성량은 수율에 달려있다. 보통 걸보기 수율 (observed yield)는 생체량 변화와 다음 식 (3) 과 같은 관계에 있다.

$$X_T = X_{T_0} + QY(S_0 - S)t \quad (3)$$

여기서  $X_T$ 는 총생체량  $X_{T_0}$ 는 초기생체량,  $S_0$ 는 원수농도,  $S$ 는 유출수 농도 및  $Q$ 는 유입유량을 나타낸다.

Fig. 5는 반응조에서 증가되는 생체량(biomass)의 증가로부터 걸보기 생체 수율(observed yield)을 계산한 결과이다. 물론 장기적인 관찰도 필요하겠지만 생물촉진제는 미생물 활성을 증가시키고 증가된 미생물 개체의 활성은 자산화를 촉진시켜 공정의 슬러지 생산량을 감소시킬 수 있을 가능성이 있을 것으로 생각된다.

수율의 감소와 반응조내 고형물농도는 처리성능에 있어 반드시 양호한 결과를 나타내지는 않는다. 생물촉진제 사용에 따른 미생물의 질산화 속도를 비교하기 위하여 회분 실험을 수행하였는데 회분식 반응조의 물질수지식으로부터 회분실험에서 기질 농도변화는 다음 식 (4)로 주어진다.

$$dS/dt = -[q_m S / (K + S)] [X_{a_0} + Y_a(S_0 - S)] \quad (4)$$

여기서,  $S$ 는 기질(암모니아성질소),  $X_{a_0}$ 는 암모니아산화

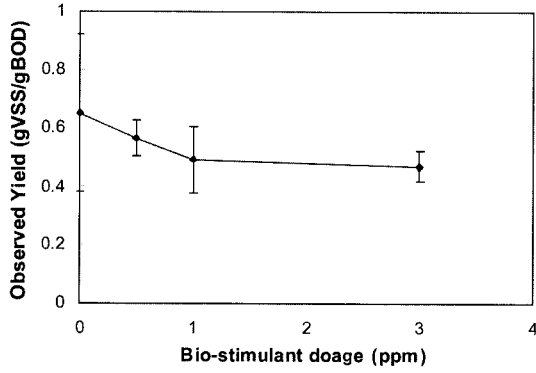


Fig. 5. Observed yield from biomass production.

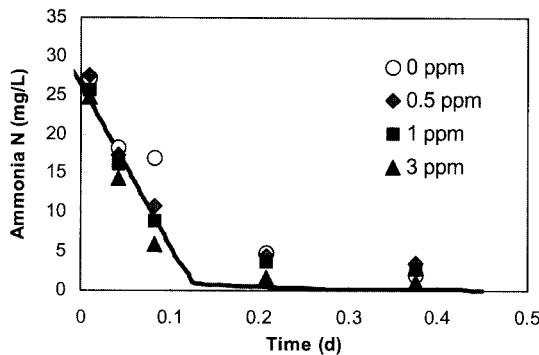


Fig. 6. Nitrification rate in batch experiment.

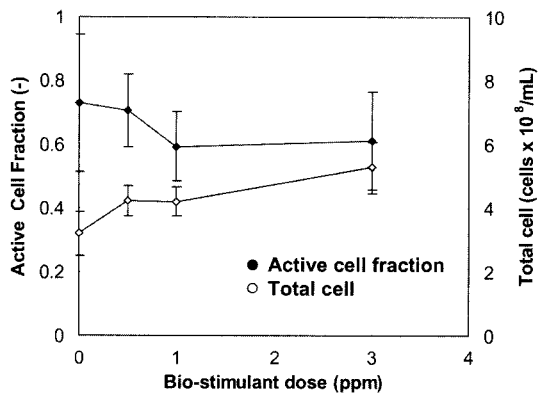


Fig. 7. Active cell fraction in the reactor.

균,  $q_m$ 은 최대비성장속도,  $K$ 는 반포화상수이다.

이 식에서 보면 암모니아성질소 제거속도 즉 질산화속도는 활성(active) 생체량에 크게 관계하는 것으로 볼 수 있다. Fig. 6은 실험중에 활성슬러지를 대상으로 암모니아성 질소 제거속도를 측정된 회분 실험 결과이다. 그림에 변동을 보이고 있으나 생물촉진제를 투여한 경우 암모니아 제거속도 즉 암모니아성 질소의 산화 속도는 크게 차이가 나지 않았다. 또한 위 식으로부터 계산된 질산균은 약 100 mg/L내외로 일정한 값을 나타낸다. 그것은 비록 생물촉진제가 많이 주입된 반응조에서 유지되는 미생물량의 증가에 따라 산화시킬 수 있는 잠재력은 크지만 생체량 증가로 반응조에 주어지는 먹이 미생물비(F/M 비)가 줄어들어 앞서 말한 자산화가 빠르게 진행되어 Fig. 7과 같이 활성을 가진 미생물 비율이 줄어들기 때문인 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

혐기성 미생물에 의한 유기물의 분해시 생물촉진제 첨가에 따른 메탄활성도 및 총 혐기성 미생물의 활성도 평가에서 0, 0.5, 1.0, 3.0 ppm의 농도로 활성제를 첨가하였을 때 혐기성 미생물의 특별한 활성증가는 관찰되지 않았고 모든 시료에서 우수한 메탄생성능력을 나타내었다. 호기성인 활성슬러지 공정에 유입수로 실제 하수를 사용하여 생물촉진제가 처리효율 및 공정운전의 영향인자에 미치는 영향을 조사하였다. 호기성 미생물에 대한 영향은 처리가 잘되고 있는 공정의 경우 처리효율에 크게 영향을 주지 않았다. 또한 침강성, 탈수성을 조사한 결과 SVI에는 영향을 미치지 못하였으나 플록의 형성을 촉진시켜 침강속도 및 탈수속도 증가에 기여할 것으로 예상되었다. 또한 스킴 발생 및 슬러지 생성에도 미미하지만 기여할 것으로 나타났다. 또한 혼합액의 부유고형물은 증가하였으나, 미생물활동도가 줄어들어 질산화속도에는 거의 영향을 미치지 못하였다.

#### 참고문헌

Bartosch, S., Mansch, R., Kntzsch, K. and Bock, E., CTC Staining and Counting of Actively Respiring Bacteria in Natural Stone Using Confocal Laser Scanning Microscopy, *Journal of Microbiological Methods*, **52**(1), pp. 75-84 (2003).

Heinicke, R., Xeronine, a New Alkanoid, Useful in Medical, Food and Industrial Fields, *Hawaii Medical Journal*, **36**, The Research Corporation of the University of Hawaii, (1977).

Kumar, S., Jain, M. C. and Chhonkar, P. K., A Note on Stimulation of Biogas Production from Cattle Dung by Addition of Charcoal, *Biological Wastes*, **20**, pp. 209-215 (1987).

Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*, 4th ed., McGraw-Hill, Inc., New York (2004).

Miller, S., McMillen, D. D. and Sober, G., A Method to Eliminate Anaerobic Odors, Residue Sludge Volumes and Increase Biologic Treatment Efficiency in Effluent Treatment Plant, *TAPPI Proceedings*, pp. 941-946 (1996).

Parker, B. D., Use of Multienzymic Microbial Stimulant for Municipal Wastewater Sludge Odor Control, *WEFTEC '96 Water Environment Federation 69th Annual Conference and Exposition*, Dallas, Texas (1996).

Singh, S., Kumar, S. Jain, M. C. and Kumar, D., Increased Biogas Production Using Microbial Stimulants, *Bioresource Technology*, **78**, pp. 313-316 (1996).

Sober, G. L., Edwards, G. R., Sludge reduction through bio-stimulation, *National Rural Water Association 1994 Management and Technical Conference* (1994).

Young, J. C. and Tabak, H. H., Multilevel Protocol for Assessing the Fate and Effect of Toxic Organic Chemicals in Anaerobic Treatment Processes, *Water Environment Research*, **65**(1), pp. 34-35 (1993).