



호흡률을 이용한 연속회분식반응조의 질산화 공정 해석

Nitrification process analysis by respirometry in a sequencing batch reactor

김동한^{1,*}·김성홍²

Donghan Kim^{1,*}·Sunghong Kim²

¹서원대학교 환경공학과, 충북 청주시 서원구 무심서로 377-3, 28674

²조선대학교 토목공학과, 광주광역시 동구 필문대로 309, 61452

¹Department of Environmental Engineering, Seowon University, 377-3 Musimseo-ro, Seowon-gu, Cheongju, Chungbuk, 28674

²Department of Civil Engineering, Chosun University, 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju, 61452

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

ABSTRACT

The respirometric technique has been used to analyze the nitrification process in a sequencing batch reactor(SBR) treating municipal wastewater. Especially the profile of the respiration rate very well expressed the reaction characteristics of nitrification. As the nitrification process required a significant amount of oxygen for nitrogen oxidation, the respiration rate due to nitrification was high. The maximum nitrification respiration rate, which was about 50 mg O₂/L·h under the period of sufficient nitrification, was related directly to the nitrification reaction rate and showed the nitrifiers activity. The growth rate of nitrifiers is the most critical parameter in the design of the biological nutrient removal systems. On the basis of nitrification kinetics, the maximum specific growth rate of nitrifiers in the SBR was estimated as 0.91 d⁻¹ at 20°C, and the active biomass of nitrifiers was calculated as 23 mg VSS/L and it was about 2% of total biomass.

Key words: Maximum specific growth rate, Nitrification, Respiration rate, Sequencing batch reactor

주제어: 최대비성장률, 질산화, 호흡률, 연속회분식반응조

1. 서론

공공수역의 부영양화를 제어하기 위하여 하폐수의 영양염류를 제거하는 생물학적 고도처리공정에서 질소화합물은 암모니아화, 질산화, 탈질 등의 반응을 거쳐 대기 중의 질소가스로 배출하여 제거한다. AOB(ammonia oxidizing bacteria)와 NOB(nitrite oxidizing bacteria)와 같은 질산화 미생물의 성장률은 종속영양

미생물에 비해 매우 느리므로 충분한 질산화를 도모하기 위해서는 고형물체류시간을 길게 운전하여야 한다. 또한 질산화 미생물은 용존산소, 온도, pH, 독성물질 등의 환경인자 변화에 큰 영향을 받으므로 여러 운전조건이 적절하게 충족되어야만 원활한 질산화 반응을 도모할 수 있다 (US EPA, 2010).

호흡률법(respirometry)은 미생물이 기질을 분해하는 대사과정 중에 산소를 섭취하는 속도인 호흡률(respiration rate)을 측정함으로써 생물학적 공정에서 유입수의 정상분석, 미생물의 활성도 평가, 동역학적

Received 12 January 2019, revised 23 January 2019, accepted 24 January 2019.

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

해석, 모델링 및 제어 등에 효과적으로 이용되어 왔다 (Ekama et al., 1986; Kappeler and Gujer, 1992; Henze et al., 2000; Daebel et al., 2007; Ruiz et al., 2011; Drownowski, 2014). 호흡률의 변화는 유기물 분해 및 질산화에 따른 반응과정을 직접적으로 나타내며, 특히 질산화에는 산소가 많이 소모되므로 이에 따른 호흡률도 매우 커서 질산화 공정의 반응특성을 모니터링하고 해석하는 데 유용하게 활용할 수 있다.

생물학적 고도처리공정 중의 하나인 연속회분식반응조(sequencing batch reactor)는 단일 반응조에서 시간에 따라 하수의 유입, 반응, 침전, 배출 등의 과정을 한 주기로 하여 회분식으로 운전된다. 질소와 인의 동시제거를 위한 호기, 무산소, 혐기의 환경조건을 포기를 조절함으로써 단일 반응조에서 매우 용이하게 구현할 수 있는 운전에서의 유연성이 가장 우수한 장점으로 중소규모의 처리장에 많이 이용되고 있다 (Irvine and Ketchum, 1989; Ketchum, 1997; Puig et al., 2007; Ginige et al., 2013). 연속회분식반응조는 회분식의 공정 운전특성으로 인하여 시간에 따라 생물학적 반응에 의한 호흡률의 변화가 뚜렷하게 나타나며, 특히 큰 호흡률을 유발하는 질산화는 그와 같은 경향이 더욱 명확하여 호흡률을 측정하면 효과적으로 질산화의 반응특성을 파악할 수 있다 (Kim and Kim, 2018). 생물학적 공정의 설계 및 운전에서 고형물체류시간은 미생물의 농도와 반응조의 크기에 영향을 주므로 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 보통 가장 느린 성장률을 나타내는 질산화 미생물의 고형물체류시간에 안전계수를 곱해서 설계 고형물체류시간을 결정하므로 질산화의 반응속도는 전체 공정의 설계에 큰 영향을 준다 (US EPA, 2010; Metcalf and Eddy, 2014). 따라서 본 연구에서는 호흡률을 이용하여 연속회분식반응조의 설계 및 운전에서 중요한 질산화 공정의 반응과정 및 특성을 파악하고 또한 동역학적 해석을 도모하고자 한다.

2. 재료 및 방법

호흡률을 이용하여 연속회분식반응조의 질산화 공정을 해석하기 위하여 실험실 규모로 반응조를 구성하였다. 원통형 아크릴을 사용하여 유효용적이 7 L가 되도록 제작하였으며, 교반기로 혼합하고 산기관으로 포기하였다. 펌프를 이용하여 하수를 유입하고 처리

수를 유출하였다. 유입수로 C시의 차집관거 토구에서 채취한 생활하수를 실험실로 운반하여 이용하였다. 반응조는 Table 1에 제시한 것과 같이 총 용량 7 L 중에서 주기당 3 L를 처리하고 하루에 3주기를 반복하여 운전하였으며, 따라서 수리학적 체류시간은 18.7 h 이었다. 고형물체류시간은 주기내 반응기말에 매일 일정량의 슬러지를 폐기하여 25 d가 되도록 유지하였다. 8 h인 각 주기는 유입기 0.5 h, 반응기 6 h, 침전기 1 h, 배출 및 휴지기 0.5 h로 운전하였다. 탈질과 인방출이 진행되도록 초기의 2 h와 침전 및 배출 기간의 1.5 h는 포기를 실시하지 않았다. 반응기에서 2~6.5 h에 해당되는 4.5 h 동안에 포기시간을 호흡률에 기초하여 조절하였다.

연속회분식반응조의 호흡률을 측정하기 위하여 Fig. 1과 같이 호흡반응조, 호흡셀, 펌프 등으로 측정 시스템을 구성하였다. 연속회분식반응조의 슬러지를 반응기중 포기가 시작되는 2 h 직전에 채취하여 호흡반응조에 주입하였고, 펌프를 이용하여 호흡반응조의 혼합액을 3.5~4분 주기로 호흡셀로 순환시켰다. 대기와 차단되어 밀폐된 구조의 호흡셀에서 펌프를 정지한 상태로 용존산소를 3초 간격으로 측정하였으며, 시간에 따른 용존산소의 선형적 감소율을 계산하여 호흡률을 구하였다. 컴퓨터를 이용하여 펌프의 작동을 제어하였고, 호흡률을 실시간으로 계속하였다. 또한 인공시료로 염화암모늄을 주입한 실험에서는 연속회분식반응조의 슬러지를 반응기말에 채취한 후 호흡률을 안정화시키기 위하여 약 30분 정도 포기를 하였으며, 아울러 pH 저하에 따른 질산화 저해를 방지하기 위하여 인공시료의 농도에 상응하는 알칼리도로 NaHCO_3 를 주입하였다. 그리고 하수를 주입한 실험에서는 미생물 농도를 연속회분식반응조와 거의 동일하게 하기 위하여 슬러지의 부피를 약 20% 줄여 농축한 후 동일한 부피의 하수를 주입하여 호흡률을 측정하였다.

Table 1. Operating conditions of 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

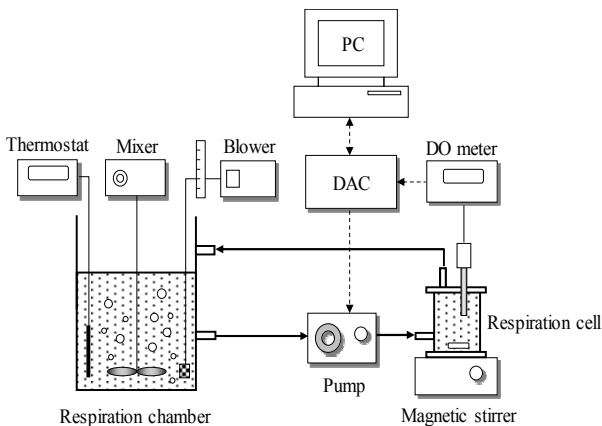


Fig. 1. Schematic of the respirometry system.

반응조는 하절기에 운전되어 온도가 다소 높은 28~31°C로 평균 29°C이었고, MLSS(MLVSS)는 1300~1550(1060~1220) mg/L로 평균 1398(1130) mg/L로 유지되었다. 포기시 반응조내 용존산소는 생물학적 반응에 영향을 받아 변화하였으며, 약 1.5~3.5 mg/L의 범위로 유지되었다. 유입수, 유출수, 반응조내의 시료를 주기적으로 채취하여 SS, VSS, NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, TN 등의 수질항목을 standard methods(APHA et al., 2012)에 따라 분석하였으며, 여과시료는 0.45 μm 막여과지를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 반응조의 호흡률 특성

연속회분식반응조에서 주기내 호흡률의 변화 (Kim, 2015)를 측정하고, 이에 따른 질소화합물(NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻)을 분석한 결과는 Fig. 2와 같다. 생물학적 처리에서 호흡률은 유기물의 분해, 질산화, 내생분해 등에 의해서 복합적으로 유발된다. 2 h에 포기시작과 동시에 호흡률 2~3개 정도의 매우 짧은 시간 동안 유기물에 의한 호흡률이 나타났다. 유기물은 미생물에 의한 분해속도에 따라 쉽게 분해되는(readily biodegradable) 유기물과 서서히 분해되는(slowly biodegradable) 유기물로 구분할 수 있으며, 그에 따른 호흡률 특성도 상이하게 나타난다. Ekama et al. (1986)의 선도적인 연구에 의하여 유기물을 분해속도에 따라 이원화한 구분은 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 ASM (activated sludge model) 모형 (Henze et al., 2000)에도 반영되어 있다. 포기시작과 동시에 나타난 호흡률은

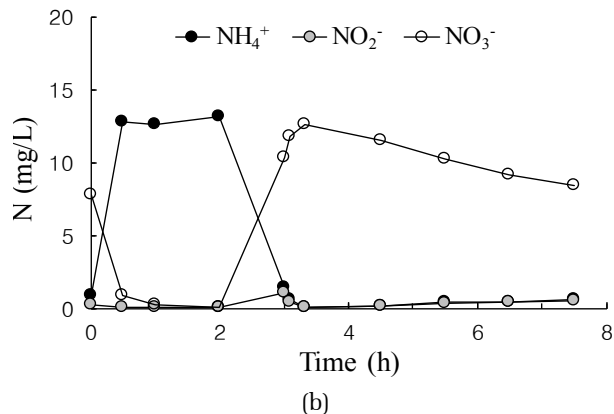
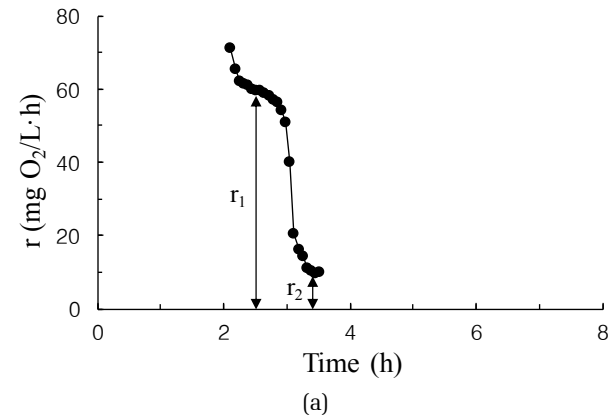


Fig. 2. Respiration rate (a) and nitrogen compounds (b) in the SBR.

그중 쉽게 분해되는 유기물에 의한 호흡률이며, 단순한 형태의 유기물로서 종속영양미생물이 바로 섭취하여 이용할 수 있어 가장 먼저 분해된다. 그러나 연속회분식반응조에서는 혐기기에 대부분의 쉽게 분해되는 유기물이 탈질 및 인방출에 소모되어 포기시작 시에는 적은 양만 남아 있기 때문에 호흡률이 짧은 시간에 빠르게 감소하였다.

이후 비교적 일정하면서 느리게 감소하는 r₁ 정도의 호흡률이 약 3 h까지 유지되었다. 이때의 호흡률은 질산화, 서서히 분해되는 유기물, 내생분해에 따른 호흡률로서, 질산화에 의해 매우 크며 동시에 서서히 분해되는 유기물과 내생분해에 따라 느리게 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 이 기간에 NH₄⁺는 최대질산화율의 속도로 빠르게 NO₂⁻ 및 NO₃⁻로 산화되었다. 3 h 이후부터는 NH₄⁺가 대부분 산화되면서 호흡률이 급격히 매우 크게 감소하였으며, 따라서 호흡률이 급격하게 감소하는 경향을 통해서 대부분의 질산화 반응이 완료되는 것을 뚜렷이 파악할 수 있다. 이후 다시 비

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

교적 일정하면서 작은 r_2 정도의 호흡률이 나타났는데, 이는 서서히 분해되는 유기물과 내생분해에 따른 호흡률이다. 주로 입상상인 서서히 분해되는 유기물은 쉽게 분해되는 유기물로 가수분해된 후 미생물에 의해 섭취되므로 반응속도가 많이 느려 내생분해와 함께 호흡률이 작게 나타났다.

그러므로 Fig. 2에서 (r_1 - r_2)의 호흡률이 질산화 반응에 의해 유발된 최대질산화호흡률로서 본 연속회분식 반응조에서는 약 $50 \text{ mg O}_2/\text{L}\cdot\text{h}$ 를 나타냈다. 최대질산화호흡률은 질산화 미생물의 활성을 직접적으로 나타내므로 반응조내 질산화 반응특성을 파악할 수 있는 유용한 지표이었다. 또한 연속회분식반응조에서 호흡률이 급격히 감소한 후 비교적 일정하게 나타나는 시점을 질산화 반응이 완료되는 때의 기준으로 하여 포기를 중단함으로써 포기시간을 조절할 결과 이후 NO_3^- 가 4.2 mg N/L 나 제거되어 많은 내생탈질(endogenous denitrification)을 달성하고 또한 포기에 따른 에너지도 저감할 수 있었다.

3.2 질산화에 따른 호흡률 변화

생물학적 처리공정의 질산화 반응과정에서 질산화 미생물(X_N)이 NH_4^+ 를 기질로 이용하여 에너지를 얻고 성장하는 대사과정 중에 최종전자수용체로 산소가 소모되며 이에 따른 호흡률(r_N)은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다 (Henze et al., 2000). Y_N 은 질산화 미생물의 수율(yield)이며, μ_N 은 비성장률이다. 연속회분식반응조에서 이와 같이 질산화에 따라 유발되는 호흡률의 변화만을 기타의 호흡률과 구분하여 가능한 뚜렷이 나타냄으로써, 질산화의 반응특성을 보다 용이하게 파악하기 위해 별도로 염화암모늄을 주입하고 호흡률을 측정된 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

$$r_N = \frac{4.57 - Y_N}{Y_N} \mu_N X_N \quad (1)$$

연속회분식반응조에서 반응기말에 슬러지를 채취하고 약 30분 포기하여 호흡률을 안정화시킨 후 염화암모늄을 7.5 mg N/L 가 되도록 주입하였다. 또한 질산화에 따라 pH가 저하되어 질산화 반응을 저해하지 않도록 알칼리도로 NaHCO_3 를 이론치인 $7.14 \text{ mg CaCO}_3/\text{mg N}$ 을 고려하여 100 mg/L 정도가 되도록 첨가하였다. 초기에는 내생호흡에 근접한 작은 호흡률을

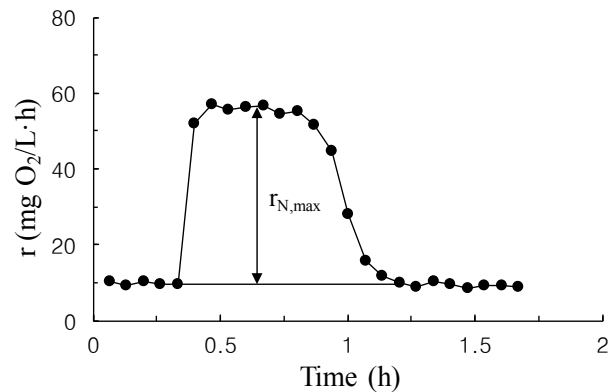


Fig. 3. Respiration rate with the addition of ammonium chloride.

나타내다 염화암모늄의 주입과 동시에 호흡률은 질산화에 따라서 급격히 상승하였다. 이후 비교적 일정하며 큰 호흡률이 유지되다가 대부분의 NH_4^+ 가 산화되어 감에 따라 호흡률이 급격히 감소하였고, 이어서 주로 내생분해에 따른 작은 호흡률이 유지되었다. 따라서 호흡률의 급격한 변화는 질산화 반응과정을 매우 잘 나타내었으며, 이에 기초하여 질산화 반응만의 동역학적 특성을 Fig. 2보다 명확히 구분하여 고찰할 수 있었다. Fig. 3의 $r_{N,max}$ 는 질산화에 의해 유발되는 최대질산화호흡률이다. 본 연속회분식반응조에서는 약 $47 \text{ mg O}_2/\text{L}\cdot\text{h}$ 를 나타내었으며, Fig. 2에 비해서는 약간 작으나 거의 비슷한 질산화 미생물의 활성도를 나타냈다.

Fig. 4는 연속회분식반응조의 반응기말에 슬러지를 채취하고 30분 정도 포기하여 호흡률을 안정화시킨 후 유입하수를 주입하여 호흡률을 측정된 결과이다. 연속회분식반응조의 질산화호흡률과 비교하기 위하여 채취한 슬러지 부피의 약 20% 정도를 줄여 농축한 후 줄인 부피와 동일한 부피의 하수를 주입함으로써 슬러지 농도가 반응조와 유사하도록 측정조건을 설정하였다. 하수주입과 동시에 약 $88 \text{ mg O}_2/\text{L}\cdot\text{h}$ 의 큰 호흡률이 짧은 시간 동안에 나타났다. 반응조에서는 Fig. 2와 같이 혐기말에 남아 있는 쉽게 분해되는 유기물이 많지 않아 이로 인한 호흡률이 작았는데, 하수를 주입한 결과는 유입하수의 쉽게 분해되는 유기물로 인하여 보다 큰 호흡률이 나타났다. 그러나 하수주입량이 많지는 않아 지속시간은 매우 짧았다. 이후 최대질산화호흡률이 유지되다가 약 0.5 h에 대부분의 NH_4^+ 가 질산화되면서 호흡률이 급격히 감소하였다. 따라서 Fig. 4에서 질산화에 따른 호흡률의 차이인 약



(61~13) mg O₂/L·h에 기초할 때 최대질산화호흡률은 48 mg O₂/L·h이었으며, 호흡률 변화를 통하여 질산화 반응특성을 효과적으로 파악할 수 있었다.

연속회분식반응조의 운전 경과에 따라 질산화 반응 속도가 변화하였는데 호흡률을 측정하여 질산화 반응 속도를 효율적으로 모니터링 할 수 있었다. 반응조의

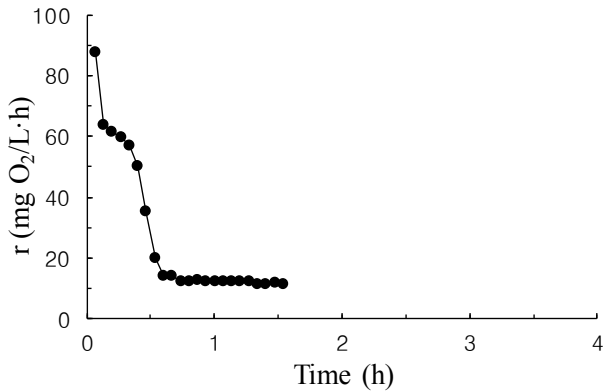


Fig. 4. Respiration rate with the addition of municipal wastewater.

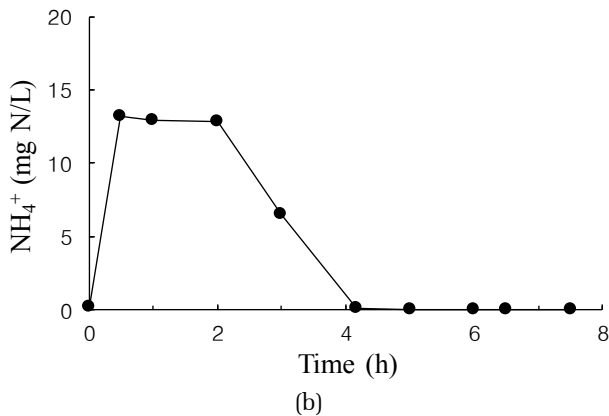
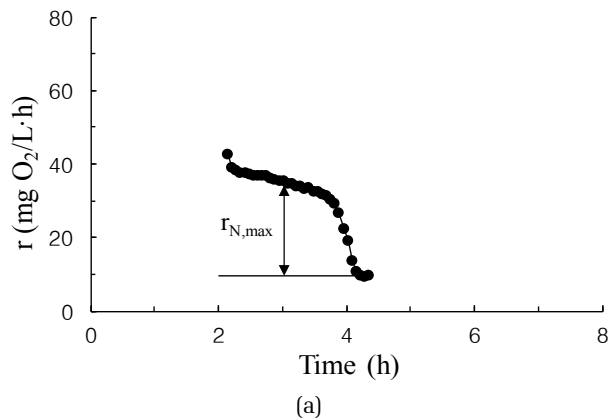


Fig. 5. Respiration rate (a) and NH₄⁺ (b) in the period of start-up.

운전초기에는 질산화 반응이 충분히 진행되지 않았는데 시간이 경과하면서 점차 반응속도가 빨라지고 질산화가 증가하여 나중에는 대부분의 질산화가 이뤄지도록 향상되었다. 이에 따른 반응조의 주기내 호흡률의 변화 (Kim, 2017)와 NH₄⁺의 분석결과는 Fig. 5 및 Fig. 6 과 같다. 운전초기의 시기에는 반응기중 2~6.5 h에 해당되는 4.5 h 동안에 포기시간을 조절하지 않고 호기 3 h, 무산소 1 h, 호기 0.5 h로 운전하였다. 운전초기 (Fig. 5)에는 질산화 반응속도가 느려 NH₄⁺가 완전히 질산화되는 데 2 h 정도가 소요되었으며 최대질산화 호흡률도 약 25 mg O₂/L·h에 불과하였다. 그러나 질산화 반응이 안정화된 시기(Fig. 6)에는 NH₄⁺가 완전히 질산화되는 데 1 h 정도가 소요되어 질산화 반응속도가 대략 2배 빨라졌으며, 이에 따른 최대질산화호흡률도 47 mg O₂/L·h로 약 2배 정도 큰 호흡률을 나타냈다. 따라서 최대질산화호흡률은 질산화 반응속도에 직접적으로 비례하였으며, 연속회분식반응조의 질산화 공정특성을 매우 잘 나타냈다.

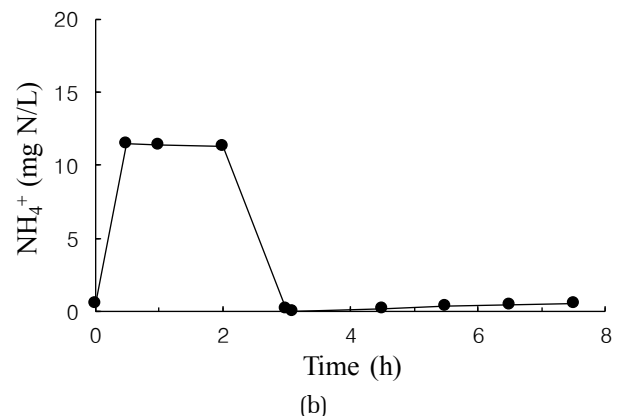
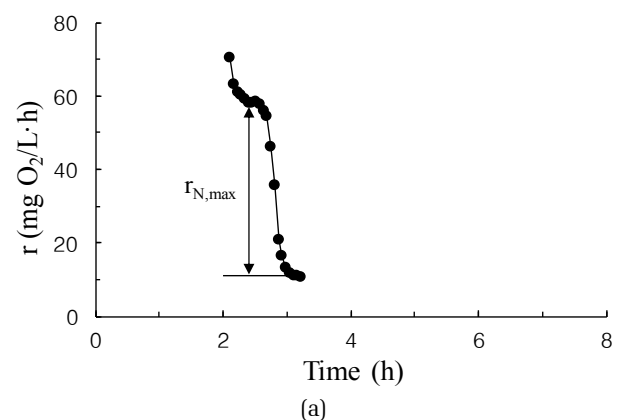


Fig. 6. Respiration rate (a) and NH₄⁺ (b) in the period of higher nitrifiers activity.

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

3.3 질산화 반응속도 분석

생물학적 처리공정의 설계에서 가장 중요한 요소에 해당되는 것은 고형물체류시간으로서 반응조내 미생물의 양과 반응조의 크기에 영향을 준다. 일반적으로 반응조내 미생물 중에서 질산화 미생물의 성장속도가 가장 느리므로 질산화 미생물의 성장속도에 기초한 최소한의 고형물체류시간에 안전계수를 곱하여 공정의 고형물체류시간으로 설계한다. 따라서 질산화 미생물의 성장속도는 공정의 설계에서 매우 중요하며, 본 연속회분식반응조를 대상으로 이와 연관된 질산화 반응속도에 대한 분석을 실시하였다.

질산화 미생물의 성장률은 비성장률을 Monod식으로 표현하면 식 (2)와 같다. 기질(S_N)인 NH_4^+ 가 반포화상수(K_N)에 비하여 충분하면 최대질산화율로 NH_4^+ 는 빠르게 NO_2^- 및 NO_3^- 로 산화된다. NO_3^- 와 NO_2^- 의 합인 질소산화물(S_{NO})을 기준으로 하여 최대질산화율을 나타내면 식 (3a)와 같이 된다. 따라서 연속회분식반응조에서 최대질산화호흡률이 유지되는 기간의 최대질산화율에 기초하여 식 (3b)와 같이 질산화 미생물의 최대비성장률인 $\mu_{N,max}$ 를 계산할 수 있다. 이때 (X_N/Y_N)의 값이 필요한데 주기내 최대질산화율이 나타나는 약 1 h 정도의 시간에 X_N 의 변화는 무시할 만하므로 일정한 값으로 보고 물질수지식에 기초하여 식 (4)와 같이 산정할 수 있다 (Melcer et al., 2003).

$$\frac{dX_N}{dt} = \mu_{N,max} \frac{S_N}{K_N + S_N} X_N \quad (2)$$

$$\frac{dS_{NO}}{dt} = \frac{\mu_{N,max}}{Y_N} X_N \quad (3a)$$

$$\mu_{N,max} = \frac{1}{(X_N/Y_N)} \frac{dS_{NO}}{dt} \quad (3b)$$

$$\frac{X_N}{Y_N} = \frac{Q(TN_i - NH_{4,e} - N_S)\theta_X}{V(1 + b_N\theta_X)} \quad (4a)$$

$$N_S = f_N \frac{VX}{Q\theta_X} \quad (4b)$$

Table 2와 같이 문헌에서 보고된 동역학적 계수들의 값을 참고하였으며, 연속회분식반응조가 비교적 안정화된 약 2주간의 운전자료의 평균값인 고형물체류시간(θ_X)

25 d, 수리학적 체류시간(V/Q) 18.7 h, 유입수의 TN(TN_i) 35 mg N/L, 유출수의 NH_4^+ ($NH_{4,e}$) 0.8 mg N/L, MLVSS(X) 1130 mg/L, 미생물 세포내의 질소비율(f_N) 0.1 mg N/mg VSS를 적용하였다. 또한 내생분해율(b_N)은 20°C의 0.17 d⁻¹ 값에 온도보정상수(θ) 1.029 (US EPA, 2010)를 적용하고, 본 반응조가 운전된 하절기의 평균온도 29°C에서의 값으로 식 (5b)를 이용하여 환산한 0.22 d⁻¹를 적용하였다. 산정 결과 (X_N/Y_N)은 152 mg N/L로 나타났다.

$$\mu_{N,max T} = \mu_{N,max 20} \theta^{(T-20)} \quad (5a)$$

$$b_{N,T} = b_{N,20} \theta^{(T-20)} \quad (5b)$$

본 연속회분식반응조에서 최대질산화율은 Table 3과 같이 9.9~11.4 mg N/L·h로서 평균 10.7 mg N/L·h이었다. 앞서 산정한 (X_N/Y_N)값 152 mg N/L를 적용하고 식 (3b)를 이용하여 계산한 결과 질산화 미생물의 최대비성장률 $\mu_{N,max}$ 는 1.58~1.80 d⁻¹로서 평균 1.70 d⁻¹로 나타났다. 이는 반응조가 운전된 평균 29°C에서의 결과이므로 온도보정상수(θ) 1.072 (US EPA, 2010)를 적용하고 식 (5a)를 이용하여 20°C에서의 값으로 환산한 결과 0.91 d⁻¹로 추정되었다. Table 2와 같이 질산화 미생물의 최대비성장률은 0.2~3.0 d⁻¹의 범위로 다양한 값이 보고되었는데 본 연구에서 추정된 결과는 US EPA(2010)의 0.90 d⁻¹와 매우 유사한 값을 나타내었다. 생물학적 처리공정의 설계에서 질산화 미생물의 최대비성장률은 지역적 특성을 고려하고 가능한 실험적 결과에 기초하여 적용하는 것이 바람직하나 국내의 생활하수를 대상으로 한 경우 질산화 미생물의 최대비성장률로 0.91 d⁻¹를 적용하는 것이 무난할 것으로 사료된다.

또한 질산화 미생물의 수율 Y_N 을 식 (4a)에 곱하면 질산화 미생물의 활성미생물량(active biomass)인 X_N 을 추정할 수 있다. 산정결과인 (X_N/Y_N)의 152 mg N/L에 Y_N 으로 0.15 mg VSS/mg N을 적용하여 곱하면 X_N 은 23 mg VSS/L로 나타났다. 따라서 전체 미생물(X) 중에서 활성미생물 기준의 질산화 미생물(X_N)은 약 2%에 해당되었다. Rittmann et al. (1999)은 다수의 하수처리장 현장자료에 기초하여 분석한 결과 전체 미생물(VSS) 중에서 활성미생물 기준의 질산화 미생물 비율이 0.9~6.2% 정도라고 보고하였다. 이 비율은 주로 유입수의 성상(유기물과 질소의 비율)과 고형물체류시간에 따라 상이한데, 약 2%인 본 연구결과는 생활하수를 대상으로 한 처리장의 일반적인 수준에 가까운 것으로 판단된다.



Table 2. Kinetic coefficients for nitrification

Coefficient	Value	Ref.
$\mu_{N,max}^1$ (d ⁻¹)	0.90	US EPA (2010)
	0.84-1.62	US EPA (1993)
	0.20-0.90	Metcalf & Eddy (2003)
	0.30-3.00	Metcalf & Eddy (1991)
b_N^2 (d ⁻¹)	0.17	US EPA (2010)
	0.05-0.15	Metcalf & Eddy (2003)
	0.03-0.06	Metcalf & Eddy (1991)
Y_N^3 (mg VSS/mg N)	0.15	US EPA (2010)
	0.06-0.20	US EPA (1993)
	0.10-0.15	Metcalf & Eddy (2003)
	0.10-0.30	Metcalf & Eddy (1991)
f_N^4 (mg N/mg VSS)	0.12	Metcalf & Eddy (2014)
	0.10	Melcer et al. (2003)

¹Maximum specific growth rate

²Decay rate

³Yield

⁴N content of biomass

Table 3. Estimated maximum specific growth rate of nitrifiers

Coefficient	Value	
	Range	Average
dS_{NO}/dt (mg N/L/h)	9.9-11.4	10.7
$\mu_{N,max}$ (d ⁻¹)	1.58-1.80	1.70

4. 결 론

본 연구에서는 호흡률을 이용하여 연속회분식반응조의 질산화 공정을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 호흡률의 변화는 연속회분식반응조의 생물학적 반응과정을 잘 나타내었다. 호흡률은 반응조내 유기물의 분해, 질산화, 내생분해에 따라 유발되었으며, 특히 질산화에 따른 호흡률은 매우 높은 수준을 나타내었고 그 변화도 명확하여 질산화 반응특성을 잘 파악할 수 있었다.

2) 인공시료인 염화암모늄을 주입하고 호흡률을 측정한 결과 질산화에 의한 호흡률만을 보다 뚜렷하게 구분할 수 있었으며, 최대질산화호흡률은 질산화 미생물의 활성도를 나타내는 유용한 지표이었다.

3) 연속회분식반응조의 운전과정에서 질산화 반응의 진행정도에 따라 나타나는 호흡률의 크기도 변화

하였다. 최대질산화호흡률의 크기는 질산화 반응속도에 직접적으로 비례하였으며 따라서 반응조의 질산화 공정특성을 매우 잘 나타냈다.

4) 연속회분식반응조에서 질산화 반응속도를 분석한 결과 질산화 미생물의 최대비성장률은 20°C에서의 값을 기준으로 할 때 0.91 d⁻¹로 추정되었다. 또한 활성미생물 기준의 질산화 미생물은 전체 미생물 중에서 약 2% 정도에 해당되는 것으로 분석되었다.

References

APHA, AWWA, and WEF (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, APHA, AWWA, WEF, Washington, DC.

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.

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, 50-63.

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.

Ketchum, Jr., L.H. (1997). Design and physical features of sequencing batch reactors, *Water Sci. Technol.*, 35(1), 11-18.

Kim, D.H. (2015). "Nitrification monitoring by respirometry in a sequencing batch reactor", *Proceedings of the 2015 Co-Conference of the Korean Society of Water and*

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

- Wastewater and Korean Society on Water Environment*, Korean Soc. Water and Wastewater and Korean Soc. Water Environ., 333-334.
- Kim, D.H. (2017). "Nitrification process analysis and control based on oxygen uptake rate in a sequencing batch reactor", *Proceedings of the 2017 International Environmental Engineering Conference*, Korean Soc. Environ. Eng., 570-571.
- Kim, D. and Kim, S. (2018). Aeration control based on respirometry in a sequencing batch reactor, *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, 32(1), 11-18.
- Melcer, H., Dold, P.L., Jones, R.M., Bye, C.M., Takacs, I., Stensel, H.D., Wilson, A.W., Sun, P., and Bury, S. (2003). *Methods for Wastewater Characterization in Activated Sludge Modeling*, Water Environment Research Foundation, Alexandria, 14-4-16-9.
- Metcalf & Eddy. (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*, McGraw-Hill, New York, 701.
- Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, McGraw-Hill, New York, 705.
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*, McGraw-Hill, New York, 723-755.
- Puig, S., Corominas, L.I., 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.
- Rittmann, B.E., Laspidou, C.S., Flax, J., Stahl, D.A., Urbain, V., Harduin, H., van der Waarde, J.J., Geurkink, B., Henssen, M.J.C., Brouwer, H., Klapwijk, A., and Wetterauw, M. (1999). Molecular and modeling analyses of the structure and function of nitrifying activated sludge, *Water Sci. Technol.*, 39(1), 51-59.
- Ruiz, L.M., Arévalo, J., Parada, J., González, D., Moreno, B., Pérez, J., and Gómez, M.A. (2011). Respirometric assays of two different MBR (microfiltration and ultrafiltration) to obtain kinetic and stoichiometric parameters, *Water Sci. Technol.*, 63(11), 2478-2485.
- US EPA. (1993). *Manual Nitrogen Control*. EPA/625/R-93/010, Washington, DC, 88-90.
- US EPA. (2010). *Nutrient Control Design Manual*. EPA/600/R-10/100, Cincinnati, 4-6-4-18.