

최대 호흡율을 이용한 활성슬러지 모델 No.1 보정: 자가영양균 최대비성장을 추정

최은희[†] · B. Buys* · H. Temmink* · B. Klapwijk*

Subdepartment of Environmental Technology, *Wageningen University, Netherlands

(2005년 2월 17일 접수, 2005년 4월 18일 채택)

Calibration of Activated Sludge Model No. 1 using Maximum Respiration Rate: Maximum Autotrophs Specific Growth Rate

Choi, E.H.[†] · B. Buys* · H. Temmink* · B. Klapwijk*

Subdepartment of Environmental Technology, *Wageningen University, Netherlands

ABSTRACT : A method to estimate the autotrophic maximum specific growth rate is presented in this paper. First of all, the concentration of nitrifier is simulated based on the amount of N nitrified, the sludge age and the default value for the decay coefficient. Secondly the OUR of the sludge with access of ammonia is measured. The maximum specific growth rate can be calculated as $\mu_{max,A} = OUR_{max,A}/Y_A$. It was demonstrated that the maximum specific growth rate of autotrophic biomass is not a constants but a time variable parameter. It is concluded that using $OUR_{max,A}$ for dynamic estimating maximum specific growth rate is a good approach and that using a constant value for the maximum specific growth rate over a longer period of time could not predict the performance of activated sludge plants.

Key Words : Activated Sludge Model No. 1, Autotrophs Maximum Specific Growth Rate, Maximum Respiration Rate

요약 : 본 논문에는 자가영양균의 최대비성장을 추정법이 제시되었다. 먼저 질산화균의 농도가 질산화 된 암모니아, 슬러지 일령 및 사멸계수를 이용하여 시뮬레이션 되었고, 다음단계로 과잉암모니아를 공급하여 질산화균의 호흡율을 측정하였다. 자가영양균의 최대비성장율은 $\mu_{max,A} = OUR_{max,A}/Y_A$ 의 관계를 통해 계산되어질 수 있으며 추정된 최대비성장율은 운전기간에 걸쳐 일정한 값을 가지지 않고 시간에 따라 변화한다는 결과를 얻었다. 본 연구를 통해 최대호흡율을 이용한 최대비성장율의 동적 추정법이 수행되었고, 일정한 최대비성장율을 이용한 처리장 운전결과 예측은 처리장 거동을 예측할 수 없으며 활성슬러지공정의 성능예측을 위한 시뮬레이션을 위해서는 동적 추정된 매개변수의 사용이 필요함을 확인하였다.

주제어 : 활성슬러지 모델 No. 1, 자가영양균 최대비성장율, 최대호흡율

1. 서론

1987년 활성슬러지모델 No. 1(ASM1)이 소개된 후¹⁾ 활성 슬러지 공정의 수학적 모델링을 위한 모범이 되어왔고, 하·폐수처리장의 설계와 개선을 위한 실질적인 목적으로 광범위하게 이용되고 있다. 정확한 모델링을 위해서는 모델의 입력변수로써 사용되는 매개변수들과 대상 폐수의 성상 분석이 필수적인데, ASM1 보고서가 발간될 당시 이미 대부분의 매개변수와 폐수 성상을 분석할 수 있는 기법들이 제시되었고, 다양한 방법의 동력학 매개변수 추정법이 사용되고 있지만, 여전히 정확한 매개변수를 추정하는 것은 어려운 일이다. 다양한 매개변수 중 최대 비성장율(μ_{max})은 활성슬러지 공정설계를 위한 중요한 매개변수이고 추정을 위한 다양한 방법들이 제시되었지만 여전히 신뢰성 있는 값을 얻기는 어렵다.^{2,3)}

활성슬러지 호흡율을 이용한 폐수특성 분석 및 매개변수 추정법도 다양하게 연구되어 오고 있다.^{4,5)} 자가영양균 최대 호흡율($OUR_{max,A}$)은 최대비성장율($\mu_{max,A}$), 잉여계수 및 미생물 농도의 함수로 표현되며(식 (1)), 실시간 연속측정이 가능한 $OUR_{max,A}$ 를 이용할 경우 $\mu_{max,A}$ 의 동적 추정이 가능하다. 자가영양균(X_{BA})의 농도는 제거된 기질의 양, 잉여계수(Y_A) 및 사멸계수(b_A)를 알고 있으면 식 (2)를 통해 추정 가능하다.

$$OUR_{max,A} = \frac{4.57 - Y_A}{Y_A} \mu_{max,A} X_{BA} \quad (1)$$

$$\frac{dX_{BA}}{dt} = Q_i Y_A (S_i - S_e) - b_A X_{BA} V \quad (2)$$

본 연구에서는 연속 측정된 $OUR_{max,A}$ 을 이용한 $\mu_{max,A}$ 의 동적추정 방법을 설명하고, $\mu_{max,A}$ 를 추정하였다. 도시하수 처리장에서 연속 유입된 폐수를 처리하는 완전혼합반응기와 2차 침전조로 구성된 파일럿플랜트를 통해 시뮬레이션

[†] Corresponding author
E-mail: ehchoi@karico.co.kr
Tel: 031-420-3919

Fax: 031-424-6676

을 위한 자료가 수집되었는데, 먼저 질산화균의 농도가 질산화 된 암모니아, 슬러지 일령 및 사멸계수를 이용하여 시뮬레이션 되었다. 추정된 미생물농도는 실측된 미생물농도로 검증되었다. 다음단계로 과잉 공급된 암모니아로 연속 측정된 $OUR_{max,A}$ 와 XBA를 이용해 $\mu_{max,A}$ 가 추정되었고 추정된 $\mu_{max,A}$ 는 운전기간에 걸쳐 일정한 값을 가지지 않고 시간에 따라 변화한다는 결과를 얻었다.

2. 재료 및 방법

2.1. 파일럿플랜트

본 연구에서 사용된 파일럿 플랜트는 완전혼합반응기와 침전조로 구성되어 있다(Fig. 1). Bennekom 하수처리장(네덜란드)에서 1차 침전 처리된 하수는 연속적으로 균등화조에 공급되고 혐기 선택조를 통과하여 폭기조로 공급되었다. 반송슬러지는 유입수와 동일한 유량으로 2차 침전조로부터 반송되었으며, 선택조에서 유입수와 혼합된 후 포기조로 공급되었다. 과잉 슬러지는 포기조에서 직접 폐기되었고 포기조에서 슬러지는 연속적으로 호흡을 측정기로 공급되어 과잉 공급된 암모니아를 통해 $OUR_{max,A}$ 이 측정 및 분석되었다.

2.2. 파일럿플랜트 운전

본 실험에서 적용된 유량과 부피 조건은 Table 1에 나타내었다. 파일럿플랜트 운전조건은 Table 2와 같이 초기에 플랜트는 MLVSS 농도가 안정화 될 때까지 슬러지체류시간(SRT) 4.9일로 운전되었다. 짧은 SRT로 인해 상대적으로 낮은 농도의 질산화균을 함유한 슬러지의 배양이 가능하였다. 다음 단계로 슬러지 폐기는 중단되었고 이로 인해 질산화균의 증식이 가능하였다(Table 2). 포기조의 pH는 수산화

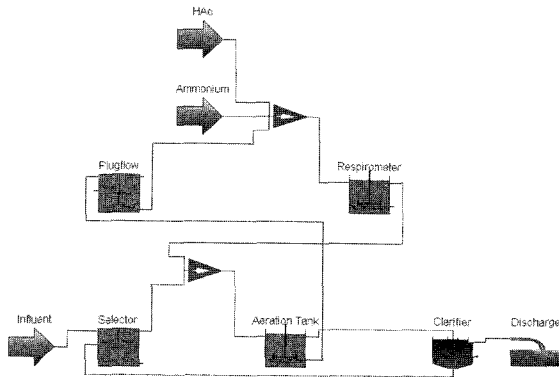


Fig. 1. Schematic of the pilot plant-scale activated sludge plant and respirometer.

Table 1. Volumes and flow-rates for the activated sludge plant and the maximum respiration rate measurement set-up

Parameter	Volume (L)					Flow-rate (L/hr)			
	Aeration tank	Settler	Plug flow tank	Respiration vessel	Selector	Influent	Return sludge	Through plug flow tank	Through respiration vessel
Value	475	159	30	0.72	8	40	40	20	20

Table 2. Chronological overview of main operational characteristics action

Time (day)	Operation
0	Start of measurements: excess sludge wastage = 2.65 Lhr ⁻¹ ; SRT 4.9 day.
8	Excess sludge wastage-rate= 0.
34	End of experiment

나트륨을 이용하여 7.4-7.6의 범위에서 유지되었고, DO 농도는 PID제어를 통해 4.0 mg/L를 유지하도록 제어되었다.

2.3. 호흡율 측정

Fig. 1에서와 같이 포기조의 활성슬러지는 먼저 전폭기조(plug-flow vessel)로 공급되어(20 L/hr) 생물학적으로 쉽게 분해되는 기질 및 질산화 가능 기질이 제거된 후 연속호흡 호흡을 측정기로 공급되어 내생호흡율과 $OUR_{max,A}$ 이 측정되었다. $OUR_{max,A}$ 측정을 위해 과잉의 암모니아(440 mL/hr, 439 mg NH₄-N/L)가 공급되었으며, $OUR_{max,A}$ 을 얻기 위한 암모니아 공급량은 동일한 실험조건에서 서로 다른 농도를 갖는 암모니아를 이용한 별도의 최대호흡을 측정실험을 통해 얻어졌다. 호흡율은 1분 간격으로 측정되었으며, 내생호흡율과 $OUR_{max,A}$ 은 1시간 간격으로 교대로 측정되었다. 각 단계의 마지막 5분간 측정된 호흡을 측정결과를 평균하여 모델보정을 위한 자료로 사용하였다.

2.4. 모델 보정

본 연구에서는 자가영양균 최대 비성장율을 추정하기 위해 활성슬러지 모델 No. 1을 사용하였고, 모델보정 및 시뮬레이션을 위해 GPS-X 시뮬레이터⁷⁾가 사용되었다. 자가영양균의 최대비성장율을 제외한 모델보정 및 시뮬레이션에 사용된 동력학 및 양론계수값은 IAWQ technical report¹⁾를 근거로 하였다. 동력학 및 양론계수를 제외한 시뮬레이션에 사용된 데이터는 실험기간동안 실측되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 파일럿플랜트 운전결과

Fig. 2와 Fig. 3에서 보여주는 것과 같이 전체 운전기간을 통해 평균 COD 제거율은 74%이었다. 운전일수 29일째를 제외한 전체 운전기간동안 완전한 질산화가 일어났으며 유출수 암모니아 농도는 항상 1 mgN/L 이하로 유지되었다. 운전일수 9일과 12일 사이 및 운전일수 15일과 18일 사이에서 유입수 농도가 다른 연구기간에 비해 낮은 것은 강우에 의한 영향이다.

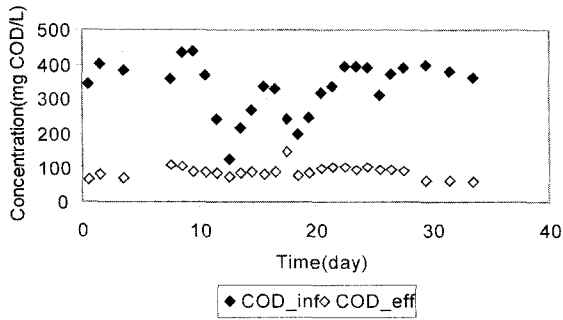


Fig. 2. Profiles of COD concentration in influent and effluent.

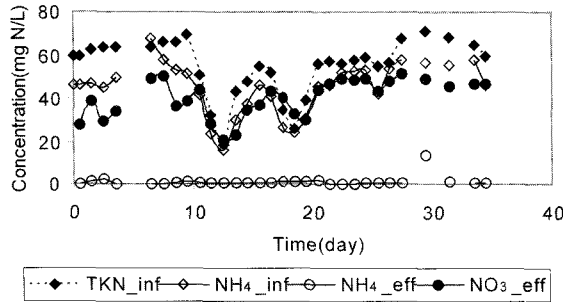


Fig. 3. Profiles of TKN, ammonium and nitrate nitrogen concentration in influent and effluent.

3.2. 미생물 농도 추정 및 검증

파일럿플랜트 운전기간을 통해 기질의 제거율 및 부하율 자료를 얻을 수 있었고, 이를 바탕으로 미생물의 농도가 식 (2)에 의해 추정되었다. 질산화균 농도(X_{BA})와 $\mu_{max,A}$ 의 독립적인 관계를 확인하기 위해 다양한 값을 가지는 $\mu_{max,A}$ 와 b_A 의 조합을 이용하고, 그 외 변수들은 ASM No. 1¹⁾을 활용하여 X_{BA} 를 추정하였다. 이를 통해 X_{BA} 는 $\mu_{max,A}$ 에 독립적이고, 단지 Y_A 와 사멸계수 b_A 에 영향을 받음을 확인하였다(Fig. 4). 정확한 X_{BA} 는 실측이 어렵기 때문에 실측된 MLSS농도를 이용하여 추정된 X_{BA} 를 검증하였다. 시뮬레이터를 이용하여 추정된 MLSS는 실측 MLSS와 좋은 상관관계를 가짐을 Fig. 5를 통해 알 수 있다.

3.3. X_{BA} 와 $OUR_{max,A}$ 을 기초로 한 $\mu_{max,A}$ 추정

$\mu_{max,A}$ 는 식 (1)을 이용하여, 측정된 $OUR_{max,A}$ 와 추정된

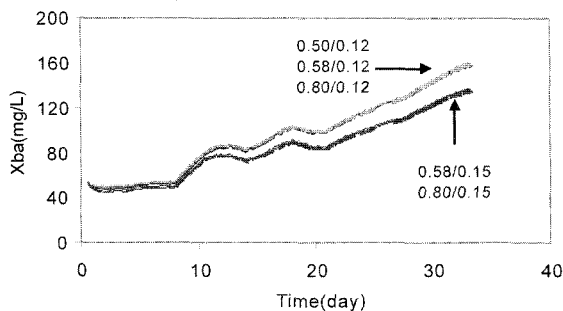


Fig. 4. Comparison of autotrophs concentration according to changing $\mu_{max,A}$ and b_A , with default parameters value from Henze et al.(1986)

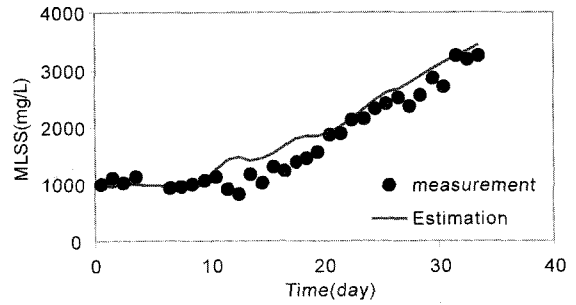


Fig. 5. Measured and simulated MLSS concentration($\mu_{max,A}$: 0.8, b_A : 0.15).

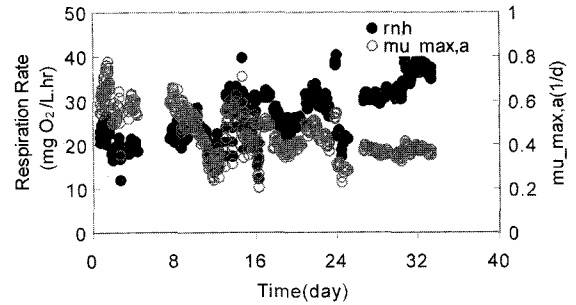


Fig. 6. Time variable behaviour of $OUR_{max,A}$ and $\mu_{max,A}$.

X_{BA} 로부터 계산되었다. Fig. 6은 측정된 $OUR_{max,A}$ 와 추정된 $\mu_{max,A}$ 를 나타내었다. 이 결과 $\mu_{max,A}$ 는 상수의 값을 가지지 않고 0.2-0.8/day에서의 변화함을 보여주고 있다.

3.4. 검증

동적시뮬레이션을 통해 추정된 $\mu_{max,A}$ 를 검증하기 위해 파일럿플랜트 유출수 자료를 이용하였다. 전체 실험기간에 대한 시뮬레이션이 수행되었고 시뮬레이션결과는 측정치와 좋은 상관관계를 가지고 있음을 알 수 있다(Fig. 7, Fig. 8).

이 결과들을 통해 다음과 같은 의문점이 부각되었다. “왜 $\mu_{max,A}$ 는 동일한 운전조건을 가지는 운전기간에 대해 일정하지 않을까?” 먼저 시뮬레이션 과정에서 일정한 pH와 일정한 온도조건을 이용하였지만 파일럿플랜트 운전동안 포기조 온도는 18-23℃ 범위에서 변화하였다. 질산화율의 경우 온도에 매우 민감해서 15-25℃ 범위에서는 5℃ 온도차에 의해 최대 질산화율은 2배 차이가 있다는 연구결과⁸⁾에 의해, 온도변화를 측정된 $OUR_{max,A}$ 와 이를 통해 추정된 $\mu_{max,A}$ 변

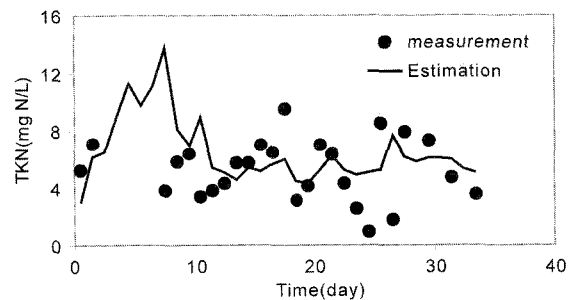


Fig. 7. Measured and simulated (with varying max) TKN concentrations in the effluent.

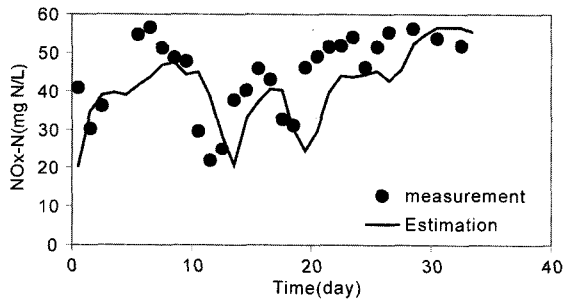


Fig. 8. Measured and simulated (with varying max) NO_x-N concentrations in the effluent.

화의 원인으로 가정할 수 있다. 그러나 단기간의 $OUR_{max,A}$ 변화는 온도 변화만으로는 설명될 수 없다.

$OUR_{max,A}$ 변화를 슬러지 유실(washout)의 영향으로 가정할 수 있다. 그러나 유출수의 SS농도는 항상 20 mg/L 이하로 유지되었고, 측정된 $OUR_{max,A}$ 의 감소를 슬러지 유실 영향으로 설명하기 위해서는 적어도 50% 이상의 슬러지 유실이 일어나야 된다.

마지막으로 유입수에 함유된 독성물질의 저해효과를 예상할 수 있지만 유입수는 가정하수로 구성되어 있기 때문에 $OUR_{max,A}$ 의 변화를 설명하기에는 부족하다.

관찰된 $OUR_{max,A}$ 의 변화는 활성슬러지의 본질적인 특성에 의한 영향으로 생각될 수 있는데, 운전일수 8일과 16일 사이에 다량의 원생동물이 관찰되었다. 원생동물은 활성슬러지 박테리아를 먹이로 하고 유사한 성장특성을 가지지만⁹⁾ 이 상호관계는 본 연구에서 사용된 모델(ASM No. 1)에 포함되어 있지 않다. 원생동물에 의한 미생물 포식은 사멸율의 증가로 나타날 수 있고 이는 낮은 최대비성장율의 감소를 설명할 수 있지만 원생동물만으로 다른 기간의 $\mu_{max,A}$ 변화를 설명할 수는 없다.

4. 결론

본 논문에는 자가영양균의 최대비성장을 추정법이 제시되었다. 먼저 질산화균의 농도가 질산화 된 암모니아, 슬러지 일령 및 사멸계수를 이용하여 시뮬레이션 되었다. 다음 단계로 과잉암모니아를 공급하여 질산화균의 호흡율을 측정하였다. 최대비성장율은 $\mu_{max,A} = OUR_{max,A}/Y_A$ 의 관계를 통해 계산되어질 수 있다. 추정된 최대비성장율을 이용한 파일럿플랜트 시뮬레이션결과는 실측된 운전결과와 좋은 상관관계를 가지고, 장기간 폐수처리장 거동 예측을 위한 가능성을 보여준다. 또한 추정된 최대비성장율은 운전기간에 걸쳐 일정한 값을 가지지 않고 시간에 따라 변화한다는 결과를 얻었다. 본 연구를 통해 최대호흡율을 이용한 최대비성장율의 동적 추정법이 수행되었고, 일정한 최대비성장율을 이용한 처리장 운전결과 예측은 처리장 거동을 예측할 수 없으며 활성슬러지공정의 성능예측을 위한 시뮬레이션을 위해서는 동적 추정된 매개변수의 사용이 필요함을 확인하였다.

사 사

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원에 의하여 연구되었습니다.

기호설명

b_A	= Autotrophs decay rate (1/day)
$OUR_{max,A}$	= Maximum ammonia oxygen uptake rate (mg O ₂ /L.hr)
Q_i	= Influent flowrate (l/day)
S_i	= Concentration of influent ammonium nitrogen (mg N/L)
S_e	= Concentration of effluent ammonium nitrogen (mg N/L)
V	= reactor volume (L)
X_{BA}	= Concentration of autotrophs (mg/L)
Y_A	= Autotrophic yield coefficient (mg COD/mg N)
$\mu_{max,A}$	= Autotrophs maximum specific growth rate (1/day)
μ_{max}	= Maximum specific growth rate (1/day)

참고문헌

1. Henze, M., Grady, C. P. L. Jr., Gujer, W., Marais, G. v. R., and Matsuo, T., "IAWQ Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment] Activated sludge model No. 1, Scientific and Technical Reports No. 1," IAWQ(1986).
2. Sözen, S., Orhon, D., and San, H. A., "A new approach for the evaluation of the maximum specific growth rate in nitrification," *Water Res.*, **30**(7), 1661~1669(1996).
3. Novak, L., Larrea, L., and Wanner, J., "Estimation of maximum specific growth rate of heterotrophic and autotrophic biomass: A combined technique of mathematical modeling and batch cultivations,cultivations," *Water Sci. Technol.*, **30**(11), 171~180(1994).
4. Sollfrank, U. and Gujer, W., "Characterization of domestic wastewater for mathematical modelling of the activated sludge process," *Water Sci. Technol.*, **23**(4-6), 1057~1066(1991).
5. Spanjers, H. and Vanrolleghem, P., "Respirometry as a tool for rapid characterization of wastewater and activated sludge," *Water Sci. Technol.*, **31**(2), 105~114(1995).
6. Spanjers, H., "Respirometry in activated sludge," Ph.D. thesis, Wageningen Agricultural University(1993).
7. Hydromantis, "Technical Reference, Version 4.0," Hydromantis, Hamilton(1999).

8. Anthonisen, A. C., "Effect of temperature and pH-value on the effective maximum specific growth rate of nitrifying bacteria," *Water Res.*, **24**, 97~101(1990).
9. Ratsak, C., "Grazer induced sludge reduction in wastewater treatment," Ph.D. thesis, Amsterdam Free University (1994).