

완전침지형 회전매체 생물막 공정에서 포기강도 조절이 동시 질산화/탈질 효율에 미치는 영향

김준명 · 이상민^{*†} · 임경호 · 김일규 · 강 호^{**}

공주대학교 건설환경공학부

^{*}공주대학교 환경공학과

^{**}충남대학교 환경공학과

Effect of Aeration Intensity on Simultaneous Nitrification and Denitrification Efficiency in the Submerged Moving Media Biofilm Process

Jun-myoung Kim · Sang-min Lee^{*†} · Kyeong-ho Lim · Il-gyou Kim · Ho Kang^{**}

Department of Civil & Environmental engineering, Kongju National University

^{*}Department of Environmental engineering, Kongju National University

^{**}Department of Environmental engineering, Chungnam National University

(Received 29 January 2008, Accepted 25 March 2008)

Abstract

Space separation method that use independent reactor for nitrification and other reactor for denitrification has been commonly used for biological nitrogen removal process like A²O process. However, this method needs large space and complicate pipelines and time separation method such as SBR process have a difficulty in continuous treatment. Thus biological nitrogen removal process which is capable of continuous treatment, easy operation and space saving is urgently required. In this research, submerged moving media was used for a biofilm process and suspended sludge was used for biological nitrogen removal at the same time. In particular DO environment by controlling air flow rate was investigated for simultaneous nitrification/denitrification. Total nitrogen removal in aeration rate more than 67 L/min · m³ showed 51~53% and rose to 65%, 70% and 78% in 50 L/min · m³, 58 L/min · m³ and 25 L/min · m³ respectively. Total phosphorus removal was very low about 10~20% more than 67 L/min · m³ aeration rates. But total phosphorus removal rises when reduces aeration rate by 58 L/min · m³ low and it showed total phosphorus removal of 72% in aeration rate 25 L/min · m³.

keywords : DO gradient, Nitrogen and phosphorus removal process, Simultaneous nitrification and denitrification, Submerged biofilm process

1. 서론

우리나라에서는 2002년부터 총질소, 총인의 배출허용기준을 특정지역과 기타지역으로 구분하여 적용하고 있으며 2008년부터는 통합하수도법의 시행에 의해 기존의 기타지역 및 소규모 시설 등의 이유로 배출허용기준의 예외적 적용을 받아왔던 시설들도 강화된 수질기준으로 적용받게 된다. 그러므로 강화되는 방류수 수질기준을 만족시키고, 가용 수자원을 최대한 확보하기 위해서는 하·폐수로부터 질소인 등과 같은 영양소를 엄격하게 제거해야 하며 이를 위한 처리효율이 높고 안정성이 뛰어나면서도 경제적인 고도처리 공정이 요구되는 실정이다. 또한 정부는 앞으로 하수처리수 재이용을 상수·하수에 이은 ‘제3의 물 산업’으로 육성할 계획이며, 2016년까지 연간 12.4억톤(생활 4.1,

공업 4.4, 농업 0.6, 유지용수 3.3억톤) 재이용 목표로 약 3,730억원의 시장형성과 함께 2,500명의 신규 일자리 창출을 기대하고 있다. 재이용수의 요구수질은 용도에 따라 차등 적용되나 유지용수와 친수용수로 재이용하는 경우 추가적으로 총질소와 총인의 방류수질이 각각 10 mg T-N/L, 1 mg T-P/L로 규제되므로 현재 고도하수처리의 방류수 수질기준보다 2배는 엄격히 적용되고 이에 대한 기술개발이 시급한 실정이다(환경부, 2006).

생물학적 질소제거는 유기성 질소 및 암모니아성 질소가 질산성 질소로 산화되는 질산화과정과 질산성 질소가 질소가스로 환원되는 탈질과정을 통해 이루어진다. 이러한 질산화 및 탈질과정은 각각 호기성 상태와 무산소 상태에서 이루어지기 때문에 완전한 질소제거를 위해서는 호기성 반응조와 무산소 반응조를 분리하여 설치하는 공간분할 공법(A²O, Bardenpho, RBC 등)이나 시간에 따라 반응조 내의 조건을 호기성 조건과 무산소 조건으로 변환시켜 운영하는 시간분할 공법(SBR, 간헐포기공법 등)이 적용되었다. 하지

[†] To whom correspondence should be addressed.
sangmin@kongju.ac.kr

만 전자의 경우 독립적인 반응조의 설계로 인해 넓은 부지면적을 필요로 하며 후자의 경우 연속적인 처리의 어려움이 나타나게 되어 연속적인 처리가 가능하면서 부지면적을 최소화할 수 있는 경제적인 공정 개발이 필요한 실정이다 (박종일과 이태진, 2007).

Fig. 1은 일반적인 질산화 탈질공정과 최근 관심을 모으고 있는 Anammox(Anaerobic ammonium oxidation) 및 CANON공정에 대한 작용원리를 도식화한 것이다(Katie, 2003). 하나의 반응기에 질산화와 탈질을 위한 적절한 조건을 충족시키는 경우에는 질산화와 탈질이 동시에 일어날 수 있다. 즉 암모니아와 적절한 용존산소 농도가 유지되는 조건에서 질산화 미생물에 의해 질산화가 진행되고 질산화 과정에서 산화된 (아)질산이온과 전자공여체, 그리고 용존산소 농도가 질산화과정에서 충분히 낮아질 경우에는 탈질 미생물에 의해 탈질이 일어날 수 있다(Pochana et al., 1999; Santos et al., 1996). 특수한 경로로 Anammox로 불리는 혐기성상태에서 암모니아와 (아)질산성 질소의 동시 산화/환원 반응에 의한 탈질 반응에 대한 보고(Astrid and Van, 1995), 산소 결핍조건에서의 독립영양 미생물에 의한 질산화 및 탈질 등이(Kuai and Verstraete, 1998) 보고되고 있다. Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 반응조의 산화상태(Oxidation state)에 따라 질산화 및 탈질 기작은 상이한 경로를 거칠 수 있으며 이러한 경로의 차이는 공학적 설계에 의미 있는 선택을 제공해 준다.

최근 질산화와 탈질화가 한반응조에서 동시에 발현될 수 있는 동시 질산·탈질반응(Simultaneous nitrification and denitrification, SND)에 대한 관심이 증가하고 있다. SND공정은 낮은 용존산소 조건으로 활성슬러지 플러내부부의 산소전달이 저해를 받음으로써 호기와 무산소 영역이 공존하는 이중 구조의 슬러지 플러가 형성되어 질산화와 탈질화가 동시에 일어나는 것이다(고광백 등, 2004). SND 공정의 적용사례로 산화구 공정에서 낮은 용존산소농도(0.1~0.5 mg/L)와 긴 수리학적 체류시간을 적용하여 높은 수준의 질소제거율을 얻은 보고가 있고(Rittman and Langeland, 1985), 생물막공정에서도 매디아에 형성된 생물막 외부는 용존산소의 전달이 용이하여 질산화 반응이 일어나고 내부는 용존산소의 전달의 한계로 무산소 혹은 혐기조건을 유지하는 이중층을 형성하여 SND를 수행하는 다양한 연구들이

보고되고(이수철 등, 2000; Gupta et al., 1994; Thomas et al., 1995; Watanabe et al., 1992) 있으나 현장에서 고정식 생물막 공정을 운전하는 경우 전자공여체 전달의 한계로 혐기조건이 형성되는 생물막의 심부는 바이오 가스의 발생으로 생물막 탈리 현상이 발생하므로 SND를 위한 이상적인 산화/환원 이중층 구조를 유지하는데 어려움이 많다(김응호, 1988; 김응호와 오정우, 1995; 石黑政儀, 1986). 이러한 고정식 생물막 공정의 개선책으로 유동식 생물막 공정과 Rotating Biological Contactor (RBC)를 개량한 완전 침지형 회전식 생물막 공정이 개발되어 수리학적 체류시간 및 포기/비포기 비 등이 질소 및 인제거 효율에 미치는 영향등이 조사되었으나(김홍태 등, 2003) 생물막 반응조내 동시 질산화 및 탈질 특성에 대한 연구는 미비하였다. 본 연구는 이러한 동시 질산화/탈질 반응의 발현과 완전 침지형 회전식 생물막 공정의 문제점을 극복하기 위해 슬러지반송을 통한 포기조내의 부유미생물과 생물막 미생물의 공존 환경을 조성하고 포기량 조절을 통해 반응조 내 공간분포에 따른 용존산소 경사를 조성함으로써 동시 질산화·탈질 효율을 증가시키고 영향인자의 정량적 분석을 목적으로 한다.

2. 연구방법

2.1. 완전침지형 회전매체 생물막공정의 구조

본 연구에 사용된 완전침지형 회전매체 생물막공정인 Submerged Moving Media Intermittent Aeration Reactor (SMMIAR) 공정의 세부구조는 Fig. 2와 Table 1에 각각 나타내었으며 아크릴 및 FRP로 제작하였다. 반응조의 구성은 혐기조, SMMIAR, 침전조 순서로 배열하였으며 유입수 와 내부반송이 혐기조로 유입된다. SMMIAR 반응조에는 표면적비가 30~100 m²/m³로 최적화된 완전침지형 회전매체가 설치되고, 이때 완전침지형 회전매체는 반응조 부피에 충만하도록 설치 및 운전되었다. 아울러 반응조 한쪽 측면 하단부에 포기장치와 회전매체사이에 길이방향으로 회전매체의 반경 이상의 높이를 갖는 내부 배플이 설치되어 회전매체의 회전에로 선회류식 포기가 실시된다. 슬러지반송은 1.0 Q로 운전되었고 부유 슬러지 농도는 2000~3000 mg/L로 유지하였고 SMMIAR 조내 DO 농도는 운전 계획에 따라 0.1~7 mg/L로 조정되면서 실험을 수행하였다.

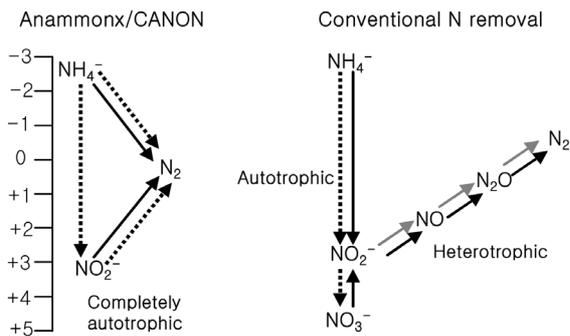


Fig. 1. Nitrification & denitrification and Anammox/CANON process.

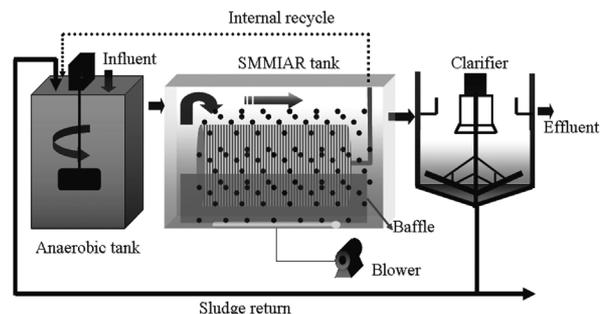


Fig. 2. Schematic of SMMIAR process.

Table 1. Design of SMMIAR process

Unit process	HRT (hours)	Effective volume (L)
Anaerobic reactor	2.5	19
SMMIAR	8	60
Clarifier	3.5	26

2.2. 완전침지형 회전매체 생물막공정의 설계

각 공정별 오염물질 제거 특성의 평가를 위해 완전침지형 회전매체 생물막공정내 유입수, 유출수, 혐기조 상등액을 채취하여 수질 분석을 실시하였으며, 실험분석 방법은 “Standard Methods(APHA, 1992)”와 “수질오염공정시험방법(환경부, 2004)”에 준하여 실험하였으며, 세부적인 사항은 Table 2와 같다. 유입수는 합성폐수를 사용했고 일관성을 유지하기 위해 혐기조 유출수의 COD도 GF/C 여과지로 여과후 SCOD를 측정하였다. SMMIAR 반응조 내 공간적 분포에 따른 DO 및 pH의 변화를 관찰하기 위하여 SMMIAR 반응조 내 15개 지점을 선정하여 공기공급량에 따른 DO 분포와 총질소 제거 및 총인 제거와의 상관관계를 조사하였으며 약 100 일간 연속운전을 통해 SMMIAR 반응조 내 포기강도가 생물학적 질소 및 인 제거 효율에 미치는 영향을 조사하였다(Table 3).

Table 2. Water quality analysis methods

Items	Analytical methods
pH	pH meter (ORION 5-star)
DO	DO meter (ORION 5-star)
SS	Total suspended solids dried at 103~105°C (SM2540D)
COD _{Cr}	Closed reflux titrimetric method
NH ₃ -N	Macor kjeldahl method (kjeltec system 1026)
NO ₂ -N	Colorimetric method
NO ₃ -N	Cadmium reduction method
T-N	Official test methods of water quality
T-P	Ascorbic acid method

3. 결과 및 고찰

3.1. 반응조 내 기류 및 수류 특성

반응조 내 기류는 포기조의 수중 배플과 회전매체의 회전력의 유도로 회전매체 내부로 쉽게 침투되지 못하고, 반응조 상부로 유도되어 회전매체의 외곽부를 순환하면서 내

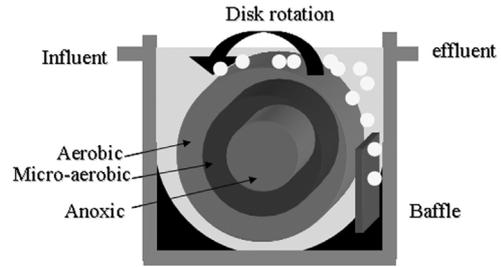


Fig. 3. Schematic of DO distribution in the aeration tank.

부로 확산되는데, 이때 반응조 외곽부의 현탁성 MLSS에 의한 신속한 DO흡착과 회전매체의 중심까지의 깊이로 인해 용존산소의 농도경사가 발생하여 회전매체 심부 및 일부 반응조 기저부는 용존산소농도가 낮아지는 현상이 발생한다. 반응조 내 수류는 회전매체의 디스크와 디스크 바 및 샤프트(멀티샤프트)부의 회전에 의해 반응조내에 순간적으로 완전혼합되지 않고 디스크의 종축방향으로 진행하게 되는 plug flow를 형성하게 됨으로써 반응조 유입부와 유출부 사이에 유기물 농도 경사를 형성하게 되고 이는 유기물 제거 속도의 향상과 더불어 슬러지의 벌킹제어에 도움을 줄 수 있다(Fig. 3).

3.2. 반응조내 공간적 특성에 따른 DO 및 pH Profile

Fig. 4는 완전침지형 회전매체 생물막공정 내의 질소 제거 메커니즘을 규명하기 위하여 조 내 공간적 특성에 따른 DO 및 pH Profile을 작성하였다. Fig. 4는 SMMIAR 반응조 내 DO 및 pH 측정 점을 나타내고 있으며, Table 4는 그 결과치를 나타내고 있다.

Fig. 5는 ⑦ 위치에서 측정된 값을 그래프로 나타낸 것이다. ⑦을 대표로 설명한 이유는 SMMIAR 공정 접촉조 내 가장 DO가 낮게 유지되는 지역이고 포기조 내에서 부분적인 탈질영역으로 작용할 가능성이 가장 높은 지역이기 때문이다. ⑦ 지역중 바닥에 가까운 영역은 83 L/min · m³와 67 L/min · m³의 포기량에서 용존산소농도가 각각 3.5 mg/L와 3.1 mg/L을 나타냈으나 포기량 58 L/min · m³에서 용존산소농도가 0.5 mg/L을 나타냈고 포기량 50 L/min · m³에서 용존산소농도가 0.4 mg/L을 그리고 포기량 25 L/min · m³에서 0.3 mg/L을 나타내어 포기량 50 L/min · m³ 이하로 운전될 때 ⑦영역부근은 탈질가능성이 충분한 영역인 것으로 판단된다. 포기량 50 L/min · m³ 이하로 운전시 조

Table 3. Experimental plan and operating condition

Experimental phase		Condition	
I	1~8 days	Air flow rate 42 L/min · m ³	
II	9~16 days	Air flow rate 101 L/min · m ³	
III	17~28 days	Air flow rate 67 L/min · m ³	
IV	29~38 days	Air flow rate 83 L/min · m ³	
V	39~50 days	Air flow rate 58 L/min · m ³	
VI	51~62 days	Air flow rate 50 L/min · m ³	
VII	63~74 days	Air flow rate 50 L/min · m ³	Internal recycle 50%
VIII	75~86 days	Air flow rate 25 L/min · m ³	Internal recycle 50%
IX	87~98 days	Air flow rate 25 L/min · m ³	Internal recycle 100%

Table 4. DO and pH measurement of SMMIAR

		Air flow (Intensity)	83 L/min · m ³		67 L/min · m ³		58 L/min · m ³		50 L/min · m ³		25 L/min · m ³	
		*Number	DO (mg/L)	pH	DO (mg/L)	pH	DO (mg/L)	pH	DO (mg/L)	pH	DO (mg/L)	pH
S M M I A R P r o c e s s	①	Top	7.01	7.29	5.78	-	3.06	7.28	2.07	7.12	1.80	6.85
		Bottom	1.36	6.98	2.54	-	2.34	7.25	0.42	7.21	0.29	6.97
	②	Top	6.70	-	6.21	-	3.11	7.35	2.29	7.18	1.13	6.89
		Bottom	6.20	-	5.56	-	2.46	7.30	1.57	7.23	1.08	7.02
	③	Top	6.59	7.33	5.83	-	2.97	7.31	2.46	7.15	0.81	6.88
		Bottom	5.10	7.34	4.26	-	1.70	7.27	1.25	7.19	0.63	7.13
	④	Top	6.67	7.31	6.89	-	3.33	7.31	2.19	7.20	2.19	6.92
		Bottom	1.30	6.79	1.70	-	0.61	7.31	0.44	7.30	0.22	6.92
	⑤	Top	7.36	-	6.23	-	3.20	7.34	2.38	7.01	2.55	7.0
		Bottom	6.54	-	5.41	-	1.86	7.28	0.88	7.20	0.16	7.05
	⑥	Top	6.89	7.33	5.84	-	2.99	7.31	2.45	7.16	1.81	6.95
		Bottom	4.51	7.32	3.80	-	0.44	7.25	0.20	7.25	0.27	7.16
	⑦	Top	6.07	-	6.13	-	3.01	-	2.06	-	1.69	-
		Middle	4.16	-	5.49	-	1.25	-	0.98	-	0.67	-
		Bottom	3.53	-	3.07	-	0.53	-	0.41	-	0.31	-

* Meaning of "Numbers(①~⑦)" means DO measuring positions that is written to Fig. 4.

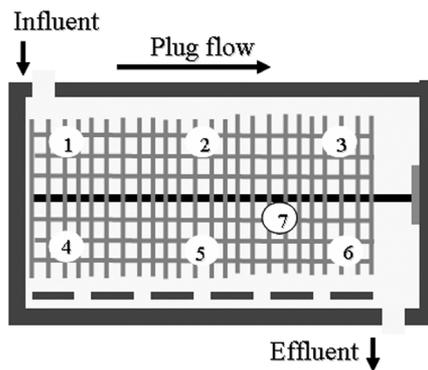


Fig. 4. DO and pH monitoring sites of SMMIAR.

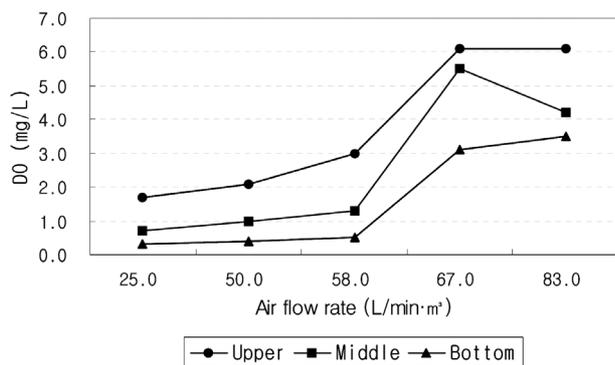


Fig. 5. DO variation in the SMMIAR with air flow rate.

내 DO는 공간적으로 0.41~2.46 mg/L로 분포되어 동일한 반응조내에서 동시 질산화/탈질이 발생할 수 있다. SMMIAR 공정 내 공간적 특성에 따른 DO 및 pH Profile을 통해 포기방식의 특성에 따라 동일 반응조에서 포기/미세포기/무산소 영역이 존재함을 알 수 있었고, SMMIAR 반응조 내에서 질산화 및 탈질화가 원활히 일어나는 것을 확인할 수

있었다. 기본적으로 질산화와 탈질공정은 서로 요구하는 산화/환원조건이 상충하는 반응이나 질산화를 위해 포기강도를 증가시키면 포기조내 동시 질산화/탈질 반응의 유도가 어려운 것은 물론 반응슬러지 중 잔존 DO로 인해 탈인반응을 저해하게 된다. 효율적인 생물학적 질소 및 인 동시 제거를 위해서는 질산화 유도가 가능한 최소 용존산소농도 조건을 유지시켜 주는 것이다. 이러한 전략은 총질소 및 총인 제거효율 향상은 물론 포기에 소요되는 에너지 비용 감소 효과도 기대할 수 있다.

3.3. 포기강도가 COD 제거에 미치는 영향

Fig. 6은 연속 운전된 SMMIAR 공정 운전 중 SMMIAR 반응조 내 포기량과 내부 반응 유무에 따라 각 단계별로 유입수와 혐기조, SMMIAR 반응조 및 유출수의 COD 농도를 측정된 결과이며, SMMIAR 공정을 통해 소모되는 유기물의 제거량은 SMMIAR 반응조 내 포기량 및 내부 반응 유무에 상관없이 평균 97.2%의 높은 COD 제거율을 보였다. 또한, 유입되는 총 COD 중 약 88.9%가 혐기조에서

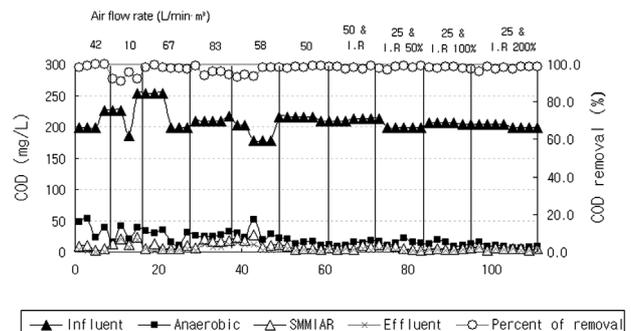


Fig. 6. COD behavior and removal according to air flow rate. *I.R: Internal recycle ratio

제거됨을 알 수 있었다. COD 제거는 SMMIAR 공정의 포기량에 의해 민감하게 반응을 나타내지 않았고, 조 내 포기량 25 L/min·m³까지 감소시킬 때까지 양호한 COD 제거율을 나타내었다.

3.4. 포기강도가 총질소 제거에 미치는 영향

Fig. 7과 Fig. 8은 SMMIAR 공정 운전 중 SMMIAR 반응조 내 포기량과 내부 반송 유무에 따라 각 단계별로 유입수와 혐기조, SMMIAR 반응조 및 유출수의 T-N 농도 및 제거 효율을 측정한 결과이다. SMMIAR 반응조 내 포기량 및 내부 반송의 유무에 따른 총질소 제거율을 평가한 결과, 전체적으로 SMMIAR 반응조 내 포기량이 50 L/min·m³ 이하의 강도에서 총 질소 제거효율이 높아지는 것으로 나타났다. 실험 I의 경우 낮은 포기량에도 불구하고 총 질소 제거율이 낮게 나타났는데, 이는 운전 초기에 알카리도 공급량이 질산화에 필요한 이론적 요구량인 7.1 mg Alkalinity/mg NH₃-N에 못 미치는 2.4~3.4 mg Alkalinity/mg NH₃-N였고 또한 운전 초기로 인해 포기조내 질산화 미생물이 충분히 배양되지 않았기 때문으로 판단된다. 이는 SMMIAR 반응조 내 NH₄⁺-N를 분석한 결과 충분한 질산화가 이루어지지 않았음을 확인할 수 있었다.

또한, 낮은 포기량으로 인하여 SMMIAR 반응조 내 교반 상태가 불량하여 반응을 위한 접촉효율이 낮은 것도 원인으로 판단된다.

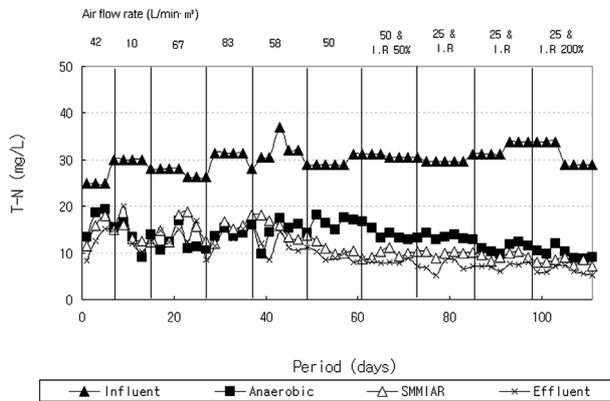


Fig. 7. Total nitrogen behavior with air flow rate.
*I.R: Internal recycle ratio

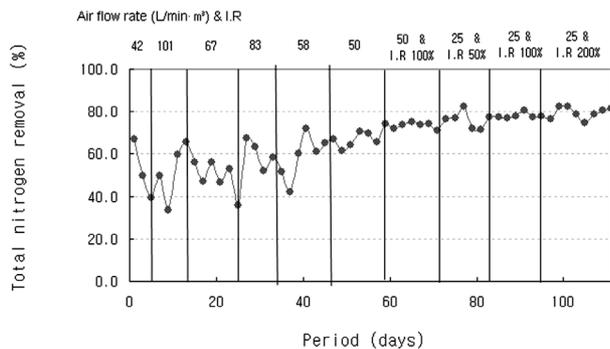


Fig. 8. Overall removal performance of total nitrogen with air flow rate.
*I.R: Internal recycle ratio

으로 판단된다. SMMIAR 공정에서 접촉조 내의 포기량은 질산화, 탈질 그리고 접촉조 내 부유미생물의 교반상태에 모두 영향을 미치는 인자이며, 포기량을 증가시키면 질산화 효율과 조 내 교반 상태는 양호해지지만 탈질효율은 감소하며, 반대로 포기량을 감소시키면 탈질효율은 증가하지만 질산화효율과 조 내 부유미생물의 교반상태가 불량해진다. 따라서 SMMIAR공정 접촉조 내의 포기량과 질산화 및 탈질화를 최적화할 수 있는 정량적 관계를 파악하는 것이 중요하며 이를 위해 포기량을 108 L/min·m³에서 25 L/min·m³으로 변화시키면서 질산화율, 탈질을 그리고 조 내 교반상태를 관찰하였다. 실험 II부터는 포기량을 늘리고 유입수에 충분한 알카리도를 공급하였다. 또한, 질소 제거 효율을 더 높이기 위해 SMMIAR 반응조에서 혐기조로의 내부반송을 실시한 결과, 내부반송율을 50, 100, 200%로 점차 늘릴수록 T-N 제거율은 76.2, 77.8, 79.9%로 점차 높아지는 것을 알 수 있었다. 즉 내부반송은 보다 높은 질소 제거효율을 얻을 수 있었으나 내부반송 100% 이상에서는 큰 폭의 제거효율 향상을 보이지 않았으며 지나친 내부반송은 동력비 상승과 생물학적 인제거 효율 저하를 초래하므로 내부반송은 100%에서 최대 200%를 초과하지 않는 것이 바람직하다. 이는 현재 SMMIAR 공정 내 존재하지 않는 내부반송라인 설치 시 질소 제거율을 높이는 데 도움을 줄 것으로 판단된다.

3.5. 포기강도가 질산화 및 탈질에 미치는 영향

Fig. 9와 Fig. 10은 SMMIAR 공정 운전 중 SMMIAR 반응조 내 포기량과 내부 반송 유무에 따라 각 단계별로 유입수와 혐기조, SMMIAR 반응조 및 유출수의 NH₄⁺-N 농도 및 제거효율을 나타낸 것이다. SMMIAR 반응조 내 포기량 및 내부 반송의 유무에 따른 NH₄⁺-N 제거율을 평가한 결과, 전체적으로 SMMIAR 반응조 내 포기량이 클수록 NH₄⁺-N의 제거율이 높았으며 또한, SMMIAR 반응조의 질산화율은 SMMIAR 반응조 내 포기량에 따라 달라지는 것을 알 수 있으며, 전반적으로 포기량이 적을수록 질산화율도 낮아지는 것으로 보아 포기조내의 암모니아성 질소제거는 동화보다는 질산화에 크게 의존함을 알 수 있었다.

실험 I의 경우 실험 VIII 및 IX와 비교해 낮은 NH₄⁺-N의

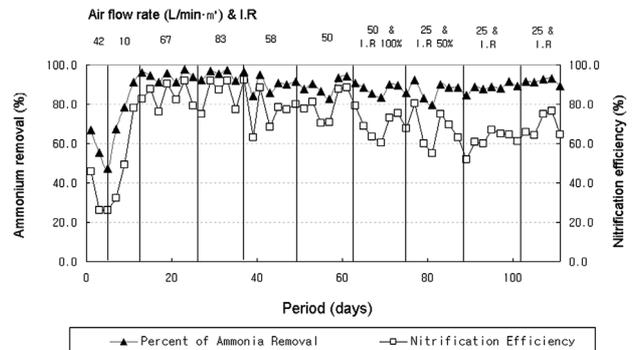


Fig. 9. Comparison between ammonia removal and percent nitrification with air flow rate.
*I.R: Internal recycle ratio

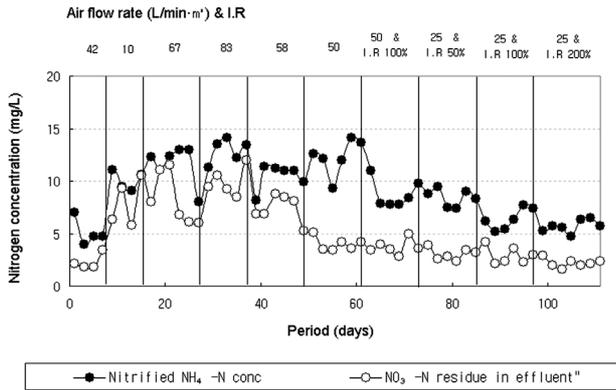


Fig. 10. Nitrogen behavior in the effluent.

*I.R: Internal recycle ratio

제거율 및 질산화율을 보이고 있다. 이는 총질소 실험 결과에도 제시했듯이 충분한 질산화가 이루어지지 않았음을 확인할 수 있었고, 이는 SMMIAR 반응조 내 포기량보다는 알카리도 부족과 초기 질산화 미생물의 순응이 충분히 발현되지 않았기 때문으로 판단된다.

Fig. 10은 SMMIAR 반응조 내 포기량과 내부 반송 유무에 따라 SMMIAR 반응조에서 질산화된 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 농도와 유출수 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도를 나타내고 있다. SMMIAR 반응조의 공기공급량은 질산화율과 탈질율 모두 영향을 주었으나 탈질율에 보다 민감하게 작용하였으며 초기 공기공급량이 67~100 $\text{L/min} \cdot \text{m}^3$ 에서는 탈질반응이 거의 발생하지 않았으며 50 $\text{L/min} \cdot \text{m}^3$ 이하에서 향상된 탈질효율을 보여주고 있다.

3.6. 포기강도가 인 제거효율에 미치는 영향

Fig. 11은 SMMIAR 반응조 내 포기량과 내부 반송 유무에 따라 각 단계별로 유입수와 혐기조, SMMIAR 반응조 및 유출수의 T-P 농도를 측정된 결과이고 Fig. 12는 인 제거효율과 유출수 내 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도와의 관계에 대해 나타내었다. T-P 제거효율은 SMMIAR 반응조의 포기량이 67 $\text{L/min} \cdot \text{m}^3$ 이상일 경우 인 제거 효율이 10~20% 정도로 매우 낮음을 알 수 있었다. 이후 SMMIAR 반응조의 포기량을 58 $\text{L/min} \cdot \text{m}^3$ 이하로 줄이면서 인 제거효율은 상승하기

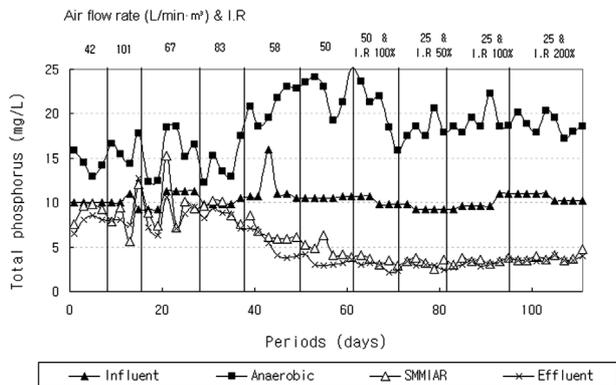


Fig. 11. Behavior of total phosphorus with air flow rate.

*I.R: Internal recycle ratio.

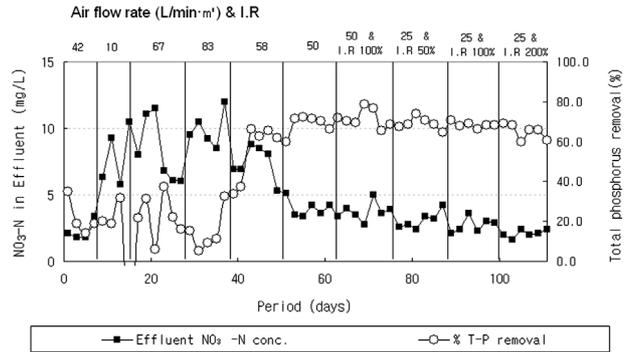


Fig. 12. Comparison between phosphorus removal and residual nitrate in the effluent.

*I.R: Internal recycle ratio

시작했으며 최고 72%의 제거율을 보였다. 하지만 내부 반송을 실시한 경우, 인 제거 효율은 내부반송율이 높아질수록 약간 감소하는 경향을 보였다.

이는 SMMIAR 반응조의 잔류 용존산소가 혐기조내의 산화/환원 전위를 상승시켜 과잉 인 방출 현상을 저해했기 때문이다. 신응배 등(2001) 연구에 의하면 질산성 질소를 0~50 $\text{mgNO}_3\text{-N/L}$ 로 변화시키면서 인 방출 현상을 연구한 결과 20 $\text{mg NO}_3\text{-N/L}$ 이하에서 인 방출이 일어나고 그 이상에서 인 방출이 일어나지 않았다. 또한 김지선 등(2004)의 연구에서는 생물학적 인 방출 현상은 용액내의 질산성 질소가 완전히 탈질된 후 발현됨을 보고하고 있다. 위 두 연구자의 결과의 기술적 표현은 차이가 있지만 신응배 등(2001)의 결과 그래프를 상세히 살펴보면 결국 신응배 등(2001)의 연구 결과 역시 유입된 질산성 질소가 거의 탈질된 후 인 방출이 됨을 확인할 수 있었다. 위의 차이는 신응배 등(2001)의 연구는 김지선 등(2004)의 연구보다 높은 C/N비 조건에서 운전하였기 때문이다. 따라서 내부 반송은 무조건 크게 설정하는 것보다 과잉 인 제거와 탈질율 사이의 최적점을 설정하는 것이 필요하다. 초반 SMMIAR 반응조의 포기량이 67 $\text{L/min} \cdot \text{m}^3$ 이상일 경우 인 제거효율이 상당히 낮은 원인은 침전조에서 슬러지 반송 시 혐기조 내로 높은 농도의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 유입되면서, 혐기조에서 인 제거 미생물에 의한 인 방출이 저해된 것으로 판단되며 유출수 내 잔류 용존산소 농도와 $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 내부 반송에 의해 혐기조로 유입될 때 인 제거효율에 크게 영향을 미치므로 인 제거와 질소제거가 동시에 요구되는 공정에는 탈질반응이 요구하는 이상의 내부 반송을 지양하고 내부 반송수내의 용존산소 농도가 가능한 낮도록 유지하는 것이 바람직하다.

4. 결론

생물막 반응조내 동시질산화/탈질 반응을 발현시키고 질소 및 인제거 효율 개선을 위해 완전 침지형 회전매체를 이용한 생물막과 부유미생물의 융합공정이 연구되었다. 동일한 반응조라도 기액전달 방법과 반응조의 구조적 특징에 따라 용존산소농도의 경사가 상이하게 형성되었으며 이에 따라 동시 질산화/탈질 효율에 민감하게 영향을 주었다.

- 1) 포기량 50 L/min · m³ 이하로 운전시 생물막 반응조내 DO는 공간적으로 0.41~2.46 mg/L로 분포되어 동일한 반응조내에서 동시 질산화/탈질이 발생할 수 있음을 확인하였다.
- 2) COD는 포기강도에 민감하게 반응하지 않았으며 포기량 25 L/min · m³ ~ 83 L/min · m³ 범위에서 평균 97% 제거율을 나타내었다.
- 3) 총질소 제거율은 포기강도가 67 L/min · m³ 이상에서 51~53%를 나타내었고 58 L/min · m³에서 65%, 50 L/min · m³에서 70% 그리고 25 L/min · m³에서 78%까지 상승하였다.
- 4) SMMIAR 반응조의 공기공급양은 질산화율과 탈질율에 모두 영향을 주었으나 탈질율에 보다 민감하게 작용하였으며 초기 공기공급양 67~101 L/min · m³에서는 탈질 반응이 거의 발생하지 않았으며 50 L/min · m³ 이하의 포기조건에서 향상된 탈질효율을 보여주었다.
- 5) SMMIAR 반응조에서 혐기조로의 내부반송을 실시한 결과, 내부반송율을 50, 100, 200%로 점차 늘릴수록 총질소 제거율은 76.2, 77.8, 79.9%로 점차 높아지는 것을 알 수 있었다.
- 6) 총인 제거율은 포기량이 67 L/min · m³ 이상일 경우 10~20% 정도로 매우 낮았으나 포기량을 58 L/min · m³ 이하로 줄이면서 상승하였으며 25 L/min · m³에서 최고 72%의 총인 제거율을 나타내었다.

사 사

본 연구는 대전환경기술개발센터 및 공주대학교 자체 학술연구과제의 지원에 의해 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

고광백 외 13인 공역(2004). *폐수처리공학 II*, 동화기술.
 김응호(1988). 회전원판법의 오니관리에 관한 기초연구. *상하수도학회지*, **1**(1), pp. 22-31.
 김응호, 오정우(1995). 회전원판법을 이용한 하수의 유기물 산화, 질화 및 탈질화의 고도처리공정 해석. *대한환경공학회지*, **15**(4), pp. 1083-1091.
 김지선, 이성학, 이은주, 김종락, 박종복, 김창원(2004). 혐기 조건에서 인 방출에 대한 nitrate 영향. *추계 학술발표회 논문집*, 대한환경공학회, pp. 171-177.

김홍태, 김학성, 김규창(2003). 생물학적 질소, 인 제거를 위한 SMMIAR 공정의 운전특성. *한국환경과학회지*, **12**(1), pp. 55-61.
 박종일, 이태진(2007). 단일반응기를 이용한 동시 질산·탈질에 관한 연구. *대한환경공학회지*, **29**(2), pp. 220-228.
 신응배, 이두진, 이상엽, 김연권(2001). 혐기조 인방출조건에 영향을 미치는 nitrate, 유기물, 미생물농도사이의 상관관계, *추계 학술발표회논문집*, *대한환경공학회*, pp. 11-12.
 이수철, 이현용, 김동진(2000). 이중층 증공사 생물막 담체를 이용한 유동층 생물막 반응기에서의 동시 질산화와 탈질. *한국생물공학회지*, **15**(5), pp. 514-520.
 환경부(2004). *수질오염공정시험법*.
 환경부(2006). *하수도 시설 지도·점검결과*.
 石黑政儀(1986). 回傳圓板法 における 窒化, 脱窒, 有機物酸化同時反應 シミコルーション. *下水道協會誌*, **23**(262), pp. 49-57.
 APHA, AWWA and WEF (1992). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18th Edition.
 Astrid, A. and Van, D. G. (1995). Anaerobic oxidation of ammonium is biological mediated process. *Appl. Environ. Microbiol.*, **61**, pp. 1246-1251.
 Gupta, S. K., Raja, S. M. and Gupta, A. B. (1994). Simultaneous nitrification and denitrification in a rotating biological contactor. *Environ. Technol.*, **15**, pp. 145-153.
 Katie Third (2003). Oxygen management for optimization of nitrogen removal in a sequencing batch reactor. A thesis for the degree of doctor of philosophy in biotechnology, Murdoch University, Western Australia.
 Kuai, L. and Verstraete, W. (1998). Ammonium removal by the oxygen-limited autotrophic nitrification-denitrification system. *Appl. Environ. Microbiol.*, **64**, pp. 4500-4506.
 Pochana, K., Keller, J. and Lant, P. (1999). Model development for simultaneous nitrification and denitrification. *Water. Sci. & Tech.*, **39**(1), pp. 235-243.
 Rittman, B. E. and Langeland, W. E. (1985). Simultaneous denitrification with nitrification in single-channel oxidation ditches. *J. Water Pollut. Control Fed.*, **57**, pp. 300.
 Santos, V., marchal, L., Tramper, J. and Wiffels, R. (1996). Modeling and evaluation of an integrated nitrogen removal system with microorganism co-immobilized in double-layer gel beads. *Biotechnol. Prog.*, **12**, pp. 240-248.
 Thomas, G. P., Chie-Chien, T. and Ben, K. (1995). Nitrogen removal in a partial nitrification/complete denitrification process. *Water Environment Research*, **70**(3), pp. 334-342.
 Watanabe, Y., Masuda, S. and Ishiguro, M. (1992). Simultaneous nitrification and denitrification in micro-aerobic biofilms. *Water Sci. & Technol.*, **26**(3/4), pp. 511-522.