

SBR 공정의 무산소조건에서 질산염농도에 따른 생물학적 인의 방출 및 흡수 특성

Biological Phosphorus Release and Uptake on Nitrate Loadings in Anoxic Condition of SBR process

이희자* · 김광수** · 조양석*** · 김이태****

Hee Ja Lee* · Kwang Soo Kim** · Yang Seok Cho*** · I Tae Kim****

요 지

질소 및 인 동시제거 공정 중 대표적인 연속회분식반응조(Sequencing Batch reactor: SBR)는 비교적 간편한 운전방법과 저렴한 건설비, 유입수의 부하변동에 큰 영향을 받지 않는 소규모 하수처리에 적합한 공정으로 알려져 있다. 또한 SBR 공정은 기존 활성슬러지 공법에 비해 적은 부지로 많은 양의 폐수를 처리할 수 있고 유입수 수질 및 유량변동에 따라 다양한 운전주기를 변화할 수 있으며, 유기물 제거뿐만 아니라 반응조의 변형에 의해 영양염류의 제거가 가능한 장점이 있다.

본 연구에서는 bench scale SBR 실험을 통하여 질산염의 탈질속도 및 용해성 인의 흡수와 방출속도를 측정하고, SBR 공정의 무산소조건에서 인흡수 및 탈질을 동시에 수행하는 DPB 존재의 가능성을 파악하고자 하였다.

연구결과 무산소조건에서 S-P의 방출과 흡수가 동시에 진행되었으며, 무산소조건에서 S-P의 방출속도는 $0.08 \sim 0.94 \text{ kgS-P/kgMLSS-d}$, 흡수속도는 $0.012 \sim 0.1 \text{ kgS-P/kgMLSS-d}$ 를 나타내었다. 무산소조에서 S-P의 방출 및 흡수가 진행되는 동안 탈질과정도 함께 진행되었으며, 각각의 F/M비에서 탈질속도를 측정한 결과 F/M비 $0.44 \text{ kgCOD/kgMLSS-d}$ 에서는 최대 $0.16 \text{ kgNO}_3^- \text{-N/kgMLSS-d}$ 의 탈질속도를 나타내었다.

S-P이 방출되지 않는 경우와 방출되는 경우의 비탈질속도를 비교한 결과 S-P이 방출되지 않는 경우의 비탈질속도가 S-P이 방출되는 경우의 비탈질속도보다 높았다. 이렇게 S-P이 방출되는 경우의 비탈질속도가 더 낮은 이유는 무산소 조건에서 탈질과 S-P의 방출 및 흡수가 동시에 일어나는 경우 S-P의 방출에 관여하는 미생물과 탈질에 관여하는 미생물간의 경쟁반응 때문으로 판단된다.

핵심용어 : SBR, 인의 방출과 흡수, 탈질, 무산소조건, F/M비

1. 서 론

하·폐수에 포함된 질소 및 인 화합물은 폐쇄성 수역에서 부영양화의 원인물질로 작용하고 있으며, 이러한 영양물질의 배출저감을 위해 고도처리공법에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 국내에서도 질소 및 인 제거 공법의 개발은 많은 발전을 이루었으며, 원수특성에 맞는 다양한 공법의 개발이 완료단계에 있다.

이러한 질소 및 인 동시제거 공정 중 대표적인 연속회분식반응조(Sequencing Batch reactor: SBR)는 비교적 간편한 운전방법과 저렴한 건설비, 유입수의 부하변동에 큰 영향을 받지 않는 소규모 하수처리에 적합한 공정으로 알려져 있다. 또한 SBR 공정은 기존 활성슬러지 공법에 비해 적은 부지로 많은 양의 폐수를 처리할 수 있고 유입수 수질 및 유량변동에 따라 다양한 운전주기를 변화할 수 있으며, 유기물 제거뿐만 아니라

* 정희원 · 한국건설기술연구원 국토환경연구부 선임연구원 · E-mail : ink42@kict.re.kr

** 정희원 · 한국건설기술연구원 국토환경연구부 수석연구원 · E-mail : kskim@kict.re.kr

*** 정희원 · 국립환경과학원 영산강물환경연구소 · E-mail : piusycho@me.go.kr

**** 정희원 · 한국건설기술연구원 국토환경연구부 수석연구원 · E-mail : itkim@me.go.kr

반응조의 변형에 의해 영양염류의 제거가 가능한 장점이 있다¹⁾.

그러나 기존 SBR공정은 폐수의 유입과 반응, 배출이 단일 반응조내에서 이루어지는 회분식공정으로 유입수의 간헐유입 및 처리수의 간헐배출에 의해 일일 처리량에 한계가 있으며, 유량조정조에 저장된 폐수를 처리함으로 주로 마을하수도 규모의 소규모 처리시설에 적용되었다. 또한 유출시간에 비해 유입시간이 더 길어 유출에 소요되는 수리학적 에너지 분산과 슬러지 침전으로 발생되는 산기석의 clogging, 밸브 개폐에 따른 운전관리자의 지속적인 관리 등의 문제점으로 실용화가 어려웠으나 최근에 디캔터(decanter)와 함께 솔레노이드(solenoid) 밸브, 산기장치 등이 개발됨에 따라 연속유입 간헐배출방식의 SBR 공정을 이용한 하-폐수 고도처리에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다²⁾.

SBR 공정에서의 생물학적 인 제거 개념은 전자수용체(electron acceptor)가 없는 혐기조건과 전자수용체가 산소인 호기조건을 반복하여 이루어져 왔고, 혐기조건에서 전자수용체로 질산염이나 산소가 유입시에는 혐기 조건에서의 인 방출을 감소시켜 호기조건에서 인의 흡수를 저하시키는 결정적인 요인으로 알려져 왔으나³⁾ 질산염이 존재하는 무산소조건에서도 용해성 인의 흡수 및 탈질이 가능한 DPB(denitrifying phosphorus removing bacteria)의 존재가 여러 연구자들에 의해 확인되었다^{4), 5)}.

본 연구에서는 연속주입 SBR 공정 개발에 앞서 bench scale SBR 실험을 통하여 질산염의 탈질속도 및 용해성 인의 흡수와 방출속도를 측정하고, SBR 공정의 무산소조건에서 인흡수 및 탈질을 동시에 수행하는 DPB 존재의 가능성을 파악하고자 하였다.

2. 실험내용 및 방법

Fig. 1은 bench scale 규모의 SBR 실험에 사용된 반응조로 반응조의 크기는 내경이 20cm, 유효높이가 35cm, 유효용적이 11L였으며, 재질은 원통형의 투명한 아크릴로 제작하였다. 혐기와 무산소조건을 위해 교반기를 설치하였으며, 호기조건은 미세 폭기 장치를 하부에 설치하여 조성하였다. 반응조의 운전시 최고 및 최저수위는 각각 35cm, 18cm였으며, 유입수와 유출수의 이송은 정량펌프를 사용하였다.

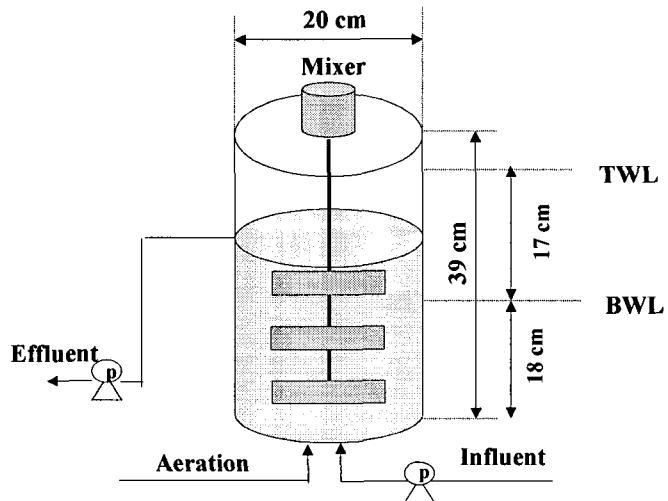


Fig. 1. Schematic diagram of bench scale SBR

실험은 합성폐수를 이용하여 F/M비를 변화시키며 무산소 조건에서 NO_3^- -N의 부하에 따른 인 방출 및 흡수, 탈질의 동시 진행 가능여부와 S-P 및 NO_3^- -N의 거동을 알아보고, 이를 토대로 S-P의 방출과 흡수속도 및 NO_3^- -N의 탈질속도를 측정하였다. 유입수의 TCOD_{Cr} 농도는 Table 1과 같이 각 단계마다 고정시킨 후, 유입 NO_3^- -N의 농도를 단계별로 증가시켰다.

Table 1. Characteristics of synthetic wastewater and operating condition

Item \ Phase	I	II	III
Reactor ORP(mV)	-281 ~ 166	-204 ~ 201	-186 ~ 196
TCOD _{Cr} (mg/L)	630.2 ~ 754.5(675.5)	378.8 ~ 436.2(398.5)	188.1 ~ 220.7(205.2)
SCOD _{Cr} (mg/L)	470.8 ~ 508.0(483.1)	212.2 ~ 240.2(236.4)	120.2 ~ 131.6(128.3)
TKN(mg/L)	60.4 ~ 68.2(64.6)	35.9 ~ 43.3(38.3)	18.1 ~ 23.8(19.6)
T-P(mg/L)	8.1 ~ 11.3(9.2)	8.5 ~ 10.3(9.1)	7.8 ~ 9.9(8.9)
S-P(mg/L)	6.2 ~ 7.1(6.8)	5.5 ~ 6.5(6.2)	5.5 ~ 6.3(6.1)
NO ₃ ⁻ -N Loading (g NO ₃ ⁻ -N/kg MLSS)	1.5 ~ 1.8(1.6)	1.3 ~ 1.6(1.5)	1.4 ~ 1.7(1.6)
	8.2 ~ 10.4(9.0)	5.0 ~ 7.0(6.0)	2.0 ~ 4.0(3.0)
	10.5 ~ 12.8(11.0)	8.2 ~ 10.6(9.0)	-
	13.2 ~ 15.5(14.0)	-	-

* () : average data

유입유량은 6L/cycle(24L/day)로 균일하게 주입하였으며, 반응조내의 MLSS 농도는 3,500 mg/L, 수리학적 총 체류시간은 11hr을 유지하였다. 운전 주기는 초기유입 30분을 포함한 교반 90분, 폭기 120분, 교반 30분, 침전 60분, 배출 45분, 휴지 15분으로 총 360분을 1cycle로 하였다. 각 단계별 운전기간은 정상상태의 운전기간을 포함하여 약 25일이었으며, 반응조의 외부온도는 20°C를 유지하였다.

3. 실험결과

3.1 유기물 및 영양물질 제거특성

Fig. 2에는 회분식 SBR공정의 단계별 유기물, 질소 및 인의 제거효율을 비교하여 나타내었다. I 단계 실험에서 TCOD_{Cr} 및 SCOD_{Cr}의 제거효율은 평균 91.4%, 90.7%로 유기물 제거효율은 매우 높았으며, T-N 및 S-P의 제거효율은 각각 82.3%, 88.2%였다. I 단계는 유기물 농도가 질소 및 인의 농도에 비해 상대적으로 높았기 때문에 전체적으로 질소 및 인의 제거효율이 우수한 것으로 판단된다. II 단계 실험에서 TCOD_{Cr} 및 SCOD_{Cr}의 제거효율은 각각 평균 91.8% 및 90.0%로 I 단계와 같이 유기물 제거효율은 우수하였으며, T-N 및 S-P의 제거효율은 각각 77.8%, 86.8%였다. 유기물과 질소 부하를 크게 낮춘 III단계 실험에서 TCOD_{Cr} 및 SCOD_{Cr}의 제거효율은 각각 91.4% 및 87.9%로 I, II 단계와 큰 차이가 없었지만 S-P의 제거효율은 42.4%로 이전의 실험단계보다 현저히 낮았다. 이러한 이유는 혼기조건에서의 인 방출에 요구되는 유기물의 농도가 낮았고 이로 인해 호기조건에서의 인의 흡수 또한 감소하여 전제적으로 S-P의 제거효율이 낮아진 것으로 판단된다.

Fig. 3은 시간에 따라 NO₃⁻-N 부하를 증가시킨 S-P의 거동을 나타낸 것으로 유입수에 NO₃⁻-N를 주입하지 않은 경우 S-P의 방출농도는 약 28mg/L였으며, 유입수에 NO₃⁻-N를 주입하여 부하를 증가시킨 결과, 무산소 조건에서 S-P의 방출 및 흡수가 동시에 일어났다. 또한 S-P의 방출이 잘 일어나는 조건일수록 호기조건에서 S-P의 흡수도 잘 일어났으며, NO₃⁻-N의 부하가 증가되어 인 방출이 감소될수록 호기조건에서의 인의 흡수 또한 감소되었다. NO₃⁻-N 부하를 0.0143 kg NO₃⁻-N/kg MLSS까지 증가시킨 결과 무산소 조건에서 상기의 본 연구결과에 따르면 NO₃⁻-N가 존재하는 무산소 조건에서도 용해성 인의 흡수 및 탈질이 가능하다는 DPB(Denitrifying Phosphorus Removal Bacteria)의 존재가 확인되었으며⁶⁾, DPB는 cell내에 저장된 PHB(Poly-β-hydroxy butyrate)를 탄소원으로 하고 NO₃⁻-N를 electron acceptor로 사용하여 인의 제거뿐 아니라 질소제거도 동시에 가능하다^{7), 8)}. 결과적으로 무산소 조건에서도 인의 방출 및 흡수가 가능하며 유기물 농도와 NO₃⁻-N 농도가 가장 중요한 인자인 것으로 판단된다.

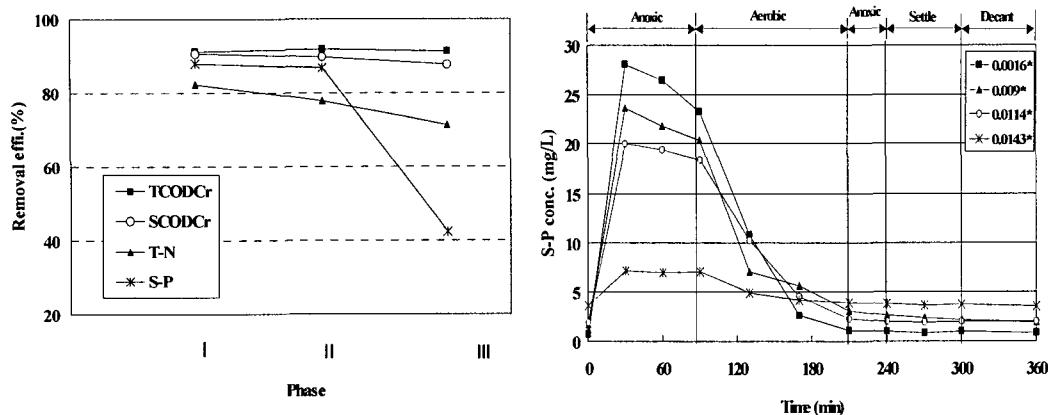


Fig. 2. Removal efficiency for COD and nutrient with various phase

Fig. 3. Variation of S-P concentration in phase I (*unit : kg NO₃⁻-N/kg MLSS)

3.2 NO₃⁻-N의 거동

Fig. 4 및 Fig. 5은 I 단계와 II 단계 실험에서 시간에 따라 NO₃⁻-N 부하를 증가시킨 NO₃⁻-N의 거동을 나타낸 것으로 I, II 단계 실험의 무산소 조건에서 S-P의 방출 및 흡수가 진행되는 동시에 탈질이 일어남을 알 수 있었으며, 이러한 경향은 NO₃⁻-N 부하를 증가시켜도 탈질이 함께 발생되는 경향을 나타내었다. 호기조건에서는 유입 NH₃-N의 질산화로 인하여 NO₃⁻-N 농도가 다시 증가하였으며 호기조건 후 내생탈질을 유도하기 위하여 실시한 교반 30분에서 탈질은 거의 일어나지 않았다. 이러한 이유는 폭기 후의 용존 산소가 교반 30분 동안 반응조내에 존재하면서 무산소 조건을 형성하지 못하였기 때문으로 판단되며, ORP를 측정해 본 결과 약 100 mV ~ 150 mV를 나타내어 호기 조건임을 확인할 수 있었다. III 단계 실험에서도 이전의 I, II 단계의 실험에서와 마찬가지로 유사한 경향을 나타내었다.

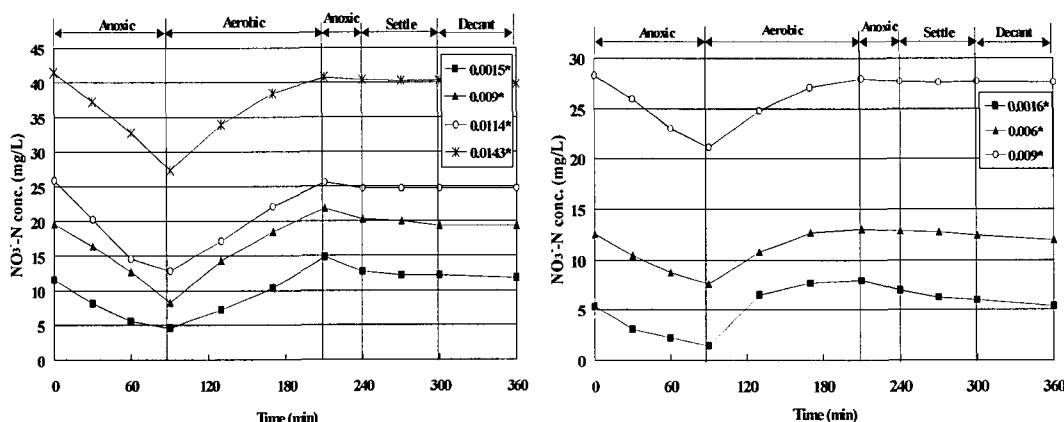


Fig. 4. Variation of nitrate concentration in phase I (*unit : kg NO₃⁻-N/kg MLSS)

Fig. 5. Variation of nitrate concentration in phase II (*unit : kg NO₃⁻-N/kg MLSS)

3.3 S-P의 방출 및 흡수속도와 NO₃⁻-N의 탈질속도

Fig. 6 및 Fig. 7은 I, II 단계에서 NO₃⁻-N 부하에 따른 S-P의 방출 및 흡수속도와 탈질속도를 함께 나타낸 것으로 NO₃⁻-N 부하가 증가할수록 S-P의 방출 및 흡수속도는 감소하였고 탈질속도는 완만히 증가하는 경향을 보였다.

I 단계에서 0.0114 kg NO₃⁻-N/kg MLSS 부하까지는 무산소 조건에서 S-P의 방출 및 흡수가 원활하게 일어났으나 0.0143 kg NO₃⁻-N/kg MLSS 부하까지 증가시킨 결과 무산소 조건에서 S-P의 방출 및 흡수 속도는 급격하게 감소하였으며, 탈질속도는 다소 증가하는 경향을 보였다. 유입수에 NO₃⁻-N를 주입하지 않은 0.0015 kg NO₃⁻-N/kg MLSS의 부하에서 S-P의 방출속도는 0.94 kg S-P/kg MLSS·d였으며, 이후 0.0143 kg NO₃⁻-N/kg MLSS의 부하에서는 0.12 kg S-P/kg MLSS·d로 감소하였다. II 단계에서는 NO₃⁻-N 부하를 0.009 kg NO₃⁻-N/kg MLSS까지 증가시킨 결과 무산소 조건에서 S-P의 방출 및 흡수속도는 급격하게 저하되었으며, 탈질속도는 약간 증가하는 경향을 보였다. 유입수에 NO₃⁻-N를 주입하지 않은 0.0015 kg NO₃⁻-N/kg MLSS의 부하에서 S-P의 방출속도는 0.83 kg S-P/kg MLSS·d였으며, 이후 0.009 kg NO₃⁻-N/kg MLSS의 부하에서는 0.1 kg S-P/kg MLSS·d로 감소하였다.

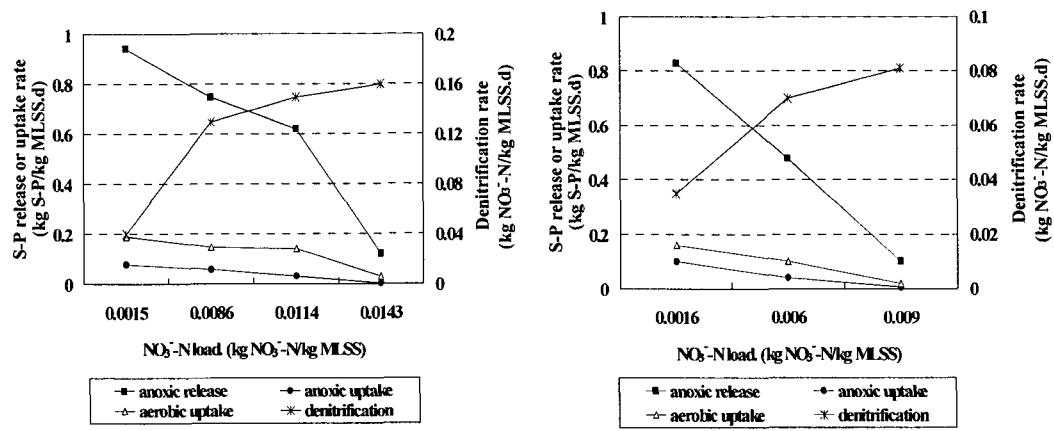


Fig. 6. S-P Effect of nitrate loadings on Fig. 7. S-P Effect of nitrate loadings on phosphorus behavior and denitrification rate in phosphorus behavior and denitrification rate in anoxic zone of SBR with phase I
anoxic zone of SBR with phase II

참 고 문 헌

- Peter A. Wilderer, Robert L. Irvine, Mervyn C. Foronszy, Sequencing Batch reactor Technology, IWA(2001).
- Jun Li, Xin-Hui Xing, Bao-Zhen Wang, "Characteristics of phosphorus removal from wastewater by biofilm sequencing batch reactor(SBR)", *Biochemical Engineering Journal*, 279~285(2003).
- 박종복, 최의소, 박명균, "Pilot 규모의 5-stage 영양소 제거공정에서 De-Nitrifying Phosphorus Accumulating Organisms(dPAOs) 미생물의 특징", *대한환경공학회지*, 24(12), 2111 ~ 2117(2002).
- Kerrn-Jespersen, J. P. and Henze, M., "Biological Phosphorus Uptake Under Anoxic and Aerobic Conditions", *Water Res.*, 27, 617 ~ 624(1993).