

기술노트

다양한 고도폐수처리공정에서의 생물반응조 세균수와 처리효율과의 비교

성기문^{**} · 조연제^{**} · 김성균^{***} · 박은원^{***} · 유기환^{****} · 이상현^{****} · 이등근^{****} · 박성주^{****,†}

^{*}대전대학교 대학원 미생물학과
^{**}글로벌 워터 인스티튜트 코리아(주)
^{***}대전대학교 미생물생명공학과
^{****}신라대학교 생명공학과

Comparison of Bacterial Numbers and Treatment Efficiencies in Bioreactors of Various Advanced Wastewater Treatment Processes

Gi Moon Sung^{**} · Yeon-Je Cho^{**} · Sung Kyun Kim^{***} · Eun Won Park^{***} · Ki Hwan Yu^{****} · Sang-Hyeon Lee^{****} · Dong-Geun Lee^{****} · Seong Joo Park^{****,†}

^{*}Department of Microbiology, Graduate School, Daejeon University
^{**}Global Water Institute Korea
^{***}Department of Microbiology & Biotechnology, Daejeon University
^{****}Department of Bioscience and Biotechnology, Silla University
(Received 12 November 2008, Revised 19 January 2009, Accepted 24 January 2009)

Abstract

Bacterial numbers, such as endospore-formers, and treatment efficiencies were investigated for Rotating Activated Bacillus Contactors (RABC) and other advanced wastewater treatment processes including anaerobic-anoxic-oxic (A2O), sequencing batch reactor (SBR) and biological aerated filter (BAF). Endospore-forming bacterial numbers in the RABC showed 129-fold higher levels than those of the existing advanced systems. RABC process demonstrated the highest bacterial numbers in its bioreactors (paired *t*-test, *p*<0.01). RBC biofilms and aeration tanks of the RABC system showed 131- and 476-fold higher than other existing advanced processes, respectively. Mean treatment efficiencies of the existing systems were 83.5% for chemical oxygen demand (COD), 59.1% for total nitrogen (TN) and 76.8% for total phosphorus (TP). However, RABC process removed 96.9% for COD, 96.9% for TN and 91.9% for TP for highly concentrated food wastewater (COD>1,500 mg/L, TN>150 mg/L, TP>50 mg/L). Treatment efficiency was significantly reduced when the numbers of *Bacillus* genus in the bioreactors decreased below 10⁶ CFU/mL. The automated RABC (A-RABC), in which dissolved oxygen concentrations are automatically controlled, showed higher treatment efficiencies compared to the RABC process. The RABC system maintained sufficient bacterial numbers for the effective treatment of highly concentrated food wastewater. Moreover, final effluent was in agreement to water quality standards.

keywords : Advanced wastewater treatment, *Bacillus*, Bacterial number, Rotating Activated Bacillus Contactor (RABC), Treatment efficiency

1. 서론

미생물의 활성을 이용하는 활성슬러지 공법은 우리나라 오수처리시설의 경우 약 80% 이상에 적용되며(박영식과 김동석, 2005) 폐수처리에도 널리 사용되어 왔다. 하지만 부유생장공정인 활성슬러지법은 낮은 활성으로 고부하에 민감하고 넓은 부지가 필요하며 슬러지 처리 문제가 대두되어, 폐수처리를 담당하는 미생물의 생물량을 늘리기 위하여 생물막을 이용하거나 슬러지 반송율을 증가시키는 공정들이 개발되었다(유익근 등, 2000). 한편 2002년 이후 하수

처리장 방류수 수질기준이 강화되었으며(환경부, 2004), 특히 부영양화의 원인물질인 질소나 인과 같은 무기영양염류 항목에 대한 규제가 강화되면서 고도처리공법에 대한 관심이 고조되어왔다(김응호 등, 2004).

내생포자형성세균은 유기물 농도의 감소, 가열, 용존산소(DO) 농도 감소 등 외부 환경조건이 열악해지면 영양세포가 죽지 않고 악조건을 견딜 수 있는 휴지기세포인 내생포자를 형성하였다가, 환경조건이 다시 호전되면 내생포자가 발아하여 원래의 영양세포로 변하는 특징을 가진다(Park et al., 2007).

RBC (rotating biological contactor) 공정의 변형인 RABC (Rotating Activated Bacillus Contactor) 공정은 *Bacillus*와 같은 내생포자형성세균수를 최대로 증가시킨 생물막공법의

[†] To whom correspondence should be addressed.
psjj@dju.kr

하나이다(김응호, 2007). RABC 공정은 일반적인 생물막공법의 장점인 유량 및 유기물 변동에도 처리효율이 낮아지지 않으며, 부지면적이 적게 소요되는 것 외에도 생물반응조 내 *Bacillus*를 포함하는 미생물 군집에 의해 고농도의 유기물, 질소, 인 및 악취성분의 제거가 매우 효율적으로 일어나는 것으로 보고되었다(김응호 등, 2004). RABC 공정은 RBC나 살수여상과 같은 생물막공법에서 사용되는 담체에 비하여 다공성이고 표면적이 훨씬 넓은 망상형 회전담체를 사용하기 때문에 생물량이 현저히 증가될 뿐만 아니라 담체 심층부까지 공기가 잘 통하도록 설계되어 있다(환경부, 2008). 최근 RABC 공정은 점감포기조에 DO 자동조절장치를 부착하여 영양세포의 포자화를 효과적으로 관리하는 Automated-RABC (A-RABC) 공정으로 발전되었다(환경부, 2008).

폐수처리효율에 생물량이 관계하고(유익근 등, 2000), RABC 공법이 *Bacillus* 속 세균 등 내생포자형성세균을 이용하여(Park et al., 2007) 악취저감과 슬러지 저감 및 처리효율의 향상을 가져왔지만(김응호, 2007), 생물반응조의 세균수와 처리효율과의 관계에 대한 보고는 많지 않은 실정이다. 이에 본 연구에서는 A-RABC 등 일련의 고도 하·폐수처리장 생물반응조에서의 호기성 및 혐기성 종속영양세균수(일반세균수)와 *Bacillus* 속을 포함하는 내생포자형성세균수를 조사하였으며, 이들 세균수와 하·폐수처리효율과의 관계를 분석하였다.

2. 연구방법

2.1. 분석대상 시료 및 분석기간

A-RABC 처리공정은 경상북도 김천시에 소재하고 있으며, 돈·도축 및 육가공 폐수를 1일 처리용량 1,300 m³ 규모로 처리하고 있다. 폐수는 RBC로 유입된 다음 #1, #2, #3 포기조 순으로 흐른다. DO 농도는 RBC에서 0.5~1.0 ppm이며, 포기조는 점감포기(tapered aeration) 방식으로 운영되어 #1, #2, #3 포기조 DO가 각각 1.0~1.5, 0.4~0.5, 0.1~0.2 ppm로 차례로 줄어든다. RABC 공정 시료는 부산 업공위생처리장, 양산 L 식품폐수처리장, 일본의 식품폐수처리장과 화학폐수처리장에서 채취하였다. 그리고 기존 고도처리공정 시료는 부산의 4개 하수종말처리장(강동, 녹산, 중앙, 장림)과 대전하수종말처리장에서 채취하였다. 2007년 8월부터 2008년 5월까지 채취된 총 28개의 시료를 분석하였다.

2.2. 세균탈착

시료를 손으로 3분 이상 아주 세게 흔들면서 교반하여 잘 섞은 후 시료 5.0 mL 씩을 멸균된 45.0 mL의 희석수가 담긴 falcon tube에 넣었다. 호기성 희석수는 0.85% NaCl의 증류수였고 혐기성 희석수는 증류수 1 L에 NaCl 2.25 g, KCl 0.105 g, CaCl₂·6H₂O 0.12 g, NaHCO₃ 0.05 g를 넣었으며, 최종농도 0.0001%가 되게 resazurin을 첨가하여 분홍색으로 혐기성을 확인할 수 있도록 하였다. 세균탈착 과

정은 교반(vortexing) 1분, 얼음에 꽂아두기 1분, 초음파세척(Branson sonicator 7150, USA) 1분, 얼음에 꽂아두기 1분의 총 4단계를 거치며(Lee et al., 2007), 이 과정을 연속적으로 3번 반복하였다. 세균탈착과정을 연속적으로 3회 실시한 후에 불순물을 제거하기 위하여 1,000×g에서 1분간 원심분리함으로써 시료 침전물과 세포가 함유된 상층액을 분리하였다.

2.3. 세균계수용 배지

호기성 종속영양세균은 1.5% (w/v) 한천이 첨가된 TSA 배지(Tryptic Soy agar media, Difco), 호기성 내생포자형성세균인 *Bacillus* 속(genus) 세균은 *Bacillus* 한천 배지(Fluka), 혐기성 종속영양세균은 혐기성 희석수에 TSA 한천배지를 첨가한 anaero-TSA 배지, 그리고 혐기성 내생포자형성세균인 *Clostridium* 속 세균은 RCM(Reinforced clostridial medium, Fluka)을 각각 사용하였다.

2.4. 배양 및 계수

연속희석된 시료를 희석비율별로 100 μL씩 취하여 평판배지 가운데에 접종하고 유리막대로 도말(loading)하였다. 호기성 종속영양세균과 내생포자형성세균은 37°C에서 48시간 배양한 다음 군체(Colony forming unit, CFU)를 계수하였다. 종속영양세균은 모든 군체를 계수하였고, *Bacillus* 속 및 *Clostridium* 속 세균의 계수는 배지 공급자의 지시에 따랐다. 실험 도중 혐기성세균이 죽는 것을 최대한 억제하기 위하여 30분 이내에 실험을 완료하였다. 멸균 증류수에 적신 Anaerocult A(Merck)나 GasPak EZ anaerobe container system(Becton, Dickinson and company, USA)을 Anaerobic jar(Merck)에 넣어 혐기성 조건이 유지되도록 하였으며, 혐기성 조건 확인을 위하여 추가로 dry anaerobic 100 indicator strip(BBL)을 anaerobic jar에 넣어 흰색이 그대로 유지되는 조건에서 37°C에서 96시간 배양한 다음 군체를 계수하였다.

2.5. 처리효율 조사

시료 채취일을 중심으로 1주일 동안 분석대상 플랜트의 평균 처리효율과 평균 유입수 및 방류수 수질을 비교 분석하였다. 부산의 4개 하수처리장과 대전하수종말처리장의 운영 자료는 온라인에서 구하였다(대전광역시 시설관리공단, 2008; 부산환경공단, 2008).

3. 결과 및 고찰

3.1. 세균수 비교

Table 1은 분석한 시료들의 세균수를 처리공정별로 정리한 것이다. 전반적으로는 혐기성 내생포자형성세균인 *Clostridium* 속 세균의 수가 호기성 포자형성세균인 *Bacillus* 속 세균보다 많았다. 생물반응조의 총 종속영양세균수는 RABC 공정(A-RABC 및 RABC)이 평균 5.0×10⁸ CFU/mL로서 기존 공정의 평균 2.1×10⁶ CFU/mL에 비하여 233배 많았다.

Table 1. Bacterial numbers in bioreactors of various advanced biological wastewater treatment processes

Wastewater treatment process	Name of wastewater treatment plant	Bioreactor	Mean bacterial number (CFU/mL)						Ratio of <i>Bacillus</i> (%)	
			Bacilli (A)	Clostridia (B)	Endospore formers (A+B)	Aerobic heterotroph (C)	Anaerobic heterotroph (D)	Total heterotroph (C+D)	To aerobe (A/C)	To total [A/(C+D)]
A-RABC ^a	Gimcheon L food	Biofilm	5.8×10 ⁷	9.0×10 ⁸	1.0×10 ⁹	5.9×10 ⁸	9.6×10 ⁹	1.1×10 ¹⁰	9.8	0.5
		#1 Tapered aeration tank	1.7×10 ⁸	1.3×10 ⁸	7.4×10 ⁸	6.9×10 ⁸	5.3×10 ⁹	6.3×10 ⁹	24.3	2.7
		#3 Tapered aeration tank	8.8×10 ⁷	6.3×10 ⁸	9.1×10 ⁸	9.2×10 ⁷	5.6×10 ⁹	5.9×10 ⁹	95.5	1.5
RABC ^b	Yangsan L food	Biofilm	1.1×10 ⁷	3.7×10 ⁷	4.8×10 ⁷	3.1×10 ⁷	6.6×10 ⁷	9.7×10 ⁷	35.5	11.3
		#1 Tapered aeration tank	3.2×10 ⁷	1.1×10 ⁸	1.1×10 ⁸	9.1×10 ⁸	4.1×10 ⁷	9.1×10 ⁸	3.5	3.5
		#4 Tapered aeration tank	1.3×10 ⁷	2.0×10 ⁷	3.3×10 ⁷	1.3×10 ⁷	1.8×10 ⁷	3.1×10 ⁷	96.9	41.9
	Eomgung septage	Biofilm	4.7×10 ⁶	2.1×10 ⁶	6.8×10 ⁶	1.4×10 ⁷	1.5×10 ⁷	2.9×10 ⁷	33.6	16.2
	Japan food	Biofilm	4.0×10 ⁷	2.8×10 ⁸	3.2×10 ⁸	9.4×10 ⁸	1.5×10 ⁸	1.1×10 ⁹	4.3	3.6
	Japan chemical	Biofilm	1.7×10 ⁷	4.9×10 ⁷	6.6×10 ⁷	2.4×10 ⁷	2.6×10 ⁷	5.0×10 ⁷	70.8	34.0
Mean of A-RABC and RABC		Biofilm	1.8×10 ⁷	6.3×10 ⁷	9.3×10 ⁷	9.0×10 ⁷	1.3×10 ⁸	2.8×10 ⁸	20.4	6.5
		Aeration tank	5.0×10 ⁷	1.2×10 ⁸	2.2×10 ⁸	1.7×10 ⁸	3.8×10 ⁸	1.0×10 ⁹	30.0	4.9
		Total	2.9×10 ⁷	8.2×10 ⁷	1.4×10 ⁸	1.2×10 ⁸	2.1×10 ⁸	5.0×10 ⁸	24.2	5.8
NPR ^c	Daejeon sewage	Aeration tank	2.7×10 ⁴	-	-	1.9×10 ⁶	-	-	1.4	-
MLE ^d	Jangrim sewage	Aeration tank	2.7×10 ⁴	4.0×10 ⁶	4.0×10 ⁶	1.1×10 ⁶	6.2×10 ⁶	7.3×10 ⁶	2.5	0.4
	Noksan sewage	Aeration tank	1.3×10 ⁶	9.0×10 ⁵	2.2×10 ⁶	1.0×10 ⁷	1.9×10 ⁶	1.2×10 ⁷	13.0	10.8
SBR ^e	Gangdong sewage	Aeration tank	1.2×10 ⁶	6.3×10 ⁶	7.5×10 ⁶	1.3×10 ⁷	1.1×10 ⁷	2.4×10 ⁷	9.2	5.0
BAF ^f	Joongang sewage	Aeration tank	1.6×10 ³	1.8×10 ⁴	1.9×10 ⁴	2.5×10 ⁴	8.2×10 ⁴	1.1×10 ⁵	6.4	1.5
Mean of Others			7.1×10 ⁴	8.0×10 ⁵	1.1×10 ⁶	1.5×10 ⁶	1.8×10 ⁶	2.1×10 ⁶	4.8	3.3

^aA-RABC: Automated-RABC; ^bRABC: Rotating Activated Bacillus Contactor; ^cNPR: Nitrogen & Phosphorus Removal process which is a modified A2O with an fluidized-bed oxic tank; ^dMLE: Modified Ludzack-Ettinger; ^eSBR: Sequencing Batch Reactor; ^fBAF: Biological Aerated Filter.

그리고 내생포자형성세균수 역시 RABC 공정이 평균 1.4×10⁸ CFU/mL로 기존 공정의 평균 1.1×10⁶ CFU/mL의 129배였다. RABC 공정에서 세균수의 가장 큰 특징은 내생포자형성세균 가운데서도 특히 *Bacillus* 속 세균수가 기존 공정에 비해 현저히 증가되었다는 사실이다($p < 0.01$, paired t -test). 즉 RABC 공정의 평균 *Bacillus* 속 세균수 2.9×10⁷ CFU/mL(4.7×10⁶~1.7×10⁸ CFU/mL)은 기존 공정 평균 7.1×10⁴ CFU/mL(1.6×10³~1.3×10⁶ CFU/mL)의 401배로서, 종속영양세균수 233배나 *Clostridium* 속 세균수 증가폭 129배보다 훨씬 높게 나타났다. 즉 기존 고도처리공정의 생물반응조에서 가장 많은 *Bacillus* 속 세균수 1.3×10⁶ CFU/mL은 RABC 공정에서는 가장 적은 세균수인 4.7×10⁶ CFU/mL보다 더 낮은 수준인 것이다. RABC 공정의 생물반응조인 RBC와 점감포기조에서 세균수의 변화는 별로 없었다. 하지만 *Bacillus* 속 세균의 비율에 있어서는 후속 포기조가 전단계의 포기조보다 현저히 증가되는 것으로 나타났다. A-RABC 공정의 점감포기조에서의 호기성 종속영양세균수

대비 *Bacillus* 속 세균수 비율을 보면 #3 포기조가 95.5%로서 #1 포기조의 24.3%에 비해 3배 이상 증가하였고, RABC 공정에서는 #4 포기조가 97%, #1 포기조가 3.5%로 16배 이상으로 현저히 증가되었다. 이렇게 RABC 공정 #1 포기조의 *Bacillus* 속 세균 비율이 불과 3.5%로 현저하게 감소된 것은, Table 1에서 보는 바와 같이 #1 포기조에서 *Bacillus* 수가 급격하게 줄어들었기 때문이 아니라(#1 포기조 3.2×10⁷ CFU/mL, #4 포기조 1.3×10⁷ CFU/mL), #1 포기조의 호기성생균수 즉 호기성 종속영양세균수가 #4 포기조에 비해 훨씬 많기 때문인 것이다(#1 포기조 9.1×10⁸ CFU/mL, #4 포기조 1.3×10⁷ CFU/mL). #1 포기조의 종속영양세균수가 이렇게 많은 것은 첫째, 바로 앞에 위치한 생물반응조 즉 RBC의 유출수가 #1 포기조로 유입됨으로써 호기성생균수가 증가한 것이고, 둘째, #1 포기조의 종속영양세균은 후속되는 점감포기조를 거쳐 마지막 #4 포기조에 이르면 종속영양세균은 대부분 사멸 또는 불활성화되는 반면(98.6% 감소), 내생포자를 생성하는 *Bacillus* 속 세균은

상대적으로 생장 가능성이 훨씬 높기 때문이다(59.4% 감소). 즉 마지막 점감포기조인 #4 포기조 DO 농도가 0.1~0.2 ppm의 무산소조건인 동시에 영양소 결핍상태로서 *Bacillus* 속 세균은 내생포자를 형성하여 생존하는 반면 다른 종류의 호기성 종속영양세균은 생장이 억제되거나 사멸되기 때문이다(김응호 등, 2004). 결과적으로 정상적으로 가동되고 있는 RABC 공정의 마지막 점감포기조에서는 호기성 종속영양세균의 95% 이상이 *Bacillus* 속 세균으로 구성되는 것이다. RABC 공정의 생물막에서의 평균 *Bacillus* 속 세균수는 1.8×10^7 CFU/mL이었다. Park 등(2007)은 폐수가 아닌 생활하수를 처리하는 RABC, RBC, 활성슬러지 공정에서의 *Bacillus* 속 세균수를 보고하였는데, RABC가 $10^6 \sim 10^7$ CFU/mL, RBC가 10^5 CFU/mL, 활성슬러지 포기조가 10^4 CFU/mL로서 폐수처리와 마찬가지로 하수처리에서도 RABC에서의 *Bacillus* 속 세균수가 RBC나 활성슬러지 공정보다 수십~수천 배 더 많았다.

RABC 공정의 생물반응조 세균수는 A-RABC 공정에 비해 상대적으로 적은 것으로 나타났다($p < 0.01$, paired *t*-test). 특히 *Bacillus* 속 세균을 비롯한 내생포자형성세균의 수를 비교하면 A-RABC 공정이 $10^8 \sim 10^9$ CFU/mL로서 RABC 공정의 내생포자형성세균 $10^6 \sim 10^8$ CFU/mL에 비하여 훨씬 많았다. 이것은 DO 자동조절장치가 내생포자형성세균의 비율을 높인데 매우 효과적으로 작용한 결과로 보인다.

3.2. *Bacillus* 속 세균수와 처리효율과의 관계

폐수의 질소나 인을 제거하는 고도처리공정은 수역의 부영양화 방지를 위한 목적으로 운영되어 왔으나, 최근 질소 제거로 폐수처리장의 악취를 줄일 수 있다는 점에서도 관심이 고조되고 있다(김응호, 2007; 박영식과 김동석, 2005). 이러한 관점에서 *Bacillus* 속 세균을 우점화시킨 폐수처리공정이 질소 화합물과 인 화합물의 제거효율이 높다는 연구결과가 발표된 바 있다(김응호, 2007; 성기문 등, 2001; 조연제와 성기문, 2000). 본 연구에서는 RABC 공정과 기존 고도처리공정의 생물반응조 내 *Bacillus* 속 세균수와 유기물(COD), 총질소(TN), 총인(TP)의 처리효율을 서로 비교

해 보았다.

Table 2는 고도처리공정별 유입수와 방류수의 COD, TN, TP의 평균 농도를 나타낸 것이다. A-RABC나 RABC 공정의 유입폐수는 COD 1,450 mg/L 이상, TN 160 mg/L 이상, TP 50 mg/L 이상인 고농도의 식품폐수이거나 분뇨 및 정화조 폐수였다. 이에 비하여 기존 고도처리공정의 하수처리장 유입수는 COD 140 mg/L 미만, TN 20~62 mg/L, TP 5 mg/L 미만의 생활하수로서 RABC에 비해 훨씬 저농도 폐수였다. 그럼에도 불구하고 RABC 공정의 평균 방류수질은 COD 49 mg/L, TN 8.6 mg/L, TP 4.4 mg/L로서, 기존 고도처리공정의 평균 TN 방류수질인 14.0 mg/L에 비하여 현저히 낮은 농도를 유지함으로써 탁월한 질소 제거효율을 보여주었다. 김응호 등(2004)은 이러한 RABC 공정의 높은 고도처리효율이 점감포기방식의 부유미생물반응조 설치 때문인 것으로 평가하였다.

Fig. 1은 폐수처리공정별 COD, TN, TP의 처리효율과 생물반응조 가운데 포기조 내 *Bacillus* 속 세균수와 호기성 종속영양세균수를 나타낸 그림이다. A-RABC와 RABC 공정은 기존 공정보다 처리효율이 항상 우수하였다. 그리고 RABC 관련 공정의 *Bacillus* 수는 모든 기존 공정에 비하여 최대 10^5 배 많은 10^6 CFU/mL 이상을 유지하였으며, 특히 A-RABC 공정의 *Bacillus* 수는 10^9 CFU/mL에 가까울 정도로 아주 많았다. 반면 호기성 종속영양세균수의 경우 2 종류의 기존 공정(MLE, SBR)에서 RABC 공정과 비슷하거나 약간 많기는 했지만 그 처리효율에 있어서는 RABC 관련 공정에 비해 낮았다. 이렇게 RABC 공정이 기존 공정보다 처리효율이 높은 것은 상대적으로 훨씬 많은 *Bacillus* 속 세균수와 관련이 있을 가능성이 큰 것으로 보인다.

A-RABC 공정의 파일럿플랜트와 실증플랜트의 점감포기조 폐수에 포함된 *Bacillus* 속 세균수를 비교한 결과, 파일럿플랜트가 실증플랜트에 비해 1/10~1/1000 수준인 5.0×10^5 CFU/mL인 경우가 있었다. 그런데 이 당시 파일럿플랜트의 TN과 TP 처리효율을 확인한 결과 80% 미만의 처리효율을 기록하였는데, 이 정도의 처리효율은 95% 이상의 처리효율을 유지하는 실증플랜트보다 훨씬 낮을 뿐만 아니라 기존

Table 2. Influent and effluent qualities and important operating parameters of various advanced biological wastewater treatment processes

Process ^a	Plant name	Influent (mg/L)			Effluent (mg/L)			Flowrate (m ³ /d)	F/M ratio	MLSS in aeration tank (mg/L)	DO (mg/L)
		COD ^b	TN	TP	COD ^b	TN	TP				
A-RABC	Gimcheon L food	1720	168.5	62	54.2	4.4	1.7	1,300	0.4~0.8 ^c	3500~4500	0.5~1.0 ^f
RABC	Eomgung septage	1470	350	53	43.5	12.7	7.1	3,500	0.05~0.2 ^d		1.5~0.1 ^g
Mean of A-RABC and RABC		1595	259.3	57.5	48.8	8.6	4.4				
NPR	Daejeon sewage	95	44.2	3.7	12.9	20.0	0.5	20,000	0.3~3.0 ^d	4000~8000	≥2.0 ^h
MLE	Jangrim sewage	132	62.4	4.7	21.5	18.3	0.8	285,000	0.03~0.15 ^d	3000~5000	1.5~3.0 ^h
	Noksan sewage	76	23.6	2.5	18.0	12.1	1.0	10,000			
SBR	Gangdong sewage	64	20	3.2	7.6	9.8	0.9	15,000	0.05~0.2 ^d	3000~5000	2.0~3.0 ^h
BAF	Joongang sewage	57	32.5	2.9	9.7	9.7	0.5	120,000	NA ^c	NA ^c	≥2.0 ^h
Mean of others		85	36.6	3.4	13.9	14.0	0.7				

^aSee table 1 for A-RABC, RABC, NPR, MLE, SBR, and BAF; ^bCOD_{Mn} for sewage and COD_{Cr} for others; ^ckgBOD/m²·d in RBCs; ^dkgBOD/kgMLSS·d in aeration tanks; ^eNot available; ^fDO in RBCs; ^gDO in tapered aeration tanks; ^hDO in aeration tanks.

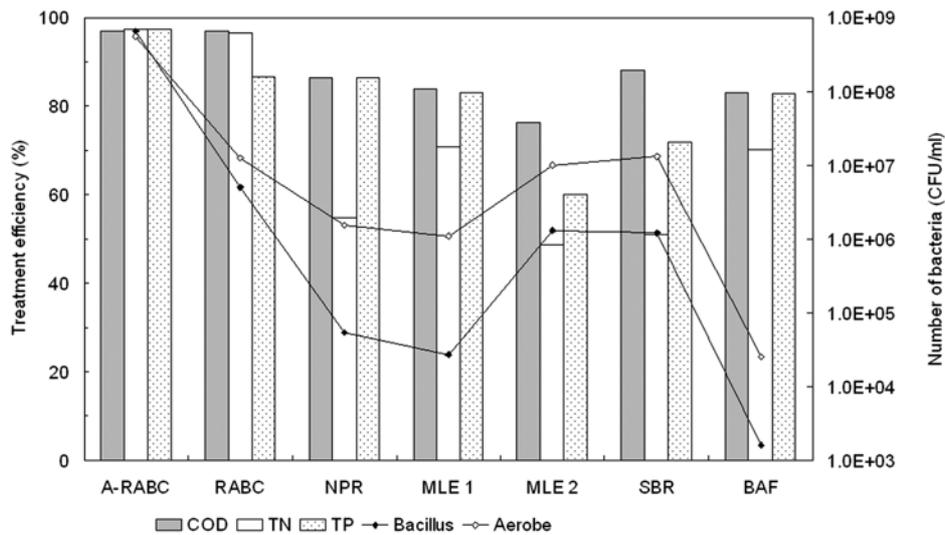


Fig. 1. Comparison of treatment efficiencies (%) in terms of COD, TN, and TP with numbers of *Bacillus* (◆) and aerobic heterotrophic bacteria (◇) in aeration tanks of various advanced biological wastewater treatment processes. MLE 1 and MLE 2 represent the Noksan and Janggrim sewage treatment plants, respectively (refers to tables 1 and 2).

의 다른 고도처리공정에 비해서도 낮은 수준이었다. 이 결과는 A-RABC 공정의 생물막은 물론 점감포기조 역시 *Bacillus* 속 세균수가 10⁶ CFU/mL 미만으로 감소할 때는 TN과 TP와 같은 고도처리효율이 현저히 저하될 수 있음을 보여주는 단서가 될 수 있을 것이다. RABC 시스템으로 가동되고 있는 엄궁위생처리장의 경우 생물막은 *Bacillus* 속 세균수가 10⁶ CFU/mL 정도이고(Table 2), TN과 TP의 처리효율이 각각 96%, 87%를 유지하였다. 폐수처리가 아닌 하수처리에 RABC공정이 적용된 것은 300 m³/일 처리용량의 실증플랜트 RABC 공정이 있는데, 이 하수처리 RABC 공정에서의 생물막 *Bacillus* 속 세균수는 10⁷ CFU/mL, 그리고 COD_{Cr}, TN, TP 처리효율이 각각 86.5%, 79.0%, 70.0%를 기록하였다(환경부, 2003). 폐수처리효율에 비하여 하수처리효율이 이렇게 낮은 것은 처리수 수질은 비슷한 반면 유입하수 수질이 유입폐수의 1/10 수준으로 낮기 때문이다.

기존 고도하수처리공정의 포기조는 공법에 관계없이 전반적으로 호기성 종속영양세균수와 *Bacillus* 속 세균수가 RABC 공정보다 훨씬 적었다. 특히 처리효율은 COD_{Mn} 83.5%(76.3~88.1%), TN 59.1%(48.7~70.7%), TP 76.8%(60.0~86.5%)로서, 본 연구 대상 RABC 폐수처리공정에 비해서는 현저하게 낮았으며 TN 처리효율이 특히 낮았다. Table 2에서 보는 바와 같이 기존 공정에서는 평균 36.6 mg/L의 TN이 유입되어 14.0 mg/L의 방류수가 생산되는 것에 비하여, A-RABC 공정은 168.5 mg/L의 TN이 유입되어 4.4 mg/L에 불과한 낮은 TN 농도의 방류수가 생산되고 있었다. 그리고 기존 공정과 RABC 하수처리 공정의 처리효율을 비교해 보았을 때도 RABC 공정의 TN 처리효율은 훨씬 우수하였으며 COD와 TP 처리효율은 비슷하였다. 김응호 등(2004)은 RABC 공법이 활성슬러지 공법에 비해 슬러지의 발생량은 적고 침강성은 높다는 장점이 있다고 보고하였다.

Bacillus 속 세균 우점화 과정을 통한 폐수처리공정이 돈도축 폐수(조연제와 성기문, 2000)와 매립장 침출수 처리(성기문 등, 2001)에서도 높은 처리효율을 나타낸다는 사실은 이미 보고된 바 있다. 점감포기방식을 통하여 *Bacillus* 속 세균수를 현저하게 증대시키고 있는 RABC 공정의 핵심은 마지막 점감포기조의 DO 농도를 0.1~0.2 ppm로 현저히 낮추는 것이다. 이런 낮은 DO 농도는 *Bacillus*의 영양세포가 내생포자로 변하게 하는 반면, 다른 종류의 세균은 생장을 억제시키거나 사멸시킴으로써 *Bacillus* 속 세균의 비율이 높아지는 것이다(Table 1). 김응호 등(2005)은 *Bacillus* 속 세균의 생장과 포자화를 통하여 *Bacillus* 속 세균수가 일정 수준으로 증가하면 슬러지 침강성이 증가함으로써 대장균군의 제거효율이 증대되는 것으로 보고하였다. *Bacillus* 속 세균의 우점화를 통한 하·폐수처리효율 향상(김응호 등, 2004; 조연제와 성기문, 2000), 생물막의 증가를 통한 폐수처리효율 향상에 관한 보고(유익근 등, 2000)도 있었지만, RABC 공정에서 *Bacillus* 속 세균과 일반세균의 농도에 따른 처리효율에 관한 보고는 거의 없었다. 본 연구 결과 RABC 공정의 모든 생물반응조 즉 생물막과 포기조의 *Bacillus* 속 세균수가 10⁷ CFU/mL 이상이면 우수한 처리효율이 유지되는 반면, 10⁶ CFU/mL 미만으로 감소하면 TN과 TP와 같은 고도처리효율이 감소될 수 있음을 보여 주었다(Fig. 1).

4. 결론

RABC(Rotating Activated Bacillus contactor), A-RABC(Automated RABC)와 기타 하수 및 폐수 고도처리공법을 대상으로 *Bacillus* 속 세균수와 처리효율과의 상관성을 분석하기 위하여 2007년 8월부터 2008년 5월까지 총 28개의 시료를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) RABC 공정의 생물막의 경우 종속영양세균수(호기성+혐기성)는 생물막인 RBC가 평균 2.8×10^8 CFU/mL, 점감포기조 폐수는 평균 1.0×10^9 CFU/mL로서 기존 고도처리공정의 평균 종속영양세균수 2.1×10^6 CFU/mL의 131배 및 476배에 달하였다. 특히 바실러스와 같은 내생포자형성세균을 우점화시키기 위하여 RBC에 후속되는 점감포기조를 운영하는 RABC 공정의 경우 내생포자형성세균수(바실러스수+클로스트리디움수)가 기존 공정의 129배에 해당하는 1.4×10^8 CFU/mL로서 점감포기에 의하여 내생포자형성세균이 현저히 증가되었다.
- 2) COD 1,500 mg/L 이상, TN 150 mg/L 이상, TP 50 mg/L 이상의 고농도식품폐수를 처리하는 A-RABC 공법과 분뇨를 처리하는 RABC 공법이, 타 고도하수처리공정에 비해 방류수 중 TN의 절대농도가 낮았으며, COD, TN, TP의 제거효율도 각각 13.4%, 37.8%, 15.1% 증가하였다.
- 3) A-RABC 시스템은 *Bacillus* 속 세균의 농도가 10^7 CFU/mL 이상이면 COD와 악취를 유발시키는 TN 및 TP의 처리 효율이 아주 우수할 것으로 판단되며, RABC 공정의 점감포기조에 DO 자동조절장치를 설치한 Automated RABC(A-RABC) 공정은 RABC 공정에 비하여 처리효율이 향상되었다.

사 사

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project 수행기관인 수처리 선진화사업단(과제번호: I²WATERTECH 04-7)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

김응호(2007). 포자형성균 우점화 RABC 공정 기술의 평가: 새로운 생물학적 하·폐수 고도처리 시대의 개막. *공동추계학술발표회 논문집*, 대한상하수도학회 · 한국물환경학회, pp. G1-G8.

- 김응호, 조연제, 박성주, 신광수, 임수빈, 박현주(2005). 회전식 부착 바실러스를 이용한 하수고도처리 공정에서의 총대장균군 제거 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **21**(1), pp. 73-78.
- 김응호, 조연제, 박성주, 신광수, 임수빈, 정진권(2004). 망상형 회전식 바실러스 접촉장치를 이용한 하수의 고도처리공정에 관한 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **20**(2), pp. 190-195.
- 대전광역시 시설관리공단(2008). 하수처리장 운영자료. <http://www.djsiseol.or.kr/sewage/sub04/sub0405.asp>.
- 박영식, 김동석(2005). 연속 회분식 반응기와 연속 회분식 생물막 반응기의 유기물, 질소 및 인의 동시 제거에 관한 비교 연구. *한국환경보전학회지*, **31**(2), pp. 152-159.
- 부산환경공단(2008). 하수처리장 운영현황. <http://www.beic.go.kr>.
- 성기문, 조연제, 안영태, 이철희, 이창근, 류병순(2001). Seil-Bio 공법을 이용한 매립장 침출수 처리. *추계학술발표회 논문집*, 한국폐기물학회, pp. 85-88.
- 유기환, 안성호, 심진기, 이영무, 김형수, 차기철(2000). 침지형 평막/생물반응기에 의한 식품폐수 처리. *대한환경공학회지*, **22**(8), pp. 1475-1484.
- 조연제, 성기문(2000). 바실러스균을 이용한 돈·도축폐수처리에 관한 연구. *공동추계학술발표회 논문집*, 한국물환경학회 · 대한상하수도학회, pp. 285-291.
- 환경부(2003). 망상형 회전식 바실러스 접촉장치(RABC)를 이용한 하수고도처리공법.
- 환경부(2004). 수질환경보전법.
- 환경부(2008). 고농도 식품 산업폐수의 집적형 고도처리기술 실용화.
- Lee, D. G., Park, S. J., and Kim, S. J. (2007). Influence of pipe materials and VBNC cells on culturable bacteria in a chlorinated drinking water model system. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, **17**(9), pp. 1558-1562.
- Park, S. J., Yoon, J. C., Shin, K. S., Kim, E. H., Yim, S., Cho, Y. C., Sung, G. M., Lee, D. G., Kim, S. B., Lee, D. U., Woo, S. H., and Koopman, B. (2007). Dominance of Endospore-forming Bacteria on a Rotating Activated Bacillus Contactor Biofilm for Advanced Wastewater Treatment. *Journal of Microbiology*, **45**(2), pp. 113-121.