ISSN(Print): 1225-7672 / ISSN(Online): 2287-822X
DOI https://doi.org/10.11001/jksww.2018.32.1.011

호흡률에 기반한 연속회분식반응조의 포기공정 제어

Aeration control based on respirometry in a sequencing batch reactor

김동한[1*]·김성홍[2]
Donghan Kim[1*]·Sunghong Kim[2]

[1]서원대학교 환경공학과, [2]조선대학교 토목공학과
[1]*Department of Environmental Engineering, Seowon University*
[2]*Department of Civil Engineering, Chosun University*

ABSTRACT

As the sequencing batch reactor process is a time-oriented system, it has advantages of the flexibility in operation for the biological nutrient removal. Because the sequencing batch reactor is operated in a batch system, respiration rate is more sensitive and obvious than in a continuous system. The variation of respiration rate in the process well represented the characteristics of biological reactions, especially nitrification. The respiration rate dropped rapidly and greatly with the completion of nitrification, and the maximum respiration rate of nitrification showed the activity of nitrifiers. This study suggested a strategy to control the aeration of the sequencing batch reactor based on respirometry. Aeration time of the optimal aerobic period required for nitrification was daily adjusted according to the dynamics of respiration rate. The aeration time was mainly correlated with influent nitrogen loadings. The anoxic period was extended through aeration control facilitating a longer endogenous denitrification reaction time. By respirometric aeration control in the sequencing batch reactor, energy saving and process performance improvement could be achieved.

Key words: Aeration control, Nitrification, Respirometry, Sequencing batch reactor

주제어: 포기공정 제어, 질산화, 호흡률법, 연속회분식반응조

1. 서 론

생물학적 고도처리공정에서 유기물, 질소, 인을 효과적으로 제거하기 위해서는 포기공정을 제어하여 반응조에 적절한 호기, 무산소, 혐기의 환경을 조성해야 한다. 호기환경에서의 유기물제거와 질산화, 무산소환경에서의 탈질, 혐기환경에서의 인방출과 같은 생물학적 반응에 의해 용존산소의 소모, 알칼리도의 소모 또는 생성 등이 나타난다. 따라서 반응조에서는 용존산소, pH, ORP(Oxidation-Reduction Potential) 등이 변화하게 되며, 이를 통해 반응의 특성을 파악할 수 있어 모니터링이나 제어의 지표로 많이 이용하여 왔다 (Paul et al., 1998; Spagni et al., 2001; Ciappelloni et al., 2006; Poo et al., 2006; Claros et al., 2011; Alpaslan Kocamemi and Dityapak, 2014).

생물학적 처리에서 미생물이 기질을 분해하고 호흡과정에서 용존산소를 이용하는 속도인 산소섭취율(Oxygen Uptake Rate), 즉 호흡률(Respiration Rate)을 측정하는 호흡률법(Respirometry)은 미생물의 활성도를 평가하는 방법으로 생물학적 공정의 유입수 성상분석, 동역학적 계수 추정, 모니터링 및 제어 등에 활용되어 왔다 (Ekama et al., 1986; Kappeler and Gujer, 1992; Benes et al., 2002; Daebel et al., 2007; Lu et al., 2010; Drewnowski, 2014). 호흡률은 다른 지표에 비해 포기에 따른 공정내 유기물제거 및 질산화의 생분해 특성(Biodegradability)을 보다 직접적이고 뚜렷이 나타내므로, 반응과정을 분석하고 포기공정을 제어하는 데 유용하게 활용할 수 있다.

Received 3 December 2017, revised 22 December 2017, accepted 26 December 2017
*Corresponding author: Donghan Kim (E-mail: kdh@seowon.ac.kr)

연속회분식반응조(Sequencing Batch Reactor, SBR)는 생물학적 고도처리공정 중의 하나로서 단일 반응조에서 하수 유입, 반응, 침전 및 배출의 과정을 한 주기로 하여 운전된다. 질소와 인을 동시에 제거하기 위한 호기, 무산소, 혐기의 환경을 포기를 제어하여 단일 반응조에서 시간에 따라 용이하게 구현할 수 있다는 운전상의 유연성이 가장 큰 장점으로 중소규모의 처리장을 위주로 많이 적용되고 있다 (Irvine and Ketchum, 1989; Ketchum, 1997; Puig et al., 2007). 또한 최근 슬러지 처리계통의 반류수와 같은 고농도의 암모니아를 함유한 폐수를 처리하는 데 많은 관심을 받고 있는 부분질산화(Partial Nitrification) 및 혐기성 암모니아산화(Anaerobic Ammonium Oxidation) 공정에도 많이 이용되고 있다 (Lackner et al., 2014). 생물학적 공정에서 안정적인 처리효율을 확보하기 위해서는 유입수의 부하변동에 상응한 적절한 산소공급이 이뤄져야 한다. 일반적으로 포기에 소요되는 에너지는 처리장 전체의 약 50~75% 정도로 주된 부분을 차지하므로 (Åmand et al., 2013), 에너지를 절약하고 또한 미생물 플록의 안정적인 성상을 유지하기 위해서 과도한 포기는 최소화하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 회분식 공정이기 때문에 연속식 공정에 비해 반응조내에서 변화의 폭이 큰 특성을 갖는 호흡률을 이용하여 연속회분식반응조의 생물학적 반응특성을 구체적으로 파악하고 이에 기초하여 포기공정을 제어함으로써 에너지를 저감하고 처리효율의 향상을 도모하고자 한다.

2. 재료 및 방법

호흡률법을 이용하여 연속회분식반응조의 포기공정을 제어하기 위하여 실험실 규모로 반응조 시스템을 Fig. 1과 같이 구성하였다. 원통형 아크릴을 사용하여 유효용적 7 L의 크기로 제작하였으며, 교반기로 혼합하고 산기관을 통해 포기하였다. 하수의 유입과 처리수의 유출은 펌프를 이용하였다. 온도조절장치를 설치하여 20℃로 유지하였고, 본 실험기간과 같이 하절기에 그 이상의 온도인 경우는 실온으로 유지하였다. 교반기, 송풍기, 펌프, 용존산소계의 제어와 계측은 디지털타이머와 DAC(Data Acquisition and Control) 시스템을 이용하였다. DAC시스템은 신호의 절연, 증폭, 변환(Analog/Digital 및 Digital/Analog), 필터링 등이 이뤄지도록 구성하였다.

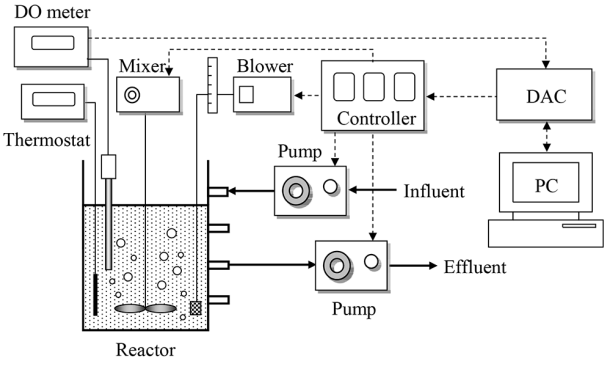

Fig. 1. Schematic of the SBR system.

유입수로 생활하수를 대상으로 하였으며, C시의 차집관거 토구에서 채취하여 실험실로 운반하였다. 반응조는 Table 1과 같이 전체 용량 7 L 중 주기당 3 L를 처리하여 하루에 3주기가 반복되도록 운전하였으며, 따라서 HRT는 18.7 h이었다. SRT는 주기내 반응기말에 슬러지를 매일 폐기하여 25 d로 유지하였다. 8 h의 각 주기는 Fig. 2와 같이 유입 0.5 h, 반응 6 h, 침전 1 h, 배출 및 휴지 0.5 h로 운전하였다. 탈질과 인 방출을 위한 초기의 2 h 그리고 침전 및 배출의 1.5 h는 포기하지 않았다. 반응기중 2~6.5 h 동안의 4.5 h를 대상으로 포기공정을 제어하였으며, 호흡률법을 이용하여 유입수의 부하변동에 따른 최적의 포기시간을 매일 설정하여 운전하였다.

연속회분식반응조의 호흡률을 측정하기 위하여 호흡반응조, 호흡셀, 펌프 등으로 호흡률 측정장치를 Fig. 3과 같이 제작하였다. 연속회분식반응조의 슬러지를 포기기가 시작되기 직전에 채취하여 호흡반응조에 주입하였으며, 펌프를 이용하여 3~4분 주기로 호흡반응조의 혼합액을 호흡셀로 순환시켰다. 용존산소 전극이 설치된 호흡셀은 대기와 차단되도록 밀폐된 구조로 하였으며, 펌프의 작동이 멈춘 상태에서 용존산소의 선형적 감소율에 기초하여 호흡률을 계산하였다. 펌프의 작동, 호흡률의 실시간 계측은 DAC시스템을 통해 컴퓨터로 이뤄지도록 하였다.

반응조의 온도는 하절기에 운전되어 다소 높은 수준인 28~30℃로 평균 29℃이었으며, MLSS(MLVSS)는 1300~1440(1060~1210) mg/L로 평균 1347(1113) mg/L로 유지되었다. 유입수, 유출수, 반응조의 시료를 주기적으로 채취하여 SS, TCOD(SCOD), NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-, TN, TP(SP) 등의 수질항목을 분석하였으며, 시료의 여과에는 0.45 μm 막여과지를 이용하였다.

Table 1. Operating conditions for the SBR

Parameter	Value
Total volume (L)	7
Treated volume per cycle (L)	3
Number of cycles per day	3
HRT (h)	18.7
SRT (d)	25

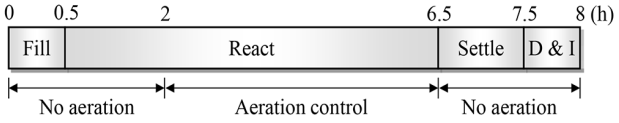

Fig. 2. Operating mode for each cycle.

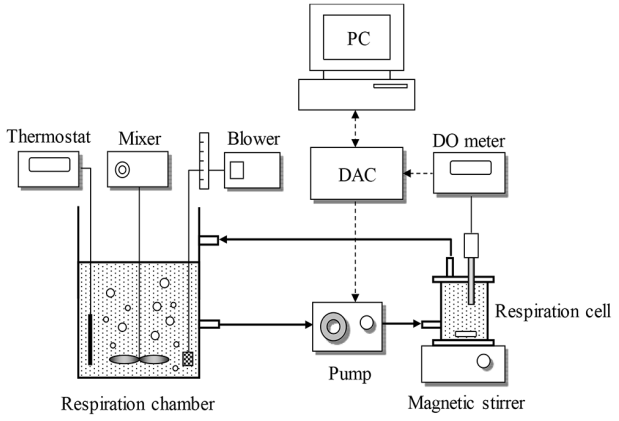

Fig. 3. Schematic of the respirometry unit.

3. 결과 및 고찰

3.1 호흡률 특성

연속회분식반응조에서 포기공정을 제어하지 않고 고정된 형태로 운전한 결과의 반응조내 호흡률과 질소화합물의 변화는 Fig. 4와 같다. 고정된 형태는 포기공정의 대상기간인 반응기중 2~6.5 h 동안의 4.5 h를 포기 3 h, 비포기 1 h, 포기 0.5 h로 구성하여 운전하였으며, 호흡률은 포기 3 h 동안의 측정자료이다. 생물학적 처리과정에서 호흡률은 유기물분해, 질산화, 내생분해 등의 반응에 따라 복합적으로 유발된다. 유기물은 생분해 특성을 고려하여 쉽게 생분해되는 유기물(Readily Biodegradable Organics)과 서서히 생분해되는 유기물(Slowly Biodegradable Organics)로 구분할 수 있으며(Ekama et al., 1986; Henze et al., 2000), 그에 따른 호흡률 특성도 상이하다.

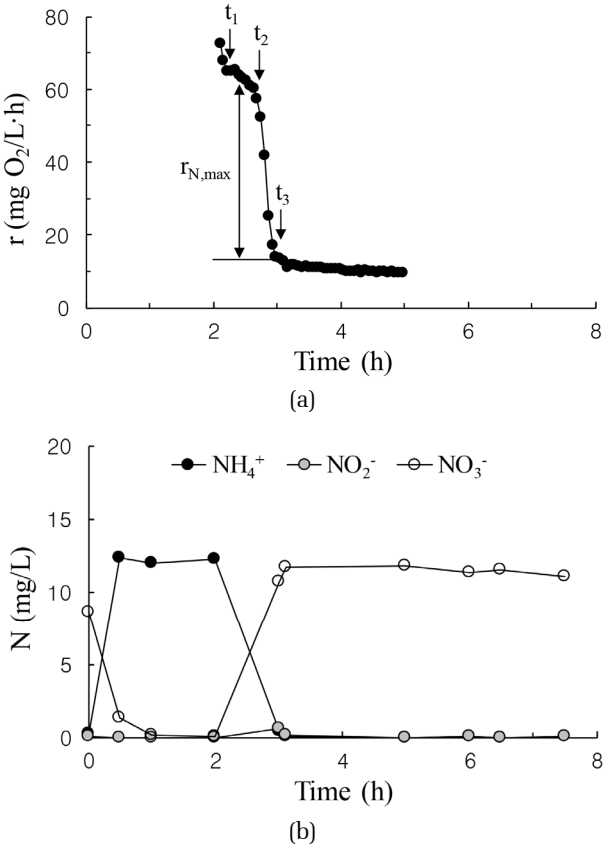

Fig. 4. Fixed mode operation: (a) respiration rate and (b) nitrogen compounds.

포기시작(2 h)과 동시에 매우 짧은 시간인 t_1까지 호흡률이 급격히 감소하였다. 이는 종속영양미생물이 바로 이용할 수 있는 단순한 구조인 쉽게 생분해되는 유기물의 분해에 따른 호흡률인데, 혐기기에 탈질 및 인방출에 소모되어 혐기기말에는 반응조에 잔존하는 양이 적고 또한 분해속도도 빨라 유발되는 호흡률의 기간과 총량이 작았다. 이후 비교적 일정하면서 서서히 감소하는 호흡률이 유지되었는데 이는 질산화, 서서히 생분해되는 유기물, 내생분해에 따른 호흡률이다. 이 기간 동안에 NH_4^+는 최대질산화율로 빠르게 NO_2^-, NO_3^-로 산화되었으며, 서서히 생분해되는 유기물 및 내생분해에 따른 호흡률의 변화로 인해 전반적으로 느리게 감소하는 경향도 함께 나타내었다. NH_4^+가 대부분 산화된 t_2에서 호흡률은 급격히 감소하기 시작하였으며 t_3에서는 작은 호흡률을 나타냈다. 호흡률이 급격히 감소하는 시기에 NO_2^-도 산화되어 t_3에서는 거의 대부분이 NO_3^-로 산화되었다. 따라서 호흡률의 급격한 감소는 질산화 반응이 완료되는 시점을 나

타내는 뚜렷한 지표이었다. 이후에는 다시 비교적 일정하면서 매우 느리게 감소하는 호흡률을 나타냈는데 이는 서서히 생분해되는 유기물과 미생물의 내생분해에 따른 호흡률이다. 서서히 생분해되는 유기물은 가수분해를 통해 쉽게 생분해되는 유기물로 분해된 후 미생물에 의해 이용되기 때문에 반응속도가 느려 내생분해와 함께 매우 작은 호흡률을 나타내게 된다. 따라서 Fig. 4에 표시한 것과 같이 두 개의 비교적 일정한 호흡률의 차이인 $r_{N,max}$가 질산화에 의해 유발되는 최대질산화호흡률이며, 본 연속회분식반응조에서는 49 mg O_2/L·h이었다. 최대질산화호흡률은 질산화미생물의 활성을 나타내는 것으로 공정내 질산화 반응을 파악할 수 있는 중요한 지표이었다.

반응기중 5~6 h의 1 h 동안은 탈질을 위한 무산소기를 조성하기 위하여 포기를 하지 않았다. 그러나 반응조내 유기물이 거의 없는 상태이기 때문에 내생탈질에 의한 탈질은 매우 미미하였으며, 또한 이 기간에 용존산소의 감소에 소요되는 시간을 고려하면 실질적인 무산소기는 아주 짧아 탈질이 진행되기에는 시간이 부족하였을 것이다. 고정된 형태로 포기공정을 운전하였을 때 연속회분식반응조내 유기물과 인의 변화는 Fig. 5와 같다. COD는 유입기(0~0.5 h)에 유입된 유기물이 대부분 탈질 및 인방출에 이용되어 유입기말에도 약간만 상승하였으며, 2 h까지 탈질 및 인방출로 인하여 서서히 제거되었다. 포기가 시작되면서 잔존한 유기물이 호기성분해에 의해 초반에 제거되었고 이후는 비교적 일정하였다. P는 혐기기에 방출된 후 포기가 시작되면서 과잉섭취되어 대부분이 초반에 제거되었다.

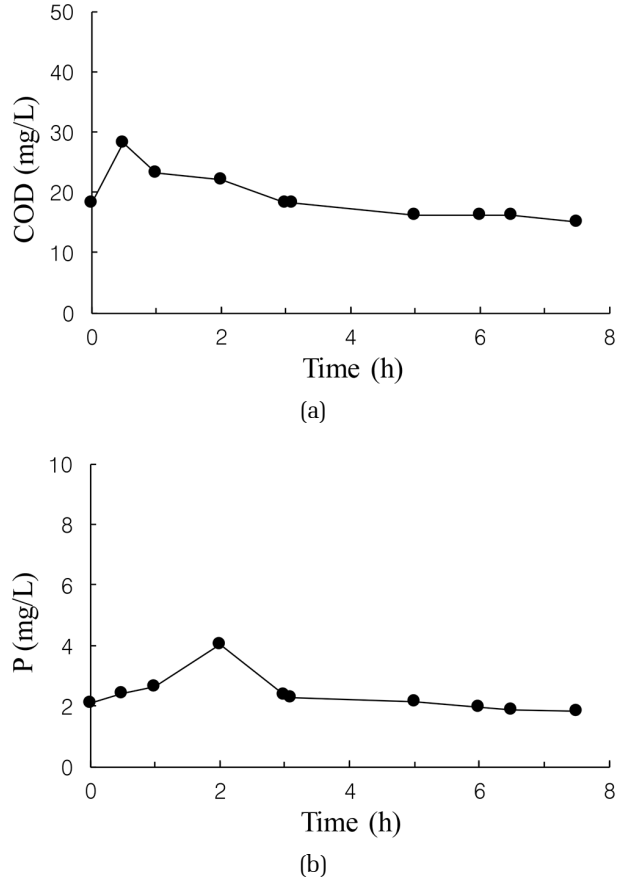

Fig. 5. Fixed mode operation: (a) organics and (b) phosphorus.

본 실험에서 유입수는 TCOD(SCOD) 281(108) mg/L, NH_4^+ 27 mg N/L, TN 33 mg N/L, TP(SP) 4.5(2.7) mg P/L이었으며, 유출수는 TCOD(SCOD) 17(15) mg/L, NH_4^+ 0.1 mg N/L, TN 12 mg N/L, TP(SP) 1.9(1.8) mg P/L이었다. 따라서 TCOD제거율은 94%, 유입수 TN과 유출수 NH_4^+를 기준으로 한 질산화율은 99%, TN제거율은 63%, TP제거율은 56%를 나타내었다.

3.2 호흡률법에 의한 포기공정 제어

연속회분식반응조에서 호흡률을 고찰한 결과 반응조내 유기물제거, 질산화, 내생분해 등의 반응특성을 잘 나타내고 있었다. 특히 질산화 반응에는 많은 양의 산소가 소모되므로 이에 따른 호흡률은 매우 컸으며 변화 또한 뚜렷하여 질산화 반응을 효과적으로 파악할 수 있었다. 또한 호흡률의 급격한 감소는 질산화가 거의 완료되는 시점을 파악할 수 있는 뚜렷한 지표로서 포기공정을 제어하는 데 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

반응기중 포기공정의 대상기간(2~6.5 h)인 4.5 h 동안 호흡률을 실시간으로 계측하였다. 그리고 질산화가 완료되어 호흡률이 급감한 후 비교적 일정한 호흡률이 나타나기 시작하는 시점을 검출하여 그때까지의 시간을 기준으로 포기시간을 설정하였다. 즉, 질산화에 필요한 포기시간을 확보하면서 추가적인 포기를 하지 않음으로써 에너지를 저감하고 또한 무산소기를 최대한으로 늘려 탈질효율의 향상을 도모하였다. 포기공정을 제어하여 운전한 반응조에서의 호흡률과 질소화합물의 변화는 Fig. 6과 같다. 호흡률의 변화는 유기물제거, 질산화, 내생분해 등에 따른 생물학적 반응특성을 동일하게 잘 나타내었다. 본 실험의 경우 최대질산화호흡률은 45 mg O_2/L·h로서 Fig. 4보다는 약간

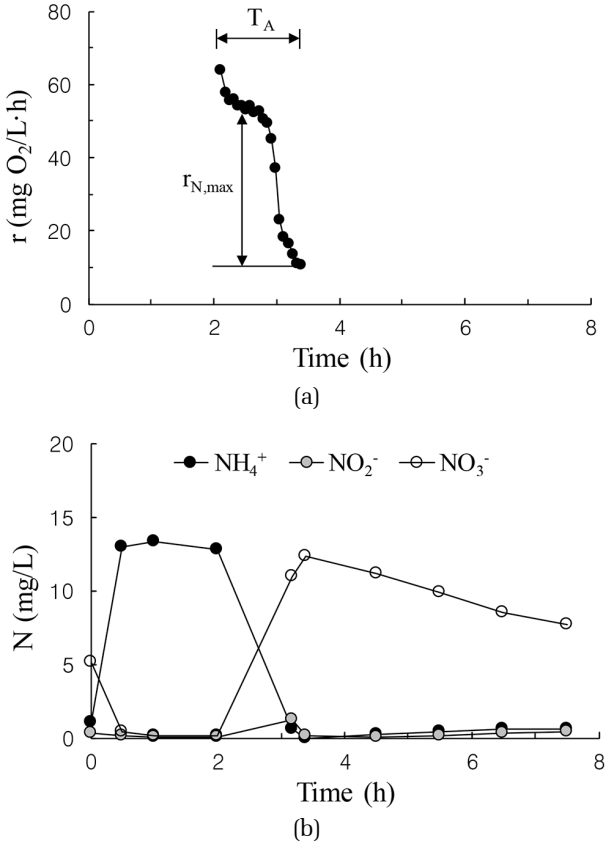

Fig. 6. Aeration control: (a) respiration rate and (b) nitrogen compounds.

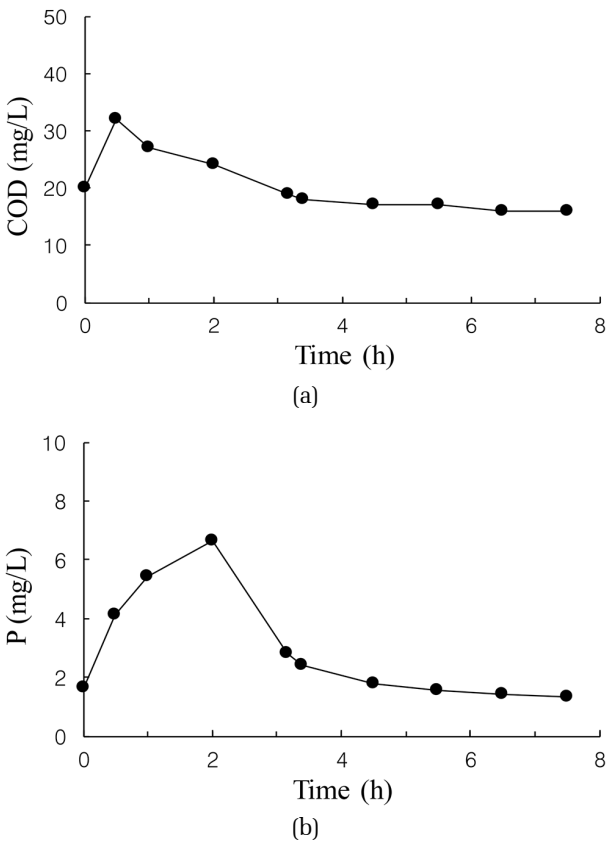

Fig. 7. Aeration control: (a) organics and (b) phosphorus.

작았으며, 질산화가 거의 완료되어 호흡률이 급감하는 시간은 조금 늦었다. 포기시간 T_A는 1.39 h이었으며, 따라서 포기공정을 제어함으로써 반응기중 포기의 대상기간 전체를 기준으로 할 때보다 포기를 69% 그리고 고정된 형태로 포기공정을 운전할 때보다는 60%를 저감할 수 있었다. 포기공정 제어의 대상기간인 4.5 h 중 3.11 h를 포기하지 않음으로써 무산소기를 최대한으로 길게 할 수 있었다. 따라서 무산소기를 고정된 형태로 운전한 경우 NO_3^-의 제거가 미미하였으나, 포기공정을 제어한 경우는 NO_3^-가 4.7 mg N/L 제거되어 내생탈질을 크게 향상시킬 수 있었다.

포기공정을 제어하여 운전하였을 때 연속회분식반응조내 유기물과 인의 변화는 Fig. 7과 같다. COD는 유입된 유기물이 혐기기에 탈질과 인방출에 의하여, 그리고 포기기에는 호기성분해에 의해 초반에 대부분이 제거되었다. P는 혐기기에 방출된 후 포기기에 과잉섭취되어 포기말에는 대부분이 제거되었다. 포기공정을 제어하지 않고 고정된 형태로 운전한 결과에 비해 혐기말(2 h)에 인방출이 많이 증가하였는데, 이는 포기공정을 제어함으로써 탈질효율이 향상되어 반응조내 유입초기의 NO_3^-가 적었고 탈질에 소요되는 유기물이 감소하여 보다 많은 유기물을 인방출에 이용할 수 있었기 때문이다. 이에 따라 인제거율도 함께 향상되었다. 또한 포기공정의 제어에 따라 침전 및 배출기까지 무산소기로 조성됨으로써 이어지는 주기의 반응조내 유입초기에 용존산소도 존재하지 않아 유기물의 호기성분해가 감소하였으며, 탈질 및 인방출에 보다 많은 유기물을 이용할 수 있어 제거효율을 향상시킬 수 있었다. 유출수의 용존산소를 유지할 필요가 있는 경우에는 배출된 상징액만을 포기하는 방안으로 적은 송풍량을 이용하여 용존산소를 유지할 수 있을 것이다.

본 실험에서 유입수는 TCOD(SCOD) 268(105) mg/L, NH_4^+ 28 mg N/L, TN 35 mg N/L, TP(SP) 4.3(2.6) mg P/L이었으며, 유출수는 TCOD(SCOD) 19(16) mg/L, NH_4^+ 0.6 mg N/L, TN 9 mg N/L, TP(SP) 1.5(1.4) mg P/L이었다. 따라서 TCOD제거율은 93%, 유입수 TN과 유출수 NH_4^+를 기준으로 한 질산화율은 98%, TN제거율은 74%, TP제

거율은 65%를 나타내었다. 포기공정을 제어하지 않고 고정된 형태로 운전한 결과에 비해 유기물제거와 질산화는 거의 비슷한 수준이었으나, 탈질은 11% 그리고 인제거는 9% 정도 향상되었다.

3.3 포기시간 및 공정효율

연속회분식반응조에서 호흡률 변화는 유입수의 부하변동에 따라 상이하였다. 포기공정의 제어에서 포기시간을 설정하는 데 기준으로 이용하였던 질산화가 완료되어 호흡률이 급감한 후 비교적 일정한 호흡률이 나타나기 시작하는 시점도 유입수의 질소농도에 따라 변화하였다. Fig. 8과 같이 유입수의 질소농도가 (a)는 NH_4^+ 32 mg N/L(TN 37 mg N/L), (b)는 NH_4^+ 19 mg N/L(TN 28 mg N/L)이었을 때 포기시간은 T_{A1}은 1.52 h, T_{A2}는 0.99 h로 질소농도에 비례하여 설정되었다. Fig. 8(a)는 고부하로 포기시간이 길었으며, 전반적으로 호흡률이 저부하에 비해 약간 컸고 포기 초반에

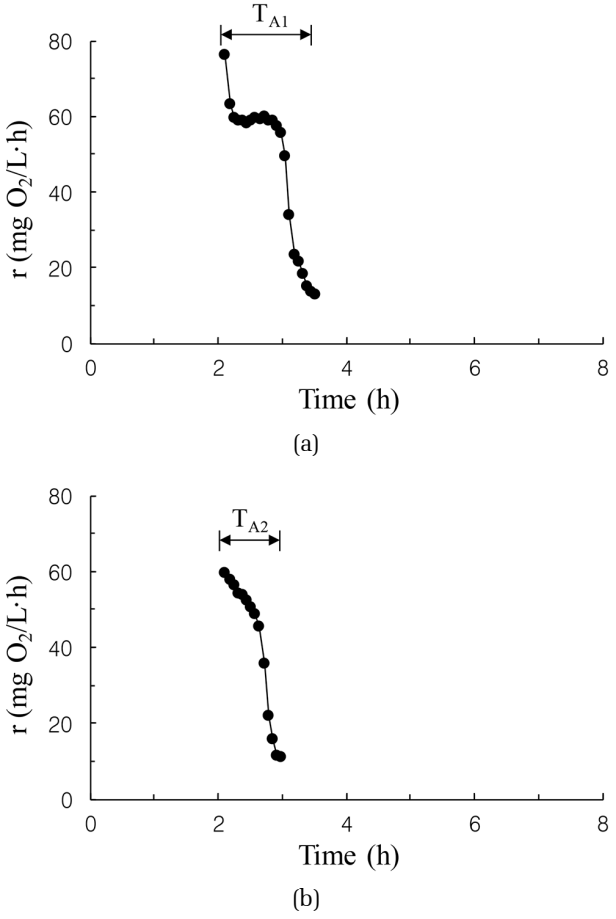

Fig. 8. Aeration control: (a) T_{A1} of 1.52 h and (b) T_{A2} of 0.99 h.

쉽게 생분해되는 유기물에 의한 호흡률도 보다 크게 나타났다. 또한 최대질산화호흡률이 유지되는 기간에 호흡률의 변화가 다소 불규칙하였는데 유입수에 복합적인 생분해 특성을 갖는 유기물이 포함되었던 것으로 사료된다. Fig. 8(b)는 저부하로 포기시간이 짧았으며, 전반적으로 호흡률이 조금 작았고 포기 초반에 쉽게 생분해되는 유기물에 의한 호흡률도 명확하지 않았다.

호흡률법에 의하여 포기공정을 제어한 운전기간 동안에 유입수의 질소 부하변동에 따라 매일 설정된 반응조의 포기시간 변화는 Fig. 9와 Table 2와 같다. 유입수의 TN은 28~37 mg N/L로 평균 34 mg N/L, NH_4^+는 19~32 mg N/L로 평균 27 mg N/L이었으며, 포기시간은 0.99~1.52 h로 평균 1.31 h로 운전되었다. 따라서 유입수의 질소농도에 비례하여 적절한 포기시간이 설정되었으며, 이와 같은 포기공정 제어는 부하변동이 큰 중소규모의 공정일수록 더욱 효과적일 것으로 사료된다.

유입수의 NH_4^+가 유입된 후 반응조의 초기용량과 혼합되어 희석된 실제의 농도를 기준으로 포기시간과의 상관관계를 나타낸 결과는 Fig. 10과 같다. 반응조내 실제의 질소농도를 기준으로 하였으므로 질산화에 필요한 시간과 반응특성을 파악할 수 있다. 반응조내

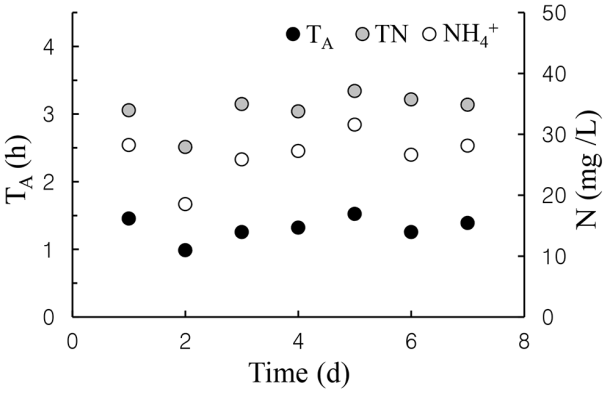

Fig. 9. Aeration time variation with nitrogen loadings.

Table 2. Aeration time in the operation of aeration control

Parameter	Value	
	Range	Average
TN (mg N/L)	28-37	34
NH_4^+ (mg N/L)	19-32	27
Aeration time (h)	0.99-1.52	1.31

Table 3. Treatment efficiency of the SBR

Component	Influent		Effluent		Removal (%)
	Range	Average	Range	Average	
COD (mg/L)	168-289	250	16-26	19	92
NH_4^+ (mg N/L)	19-32	27	0.5-1.6	0.9	97
TN (mg N/L)	28-37	34	8-11	9	73
TP (mg P/L)	3.2-4.7	4.2	1.5-1.9	1.7	61

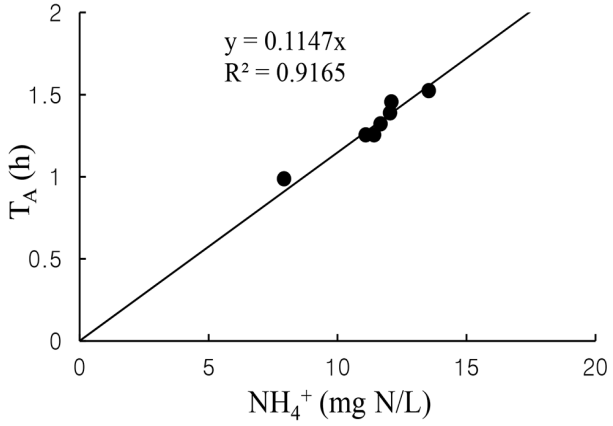

Fig. 10. Aeration time required for nitrification.

NH_4^+ 농도에 선형적으로 비례하여 포기시간이 증가하였고 상관성이 매우 컸다. NH_4^+의 질산화에 필요한 시간은 다음 식과 같이 계산되었으며, 식에서 기울기의 역수는 최대질산화율을 의미한다.

$$T_A\ (h) = 0.115\ NH_4^+\ (mg\ N/L)$$

본 연속회분식반응조에서 최대질산화율은 8.7 mg N/L·h이었으며, 또한 최대비질산화율은 7.8 mg N/g MLVSS·h이었다. 이 식에 기초하여 유입수의 질소농도에 따른 공정의 포기시간을 추정할 수 있으며, 운전 중 포기시간을 정기적으로 재설정하는 경우에도 활용할 수 있다. 또한 다양한 환경변화에 따른 공정내의 질산화 반응특성을 용이하게 파악할 수 있다.

호흡률법에 의하여 연속회분식반응조의 포기공정을 제어하여 운전한 결과 처리효율은 Table 3과 같다. COD제거율은 92%, NH_4^+제거율은 97%, 유입수의 TN과 유출수의 NH_4^+를 기준으로 한 질산화율은 97%, TN제거율은 73%, TP제거율은 61%로서 하절기에 다소 저농도 유기물의 하수였는데도 포기공정을 제어함으로써 비교적 양호한 처리효율을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 호흡률법에 의해 연속회분식반응조의 포기공정을 제어하여 운전한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 호흡률 특성은 반응조내 생물학적 처리과정을 잘 반영하였다. 특히 질산화에 따라 유발되는 호흡률은 매우 큰 값을 나타내었으며 변화 또한 뚜렷하여 질산화 미생물의 활성 및 반응특성을 파악할 수 있었다.

2) 대부분의 NH_4^+가 산화되면서 호흡률이 급격히 감소하였으며, 이는 질산화의 완료시점을 나타내는 유용한 지표로 이용할 수 있었다.

3) 호흡률의 급격한 감소에 기초하여 질산화에 요구되는 최적의 포기시간을 설정함으로써 과도한 포기를 크게 줄일 수 있었다. 또한 무산소기를 최대화함으로써 내생탈질이 크게 향상되었고 동시에 인제거도 개선되었다.

4) 유입수의 부하변동에 따라 호흡률의 변화가 상이하였으며, 포기시간은 유입수의 질소농도에 비례하여 설정되었다. 또한 호흡률 특성에 기초하여 최대질산화율, 최대비질산화율 등을 분석함으로써 공정내 질산화 반응을 고찰할 수 있었다.

5) 호흡률법에 의해 포기공정을 제어함으로써 하절기에 다소 저농도 유기물의 하수임에도 비교적 양호한 처리효율을 나타내었다. 따라서 본 포기공정 제어는 부하변동이 큰 중소규모의 공정일수록 더욱 효과적일 것으로 사료된다.

References

Alpaslan Kocamemi, B., Dityapak, D. (2014). Real-time process dynamics monitoring in Anammox reactors, Water Sci. Technol., 70(2), 183-191.

Åmand, L., Olsson, G., and Carlsson, B. (2013). Aeration control

- a review, Water Sci. Technol., 67(11), 2374-2398.
Benes, O., Spanjers, H., and Holba, M. (2002). Respirometry techniques and activated sludge models, Water Sci. Technol., 46(4-5), 1-6.
Ciappelloni, F., Mazouni, D., Harmand, J., and Lardon, L. (2006). On-line supervision and control of an aerobic SBR process, Water Sci. Technol., 53(1), 169-177.
Claros, J., Serralta, J., Seco, A., Ferrer, J., and Aguado, D. (2011). Monitoring pH and ORP in a SHARON reactor, Water Sci. Technol., 63(11), 2505-2512.
Daebel, H., Manser, R., and Gujer, W. (2007). Exploring temporal variations of oxygen saturation constants of nitrifying bacteria, Water Res., 41(5), 1094-1102.
Drewnowski, J. (2014). The impact of slowly biodegradable organic compounds on the oxygen uptake rate in activated sludge systems, Water Sci. Technol., 69(6), 1136-1144.
Ekama, G.A., Dold, P.L., and Marais, G.V.R. (1986). Procedures for determining influent COD fractions and the maximum specific growth rate of heterotrophs in activated sludge systems, Water Sci. Technol., 18(6), 91-114.
Henze, M., Gujer, W., Mino, T. and van Loosdrecht, M. (2000). *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. Scientific and Technical Report No. 9, IWA Publishing, London, pp. 16-18.
Irvine, R.L., Ketchum, Jr., L.H. (1989). Sequencing batch reactors for biological wastewater treatment, CRC Crit Rev Environ Control, 18(4), 255-294.
Kappeler, J., Gujer, W. (1992). Estimation of kinetic parameters of heterotrophic biomass under aerobic conditions and characterization of wastewater for activated sludge modelling, Water Sci. Technol., 25(6), 125-139.
Ketchum, Jr., L.H. (1997). Design and physical features of sequencing batch reactors, Water Sci. Technol., 35(1), 11-18.
Lackner, S., Gilbert, E.M., Vlaeminck, S.E., Joss, A., Horn, H., and van Loosdrecht, M.C.M. (2014). Full-scale partial nitritation/anammox experiences – an application survey, Water Res., 55, 292-303.
Lu, P., Zhang, X., and Zhang, D. (2010). An integrated system for wastewater COD characterization and a case study, Water Sci. Technol., 62(4), 866-874.
Paul, E., Plisson-Saune, S., Mauret, M., and Cantet, J. (1998). Process state evaluation of alternating oxic-anoxic activated sludge using ORP, pH and DO, Water Sci. Technol., 38(3), 299-306.
Poo, K.M., Im, J.H., Jun, B.H., Kim, J.R., Hwang, I.S., Choi, K.S., and Kim, C.W. (2006). Full-cyclic control strategy of SBR for nitrogen removal in strong wastewater using common sensors, Water Sci. Technol., 53(4-5), 151-160.
Puig, S., Corominas, LI., Balaguer, M.D., and Colprim, J. (2007). Biological nutrient removal by applying SBR technology in small wastewater treatment plants: carbon source and C/N/P ratio effects, Water Sci. Technol., 55(7), 135-141.
Spagni, A., Buday, J., Ratini, P., and Bortone, G. (2001). Experimental considerations on monitoring ORP, pH, conductivity and dissolved oxygen in nitrogen and phosphorus biological removal processes, Water Sci. Technol., 43(11), 197-204.