



연속회분식반응조에서 호흡률에 기반한 포기공정의 예측제어

Predictive aeration control based on the respirometric method in a sequencing batch reactor

김동한*
Donghan Kim*

서원대학교 환경공학과, 충북 청주시 서원구 무심서로 377-3, 28674
Department of Environmental Engineering, Seowon University, 377-3 Musimseo-ro, Seowon-gu, Cheongju, Chungbuk 28674, Republic of Korea

pp. 413-420

pp. 421-428

pp. 429-436

pp. 437-446

pp. 447-456

pp. 457-467

pp. 469-480

pp. 481-489

ABSTRACT

As aeration is an energy-intensive process, its control has become more important to save energy and to meet strict effluent limits. In this study, predictive aeration control based on the respirometric method has been applied to the sequencing batch reactor (SBR) process. The variation of the respiration rate by nitrification was great and obvious, so it could be a very useful parameter for the predictive aeration control. The maximum respiration rate due to nitrification was about 60 mg O₂/L·h and the maximum specific nitrification rate was about 7.5 mg N/g MLVSS·h. The aeration time of the following cycle of the SBR was daily adjusted in proportion to that which was previously determined based on the sudden decrease of respiration rate at the end of nitrification in the respirometer. The aeration time required for nitrification could be effectively predicted and it was closely related to influent nitrogen loadings. By the predictive aeration control the aerobic period of the SBR has been optimized, and energy saving and enhanced nitrogen removal could be obtained.

Key words: Aeration, Predictive control, Respirometric method, Sequencing batch reactor

주제어: 포기공정, 예측제어, 호흡률법, 연속회분식반응조

1. 서 론

포기는 반응조에 산소를 공급하는 공정으로서 생물학적 처리에서 호기성 종속영양미생물 및 독립영양미생물의 대사과정에 전자수용체로 작용하는 용존산소의 농도를 유지하게 하므로 가장 중요한 운전인자 중의 하나

이다. 생물학적 공정에서 안정적인 처리를 도모하기 위해서는 유입 하수의 부하에 따른 산소요구량에 맞게 포기가 이뤄져야 한다. 그러나 포기공정은 에너지를 많이 소비하여 보통 처리장 전체 전력의 50% 정도를 차지하고 있으며 많게는 약 75%에 이르기까지도 하므로 (Rosso et al., 2008; Åmand et al., 2013), 에너지를 절약하

Received 15 November 2019, revised 5 December 2019, accepted 6 December 2019.

*Corresponding author: Donghan Kim (E-mail: kdh@seowon.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기 위해서는 포기공정이 적절히 제어되어야 한다. 또한 응집성이 양호한 슬러지의 성상을 유지하고 탈질 및 인 방출에 미치는 고도처리 효율에의 영향을 고려해서도 과도한 포기는 방지되어야 한다.

생물학적 고도처리에서 유기물 및 질소와 인을 동시에 제거하기 위해서는 포기공정을 제어하여 적절한 호기, 무산소, 혐기의 환경조건을 반응조에 형성하여야 한다. 호기조건에서의 유기물 제거 및 질산화 반응에 따라 용존산소와 알칼리도가 소모되어 용존산소, pH, 암모니아 등의 지표가 반응에 대한 모니터링 및 포기공정의 제어에 활용되어 왔다 (Al-Ghusain et al., 1994; Paul et al., 1998; Andreottola et al., 2001; Mauret et al., 2001; Poo et al., 2006; Vrečko et al., 2006; Claros et al., 2011). 호흡률법(respirometric method)은 생물학적 공정에서 미생물이 기질을 분해하고 호흡대사 중에 용존산소를 이용하는 속도인 호흡률(respiration rate)을 측정하여 미생물의 활성도를 평가하는 기법으로서 유입하수의 생분해 특성에 따른 유기물 분류, 공정의 동역학적 해석 및 제어 등에 이용되어 왔다 (Henze, 1992; Kappeler and Gujer, 1992; Baeza et al., 2002; Vollertsen et al., 2006; Daebel et al., 2007; Drewnowski, 2014). 반응조의 호흡률은 유기물 제거 및 질산화에 따른 호기성 반응속도를 직접적으로 나타내며, 특히 질산화에는 많은 산소가 소모되어 큰 호흡률이 유발된다. 따라서 기타 지표에 비해 반응특성을 명확히 고찰할 수 있으며 포기공정을 제어하는 데도 더욱 효과적으로 이용할 수 있을 것이다.

생물학적 고도처리공정인 연속회분식반응조(sequencing batch reactor)는 하나의 반응조에서 하수유입, 반응, 침전·배출·휴지의 과정을 한 주기단위로 하여 운전된다. 질소와 인의 동시제거에 필요한 호기, 무산소, 혐기의 조건을 포기를 조절하여 하나의 반응조에서 용이하게 형성할 수 있는 운전상의 유연성을 갖는 것이 가장 큰 장점으로서 중소규모의 처리장에 많이 적용되고 있는 공정이다 (Irvine and Ketchum, 1989; Artan et al., 2001; Ginige et al., 2013). 또한 슬러지 처리공정의 반류수와 같이 암모니아가 고농도인 폐수를 처리하는 데 근래에 응용되고 있는 아질산화(nitritation)나 Anammox (anaerobic ammonium oxidation)의 공정에도 많이 활용되고 있다 (Gustavsson et al., 2008; Lackner et al., 2014). 연속회분식 반응조는 회분식으로 운전되기 때문에 시간에 따른 호흡률의 변화가 호기성 생물학적 반응과정을 뚜렷이 나타내므로 포기공정의 제어에 매우 효과적으로 활용할

수 있을 것이다. 또한 유입하수의 부하변동에 상응하는 호흡률의 변화를 공정의 다음 주기가 시작되기 이전에 분석하여 공정제어에 활용하는 예측제어(predictive control) 기법을 통해, 연속회분식반응조에서의 질산화 반응과정을 미리 신속하게 파악하고 이에 기초하여 포기시간을 설정함으로써 최적화된 호기시간으로 포기공정을 제어할 수 있을 것으로 기대된다. 독성물질이 유입되거나 충격부하가 발생하는 경우에도 이를 사전에 파악하여 대책을 수립할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 호흡률에 기반하여 연속회분식반응조의 질산화 반응특성을 파악하고 포기공정을 예측제어함으로써 에너지를 절약하고 고도처리효율을 향상시키고자 한다.

2. 재료 및 방법

호흡률에 기반하여 연속회분식반응조의 포기공정을 예측제어하기 위하여 실험실 규모로 Fig. 1과 같이 반응조를 구성하였다. 원통형 아크릴을 재료로 하여 유효용적 7 L의 규모로 제작하였으며, 교반기로 슬러지를 혼합하고 산기관을 통해 포기하였다. 펌프를 사용하여 하수를 유입하고 처리수를 유출시켰다. 펌프, 교반기, 송풍기, 용존산소계 등의 작동과 계측에는 타이머와 컴퓨터를 이용하였다. 유입수는 생활하수로서 C시의 차집관거에서 채취한 후 실험실로 운반하여 사용하였다. 반응조는 Table 1과 같이 총용량 7 L 중 3 L를 주기당 처리하고, 하루에 3주기가 반복되도록 운전하였다. 그러므로 수리학적 체류시간은 18.7 h에 해당되었으며, 고형물체류시간은 매일 일정량의 슬러지를 주기내 반응기말에 인발하여 25 d로 유지하였다.

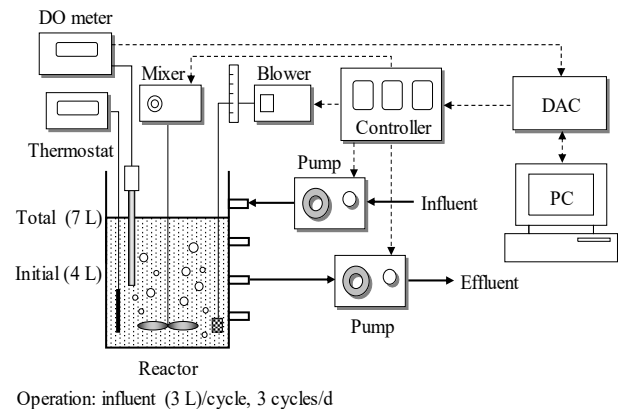


Fig. 1. Schematic diagram of the SBR.



Table 1. Operating conditions

Parameter	Value
Working volume (L)	7
Influent volume a cycle (L)	3
Cycle time (h)	8
Hydraulic retention time (h)	18.7
Solids retention time (d)	25

각 주기는 8 h로서 하수유입 0.5 h, 처리반응 6 h, 슬러지 침전 1 h, 처리수 배출과 휴지 0.5 h로 구성하여 운전하였다. 탈질과 인제거를 도모하기 위한 초기의 2 h와 침전·배출·휴지의 1.5 h는 포기를 하지 않았다. 반응기중에서 주기 시작시간을 기준으로 2~6.5 h에 해당하는 4.5 h의 기간을 대상으로 포기공정을 예측제어하였다. 즉 유입수의 부하변동에 상응하는 최적의 포기시간을 주기가 시작되기 이전에 미리 호흡률에 기반하여 예측하였고, 이를 매일 공정의 포기시간으로 설정하여 운전하였다.

반응조 및 예측제어를 위한 호흡률은 호흡반응조, 호흡셀, 펌프 등의 구성으로 제작한 호흡률 시스템(Fig. 2)을 이용하여 측정하였다. 연속회분식반응조의 호흡률을 측정하는 경우는 반응조의 슬러지를 반응기중 포기가 시작(2 h)되기 직전에 채취하여 호흡반응조에 주입하였다. 펌프를 사용하여 호흡반응조의 혼합액을 3.5~4분의 주기로 호흡셀로 순환시켰다. 용존산소전극을 설치한 호흡셀은 대기와 차단된 밀폐된 구조로서 펌프의 작동을 멈춘 상태에서 용존산소를 측정하였으며, 시간에 따른 용존산소의 선형적인 감소율에 기초하여 호흡률을 구하였다. 컴퓨터를 이용하여 펌프의 작동을 조작하였으며, 호흡률을 실시간으로 계속하였다. 연속회분식반응조의 포기시간을 미리 예측하기 위한 호흡률 측정에서는 반응조의 슬러지를 반응기말에 채취하여 일정 비율로 농축하고 상징액을 배출하였다. 이후 호흡반응조에서 포기를 하여 슬러지의 호흡률을 안정화시킨 후 다음 주기에 반응조로 유입될 하수를 주입하여 호흡률을 측정하였다.

반응조의 온도는 하절기에 운전하여 다소 높은 수준인 29~32℃로 평균 30℃이었으며, MLSS(MLVSS)는 1380~1550(1140~1210) mg/L로 평균 1464(1172) mg/L로 유지되었다. 유입수, 반응조, 유출수의 시료를 주기적으로 채취하여 NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, TN, P, COD, SS 등의 수질항목을 standard methods (APHA et al., 2012)에 따라 분석하였으며, 여과시료는 0.45 μm 막여과지를 사용하였다.

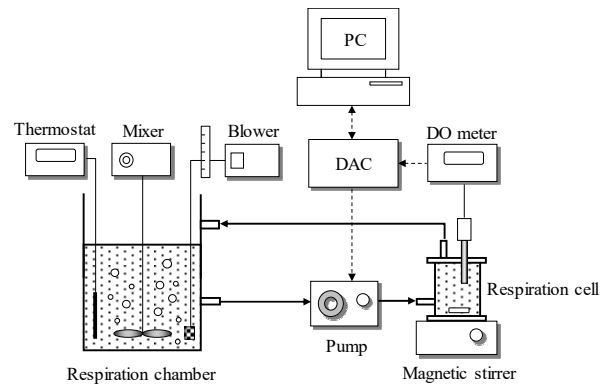


Fig. 2. Respirometry system.

3. 결과 및 고찰

3.1 연속회분식반응조의 주기내 호흡률 특성

연속회분식반응조의 운전에서 주기내 호흡률과 질소화합물의 변화는 Fig. 3과 같다. 반응조에서 호흡률은 유기물분해, 질산화, 내생분해 등과 같은 여러 생물학적 반응에 의하여 유발된다. 주기내 2 h에 포기가 시작되면서 바로 측정되기 시작한 초기의 약 2개 정도의 호흡률은 유기물분해에 따른 호흡률로서 매우 짧은 시간 동안에만 나타났다. 생물학적 처리의 대상이 되는 유기물은 미생물에 의한 생분해성(biodegradability)에 따라 쉽게(readily) 분해되는 유기물과 서서히(slowly) 분해되는 유기물로 구분된다 (Ekama et al., 1986). 포기가 시작되면서 동시에 나타난 호흡률의 변화는 쉽게 분해되는 유기물에 의한 것으로, 미생물이 바로 섭취하여 이용할 수 있는 단순한 화합물의 유기물이기 때문에 가장 먼저 분해된다. 그러나 쉽게 분해되는 유기물은 혐기기의 탈질과 인방출에 대부분이 소모되어 포기가 시작될 때에는 잔존하는 양이 적어 짧은 시간에 빠르게 호흡률이 감소하였다.

호흡률은 이후 비교적 일정한 수준이면서 느리게 감소하는 경향으로 약 2.7 h까지 유지되었다. 이는 대부분 질산화에 의한 호흡률로서 많은 산소가 소모되므로 큰 값을 나타내었으며, 동시에 서서히 분해되는 유기물 및 내생분해로 인하여 느리게 감소하는 경향도 나타내었다. 이 기간에 최대질산화율의 반응속도로 NH₄⁺는 빠르게 NO₂⁻, NO₃⁻로 산화되었다. 대부분의 NH₄⁺가 산화된 2.7 h부터는 호흡률이 급격히 감소하기 시작하여 작은 값으로 변화하였으며, 따라서 호흡률이 급격히 감소한 것은 질산화 반응의 완료시점을 나타

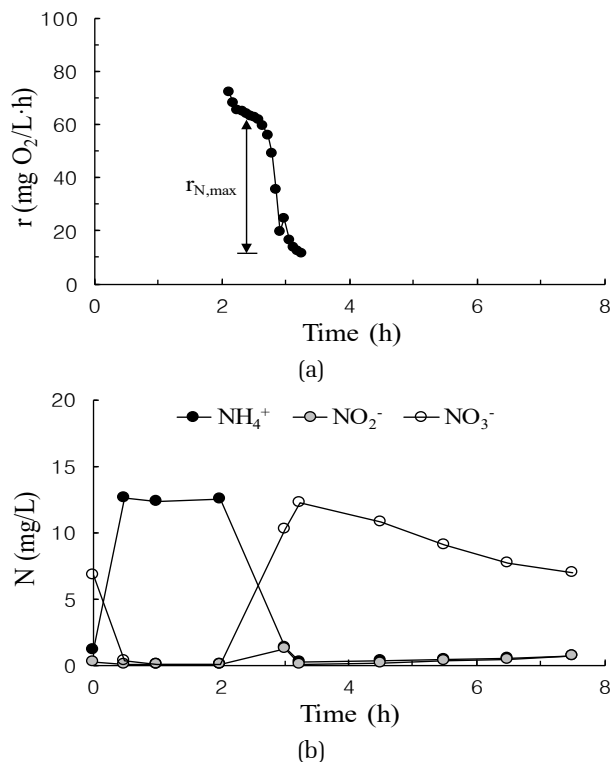


Fig. 3. Characteristics of respiration rate (a) and nitrification (b) in the SBR.

내는 뚜렷한 지표임을 알 수 있었다. 이후 다시 비교적 일정하면서 느리게 감소하는 경향의 작은 호흡률이 서서히 분해되는 유기물 및 내생분해에 의하여 나타났다. 서서히 분해되는 유기물은 주로 입자상으로 가수분해 후 미생물에 의해 이용되므로 내생분해와 함께 느린 반응속도로 인하여 작은 호흡률이 유발되었다.

따라서 Fig. 3에 표시한 것과 같이 $r_{N,max}$ 가 질산화 반응에 의한 최대질산화호흡률로서 본 연속회분식반응조에서는 $54 \text{ mg O}_2/\text{L}\cdot\text{h}$ 를 나타냈다. 최대질산화호흡률은 질산화 미생물의 활성을 나타내는 지표로서 호흡률의 변화특성과 함께 공정내 질산화 반응상태를 파악할 수 있는 유용한 정보를 제공하였다. 또한 본 실험에서 호흡률이 급격히 감소한 이후 비교적 일정하게 나타나는 시점인 3.25 h에 포기를 중단하였다. 그 결과 질산화 반응 이후의 과잉 포기를 방지하여 에너지를 저감할 수 있었으며, 포기를 중단한 이후 내생탈질(endogenous denitrification)을 통하여 NO_3^- 를 5.2 mg N/L 제거할 수 있었다.

3.2 호흡률에 기반한 포기공정의 예측제어

연속회분식반응조에서 앞의 3.1에서와 같이 호흡률

의 변화특성에 기초하여 호흡률이 급격히 감소한 이후 비교적 일정하게 나타나는 때를 질산화 반응의 완료시점으로 간주하여 포기시간을 조절할 수 있었다. 그러나 질산화 반응의 완료 여부를 명확히 판단하기 위해서는 비교적 일정한 호흡률이 최소 몇 개 정도는 나타나는 것을 확인해야 했기 때문에 약간의 시간이 지연될 수밖에 없었다. 또한 호흡률이 다소 불안정하게 변화할 때 실시간으로 바로 포기시간을 결정하는 것도 어려운 측면이 있으며, 질산화 반응에 저해를 주는 독성물질 등이 유입될 경우에도 미리 대처하는 것이 곤란하다. 예측제어는 개루프 제어제(open loop control system)로서 외란(disturbance)에 의한 영향을 미리 예측하여 이를 상쇄하는 조작량을 취하는 제어방식이다. 따라서 호흡률에 기반하여 연속회분식반응조의 포기공정을 예측제어하면 질산화에 필요한 포기시간을 미리 신속하게 예측하여 이어지는 주기에 적용할 수 있다. 또한 호흡률의 변화특성을 종합적으로 파악할 수 있는 시간적 여유를 가질 수 있어 포기시간을 보다 엄밀하게 판단할 수 있으며, 자료가 다소 불안정한 경우도 안정적으로 포기시간을 결정할 수 있을 것이다. 질산화 반응에 저해가 발생하는 경우에도 이를 조기에 파악함으로써 대책을 수립하여 적용할 수 있을 것이다.

연속회분식반응조의 포기공정을 예측제어하기 위한 호흡률 측정은 반응조의 질산화 반응에 필요한 포기시간을 용이하게 예측할 수 있으며 동시에 질산화 미생물의 활성을 명확히 파악할 수 있도록, 호흡반응조의 미생물 농도를 실제 반응조의 미생물 농도와 거의 동일하게 유지하는 조건에서 실시하였다. 즉 반응기말에 반응조의 슬러지를 채취하여 일정 비율로 농축한 후 상징액을 배출하였고, 호흡반응조에서 슬러지의 호흡률을 안정화시키기 위하여 30분 정도 포기를 하였다. 이후 이어지는 주기에 반응조로 유입될 저류조의 같은 하수를 배출한 상징액과 동일한 부피로 주입하였다. 따라서 호흡반응조와 실제 반응조의 미생물 농도가 거의 유사하여 같은 수준의 최대질산화율을 나타내므로, 질소부하인 유입하수의 부피비율에 비례하여 질산화에 필요한 실제 반응조의 포기시간 T_A 를 식 (1)과 같이 예측하였다.

$$T_A = T_{AW} \frac{(V_i/V_T)}{(V_W/V_R)} \quad (1)$$

T_{AW} 는 호흡반응조에서 호흡률 변화에 기초하여 결정



된 포기시간, V_i 는 실제 반응조의 주기당 유입하수 부피, V_T 는 실제 반응조의 전체부피, V_w 는 호흡반응조에 주입한 하수의 부피, V_R 은 호흡반응조의 전체부피이다. 예측제어를 위한 호흡반응조에서의 호흡률 측정은 연속회분식반응조의 다음 주기가 시작되기 이전의 기간 동안에 신속하게 완료되어야 하므로 하수의 부피비율을 작게 하였다. 본 연구에서 호흡반응조에서의 농축 및 상징액의 교체비율(V_w/V_R)을 실제 반응조에서 주기당 유입된 하수의 부피비율(V_i/V_T , 3 L/7 L)인 43%의 1/2에 해당되는 21.5%로 하였다. 따라서 호흡반응조에서 주입한 하수의 부피비율을 상대적으로 작게 함으로써 포기시간(T_{Aw})을 보다 신속하게 결정할 수 있었고, 이 값의 2배로 실제 반응조에서의 포기시간(T_A)을 매일 예측하여 바로 이어지는 주기에 설정하였다.

연속회분식반응조의 포기공정을 예측제어한 운전에서 호흡반응조와 실제 반응조의 호흡률 측정결과 및 실제 반응조의 질소화합물 변화는 Fig. 4와 같다. 예측제어를 위하여 호흡반응조에서 하수를 주입한 직후의 호흡률인 Fig. 4(a)는 바로 이어지는 주기의 실제 반응조에서의 호흡률인 Fig. 4(b)와 전반적으로 매우 유사한 변화의 경향을 나타내어 주기시작 이전에 미리 질산화 반응과정을 잘 파악할 수 있었다. 호흡반응조에서 측정시작과 동시에 쉽게 분해되는 유기물로 인하여 95 mg O₂/Lh에 이르는 매우 큰 호흡률이 아주 짧은 시간 동안에 나타났다. 실제 반응조에서는 Fig. 3(a)나 Fig. 4(b)와 같이 혐기기에 탈질과 인방출에 유기물이 소모되어 포기가 시작될 때는 조내에 남아 있는 쉽게 분해되는 유기물이 적어서 호흡률의 크기가 상대적으로 작았으나, 호흡반응조에서는 주입한 하수의 쉽게 분해되는 유기물로 인하여 많이 큰 호흡률을 나타냈다. 그러나 하수의 주입량을 적게 한 작은 F/M비의 측정조건으로 인하여 유지되는 호흡률은 순간적이었다.

호흡반응조의 최대질산화호흡률은 60 mg O₂/Lh이었는데 실제 반응조에서는 58 mg O₂/Lh를 나타내어 거의 정확하게 질산화 미생물의 활성도를 미리 파악할 수 있었다. 예측제어를 위해 호흡반응조에서 호흡률의 변화에 기초하여 결정한 포기시간 T_{Aw} 는 0.70 h로서 주입한 하수의 부피를 적게 함으로써 짧은 시간 내에 신속히 결정할 수 있었으며, 바로 이어지는 주기의 실제 반응조에서의 포기시간 T_A 를 T_{Aw} 의 2배인 1.40 h로 설정하였다. 실제 반응조에서 설정된 포기시간이 적용된 주기내 3.4 h까지 미리 파악한 질산화 반응과

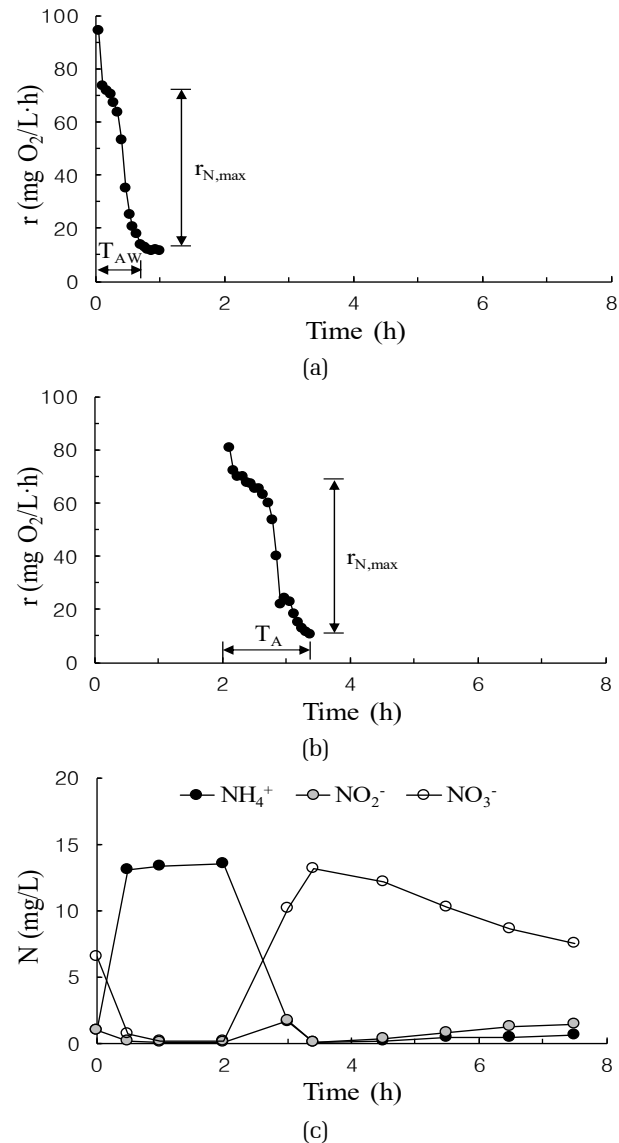


Fig. 4. Respiration rate in the respirometer (a), respiration rate (b) and nitrification (c) in the SBR under predictive aeration control.

거의 유사한 변화의 경향을 나타내었고, 호흡률이 급격히 감소한 이후 비교적 일정하게 나타나는 질산화의 완료시점도 매우 정확하게 일치하였다. 또한 실제 반응조에서 직접 포기시간을 결정할 때는 질산화의 완료시점으로 일정한 호흡률이 최소 3개 정도는 나타난 이후에야 판단할 수 있어 포기시간이 약간 길어지게 된다. 그러나 호흡반응조에서는 짧은 시간 내에 신속히 호흡률을 측정하여 전반적인 호흡률의 변화를 미리 파악함으로써 비교적 일정한 호흡률이 나타나는 최초의 시점을 안정적으로 조기에 결정할 수 있었

pp. 413-420

pp. 421-428

pp. 429-436

pp. 437-446

pp. 447-456

pp. 457-467

pp. 469-480

pp. 481-489

며, 이를 기준으로 하여 질산화에 필요한 최적의 포기 시간을 보다 엄밀하게 설정할 수 있었다.

이와 같이 예측제어를 통해 질산화 완료시점에 포기를 중단함으로써 이후 과잉의 포기를 방지하고 에너지를 크게 저감할 수 있었다. 동시에 무산소 기간을 최대한으로 확보하여 NO_3^- 를 5.6 mg N/L나 제거하고 내생탈질 효율을 크게 향상시킬 수 있었다. 또한 본 연구와 같이 호흡률에 기반하면 반응조의 질산화 반응특성을 파악하고 이를 곧바로 반영한 예측제어를 할 수 있어 단순히 암모니아 부하만을 이용한 예측제어 (Wett and Ingerle, 2001)에 비하여 제어의 안정성을 보다 확보할 수 있다. 독성물질 등이 유입되어 질산화 반응이 저해되는 경우에도 이를 조기에 파악하여 대처하는 것이 가능할 것이다. 그리고 포기공정을 연속식공정에서는 보통 분리된 반응조 단위로 제어해야 하지만 (Ingildsen et al., 2002), 연속회분식반응조에서는 시간 단위로 포기시간을 설정함으로써 보다 세밀하게 제어할 수 있었다.

연속회분식반응조에서 호흡률에 기반하여 포기공정을 예측제어한 운전에서 주기내 유기물 및 인의 변화는

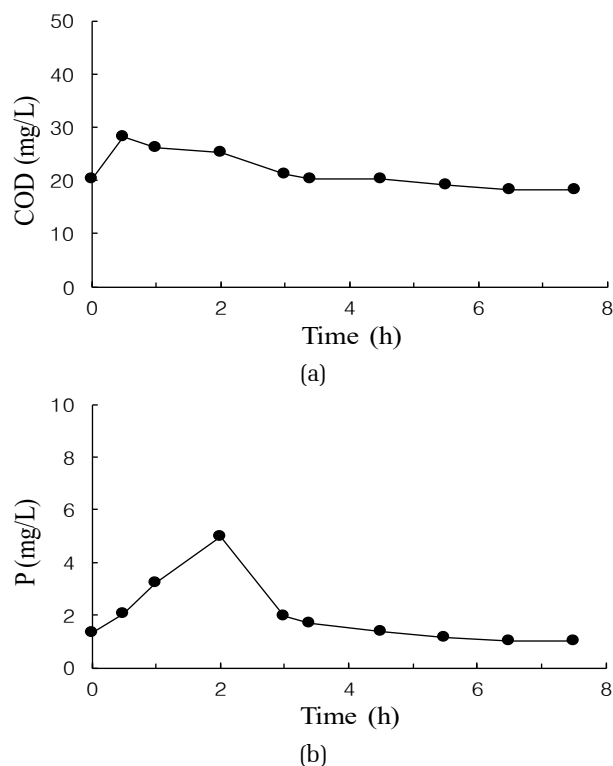


Fig. 5. Organics (a) and phosphorus (b) removal in the SBR under predictive aeration control.

Fig. 5와 같이 하수유입에 따라서 혐기기에 인이 방출되었고 호기기의 초반에 대부분의 잔존 유기물 및 인이 제거되었다. 본 실험결과 유입수의 TCOD(SCOD)는 299(144) mg/L, NH_4^+ 는 29 mg N/L, TN은 39 mg N/L, TP(SP)는 4.5(2.6) mg P/L이었으며, 유출수의 TCOD(SCOD)는 23(18) mg/L, NH_4^+ 는 0.6 mg N/L, TN은 10 mg N/L, TP(SP)는 1.2(1.0) mg P/L이었다. 따라서 TCOD의 제거율은 92%, 유입수 TN과 유출수 NH_4^+ 기준의 질산화율은 98%, TN의 제거율은 74%, TP의 제거율은 73%를 나타내었다.

3.3 연속회분식반응조의 운전특성

연속회분식반응조의 포기공정을 제어한 운전에서 NH_4^+ 가 대부분 산화되어 호흡률이 급감하는 과정에 호흡률이 순간적으로 상승하거나 비슷한 크기로 몇 개를 잠시 보이다가 다시 감소하는 현상이 나타났다. 예측제어를 위하여 하수를 주입한 호흡반응조의 Fig. 4(a)에서는 명확하지 않았지만 Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)에서는 점선으로 표시한 것과 같이 뚜렷하였다. 이와 같은 현상은 Fig. 3(a)와 Fig. 4(b)에서와 같이 실제 반응조에서도 동일하게 나타났는데 그중 Fig. 4(b)에서는 더욱 두드러졌다. 질산화는 AOB(ammonia oxidizing bacteria)에 의한 NH_4^+ 의 NO_2^- 로의 산화 및 NOB(nitrite oxidizing bacteria)에 의한 NO_2^- 의 NO_3^- 로의 산화와 같은 2단계에 걸쳐 진행된다. NOB는 AOB에 비해 고온, 짧은 고형물체류시간, 용존산소 제한 등의 조건에서 성장에 불리하거나 저해를 받는 것으로 보고되고 있으며 (US EPA, 2010; Lackner et al., 2014), 이와 같은 특성은 아질산화 및 Anammox 공정에도 활용되고 있다. 본 연구에서는 하절기에 평균 30°C에 이르는 고온의 환경에서 포기공정을 제어하였기 때문에 질산화가 거의 완료되어 가는 시기에 포기 중단으로 용존산소가 제한되어 NOB가 일부 저해를 받은 것으로 판단된다. NO_2^- 가 Fig. 4(c)에서와 같이 3 h에 1.7 mg N/L로 약간 축적된 상태에서도 NO_2^- 의 산화가 지연되어 이에 따른 호흡률이 나타났다. 따라서 고온의 하절기에 포기공정을 제어하면 아질산화를 촉진할 수 있을 것으로 사료된다.

연속회분식반응조에서 예측제어를 하기 위하여 호흡반응조의 호흡률을 측정된 결과 포기시간은 유입수의 질소농도에 따라 변화하였다. 유입수의 질소농도가 Fig. 6(a)에서 NH_4^+ 는 32 mg N/L(TN은 43 mg N/L),



Fig. 6(b)에서 NH_4^+ 는 26 mg N/L(TN은 39 mg N/L)일 때 포기시간 T_{AW1} 은 0.76 h, T_{AW2} 는 0.64 h로 질소농도에 비례하여 결정되었다. 이에 따라 실제 반응조에서는 포기시간 T_A 를 각각 1.52 h와 1.28 h로 설정하여 운전하였다. 포기공정을 예측제어한 운전기간 동안 유입수의 질소부하에 따라 매일 설정된 반응조의 포기시간은 Fig. 7과 같다. 유입수의 NH_4^+ 는 26~33 mg N/L로 평균 30 mg N/L, TN은 38~47 mg N/L로 평균 42 mg N/L이었으며, 반응조의 포기시간은 1.28~1.63 h로 평균 1.46 h로 운전되었다. 따라서 유입수의 질소부하에 비례하여 적절하게 반응조의 포기시간이 설정되었으며, 반응기중 포기공정의 대상기간인 4.5 h를 기준으로 하면 포기시간을 68% 줄일 수 있었다. 이와 같은 포기공정의 예측제어는 연속회분식반응조의 유입수 부하변동이 큰 경우에 더욱 효과적일 것이다.

하수가 반응조에 유입된 후 초기의 슬러지와 혼합되어 희석된 반응조내 실제의 NH_4^+ 농도를 기준으로 하여 포기시간과의 상관관계를 구해보면 Fig. 8 및 식 (2)와 같다. 포기시간은 반응조내 NH_4^+ 농도와 상관관계가 매우 컸다. 식 (2)에서 기울기의 역수는 최대질산화율로서

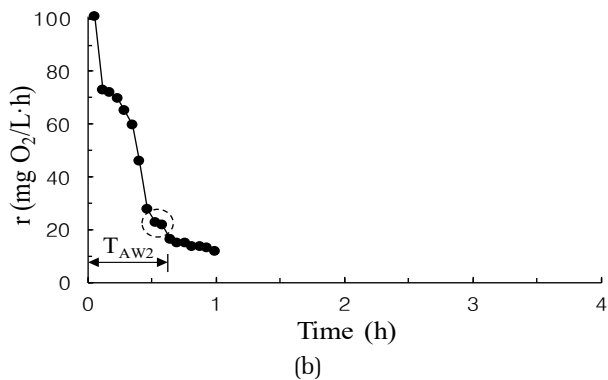
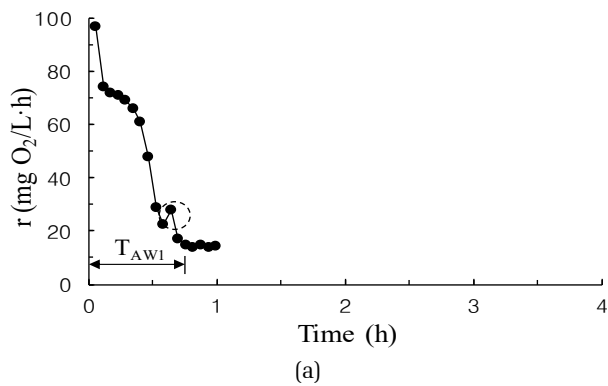


Fig. 6. Aeration times of $T_{AW1} = 0.76$ h (a) and $T_{AW2} = 0.64$ h (b) under predictive aeration control.

8.8 mg N/L·h이었으며, 최대비질산화율로는 7.5 mg N/g MLVSS·h에 해당되었다.

$$T_A (h) = 0.113 NH_4^+ (mgN/L) \quad (2)$$

연속회분식반응조에서 호흡률에 기반하여 포기공정을 예측제어한 운전결과 처리효율은 Table 2와 같다. COD의 제거율은 92%, NH_4^+ 의 제거율은 97%, 유입수 TN과 유출수 NH_4^+ 기준의 질산화율은 98%, TN의 제거율은 76%, TP의 제거율은 70%로서 포기공정을 예측제어함으로써 비교적 양호한 처리효율을 얻을 수 있었다.

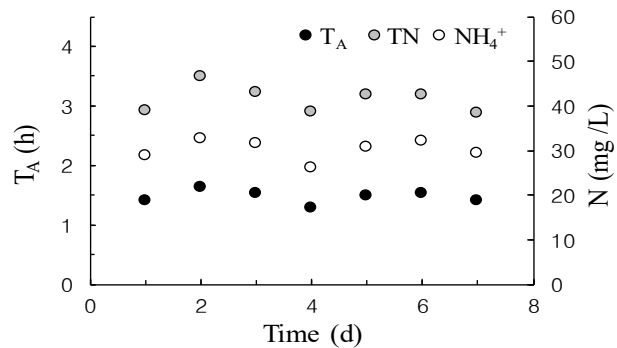


Fig. 7. Variation of aeration time with influent nitrogen loadings.

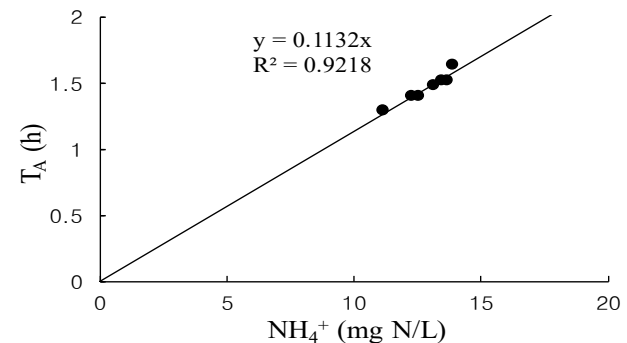


Fig. 8. Aeration time for nitrification.

Table 2. Treatment performance of the SBR

Constituent	Influent (average)	Effluent (average)	Removal (%)
COD (mg/L)	279-321 (303)	19-27 (23)	92
NH_4^+ (mg N/L)	26-33 (30)	0.4-1.4 (0.8)	97
TN (mg N/L)	38-47 (42)	8-11 (10)	76
TP (mg P/L)	4.3-5.2 (4.8)	0.9-1.8 (1.4)	70

pp. 413-420

pp. 421-428

pp. 429-436

pp. 437-446

pp. 447-456

pp. 457-467

pp. 469-480

pp. 481-489

4. 결 론

본 연구에서는 호흡률에 기반하여 연속회분식반응조의 포기공정을 예측제어한 운전결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 연속회분식반응조에서 주기내 호흡률은 질산화에 따라 뚜렷하게 변화하였으며, 호흡률이 급격히 감소한 이후 비교적 일정하게 나타나는 때는 질산화의 완료시점으로서 포기공정의 제어에 유용하게 활용할 수 있었다.

2) 호흡률에 기반한 예측제어를 통해 미리 신속하게 질산화 반응특성을 파악하였고 이에 기초하여 바로 이어지는 연속회분식반응조 주기에 최적의 포기시간을 설정함으로써 에너지를 저감하고 탈질효율을 향상시킬 수 있었다.

3) 하절기의 비교적 고온 환경에서 포기공정을 제어함으로써 용존산소가 제한되어 NOB가 일부 저해를 받는 것으로 판단되며 이를 이용하면 아질산화를 촉진할 수 있을 것으로 사료된다.

4) 포기공정을 예측제어하여 운전한 결과 유입수의 질소부하에 비례하여 적절하게 반응조의 포기시간을 설정할 수 있었으며, 따라서 유입수의 부하변동이 큰 경우에 이를 적용하면 더욱 효과적인 것이다.

References

- Al-Ghusain, I.A., Huang, J., Hao, O.J., and Lim, B.S. (1994). Using pH as a real-time control parameter for wastewater treatment and sludge digestion processes, *Water Sci. Technol.*, 30(4), 159-168.
- Åmand, L., Olsson, G., and Carlsson, B. (2013). Aeration control - A review, *Water Sci. Technol.*, 67(11), 2374-2398.
- Andreottola, G., Foladori, P., and Ragazzi, M. (2001). On-line control of a SBR system for nitrogen removal from industrial wastewater, *Water Sci. Technol.*, 43(3), 93-100.
- APHA, AWWA, and WEF (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, APHA, AWWA, WEF, Washington, DC.
- Artan, N., Wilderer, P., Orhon, D., Morgenroth, E., and Özgür, N. (2001). The mechanism and design of sequencing batch reactor systems for nutrient removal - The state of the art, *Water Sci. Technol.*, 43(3), 53-60.
- Baeza, J.A., Gabriel, D., and Lafuente, J. (2002). In-line fast OUR (oxygen uptake rate) measurements for monitoring and control of WWTP, *Water Sci. Technol.*, 45(4-5), 19-28.
- 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.
- Ginige, M.P., Kayaalp, A.S., Cheng, K.Y., Wylie, J., and Kaksonen, A.H. (2013). Biological phosphorus and nitrogen removal in sequencing batch reactors: effects of cycle length, dissolved oxygen concentration and influent particulate matter, *Water Sci. Technol.*, 68(5), 982-990.
- Gustavsson, D.J.I., Nyberg, U., and la Cour Jansen, J. (2008). Operation for nitrification of sludge liquor in a full-scale SBR, *Water Sci. Technol.*, 58(2), 439-444.
- Henze, M. (1992). Characterization of wastewater for modelling of activated sludge processes, *Water Sci. Technol.*, 25(6), 1-15.
- Ingildsen, P., Jeppsson, U., and Olsson, G. (2002). Dissolved oxygen controller based on on-line measurements of ammonium combining feed-forward and feedback, *Water Sci. Technol.*, 45(4-5), 453-460.
- Irvine, R.L. and Ketchum, Jr., L.H. (1989). Sequencing batch reactors for biological wastewater treatment, *CRC Crit. Rev. Environ. Control*, 18(4), 255-294.
- Kappeler, J. and 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.
- Lackner, S., Gilbert, E.M., Vlaeminck, S.E., Joss, A., Horn, H., and van Loosdrecht, M.C.M. (2014). Full-scale partial nitrification/anammox experiences - An application survey, *Water Res.*, 55, 292-303.
- Mauret, M., Ferrand, F., Boisdon, V., Spérandio, M., and Paul, E. (2001). Process using DO and ORP signals for biological nitrification and denitrification: validation of a food-processing industry wastewater treatment plant on boosting with pure oxygen, *Water Sci. Technol.*, 44(2-3), 163-170.



- 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.
- Rosso, D., Larson, L.E., and Stenstrom, M.K. (2008). Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants: state of the art, *Water Sci. Technol.*, 57(7), 973-978.
- US EPA (2010). *Nutrient Control Design Manual*. EPA/600/R-10/100, Cincinnati, 4-12-4-15.
- Vollertsen, J., Petersen, G., and Borregaard, V.R. (2006). Hydrolysis and fermentation of activated sludge to enhance biological phosphorus removal, *Water Sci. Technol.*, 53(12), 55-64.
- Vrečko, D., Hvala, N., Stare, A., Burica, O., Stražar, M., Levstek, M., Cerar, P., and Podbevšek, S. (2006). Improvement of ammonia removal in activated sludge process with feedforward-feedback aeration controllers, *Water Sci. Technol.*, 53(4-5), 125-132.
- Wett, B. and Ingerle, K. (2001). Feedforward aeration control of a Biocos wastewater treatment plant, *Water Sci. Technol.*, 43(3), 85-91.

pp. 413-420

pp. 421-428

pp. 429-436

pp. 437-446

pp. 447-456

pp. 457-467

pp. 469-480

pp. 481-489