

SBR에서 BNR 슬러지 식종비에 따른 영양염류 제거 특성

김동석 · 박영식*†

대구가톨릭대학교 환경과학과, *대구대학교 보건과학부
(2007. 11. 21. 접수/2008. 1. 11. 채택)

Nutrient Removal Characteristics by the Addition Ratio of BNR Sludge in SBR

Dong-Seog Kim · Young-Seek Park*†

Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu

*Department of Health & Environment, Daegu University

(Received November 21, 2007/Accepted January 11, 2008)

ABSTRACT

Biological nutrient removal (BNR) sludge was added to a sequencing batch reactor (SBR) in the addition ratios of 0%, 20%, 40%, 50% while observing the variation of nutrient removal characteristics and microorganism groups. When the BNR sludge was added in a ratio over 40%, the characteristics of EBPR (enhanced biological phosphorus removal) was shown at the 27 days. However, a distinct BNR was not shown when the addition ratio of BNR sludge was lower than 40%. The organic removal efficiency were shown as 90% in all SBRs irrespective of the addition ratio of BNR sludge. At the 27 days, the phosphorus removal efficiencies were shown as 40%, 55%, 77% and 69%, respectively, according to the addition ratio of BNR sludge. Overall, efficient nitrification and phosphorus removal was shown when the added BNR sludge ratio was over 40%.

Keywords: SBR, BNR sludge, addition ratio, nutrient removal

I. 서 론

현재 우리나라에는 18,797개의 호소가 있으며 이들 대부분은 댐 등을 건설하여 조성된 인공호소로서 농업 용 저수지가 대부분이다. 호소는 대부분 폐쇄성 또는 준 폐쇄성 수역 공간이라는 구조적 특성 때문에 하천에 비해 자체정화 능력이 떨어지며 영양염류의 축적이 용이하여 일단 오염이 되면 부영양화(eutrophication) 등 2차 오염이 유발될 우려가 크다는 특성을 가지고 있다.¹⁾ 환경부에서는 호소수질보전대책으로서 호소 환경조사, 환경기초시설 방류수 수질 기준 강화 및 조류 예보제 등을 실시하고 있으나, 상대적으로 수질관리가 취약한 소규모 오수처리시설이나 마을 하수처리 시설에 대한 관리는 미흡한 실정이다.

하수나 오수에 포함되어 있는 질소와 인은 부영양화

를 초래할 수 있는 중요한 제한 요소들로서, 부영양화 현상이 심화되면 어류의 폐사, 악취 발생, 수역경관 훼손 등 수자원의 효율성이 크게 저하된다.

질소와 인을 제거하기 위한 방법들은 물리화학적 방법과 생물학적 방법으로 대별할 수 있다. 질소 처리의 경우 물리화학적 방법으로 암모니아 탈기, 염소 산화, 이온 교환 등의 방법이 이용되고 있으나, 생물학적 방법이 보다 경제적이고 효과적인 것으로 알려져 있다.²⁾ 또한, 인 처리의 경우에는 화학 첨가제를 이용한 응집과 침전 등의 방법을 이용하고 있는데, 이는 비용이 많이 들고 다량의 슬러지가 발생하는 문제점이 있는 것으로 지적되고 있다. 그러므로 수중의 질소와 인을 동시에 제거하기 위해서는 생물학적 방법이 가장 적절한 것으로 인식되고 있다.

생물학적 질소 제거는 유입 하수 중의 암모니아와 유기 질소가 일정 조건하에서 아질산성 질소를 거쳐 질산성 질소로 산화되는 질산화 과정(nitrification)과 질산성 질소가 환원되어 질소 가스로 전환되는 탈질화 과정(denitrification)을 통하여 완전한 처리가 가능하다. 최

†Corresponding author : Department of Health & Environment, Daegu University
Tel: 82-53-650-8043, Fax: 82-53-650-8049
E-mail : ysrkk@daegu.ac.kr

근 들어 새롭고 경제적인 생물학적 질소 제거 공정으로 partial nitrification, nitrifier denitrification, anaerobic ammonium oxidation (Anammox) 등이 개발되었으며, aerobic denitrification, lithoautotrophic denitrification, combined autotrophic nitrogen removal에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.³⁾

우리나라 소규모 오수처리시설의 경우, 오수는 유량의 변동이 심하고 C/N 비가 낮은 특성을 가지고 있고, 전문적인 관리 인력과 자동화 운전 설비의 부재로 인하여 pH나 DO와 같은 운전 인자의 조절이 불가능할 뿐만 아니라 적절한 슬러지의 배출이 곤란하여 저조한 질소·인 처리효율을 나타내고 있다.

소규모 오수처리시설에서는 SBR (sequencing batch reactor)이 많이 적용되고 있고,⁴⁾ SBBR (sequencing batch biofilm reactor)도 SBR의 변형된 공정으로 연구되고 있다.^{5,6)} 그러나 SBR의 경우 어느 생물학적 처리 시설과 마찬가지로 초기 가동(start-up)시 높은 질소·인 처리효율을 기대하기 힘든데, 이는 처리 시설의 초기 설치시 슬러지를 반응조에 식종하지 않은 채 운영을 하거나, 식종을 하더라도 적절한 최적의 슬러지 식종량을 효율적으로 결정하지 못하고 있기 때문이다.

본 연구에서는 glucose를 탄소원으로 하여 pH 조절

을 하지 않은 SBR의 초기 가동시, 질소와 인 제거능이 없는 활성슬러지에 일정 비율의 BNR (biological nutrient removal) 슬러지를 식종하여 질소와 인 제거 슬러지로의 전환과정을 관찰하였다. 또한 FISH (fluorescent *in situ* hybridization) 방법을 통하여 슬러지 식종에 따른 반응조내의 미생물 군집 변화를 실험 경과에 따라 연속적으로 조사하였다. 또한, 위의 연구 결과를 토대로 하여 일반 활성 슬러지의 생물학적 영양염류 제거(BNR) 슬러지로의 전환 시에 활용 가능한 기초 자료를 얻고자 하였다.

II. 실험재료 및 방법

1. 실험 재료

본 연구를 위하여 재래식 활성 슬러지 처리 시설인 K시 하수처리장의 반응 슬러지를 이용하였다. BNR 슬러지를 확보하기 위하여 일반적인 활성 슬러지를 약 6개월 이상 합성 폐수를 이용하여 혐기-호기-무산소(anaerobic-oxic-anoxic) 상태의 SBR에서 운전하였다.

실험에는 Fig. 1과 같이 4개의 SBR을 설치하여 운전하였는데, 크게 혐기-호기-무산소 상태의 3단계 반응으로 구성하였다. 각 반응조는 아크릴을 사용하여 150

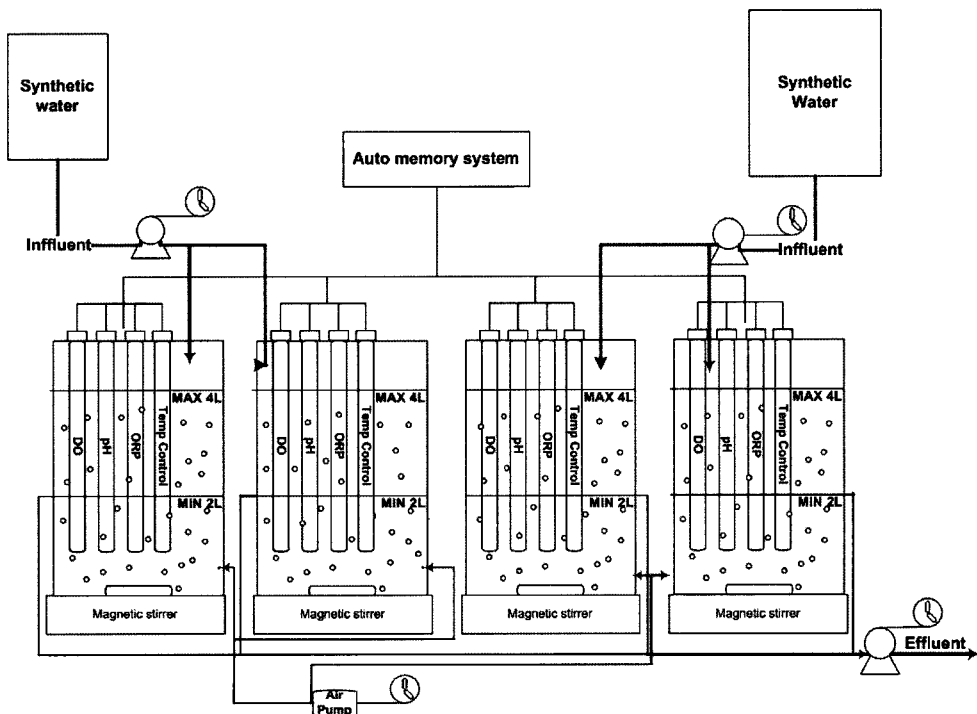


Fig. 1. Schematic diagram of sequencing batch reactors.

×150×250 mm의 크기로 제작되었으며, 유입 후 최대 용적량을 4l, 유출 후 최소 용적량을 2l가 되도록 하였다. 합성 폐수는 정량펌프를 이용하여 반응기 상부에서 매 주기마다 2l씩 유입시켰으며, 처리수는 침전 시간 30분 후 정량펌프를 이용하여 반응기 최대 유효 용적의 50%인 2l를 유출시켰다.

침전-배출 단계를 제외한 전 단계에서 반응기 내의 혼합을 위해 반응기 하부에 자석 교반기를 설치하여 일정하게 100~150 rpm으로 교반시켰으며, 온도는 자동온도 조절기를 이용하여 25±1°C를 유지하였다. 호기 단계에서는 공기 펌프를 이용하여 0.5 l/min의 공기가 반응기 하부에 설치된 산기관을 통하여 주입되었다. 기질 공급, 처리수 배출, 포기 및 혼합 등의 조작은 타이머(timer)를 이용하여 제어하였다. 반응 주기는 12 h/cycle로 하였다.

반응 단계는 유입, 혐기, 호기, 무산소, 침전, 배출, 휴지 단계가 이루어지도록 하였으며 유입 시간 30분을 포함한 혐기 단계를 3시간 30분, 호기 단계와 무산소 단계를 각각 3시간 30분으로 설정하였다. 또한 침전과 배출 단계를 1시간으로 하고 휴지 단계를 30분으로 설정하였다.

유입된 합성 폐수 성분은 Table 1과 같으며, 농도는 TOC (total organic carbon) 240 mg/l, NH₄⁺-N 20 mg/l, PO₄³⁻-P 15 mg/l로 일정하게 유지되었다.

실험에 사용된 일반 활성슬러지는 K시의 하수처리장에서 채취하여 과포기를 통하여 질소와 인 제거능력을 인위적으로 떨어뜨려 사용하였으며,⁷⁾ BNR 슬러지는 질소와 인이 정상적으로 제거되는 SBR에서 채취하여 사용하였다. 일반 활성 슬러지는 각각 반응조당 MLVSS (mixed liquor volatile suspended solid) 1,200 mg/l로 일정하게 유지하였으며, BNR 슬러지는 각 반응조당 BNR 슬러지의 질량 비율이 전체의 0%, 20%, 40%, 50%가 되도록 첨가하였고, 본 연구에서는 각각 R1, R2, R3, R4라고 명명하였다.

Table 1. Composition of the synthetic wastewater

Compounds	mg/l
Glucose	600
MgSO ₄ · 7H ₂ O	50
MnSO ₄ · 7H ₂ O	55
FeSO ₄ · 7H ₂ O	2.22
KCl	7
(NH ₄) ₂ SO ₄	188.4
K ₂ HPO ₄	84.2
NaHCO ₃	300
CaCl ₂	3.76

2. 실험 방법

각 반응기 내의 시료 채취는 약 30분 내지 1시간 간격으로 채취하였으며, 시료 채취 후 즉시 0.22 μm인 membrane filter로 여과하여 시료 내 존재하는 미생물을 완전히 제거한 다음 분석에 들어갔다. SVI (sludge volume index)와 MLVSS는 Standard Methods⁸⁾를 통하여 측정하였고, 유기물 농도는 TOC를 지표로 이용하여 TOC analyzer (TOC-5000A, Shimadzu, Japan)를 이용하여 분석하였다. NO₂⁻-N, NO₃⁻-N, PO₄³⁻-P은 ion chromatograph (Metrohm, Switzerland)를 이용하여 측정하였다. NH₄⁺-N는 HS 3100 Water Analyzer (HumaS, Korea)를 이용하여 측정하였다. pH, DO, ORP는 실시간 자동 측정기(Ino lab multi level 3, WTW, Germany)를 사용하여 측정하였다.

미생물의 군집변화를 조사하기 위한 FISH는 다음과 같은 방법으로 분석하였다.⁹⁾

원 시료 적당량을 1.5 ml 펠렛(pellet)에 넣어 26G1/2 비늘을 사용한 주사기를 사용하여 슬러지 크기를 일정하게 부수어 현미경 관찰시 위상차가 나타나지 않게 약 1시간 정도 펌핑(pumping) 작업을 한 후, 슬러지가 충분히 분산되었다고 판단되면 증류수를 이용하여 희석하였다.

원 시료 적당량을 1.5 ml 펠렛에 넣고 약 30초 정도 원심 분리하여 상정액은 버리고 다시 원 시료 적당량을 첨가하는 식으로 반복하였다. 시료는 4% paraformaldehyde 용액에 24시간 정도 고정시켰다. 고정액에 따라 4% paraformaldehyde일 경우, 시료와 고정액의 비가 1:2가 되도록 하고, 50% ethanol일 경우, 시료와 고정액의 비가 1:1이 되도록 하였다. 시료 0.5 ml에 4% paraformaldehyde 용액 1 ml를 넣어 24시간 냉장고에 보관하였다.

고정된 시료를 12,000 rpm에서 5분 동안 원심 분리시킨 다음, 상정액은 버리고 PBS (phosphate buffered saline)를 1.5 ml 펠렛에 적당히 넣고 voltex mixer 위에 올려 잘 혼합하였다. 이 과정을 1회 이상 반복하였다. 세척한 시료 5 μl를 cell-line에 넣고 얇게 펴서 건조기에서 건조한 다음, 건조한 시료를 50%, 80%, 90% ethanol에 차례로 각각 3분 동안 담갔다 건조기에서 건조하였다.

미리 예열시킨 hybridization 용액 8 μl와 Table 2와 같이 제작된 oligonucleotide probe 2~3 μl를 차례대로 넣고 잘 섞이게 펌핑한 후, probe나 DAPI (4,6-Diamidino-2-phenylindole)를 넣은 후부터는 형광물질이 감소되는 것을 방지하기 위해 상자를 이용하여 빛을 차단하였다. 휴지를 간 carbonate filter case에 해당

Table 2. Oligonucleotide probes used in microbial analysis by FISH

Probe	Labelling dye	Probe sequence (5'→3')	mer ¹⁾	scale ²⁾ (pmole)	OD ³⁾
Nso 1225	Cy3	CGC CAT TGTbATT TGT GA	20	0.2	5
Nb 1000	Cy3	TGC GAC CGG TCA CGG	15	0.2	5
EUB 338	Cy3	GCT GCC TCC CGT AGG AGT	20	0.2	5
PAO 462	Cy3	CCG TCA TCT ACC AGG GTA TTA C	22	0.2	5

¹⁾primer length, ²⁾dilution ratio, ³⁾optical density.

Table 3. Selected temperature and time of hybridization and washing solution in probe

Probe	Hybridization solution		Washing solution	
	Temperature (°C)	Time (min)	Temperature (°C)	Time (min)
EUB 338	38	90	40	15
Nb 1000	46	90	48	15
Nso 1225	46	90	48	15
PAO 462	46	90	48	15

hybridization 용액으로 적신 후, cell-line을 넣고 Table 3과 같이 설정된 시간과 온도에서 건조하였다.

Cell-line의 남은 물을 조심스럽게 휴지로 제거한 후, 미리 예열된 hybridization washing 용액에 15분 동안 담가둔 후, 증류수로 가볍게 씻어낸 다음 건조기에서 건조하였고, DAPI(0.33 mg/l)를 8 µl 넣고 골고루 퍼 주었다.

증류수로 세척 후 건조기에서 건조하였고, anti-fade 시약 3 µl를 넣고 cover-glass로 덮은 후, 매니큐어로 cover-glass를 고정하였다. 그 후 냉동실에 보관하고 24시간 뒤 형광현미경을 통하여 관찰하였다.

III. 결과 및 고찰

1. BNR 슬러지의 특성

혐기-호기-무산소 상태를 각각 3시간 30분으로 유지하여 6개월간 운전하여 Fig. 2와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 전체 TOC의 90% 이상이 혐기 초기 30분 이내에 제거되었다. 혐기 기간 중 세포의 인 방출로 인하여 반응조 내 인 농도는 30 mg/l까지 증가하였으며, 호기 상태에서는 다시 급격히 체내로 인이 흡수되어 2시간 이내에 반응조 내의 인 농도는 거의 0 mg/l로 나타났다.

호기 상태에서 NH₄⁺-N는 질산화에 의해 감소되기 시작하였으며, 그에 따라 NO₃⁻-N 농도는 증가하였으나, NO₂⁻-N는 생성됨과 동시에 질산화됨으로써 거의 검출되지 않았다.

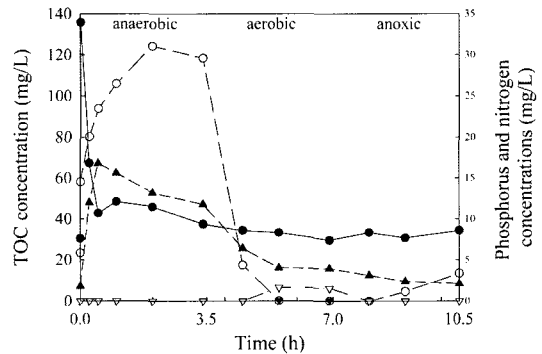


Fig. 2. Typical profiles of TOC (●), PO₄³⁻-P (○), NH₄⁺-N (▲), NO₂⁻-N (▼), NO₃⁻-N (▽) in BNR sludge.

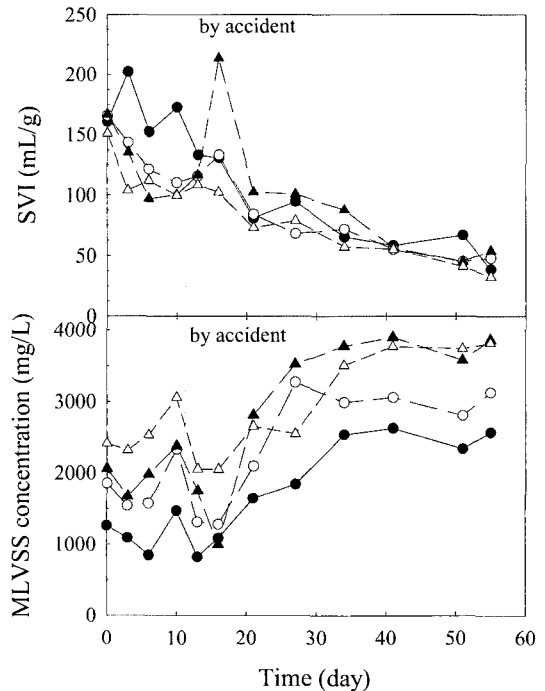


Fig. 3. The variations of (a) SVI and (b) MLVSS concentration in 0% (●), 20% (○), 40% (▲), 50% (△) BNR sludge seeded in SBRs.

그러므로 본 실험에 사용된 슬러지는 질소와 인의 제거 활동이 활발한 슬러지라는 것을 알 수 있었다.

2. BNR 슬러지 식종에 따른 슬러지의 SVI와 MLVSS 농도 변화

BNR 슬러지의 식종량을 달리한 4개의 SBRs에서 SVI와 MLVSS 변화를 관찰하였다(Fig. 3). 초기 MLVSS의 농도가 1,200~2,500 mg/l로 농도가 높지 않아 인위적인 슬러지의 농도 조절은 하지 않았다. 초기 5일 정도는 지체기로서 그다지 큰 MLVSS 농도변화를 나타내지 않았으나, 그 이후 MLVSS는 증가하는 경향을 나타내었다. 11일 정도 경과된 시점에 타이머의 오작동으로 인하여 슬러지의 과다 유출과 같은 현상이

발생하여 일시적으로 MLVSS의 감소가 발생하였으나, 그 이후 지속적인 MLVSS 농도의 증가를 나타내었고, 약 35일 정도 경과된 시점부터는 그다지 큰 변화를 나타내지 않았다. MLVSS 농도 변화는 4조의 SBR 모두에서 거의 비슷한 증가를 나타내었다.

SVI (sludge volume index)는 4조의 SBR 모두에서 지속적으로 감소하였으며, 최종적으로 50 ml/g 이하의 양호한 값을 나타내었다. 그러므로 일반 활성슬러지가 혐기-호기의 반복적인 운전에 의해 SVI가 감소함으로써 침전성이 향상되는 것을 볼 수 있었다. 그러나 BNR 슬러지를 많이 투입한 반응기일수록 MLVSS 농도가 높음에도 불구하고 최종적인 SVI가 거의 동일한 것으로 보아, BNR 슬러지가 투입될수록 침전성은 더

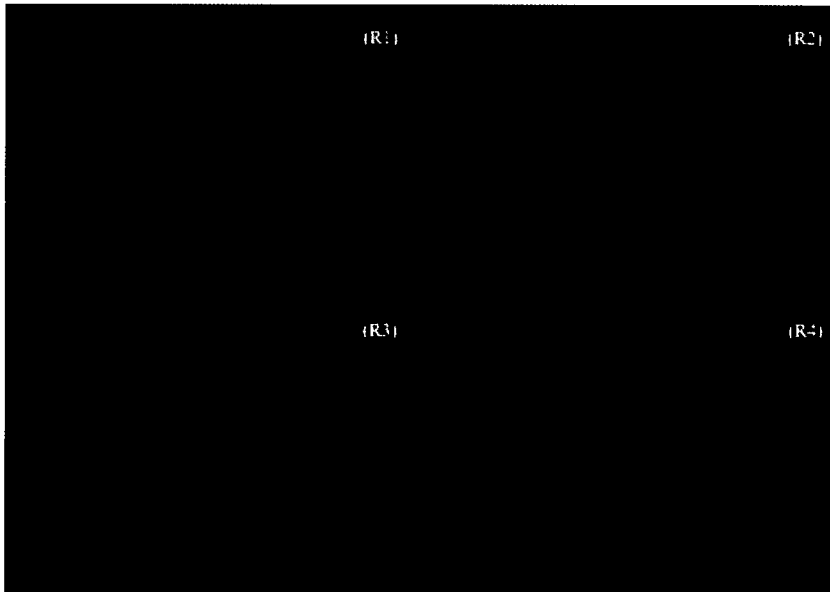


Fig. 4. The variation of photographs using PAO 462 probe after 33 days in SBRs.

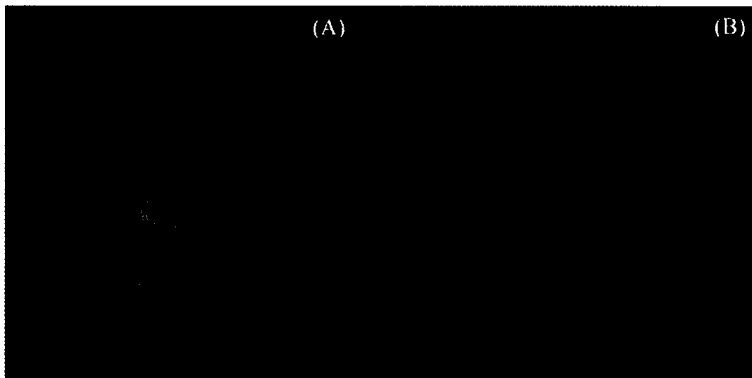


Fig. 5. FISH photographs using (a) DAPI and (b) Nb 1000 probes after 33 days in R4.

양호하다는 것을 알 수 있었다.

본 연구와 유사한 연구로서 동시 인 제거와 탈질화가 가능한 DEPHANOX를 이용한 실험에서, 일반 사상성 슬러지가 동시 탈질화와 인 제거가 가능한 슬러지로 변화해 갈수록 침전성이 양호해져서 SVI가 50 ml/g으로 나타났다는 보고도 있었다.¹⁰⁾

3. BNR 슬러지 식중에 따른 미생물 군집 변화

BNR 슬러지를 식중하여 33일 경과된 시점에서, 각 반응조의 미생물 군집 중 PAOs를 나타내는 PAO 462 probe에 의해 관찰된 사진을 Fig. 4에 나타내었다.

BNR 슬러지를 각각 40%와 50% 식중한 R3과 R4에서 비교적 많은 PAOs가 관찰된 것을 볼 수 있다.

또한, 식중 33일 후, DAPI로 관찰된 미생물수와 *Nitrobacter* 속을 나타내는 Nb 1000 probe에 의해 관찰된 FISH 사진을 비교하여 Fig. 5에 제시하였다. DAPI로 관찰되는 미생물은 푸른 바탕색에 밝게 빛나는 점으로 나타나고, Nb 1000 probe에 의해 관찰되는 미생물은 붉은 색 바탕에 밝게 빛나는 점으로 관찰된다.

위와 같은 방법으로 BNR 슬러지 식중 비율과 경과 시간에 따른 미생물 군집의 변화를 다양한 FISH probes를 이용하여 관찰한 군집 수를 Table 4에 나타내

Table 4. The counted number of microorganisms according to time

R1	3 day	14 day	27 day	33 day	R2	3 day	14 day	27 day	33 day
others	718	948	1423	2114	others	1170	1045	1686	2347
PAO 462	28	48	51	124	PAO 462	56	162	164	202
Nso 1225	46	59	113	176	Nso 1225	115	138	150	240
Nb 1000	44	63	65	123	Nb 1000	65	64	155	181
R3	3 day	14 day	27 day	33 day	R4	3 day	14 day	27 day	33 day
others	783	1113	2145	2840	others	1234	1414	2043	2677
PAO 462	44	211	232	436	PAO 462	139	181	196	403
Nso 1225	102	226	311	394	Nso 1225	210	273	279	450
Nb 1000	65	146	208	252	Nb 1000	201	214	223	373

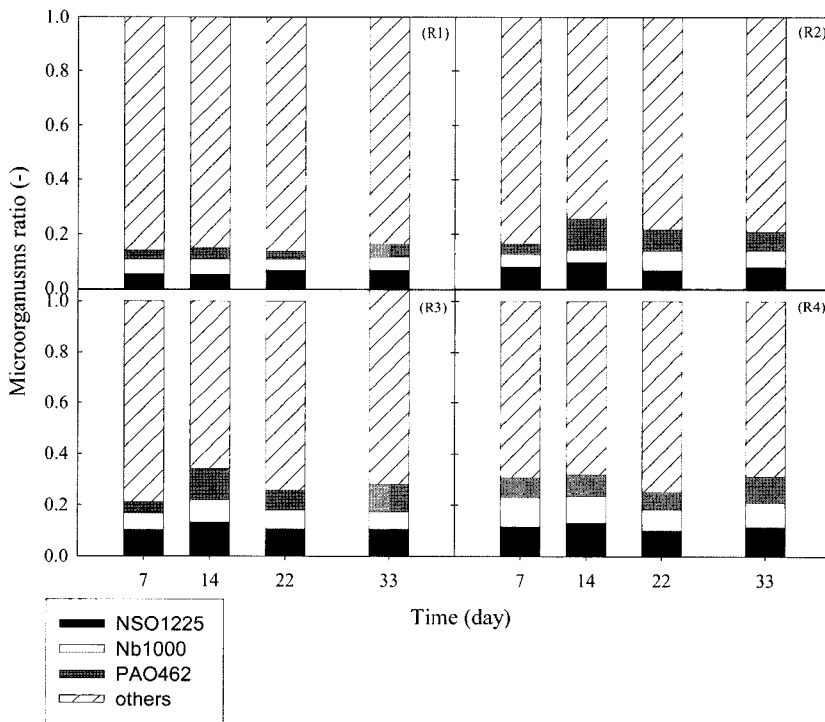


Fig. 6. Change of *Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, PAOs and others during experimental periods.

었고, DAPI로 관찰된 전체 미생물 수에 대한 각 probe에 의해 관찰된 미생물 군집수의 비율을 정리하여 Fig. 6에 나타내었다.

R1에서 볼 때, PAO 462 군집 비율은 시간이 경과됨에 따라 증가하였으나, 그 비율은 그다지 큰 증가를 보이지 못하였으며, 33일 경과된 시점에서 측정된 결과 4.8%에 불과하였다. 아질산화 반응을 유발하는 *Nitrosomonas* 속의 Nso 1225 군집 비율은 실험이 경과됨에 따라 가장 큰 변화를 나타내었으며, 33일 경과 시 6.9%로서 R1에서 가장 많은 군집으로 관찰되었다. 이에 비해 질산화를 유발하는 Nb 1000의 비율은 실험이 경과됨에 따라 감소하는 경향을 나타내어 33일 경과 시 4.9%에 불과하였다.

BNR 슬러지를 20% 식중환 R2의 경우, PAO 462 비율은 14일 경에 일시적으로 급격한 증가를 나타내었으나, 22일 경에 다시 감소하였다. 전체적으로는 PAO 462 비율은 증가하였고, 전체적인 PAO 462 수는 지속적인 증가를 나타내었다(Table 4). R2에서도 다른 미생물들에 비해 Nso 1225의 비율이 높았으나 실험 경과에 따른 큰 변화가 관찰되지는 않았다.

BNR 슬러지를 40%와 50%로 식중환 R3과 R4에서도 대체적으로 Nso 1225가 가장 큰 비율을 차지하였으나, R1과 R2에 비해 PAO 462와 Nb 1000은 높은 비율을 차지하고 있는 것으로 나타났다.

4. BNR 슬러지 식중에 따른 유기물 제거 변화

BNR 슬러지 식중 비율에 따른 각 반응조의 TOC 변화는 Fig. 7과 같이 나타났다. 유입이 진행되는 30분 동안 약 80%의 TOC가 제거되었다. 적응 기간이 경과됨에 따라 초기 유입 기간 중 제거되는 TOC 양은 많아지는 경향을 나타내었다. TOC 제거효율은 BNR 슬러지가 50% 식중된 R4에서 가장 높은 값을 나타내었으나, R1, R2, R3와 근소한 차이를 보였다. 전체적으로 BNR 슬러지의 식중 여부에 관계없이 모두 85% 이상의 TOC 제거 효율을 나타내었다.

초기 유입 기간의 급격한 TOC 감소는 유입과 함께 혐기 조건에서 지속적으로 교반이 이루어져 탄소원의 반응조 내 확산이 원활함에 따라 미생물 표면에 직접적으로 흡착이 되거나 PHAs로 분해·축적된 것으로 판단된다.

혐기 단계에서의 PAOs는 유기물 축적을 위해 PO_4^{3-} -P를 방출하는 기작을 가지고 있는데, 실험 초기의 네 반응기 모두 유기물이 제거됨에도 불구하고 혐기 단계에서 PO_4^{3-} -P의 방출이 제대로 이루어 지지 않았다(Fig. 9(a)). 이는 BNR 슬러지 접종 초기의 유기물 제거는

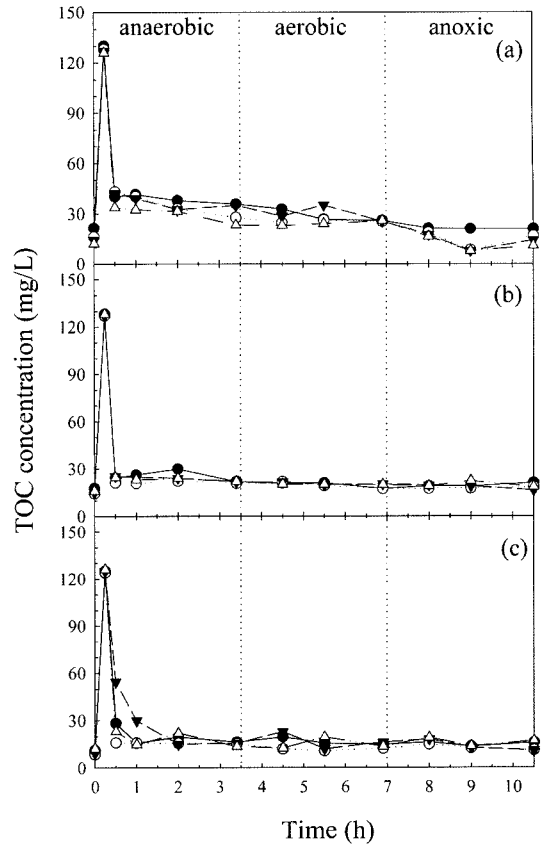


Fig. 7. Typical profiles of TOC variations in R1 (●), R2 (○), R3 (▼), R4 (△) after at (a) 3 days, (b) 7 days and (c) 27 days.

PAOs보다는 OHOs(ordinary heterotrophic organisms)에 의해 제거 되는 것으로 보는 것이 타당하다고 판단되며, 비록 실험이 경과되어 7일 경부터는 인의 방출이 발생하였으나, BNR 슬러지의 식중이 유기물 제거에 미치는 영향은 상대적으로 적은 것으로 판단된다.

5. BNR 슬러지 식중 비율에 따른 질소 제거

BNR 슬러지 식중 비율별 각 반응조의 시간 경과에 따른 질소 제거 변화를 Fig. 8에 나타내었다. BNR 슬러지를 식중하지 않은 R1의 경우, 초기 3일 경에는 질산화가 거의 발생하지 않았으나, 시간이 경과됨에 따라 질산화가 발생하기 시작하였으며, 27일 경에 암모니아 제거 효율은 83%로 나타났고 전체적인 질소 제거효율은 61%에 불과하였다. 그러나 R1에서 특이한 결과는 아질산화 반응이 활발한 반면 질산화는 적게 발생하였다. 이는 Fig. 6과 Table 4에서 살펴 본 바와 같이 질산화를 유발시키는 Nb 1000보다는 아질산화를 유발시

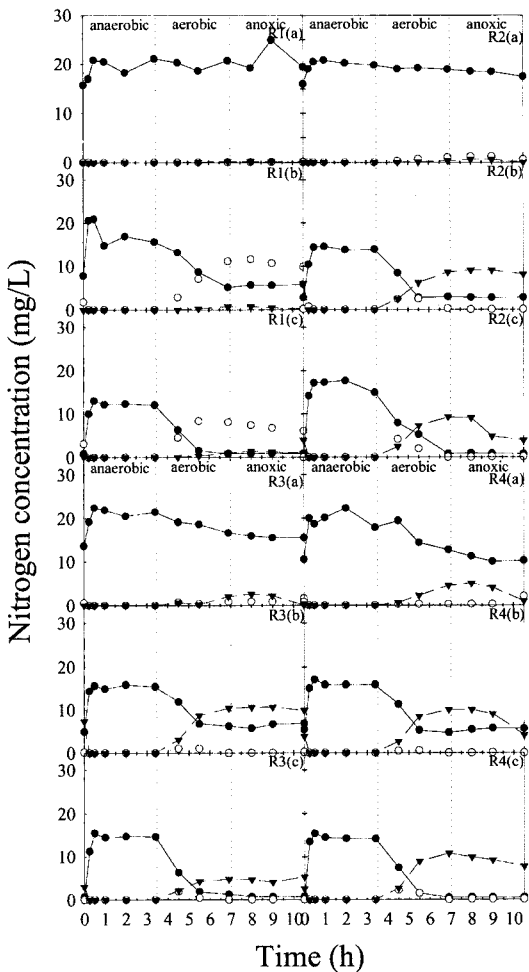


Fig. 8. Typical profiles of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (●), $\text{NO}_2^-\text{-N}$ (○), $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (▼) concentrations in SBRs after (a) 3 days, (b) 7 days and (c) 27 days.

키는 Nso 1225의 미생물 군이 상대적으로 많았고 시간이 경과됨에 따라 Nb 1000의 비율이 오히려 감소하였기 때문(Fig. 6(a))인 것으로 판단된다. 그러나 실험 기간보다 장기적으로 운전할 경우 완전한 질산화가 진행될 것으로 판단되나, 본 실험 기간 내에는 완전한 질산화가 관찰되지 못하였다.

BNR 슬러지를 20% 식종한 R2의 경우에는 초기 조건에서의 R1과 마찬가지로 질산화가 거의 발생되지 않았으나, 7일 정도 경과됨에 따라 활발한 질산화가 발생하였고 R1과는 달리 유출수 중에 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 는 거의 검출되지 않았다. 27일 경에는 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가 호기 과정에서 대부분 제거되었고 이 기간 중 암모니아 제거효율은 84%이었다. 이와 같이 질산화에 있어 R1의 결과와 차

이를 나타내는 이유는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 BNR 슬러지의 식종에 따라 Nb 1000의 빠른 적응과 증식이 발생하였기 때문인 것으로 생각된다. 이어지는 무산소 과정에서는 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 감소가 발견되었는데, 이는 DGAOs에 의한 역할인 것으로 생각된다. 호기 과정 중 완전한 질산화가 발생함에 따라 전체적인 질소 제거효율은 77%로서 R1에 비해 높게 나타났다.

BNR 슬러지를 각각 40%와 50%로 식종한 R3와 R4에서도 R2의 경우가 비슷한 경우를 나타내었으나, 차이는 BNR 슬러지 식종 비율이 높을수록 초기 3일 경부터 질산화 발생 비율이 높다는 것이다. 27일 경과시 R3와 R4의 전체적인 질소 제거효율은 각각 71%와 60%로 나타났다.

이미 상당한 질산화 미생물을 포함하는 BNR 슬러지를 식종한 반응조에서는 BNR 슬러지에 존재하는 질산화 미생물로 인하여 짧은 기간 내에 암모니아 제거 효율이 급격하게 증가하는 경향을 보인 반면, BNR 슬러지를 식종하지 않은 반응조는 암모니아 제거 효율이 다른 반응조와 비교해 볼 때 매우 낮게 나타났다.

호기 단계에서 생성된 질산성 질소가 무산소 단계에서도 잔존하는 것으로 나타나 제대로 된 탈질화가 이루어 지지 않는 것으로 나타났다. 이는 앞서 혐기 단계와 호기 단계에서 OHOs와 PAOs들이 대부분의 유기물들을 소모함으로써 탈질에 필요한 유기물이 부족한 데서 기인한다.

6. BNR 슬러지 식종에 따른 인 제거 변화

BNR 슬러지의 식종 비율별 각 반응조의 시간 경과에 따른 인 제거 변화를 Fig. 9에 나타내었다.

BNR 슬러지 식종에 따른 유입 인의 제거 효율을 보면 실험 시작 시점인 3일에는 R1, R2, R3, R4에서 각각 7.6%, 10.9%, 11.2%, 13.8%의 저조한 제거 효율으로서, BNR 슬러지 식종 비율에 따라 약간의 인 제거 효율 변화를 보였으나 그 차이는 그다지 크지 않았다. 실험 경과 7일째 되는 시점에서 BNR 슬러지 식종 비율에 따른 인 제거 거동에 있어 차이가 나타나기 시작하였다. R1과 R2에서는 여전히 인의 방출과 흡수가 제대로 발생하지 못하였으나, R3와 R4에서는 비교적 활발한 인의 방출과 흡수가 발생하였다. 이러한 현상은 27일이 경과되면서 더욱 더 뚜렷하게 나타나기 시작하였다. BNR 슬러지 식종량이 증가할수록 인의 방출과 흡수량이 많은 것으로 나타났고, R3에서 가장 높은 인 방출과 흡수량을 보여, 짧은 시간 내에 인 제거 슬러지로 전환하기 위해서는 최소 40% 이상의 BNR 슬러지 식종이 필요한 것으로 판단되었다. R1이 단위

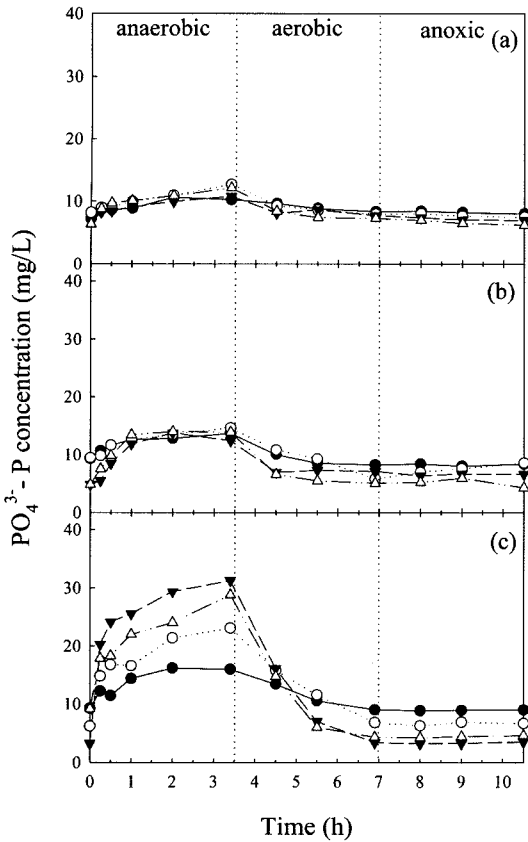


Fig. 9. Typical profiles of $PO_4^{3-}P$ concentrations in R1 (●), R2 (○), R3 (▼), R4 (△) after (a) 3 days, (b) 7 days and (c) 27 days.

미생물당 소비하는 유기물의 양이 다른 반응기에 비해 많음에도 불구하고 인 제거 효율이 미비한 것은 앞에서 설명한 바와 같이 OHOs에 비해 PAOs의 유기물 경쟁 능력이 떨어지기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6의 PAO 462 군집 비율의 결과와 비교하여 볼 때, 33일 경에 R3와 R4에서 PAO 462 군집 비율이 각각 11.1%와 10.3%로서 R1과 R2의 4.9%와 6.8%에 대해 월등히 높은 것을 알 수 있다. 그러므로 초기 BNR 슬러지의 식종 비율이 높을수록 시간 경과에 따라 PAOs의 비율이 증가됨으로써 인 제거가 원활하게 발생한다는 것을 알 수 있었다.

인의 방출과 흡수가 가장 활발한 R3의 경우와 원 BNR 슬러지의 결과(Fig. 2)를 비교해 볼 때, 인의 방출량은 비슷하나 인의 흡수량은 적은 것으로 나타나 BNR 슬러지로의 전환이 종료된 것으로 보기는 곤란하였다. 그러므로 완전한 BNR 슬러지로 전환하기 위해서는 본 실험기간인 40일보다는 긴 적응기간이 필요한

것으로 판단되었다.

Liu 등¹¹⁾은 산 형성 혐기성 반응조의 초기 가동시 미생물의 접종보다는 온도, 반응기 종류 및 pH 등이 더 주요한 인자라고 기술하였으나, 본 연구와 같은 생물학적 질소-인 제거 공정에서는 미생물의 접종이 매우 중요한 인자로 생각되었다.

본 연구와 유사한 실험을 수행한 결과들과 비교해 보면, acetate를 탄소원으로 사용하여 25%의 이상의 인 제거 효율을 얻는데 19일이 소요되었으며 90% 이상의 제거 효율을 얻는 데에는 35일 이상의 시간이 소요되었다는 Meltem¹²⁾의 결과가 있다. 이와 비교해 보면 90% 이상의 효율을 얻기 위한 시간이 많이 소요되고 제거 효율도 77%로 상대적으로 낮게 나타났는데, 이는 탄소원으로 보다 이용이 어려운 glucose를 본 실험에서 사용하였기 때문인 것으로 판단된다.

그러나 전체적인 초기 가동 시간이 57일,¹³⁾ 90일,¹⁴⁾ 100일¹⁵⁾이 소요되는 다른 연구 결과들과 비교해 보면 그다지 느린 초기 가동 시간은 아니라고 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 BNR 슬러지의 접종으로 인한 SBR 초기 가동시 영양 염류의 제거 특성 및 변화를 관찰하였다.

- 1) 시간이 경과할수록 침전성은 좋아졌으며, BNR 슬러지의 식종량이 많을수록 슬러지의 침전성이 양호하였다.
- 2) Glucose를 탄소원으로 사용한 유기물 제거에 있어서 모두 85% 이상의 높은 제거 효율을 보였으나, BNR 슬러지 접종 비율이나 접종 유무에 따른 유기물 제거에 미치는 영향은 미비한 것으로 나타났다.
- 3) 암모니아 제거 효율은 BNR 슬러지 식종 유무에 따라 다르게 나타났으며, BNR 슬러지 식종 비율에 상관없이 BNR 슬러지가 식종된 반응조에서는 7일 이내 80% 이상의 암모니아 제거 효율을 나타내었다.
- 4) 인 제거효율에 있어서는 슬러지 식종 비율이 증가함에 따라 인 제거 효율이 증가하였으며, 슬러지 식종한 경우와 식종하지 않은 경우의 차이는 50% 이상의 인 방출량 차이를 나타내었다.
- 5) 첨가한 BNR 슬러지의 비율이 전체의 40%와 50%일 때는 질소와 인 제거에 있어 큰 차이를 보이지 못하였다. 그러므로 최소 40% 이상의 BNR 슬러지의 식종이 초기 질소-인 제거의 활성화를 위해서는 필요하였다.
- 6) BNR 슬러지를 접종하지 않을 경우, PAOs와 질

산화 미생물의 성장이 더더 영양염류 제거가 어려웠으며, BNR 슬러지로의 전환에는 많은 시간이 소요되었다.

참고문헌

1. Ministry of Environment : A White Paper on Environment. 499, 2006.
2. EPA US : Process Design Manual of Nitrogen Control. EPA 625/r-93/010, Cincinnati, Ohio, 1993.
3. Anh, Y.H. : Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: A review. *Process Biochemistry*, **41**, 1709-1721, 2006.
4. Park, Y.S., Woo, H.T. and Kim, D.S. : A study on the organic, nitrogen and phosphorus removal in (AO)₂ SBR and A₂O SBR. *Korean Journal of Environmental Health*, **31**(4), 340-348, 2005.
5. Park, Y.S. and Kim, D.S. : A comparison study on the simultaneous organic, nitrogen and phosphorus removal in sequencing batch reactor and sequencing batch biofilm reactor. *Korean Journal of Environmental Health*, **31**(2), 152-159, 2005.
6. Park, Y.S., Jeong, N.S. and Kim, D.S. : A comparison of nutrients removal characteristics by the variation of organics in A₂O SBR and A₂O SBBR for the small sewerage system. *Korean Journal of Environmental Health*, **32**(5), 451-461, 2006.
7. Brdjanovic, D., Slamet, A., van Loosdrecht, M.C.M., Hooijmans, C.M., Alaerts, G.J. and Heijnen, J.J. : Impact of excess aeration on biological phosphorus removal from wastewater. *Water Reserch*, **32**(1), 200-208, 1998.
8. APHA, AWWA, WEF : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th Ed., 1992.
9. Yeo, S.M. and Lee, Y.O. : Changes of the bacterial community structure depending on carbon source in biological phosphate removing process. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **28**(2), 165-172, 2006.
10. Borton, G., Saltarelli, R., Alonso, V., Sorm, R., Wanner, J. and Tilche, A. : Biological anoxic phosphorus removal - the DEPHANOX process. *Water Science & Technology*, **34**(1-2), 119-128, 1996.
11. Liu, W.T., Chan, O.C. and Fang, H.H.P. : Microbial community dynamic during start-up of acidogenic anaerobic reactors. *Water Research*, **36**, 3203-3210, 2002.
12. Meltem, S. : Biological phosphorus removal in a sequencing batch reactor by using pure cultures. *Process Biochemistry*, **40**(5), 1599-1603, 2005.
13. Bella, E. and Smith, P.G. : The bioaugmentation of sequencing batch reactor sludges for biological phosphorus removal. *Water Science & Technology*, **35**(1), 19-26, 1997.
14. Converti, A., Rovatti, M. and del Borghi, M. : Biological removal of phosphorus from wastewaters by alternating aerobic and anaerobic conditions. *Water Research*, **29**, 263-269, 1995.
15. Cech, J.S. and Hartman, P. : Competition between polyphosphate and polysaccharide accumulating bacteria in enhanced biological phosphate removal systems. *Water Research*, **27**, 1219-1225, 1993.