

SBR 공정에서 유입수 주입방식과 비 포기 유입수 주입시간이 탈질효율과 슬러지 침강성에 미치는 영향

이상민 · 남세용*·†

공주대학교 환경공학과 · *한경대학교 환경공학과

(2005년 4월 7일 접수, 2005년 7월 6일 채택)

Effect of Feeding Pattern and Anaerobic Fill Time on the Denitrification and Sludge Settling Ability in the SBR Process

Sang-Min Lee · Se-Yong Nam*·†

Department of Environmental Engineering, Kongju National University

*Department of Environmental Engineering, Hankyong National University

ABSTRACT : Anaerobic fill time and feeding pattern in SBR operation were investigated to find way of minimizing poor nitrogen removal efficiency in BNR process without external carbon addition. The three types of the modified SBR operations that were CO-SBR, IA-SBR, and SF-SBR were tested by lab-scale and pilot-scale SBR processes (2 m³/day). In addition, practical equation for biological nitrogen removal was suggested and the equation considered the effect of ratio of fill volume over whole SBR volume and the ratio of step-feed in SBR. The denitrification efficiency of the SF-SBR was best among the three SBRs and followed by IA-SBR, and CO-SBR. The efficiency was 95%, 61%, and 19%, respectively. Looking at the change of sludge floc density by the length of anaerobic fill time, the density of sludge floc at 1 hour and 2 hours of anaerobic fill time were greater than 3 hours of one. The floc size distributions were 100~300 μm and 200~400 μm with respect to anaerobic fill time 2 hours and 3 hours, respectively.

Key Words : Sequencing Batch Reactor, Denitrification, IA-SBR, SF-SBR, Anaerobic Fill Time

요약 : 본 연구는 생물학적 질소제거공정에서 국내 하수의 저C/N비로 인한 총질소 저하현상을 최소화 하기위한 방안으로 SBR 공정에서 유입수 주입방식의 변화를 포함한 세가지 운전모드에 대한 질소제거 효율을 평가하였다. 검토된 운전방식은 CO-SBR, IA-SBR, SF-SBR이며 lab-scale운전과 pilot-scale(2 m³/day) 운전을 통해 검증하였다. 또한 질소제거를 위한 SBR공정에서 유입수량과 반응조의 비율과 유입수 간헐 주입비를 고려할 때 질소제거효율을 효과적으로 예측할 수 있는 방정식을 개발하여 질소제거율을 실제 운전결과와 비교·검토하였다. 유입수 주입방식의 변화가 탈질효율에 미치는 영향은 운전결과 SF-SBR이 90% 탈질율로서 가장 높은 탈질율을 나타냈고 IA-SBR이 61% 그리고 CO-SBR이 19%를 나타내었다. 또한 비 포기 유입시간의 길이가 슬러지 플럭에 미치는 영향은 비 포기 유입시간이 1시간 및 2시간의 경우의 플럭의 밀도가 3시간의 경우보다 높아졌고 양호한 침강성을 나타냈으며 플럭의 입도분포는 1시간 및 2시간의 경우가 100~300 μm이고 3시간의 경우 200~400 μm를 나타내었다.

주제어 : 연속 회분식 반응조, 탈질, SF-SBR, IA-SBR, 비 포기 유입시간

1. 서론

생물학적 질소제거공정은 전 탈질공정 (pre-denitrification process)과 후 탈질공정 (post-denitrification process)으로 구분된다. 전 탈질공정은 폐수 중 유기물을 전자공여체로 이용하는 장점이 있으나 처리시설이 증가하고 내부순환을 위한 에너지 공급을 필요로 하는 단점이 있으며 Bardenpho process와 같은 A²O계열의 고도처리공정이 전 탈질공정을 사용하고 있다. 후 탈질 공정은 처리시설이 적고 운영이

간단하며 수질이 안정적이라는 장점이 있으나 탈질반응조가 질산화반응조의 후반부에 위치하기 때문에 탈질반응에 필요한 유기물이 포기조가 위치하는 전 단계에서 대부분 제거되고 탈질 반응조에서는 가용 탄소원이 부족한 상황이므로 탈질효율을 높이기 위해서는 외부탄소원의 공급이 필요하다는 단점이 있다. 후 탈질공정 방식을 사용하는 대표적인 공정으로는 SBR (Sequencing batch reactor)공정이 있다. SBR 공정은 단일 반응조에서 교반, 폭기, 침전, 배출 등을 행하는 효과적인 방법으로 소요 반응조용적과 부지면적을 줄일 수 있다는 장점 때문에 중·소규모 하수처리장에 적합한 공정이다.¹⁾

생물학적 질소제거 공정은 질산화와 탈질공정으로 이루어지며 탈질공정 즉 질산성 질소를 질소가스로 환원할 때

† Corresponding author

E-mail: namsy@hnu.hankyong.ac.kr

Tel: 031-670-5177

Fax: 031-670-5170

미생물은 전자공여체(electron donor)를 필요로 한다. 탈질 공정을 위한 전자공여체로는 acetic acid, citric acid, acetone, methanol 등을 들 수 있으며, 경제적인 이유에서 메탄올을 선호하고 있다. 메탄올을 이용한 탈질화의 경우 대부분의 실험 자료는 M/N (mg methanol/mg initial nitrogen)비를 사용하고 있으며 완전한 탈질효율을 얻기 위한 M/N비는 3.0 이상을 사용하고 있다.²⁾ 국내 하수의 경우 M/N비 대신 C/N (TBOD/TN)비를 사용하는데 보통 4-5 정도를 적정범위로 보고 있다. 탈질공정에서 탈질가능성은 무산소 조에서의 COD/NO₃-N비로 평가할 수 있는데 글루코오스가 탄소원으로 사용될 때 4.2 g COD/g NO₃-N이 동화를 포함한 총 질소제거에 요구되나 순수한 탈질 및 동화과정 외에 산소에 의한 산화작용과 같은 부작용에 의해 소모되는 탄소원까지 고려하면 최소 5 g COD/g NO₃-N 이상이 요구된다.³⁾ 하지만 국내 하수처리장으로 유입되는 하수는 유기물이 부족하고 또 유기물 중에 미생물이 질소 등을 제거하기 위하여 실제적으로 이용할 수 있는 쉽게 분해되는 유기물 부분은 더욱 작기 때문에 높은 질소제거효율을 기대하기 어렵다. 특히 SBR과 같은 전형적인 후 탈질공정은 질산화 효율이 높으나 탈질효율이 낮다는 구조적 문제가 있다.

현재까지의 SBR을 이용한 질소제거연구는 주로 외부탄소원의 종류에 따른 탈질효율에 미치는 영향,⁴⁾ 포기/비 포기 시간비가 질소제거 효율에 미치는 영향⁵⁾ 포기/비 포기 시간비가 플록특성에 미치는 영향,⁶⁾ 간헐포기방식이 질소제거에 미치는 영향 등이 연구되었으며 간헐주입에 대한 연구도 진행되었지만 처리효율만 비교하였고⁷⁾ 일반적인 SBR 공정에 대한 수학적 모델은 보고되었지만⁸⁾ SBR공정의 운전모드를 변화시킬 때 질소제거효율을 모델화하려는 노력은 수행되지 않았다. 또한 탄소원의 종류에 따른 비탈질 속도는 아세트이트, 메탄올, propionic acid, 발효된 축산폐수의 비탈질 속도는 각각 9.3, 10.5, 8.9, 10.5 mg NO₃-N/g VSS · hr을 나타냈으며,⁹⁾ 해당 기질종류에 따른 비탈질 속도의 차이는 크지 않았으며 오히려 유입방식이나 운전모드의 변화가 더 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 본 연구는 SBR 반응조에서 운전방식의 변화를 통해 질소제거 효율을 비교 조사하였고 이를 일반화 할 수 있는 수식을 비교 검토하였다.

2. 실험방법

2.1. SBR 공정구성 및 운전방법

실험에 사용된 SBR 반응조는 lab-scale SBR (3 L)과 1 m³ 용적의 pilot plant를 제작하여 운전하였으며 lab-scale SBR은 Table 3에 표기된 합성폐수를 사용하여 운전하였고 pilot-scale SBR은 오수를 사용하여 운전하였다. 이때 사용된 오수는 일간 성장변화가 심해서 이의 영향을 최소화하기 위하여 5 m³ 규모의 균등조를 설치하여 균등화된 오수를 사용하여 연구를 수행하였다.

Table 1은 lab-scale SBR공정의 운전모드를 설명하고 있으며 fill time을 1시간에서 3시간까지 변화시켜 운전하면서

SBR 공정의 운전효율과 슬러지의 침강특성에 대해 조사하였다. Table 2는 SBR 운전모드가 질소제거효율의 향상을 미치는 영향을 조사하기 위해 세 가지 방식의 운전방법을 적용함으로써 유기물과 질소제거율을 살펴보았다. 첫 번째 방법은 CO-SBR (conventional SBR) 운전방식으로 혐기, 호기, 무산소 조건을 한 주기 내에 두어 혐기 조건에서는 비 포기 조건에서 유입수를 유입하여 슬러지층에 잔존한 질산성 질소의 전 탈질 (pre-denitrification)을 유도하고 이어서 발생하는 혐기조건하에서 생물학적 인의 방출을 유도한다. 호기조건에서는 포기를 통해 잔존유기물의 제거 및 질산화를 유도하였고 마지막 무산소 조건에서는 비포기 조건을 통해서 호기조건에서 생성된 질산성 질소의 탈질을 완전한 질소제거를 목적으로 운전되었고, 두 번째 방법은 IA-SBR (Intermittent aeration SBR) 운전방식으로 주기 내 반응시간을 무산소와 산소조건을 계속 반복시켜 운전함으로써 간헐포기방식의 장점을 SBR에 접목시켜 질소제거 효율을 향상시키려는 목적으로 운전되었으며, 마지막으로 SF-SBR (step-feed SBR)은 유입수의 일정량을 분배하여 후 탈질에 필요한 탄소원의 공급처로서 이용하며, 나머지 운전조건은 일반적인 SBR과 같다.

Table 1. Fill time effect on the SBR operation using a lab-scale SBR

Unit (hr)	Fill (AN)	AN	AE	AX	AE-p	Settle	Draw/Idle
Fill time 1 hr	1	2	4	2	1	1	0.5-0.5
Fill time 2 hr	2	1	4	2	1	1	0.5-0.5
Fill time 3 hr	3	0	4	2	1	1	0.5-0.5

(AE: aeration, AN: anaerobic, AX: anoxic, AE-p: post aeration)

Table 2. Operational modes for SBR experiment

Operation Mode	Conventional SBR (CO-SBR)	Intermittent aeration SBR (IA-SBR)	Step-feed SBR (SF-SBR)
Reaction	AN-AE-AX-AE	(AN-AE)n	AN-AE-AX-AE
Fill time (min)	3 - 4 - 2 - 1	60/90	3 - 4 - 2 - 1
Feeding volume	1Q	1Q	(2/3)Q & (1/3)Q
Cycle Time (hr)	12	12	12
Settle/Draw/Idle	1/0.5/0.5 hr	1/0.5/0.5 hr	1/0.5/0.5 hr

(AE: aeration, AN: anaerobic, AX: anoxic, IA: intermittent aeration)

Table 3. Characteristics of influent for a lab-scale test

Items	Reagents	Concentration (mg/L)
COD	Dextrose	200
	CH ₃ COOH	200
Phosphorus	NaH ₂ PO ₄	10
	NH ₄ Cl	20
Ammonia Nitrogen	NaHCO ₃	300
Sodium bicarbonate Mineral	MgCl ₂ ·6H ₂ O	20
	KCl	20
	CaCl ₂	20

2.2. 분석방법

COD, ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, TOC, 그리고 SVI 등의 분석은 *Standard Methods*¹⁰⁾에 의해 분석하였으며 분석 시 시료는 GF/C 여지로 여과 한 후 즉시 분석을 수행하였으며 24시간 이상 보관 시에는 0.1 N 황산 1 mL를 첨가한 후 냉장 보관하였다. 슬러지 입도분포는 Shimadzu Centrifugal Particle Size Analyzer를 이용하여 입도분석을 수행하였고 SBR 슬러지의 morphology 관찰을 위한 SEM 촬영은 SBR 슬러지를 20분간 3,000 rpm에서 원심분리한 후 상징수를 버리고 슬러지 펠렛을 냉동건조기에서 24시간 동안 건조시킨 후 건조된 시료는 gold-palladium 고정화작업을 수행한 후 20kv 조건에서 SEM 촬영을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

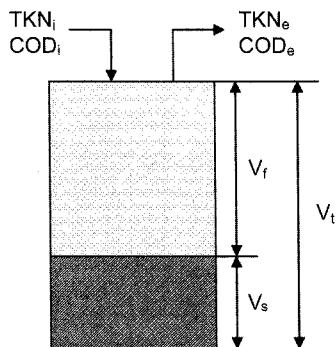
3.1. 운전방식변화에 따른 질소제거효율예측

Fig. 1은 CO-SBR 공정의 개념도를 나타낸 것이다. 단 CO-SBR 공정에서 총질소제거율 계산은 질산화가 완벽히 일어난다는 가정 하에서 이루어졌으며 식 (1)과 같이 표현될 수 있다. 일반적인 생물학적 질소제거공정에서는 질산화가 완벽히 일어나지 않은 경우도 존재하지만 본 연구에서는 탈질효율에 미치는 영향을 조사하는 것이 목적이므로 질산화 정도는 고려하지 않았다.

$$R_{TN} = (1 - \frac{V_f}{V_t}) \times 100 \quad (1)$$

R_{TN} : 총질소제거율 (%)

SBR의 총 용적은(V_t) 처리수를 방류한 후 잔존한 슬러지 용적과 유입수 용적의 합으로 이루어져 있고 V_f 는 CO-SBR의 유입수 용적비율 즉, 총 반응조 용적 중 (V_t)중 유입수 용적이(V_f) 차지하는 비율을 의미한다. 따라서 $\frac{V_f}{V_t}$ 는 유입수량과 SBR 총 용적을 통해 구할 수 있다. 본 실험에 사용된 CO-SBR의 V_f/V_t 는 0.6이므로 식 (1)에 의하면 R_{TN} 은 40%가 된다. 유입수의 총 질소 농도는 20 mg/L이므로



V_s : Sludge volume V_t : SBR total volume
 V_f : SBR decanting volume R_f : V_f/V_t

Fig. 1. Modelling of CO-SBR for biological nitrogen removal.

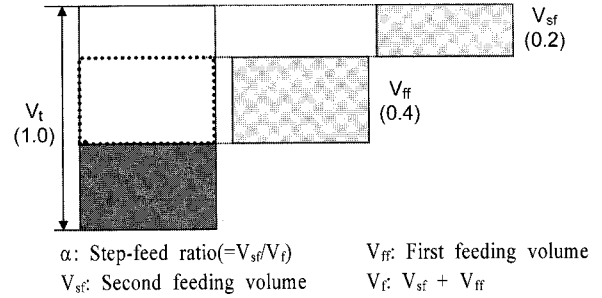


Fig. 2. Modelling of SF-SBR for biological nitrogen removal.

잔류 질소농도는 이론적으로 12 mg/L가 된다. 이는 Fig. 3과 Fig. 4에서 유출수의 질산성 질소와 암모니아의 합이 약 12 mg/L 정도로 거의 근사한 값을 나타내고 있어 식 (1)이 결과를 잘 설명하고 있음을 알 수 있다. 그러므로, CO-SBR에서 총 질소 제거율을 올리려면 유입용적비 (V_f/V_t)를 줄여야 한다. 예를 들어 V_f/V_t 가 0.2로 변한다면 총 질소 제거율은 식 (1)에 의해 80%가 된다. 그러나 V_f/V_t 가 0.2로 변하는 경우 반응속도가 줄어들어 전체적으로 동일 유량의 유입수를 처리하는데 더 큰 소요 부지를 요구하게 되어 비경제적인 설비가 된다.

Step-feed 방식은 총 유입수의 2/3는 최초 유입기에 비 포기 조건에서 유입하고 나머지 1/3은 2차 유입기에 후 탈질을 위해 주입하여 운전하는 방식이다. Fig. 2에 나와 있듯이 총 유입량이 반응기의 60%이므로 최초유입량 (V_{ff})은 총유입량의 40%가 되고 2차 유입량은 총 유입량의 20%가 된다. 여기서 2차 유입량과 총유입량과의 비를 α 라 하면 $\alpha = V_{sf}/V_f = 0.33$ 이 된다. Step-feed 방식의 목적은 CO-SBR에서는 비 포기 유입기의 유기탄소원만이 탈질에 기여하고 후 탈질을 위한 반응기에는 거의 역할을 하지 못하는 문제점을 극복하기 위해 비 탈질성 유기탄소원의 소모를 최소화 하여 탈질효율을 향상시키기 위함이다. 이러한 SF-SBR에서 질소제거효율을 예측하는 방법은 두 가지 경우가 존재한다. 첫째 경우는 2차 유입량속에 존재하는 유기탄소원이 최초 유입량 속에 존재하는 질산화 가능한 질소를 모두 탈질시킬 수 있을 정도의 유기탄소원을 가지고 있는 경우와 둘째 경우는 유입수의 특성상 낮은 C/N비와 낮은 α 값으로 인해 2차 유입량 (Step feed)에 포함된 유기탄소원으로 최초 유입으로 인해 발생한 질산성 질소를 100% 탈질하지 못하는 경우이다.

전자의 경우 처리수의 잔류 총 질소 농도는 2차 유입량속에 포함된 질산화 가능한 질소 농도와 같은 값을 나타내고 식 (2)와 같이 일반화 될 수 있다.

$$\text{잔류 총 질소 농도} = \alpha \times \frac{V_f}{V_t} \times \text{TKN} \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여 총 질소 제거율은 유입 총 질소량과 잔류 총질소량의 차이를 유입 총 질소로 나눈 값이므로 이를 정리하면 식 (3)과 같이 정리된다.

총 질소 제거율 =

$$[TKN(1 - \alpha \times \frac{V_f}{V_t})] \times 100 / TKN = 1 - (\alpha \times \frac{V_f}{V_t}) \times 100 \quad (3)$$

본 연구에서 SF-SBR의 step-feed 비(α)는 1/3이고 V_f/V_t 는 CO-SBR과 동일하게 0.6이므로 유입 총질소가 20 mg/L인 경우 잔류 총질소 농도를 식 (2)에 의해 4 mg/L가 되고 총 질소제거율은 식 (3)에 의해 80%가 된다. 이러한 결과는 Fig. 6에 나와 있는 실험 결과와 잘 일치됨을 보여준다.

생물학적 수처리 공정의 대표적인 수학적 모델인 ASM 3는 13개 이상이 모델 구성성분과 20개 이상의 동력학적 계수와 화학양론 계수로 이루어진 모델파라미터가 필요하나 측정상의 어려움으로 인해 성분분석이 제대로 이루어지지 않고 외국 문헌 값을 이용하며, 동력학적 계수 또한 일반적인 문헌상의 값을 이용하는 실정이다.¹¹⁾ 위에서 언급한 동력학적 계수와 화학양론 계수가 모두 고려된다면 질소제거율에 미치는 달리지겠지만 미생물의 기본적 특성을 나타내는 동력학적 계수는 일정하다는 가정 하에서 SBR 공정의 운전인자 변화가 탈질효율에 미치는 영향을 조사하는 것이 본 연구의 목적이고 이에 따라 둘째 경우는 α 값이 적거나 유입수의 C/N비가 낮아서 최초 주입량 속에 포함된 질소가 모두 탈질이 되지 않고 잔류하는 경우로서 총 잔류 질소 농도는 최초 주입량 속에 포함된 질소 중 미처리된 부분과 2차 유입량 속에 포함된 질소량의 합이 된다. 따라서 식 (4)와 같이 일반화 된다.

잔류 총 질소 농도 =

$$\alpha \times \frac{V_f}{V_t} \times TKN + (1 - \frac{V_f}{V_t}) \times TKN - \frac{\alpha \times BOD}{2.85} \quad (4)$$

BOD : 유입수의 BOD 농도

2.85 : g NO₃-N을 탈질 시키는데 소요되는 g BOD

3.2. SBR 공정에서 운전방식 변경과 Fill time이 처리효율에 미치는 영향

Fig. 3은 CO-SBR 반응조를 운전할 때 COD의 거동을 나타낸 것이다. COD는 3시간 반응 후 생분해성 유기물은 대부분 분해되었으며 최종 유출수의 농도는 20 mg/L을 나타내었다. Fig. 4는 암모니아성 질소의 거동을 나타낸 것으로 암모니아 농도는 비 포기 유입조건에서 유입속도가 빠를수록 즉, fill time이 짧을수록 빠르게 상승하였으나 반응이 종료될 때 암모니아의 농도는 fill time에 상관없이 모두 1 mg/L 이하로 감소하여 질산화가 양호하게 발생하였으며 SBR 공정에서 fill time은 질산화 정도에는 유의적인 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 반응시간 중 pH는 탈질로 인한 알카리도 증가로 인해 비 포기 시간동안 소폭 상승하는 경향을 나타내었고 DO는 포기중 3.5 mg/L을 유지하였다.

CO-SBR 공정은 처리 주기상 유입기는 포기하지 않고 교

반만 이루어지며 이어지는 반응기에 포기공정과 후 탈질을 위한 비 포기 공정이 있다. 따라서 방류하고 SBR에 남아 있는 슬러지에 포함되어 있는 질산성 질소는 비 포기 유입으로 인해 원활히 탈질이 일어나지만 문제는 유입수에 포함되어 있는 질소성분은 후 탈질공정에서 거의 탈질되지 않고 방류된다는 것이다. 왜냐하면 유입수내의 유기 탄소원은 비 포기 유입기에 80% 이상 제거되고 나머지도 포기 반응기동안 제거되기 때문에 정작 탄소원이 필요한 후탈질 공정에서는 가용탄소원이 거의 존재하지 않게 된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 Table 2에서 언급한 세 가지 모드의 SBR 운전방식에 대해 COD 거동 및 질산성 질소의 거동에 대해 나타낸 것이다. IA-SBR 유출수의 질산성 질소의 농도는 4-5 mg/L였으며 CO-SBR은 12-14 mg/L, SF-SBR은 1-2 mg/L을 나타내었다. CO-SBR 운전모드는 COD 제거와 질산화 그리고 전탈질은 양호하게 이루어지나 후탈질시 필요한 유기물 부족 때문에 후 탈질은 거의 발생하지 않은 채 유출수로 방출된다. 따라서 추가적인 탄소원을 공급하는 것이 총질소 제거효율을 향상시키는 가장 확실한 방법이나 탄소원 공급을 위한 추가 비용이 문제가 된다. COD제거는 세 방법이 큰 차이를 보이지 않았으나 SF-SBR이 내부탄소원 (internal carbon source)의 제거와 탈질에 필요로 하는 탄소요구량 보충이라는 두 명제를 최적화 하여 추가 탄소원 없이 탈질효율을 최대화 하였다. 그 결과 전 탈질과 후 탈질 모두 양호하게 발생하였다.

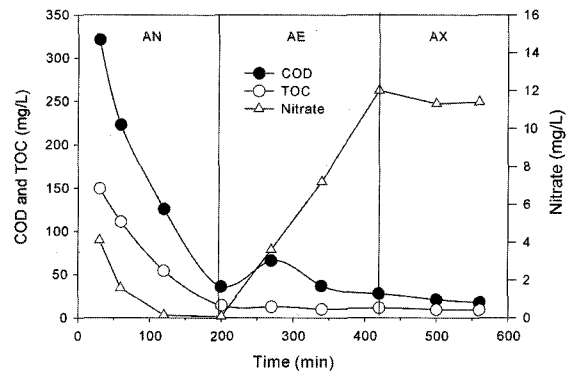


Fig. 3. COD removal and nitrification in a CO-SBR.

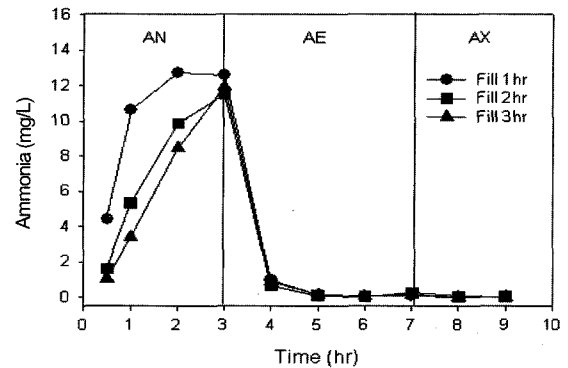


Fig. 4. Nitrification activity according to fill time in a CO-SBR.

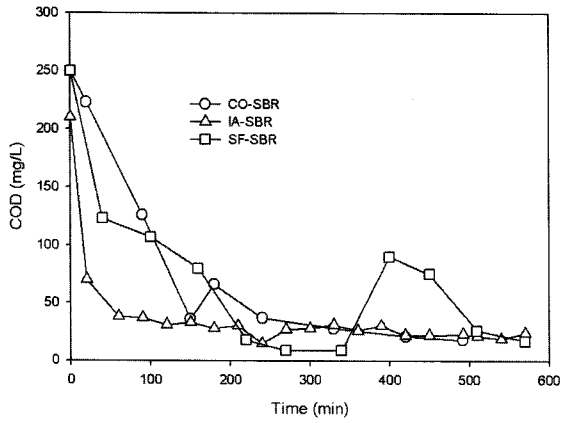


Fig. 5. Behaviour of COD removal as to three type of SBR operation modes.

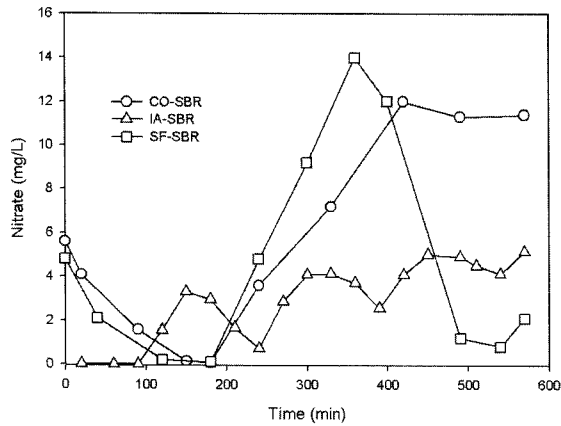


Fig. 6. Behaviour of nitrogen removal as to three type of SBR operation modes.

3.3. Fill time에 따른 슬러지 침강성 및 구조의 변화

Fig. 7은 SBR 공정에서 비 포기 유입시간의 길이에 따른 floc size 분포의 차이를 나타낸 것이다. 비 포기 유입시간이 길수록 슬러지 플럭의 평균 크기는 증가하였다. 즉 비 포기 유입시간이 1시간과 2시간의 경우는 200 μm의 크기가 가장 많은 분포율을(각각 34%, 44%) 차지하였으나 혐

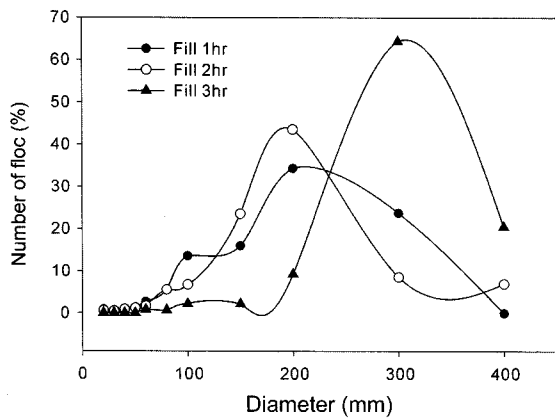
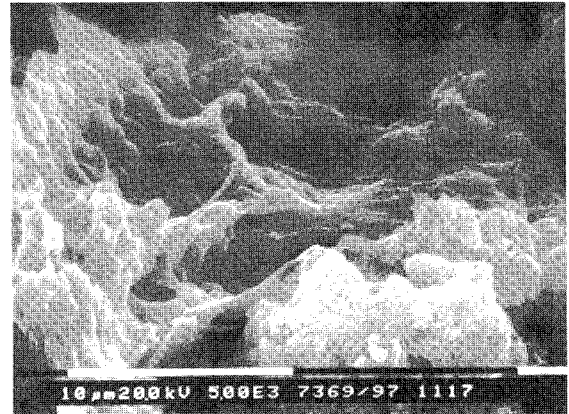


Fig. 7. Comparison of floc size distribution as to the length of anaerobic fill time.

기조건 fill time이 3시간으로 증가하였을 때는 300 μm의 크기가 64%의 분포율을 차지하였다. 일반적으로 Stock's law가 지배하는 독립입자 침강조건이라면 크기가 클수록 침강속도가 증가하는 경향을 나타내고 III형 침전에 해당하는 생물학적 2차 침전지에서는 사상상 세균의 증가로 인한 플럭의 겉보기 밀도 감소가 침강속도가 저하원인이 된다.^{12,13)}

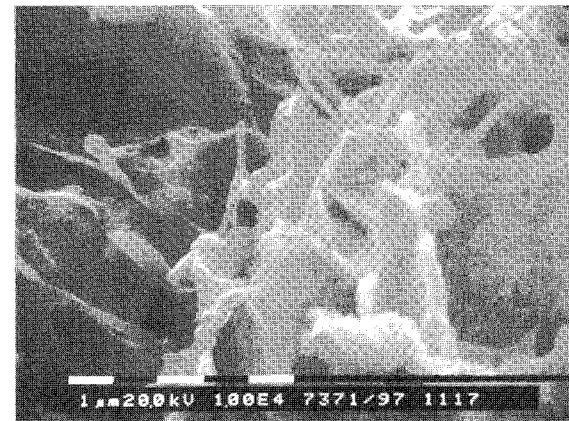
Fig. 8은 SBR 슬러지 플럭을 SEM 촬영한 것으로 비 포기 유입시간의 길이에 따른 슬러지 morphology 변화를 관찰하였으며 두가지 의미를 지적하고 있다. SBR 공정에서



(a) Anaerobic fill 1 hour



(b) Anaerobic fill 2 hours



(c) Anaerobic fill 3 hours

Fig. 8. SEM photograph of SBR floc as to the length of anaerobic fill time.

슬러지의 침강성은 비 포기 유입시간이 존재하는 경우가 비 포기 유입시간이 존재하지 않은 경우보다 우수하였다. 이는 기존의 "선택조 (Selector)" 개념으로 설명될 수 있는데, 호기조 앞의 혐기조를 돕으로써 호기성 미생물인 사상성 미생물의 성장을 억제하여 슬러지의 겉보기 밀도를 증가시키고 침강성을 개선할 수 있다는 이론이다.¹⁴⁾ Fig. 8에서 나타내는 것은 비 포기 유입시간의 길이에 따라 슬러지 플럭의 구조가 달라질 수 있으며 결과적으로 침강성에 영향을 미친다는 것이다. 비 포기 유입시간의 길이가 변화함에 따른 슬러지플럭의 구조는 사상성 미생물의 증가는 크지 않았으나 슬러지 매트릭스의 밀도가 변화함을 보여주고 있다. 즉 비 포기 유입시간의 길이가 1시간과 2시간인 경우와 3시간인 경우를 비교해보면 3시간의 경우는 슬러지 플럭 밀도가 상대적으로 낮아 (loose)짐을 관찰할 수 있었으며 각각의 경우의 슬러지 침강성을 SVI로 비교해 보면 비 포기 유입시간이 1시간과 2시간의 경우는 100~150 정도를 유지했으며 비 포기 유입시간이 3시간의 경우는 170 이상의 SVI를 나타내었다.

Karr¹⁵⁾의 연구에 의하면 슬러지 플럭의 직경 100 μm 이상의 입자를 침강성 고형물로 분류하였으며 직경 100 μm 이상의 슬러지 입자가 차지하는 분율이 증가할수록 슬러지의 침강속도는 증가한다고 보고하고 있다. 그러나 100 μm 을 크게 초과하여 슬러지 입자의 직경이 커질수록 슬러지 입자의 공극율이 함께 증가하여 결합수의 분율이 증가하고 결과적으로 슬러지 입자의 유효비중을 낮추는 작용을 하여 입자의 침강속도가 감소된다.¹⁶⁾ 결과적으로 유입시간 조건이 슬러지 침강성에 미치는 영향은 포기 유입보다 비 포기 유입조건이 침강성을 양호하게 하고 비 포기 유입시간의 경우 2시간 이내로 유입시간을 결정하는 것이 보다 양호한 침강성을 유지하는데 도움이 됨을 알 수 있다.

3.4. Pilot scale SBR 공정운전을 통한 검증실험

2 m³/day 규모의 pilot-scale SBR은 가정오수를 유입수로 사용하여 운전하였으며 시간별 유량과 농도의 변화가 커서 균등조를 사용하여 오수를 SBR 반응조로 유입하였다. Fig. 9는 pilot-scale SBR의 장기운전 시 COD의 제거 거동을 나타낸 것이다. 유입수 COD 농도는 50~200 mg/L로 연간 변동이 컸으며 처리수의 COD 농도는 운전 100일경 포기장치의 오작동으로 악화된 지점을 제외하면 20~50 mg/L 범위에서 유지되었다. 합성폐수를 사용한 lab-scale SBR 운전보다 유출수의 COD농도가 다소 높은 것은 오수 내 난분해성 유기물이 포함되어 있음을 나타낸다. 본 실험에서 사용된 세가지 운전모드, IA-SBR, CO-SBR 그리고 SF-SBR는 유기물 제거특성에서는 의미 있는 차이를 나타내지 않았다.

Fig. 10은 pilot-scale SBR운전에서 질소의 거동을 나타낸 것이다. 운전 150일까지는 IA-SBR로 운전하였고 이후 185일까지는 CO-SBR로 운전하였고 마지막으로 210일까지는 SF-SBR로 운전하였다. 유출수의 암모니아 농도는 세가지 운전 모두 1 mg/L 이하로 유지되어 질산화가 거의 완

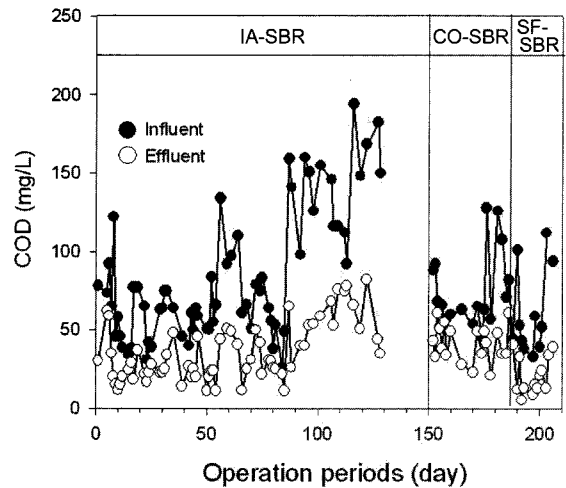


Fig. 9. Influent and effluent COD concentration during the whole experiment. (IA: Intermittent aeration SBR, CO: Conventional SBR, SF: Step-feed SBR)

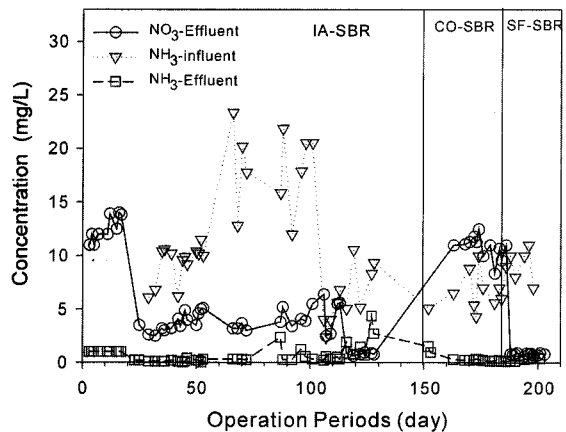


Fig. 10. Influent and effluent nitrogen concentration during the whole experiment. (IA: Intermittent aeration SBR, CO: Conventional SBR, SF: Step-feed SBR)

벽하게 이루어지고 있음을 보여주고 있다. 그러나 탈질효율을 나타내는 질산성 질소 농도를 살펴보면 IA-SBR의 경우 초기 질산화 미생물이 순응되는 시기 후부터는 4~6 mg NO₃-N/L를 유지하였고 CO-SBR의 경우는 12 mg NO₃-N/L를 나타내어 후 탈질이 거의 일어나지 않고 비 포기 유입기의 전탈질에만 의존하는 결과를 보여주었다. SF-SBR의 경우는 유출수 질산성 질소 농도가 1 mg NO₃-N/L 정도를 나타내어 lab-scale SBR 운전결과와 일치하는 경향을 나타내고 있다. 그러므로 세가지 운전모드가 질소제거에 미치는 영향은 SF-SBR, IA-SBR, CO-SBR의 순으로 탈질효율이 우수한 것으로 나타났다.

4. 결론

- 1) SBR에서 유입수량비(V_d/V_r)와 유입수 간헐 주입비(α)

를 고려할 때 총질소제거율을 간편하게 예측할 수 있는 수식을 제안하였으며 CO-SBR과 SF-SBR의 총질소 제거율을 다음과 같이 표현된다.

$$\text{CO-SBR의 총질소 제거율} = (1 - \frac{V_f}{V_t}) \times 100$$

SF-SBR의 총질소 제거율 =

$$[TKN(1 - \alpha \times \frac{V_f}{V_t})] \times 100 / TKN = 1 - (\alpha \times \frac{V_f}{V_t}) \times 100$$

2) 세 가지 변형 운전모드의 SBR을 실험결과 탈질 효율 향상은 SF-SBR, IA-SBR, CO-SBR의 순으로 나타났다. 세 가지 SBR 운전방식 중 유기물과 질소의 동시제거라는 목적과 외부 탄소원을 사용하지 않고 내부 탄소원을 탈질화에 가장 효율적으로 이용할 수 있는 운전방식은 SF-SBR이었으며 SF-SBR, IA-SBR, CO-SBR의 탈질율은 각각 90%, 61%, 19%였다.

3) 비 포기 유입시간이 1시간 및 2시간의 경우의 플록의 밀도가 3시간의 경우보다 높고 양호한 침강성을 나타내었으며 플록의 입도분포는 1시간 및 2시간의 경우가 100~300 μm이고 3시간의 경우 200~400 μm를 나타내었다.

Abbreviation

α	: Step-feed ratio(=V _{sf} /V _t)
AE	: Aeration
AE-p	: Post aeration
AN	: Anaerobic
AX	: Anoxic
BNR	: Biological nitrogen removal
CO-SBR	: Conventional sequencing batch reactor
IASBR	: Intermittent aeration sequencing batch reactor
R _f	: V _f /V _t
SBR	: Sequencing batch reactor
SEM	: Scanning electron microscopy
SF-SBR	: Step-feeding sequencing batch reactor
SVI	: Sludge volume index
V _f	: SBR decanting volume
V _{ff}	: First feeding volume
V _s	: Sludge volume
V _{sf}	: Second feeding volume
V _t	: SBR total volume

참고문헌

1. Irvine, R. L., "Controlled unsteady state processes and technologies," First IAWQ Specialized Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, Germany(1996).

2. USEPA, "Process design manual for nitrogen control," Office of Technology Transfer, USEPA, Washington D.C. (1993).

3. Clifford, W. R., James, L. B., and H. David Stensel, Design and retrofit of wastewater treatment plant for biological nutrient removal, Water Quality Management Library, **5**, pp. 349~350(1992).

4. Lee, S. I., Park, J. H., Ko, K. B., and Koopman, B., "Effect of fermented swine wastes on biological nutrient removal in sequencing batch reactor," *Water Res.*, **31**(7), 1807~1812(1997).

5. 허목, 이용두, 한지용, "SBR 공정에서 폭기/교반 시간비의 변화에 따른 하수중의 질소·인 제거," 한국수처리기술학회지, **9**(1), 53~61(2001).

6. 김강호, 문병현, 이택순, 서규태, "포기/비 포기 시간비가 flocc의 특성에 미치는 영향," 대한상하수도학회, 한국물환경학회 공동 추계 학술발표회 논문집, 대구(2002).

7. 조경환, 김규형, 한운우, "반연속 유입과 간헐포기 방식을 채용한 회분식 활성슬러지공법이 오수처리방법," 한국물환경학회, 공동 추계 학술발표회 논문집, 서울(2004).

8. 정진영, 연속회분식 반응기를 이용한 고농도 암모니아성 질소 함유폐수의 처리, Ph. D. Thesis(1999).

9. Akunna, J. C., Bizeau, C., and Moletta, R., "Nitrate and nitrite reductions with anaerobic sludge using various carbon source: glucose, glycerol, acetic acid, lactic acid, methanol," *Water Res.*, **27**(8), 1303~1312(1993).

10. APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th Edn, Washington, D.C.(1992).

11. 최은주, 주대성, 박희경, "모델링을 이용한 SBR 공정의 최적화," 한국물환경학회지, **16**(5), 633~647(2000).

12. Palm, J. C., Jenkins, D., and Parker, D. S., "Relationship between organic loading, dissolved oxygen concentration and sludge settleability in the completely mixed activated sludge process," *J. Water Pollut. Control Fed.*, **52**, 2484~2506(1980).

13. Martins, A. M. P., Van Loosdrecht, M. C. M., and Heijnen, J. J., "Effect of dissolved oxygen concentration on the sludge settleability," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **62**(5-6), 586~593(2003).

14. Kjær Andreasen, Jeanette Agertved, Jens-Ove Petersen, and Henrik Skaarup, "Improvement of Sludge Settleability in Activated Sludge Plants Treating Effluent from Pulp and Paper Industries," *Water Sci. Technol.*, **40**(11-12), 215~221(1999).

15. Karr, P. R., "Factors influencing the dewatering characteristics of sludge," Ph. D. Dissertation, Clemson Univ., SC.,(1976).

16. 명규남, "슬러지의 물리적 특성이 침강성에 미치는 영향," MS Thesis, 서울시립대학교(1991).