

Bacillus sp.를 이용한 분뇨처리

염혜경¹ · 이은숙¹ · 이병헌¹ · 이민규² · 정일호³ · 김종균*

부경대학교 식품생명공학부 생물공학전공, ¹부경대학교 환경시스템공학부 환경공학전공
²부경대학교 화학공학부 화학공학전공, ³(주)대경엔텍 환경사업부

The Treatment of Night Soil using *Bacillus* sp.

Hae-Kyong Yeom¹, Eun-Sook Lee¹, Bung-Hyun Lee¹, Min-Gyu Lee²,
Ill-Ho Chung³ and Joong Kyun Kim*

Division of Food Science and Biotechnology, Pukyong National University
¹*Division of Environmental System Engineering, Pukyong National University*
²*Division of Chemical Engineering, Pukyong National University*
³*Division of Environmental Technology, Daekyong En-Tech International Co.*

Abstract

To study the characteristics of organic and nutrient removal by *Bacillus* species at high COD concentration of influent, three lab-scale batch reactors(R1, R2, R3), each of which has different substrate composition, were operated. More than 95% of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and COD_{Cr} concentrations were removed under an aerobic condition, and their removal efficiencies were found to be 22.6 and 90.5%(R1), 23.9 and 65.8%(R2), 30.2 and 86.4%(R3), respectively. The removal efficiency of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was high when an enough amount of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ was supplied, and that of COD_{Cr} was low when a high concentration of initial $\text{NO}_2^-\text{-N}$ was added. The amount of carbon utilized in denitrification was a little. In all reactors, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ was removed under an anoxic condition, but in the R3 reactor, 10% of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ could be removed even under an aerobic condition. The removal efficiencies of TN and TP were 41.8 and 49.5%(R1), 40.1 and 35.8%(R2), 47.0 and 57.6%(R3), respectively. Alkalinities destructed under an aerobic condition for each reactor were 4.96, 5.41 and 3.93 mg/L (as CaCO_3) per each gram of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ oxidized, respectively, while 3.06, 3.17 and 2.60 mg/L (as CaCO_3) of alkalinities were produced for each gram of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ reduced to N_2 . The SOUR were found to be 38.5, 52.7 and 42.0 mg $\text{O}_2/\text{g MLSS}/\text{hr}$, which indicated that *Bacillus* sp. had a higher cell activity than activated sludge. The OLR and sludge production were estimated to be 0.69 and 0.28(R1), 0.77 and 0.20(R2), 0.61 kg $\text{COD}/\text{m}^3/\text{day}$ and 0.25 kg $\text{MLSS}/\text{kg COD}$ (R3), respectively. From the N-balance, the highest percentage(40.9%) of nitrogen lost to N_2 was obtained in the R3 reactor. From all the results, the possibility of aerobic denitrification *Bacillus* sp. has been shown and the B3 process seemed to have two advantages: a little amount of carbon was required in denitrification and not much amount of alkalinity was destructed under an aerobic condition.

Key words – *Bacillus* sp., night soil treatment, nitrogen removal system, B3 process

*To whom all correspondence should be addressed
Tel : 051-620-6186, Fax : 051-620-6180
E-mail : junekim@pknu.ac.kr

서론

질소와 인을 포함한 배출수는 호수나 저수지의 부영양화를 가속화시키고 얕은 하천에서 조류와 수생식물 성장을 촉진시켜 심미적인 면에서 좋지 않다. 질소와 인의 제거는 수질관리와 하수장 처리공장 설계에 중요하며, 이것들을 제거하기 위한 여러 공법들이 개발되고 있다. 초기에 가장 많이 사용된 공정들은 암모니아 산화와 조절을 위한 생물학적 질산화, 외부탄소원인 메탄올을 이용한 생물학적 탈질화 및 인 제거를 위한 화학적 침전이었으며, 최근에는 다수의 공정이 인 제거만을 위하여 또는 질소와의 혼합제거를 위하여 개발되고 있다[4-6,10,11]. 그 동안 개발된 공정은 대부분이 외국에서 개발된 것으로서 우리나라의 하·폐수 적용에 많은 어려움이 있었고, 정부는 G7프로젝트 등을 통하여 한국형 하·폐수 영양소 제거공정 개발에 힘쓰고 있다.

B3(Bio Best Bacillus) 시스템은 건설교통부 신기술 제46호와 한국 특허 제 151928호로 등록된 하수고도처리기술의 하나로서 유기물 및 영양소를 제거하는 목적으로 주로 *Bacillus* 균주를 사용하는 생물학적 처리 기술로 알려져 있다. B3 공정은 반응슬러지와 반응조내 4실에서 1실로의 내부순환을 포함하는 4실로 이루어지는 반응조로 구성되어 있으며, *Bacillus* 균을 선택적으로 배양하고 우점화 시킨 후 이를 포자화 시킴으로써 포자의 침강성 및 슬러지의 침강성을 향상시키며, 약취제거, 폐수내의 유기물 및 영양소를 효율적으로 제거하는 공정으로 알려져 현재 국내에서 이 공정의 가치를 인정받고 있다[4]. 그러나, 이 공정의 가장 핵심인 *Bacillus* 균주의 의한 생물학적 처리공정에 대한 실제적인 반응기작 및 동력학적 계수 등의 처리특성에 관한 연구는 매우 미비한 실정이다. 따라서, B3 공정을 이용한 장기간 하수 처리시, 환경적 요인 등으로 원활한 처리가 되지 않아 그 처리율이 크게 떨어질 경우 이에 대한 복구가 바로 되지 못하고 과학적인 근거에 의하기보다는 운전 경험에 의한 정상 복구가 시도되고 있는 상황에서 볼 때, *Bacillus* 균주에 의한 처리 특성 규명은 매우 중요하다고 본다.

본 연구에서는 실험실 규모의 3가지 다른 기질 조성을 가지는 회분식 반응조를 운전하여 높은 COD 농도의 유입

수질에 따른 *Bacillus* 균주의 유기물 및 영양소 제거특성을 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

사용 균주 및 배양

본 실험에 사용된 *Bacillus* 균주는 pilot plant 단위의 B3 공정이 운전되고 있는 부산 엄궁 지역에서 얻었다. *Bacillus* 균주는 반응조중 제 1실에서 채취하였고, 실험실에서 1주일간 nutrient 배지에서 배양한 뒤 본 실험에 사용하였다. 실험에 사용한 *Bacillus* 균주의 접종량은 10%로 하였다.

대상 시료

대상시료는 부경대학교의 기숙사에서 방류되는 분뇨를 주입하였으며, 분뇨의 성상을 일정한 농도로 맞추기 위하여 glucose, NH₄Cl, KH₂PO₄ 및 K₂HPO₄ 시약으로 조제한 합성폐수를 일정량 혼합하여 COD_{Cr}, NH₄-N, 그리고 총인(TP) 등의 유입수의 농도를 조절하여 실험에 사용하였다. 초기 pH는 7.3으로 맞추어 실험하였다.

실험장치 및 운전조건

실험은 회분식 반응조에서 실행하였고, 회분식 실험장치는 실용적이 1.5L인 원통형의 아크릴로 만든 반응조 3개(R1, R2, R3)를 제작하여 사용하였다. 먼저, 호기적 조건(DO농도, 2±0.8 ppm)에서 6시간, 그 이후 무산소로 40 rpm의 교반기로만 시료 성분이 완전 혼합되도록 하여 DO 농도가 0.5 ppm이하가 되도록 유지시켜 18시간 운전하였다. 반응조 바깥쪽에는 항온수조를 설치하여 처리 반응온도를 30±2℃로 유지시켰다. R1, R2 및 R3 반응조의 기질 조성은 각각 (분뇨+합성폐수 주입), (분뇨+합성폐수 주입+NO₂⁻ 첨가) 및 (분뇨+합성폐수 주입+NO₃⁻ 첨가)로 하여 기질 조성을 달리하였으며, 각 반응조의 초기 평균 기질농도는 Table 1과 같다.

분석

모든 분석은 Standard Methods[1] 및 공해공정시험법에 의하여 실행되었는데, pH와 DO의 측정에는 pH Meter와 Oxygen meter를 각각 사용하였고, COD와 MLSS는 각각 Potassium dichromate reflux method 및 Gravimetric

Table 1. Average substrate concentrations (mg/L) in each reactor

Substrate	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3
COD _{Cr}	1040	1155	914
NH ₄ -N	349	363	321
NO ₂ -N	0	96	1.8
NO ₃ -N	0.2	0.3	158
TN	521	593	568
TP	39.0	35.2	42.9

method를 사용하여 측정하였다. NH₄⁺-N의 농도 및 alkalinity 소모량의 측정에는 각각 Electrode method와 Titration method를 사용하였고, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N 및 PO₄³⁻-P의 농도는 모두 Ion chromatography를 사용하여 분석하였으며, TN과 TP의 농도는 각각 Ultraviolet adsorption method와 Ascorbic acid reduction method로 측정하였다. 모든 분석은 세 번에 걸쳐 실시하였다. 산소섭취율(oxygen uptake rate; OUR)은 300 mL BOD병에 DO probe를 설치하여 단위 시간당의 산소농도의 변화(dO₂/dt) 양을 측정하여 계산하였다.

결과 및 고찰

NH₄⁺-N, NO₂⁻-N 및 NO₃⁻-N 제거율

기질 조성이 다른 R1, R2, R3 각 반응조에 있어서 *Bacillus* 균주에 의한 NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N, COD_{Cr}, TN 및 TP의 농도제거 실험의 결과를 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 1(a)에서 알 수 있듯이 NH₄⁺-N 농도는 6시간의 호기적 상태에서 질산화 반응으로 인하여 대부분 제거되었으며, 18시간동안의 무산소 상태에서는 나머지 2-5% 정도만 제거되었다. 초기 NH₄⁺-N 농도에 대한 R1, R2, R3 반응조의 NH₄⁺-N 제거율을 살펴보면 각각 22.6, 23.9, 30.2%로서, NH₄⁺-N의 제거는 NO₃⁻-N의 농도가 충분히 공급이 될 경우 제거효율이 높은 것으로 나타났다. 이는 NH₄⁺-N가 NO₃⁻-N의 제거시에 필요한 전자공여체(electron donor)로서 사용되어 질 가능성이 있어 보인다. 탈질에 의한 NO₃⁻-N의 제거시 가장 많이 사용되는 전자공여체로서는 메탄올이 가장 일반적으로 사용되는데, Cervantes et al.(2001)[3]은 upflow anaerobic blanket reactor를 사용한

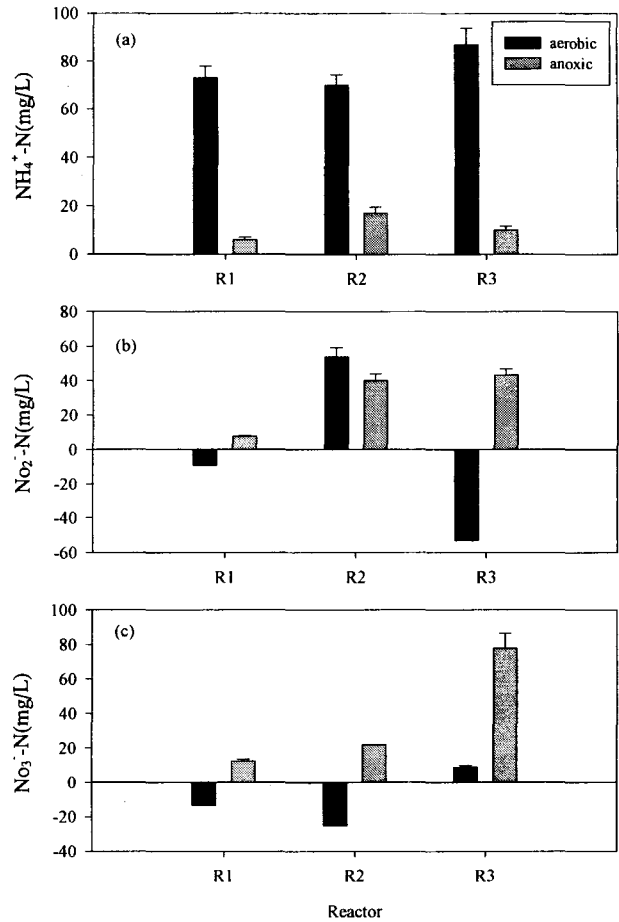


Fig. 1. Removed amounts of NH₄⁺-N (a), NO₂⁻-N (b) and NO₃⁻-N (c) by *Bacillus* sp. in each reactor under aerobic and anoxic conditions. Error bars: mean±S.D.

질소성분 제거실험에서 탈질시 전자공여체로 acetate 대신에 ammonium을 첨가하면 ammonium이 대체 전자공여체로서 사용되어 질 수 있으며, 불필요한 중간대사물의 생산까지도 줄일 수 있다고 보고한 바 있다.

NO₂⁻-N의 제거에 있어서는 초기 NO₂⁻-N의 농도가 아주 낮을 시(R1 및 R3 반응조의 경우)에는 *Bacillus* 균주에 의한 질산화 반응의 중간대사물질로서의 nitrite의 생성으로 인하여 반응조내에 NO₂⁻-N 농도의 축적이 일어났으나, 초기 NO₂⁻-N의 농도가 높을 시(반응 초기 NO₂⁻-N 첨가로 인한 R2 반응조의 경우)는 호기적 조건에서는 ammonium의 산화로 인한 중간 대사산물로서의 생성보다는 nitrate로의 산화로 인한 제거가 더 많았으며, 무산소 상태에서는 탈질에 의해 NO₂⁻-N이 제거되었다(Fig. 1(b)). R3 반응조의 경

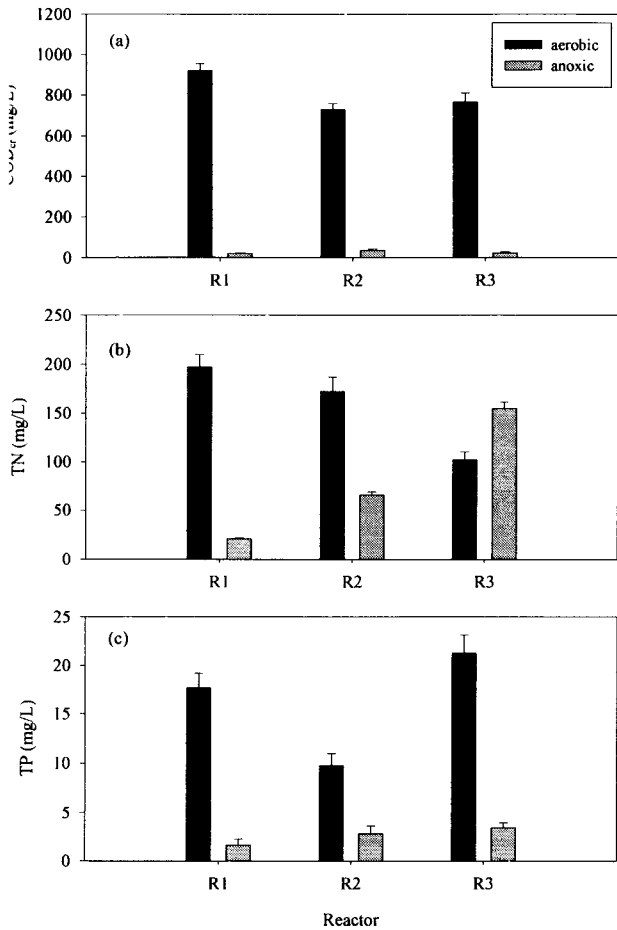


Fig. 2. Removed amounts of COD_{Cr} (a), TN (b) and TP (c) by *Bacillus* sp. in each reactor under aerobic and anoxic conditions. Error bars: mean ± S.D.

우, 호기조건에서 질산화 중간대사물질로 생성되었던 nitrite는 무산소 조건하에서 탈질로 79% 제거되었다. Fig. 1(c)를 보면, R1, R2, R3 모든 반응조에서 NO₃⁻-N농도의 대부분이 무산소 조건에서 거의 탈질되는 것으로 나타났으며 R3 반응조의 경우에만 호기상태에서도 10%의 제거가 일어났다. 추가적인 실험이 필요하지만, 이 결과로 미루어 보아 *Bacillus* 균주가 호기적 탈질을 일으킬 수 있다는 가능성이 엿보인다. 지금까지 호기적 탈질을 일으킨다고 보고된 균주들은 *Hyphomicrobium* X[12], *Thiosphaera pantotropha*[14], *Pseudomonas stutzeri*[15] 등이 있다.

COD_{Cr}, TN 및 TP 제거율

COD_{Cr} 농도 제거를 살펴보면, R1, R2, R3 모든 반응조

에서 호기조건하에 95%이상이 제거되는 것으로 나타났다 (Fig. 2 (a)). 무산소조에서 제거되는 양이 극히 미미한 것으로 보아 탈질에 이용되는 탄소량은 거의 없는 것으로 보이며, 따라서, 실제 *Bacillus* 균주에 의한 탈질과정에서는 일반적 전자공여체 대신에 암모니아성 질소가 전자공여체로서 이용될 수 있다는 이론을 뒷받침 해주고 있다. 초기 COD 농도에 대한 호기 및 무산소 처리 후의 COD 제거율을 계산하여 보면, R1, R2, R3 반응조에서 각각 90.5, 65.8, 86.4%로서 R1 반응조에서 그 처리효율이 가장 높았고, 질산화 중간 대사산물인 nitrite의 첨가는 COD 처리효율을 크게 떨어뜨림을 알 수 있었다. 이는 nitrite의 농도가 반응조내에서 축적되면, 질산화 반응을 어느 정도 저해하기 때문인 것으로 사료된다[2].

Fig. 2(b)에서 보듯이, 호기적 조건하에서 R1 반응조에서 R2 및 R3 반응조보다 총질소(TN) 제거가 많이 이루어졌다. Fig. 1(a)에서 NH₄⁺-N 제거량이 각 반응조마다 크게 차이가 나지 않음을 비추어 볼 때, 호기적 조건하에서는 유기질소 제거가 많이 일어남을 알 수 있었고, NO₂⁻-N 및 NO₃⁻-N의 초기 농도가 높으면 COD 제거에서와 같이 유기질소의 제거에 좋지 않은 영향을 미침을 알 수 있었다. 무산소 조건하에서는 R3 반응조의 결과에서와 같이 *Bacillus* 균주의 탈질을 통한 질소제거가 많이 일어남을 알 수 있었다. 총질소의 제거율은 각각 41.8%(R1), 40.1%(R2) 및 47.0%(R3) 이었다. Fig. 2(c)에는 총인(TP) 제거량을 나타내었는데, 호기적 조건하에서 *Bacillus* 균주 체내의 인 축적에 의해 많이 제거됨을 알 수 있었다. 무산소 조건하에서도 NO₂⁻-N 및 NO₃⁻-N의 초기 농도에 상관없이 소량의 인이 제거되었는데, biofloc 등에 의한 제거로 보여진다[4]. NO₂⁻-N 농도가 높은 R2반응조의 경우 전체 제거량이 가장 적었으며, R1, R2, R3 반응조별 총인의 제거율은 각각 49.5, 35.8 및 57.6% 이었다. 이는 높은 NO₂⁻-N 농도에서는 혐기적 인 섭취는 완전히 저해되고, 호기적 인 섭취는 어느 정도 이상의 저해작용이 일어날 수 있다는 보고[13]와 일치한다.

Alkalinity 소모량

Fig. 3(a)에는 alkalinity 소모량을 나타내었는데, alkalinity 변화량을 살펴보면 호기조건에서 암모니아의 산화에 의해 alkalinity의 농도가 많이 소모되었다가 다시 무산소

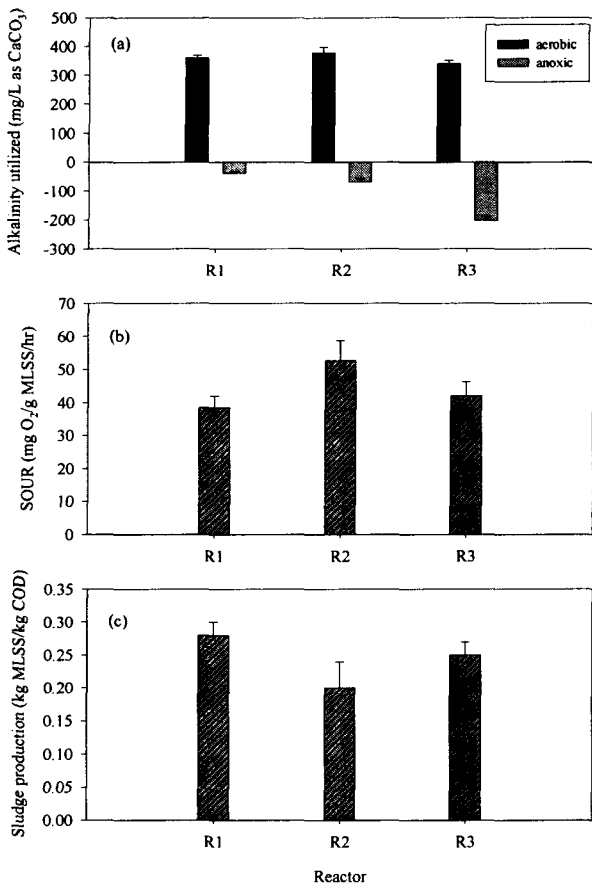


Fig. 3. The alkalinity utilized (a), the specific oxygen uptake rate (SOUR) (b) and the sludge production (c) by *Bacillus* sp. in each reactor. Error bars: mean \pm S.D.

조건에서 탈질반응에 의하여 회복됨을 알 수 있었다. 일반적으로 질산화가 일어날 경우 1 g의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 이 산화될 때 필요한 alkalinity는 7.08 g(CaCO_3 으로 환산한 농도로서)이 소모되며 탈질시에는 1g의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 이 N_2 로 변환되는 동안 회복되는 alkalinity는 3.5 g(CaCO_3 으로 환산한 농도로서)로 알려져 있다[5]. 본 실험의 경우, 6시간 동안의 호기적 조건하에서 1 mg/L의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 이 산화될 때 소모된 alkalinity는 R1, R2, R3 반응조에서 각각 4.96, 5.41, 3.93 mg/L(CaCO_3 으로 환산한 농도로서)이었으며, 이론적 계산값보다 55-76% 정도만 소모되었고, 그 이후 18시간의 무산소 조건하에서의 탈질시에는 1 mg/L의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 이 제거되는 동안 회복되는 alkalinity는 각각 3.06, 3.17, 2.60

mg/L(CaCO_3 으로 환산한 농도로서)이었다. 이론적 계산값과 비교하면 74~91%가 회복되었다. 이때, 반응 초기부터 반응이 끝날 때까지 각 반응조내의 pH 변화는 최대 0.4 이내에서 큰 변화가 없었다. 이렇게 이론값보다 적은 수치가 나오게 된 것은 실험에 사용된 *Bacillus* 균주의 cell activity 또는 사용 기질의 C/N비 등에 따라서 alkalinity 소모량이 달라진다고 볼 수도 있으나[9], *Bacillus* 균주의 경우, 호기적 조건하에서는 질산화 반응만이 무산소 조건하에서는 탈질 반응만이 각각 독립적으로 일어나지 않고, 앞에서 언급한 바와 같이 질산과 탈질반응이 호기적 조건에서 동시에 일어날 수도 있음을 보여준다고 사료된다[4]. 따라서, 질산화 반응에서 많은 alkalinity 소모가 생겨 이에 대한 alkalinity 보충에 드는 비용이 적지 않은 일반적인 하수처리 공정에 비해 *Bacillus* 균주를 사용한 공정은 그 경제적 효과가 크다고 생각된다.

비산소섭취율 및 슬러지 생산량

Fig. 3(b)에는 비산소섭취율(specific oxygen uptake rate; SOUR)의 결과를 나타내었는데, R1 반응조의 경우 단위 시간당 산소섭취율(dO_2/dt)은 평균 10.0 mg $\text{O}_2/\text{L/hr}$ 이었으며, R2, R3 반응조의 경우 각각 7.9, 8.4 mg $\text{O}_2/\text{L/hr}$ 이었다. 산소소모량은 포기시간 및 solids retention time(SRT)에 따라 변하는데 일반적으로 SRT에 따르는 산소섭취율은 SRT가 짧을수록, F/M비가 높을수록 증가한다[5]. R1, R2, R3 각 반응조의 SOUR 값을 구해보면, 각각 38.5, 52.7 및 42.0 mg $\text{O}_2/\text{g MLSS/hr}$ 이었다. OUR 수치는 기질제거에 있어 미생물의 활동도를 나타내며, SOUR 수치는 호기적 미생물의 활성 미생물량의 지표로 사용되고 있는데[8] *Bacillus* 미생물을 이용한 실험에서 얻은 위의 SOUR 수치는 기존의 활성슬러지보다 높은 값을 보였다[4]. 따라서, *Bacillus* 균주의 미생물 활동이 활성슬러지에 있는 균주보다 더 활발함을 알 수 있었다. 각 반응조의 유기물질 용적 부하율(organic loading rate; OLR)을 계산하면 각각 0.69(R1), 0.77(R2) 및 0.61 kg COD/ m^3/day (R3)이고, 이때 슬러지 생산량은 R1, R2, R3 반응조에서 각각 0.28, 0.20, 0.25 kg MLSS/kg COD로 나타났다(Fig. 3(c)). 이는 하수처리 시설 설계기준치인 0.2~0.4 kg COD/ m^3/day 에 비해 유기물 부하율이 상당히 높는데 반해 슬러지 생산량의 경

Table 2. Derived parameters for each reactor

Reactor	mg NO ₂ ⁻ -N removed/ mg NH ₄ ⁺ -N removed		mg NO ₃ ⁻ -N removed/ mg NH ₄ ⁺ -N removed		mg NO ₃ ⁻ -N removed/ mg COD removed		mg COD removed/ mg NH ₄ ⁺ -N removed	
	aerobic	anoxic	aerobic	anoxic	aerobic	anoxic	aerobic	anoxic
R1	- 0.13	1.25	- 0.18	2.07	- 0.01	0.63	12.63	3.28
R2	0.77	2.35	- 0.36	1.28	- 0.03	0.61	10.41	2.12
R3	- 0.16	4.34	0.10	7.77	0.01	3.38	8.82	2.30

Table 3. Nitrogen balance for each reactor (units: mg/L)

Reactor	Initial TN	Final NH ₄ ⁺ -N	Final NO ₂ ⁻ -N	Final NO ₃ ⁻ -N	Final Organic-N	Nitrogen in biomass ¹⁾	% N lost ²⁾
R1	521	270	1.8	1.2	30.0	32.2	35.7
R2	593	276	2.1	3.6	73.3	18.6	37.0
R3	568	224	11.5	71.3	4.2	24.8	40.9

¹⁾Biomass composition was assumed to be C₅H₇O₂N.

²⁾% lost N = 100 × ((initial TN) - (final NH₄⁺-N) - (final NO₂⁻-N) - (final NO₃⁻-N) - (final Organic-N) - (nitrogen in biomass)) / (initial TN).

우는 다른 기존의 영양소 제거 공법[5]과 비교시 다소 낮은 것으로 나타났다. 또한, 슬러지 생산량은 총인 제거량과 관련이 있는데, 슬러지 생산이 가장 적은 R2 반응조에서 가장 낮은 제거율을 보였다.

각 인자별 제거율 및 N-balance

이상의 테이블로부터 *Bacillus* 균주에 의한 각 인자별 제거율을 계산하여 Table 2에 나타내었다. 먼저 NH₄⁺-N 1 mg 당 제거된 NO₂⁻-N mg 수를 살펴보면, 질산화 반응이 우세한 호기적 조건하에서 R1, R3 반응조에서는 NO₂⁻-N 가 오히려 생성되었고, R2 반응조에서는 NO₃⁻-N으로의 전환으로 인해 NO₂⁻-N 농도가 제거되었음을 알 수 있었다. 탈질반응이 우세하게 일어나는 무산소 조건하에서는 N₂로의 대사과정이 일어남으로 인해 모든 반응기에서 NO₂⁻-N 농도가 제거되었으며, 그 중에서도 R3 반응조에서 가장 많은 제거가 일어났다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 무산소 조건에서의 탈질시, NH₄⁺-N이 대체 전자공여체로서 사용될 수 있음을 보여준다고 생각된다. NH₄⁺-N 1 mg 당 제거된 NO₃⁻-N mg 수는 호기적 조건하에서는 R1, R2 반응조의 경우 NH₄⁺-N이나 NO₂⁻-N로부터 NO₃⁻-N로의 전환이 이루어졌음을 시사하고, 무산소 조건하에서는 R3 반응

조에서 가장 높은 제거율을 보였다. COD 1 mg 당 제거된 NO₃⁻-N mg 수를 살펴보면, 호기적 조건하에서는 모든 반응조에서 제거가 잘 일어나지 않았고, 무산소 조건하에서는 R1, R2 반응조보다 R3 반응조에서 가장 높은 제거율을 보였다. 또한, NH₄⁺-N 1 mg 당 제거된 COD mg 수를 다른 실험결과와 비교하여 보면, R3 반응조의 경우 호기적 탈질을 일으킨다고 보고된 *T. pantotropha*를 사용한 실험결과[7]에 비해 그 값이 다소 낮으나 나머지 반응조에서의 결과는 비슷한 수치를 나타내었다. 이는 *Bacillus* 균주의 호기적 탈질 가능성을 나타내 준다고 보인다. Table 3에는 각 반응조별 N-balance를 이론적으로 계산한 결과를 나타내었는데, 최종적으로 *Bacillus* 균주에 의한 질산화·탈질반응으로 반응기에서 사라진 질소성분의 백분율은 R1, R2, R3 반응조에서 각각 35.7, 37.0, 40.9%으로 계산되어졌다. 즉, 각 반응조에서 *Bacillus* 균주에 의하여 질소성분이 최종적으로 N₂ 가스로 변환되어 반응조에서 제거된 것으로서, 앞선 결과들과 일치하게 초기 NO₃⁻-N 농도가 높은 R3 반응조의 경우가 가장 높은 제거율을 보였다.

요 약

높은 COD 농도의 유입수질에 따른 *Bacillus* 균주의 유

기물 및 영양소 제거특성을 파악하고자 실험실 규모의 3가지 다른 기질 조성을 가지는 회분식 반응조(R1, R2, R3)를 운전하였다. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 및 COD_Cr 농도는 호기적 상태에서 95% 이상 제거되었으며, 각 반응조의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 및 COD_Cr 제거율은 각각 22.6 와 90.5%(R1), 23.9 와 65.8%(R2), 30.2 와 86.4%(R3)이었다. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 제거는 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 농도가 충분히 공급이 될 경우 제거효율이 높은 것으로 나타났고, 초기 nitrite의 농도가 높을 시에는 COD 처리효율을 크게 떨어뜨림을 알 수 있으며, 탈질에 이용되는 탄소량은 거의 없었다. 따라서, *Bacillus* 균주에 의한 탈질과정에서는 일반적 전자공여체 대신에 암모니아성 질소가 전자공여체로서 이용될 수 있다는 가능성을 보였다. $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도는 무산소 조건에서 거의 탈질 되는 것으로 나타났으며, R3 반응조의 경우에만 호기상태에서도 10%의 제거가 일어났다. 총질소(TN)와 총인(TP)의 제거율은 각각 41.8 와 49.5%(R1), 40.1 와 35.8%(R2) 및 47.0 와 57.6%(R3) 이었다. Alkalinity는 호기조건에서 alkalinity의 농도가 많이 소모되었다가 다시 무산소 조건에서 탈질반응에 의하여 회복됨을 알 수 있었는데, 호기적 조건하에서 1 mg/L의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 이 산화될 때 소모된 alkalinity는 R1, R2, R3 반응조에서 각각 4.96, 5.41, 3.93 mg/L(CaCO_3 으로 환산한 농도로서)이었으며, 무산소 조건하에서는 1 mg/L의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 이 제거되는 동안 회복되는 alkalinity는 각각 3.06, 3.17, 2.60 mg/L(CaCO_3 으로 환산한 농도로서)이었다. R1, R2, R3 각 반응조의 SOUR 값을 구해보면, 각각 38.5, 52.7 및 42.0 mg O_2 /g MLSS/hr으로서 기존의 활성슬러지보다 높은 미생물 활성을 보였다. 각 반응조의 유기물질 용적부하율(OLR) 및 슬러지 생산량을 계산하면 각각 0.69 와 0.28(R1), 0.77 와 0.20(R2) 및 0.61 kg $\text{COD}/\text{m}^3/\text{day}$ 와 0.25 kg MLSS/kg COD (R3)이었다. 유기물 부하율이 상당히 높는데 반해 슬러지 생산량은 다른 공법에 비해 다소 낮은 것으로 나타났다. 초기 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도가 높은 R3 반응조는 무산소 조건하에서의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 1 mg 제거 당 가장 많은 양의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 제거 및 COD 1 mg 제거 당 가장 많은 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 량이 제거되었다. R1, R2 반응조에서의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 1 mg 당 제거된 COD mg수는 10.41-12.63으로서 호기적 탈질을 일으킨다고 보고된 *T. pantotropha* 균주를 사용한 실험결과와 비슷한 값을 나타내었고, N_2 로의 변환에 의한 질소제거를 N-balance로부터 구해보면, R3 반응조의 경우가 가장 높은 제거율(40.9%)을

보였다. 이상의 결과들을 볼 때, *Bacillus* 균주는 호기적 탈질을 일으킬 수 있는 가능성이 있고, *Bacillus* 균주를 이용한 B3 공정은 탈질에 이용되는 탄소량이 거의 없고, 적은 alkalinity 소모에 의한 경제적 이익 등 장점을 가진 공정으로 보여진다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 부경대학교 연구년 사업에 의하여 지원되었음.

참고 문헌

1. APHA. 1985. Standard methods for the examination of water and wastewater. 16th eds. American Public Health Association, Washington DC.
2. Bae, J.-H., S.-K. Kim and H.-S. Chang. 1997. Treatment of landfill leachates: ammonia removal via nitrification and denitrification and further COD reduction via Fenten's treatment followed by activated sludge. *Water Science and Technology* 36, 341-348.
3. Cervantes, F. J., D. A. De la Rosa and J. Gomez. 2001. Nitrogen removal from wastewater at low C/N ratios with ammonium and acetate as electron donors. *Bioresource Technology* 79, 165-170.
4. Choi, Y. S., S. W. Hong, S. J. Kim and I. H. Chung. 2000. Development of a biological process for livestock wastewater treatment using a technique for predominant outgrowth of *Bacillus* species. *Water Science and Technology* 45, 71-78.
5. Grady, Jr., C. P. L., G. T. Daigger and H. C. Lim. 1999. Biological wastewater treatment. pp. 3-18, 61-95, 216-221, 561-597, 2nd eds., Marcel Dekker, Inc., New York.
6. Grady, Jr., C. P. L. and C. D. M. Filipe. 2000. Ecological engineering of bioreactors for wastewater treatment. *Water, Air and Soil Pollution* 123, 117-132.
7. Gupta, A. B. and S. K. Gupta. 2001. Simultaneous carbon and nitrogen removal from high strength domestic wastewater in an aerobic RBC biofilm. *Water Research* 35, 1714-1722.
8. Huang, J. Y. C. and M. D. Cheng. 1984. Measurement and new applications of oxygen uptake

- rates in activated sludge processes. *Journal of Water Pollution Control Federation* **56**, 259-265.
9. Kristensen, E. 1993. Seasonal variations in benthic community metabolism and nitrogen dynamics in a shallow, organic-poor Danish lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **36**, 565-586.
 10. Lee, D. S., C. O. Jeon and J. M. Park. 2001. Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system. *Water Research* **16**, 3968-3976.
 11. Lee, H. S., S. J. Park and T. I. Yoon. 2002. Wastewater treatment in a hybrid biological reactor using powdered minerals: effects of organic loading rates on COD removal and nitrification. *Process Biochemistry* **38**, 81-88.
 12. Meiberg, J. B. M., P. M. Bruinenberg, W. Harder. 1980. Effect of dissolved oxygen tension on the metabolism of methylated amines in *Hyphomicrobium* X in the absence and presence of nitrate: evidence for aerobic denitrification. *Journal of General Microbiology* **120**, 453-463.
 13. Meinhold, J., E. Arnold and S. Isaacs. 1999. Effect of nitrite on anoxic phosphate uptake in biological phosphorus removal activated sludge. *Water Research* **33**, 1871-1883.
 14. Robertson, L. A., E. D. W. J. van Niel, R. A. M. Torremans and J. G. Kuenen. 1988. Simultaneous nitrification and denitrification in aerobic chemostat of *Thiosphaera pantotropha*. *Applied and Environmental Microbiology* **54**, 2812-2818.
 15. Su, J.-J., B.-Y. Liu, J. Lin and C.-P. Yang. 2001. Isolation of an aerobic denitrifying bacterial strain NS-2 from the activated sludge of piggery wastewater treatment systems in Taiwan possessing denitrification under 92% oxygen atmosphere. *Journal of Applied Microbiology* **91**, 853-860.

(Received September 30, 2002; Accepted November 20, 2002)