Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 17, No. 12 pp. 1-8, 2016

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.12.1
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

바실러스균을 이용한 하수 슬러지의 악취 제거 특성에 대한 연구

성일화
가천대학교 환경에너지공학과

A Study on the Odor Removal Characteristics of sewage sludge using *Bacillus* sp.

Il-Wha Sung
Department of Environmental & Energy Engineering, Gachon University

요 약 본 연구에서는 하수 처리에 많은 장점이 있는 *Bacillus sp.*를 하수 슬러지에 적용함으로써 악취 제거에 대한 타당성을 검토하였다. 1차 슬러지를 공기공급 만으로 24시간, 48시간, 72시간 경과 후의 NH_3제거율은 12.5 %, 12 %, 42.1 %를 나타내었고, *Bacillus* sp.농축액 10%와 기타 물질을 넣어 고형화시킨 BIO-CLOD를 주입한 반응기에서는 NH_3제거율이 43 %, 70 %, 81 %의 제거율을 보였다. NB배지에서 배양된 *Bacillus sp.*를 1차 슬러지 반응기에 주입율 0 %, 1.7 %, 3.3 %, 6.7(v/v%)에서 72시간 경과 후의 TVOC제거율은 59 %, 71 %, 88 %, 98 %를 나타내었고, NH_3제거율은 29 %, 25 %, 31 %, 48 %로서 TVOC 제거율이 더 높았으며, *Bacillus sp.*주입 농도에 따른 탈수 실험에서는 *Bacillus sp.*농도를 4(v/v%)로 하는 것이 적합한 것으로 판단되었다. *Bacillus sp.*농도와 악취물질 감소간에 상관관계가 성립되며, 공기공급과 바실러스의 주입은 생물학적 산화를 도와 악취물질의 제거가능성을 확인하였다. Alum과 PAC을 사용한 1차 슬러지와 소화슬러지의 SRF값으로 적정한 Alum응집제량은 500 mg/L이였고 PAC을 사용할 때는 적정량이 6 mg/L주입하는 것이 타당하다고 판단되었다.

Abstract This study assessed the feasibility of odor removal by the application of Bacillus sp. that has many advantages in sewage treatment to sewage sludge. The NH3 removal rates in the treatment of primary sludge using only aeration were measured at 24, 48, and 72 hours of treatment and the results were 12.5 %, 12 %, and 42.1 %, respectively. The NH3 removal rates of a reactor injected with BIO-CLOD made by solidifying Bacillus sp. concentrated 10 % together with other substances were measured after 24, 48, and 72 hours of treatment and the results were 43 %, 70 %, and 81 % respectively.
In the cases where the Bacillus sp. cultured in NB medium was injected into the primary sludge reactor to reach injection rates of 0 %, 1.7 %, 3.3 %, and 6.7(v/v%), the TVOC removal rates measured when 72 hours had passed after the injection were 59 %, 71 %, 88 %, and 98 % respectively, which were higher than the NH3 removal rates as the NH3 removal rates measured at the same time were shown to be 29 %, 25 %, 31 %, and 48 %, respectively. In the sludge dewaterability conducted with various Bacillus sp. injection concentrations, a Bacillus sp. concentration of 4(v/v%) was considered to be suitable. The Bacillus sp. concentrations and reduction in the bad odor substances were correlated with each other. The results showed that aeration and Bacillus sp. injection will assist biological oxidation so that the bad odor substances can be removed. Based on the SRF values of the primary sludge and digested sludge, in which Alum and PAC were used, the appropriate amount of Alum aggregate reagent was judged to be 500 mg/L, and when PAC was used, 6 mg/L was judged to be appropriate.

Keywords : *Bacillus sp.*, sludge dewaterability, odor removal, primary sludge, SRF

*Corresponding Author : Il-Wha Sung (Gachon Univ.)
Tel: +82-31-750-5592 email: iwsung@gachon.ac.kr
Received August 12, 2016 Revised (1st August 23, 2016, 2nd August 25, 2016)
Accepted December 8, 2016 Published December 31, 2016

1. 서론

통계 자료에 따르면, 2014년도 하수도 보급률(공공하수처리 인구 보급률)은 92.5%이고, 전국 500 m^3/일 처리규모이상 597 개소의 공공하수처리시설에서 처리되는 하수량은 19,700 천 톤/일(처리시설용량 24,999 천 톤/일)로서 지난 10년간 하수 슬러지 발생량은 2004년 2,426 천 톤/일(2004년 하수도 보급률 81.4%)에서 2014년에는 3,654 천 톤/일로 증가하였으며, 발생된 하수슬러지 처리는 56 %가 연료, 비료 또는 골재로 재활용되고 있고 나머지는 소각, 건조, 매립 및 기타 처리되고 있는 실정이다[1].

하수 처리장에서 각 공정별로 악취 발생이 심한 슬러지 특성을 살펴보면 1차 침전지에서 발생하는 슬러지는 체류 시간과 설계 조건에 따라서 침전지 바닥의 혐기성 구역이 형성됨으로써 NH_3와 H_2S 등이 생성될 수 있다. 생물학적 반응으로 발생되는 2차 슬러지는 대부분 호기성처리로 인해 악취 물질은 생성되지 않지만 1차 슬러지보다는 수분양이 많게 된다. 1차, 2차 슬러지를 농축시켜 수분 함량을 줄이는 농축 슬러지 저류조나 농축조에서 악취 발생의 큰 부분을 차지하고 있다[2]. 처리장에 따라서는 소화조를 운영하는 경우 소화 슬러지 특성으로 수분 77~80 %, 유기물 함량(VS/TS)은 30 ~ 60 %로서 1차 슬러지에 비해 낮은 농도일지라도 고농도의 유기물 함량으로 인해 탈수시키고 매립지에 최종 처분될 때 까지 악취를 발생시키게 된다. 또한 악취 물질 중 H_2S의 경우 0.47 ppb, 메틸메르캅탄의 경우 2.1 ppb 정도의 농도에서도 냄새가 감지됨으로서 악취 제거 특성에 어려움으로 존재한다.

다양한 하수고도처리공법 중에서 바실러스균을 사용하는 B3 공법은 유기물 제거와 질소. 인 제거가 가능하며 고농도의 유기물로 인한 악취제거가 동시에 가능하다는 장점이 있다. 그 외 토양이나 식품에 서식하는 바실러스균을 선택적으로 배양하고 우점화시킨 활성 슬러지 공정과 호기성 소화 공정에서 유기물 제거 효율도 높이고, 악취 제거에도 효과적이었으며[3], 망상형 회전식 바실러스 접촉 장치를 이용한 하수 처리에서도 유기물과 질소, 인을 대상으로 안정적인 유출수 농도와 높은 슬러지 침강성을 확인할 수 있었으며, 생물막의 혐기성화 단계에서도 악취가 발생하지 않음을 확인했다고 보고하였다[4]. 유기물의 제거율을 높이고 침전 조에서 슬러지의 침강 성을 증대시키는 것은 바실러스에서 분비되는 세포벽 외부에 점액층의 점착력에 의한 것으로 이를 이용한 난분해성 유기물의 흡착 및 악취제거 등에 대한 연구도 활발하다[5]. 처리장에서 발생되는 악취 가스 제거는 부식방지 재질인 PS, FRP, PVC 같은 충진 재를 이용하여 여재 표면에 미생물이 성장하여 악취 가스가 바이오필터를 통과하면서 미생물에 의해 제거되는 시스템으로 시설이 간편하고 제거 효과도 높아서 기존 하수처리장에 많이 설치되어있다[6]. 하지만 미생물이 성장할 수 있는 수분 공급이 적절치 않으면 미생물의 성장에 영향을 주어 악취제거율을 낮추게 하고 있다

본 연구에서는 하수처리장에서 발생되는 하수슬러지는 처리장 주변의 생활환경의 질을 떨어뜨리는 요인이지만 자연친화적이고 하수처리에 많은 장점이 있는 바실러스를 하수 슬러지에 적용함으로써 악취 제거에 대한 타당성을 수행하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험 재료

2.1.1 실험 장치

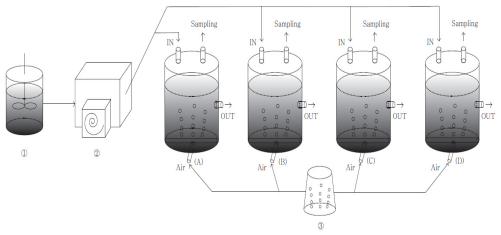
본 연구에 사용된 실험 장치는 Fig. 1과 같이 시료 저장조, 유입수 공급 펌프, 공기 주입기, 시료 채취구가 부착된 호기성 반응조로 구성되었으며, 실험 조건에 따라 호기성 반응조는 2개 또는 4개를 동시에 가동시킬 수 있도록 하였다. 시료는 경기도 S 수질복원센터의 1차 슬러지를 사용하였으며, 슬러지는 채수 후 즉시 운반하여 4℃ 이하에서 냉장보관 하였으며 시료의 성상은 Table. 1과 같다.

반응조의 크기는 4 L이며, HRT는 48시간에서 반응시간은 24시간, 48시간, 72시간으로 운전하였으며, 슬러지는 펌프(Cole-Parmer, masterflex, USA)를 이용해 반응조에 유입시킨 후 공기주입기(전기 기포 발생기 DY-20,(주)동양사, Korea)로 반응 조 내 슬러지에 공기를 주입시켜 호기성 상태로 만들었다.

악취 시료 채취는 반응조 상단의 가스 유출 관 중간에 가스를 포집할 수 있는 채취구를 설치하여 항목에 따라 테들러 백 혹은 가스 흡수관을 통해 24시간, 48시간 및 72시간 후 포집한 시료에서 NH_3, TVOCs, H_2S, dimethy sulfide(DMS) 및 methyl mercaptane를 분석하였다.

Table 1. Characteristics of the sewage sludge used for the experiment

Item	primary sludge	digested sludge
TS (mg/L)	8,000 ~ 15700	29,300 ~ 29,285
VS(mg/L)	4,000 ~ 10900	23,300 ~ 23,310
SS(mg/L)	6,140	
VSS(mg/L)	5,000	
T-N(mg/L)	135	1,700
T-P(mg/L)	6.7	470
pH	7.24	7.0



① Sludge storage tank ② Peristaltic pump ③ Diffuser Ⓐ~Ⓓ Reactors

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 분석 항목 및 방법

2.2.1 악취 물질

본 연구에서는 악취 방지법에 의한 지정 악취물질 22가지 중 NH_3, H_2S, 다이메틸설파이드와 TVOCs를 분석 항목으로 설정하였으며 TVOCs는 톨루엔, 스타이렌, 아세트알데히드, 벤젠 등의 화합물이 포함된 총 휘발성 유기화합물을 일컫는다. 각 항목은 24시간 간격으로 채취가 이루어졌으며, 각 항목 별 분석 조건은 Table. 2에 요약하여 나타내었다.

Table 2. Summary of instrumental and analytical conditions

Item		Operation condition
NH_3	UV/VIS	UV-1201, SHIMADZU
	Detector	UV/VIS, 640nm
TVOCs	GC	GC 6890, Agilent tech.
	Detector	MSD
	Column	HP-1(60mx320 ㎛ x1.0 ㎛)
	Carrier gas	He
	Column temp.	40℃(5m)140℃(5m)250℃(2min)
	Interface temp.	300 ℃
	MS scan range	35~300 amu
H_2S & Dimetyl sulfide	GC	GC 6890, Agilent tech.
	Detector	FPD
	Column	DB-1(30m x 320㎛ x 3㎛)
	Carrier gas	He
	Detector temp.	250℃
	Oven temp.	50 ℃(3 min)→130 ℃(8 min)→
	Injector vol	150 mL

NH_3는 2개의 흡수 병에 각 각 붕산용액(0.5%) 50 ㎖씩을 넣은 후 고용량 흡입 펌프(LP-12, Buck Inc.)를 이용해 5 LPM의 속도로 5분간 흡입하여 25 L의 시료를 채취하였다. 시료 채취가 끝난 시료는 분석 전까지 4℃ 이하에서 냉장보관 하였으며, 분석용 용액에 페놀-니트로 푸르시드 나트륨 용액과 차아염소산나트륨 용액을 가하여 암모늄이온과 반응 하여 생성되는 청색 인도 페놀의 흡광도를 UV (UV-1201, Shimadzu)를 이용해 파장 640nm에서 분석하였다. 휘발성 유기화합물(total volatile organic compounds)은 TVOC용 공기 포집용 펌프(MP-Σ30 mini pump, Sibata)를 이용해 200 mL/min으로 30분간 채취해 총 6 L를 고체 흡착 관(Tenax-TA)에 흡착시킨 후 저온농축기를 이용해 농축 후 2단 열 탈착시켜 GC/MSD(GC 6890, Agilent technologies)로 분석하였다. 채취한 시료는 가능한 빨리 분석하고, 보관하는 동안은 흡착관의 양쪽을 파라필름으로 밀봉하고 알루미늄 호일의 코팅되지 않은 면으로 흡착 관을 감싼 후 4 ℃ 이하에서 냉장보관 하였다.

황 화합물 및 DMS는 Tedlar bag(5 L, ㈜탑트레이닝 이엔지)을 고 순도 질소로 3회 이상 세척한 후 황 화합물 포집장치(NE-OOO-2939-S, (주)디에스이)를 이용하여 5 L를 채취하였다. 채취된 시료를 정성 및 정량 분석하기 위해 흡인 장치로 진공 펌프를 사용하여 Tedlar bag 내의 시료를 흡인하여 액체질소로 저온 냉각시켜 농축 관에 시료를 농축하였으며 농축된 시료는 황 화합물에 선택성이 좋은 불꽃광도검출기(FPD)가 설치된 (GC 6890, Agilent technologies)를 사용하여 분석하였다.

2.2.2 탈수 실험

슬러지의 탈수성은 비저항(Specific resistance to filtration, SRF) 실험으로 평가하였으며, 탈수 실험 장치의 Büchner funnel 내경은 7 cm이고 눈금실린더의 용량은 100 ㎖이며, 여과지로 Toyo 5C를 사용하였다. 탈수 실험을 위해 6개의 교반 장치를 갖춘 Jar-Tester(Dae sung scientific co.)를 사용하여 하수슬러지 100 mL에 응집제[Alum과 PAC(Al_2O_3 10.4%)]를 혼합하여 150 rpm에서 급속 교반 3분, 50 rpm에서 완속 교반 15분간을 한 후 30분 침전 후, SRF를 측정하였다.

2.2.3 미생물 및 배양

사용된 균주는 한국미생물보존센터(Korean culture

center of microorganisms) KCCM11316 *Bacillus subtilis*이며, 균주배양은 Nutrient broth(NB, Difco)와 Lactose broth(LB, Sigma)배지를 이용하였으며, 배양온도 37℃에서 24, 48, 72시간 후 균주의 농도를 측정하였다. 악취 조사를 위해서는 4개의 반응 조에 1차 슬러지 3L에 대해 균주 배양액 0, 50, 100, 200 mL를 주입하여 24, 48, 72시간 후 악취 측정과 슬러지 탈수시험을 하였다.

사용한 BIO-CLOD(Biomeca Inc.)는 *Bacillus sp*에 응집 효과가 있는 철분 및 규산분을 첨가 가공한 것으로 C 27.9 wt%, H 1.12 wt%, O 45.4 wt%, Si 9.7 wt%, Al 4.1 wt%, Ca 3.6 wt%, N 2.8 wt%, S 2.0 wt%, Fe 1.6 wt%, P 0.7 wt%, 그리고 함수량 8.56~12.4 wt%, 총세균수 $2.4x10^8$~$1.6x10^{11}$cfu/g으로 되어 있다[7].

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 악취 물질 제거능

1차 침전지에서 발생되는 1차 슬러지는 오수만이 유입되는 경우와 오수와 빗물이 함께 유입되는 하수의 성분에 따라 차이가 있으며, 침전지에서 체류하는 동안 악취의 발생원이 되고 있다.

공기 공급만으로 이루어진 HRT48시간의 반응 조에 1차 슬러지를 주입한 경우와 *Bacillus* sp.농축액 10%와 기타 물질을 넣어 고형화시킨 BIO-CLOD를 주입한 경우에서 악취물질 제거능을 알아보고자 예비 실험에서 호기만의 반응 조에는 슬러지 투입 1시간 후 NH_3농도는 34.4 ppm이였으며, 24시간, 48시간, 72시간 경과 후는 29.8 ppm, 27.1 ppm, 21.4 ppm으로 NH_3제거율은 13.4%, 21.5%, 39% 이였다. BIO-CLOD를 주입한 반응기에서는 슬러지 투입 1시간 후 29.8 ppm에서 시간에 따른 농도는 16.4ppm, 9.7ppm, 10.4ppm으로 제거율은 45.0%, 67.5%, 65.1%이였다.

본 실험에서는 공기 공급만으로 24시간, 48시간, 72시간 경과 후의 NH_3제거율은 예비 실험에서와 같이 26.1 ppm, 26.2 ppm, 17.3 ppm 제거율은 12.5 %, 12 %, 42.1 %를 나타내었고, BIO-CLOD를 주입 한 반응조에서는 슬러지 투입 후 1시간 후 29.8 ppm에서 17.1 ppm, 8.9 ppm, 5.7 ppm NH_3제거율은 43%, 70%, 81%의 제거율을 보임으로서 이는 BIO-CLOD이 구성 성분 중에 10%를 포함한 *Bacillus sp.*의 용출에 의한 제거로 보인다(Fig. 2).

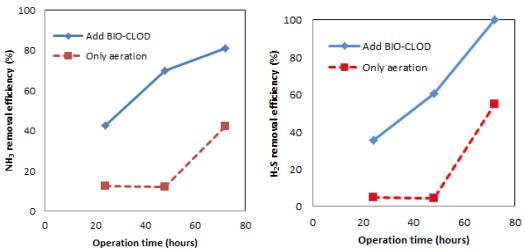


Fig. 2. Removal efficiency of NH_3 and H_2S in primary sludge.

성[7]은 하수처리장 혐기성 반응조에서 소화가 끝난 소화슬러지를 대상으로 HRT 12시간 실험에서 24시간, 48시간, 72시간 반응 후 NH_3제거율은 45%, 45%, 74%이였으며, BIO-CLOD를 적용한 반응기에서는 NH_3제거율은 48%, 58%, 74%이였다고 하였다.

1차 슬러지에서의 NH_3제거율이 소화 슬러지에 비해 낮은 원인은 HRT조건이 다르기도 하지만 소화 슬러지의 T-N은 1,700 mg/L이고 1차 슬러지의 T-N은 135 mg/L로서 총 질소 농도의 영향에 의한 것으로 사료된다.

하수 슬러지의 악취 물질 농도는 Table 3에 나타냈으며 methyl mercaptane과 dimethy sulfide는 1차 슬러지 특성으로 detection limit이하로 검출되지 않았다.

H_2S제거율에서는 1차 슬러지에 공기 공급만으로 24시간, 48시간, 72시간 경과 후에 4.7 %, 4.2 %, 55.4 %

Table 3. Chracteristics of malodorous substance in primary sludge at HRT 48hours (unit : ppm)

Item / Reactor / Duration	NH_3		H_2S		TVOC		Methy mercaptane		Dimethy sulfide	
	aeration	BIO-CLOD	aeration	BIO-CLOD	aeration	BIO-CLOD	aeration	BIO-CLOD	aeration	BIO-CLOD
0 hr	29.8		0.12		6.6		ND		ND	
24 hr	26.1	17.1	0.114	0.078	6.52	3.0	ND	ND	ND	ND
48 hr	26.2	8.9	0.115	0.048	3.71	1.75	ND	ND	ND	ND
72 hr	17.3	5.7	0.054	ND	6.34	4.4	ND	ND	ND	ND

를 나타내었고, BIO-CLOD를 주입 한 반응조에서는 35 %, 60 %, 100 %의 제거율을 보임으로서 HRT 12시간에서의 소화 슬러지에 대한 호기성 반응기에서의 H_2S제거율은 71 %, 73%, 96%를 보인 것과 비교하면 본 실험의 제거율이 낮았지만 72시간 경과 후에 제거율이 높아지는 경향은 동일하였다. 반면에 TVOC제거율은 1.2 %, 44 %, 3.9 %를 나타내었고, BIO-CLOD를 주입 한 반응조에서는 55 %, 74 %, 34 %의 제거율을 보임으로서 48시간 경과 후에는 TVOC제거율이 증가하지만 72시간경과 후에는 감소하는 경향을 보였다.

본 실험에서의 HRT 48시간과 충분한 산소접촉시간은 미생물 생장 속도가 빠른 호기성 미생물이 활동하게 되어 암모니아성 질소는 질산성 질소의 무기염상태로 전환을 일으키게 되고, 황화물은 황산염이온으로 전환시키거나 악취를 발생시키지 않는 황 함유 물질로 산화시켜 환원된 무기성 악취 물질은 먹이로 섭취 분해된다[9][10]. 따라서 1차 슬러지에 공기 공급과 바실러스의 주입으로 악취 물질의 제거 가능성은 있는 것으로 사료되었다.

3.2 바실러스균에 의한 악취물질 제거능

Fig. 3은 한국미생물보존센터에서 분양받은 *Bacillus sp.*를 NB와 LB배지를 사용하여 배양온도 37 ℃에서 배양하여 24시간, 48시간, 72시간 후 균주를 측정한 것으로 NB에서는 $0.028x10^8$ CFU/mL, $0.6x10^8$ CFU/mL, $18x10^8$ CFU/mL이였고, LB에서는 $0.011x10^8$ CFU/mL, $0.15x10^8$ CFU/mL, 4 $x10^8$ CFU/mL로서 두 배지 모두에서 48시간 까지는 서서히 증가하다가 72시간에서는 급격히 생장하는 것으로 생장 속도는 LB배지에서보다 NB배지에서 더 컸다.

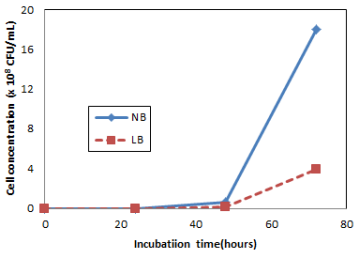


Fig. 3. Microbial growth phase on cell cultivation with NB and LB medium

증식 속도가 큰 NB배지에서 배양된 균주 배양액을 1차 슬러지 반응기에 주입하여 악취물질 제거 능을 알아보기위해 주입율을 0 %, 1.7%, 3.3%, 6.7(v/v%)로 주입하여 24, 48, 72시간 경과 후의 악취 물질을 측정한 것으로 *Bacillus* sp.주입 농도를 증가시킴에 따라 점차 NH_3와 TVOC농도는 낮아지는 경향을 보이고 있다.(Fig. 4)

*Bacillus sp.*주입율 3.3 % 이상에서 NH_3와 TVOC농도는 점차 낮아지기 시작하여 6.7 %에서 더욱 낮은 농도 값을 보였으며 NH_3에 비해 TVOC에서 더 큰 농도감소로 나타났다.

72시간 경과 후의 제거율을 볼 때 *Bacillus sp.*주입율 0 %, 1.7%, 3.3%, 6.7% 각 각에서 TVOC 제거율은 59%, 71%, 88%, 98%를 나타내었는데 NH_3제거율은 29%, 25%, 31%, 48%로서 TVOC 제거율이 더 높았다.

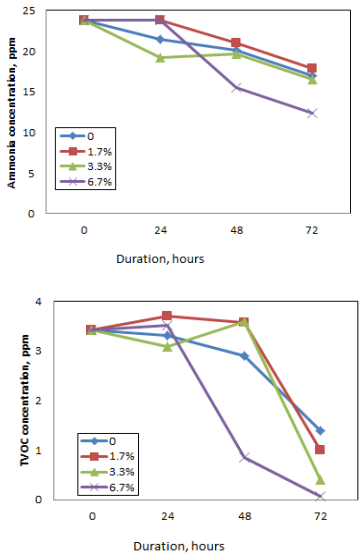


Fig. 4. Changes in NH3 and TVOC concentrations in primary sludge according to *Bacillus sp.* dose

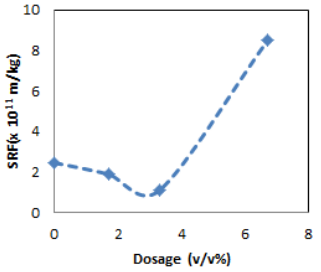


Fig. 5. Effect of SRF in primary sludge according to *Bacillus sp.* dose

1차 슬러지를 농축시키게 될 경우 슬러지 탈수율을 알아보기 위해 1차 슬러지 반응 조에 NB 배지에서 배양된 *Bacillus sp.*를 0, 1.7%, 3.3%, 6.7%의 비율로 주입하여 72시간 경과 후의 비저항계수를 측정한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. *Bacillus sp.*주입 농도를 증가시킴에 따라 점차 비저항계수가 낮아지는 경향을 보이다가 4 %이상에서 급격히 높아지는 것을 볼 수 있는데 이는 *Bacillus sp.*농도가 높아짐에 따라 점성이 높아지는 결과로서 6.7%에서 TVOC제거율은 높아졌지만 탈수능이 떨어지므로 *Bacillus sp.*농도를 4%로 하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

*Bacillus sp.*는 무 산소 환경에서도 느린 생장을 하는 통성 혐기성이며, 빈 영양상태가 되면 세포막은 함몰되고 포자외피로 싸이게 되는 내생포자(endospore)를 형성하며 분해효소를 분비하는 특성 때문에 비휘발성 유기물을 분해하기도 한다[8]. 성[7]은 반응기내 기체상의 H_2S 농도가 감소하면서 용액중의 황산염 이온농도는 증가하고 HRT가 길수록 H_2S제거율과 황산염 이온농도가 증가하였으며, 정[11]등은 악취 제거에는 *Bacillus subtilis*와 *Bacillus atrophaeus*가 효과적인 역할을 하였고 액체 상태의 바실러스균을 주입하여 높은 악취 제거 효율을 보았다고 하였다.

허[12]등은 간접 폭기형 생물침적 여상조를 이용하여 NH_3 과 H_2S제거율이 98%이상 이였다고 하였으며, 미생물체내에 유황이 축적되는 것으로 확인 하였다. 또한 미생물에 의한 H_2S제거 효율에 미치는 온도영향은 약 25℃이상에서는 거의 없다고 하였다[13]. 따라서 호기성 상태에서 바실러스균의 주입은 생물학적 산화를 도와 악취물질의 제거 가능성을 확인하였다.

*Bacillus sp.*를 0%, 1.7%, 3.3%, 6.7%의 주입 비율에 따른 72시간 후의 총 고형물(TS)과 휘발성 고형물(VS)의 측정은 *Bacillus sp.*주입량에 따라서 고형물의 양도 증가하였고. 총 고형물에 대한 휘발성 고형물(VS/TS)비는 유기물 농도의 경향을 나타내는 지표로서 통상 1차 슬러지는 60 ~ 80 %, 소화 슬러지는 30 ~ 60 %이다. 주입농도에 따른 VS/TS는 모두 75%로서 72시간 내에서는 유기물의 변동이 없는 것을 알 수 있었다.

3.3 응집제에 의한 탈수능 특성

하수슬러지에 따른 탈수성을 비교하고자 Alum과 PAC을 사용하였으며 슬러지 탈수율을 측정 할 수 있는 항목으로 재현성이 높은 SRF(비저항계수)값을 비교하였다. Fig. 6은 1차 슬러지와 소화슬러지에 Alum의 농도를 0, 200 mg/L, 400 mg/L, 600 mg/L, 800 mg/L, 1000 mg/L 주입량에 따른 비저항계수 값의 변화를 나타내었다. 1차 슬러지에는 주입농도에 따라 1.19×10^{10} ~ 0.099×10^{10} m/kg로 비저항계수 값이 완만하게 감소하기 시작하여 600 mg/L에서부터는 감소의 폭이 커지게 나타내었다. 그러나 그이상의 주입은 경제성이 타당하지 않으므로 600 mg/L의 값이 적정하다고 판단되며, 동일한 조건으로 소화슬러지에서는 주입량 0 mg/L일 때 비저항계수 값이 8.95×10^{10} m/kg이었고, 주입량을 증가시키면 비저항계수 값이 감소하다가 500 mg/L의 주입 량 부터는 현저히 높아지게 되어 탈수능을 떨어뜨리게 하였다. 따라서 소화 슬러지에 주입되는 Alum응집제의 적정량은 500 mg/L이 타당하다고 판단된다.

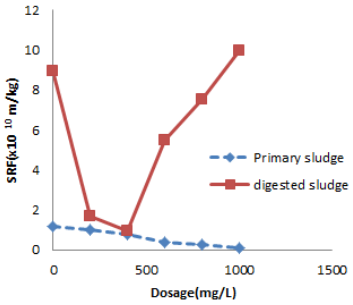


Fig. 6. Effect of Alum on SRF in primary sludge and digested sludge

반면 Fig. 7은 1차 슬러지와 소화 슬러지에 PAC의 농도를 0, 2 mg/L, 4 mg/L, 6 mg/L, 8 mg/L, 10 mg/L 주입하였을 때의 전체적인 비저항계수 값의 변화율은 0.75×10^{10} ~ 0.79×10^{10} m/kg로서 주입율 6 mg/L에서 0.62×10^{10} m/kg 낮아지다가 주입율이 높아지면 비저항계수 값도 증가하여 탈수율을 떨어뜨렸다. 따라서 1차 슬러지의 PAC의 적정량은 6 mg/L로 보았으며, 소화 슬러지에서도 주입량 0 mg/L일 때 비저항계수 값이 2.9×10^{10}m/kg이었고, 주입량을 증가시키면 비저항계수 값은 점차 감소하다가 주입량 8 mg/L에서 5.0×10^{10} m/kg로 높아짐으로서 6 mg/L을 PAC의 적정량으로 보는 것이 적합하다고 판단된다. (Table 4)

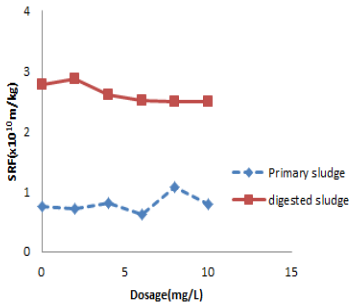


Fig. 7. Effect of PAC on SRF in primary sludge and digested sludge

*Bacillus sp.*를 1차 슬러지에 주입했을 때 3.3 (v/v %) 주입 시 비저항계수 값은 $1.09x10^{11}$ m/kg 의 높은 값을 보이므로 *Bacillus sp.*주입으로 악취 제거와 보조 응집제로 PAC 주입량은 6 mg/L이 고려되었다.

Table 4. Comparison of specific resistance on primary sludge and digested sludge

Alum Dosage (mg/L)	primary sludge (m/kg)	digested sludge (m/kg)
0	$1.19x10^{10}$	$8.95x10^{10}$
200	$0.99x10^{10}$	$1.7x10^{10}$
400	$0.79x10^{10}$	$0.94x10^{10}$
600	$0.36x10^{10}$	$5.52x10^{10}$
800	$0.25x10^{10}$	$7.51x10^{10}$
1000	$0.099x10^{10}$	$10\ x10^{10}$

PAC Dosage (mg/L)	primary sludge (m/kg)	digested sludge (m/kg)
0	$0.75\ x\ 10^{10}$	$2.8\ x\ 10^{10}$
2	$0.72\ x\ 10^{10}$	$2.9\ x\ 10^{10}$
4	$0.81\ x\ 10^{10}$	$2.6\ x\ 10^{10}$
6	$0.62\ x\ 10^{10}$	$2.5\ x\ 10^{10}$
8	$1.07\ x\ 10^{10}$	$5.0\ x\ 10^{10}$
10	$0.79\ x\ 10^{10}$	$2.5\ x\ 10^{10}$

4. 결론

본 연구에서는 하수 처리장에서 발생되는 하수슬러지를 대상으로 자연 친화적이고 하수처리에 많은 장점이 있는 *Bacillus sp.*를 하수 슬러지에 적용함으로써 악취 제거에 대한 타당성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 1차 슬러지에 공기 공급과 *Bacillus sp.*의 주입에 의한 악취물질의 제거 가능성 실험에서는 24시간, 48시간, 72시간 경과 후의 NH_3제거율은 12.5 %, 12 %, 42.1 %를 나타내었고, *Bacillus* sp.농축액 10%와 기타 물질을 넣어 고형화시킨 BIO-CLOD를 주입한 반응기에서는 NH_3제거율이 43 %, 70 %, 81 %의 제거율을 보였다.
2) NB배지에서 배양된 *Bacillus sp.*를 1차 슬러지 반응기에 주입하여 악취 물질 제거능을 알아 보기위해 주입율 0%, 1.7%, 3.3%, 6.7(v/v %)에서 72시간 경과 후의 TVOC제거율은 59 %, 71 %, 88 %, 98 %를 나타내었고, NH_3제거율은 29 %, 25 %, 31 %, 48 %로서 TVOC 제거율이 더 높았다.
3) 1차 슬러지에 *Bacillus sp.*배양액 주입 농도에 따른 탈수 실험에서는 *Bacillus sp.*주입 농도 4(v/v%)에서 탈수능에 영향을 주는 것으로 나타났다.
4) Alum과 PAC을 사용한 1차 슬러지와 소화슬러지의 SRF값으로 Alum의 적정량은 500 mg/L으로 PAC은 6 mg/L로 주입하는 것이 타당하다고 판단되었다.

Reference

[1] Ministry of Environment, Environ. statistics year book, Available : [accessed 1 July 2016] http://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10264&seq=6671.

[2] Ko B. C., Lee J. K., Lee Y. S., Lee M. G., Kam S. K., “A study odor emission characteristics of domestic sewage treatment facilities using composite odor concentration and hydrogen sulfide concentration” *J. of the Environ Sciences* , 21(11), pp. 1379-1388, 2012. DOI: http://dx.doi.org/10.5322/jes.2012.21.11.1379

[3] Eom T. K., “The study for the advanced efficient of SBR process using *Bacillus sp.*” *J. of Korean Soc. of Water Sci. and Tech..*, 19(6), pp. 11-19, 2011.

[4] Kim E. H., Cho Y. J., Park S. J., Shin K. S., Yim S. B., Jung J. K., “ Advanced wastewater treatment process using rotating activated *Bacillus* contactor(RABC)” *J. of Korean Soc. on Water Quality*, 20(2), pp.190-195, 2004.

[5] Lee S. H., Son H. H., “Sedimentation and EPS production by the change of dissolved oxygen concentration for the aeration tank to treat wastewater with *Bacillus sp.” J. of the Koera Academia-Industrial Cooperation Society*, 8(3), pp.627-631, 2007.

[6] Ko B. C., Park Y. H., Kim D. I., Lee M. G., Kam S. K., “Odor removal characteristics of biofilters in domestic sewage treatment facilities analyzing composite

odor and odor quotient" *J. of the Environ Science*, 22(1), pp. 109-117, 2013.
DOI: http://dx.doi.org/10.5322/jes.2013.22.1.109

[7] Sung I. W., "The Study on the Odor Removal of Digested Sludge using BIO-CLOD" *J. the Koera Academia-Industrial Cooperation Society*, 16(12), pp.8665-8672, 2015.
DOI: http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.12.8665

[8] Park H. J., "Removal characteristics of total Coliforms in rotating activated Bacillus contactor process" pp. 39-40, Hong Ik University, 2003.

[9] Lim D. J., Lim K. H., "Characteristics on the incubation of sulfur compound-oxidizing strains separated for the removal of malodor" Korean Chem. Eng. Res., 47(6), pp. 788-794, 2009.

[10] Choi I., Lee H. J., Shin J. D., Kim H. O., "Evaluation of effectiveness of five odor reducing agents for sewer system odors using an on-line total reduced sulfur analyzer", pp.16892-16906, *Sensors,* 2012.
DOI: http://dx.doi.org/10.3390/s121216892

[11] Jung B. G., Seong D. H., Bin J. I., Lee B. H., "Removal of odorfrom food wastes by nightsoil treatment sludge including Bacillus" J. of Water Treatment, 22(5), pp.49-58, 2014.

[12] Huh M., Park C. K., "Odor control for the nightsoil treatment plant by a biological submerged deodorator with air lift aeration", J. of Korean Soc of Environ Eng, 11(1), pp. 1-11, 1989.

[13] Park O. H., Chun S. N., "A study on deordorization technology employing microorganisms(I) - Effect of temperature on hydrogen sulfide removal efficiency in activated sludge tank" J. of Korean Soc. of Environ Eng, 12(2), pp. 59-69, 1990.

성 일 화(Il-Wha Sung) **[정회원]**

- 1986년 2월 : 서울시립대학교 환경공학과 (공학석사)
- 1993년 2월 : 서울시립대학교 환경공학과 (공학박사)
- 1991년 8월 ~ 현재 : 가천대학교 환경에너지공학과 교수

<관심분야>
폐 · 하수처리, 폐기물