

DMR 생물막 공정에서 포기량에 따른 질산화 동시 탈질화 및 영양염류 제거특성

김일규 · 이상민* · 임경호†

공주대학교 건설환경공학부 · *공주대학교 환경공학과

(2008년 5월 29일 접수, 2008년 9월 23일 채택)

Effect of Air-flow on Enhanced Nutrient Removal and Simultaneous Nitrification/Denitrification in DMR Biofilm Process

Il-Kyu Kim · Sang-Min Lee* · Kyeong-Ho Lim†

Department of Civil & Environ. Engineering, Kongju National University

*Department of Environ. Engineering, Kongju National University

ABSTRACT : Recently, a new concept for nitrogen removal that is simultaneous nitrification and denitrification(SND) has been studied for wastewater treatment process. The DMR(Daiho Microbic Revolution) process that used in this study consists of two suspended anoxic, anaerobic reactors and an aerobic biofilm reactor. The function of aerobic environment and the intensity of air flow rate(2.0, 1.0, 0.5, 0.4, 0.2 L/min) were studied in the biofilm reactor; also SND and nutrient removal efficiencies were investigated. Experimental results indicated that the change in air flow did not affect COD_{Cr} removal significantly. Thus sustained at 93%. The lower the air flow rate, the higher T-N removal efficiency was attained(i.e.80% at 0.2 L/min). SND efficiency was 62, 65, 72 and 78% corresponding to each air flow rate. T-P removal was sensitive to aeration intensity and removal enhanced from 75% to 96% when the air flow rate was changed from 2.0 to 0.5 L/m; however second release occurred in the clarifier at 0.2 L/min. Phosphorus content of activated sludge was 5.0%, as P releases and acetate uptake a ratio of 0.75 mg P/ mg HAC.

Key Words : Air-flow, Biofilm Process, DO, SND, Poly-P Content

요약 : SND 공정은 최근에 하수내 질소제거를 위한 새로운 공법으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 이에 본 연구는 무산소조, 혐기조 및 담체를 충전한 포기조로 구성된 DMR(Daiho Microbic Revolution)공정을 이용하여 포기량을 2.0, 1.0, 0.5, 0.4 및 0.2 L/min으로 변화시키면서 영양염류 제거효율과 동시 질산화/탈질 효율을 검토하였다. 유기물제거율은 포기량에 차이를 보이지 않았으며 모든 조건에서 93%의 제거율을 얻을 수 있었다. T-N 제거효율은 포기량이 적어짐에 따라 높아져 0.2 L/min의 조건에서 80%의 효율을 얻었으며, SND효율 또한 각 조건에서 62, 65, 72 및 78%를 나타내어 포기량 조절만으로 높은 질소제거율을 얻을 수 있었다. T-P는 포기량에 따라 75~96%의 제거율을 보였지만, 0.2 L/min의 조건에서는 2차 인방출이 발생하였다. 0.5 L/min의 조건에서 슬러지의 poly-P함량은 5.08%였으며 소모된 유기물 양과 방출된 인 농도의 비는 0.72 mg P/mg HAC였다.

주제어 : 포기량, 생물막 공정, 용존산소, 동시 질산화/탈질, poly-P함량

1. 서론

국내에서 가동 중인 대부분의 하수처리시설은 표준활성 슬러지 공법이나 그 변법들이 주종을 이루고 있다. 이들의 질소, 인 제거효율은 약 20% 이하인 반면에 2004년부터 4대강 유역의 수질기준이 BOD 10 ppm, COD_{Mn} 40 ppm, T-N 20 ppm, T-P 2 ppm으로 강화되었고, 기타지역 및 1일 하수처리 능력이 500 m³ 이하의 소규모 하수 처리시설 또한 2008년부터 동일 기준을 적용받고 있다. 그러나 국내하수는 C/N비가 낮고, 유입부하 변동이 심하며 겨울철은 온도가 낮아 안정적인 영양염류 제거에 어려움을 겪고 있는 실정이다.¹⁾

이러한 문제점을 극복하기 위한 한 방법으로는 담체를 부착시켜 미생물 보유농도를 증가시키는 방법이 있는데, 이는 부유성장 미생물과 부착성장 미생물을 공존된 상태로 이용할 수 있어 온도 및 충격부하에 강하며, 슬러지 자산화가 촉진되어 슬러지 발생량을 줄일 수 있는 장점이 있다.^{1,2)} 또한 생물막 특유구조로 인한 DO 구배가 발생하는 특성을 활용하면 질산화 미생물과 탈질 미생물의 공존을 유도할 수 있고 이를 통하여 질산화 동시 탈질반응(Simultaneous Nitrification and Denitrification, SND)을 기대할 수 있다.^{3,4)}

SND공정은 최근에 하수내 질소제거를 위한 새로운 공법으로 많은 연구가 이루어지고 있다. SND공정은 DO등의 조절을 통해 호기조안에서 질산화와 탈질화를 유도해 하수내 질소를 제거하는 공정으로서, SBR공정을 비롯한 여러 공정에서 기계적인 표면포기기에 의해 교반과 포기가 이

† Corresponding author

E-mail: khlim@kongju.ac.kr

Tel: 041-521-9308

Fax: 041-568-0287

루어지는 질산화조에서 약 80%의 무기질소 유실이 보고되면서 관심을 끌게 되었다.^{5~7)}

질산화와 탈질의 조합은 세 가지 발생기작으로 설명할 수 있다. 첫째, 교반작용 및 포기량 조절을 통한 반응조내 DO농도가 낮은 무산소 조건을 만들어 탈질을 유도한다.⁸⁾ 둘째, 호기조건에서 탈질을 수행하는 미생물에 의해 발생한다. Zart⁹⁾은 *Nitrosomoas europea*와 *Nitrosomonas eutropha*가 호기조건에서 탈질을 수행할 수 있음을 증명하였다. 셋째, 활성슬러지 floc은 호기영역과 무산소영역으로 구분할 수 있는데 포기조에서 질산화로 생성된 질산성 질소가 floc 내부의 무산소영역으로 기질과 함께 침투하여 탈질화가 일어나는 것이다. 하지만, 포기조내 낮은 DO 농도는 질산화를 떨어뜨리는 반면에, DO 농도가 높을시에는 floc의 호기영역에서의 기질 소모로 인하여 탈질율은 더 낮아진다. 따라서 질산화율과 탈질율이 적정수준으로 이루어지도록 하여야 한다.^{10~12)}

일반적으로 부유성장 미생물을 이용한 생물학적 영양염류 제거공정에서 효율적인 질산화를 위해서는 DO농도가 2.0 mg/L 이상을 유지해야 하며,¹³⁾ 탈질을 위해서는 0.2 mg/L 이하여야 한다고 알려져 있다.¹⁴⁾ 포기조내에서 질산화와 탈질화가 동시에 일어나는 SND공정의 적용시 탈질에 의해 생성되는 3.57 g CaCO₃/g NO₃-N의 알칼리도는 질산화에 의해 소모되는 7.14 g CaCO₃/g NH₄-N의 알칼리도의 절반을 공정내에서 공급할 수 있으며 무산소조의 부피를 줄일 수 있거나 없앨 수 있고, 포기량을 줄일 수 있는 경제적인 이점이 있다.^{15~17)} 또한, 내부반송을 하지 않으므로써 혐기조내 DO와 질산성 질소의 농도를 낮게 유지하고 높은 인 제거효율을 기대할 수 있다. 하지만 현재까지의 선행연구는 SND의 효율과 영향인자에 관해서만 이루어져 유기물과 인 제거율에 미치는 영향에 대해서는 미진한 실정이다.

이에 본 연구에서는 담체를 회전유닛에 충전하여 생물막 반응조를 구성한 DMR 변형공정(Modified DMR process)을 대상으로 포기량을 2.0~0.2 L/min으로 변화시키면서 SND 효율과 유기물 및 인 제거율에 대해 비교 평가 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. DMR 공정구성 및 운전방법

본 실험에 사용된 DMR(Daiho Microbic Revolution) 변형공정은 Fig. 1과 같으며, 기존의 공정에 질소와 인의 제거율을 강화하기 위하여 무산소 공정을 추가로 설치하였고 실험실 규모로써 아크릴로 제작되었다. 유입과 반송은 미세유량조절 펌프 및 정량펌프를 사용하였고, 전체공정은 자연 유하할 수 있도록 설치하였다. 반응조는 무산소조, 혐기조, 포기조, 침전지가 결합된 A²O공정으로 구성되어 있으며, DMR 공정에 대한 자세한 운전조건은 Table 1에 정리하였다. 각 반응조의 용량은 3.9 L, 3.9 L, 16.5 L로서 수리학적 체류시간은 각각 1.5 hr, 1.5 hr, 5.5 hr으로 운전하였다. 반응조내 MLSS 농도는 3,000 mg/L로 유지하였고, 혐기조와 무산소조에는 반응조내 미생물과 유입수 및 반송슬러지의 완전 혼합을 위해 반응조 상부에 교반기를 설치하였다. 포기조에서 무산소조로의 내부반송은 하지 않고 2차 침전조에서의 외부반송만 하였다.

호기조에는 담체를 반응기 부피비로 20% 충전한 유니트를 장착하여 수류방향으로 저속 회전시켜 포기조내 DO를 확산시키도록 하였으며, 포기조내 형성되는 무산소 영역을 조절하기 위하여 Air flow를 2.0 L/min, 1.0 L/min, 0.5 L/min, 0.4L/min, 0.2 L/min으로 변화를 주었다. 포기량에 따른 DO 농도의 반응조내 공간분포를 확인하였으며 120일간의 연속운전기간 동안 각 포기량 조건에서의 운전기간은 25일, 35일, 25일, 10일 및 25일이었다.

Table 1. Operating conditions of DMR process

	Anoxic	Anaerobic	Aerobic
HRT(hr)	1.5	1.5	5.5
Volume(L)	3.9	3.9	16.5
MLSS(mg/L)	3000		
Recycle ratio(%)	100		
Temperature(°C)	11 ~ 19		

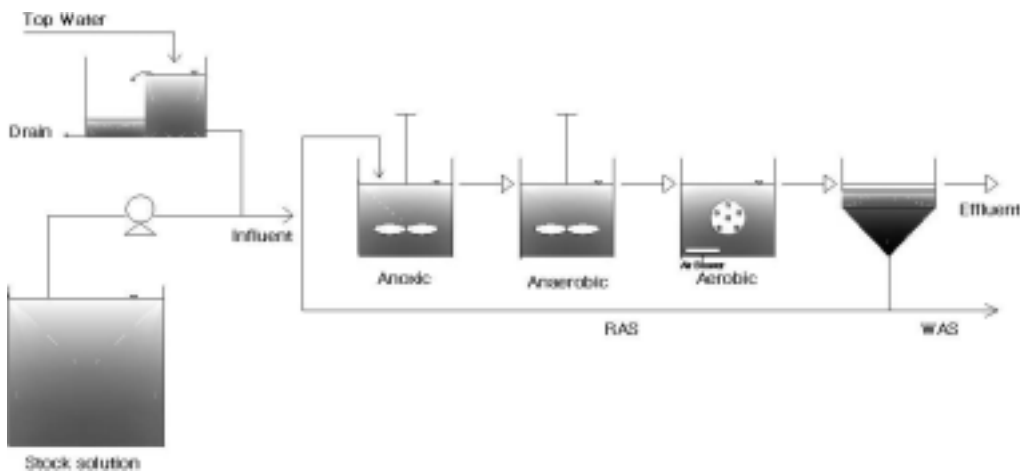


Fig. 1. Schematics diagram of the DMR process.

Table 2. Synthetic wastewater composition

Components	Concentration, mg/L
CH ₃ COONa	290
(NH ₄) ₂ SO ₄	140.0
KH ₂ PO ₄	44.0
MgSO ₄ 7H ₂ O	50.0
CaCl ₂ 2H ₂ O	3.7
FeCl ₃ 6H ₂ O	0.2
MnSO ₄ H ₂ O	5.0
Na ₂ CO ₃	66.0
NaHCO ₃	105.0

본 연구에서는 합성폐수 원액을 일정비율의 수돗물과 섞어서 반응조에 유입하였으며 Table 2는 유입되는 합성폐수의 성분으로 COD_{Cr} 200 mg/L, T-N 30 mg/L, T-P 10 mg/L로 유지하였다.

2.2. 담체 및 유니트 특성

본 실험에 사용한 담체는 유·무기 복합소재를 이용하여 제조한 것으로 무기소재는 제올라이트, 실리카겔과 같은 증기공성 무기흡착소재를 사용하였고, 유기소재로는 활성탄 등이 이용되었다.

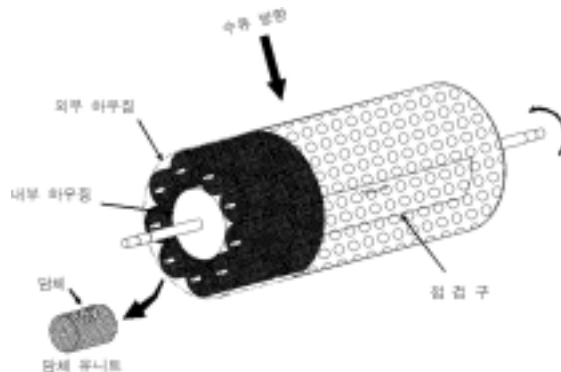
Fig. 2는 담체와 담체유니트를 나타낸 것으로 담체의 비표면적은 2.47 m²/g이며, 직경은 5~7 mm이다. 담체유니트는 담체가 충전된 유니트를 원둘레 방향으로 조립한 담체회전기로서 수류방향으로 회전하여 원심력에 의해 적절한 탈리가 일어나도록 하였다.

2.3. 슬러지 poly-P 함량 측정을 위한 회분식 실험

실험에 사용된 process는 내부반응이 없고, 외부반응 또한 무산소조를 통해 혐기조로 유입되기 때문에 NO_x-N의 영향을 받지 않으므로 높은 처리효율을 예상할 수 있다. 이의 확인을 위해 각 조건에서의 슬러지 인함량 실험을 수행하였다. 본 실험은 Yves²⁰⁾가 제안한 방법으로 실행하였으며 구체적인 방법은 다음과 같다. 슬러지는 포기조 상부에서 채취하였으며 증류수로 희석하여 1 L를 만든 후



Fig. 2. Shape of packed media and media unit.



MLSS를 측정하였고 0.5~1 hr 동안 포기조에서 질산화를 통해 생성된 질산성 질소를 제거하기 위하여 마그네틱바를 이용하여 교반을 해주었다. 탈질이 완료된 후 Acetate를 이용하여 충분한 탄소원을 공급해주었다. 일정시간 간격으로 시료를 채취하였으며 membrane filter(0.45 μm)로 여과한 후 SCOD, PO₄-P, NO₃-N을 분석하였다. 실험시간 동안 삼각플라스크의 입구는 밀봉하였으며 질소가스를 이용하여 혐기조건을 유지하였다. 슬러지의 %P는 아래의 식(1)에 따라 구할 수 있다.²⁰⁾

$$\%P = [P_{final} - P_{initial}] / MLSS \times 100 \quad (1)$$

여기서, %P = 슬러지의 poly-P함량(mg P/mg MLSS)
 P_{final} = 실험 종료(4시간) 후 PO₄-P 농도(mg/L)
 P_{initial} = 실험초기 PO₄-P 농도(mg/L)
 MLSS = 미생물 양(mg/L)

2.4. 분석방법

시료는 유입수 및 유출수와 각 반응조로부터 주 3~4회 채취하였으며, 시료분석 항목은 COD_{Cr}, T-P, PO₄-P, T-N, NH₄-N 및 NO₃-N을 대상으로 하였으며 분석은 Standard Methods²¹⁾와 수질오염공정시험법에 준하여 실시하였다. 24시간 이상 시료를 보관할 때는 시료 200 mL당 0.1 N 황산 1 mL를 첨가한 후 4℃에서 냉장 보관하였다.

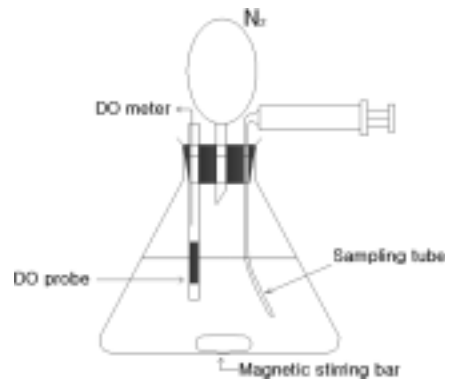


Fig. 3. Small batch reactor for measuring poly-P content in biomass.

3. 결과 및 고찰

3.1. 포기량에 따른 호기조의 DO profile

반응조 내에서 요구하는 산소량은 유기물 산화, 질산화, 내생호흡 등으로 구분할 수 있다. 유기물부하에 비해 용존 산소가 너무 많으면 탈질화에 영향을 미칠 수 있는 반면 용존산소가 적은 경우 반응조 내 질산화율을 감소시킨다. 따라서 반응조내 DO농도는 미생물의 반응기작에 중요한 영향인자로 작용한다. 호기조에서 SND를 유도하기 위해 포기량 조절에 따른 호기조내 DO profile를 조사하였다. Fig 4는 호기조내 DO측정 지점이며, Table 3은 포기량에 따른 측정지점의 DO를 나타낸 것이다.

Table 3을 보면 포기량 2.0과 1.0 L/min의 조건에서는 포기조내 모든 공간이 DO 1.0 mg/L 이상을 나타내 호기성 공간을 이루고 있음을 알 수 있다. 반면 0.5와 0.2 L/min의 조건에서는 호기조의 상부는 1.8~3.7 mg/L의 호기영역을 형성하고 있는 반면, 하부쪽은 0.2~0.7 mg/L의 낮은 DO 농도를 보였다. Münch⁴⁾는 DO 0.5 mg/L의 조건에서 질산화율과 탈질율이 같아져 완전한 SND반응이 발생한다고 보고하였다. 이에 비추어볼 때 본 연구에서는 포기량 0.5 및 0.2 L/min에서 SND공정을 위한 가장 유리한 조건이 만들어질 것으로 판단하였다.

3.2. 유기물 제거 특성

Fig. 5는 반응조 운전기간 동안 COD_{Cr}의 유입 및 유출 농도와 제거효율을 나타낸 것이다. 유입수 COD_{Cr}는 평균 208 mg/L였으며 유출수는 평균 10 mg/L 이하로 유출되어 포기량에 상관없이 95.8%의 높은 제거율을 나타냈다. 따라서, 실험 범위내의 포기량이 유기물 제거에 미치는 영향은 없는 것으로 판단된다.

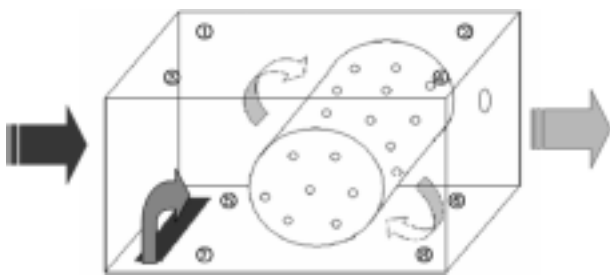


Fig. 4. DO monitoring points in the aeration reactor.

Table 3. Variation of DO concentration according to positions in the aerobic reactor

Air flow	Air flow / reactor volume	DO concentration at each points(mg/L)							
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
2.0	0.121	5.3	4.4	5.5	4.2	7.5	4.2	7.5	4.0
1.0	0.060	3.9	2.4	4.3	2.6	4.4	1.8	4.3	1.2
0.5	0.030	3.6	2.2	3.8	2.1	0.7	0.5	0.4	0.4
0.2	0.012	3.1	2.0	2.9	1.8	0.5	0.2	0.4	0.2

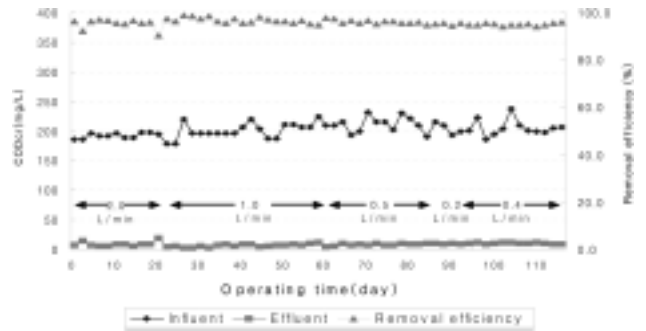


Fig. 5. Variation of COD_{Cr} removal efficiency according to air-flow.

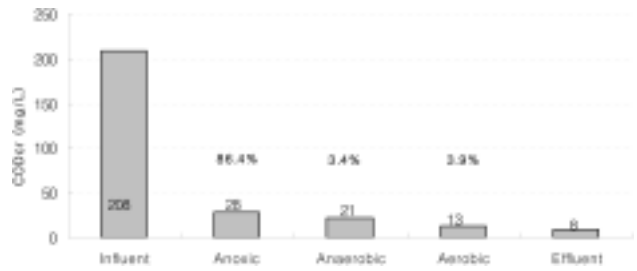


Fig. 6. Behavior of COD_{Cr} concentration in each reactor.

Fig. 6은 각 공정별 유기물 제거율을 나타낸 것으로 전체 유기물량의 86%가 무산소조에서 제거되었으며, 혐기조와 포기조에서 각 3.4%, 3.9%의 제거율을 보여 유기물의 상당량이 무산소조에서 제거됨을 알 수 있다. 이는 외부반응으로 유입되는 질산성 질소의 탈질 및 기질과 활성슬러지 접촉 초기에 유기물 제거가 급격히 일어나는 biosorption 효과 때문으로 사료된다.²²⁾

3.3. 질산화 및 탈질율에 따른 T-N 제거특성

Fig. 7은 공정별 NH₄⁺-N의 거동을 나타낸 것이다. 운전기간 중 유입수의 평균 NH₄⁺-N 농도는 30 mg/L였고, 무산소조로 유입되면서 희석되어 13 mg/L의 농도를 보였다. 포기조에서 질산화를 통해 유출 농도는 2.0 mg/L로 평균 93%의 높은 질산화율을 나타내었다. 특히 운전초기에도 5.0 mg/L의 낮은 농도로 유출됐으며 45.0 mg/L의 고농도로 유

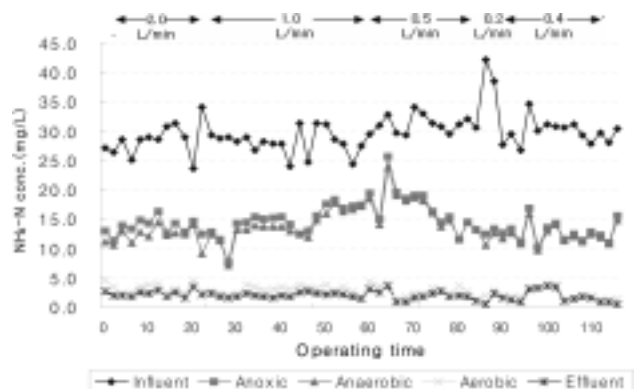


Fig. 7. Variation of NH₄⁺-N concentration in each reactor during operating days.

입될 시에도 5.0 mg/L 이하로 유출되어 안정적인 질산화 효율을 보였다. 포기량 0.2 L/min의 조건에서도 평균 1.8 mg/L의 유출농도를 보여 적은 포기량에도 충분한 질산화가 이루어짐을 확인할 수 있었다. 반응조의 수온이 10~12℃로 낮은 겨울철에도 90% 이상의 안정된 질산화율을 나타냈다. 이처럼 낮은 포기량과 온도에서 높은 질산화율을 나타낸 것은 포기조에 충전되어 있는 담체에 생물막이 형성되어 안정적인 미생물 농도를 유지했기 때문으로 사료된다.

Fig. 8은 포기량에 따른 반응조별 NH₄⁺-N과 NO₃⁻-N의 농도를 나타낸 것이다. 유입수의 질산성 질소는 외부반송과 합성하수의 희석수로 사용한 수돗물에 의한 것으로 수돗물의 실험결과 3.0~5.0 mg/L의 질산성 질소를 함유하고 있었다. 무산소조에 유입된 질산성 질소는 활발한 탈질반응을 통하여 2.0 L/min을 제외한 모든 조건에서 0.1 mg/L 이하의 농도를 보였다. 이와 같은 무산소조에서의 저농도 질산성 질소의 달성은 후속하는 혐기조에서의 인방출에 매우 유리한 조건을 형성한 것으로 나타났다. 포기량 2.0 L/min과 0.2 L/min에서의 결과를 비교하면 2.0 L/min의 조건에서 NH₄⁺-N는 가장 낮은 28.5 mg/L의 농도로 유입되었지만 NO₃⁻-N의 유출농도는 8.3 mg/L로 가장 높은 값을 보였다. 이는 2.0 L/min의 조건에서 호기조에서의 충분한 산소공급으로 인해 질산화율은 높았으나 높은 DO에 따른 무산소영역이 상대적으로 작아 탈질을 수행할 수 있는 공간이 media unit 내부로만 한정지어졌기 때문으로 판단된다. 반면, 0.2 L/min의 조건에서는 31.5 mg/L의 높은 NH₄⁺-N의 유입농도를 보였지만, 유출수에서는 1.8 mg/L의 낮은 농도를 나타냈으며 NO₃⁻-N 또한 4.3 mg/L로 가장 낮게 유출됨으로써 95%의 질산화율을 나타내었다. 이와 같은 결과는 포기량이 상대적으로 적어 호기조 하단에서 0.2~0.5 mg/L의 저농도 DO 조건이 형성되어 SND반응이 활발히 이루어졌기 때문으로 사료된다. 실험결과 포기량 2.0 L/min과 1.0 L/min의 조건에서는 상대적으로 높은 NO₃⁻-N의 유출농도를 보였으나 0.5 L/min 이하의 포기조건에서는 낮은 유출농도를 보여 원활한 질산화 동시 탈질반응이 이루어졌음을 알 수 있었다.

이는 T-N 제거효율을 살펴보면 보다 명확히 확인할 수 있다. 각 조건에서 평균 T-N 제거효율은 62.1%, 66.6%, 73.3%, 75.8%를 나타내어 포기량이 적을수록 높은 T-N제거효율

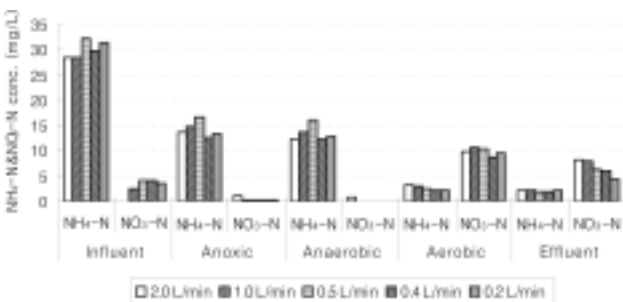


Fig. 8. NH₄⁺-N and NO₃⁻-N concentration an each reactor according to air-flow.

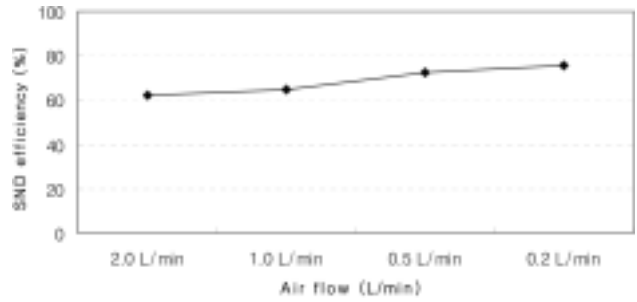


Fig. 9. The efficiency of SND in different air-flow.

을 나타내었다. 이는 포기량이 적을수록 호기조내 탈질반응이 발생할 수 있는 무산소 공간이 확대되었기 때문으로 판단된다.

Fig. 9는 포기량에 따른 SND 효율을 나타낸 것으로 아래의 식 (2)를 이용하여 계산하였다.

$$SND(\%) = \frac{(NH_4^+ - N_{rem}) - (NO_3^- - N_{eff})}{NH_4^+ - N_{rem}} \times 100 \quad (2)$$

여기서, NH₄⁺-N_{rem} = 호기조에서 제거된 암모니아성 질소(mg/L)
 NO₃⁻-N_{eff} = 호기조 유출수의 질산성 질소 농도(mg/L)

포기 조건에 따라 62.4, 64.8, 72.2, 및 75.5%로 포기량이 적을수록 높은 SND효율을 나타냈다. 이는 호기조내 무산소 조건의 형성과 함께 회전체 내부와 생물 막에서의 탈질반응에 기인한 것으로 판단되며, 포기량 2.0 L/min의 조건에서도 62%의 높은 SND효율을 얻은 것은 DMR공정이 갖고 있는 큰 장점으로 판단된다.

3.4. T-P 제거특성

Fig. 10은 반응조의 운전기간동안 T-P의 제거효율을 나타낸 것으로 포기량에 따라 T-P 제거효율도 많은 차이를 나타냈다. 포기량 2.0 L/min의 초기운전조건에서는 50% 이하의 낮은 제거효율을 보였는데 이는 반응조 운전이 정상 상태에 도달되지 않았기 때문으로 사료된다. 그러나 운전 20일 이후부터는 85% 이상의 안정된 제거효율을 보였다. 포기량 1.0 L/min에서는 93%의 제거율을 보였으며, 0.5 L/min의 조건에서는 96%의 가장 높은 제거효율을 보였다. 그렇지만 0.2 L/min의 조건에서는 유입농도보다 높은 유출특성을 보였다.

높은 유출농도의 원인을 파악하기 위하여 공정별 T-P 거동과 DO를 조사한 결과 포기조에서는 2.0 mg/L의 DO 농도에서도 인 섭취는 활발히 진행되었으나 침전조에서는 0.1 mg/L의 낮은 DO 조건이 형성되면서 2차 인 방출이 확인되었고, 이것이 원인으로 판단되었다.

각 조건에서 공정별 T-P의 거동을 살펴본 결과 무산소에서 활발한 인방출이 발생하였으며 혐기조와의 농도차는 3.0~5.0 mg/L의 차를 보였다. 이처럼 무산소조에서의 활

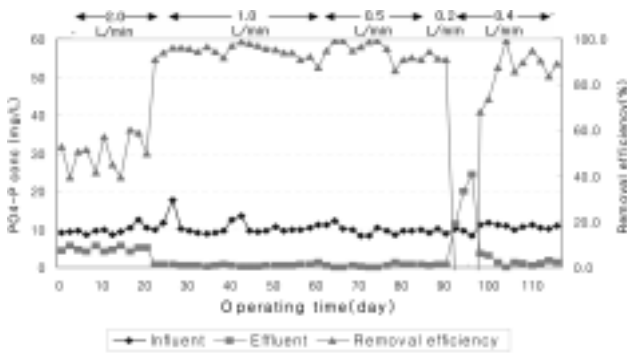
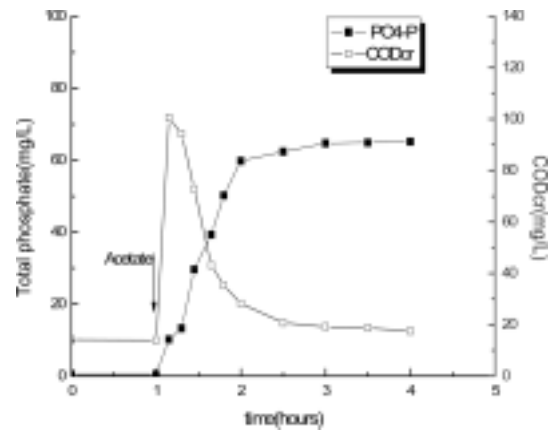


Fig. 10. Removal efficiency of T-P with respects to air flow.

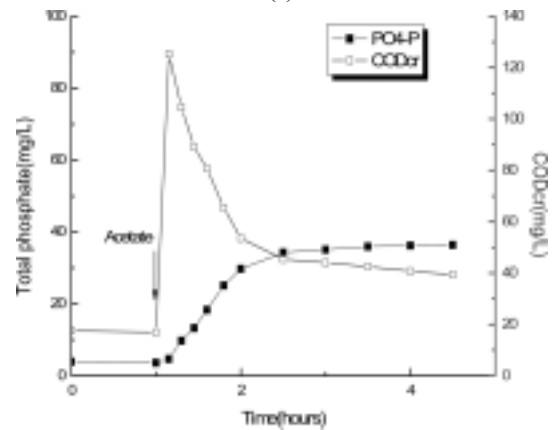
발한 인 방출이 발생한 이유는 본 공정에 내부반응이 없고, 외부반응으로 유입된 NO_x-N의 농도가 낮아 인 방출에 저해요소로 작용하지 않았기 때문으로 사료된다. 혐기조의 체류시간을 1.5 hr에서 1 hr으로 변경 한 후에도 무산소조에서의 활발한 인 방출이 발생하여 T-P 제거효율에 미치는 영향은 없는 것으로 나타났다.

3.5. 슬러지내 poly-P 함량

각 반응조가 안정화 되면서 포기량 0.5 L/min의 조건에서 95% 이상의 높은 인 제거효율을 나타내어 슬러지의 poly-P 함량에 대해 실험을 수행하였다. Fig. 11은 두가지 포기량 조건에서 시간에 따른 인 농도와 유기물 농도를 나타낸 것이다. 포기량 0.5 L/min의 조건일 때 슬러지 내 poly-P 함량을 측정하기 위해 포기조에서 채취한 시료는 NO₃-N 10.9 mg/L, PO₄-P 0.54 mg/L, MLSS 1,270 mg/L를 나타내었다. 인 방출의 저해요소로 작용하는 NO₃-N 제거를 위해 1 hr 동안 탈질을 위해 교반해준 결과 0.2 mg/L로 낮아졌으며 PO₄-P 또한 0.51 mg/L로 약 0.03 mg/L 낮아졌다. 1 hr 후 인 방출을 유도하기 위한 물질로 Acetate를 100 ± 10 mg/L 첨가하였다. 실험초기 첫 1시간은 10분 간격으로 그 이후에는 30분 간격으로 시료를 채취하여 COD_{Cr}, PO₄-P 및 NO₃-N을 측정하였다. 탄소원 첨가 10분 후 NO₃-N은 0.1 mg/L로 낮아져 인 방출의 저해요소로 작용하지 않았다. 첨가된 유기물은 초기에 소모되어 1시간 후 35.2 mg/L였으며 4시간 후 유기물 첨가 전 농도인 13.9 mg/L 보다 약간 높은 17.5 mg/L의 농도를 보여 인 방출에 90 mg/L의 유기물이 소모되었다. PO₄-P 또한 초기 1시간 동안 0.5 mg/L에서 59.8 mg/L로 약 59.3 mg/L의 인 방출이 발생되었고, 1시간 이후에는 인 방출속도가 느려졌으며 4시간 후 65.1 mg/L를 나타내었다. 포기량 2.0 L/min의 경우 초기 NO₃-N 11.6 mg/L, PO₄-P 3.9 mg/L, MLSS 1,080 mg/L를 나타내었다. 0.5 L/min의 조건과 비교하면 상대적으로 높은 NO₃-N 및 PO₄-P의 농도조건을 보이고 있다. 이는 호기조에서의 탈질효율이 낮아 인 제거율도 미흡하게 됐기 때문으로 판단된다. 1시간 교반 후 NO₃-N은 3.2 mg/L PO₄-P는 3.6 mg/L의 농도로 낮아졌고, 유기물 첨가 10분 후 0.3 mg/L 줄었으며, 20분 후에는 검출되지 않았다.



(a)



(b)

Fig. 11. Behavior of poly-P content in microorganism. (a : 0.5 L/min, b : 2.0 L/min)

PO₄-P의 경우 포기량 0.5 L/min의 조건에서 초기 10분 동안 약 10.0 mg/L의 인 방출이 발생한 반면, 2.0 L/min의 경우 1.0 mg/L의 방출에 그쳤다. 이는 탈질 되지 않고 잔류한 NO₃-N에 의한 영향으로 판단된다. Fig. 11의 (b) 그래프를 보면 20분 후부터 1시간 동안 인 방출이 발생하여 약 30.0 mg/L까지 증가함을 알 수 있으며 4시간 후에는 36.4 mg/L의 저조한 인 방출율을 나타내었다.

0.5 L/min과 2.0 L/min의 포기 조건에서 인 함량은 5.08%, 3.03%로 나타났으며 소모된 유기물 양과 방출된 인 농도의 비는 각각 0.72 mg P/g HAc, 0.38 mg P/g HAc로 나타났다. 포기량 0.5 L/min에서의 5.08%의 인 함량값은 일반적 고도처리 공정에서의 인 함유율에 비해 비교적 높은 값이며, 2.0 L/min의 포기조건에서 얻어진 0.38 mg P/g HAc의 낮은 인 방출율은 유기물이 탈질에 이용되므로써 인 제거 미생물이 사용할 수 있는 기질의 양이 제한되었기 때문으로 사료된다.

4. 결론

DMR 공정에서 내부반응을 추가하지 않고 포기량 조절에 따른 유기물, 인 처리 및 동시 질산화/탈질효율 특성에 관한 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유기물 제거율은 포기량에 상관없이 95% 이상의 제거율을 보였다.
- 2) T-N의 제거율은 포기량이 적을수록 증가하여 0.2 L/min의 조건에서 74%의 제거율을 보여, 내부반송 없이 포기량 조절만으로 높은 질소제거율을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.
- 3) 0.2 L/min의 낮은 포기조건에서도 91%의 질산화 효율을 보였으며 10~12℃의 낮은 온도에서도 88%의 효율을 얻을 수 있었는데 이는 SND 수행조건이 잘 형성되었기 때문이다.
- 4) SND효율은 포기량에 따라 차이를 보였지만 포기량 2.0 L/min 에서도 60% 이상의 효율을 얻을 수 있었으며 0.2 L/min의 조건에서 78%의 효율을 얻어 포기량 조절만으로 SND반응을 유도할 수 있었다.
- 5) T-P 제거율도 포기량에 따라 큰 차이를 보여 2.0, 1.0, 0.5 L/min의 조건에서 각각 75%, 93%, 96%의 제거율을 얻었으며 0.2 L/min의 조건에서는 침전조에서의 2차 인방출 현상으로 인해 유입수보다 높은 T-P 유출 농도를 보였다.
- 6) 포기량 조절에 따른 호기조내 슬러지의 poly-P 함량 실험결과 0.5 L/min의 조건에서 5.08%의 높은 인 함량값을 얻을 수 있었으며 소모된 유기물 양과 방출된 인 농도의 비는 0.72 mg P/mg HAc으로 나타났다.

사 사

본 연구는 2006년 중소기업청 컨소시엄사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 원활한 연구를 위해 도움을 주신 (주) 대호산업의 구자옥사장님과 직원 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 류홍덕, 이상일, “부유 및 부착성장 미생물을 이용하는 공정의 유기물, 질소 및 인 제거 특성 비교,” 대한환경공학회지, **27(2)**, 206~214(2005).
2. 황규대, 배성현, “포기조에 충전된 고정상 담체가 A²O 공정에서 질소제거에 미치는 영향,” 한국물환경학회지, **22(6)**, 1022~1030(2006).
3. Sanchez, O., Bernet, N., Delgenes, J. P., “Effect of dissolved oxygen concentration on nitrite accumulation in nitrifying sequencing batch reactor,” *Water Environ. Res.*, **79(8)**, 845~850(2007).
4. Münch, E. V., Lant, P. A. and Keller, J., “Simultaneous nitrification and denitrification in bench-scale sequencing batch reactors,” *Water Res.*, **30(2)**, 277~284(1996).
5. Irvine, R. L., D. V. S., Murthy, M. L Arora, J. L Copeman, J., A Heidman, “Analysis of full-scale SBR operation at Grundy Centre,” *J. Water Pollut. Control Fed.*, **59(3)**, 132~138(1987).
6. Pochana, K., Keller, J., “Study of factors simultaneous nitrification and denitrification(SND),” *Water Sci. Technol.*,

- 39(6)**, 61~68(1999).
7. Sen, P., Dentel, S. K., “Simultaneous nitrification-denitrification in a fluidized bed reactor,” *Water Sci. Technol.*, **38(1)**, 247~254(1998).
8. 이태경, 박재구, 한기봉, “세라믹 담체를 이용한 고정생물막 공정에서의 동시 질산화 및 탈질화,” 대한환경공학회지, **24(96)**, 1105~1115(2007).
9. Zart, D., Schmidt, I., Bock, E., “New routes to nitrogen from ammonium,” *Oekologie der abwasserorganismen*, 183~192(1996).
10. 윤조희, 박승환, 이상훈, 김승현, “물질수지를 이용한 A²O 고정생물막법에서의 호기탈질평가,” 대한환경공학회지, **22(2)**, 231~239(2007).
11. 전병희, “다공성 담체를 이용한 유동상 및 하이브리드 반응기에서의 질소제거,” 대한환경공학회지, **27(5)**, 542~548(2005).
12. Lu-Kwang Ju, Lin Huang, Hiren Trivedi, “Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal in single-tank low-dissolved-oxygen systems under cyclic aeration,” *Water Environ. Res.*, **79(8)**, 912~920(2007).
13. Painter, H. A., “Microbial transformations of inorganic nitrogen,” *Prog. Water Technol.*, **8(4/5)**, 3~29(1977).
14. Hee-Deung Park, Daniel R. N., “Evaluating the effect of dissolved oxygen on ammonia-oxidizing bacterial communities in activated sludge,” *Water Res.*, **38**, 3275~3286(2004).
15. 김용환, 조재현, 김무훈, 이용우, “생물막 담체를 이용한 질산화 반응 특성 연구,” 대한환경공학회지, **19(3)**, 415~424(1997).
16. Helmer, C., Kunst, S., “Simultaneous nitrification/denitrification in an aerobic biofilm system,” *Water Sci. Technol.*, **37(5)**, 183~187(1998).
17. Holman, J. B., Wareham, D. G., “COD, ammonia and dissolved oxygen time profiles in the simultaneous nitrification/denitrification process,” *Biochemical Engineering Journal*, **22**, 125~133(2005).
18. Jens, P. K. J., Mogens, H., “Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic conditions,” *Water Res.*, **27(4)**, 617~624(1993).
19. Xiuhong, Z., Jiti, Z., Haiyan G., Yuanyuan, Q., Guangfei, L., Lihong, Z., “Nitrogen removal performance in a novel combined biofilm reactor,” *Process Biochemistry*, **42**, 620~626(2007).
20. Yves, C., Kenneth J. Hall, W. K., “Indirect polyphosphate quantification in activated sludge,” *Water Pollut. Res.*, **25(2)**, 161~174(1990).
21. APHA, “Standard methods for the examination of water wastewater,” American Public Health Association, Washinton D. C.,(1995).
22. Eikelboom, D. H, Bulking of activated sludge, Prevention and Remedial Methods, Ellis Horwood Limited, UK.