

2단 간헐폭기 시스템에서 aeration cycle이 질소 및 인 제거에 미치는 영향

Influence of Aeration Cycle on Nitrogen and Phosphorus Removal in Two-Stage Intermittent Aeration System

정 명 선* 이 준 호** 서 광 범** 김 영 관***
Jeong, Myoung-Sun Lee, Jun-Ho Seo, Kwang-Bum Kim, Yeong-Kwan

Abstract

This bench-scale research investigated the aeration cycle(on/off) as the controlling factors for nitrogen and phosphorus removal in a 2-stage, intermittent aeration process. At this experiment, the aeration cycle time(air-on/air-off) was 30min/30min, 60min/60min, 90min/90min. Organic matter removal was observed more than 90% regardless of the aeration cycle and phosphorus removal was relatively high when the aeration cycle time was 60min/60min. On the other hand, For all of the aeration cycle, TN removal was appeared less than 55%. This result was probably due to the limitation of the external substrate for heterotrophic nitrification and aerobic denitrification.

키워드 간헐폭기, 인·질소제거, 폭기/비폭기 주기
Keywords : Intermittent aeration, phosphorus and nitrogen removal,
aeration cycle

1. 서론

국내 하·폐수 처리공정에 있어 유출수내의 질소와 인에 대한 규제가 강화되면서 새로운 공정을 신설하거나 추가 배치 또는 운영방식을 바꾸어야 할 필요성이 제기되고 있다. 그러나 공정의 신설 및 추가는 많은 시설비와 운영비 문제를 가지고 있어, 최근 많은 연구자들이 기존의 시설 변경 없이 영양염류를 처리할 수 있는 방안에 대하여 활발한 연구를 하고 있다. 그 중 기존의 활성 슬러지 공법을 간단히 개량하여 질소와 인 등의 영양염류 제거효율을 향상시킬 수 있는 처리 방식으로서

간헐폭기(Intermittent Aeration) 공정이 알려지고 있다.

간헐폭기 방식은 단일 반응조내에서 폭기/비폭기의 교대 운전으로 호기(aerobic)와 무산소(anoxic) 조건을 형성하여 유기물 및 질소와 인을 동시에 제거하도록 되어 있어 폭기 비용의 절감과 더불어 최종 침전지에서 탈질(denitrification)에 의한 슬러지(sludge) 부상 문제를 해결할 수 있다는 장점이 있다. 이 외에도 건설비, 소요부지가 적고, 유입 부하량에 따라 폭기/비폭기의 시간 변화가 가능하며, 폭기 장치의 on/off 만으로 호기성과 무산소 조건을 조절할 수 있으므로 기존 2차 처리공정에 적용하기 쉬운 것으로 알려지고 있다[1]. 간헐폭기 공정 중에서 혐기-제 1간헐폭기-제 2간헐폭기구조로 이루어진 2단 간헐폭기 공정의 경우 인

* 강원대학교 대학원 환경공학과, 박사수료
** 강원대학교 대학원 환경공학과, 석사과정
*** 강원대학교 환경공학과 교수, 공학박사

제거 미생물에 의해 용존성 유기물의 소모와 인 방출이 일어나고 제 1간헐폭기조내 호기성 상태에서 인의 과잉섭취(Luxury uptake) 및 질산화(nitrification)가 일어난다. 그리고 제 2간헐폭기조는 무산소 상태로 운전되면서 탈질화가 이루어지게 된다. 일정시간 후에는 제 1, 2간헐폭기조의 폭기 상태가 역으로 변화되어 유기물 및 질소, 인의 동시제거가 연속적으로 이루어지게 된다. 이러한 영양염류 제거 mechanism을 충족시키기 위해서는 간헐폭기조내의 적절한 호기/무산소의 유지가 중요하며, 이를 위한 폭기/비폭기 주기가 간헐폭기 공정의 운전에 중요한 설계 및 운전인자가 된다. 이는 폭기/비폭기 주기가 각 환경에 존재하는 미생물들의 우열관계 또는 상관관계를 변화시키고, 환경변화에 적응하는 시간과 반응속도에 영향을 미치기 때문이다. 이러한 이유로 폭기 주기에 대해 많은 연구가 이루어졌으며, Araki등은 간헐폭기 공정에서 폭기/비폭기 주기가 1:1일 때 질소와 인 제거 효율이 우수한 것으로 보고하였다[2].

본 연구에서는 이러한 간헐폭기 공정 중 혐기조와 2단 간헐폭기조로 구성된 실험실 규모의 반응조를 이용하여 간헐폭기조내 aeration cycle에 따른 질산화와 탈질화 및 인 제거를 비교·평가하고자 하였다.

제거 효율을 알아보기 위하여 폭기/비폭기 주기를 1:1 비율로 하여 반응조를 3가지 모드로 운전하였다. Run 1은 간헐폭기조의 폭기/비폭기 시간을 30min/30min으로 운전하였으며, Run 2는 60min/60min, Run 3은 90min/90min으로 수행하였다.

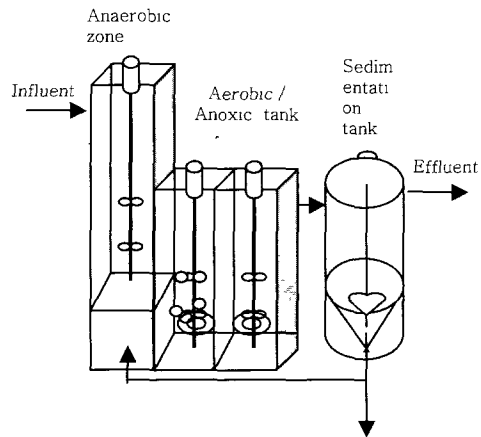


Fig. 1 Schematic diagram of 2-stage intermittent aeration reactor.

2. 재료 및 방법

2.1 장치 및 시료

실험에 사용한 반응조는 혐기조, 제 1, 2간헐폭기조, 침전조로 구성되었으며, 그 모식도는 Fig. 1과 같다. 혐기조 및 제 1, 2간헐폭기조의 유효용적은 각각 3 L, 5.5 L, 5.5 L이며, 총 반응조의 유효용적은 14 L이었다. 간헐폭기조의 폭기/비폭기 조건은 blower의 on/off 시간을 조절함으로써 유지시켰는데, 이를 위하여 blower에 time controller를 부착시켰다. 혐기조는 외부로부터의 공기 유입을 완전히 차단시키기 위해 밀봉하였으며, 유입수와 혐기조내 미생물과의 혼합을 위해 교반기의 속도는 60 rpm으로 하였다. 또한, 간헐폭기조 내에서 비폭기시 슬러지의 침전을 방지하기 위해 교반기(60 rpm)를 설치하였다.

실험에 사용한 유입수는 인공폐수로서, 그 조성은 Table 1과 같다. 유입수의 화학적산소요구량(Chemical Oxygen Demand)은 285 mg/L이었고 총질소(Total Nitrogen)는 35 mg/L, 총인(Total Phosphorus) 농도는 4.5 mg/L로 하였으며, alkalinity는 120 mg/L(CaCO₃)이었다.

2.2 운전조건

간헐폭기조내 aeration cycle에 따른 질소 및 인

Table 1 The composition of synthetic wastewater

Constituents ¹⁾	Dosage(mg)
C ₆ H ₁₂ O ₆	281.3
NaHCO ₃	150.0
NH ₄ Cl	114.6
KH ₂ PO ₄	22.0
CaCl ₂	11.5
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	2.0
MgSO ₄ · 7H ₂ O	30.0
FeSO ₄ · 6H ₂ O	0.1
MnSO ₄ · 5H ₂ O	0.9
CuSO ₄ · 5H ₂ O	2.0

¹⁾The constituents were dissolved in one liter tap water.

유입수는 정량펌프를 이용하여 48 L/day의 유량으로 공급하였으며, 혐기조, 제 1간헐폭기조, 제 2간헐폭기조의 수리학적 체류시간(Hydraulic Retention Time)은 각각 3 hr, 6 hr, 6 hr이었다.

슬러지 반응율은 유입유량의 50%로 운전하였고, 간헐폭기조내의 MLSS 농도와 고형물 체류시간(Sludge Retention Time)은 각각 3000~3500 mg/L와 20 day로 유지하였다. 동질기 수온저하에 따른 탈질 감소를 방지하기 위해 실시하는 내부반송은 운전기간동안 가온장치에 의해 수온을 일정하게 유지하였으므로 실시하지 않았고 반응조의 수온은 가열기를 이용하여 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 조절하였다. DO농도는 혐기조에서 0.1 mg/L이하로 유지하였으며 간헐폭기조내에서는 폭기시 2.0~3.0 mg/L정도가 되도록 유입공기량을 조절하였다.

2.3 분석방법

운전기간동안 모든 분석은 Standard Methods[3]와 수질공정시험법[4]에 준하여 수행하였다. BOD는 5일 BOD test로 측정하였으며 COD는 closed reflux method를 이용하였다. 총질소(TN)농도는 자외선 흡광도법으로 구하였으며 총인(TP)은 ascorbic acid법으로 하였다. pH는 ORION 710A를 이용하였으며 DO농도는 YSI 55로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Runs 1~3의 각 반응조별 COD 농도 변화를 Fig 2에 나타냈다. 반응조내 유입수의 평균 COD 농도는 285 mg/L이었으며, Runs 1~3에 따른 COD 제거 효율은 두드러진 차이를 나타내지 않았다. Fig 2에 나타낸 바와 같이 최종 유출수의 농도는 약 15 mg/L 수준으로서 90~94% 범위의 COD 제거 효율을 나타냈다. Runs 1~3에서 반응조별 COD 제거율을 살펴볼 때 COD의 약 50% 정도가 혐기조에서 제거되었는데, 이는 혐기조에서 미생물 세포내의 인 방출을 위하여 유입 유기물의 일부가 세포에 PHA (polyhydroxyalkanoate) 등으로 저장되었거나 흡수되었기 때문인 것으로 판단된다[5]. 또한 혐기조에서 제거되고 남은 유기물 중 35% 정도가 제 1간헐폭기조에서 제거된 것으로 나타났다.

간헐폭기 공정에서 aeration cycle에 따른 인 제거 효율을 비교하였다. Run 1, Run 2 및 Run 3의 유출수 TP 농도는 각각 1.8 mg/L, 0.9 mg/L, 1.6 mg/L이었으며, 인 제거율은 각각 60%, 80%, 65%로 나타났다(Fig. 3). 특히, 폭기/비폭기 시간을 60min/60min으로 운전한 Run 2에서 상대적으로 높은 인 제거 효율을 나타내는 것으로 조사되었다.

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 혐기성조에서의 인 농도가 유입수 농도에 비교하여 약 2배 정도로 증가하였는데, 이는 Fig. 2의 COD 제거와 동시에 슬러지로부터 인이 방출되었음을 의미한다. 인의 농도는 간헐폭기조를 거치면서 점차적으로 감소하였으나,

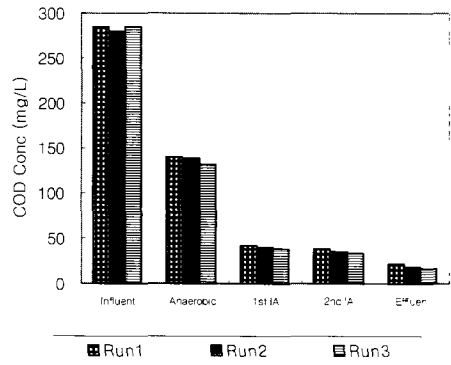


Fig. 2 Variations of COD within each reactor during different experimental runs.

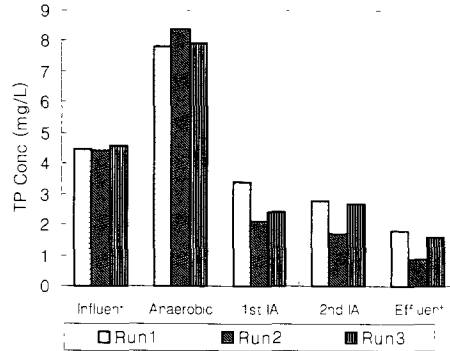


Fig 3 Variations of T-P within each reactor during different experimental runs.

인 방출 농도와는 달리 Run 1과 Run 3의 경우 Run 2에 비해 폭기조내 인의 농도가 상대적으로 높게 나타나 인의 흡수가 상대적으로 잘 일어나지 않음을 알 수 있었다.

2단 간헐폭기 공정은 호기성/무산소 조건의 변화를 통해 연속적으로 질산화와 탈질화를 유도함으로써 유입수내 질소화합물을 제거하는 공정이며, 또한 미생물이 이용할 수 있는 기질의 양과 DO 농도에 따라 질산화율과 탈질율이 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다[6].

운전기간 동안 간헐폭기조의 폭기시 DO 농도는 2.8~3.2 mg/L이었으며, 이 농도는 폭기 시작부터 5~10분 이내에 도달하였다. 그리고 무산소 조건을 형성하기 위한 비폭기시의 DO 농도는 폭기 중단 이후 약 10분 정도가 경과하면 0.07~0.1 mg/L을 나타냈다. 이러한 간헐폭기조내 호기성 및 무산소

상태의 DO 농도는 aeration cycle에 따라 유의한 차이를 나타내지는 않았다.

Fig. 4는 실험 조건에 따른 TN 제거율을 나타낸 결과로서, Run 1, Run 2, Run 3에 따른 유출수의 TN 농도는 각각 17.2 mg/L, 16.1 mg/L, 16.5 mg/L로서, 각각 51%, 54%, 53%의 TN 제거율을 나타냈다. 인 제거율과는 달리 전반적으로 aeration cycle에 따른 커다란 차이를 관찰할 수 없었다.

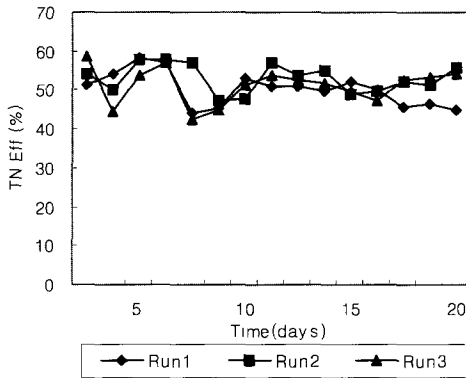


Fig. 4 Variations of TN removal within each reactor during different experimental runs.

Fig. 5는 질소 화합물의 분포 형태를 알아보기 위하여 실험조건에 따른 각 반응조의 암모니아성 질소와 질산성 질소 농도 변화를 분석하여 나타낸 결과이다. 유입수의 평균 암모니아성 질소의 농도는 33 mg/L이었으며, Run 1, Run 2, Run 3에 따른 최종 유출수의 평균 농도는 각각 15.2 mg/L, 11.4 mg/L, 10.3 mg/L이었다. 그리고 Run 1, Run 2, Run 3에 따른 유출수의 질산성 질소의 농도는 각각 0.4 mg/L, 0.4 mg/L, 2.5 mg/L인 것으로 나타났다. 따라서 유출수내 대부분의 TN 성분은 암모니아성 질소가 차지하는 것으로 분석되었다.

질산화율(mgN/L/h)

$$= \frac{(NH_3 \text{ inflow} - NH_3 \text{ out})}{\theta h}$$

탈질율(mgN/L/h)

$$= \frac{(NH_3 \text{ rem} - NO_3 \text{ out})}{\theta h}$$

여기서, $NH_3 \text{ inflow}$ = 유입 NH_3 (mg/L)

$NH_3 \text{ out}$ = 유출 NH_3 (mg/L)

$NH_3 \text{ rem}$ = (유입 NH_3)-(유출 NH_3) (mg/L)

$NO_3 \text{ out}$ = 유출 NO_3 (mg/L)

θ = sludge retention time (day)

h = hydraulic retention time (hr)

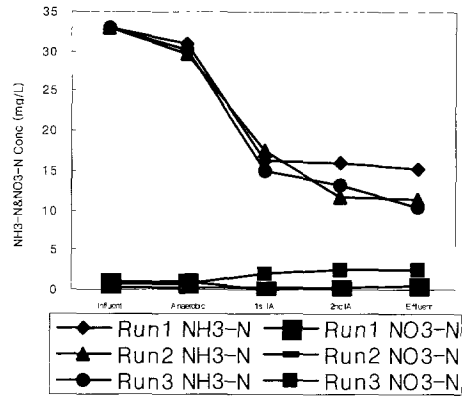


Fig. 5 Variations of NH_3 -N and NO_3 -N within each reactor during different experimental runs.

Run 1, Run 2, Run 3에 따른 질산화율은 각각 1.27 mgN/L/h, 1.54 mgN/L/h, 1.6 2mgN/L/h 이었으며, 탈질율은 각각 1.16 mgN/L/h, 1.41 mgN/L/h, 1.35 mgN/L/h이었다. 실험 결과 aeration cycle에 따른 질산화율과 탈질율의 유의한 차이는 나타나지 않았으나, 질산화는 폭기/비폭기 시간이 90min/90min인 Run 3이 다소 높게 나타났고, 탈질율은 Run 2에서 다소 높게 나타났다.

본 실험에서 질산화와 탈질화의 대부분은 COD 및 TP 제거율과 같이 제 1간헐폭기조내에서 발생하였다. 이는 제 1간헐폭기조내에서 상대적으로 높은 기질 농도와 aeration cycle중 무산소 조건에서 우점할 수 있는 탈질 미생물에 의한 탈질화 현상과 호기성 조건에서 우점할 수 있는 질산화 미생물에 의한 질산화 현상이 연속적으로 발생하여 대부분의 질소 화합물이 제 1간헐폭기조내에서 제거되는 것으로 판단되었으며, 제 1간헐폭기조 다음의 제 2간헐폭기조에서는 이들 미생물이 이용할 수 있는 기질이 제한되어 질산화/탈질화율이 현저히 감소하는 것으로 생각할 수 있었다. 특히 본 실험에서 질산화는 상대적으로 긴 폭기 시간(90min)으로 운전한 Run 3에서 다소 높게 나타났는데, 이는 질산화 미생물의 느린 성장 특성과 관련된 것으로 보인다. 그러나 전반적으로 69% 미만의 낮은 암모니아성 질

소 제거율은 alkalinity의 제한에 기인한 것으로 판단된다. 질산화 과정에서 소모되는 이론적 alkalinity 양은 암모니아성 질소 1 mg 당 7.14 mg(CaCO₃)이며, 탈질화 과정에서 질산성 질소 1 mg이 질소 가스로 환원되면서 3.57 mg(CaCO₃)의 alkalinity가 생성된다[7]~[9]. 운전기간 동안 간헐폭기조내의 alkalinity는 약 60 mg/L 수준이었는데, 원활한 질산화를 위한 이론적 소모량에 비해 60 mg/L의 alkalinity가 부족한 것으로 조사되었다. 이로 인해 질산화가 현저히 낮아지고 탈질율도 감소한 것으로 판단되었다.

4. 결론

2단 간헐폭기 공정에서 aeration cycle에 따른 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 2단 간헐폭기 공정에서 유기물 제거는 Aeration cycle에 관계없이 90%이상의 제거효율을 보여주었다.

2. 인 제거는 폭기/비폭기 시간이 60min/60min으로 운전한 반응조에서 상대적으로 높은 효율(80%)을 나타내었다.

3. Aeration cycle 변화에 따른 TN 제거효율은 55%미만으로서 유의한 차이를 나타내지 않았으며, 질산화는 기질제한으로 인해 낮은 효율을 나타내었다.

4. 2단 간헐폭기 공정에서 대부분의 유기물 제거 반응은 제 1간헐폭기조에서 나타났다.

성에 미치는 영향”, 상하수도학회지, Vol. 8, No. 2, pp 25-34, 1994.

- [6] Zhao et al., "Factors affecting phosphorus removal in a two-stage intermittent aeration process treating Domestic sewage" Wat. Sci. Tech, Vol. 34, No. 2, pp 115-122, 1998
- [7] Metcalf and Eddy, Wastewater engineering treatment and reuse, McGraw-Hill, 1999
- [8] Zhao et al., "Controlling factors for simultaneous nitrification and denitrification in a two stage intermittent aeration process treating domestic sewage" J Wat Res, Vol. 33, No. 4, pp 916-970, 1999
- [9] 이해준, 배준석, 최광수, "간헐 폭기 활성 슬러지에서 질소제거를 위한 폭기/비폭기 주기 및 ORP 적용성 평가", 대한공학회지, Vol. 20, No. 2, pp.9-18, 2000.

참 고 문 헌

- [1] Kousei et al., "Development of 2-reactor intermittent aeration activated sludge process for simultaneous removal of nitrogen and phosphorus" Wat. Sci. Tech, Vol. 34, No. 1-2, pp 111-118, 1996.
- [2] Araki et al., "Intermittent aeration for nitrogen removal in small oxidation ditches", Wat Sci Tech, Vol. 22, No. 3-4, pp 131-138, 1990.
- [3] APHA Standard methods for the examination of water, wastewater(17thed) Washington, DC American Public Health Association, 1995.
- [4] 최규철, 권오익, 김용대 외 5명, "수질오염공정시험 방법주해," 동화 기술, 2000.
- [5] 건항배, 이용택, 신항식, "유기물질이 인 제거 특