

산소이용률을 이용한 생물학적 동력학 계수 추정

정연규 · 김한수* · 유성인**

연세대학교 사회환경 · 건축공학부

*연세대학교 토목공학과

**연세대학교 도시공학과

(1999년 5월 14일 접수, 1999년 9월 14일 채택)

The Estimation of Bio-kinetic Parameters using Respirometric Analysis

Youn-Kyoo Choung · Han-Soo Kim* · Sung-In Yoo**

School of Civil, Urban & Architectural Eng., Yonsei University

**Dept. of Civil Eng., Yonsei University*

***Dept. of Urban Planning & Eng., Yonsei University*

ABSTRACT

In order to predict the performance of biological wastewater treatment plant, the kinetic parameters and stoichiometric coefficient must be known. The theories and experimental procedures for determining the biological kinetic parameters were discussed in this study. Respirometric analysis in the batch reactor was carried out for the experimental assessment of kinetic parameters. A simple procedure to estimate kinetic parameters of heterotrophs and autotrophs under aerobic condition was presented. The difficulties in the interpretation of COD and VSS measurements encouraged the conversion of respirometric data to growth data. Maximum specific growth rate, yield coefficient, half saturation constant and decay rate of heterotrophic biomass were obtained from OUR(Oxygen Uptake Rate) data. Maximum specific growth rate of autotrophic biomass was obtained from the increase of nitrate concentration. The aim of this paper is to estimate the kinetic parameters of heterotrophic and autotrophic biomass by means of the respirometric analysis of activated sludge behavior in the batch reactors. These procedures may be used for the activated sludge modeling with complex kinetic parameters.

요 약 문

생물학적 폐수처리장의 효율을 정확하게 예측하기 위해서는 생물학적 동력학 계수와 화학양론적 계수를 반드시 추정하여야만 한다. 본 연구에서는 생물학적 동력학 계수를 추정하는 실험적 방법과 그 이론적 배경이 논의되었다. 또한 생물학적 동력학 계수 추정을 위해 산소이용률(Oxygen Uptake Rate, OUR)을 이용한 회분식 실험을 실시하였다. 호기성 상태에서 종속영양미생물과 독립영양미생물의 생물학적 동력학 계수를 추정하기 위한 간단한 방법이 기술되어 있다. 생물학적 동력학 계수 추정시 해석상의 부정확성 때문에 COD와 VSS농도를 이용하지 않고 산소이용률을 미생물 성장 자료로 변환하여 사용하였다. 종속영양미생물의 최대비성장율, 생산계수, 반속도상수, 사멸율을 산소이용률을 사용하여 추정하였다. 또한 독립영양미생물의 최대비성장율은 NO_3^- 농도의 증가율로부터 추정하였다. 본 연구의 목적은 회분식 반응조에서 산소이용률을 이용해 종속영양미생물과 독립영양미생물의 생물학적 동력학 계수를 정확하고 간편하게 추정하는데 있다. 이러한 산소이용률을 이용한 생물학적 동력학 계수 추정 방법이 복잡한 활성슬러지 모델링에 도움을 줄 것으로 판단된다.

주제어 : 독립영양미생물, 종속영양미생물, 동력학 계수, 산소이용률

1. 서 론

활성슬러지 공법은 미생물의 분해능력을 이용하여 하·폐수내의 유기물을 제거하는 공정이므로 미생물의 상태나 특성에 따라 분해능력에 많은 차이를 보일 수 있다. 그러나 흔히 유입수와 유출수의 성상에 따라 그 처리장의 운영효율을 파악하고 있으며 비용과 분석상의 어려움으로 인해 미생물의 특성을 규명하는 연구는 거의 행해지지 않는 실정이다. 물론 전형적인 미생물의 동력학적 계수 값들은 이미 문헌¹⁾에 보고되어 있지만 그러한 동력학적 계수는 환경이나 각 하수처리장마다 다른 값들을 가지기 때문에 일반적으로 적용하기 어려운 문제가 있다. 최근에는 유출수 농도 예측을 목표로 하는 수학적 모형들이 계속 개발됨에 따라 미생물의 동력학적 계수를 추정하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 과거의 연구는 주로 미생물의 중량결정(VSS)과 기질(COD) 측정으로 동력학적 계수를 추정하였으나 현재는 미생물이 유기물을 분해하는데 필요한 전자수용체(O_2)를 이용하는 respirometric method가 많이 사용되고 있는 실정이다.

Ekama 등²⁾은 산소이용률(oxygen uptake rate, OUR)을 이용하여 종속영양미생물(heterotrophs)

의 최대비성장율을 구하는 방법을 연구하였고 종속영양미생물의 active fraction의 추정 방법 또한 제시하였다. 또한 IAWPRC Task Group에 의해 개발된 Activated Sludge Model No. 1은 생물학적 폐수처리시설의 효율을 예측하기 위해 자주 사용되고 있다. Henze 등(1987)¹⁾과 Sollfrank and Gujer(1990)는³⁾ OUR 측정법이 충분한 정확도를 가지고 있으므로 수학적 모형의 계수를 추정하는데 있어 적합한 방법이라고 하였다. 최근에는 Roß 등과(1992)⁴⁾ Kappler 등(1992)⁵⁾이 OUR측정에 기초를 둔 새로운 계수추정 방법을 제안하였다. 한편 최근엔 Lesouef 등(1992)⁶⁾과 Drtil 등(1993)⁷⁾에 의해 OUR을 응용한 독립영양미생물의 최대비성장율($\mu_{\max,A}$)을 추정하는 방법이 보고되기도 하였다. 유(1999)⁸⁾는 산소이용률을 이용한 회분식 실험을 통해 종속영양미생물과 독립영양미생물의 동력학적 계수를 추정하는 방법을 제시하였고, 박(1999)⁹⁾은 이중기질에 대한 동력학적 계수를 추정하는 방법을 보고하기도 하였다. 또한 이(1995)¹⁰⁾는 질소, 인 동시제거를 위한 변형된 활성슬러지 공정에서의 동력학적 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 보다 정확하고 신속한 동력학적 계수 추정을 위해 OUR을 이용하였다. 연속유입되는

SBR(sequencing batch reactor) 반응조에서 분리한 슬러지를 OUR반응조에 접종시켜 OUR을 이용하여 미생물의 여러 동력학적 계수를 추정하였다. 기존 연구와는 달리 종속영양미생물의 사멸율은 산소이용률로 표현된 식으로 나타내어 비선형회귀분석을 통해 그 값을 추정하였다. 또한, 독립영양미생물(autotrophs)의 최대비성장율을 추정하기 위하여 AUR(ammonia uptake rate)을 사용하였다. 본 연구에서 추정한 모든 동력학적 계수들은 기존의 동력학적 계수 추정방법과는 달리 실험상의 오차를 줄이고 신뢰도와 정확성을 높이기 위하여 전자수용체인 산소를 이용하여 추정하였다.

본 연구에 제시된 방법을 통해 보다 시간이 절약되고 정확한 동력학적 계수를 추정할 수 있으리라 예상되며 현재 가동중이거나 향후 설계될 많은 활성슬러지 공법의 하·폐수 처리장의 운전효율 향상을 위한 기초자료로 충분한 활용이 기대된다.

2. 실험 방법

2.1. OUR 반응조

연속유입되는 SBR 반응조에서 증식·배양된 미생물을 Fig. 1과 같은 OUR반응조에 접종하여 생물학적 동력학 계수 추정 실험을 수행하였다. OUR반응조는 용적을 2L로 하고 외부로부터의 산소 차단을 위해 완전 밀폐하였다. 생물학적 동력학 계수 추정에 필요한 폐수는 합성폐수를 사용하였고 OUR반응조의 온도는 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하여 운영하였다. OUR반응조에 접종되는 미생물은 연속유입되는 SBR 반응조에서 매일 폐기되는 슬러지(0.4L/day)를 이용하였다. OUR반응조에 접종되는 미생물은 0.2L이고 나머지 1.8L는 합성폐수로 채워서 계수를 추정하였다. 또한 모든 OUR값은 10분 간격으로 실험하였다.

2.2. 산소이용률의 측정

종속영양미생물의 동력학 계수 추정시에는 독립영양미생물의 활동을 억제하기 위해 20ppm의 thiourea

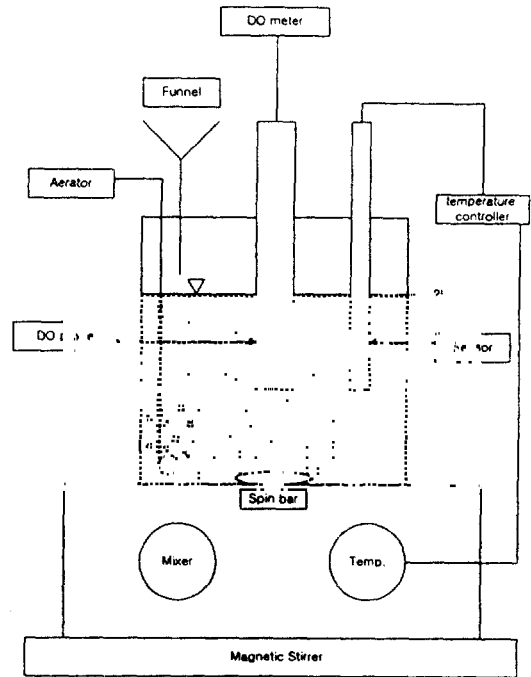


Fig. 1. Schematic diagram of the respiration.

를 첨가하였다. 포기는 일정한 농도까지 계속되다가 그 농도에 이르면 중단되지만 교반은 계속 실시된다. 포기가 끝나고 일정시간 동안에 DO의 감소량을 계산하면 OUR값을 얻을 수 있다.

2.3. 분석방법

실험항목의 분석방법은 Table 1과 같다.

Table 1. Analyzing method of the experimental items

Index	Method & Apparatus
DO	YSI MODEL 58 Dissolved Oxygen meter
COD	Colorimetric Method($\lambda = 650\text{nm}$)
	UV VIS Spectrophotometer DR-4000U, HACH
NO ₃ ⁻	Cadmium Reduction Method($\lambda = 400\text{nm}$)
	UV VIS Spectrophotometer DR-4000U, HACH
VSS	Glass Fiber Filter Furnace(110 $^\circ\text{C}$, 550 $^\circ\text{C}$)

3. 결과 및 고찰

3.1. 종속영양미생물의 생산계수(Y_H)와 최대비성장율($\mu_{max,H}$) 추정

$\mu_{max,H}$, Y_H 추정은 한 반응조에서 동시에 실험을 실시하였다. 즉, Y_H 는 식 (4)를 이용하여 추정하였고 $\mu_{max,H}$ 는 Ekama 등(1986)²⁾에 의해 제기된 식 (5)와 (6)을 사용하였다. 독립영양미생물에 의한 영향을 배제하기 위해서 20mg/L의 thiourea를 첨가하여 실험을 하였다. 실험은 220분 동안 실시하였고, 합성폐수의 초기 COD는 105mg/L였다. OUR은 DO meter를 가지고 매 10분 간격으로 측정하였고 COD의 농도 변화는 매 30분마다 측정하였다.

산소이용률과 미생물성장(biomass growth) 혹은 기질이용(substrate utilization)과의 관계는 미생물의 대사(metabolism)를 통해 제거되는 COD가 새로운 세포의 합성(the synthesis of new cells)과 산소이용률로 측정될 수 있는 respiration에 사용된다는 것이다.¹¹⁾ 이 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta COD_t \cong \Delta O_2 + \Delta X_t \quad (1)$$

여기서, $\Delta COD_t = t$ 시간 후에 제거되는 COD농도 (mg/L)

$\Delta O_2 = t$ 시간까지 누적산소소모량 (cumulative oxygen uptake, mgO₂/L)

$\Delta X_t = t$ 시간 후에 증가한 미생물 농도 (mgVSS/L)

기질의 물리적인 탈기(physical stripping)나 화학적인 산화(chemical oxidation)가 일어나지 않는다면, 식 (1)은 호기성상태에서 기질제거에 대한 완전한 물질수지식(mass balance)이 된다.

한편, 종속영양미생물의 생산계수(Y_H)는 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$Y_H = \frac{\Delta X_t}{\Delta COD_t} \quad (2)$$

그런데, 식 (1)의 양변을 ΔCOD_t 로 나눈 뒤 정리하면 식 (3)이 된다.

$$\frac{\Delta X_t}{\Delta COD_t} = 1 - \frac{\Delta O_2}{\Delta COD_t} \quad (3)$$

그러므로 식 (2)와 식 (3)을 연립하면 식 (4)와 같은 Y_H 에 관한 식이 되고 이 식을 이용하여 Y_H 값을 추정할 수 있다.

$$Y_H = 1 - \frac{\Delta O_2}{\Delta COD_t} \quad (4)$$

여기서, ΔCOD_t 는 t 시간 후의 COD감소량을, ΔO_2 는 누적산소소모량을 나타낸다.

Fig. 2에서 보듯이 ΔCOD 는 150분 동안 62.5 mg/L였고 그 시간 동안에 ΔO_2 는 29.39mgO₂/L였다. 따라서 Y_H 는 0.53을 얻을 수 있다.

종속영양미생물의 최대비성장율은 흔히 $\frac{\text{mg active VSS synthesized}}{\text{mg active VSS present day}}$ 로 나타내며 간단히 day⁻¹로도 표현된다. $\mu_{max,H}$ 는 최대기질이용율(the maximum readily biodegradable substrate utilization rate, K_{ms})과 종속영양미생물의 생산계수(Y_H)에 비례한다. 즉, $\mu_{max,H}$ 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\mu_{max,H} = K_{ms} \times Y_H \text{ (mgAVSS/mgAVSS/d)} \quad (5)$$

여기서, $\mu_{max,H}$ = 종속영양미생물의 최대비성장율
 K_{ms} = 최대기질이용율(mg COD utilized/mg active VSS/day)

Y_H = 생산계수

AVSS = active VSS

그런데 K_{ms} 는 batch test를 시작할 때 초기의 최대 OUR값(OUR_m)과 관련이 있고 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$K_{ms} = \left\{ \frac{1}{(1 - f_{cv} \cdot Y_H)} \right\} \cdot OUR_m \cdot 24 \cdot \frac{V_{WW} + V_{ml}}{f_{av} \cdot X_v \cdot V_{ml}} \quad (6)$$

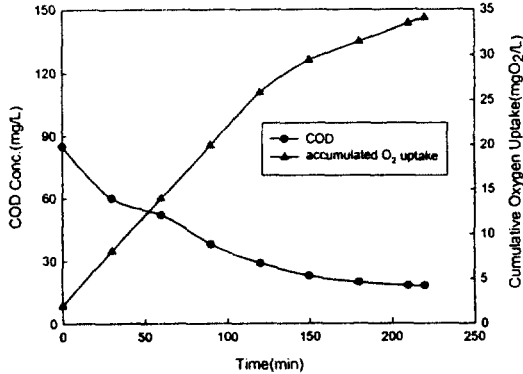


Fig. 2. The change of COD and O₂ uptake for Y_H estimation.

여기서, f_{cv} = 슬러지의 COD/VSS ratio(=1.48 mgCOD/mgVSS)²⁾

Y_H = 생산계수

OUR_m = 초기 최대 OUR(mgO₂/L · hr)

24 = 1일의 시간

X_v = batch test에 사용되는 미생물의 MLVSS 농도(mgVSS/L)

f_{av} = the active fraction of the MLVSS

V_{ww} = 폐수의 부피(L)

V_{ml} = mixed liquor의 부피(L)

여기서 K_{ms} 를 추정하기 위해서는 Y_H , MLVSS, COD/VSS ratio(f_{cv}), MLVSS의 active fraction(f_{av})이 필요한데 그 값은 각각 0.53, 3000, 1.48, 0.4를 이용하였다. 이 중 f_{cv} 는 기존 문헌²⁾에 보고되어 있는 일반적인 값을 사용하였고, f_{av} 값은 3.4절에 기술된 방법을 이용하여 구한 값을 사용하였다. Fig. 3에서 초기 최대 OUR(OUR_m)은 실험 후 110분 동안의 평균값 11.92mgO₂/L를 취하였다. 따라서 K_{ms} 는 7.15, $\mu_{max,H}$ 는 3.79d⁻¹(0.158hr⁻¹)을 얻었다.

3.2. 산소이용률의 미생물 성장 data로의 전환

Y_H 는 기질(COD)소비량에 따른 미생물 농도(X)의 증가분을 의미하므로 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta COD = \frac{\Delta X}{Y_H} = \frac{(X_t - X_0)}{Y_H} \quad (7)$$

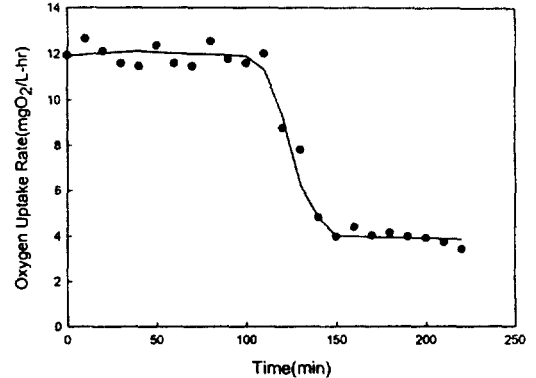


Fig. 3. OUR response in a batch test for measuring the maximum specific growth rate of heterotrophic biomass.

여기서, X_t = t시간 경과후의 미생물 농도(mg VSS/L)

X_0 = 초기 미생물 농도(mg VSS/L)

한편, ΔX 라는 것은 새로운 세포에 합성된 COD 농도(ΔCOD_{cells})를 의미하기 때문에 좀 더 정확히 표현하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta COD = O_2 \text{ Uptake} + \Delta COD_{cells} \quad (8)$$

여기서, $O_2 \text{ Uptake}$ = 누적산소소모량(mgO₂/L)

그런데 ΔCOD_{cells} 는 새로 생성된 세포의 양(ΔX)과 단위 미생물당 단위 COD(the unit COD per unit of biomass, O_x)로 표현할 수 있다. 여기서 O_x 값은 Porge 등(1956)¹²⁾이 일반 활성슬러지(C₅H₇NO₂)에서 보고한 1.42(mgCOD/mgX)를 취하였다. 이 관계는 식 (9)와 같다.

$$\Delta COD_{cells} = (\Delta X) \times (O_x) \quad (9)$$

식 (7)과 식 (9)를 식 (8)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 미생물 농도에 관한 식이 된다.

$$X_T = X_0 + \frac{O_2 \text{ Uptake}}{\left(\frac{1}{Y_H} - O_x\right)} \quad (10)$$

식 (10)은 산소이용률 data를 미생물의 농도로

Table 2. Cumulative oxygen uptake data for each substrate concentration

Time(min)	Cumulative Oxygen Uptake(mgO ₂ /L)				
	Substrate Concentration(mg/L)				
	20	40	48	76	150
0	0	0	0	0	0
10	2.82	2.82	2.82	2.82	2.82
20	3.22	3.44	4.02	4.64	5.85
30	3.64	3.88	4.48	6.57	8.53
40	4.02	4.26	4.90	7.72	10.94
50	4.40	4.64	5.34	8.16	13.27
60				8.59	15.56
70				8.99	17.62
80				9.37	19.61
90					21.52
100					22.37
110					23.07
120					23.80
130					24.44

Table 3. Biomass growth data for each substrate concentration

Time(min)	Biomass Growth Data(mgVSS/L)				
	Substrate Concentration(mg/L)				
	20	40	48	76	150
0	350.00	350.00	350.00	350.00	350.00
10	369.79	369.79	369.79	369.79	369.79
20	372.60	374.14	378.21	382.56	391.05
30	375.54	377.23	381.44	396.11	409.86
40	378.21	379.89	384.39	404.18	426.77
50	380.88	382.56	387.47	407.26	443.12
60				410.28	459.19
70				413.09	473.65
80				415.75	487.61
90					501.02
100					506.98
110					511.89
120					517.02
130					521.51

변환하기 위해서 사용된다. 그러므로 미생물의 성장률(μ)이나 반속도상수(K_s) 추정시 산소이용률만 알면 일정시간 경과 후의 미생물 농도를 정확하게 추정할 수 있다.

3.3. 증속영양미생물의 반속도상수(K_s) 추정

K_s 를 추정하기 위해 기질농도를 달리한 5개(20, 40, 48, 76, 150mgCOD/L)의 반응조를 운영하였다. 각 반응조에는 질산화 억제제인 thiourea 20 mg/L를 첨가하였고 초기 미생물 농도는 350 mgVSS/L로 일정하게 맞춰 주었다. 미생물 성장 data는 식 (10)을 이용하였다. 누적산소량의 변화와 미생물 성장 data는 각각 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 각 기질에 대한 미생물 성장률(μ)값은 semi-log paper에 plot함으로써 구할 수 있다. 이 plot에 대한 기울기가 바로 $\mu_{max,H}$ 가 된다. 각 기질농도에 대한 $\mu_{max,H}$ 를 Monod equation을 이용하여 plot한 후 비선형회귀분석(nonlinear regression)을 하면

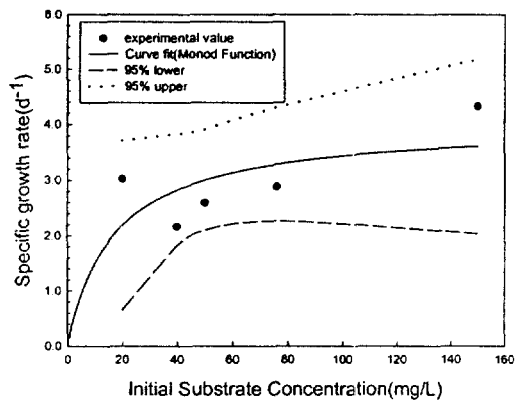


Fig. 4. The growth curve fitted to Monod equation.

K_s 값과 $\mu_{max,H}$ 값을 구할 수 있다. 이 관계는 Fig. 4로 나타낼 수 있다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 K_s 값은 16.85mg/L, $\mu_{max,H}$ 값은 4.00d⁻¹(0.167 hr⁻¹)을 얻었다. $\mu_{max,H}$ 값은 3.1절에서 OUR_m값을 이용하여 구한 값과 비슷한 경향을 나타냈다.

한편, Fig. 4의 회귀분석을 검증하기 위해 잔차

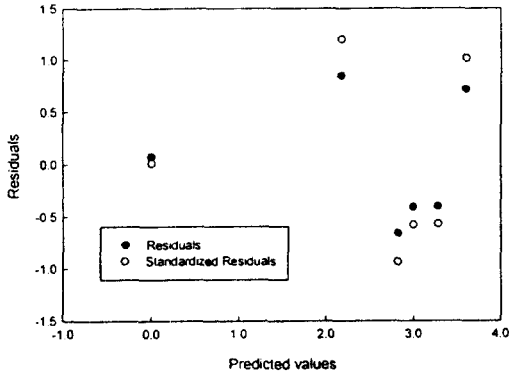


Fig. 5. The statistical analysis from residuals.

(residual) 분석을 Fig. 5에 나타내었다. 표준화 잔차(standardized residual)는 측정값의 원래의 잔차를 표준편차로 나눈 값을 의미한다.

만약 회귀모형이 정규성 가정을 만족한다면 표준화 잔차의 약 66%는 -1~+1 사이의 값을, 약 95%는 -2~+2 사이의 값을 가지게 된다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 본 연구에서는 잔차 값들은 등분산성을 만족시키고 표준화 잔차의 약 67%가 -1~+1 사이의 값을, 표준화 잔차의 100%가 -2~+2 사이의 값을 가지는 것으로 나타났다. 그러므로, Fig. 4의 비선형 회귀분석은 통계적으로 적절하다고 볼 수 있다.

3.4. 종속영양미생물의 사멸율(decay rate, b_H), active fraction(f_{av}) 추정

b_H 와 f_{av} 는 하나의 OUR반응조에서 동시에 추정되었는데 OUR이 초기 값의 10% 이내로 떨어지기까지는 6일이 소요되었다. 초기 미생물 농도는 122 mg/L였고 실험 종료시의 미생물 농도는 80mg/L였다. 사멸율에 관한 산소이용(소비)률(dO/dt)은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{dO}{dt} = 1.42 \times b_H \times X_t \quad (11)$$

여기서, $\frac{dO}{dt}$ = 산소이용률(mg O_2 /L)

1.42 = oxygen equivalent
(mg O_2 /mg VSS)¹²⁾

b_H = 사멸율(decay rate, hr^{-1})

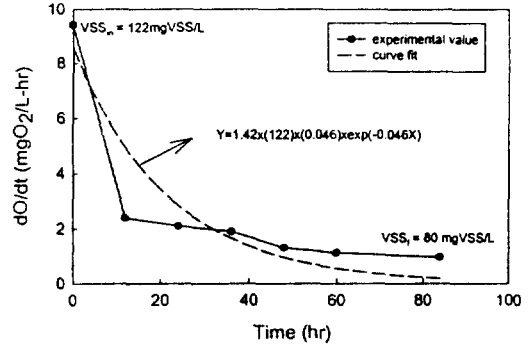


Fig. 6. The curve fitting of OUR for calculating the decay rate.

$$X_t = t \text{ 시간 후의 미생물 농도} (=X_0 e^{-b_H t}) \quad (12)$$

그러므로 식 (12)를 식 (11)에 대입하면 사멸율과 산소이용률에 관한 식 (13)을 구할 수 있다.

$$\frac{dO}{dt} = 1.42 \times b_H \times X_0 \times e^{-b_H t} \quad (13)$$

따라서 시간에 따른 산소이용률만 알면 식 (13)을 이용하여 b_H 를 추정할 수 있다. 시간에 따른 산소이용률의 변화는 Fig. 6에 나타나 있다. Fig. 6에서 보듯이 b_H 값은 $0.046hr^{-1}$ 로 나타났다.

한편, Ekama 등(1986)²⁾은 종속영양미생물의 active fraction(f_{av})을 다음 식과 같이 나타냈다.

$$f_{av} = \frac{X_{vi} - X_{v\infty}}{X_{vi} (1 - f_E)} \quad (14)$$

여기서, X_{vi} = 초기 미생물 농도(mg VSS/L)

$X_{v\infty}$ = 최종 미생물 농도(OUR이 초기 값의 10% 이하로 감소했을 때의 미생물 농도, mg VSS/L)

f_E = net endogenous residue fraction (≈ 0.2)²⁾

그러므로, 식 (14)를 이용하여 f_{av} 를 구하면 0.4를 얻을 수 있다.

3.5. 독립영양미생물의 최대비성장율($\mu_{max,A}$) 추정

$\mu_{max,A}$ 는 NO_3^- 농도의 증가로써 측정하는 최대 암

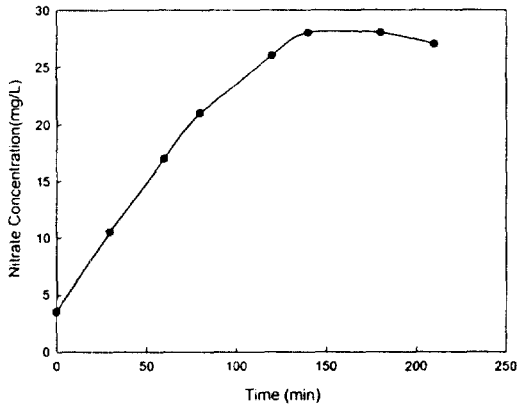


Fig. 7. The change of nitrate concentration in batch reactor.

모니아섭취율(maximum ammonia uptake rate, AUR_{max})로서 추정할 수 있다. 이를 토대로 한 $OUR_{max,A}$ 와 AUR_{max} 의 관계는 식 (15)와 같다.

$$OUR_{max,A} = 4.57 \times AUR_{max} \quad (15)$$

여기서, 4.57 = the consumption of oxygen per gram of NH_4^+ -N oxidation ($g O_2/g NH_4^+$ -N)

한편 $OUR_{max,A}$ 와 $\mu_{max,A}$ 의 관계는 식 (16)으로 나타낼 수 있다.

$$\mu_{max,A} = \frac{OUR_{max,A}}{f_{xba} X} \cdot \frac{Y_A}{4.57 - Y_A} \quad (16)$$

여기서, f_{xba} = 독립영양미생물의 active fraction (=0.054¹³⁾)

Y_A = 독립영양 미생물의 생산계수(cell yield)(=0.24¹⁾)

X = 미생물 농도(mg VSS/L)

시간에 따른 NO_3^- 농도 변화와 AUR_{max} 는 각각 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에서 보듯이 AUR_{max} 는 regression line의 기울기로 구할 수 있는데 그 값은 0.219로 나타났다. 회귀분석은 NO_3^- 농도가 최고로 증가하는 80분 동안의 4개의 data를 이용하였다. 따라서 식 (16)

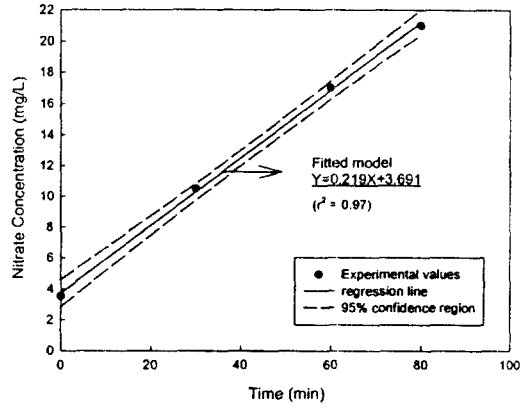


Fig. 8. The regression in order to identify AUR_{max} .

을 사용하여 $\mu_{max,A}$ 를 구하면.

$$\begin{aligned} \mu_{max,A} &= \frac{1441.195}{0.054 \times 1750} \cdot \frac{0.24}{4.57 - 0.24} \\ &= 0.845d^{-1} (0.035hr^{-1}) \end{aligned}$$

가 된다.

4. 결 론

본 연구는 연속회분식 반응조(SBR)에서 증식 배양시킨 중속영양미생물과 독립영양미생물의 생물학적 동력학 계수를 산소이용률을 이용한 respirometric method로 추정하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) OUR을 이용한 respirometric method는 시간과 노력이 많이 필요한 광학밀도(O.D)나 중량결정 방법(gravimetric method)에 의한 미생물의 농도(mg VSS/L)추정 방법에 비해 빠르고 정확하게 미생물농도를 추정할 수 있었다.
- 2) 식 (5)를 이용하여 추정한 중속영양미생물의 최대비성장률(maximum specific growth rate, $\mu_{max,H}$)은 0.158hr⁻¹이었다.

한편 Monod equation의 nonlinear regression으로 추정한 $\mu_{max,H}$ 값은 0.167hr⁻¹이었는데 두 값 모두 비슷한 경향을 보였다.

- 3) 본 연구에서 추정한 중속영양미생물의 생산계

수(cell yield, Y_{H})와 반속도상수(half saturation coefficient, K_s)는 각각 0.53, 16.85 mg/L로 나타났다.

- 4) 독립영양미생물의 최대비성장률($\mu_{max,A}$)은 최대 암모니아 섭취율(maximum ammonia uptake rate, AUR_{max})로 추정하였다. AUR_{max} 는 NO_3^- 의 농도의 증가로 측정되었는데 본 연구에서 얻은 $\mu_{max,A}$ 값은 $0.845d^{-1}$ ($0.035hr^{-1}$)이었다.
- 5) 종속영양미생물의 사멸율(decay rate, b_H)과 active fraction(f_{av})은 한 번의 batch test에서 동시에 추정되었다. 본 연구에서 추정한 b_H 와 f_{av} 는 각각 $0.046hr^{-1}$, 0.4로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Henze, M., Grady, C. P. L. Jr, Gujer, M., Marais, G. V. R., and Matsuo, T., "Activated Sludge Model No. 1," IAWPRC Scientific and Technical Report No. 1, IAWPRC, London(1987).
2. G. A. Ekama, P. L. Dold, and G.v.R. Marais, "Procedures for determining influent COD fractions and the maximum specific growth rate of heterotrophs in an activated sludge systems," *Wat. Sci. Tech.* **18**, 91~114(1986).
3. Sollfrank, U. and Gujer, W., "Simultaneous determination of oxygen uptake rate and oxygen transfer coefficient in activated sludge systems by an on-line method," *Wat. Res.*, **24**, 725~732(1990).
4. Roš, M. and Dular, M., "Determination of some kinetic parameters by respirometry," *Wat. Sci. Tech.*, **26**, 2535~2538(1992).
5. Kappler, J. and Gujer, W., "Estimation of kinetic parameters of heterotrophic biomass under aerobic conditions and characterization of wastewater of activated sludge modelling," *Wat. Sci. Tech.*, **25**, 125~139 (1992).
6. Lesouef, A., Payraudeau, M., Rogalla, F. and Kleiber, B., "Optimizing nitrogen removal reactor configurations by on-site calibration of the IAWPRC activated sludge model," *Wat. Sci. Tech.*, **25**(6), 105~123 (1992).
7. Drtil, M., Nemeth, P., and Bodik I., "Kinetic constants of nitrification," *Wat. Res.*, **27**, 35~39(1993).
8. 유성인, 산소이용률을 이용한 생물학적 동력학 계수 추정에 관한 연구, 연세대학교 석사학위논문(1999).
9. 박혜영, 2,4-D, GLUCOSE 이중기질의 생물학적 제거에 관한 동력학적 거동연구, 연세대학교 석사학위논문(1999).
10. 이해승, 질소, 인 동시제거를 위한 변형된 활성 슬러지 공정의 동력학적 연구, 한양대학교 석사학위논문(1995).
11. Alan F. Rozich and Anthony F. Gaudy, Jr., Design and operation of activated sludge processes using respirometry, Lewis Publishers, pp. 77~96(1992).
12. Porge, N., Jascewicz, L., and Hoover, S., Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes, Reinhold, NewYork, pp. 25~48(1956).
13. US. EPA., Process Design Manual for Nitrogen Control, Office of Technology Transfer, pp. 3-22~3-23, October(1975).