

미생물 호흡률 분석에 의한 하수의 유기물 분류 Respirometry for COD Fractionation of Wastewater

최영균¹ · 김규동^{2,*} · 김희준² · 김윤중² · 정태학²

Choi, Younggyun¹ · Kim, Gyudong^{2,*} · Kim, Heejun² · Kim, Yunjung² · Chung, Taihak²

1 성균관대학교 토목환경공학과
2 서울대학교 지구환경시스템공학부

(2003년 4월 2일 접수, 2003년 6월 24일 최종수정논문 채택)

Abstract

COD fractionation of primary settled municipal wastewater was conducted by respirometry. RBCOD (Readily Biodegradable COD) fraction was analyzed to be 21% of influent TCOD. However, SCOD fraction, analyzed by physical separation using 0.45 μ m membrane filter, was about 31% of TCOD. Therefore, 10% of soluble inert COD was comprised in TCOD. It means that kinetic analysis of activated sludge system was impossible because serious error would be occurred if SCOD was used as a biodegradable soluble component instead of RBCOD estimated from respirometry. In this study, RBCOD fraction of raw wastewater could be analyzed by respirometry within the error range of 5-7%. In addition, SBCOD (Slowly Biodegradable COD) content could be determined by kinetic simulation of the experimental results. SBCOD showed about 2-fold higher fraction (38% of TCOD) as compared with RBCOD.

Key words: COD fractionation, RBCOD, SBCOD, respirometry

주제어: 유기물 분류, RBCOD, SBCOD, 미생물 호흡률

하수에 포함된 유기물의 분류는 처리공정의 동력학적 해석이나 유출수의 수질 예측에 매우 유용하다고 할 수 있다. 그러나 하수의 유기물 분류는 그 과정이 비교적 복잡하여 활성슬러지 공정의 이론적인 발전에 큰 걸림돌이 되어왔던 것이 사실이다. 하수의 유기물 지표로 가장 널리 사용되고 있는 BOD나 COD의 경우, 실제 처리시스템의 동력학적인 해석에 사용되기에는 한계가 있다. COD로는 생물학적으로 분해 가능한 입자상 유기물 (SBCOD, slowly

biodegradable COD)과 용해성 유기물 (RBCOD, readily biodegradable COD)을 분류할 수 없을 뿐만 아니라, 생물학적으로 분해 가능한 유기물과 분해 불가능한 유기물에 대한 분류도 불가능하다. 특히 유기물의 분류 및 분류된 유기물이 각각 다른 특성을 갖는 성분으로 인식되는 활성슬러지 모델 (ASM, Activated Sludge Model)에서는 COD를 하나의 성분으로 간주하는 것 자체가 불가능하게 구성되어 있다. 또한 하수에 포함되어 있거나 미생물의 사멸에 의해 발생하

*Corresponding author Tel.: +82-2-880-8351, Fax: +82-2-889-0032, E-mail: qdong@snu.ac.kr (Kim, G.D.)

는, 용해성이지만 난분해성인 COD(USCOD, unbiodegradable soluble COD)는 유기물 분류가 체계적으로 되어 있지 않은 모든 활성슬러지 공정의 유기물 제거 측면에서 매우 큰 오차를 유발할 가능성이 높은 성분이다. 이러한 COD 분류체계의 한계를 극복하기 위해 기질의 연속 주입과 호기조건으로 구성된 semi-CSTR 공정을 이용하여 하수의 RBCOD 및 종속영양미생물의 최대 비성장속도를 분석한 연구(Ekama et al., 1986), 다양한 pore-size를 갖는 filter를 이용하여 RBCOD와 SBCOD를 분류한 연구(Bortone et al., 1993; Mamais et al., 1993) 등이 진행되었다. 또한 물리적인 분류 방법의 하나인 filter를 이용하였을 경우, SBCOD의 일부가 공극을 통과하면서 RBCOD가 과대평가되는 점을 극복하기 위해 응집제를 첨가하여 SBCOD를 미리 제거한 후, RBCOD를 측정한 연구결과가 소개되기도 하였다(Dold et al., 1980). 그러나 이러한 모든 연구에는 미생물의 호흡을 측정이 반드시 수반되었다. 특히 SBCOD와 RBCOD를 분류하는 기준은 미생물의 생분해 속도가기 때문에 물리적 방법으로는 분류에 한계가 있으며, 반드시 미생물의 호흡율에 근거하여 측정하는 것을 대부분의 연구에서 추천하고 있다(Dircks et al., 1999; Wentzel et al., 1999).

국내에서의 하수의 유기물 분류는 입자의 크기에 전적으로 의존하는 물리적 방법이 대부분이며, 특히 생물학적 질소·인 제거에 직접적인 영향을 미치는 RBCOD는 용해성 COD(SCOD, soluble COD)와 혼동되어 사용되는 경우가 빈번하다. 실제로 SCOD에는 USCOD와 같이 생물학적으로 분해 불가능한 유기물이 포함되어 있으므로 유기물의 종류가 중요한 역할을 하는 생물학적 질소·인 제거 시스템에서는 RBCOD의 농도 및 SBCOD의 농도를 독립적으로 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 DO 측정조를 분리한 OUR(oxygen uptake rate) 회분실험 결과로부터 미생물 호흡율을 분석하였고, 이를 통해 하수의 RBCOD와 heterotrophic active biomass의 농도파악 및 동력학적 해석을 기초로 하여 SBCOD의 농도를 추정하는 것을 목표로 하였으며, COD 회수를 분석을 통해 미생물 호흡을 분석 과정의 신뢰도를 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료 및 방법

OUR 실험장치는 Fig. 1과 같이 8L의 폭기조와 480ml의 DO 측정조로 구성되었으며, 폭기조에서 DO 측정조로 15분 간격으로 혼합액 반송 및 중지를 반복하여 반송 중지 기간에 DO 농도의 감소율을 측정하여 OUR을 계산하였다. DO 측정(YSI model 5739 field probe connected to YSI model 58 DO meter)을 비롯한 모든 시스템은 컴퓨터에 의해 제어되었으며, 표면 폭기 방지를 위해 DO 측정조는 실리콘 마개 및 테프론을 이용하여 밀봉하였고, 상부 공기층의 부피를 최소화하였다. 질산화에 의한 산소농도감소 방지를 위해 20mg의 allylthiourea(1-Allyl-2-thiourea, 98%, Aldrich Chemical Company Inc.)를 폭기조에 첨가하였다(Ekama et al., 1986; Dircks et al., 1999).

식중슬러지는 실험실 규모로 운전중이던 MLE 공정에서 채취하였으며, OUR 회분실험 전에 50일 이상 포도당을 기질로 사용한 인공하수 또는 1차침전 과정을 거친 생하수(primary settled raw wastewater)에 적응된 상태였다. OUR 회분실험으로부터 안정적인 결과를 얻기 위한 식중슬러지의 기질에 대한 적응기간은 보통 SRT의 두배 이상이 되도록 권장하고 있다(Ekama et al., 1986; Wentzel et al., 1999). 식중슬러지에 포함된 RBCOD의 농도를 최소화하기 위해 실험전 슬러지를 중력농축 시킨 뒤, 상정액을 버리고 다시 수돗물을 이용하여 식중슬러지를 3회 세척하였다. 최종적으로 수돗물에 희석된 식중슬러지의 VSS 농도는 1,680mg/L였다. 하수로는 과천하수처리장의 초침조를 거친 실제 생하수와 포도당을 주 탄소원으로 하여 제작된 인공하수를 사용하였으며, 하수와 식

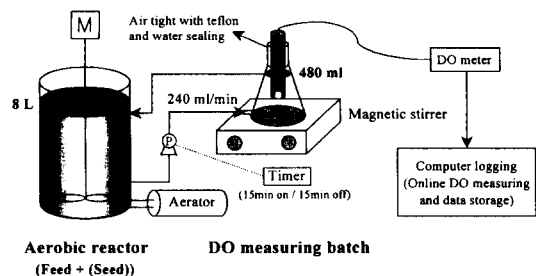


Fig. 1. Experimental set-up of OUR measuring system.

종슬러지의 부피비는 7.5:0.5로 하였다. RBCOD와 SBCOD의 분석이 용이하도록 생하수의 TCOD는 중력농축을 통해 663mg/L(SCOD: 205mg/L)로 높였으며, 이 때 반응조에서 유입 TCOD/VSS의 비는 5.9가 되었다. 인공하수의 COD는 모두 RBCOD로 간주하였으며, OUR 회분실험의 RBCOD에 대한 회수를 파악을 위해 사용하였고, 반응조에서 OUR 실험 시작과 동시에 채취한 시료의 SCOD 및 유입 TCOD/VSS의 비는 각각 408mg/L과 3.6이었다. 생하수나 인공하수를 사용한 경우 유입 TCOD/VSS의 비가 Ekama 등 (1986)이 제시한 값에 비해 상당히 높은데, 본 연구에서는 동력학적 해석을 위해 Wentzel 등 (1999)이 제시한 MUCT(Modified UCT) 모델의 해석과정을 따랐기 때문이다.

2.2. OUR 실험결과 분석 및 동력학적 해석

종속영양미생물의 성장속도(dX_{HAB}/dt)는 식 (1)과 같이 RBCOD와 SBCOD에 의한 성장과 미생물의 사멸을로서 표현 가능하다. 또한 동력학적 해석은 ASM II의 종속영양미생물 부분과 MUCT 모델을 본 연구의 목적에 맞게 일부 수정한 후 조합하여 수행하였다(Table 1).

Net growth of heterotrophs =

$$\text{growth on RBCOD} + \text{growth on SBCOD} - \text{death} \quad (1)$$

식 (1)을 Table 1에 제시한 동력학적 계수 및 반응 속도식을 이용하여 정리하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dX_{HAB}}{dt} = & \mu_{HR} \cdot \frac{S_S}{K_S + S_S} \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \cdot X_{HAB} \\ & + \mu_{HS} \cdot \frac{X_S/X_{HAB}}{K_X + X_S/X_{HAB}} \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \cdot X_{HAB} \\ & - b_H \cdot X_{HAB} \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \end{aligned} \quad (2)$$

또한 시간 t에서의 OUR은 X_{HAB(t)}의 함수로서 식 (3)과 같이 표현 가능하다(Wentzel et al., 1999).

$$OUR_{(t)} = \frac{1 - Y_H}{Y_H} \cdot (\mu_{HR} + \mu_{HS}) \cdot X_{HAB(t)} \cdot \frac{1}{24} \quad (3)$$

RBCOD가 완전히 소모되어 OUR이 급격히 감소하기 이전에는 S_s와 X_s/X_{HAB}, 그리고 S_o가 각각 K_s와 K_x, 그리고 K_o에 비해 매우 큰 값을 가진다고 볼 수 있으므로, 식 (2)는 다음과 같이 간단하게 표현된다.

Table 1. Heterotrophic process kinetics and stoichiometry

Parameters	S _O	S _S	S _I	X _{HAB}	X _S	X _I
Heterotrophic growth on RBCOD	$-\frac{1 - Y_H}{Y_H}$	$-\frac{1}{Y_H}$		1		
Heterotrophic growth on SBCOD	$-\frac{1 - Y_H}{Y_H}$			1	$-\frac{1}{Y_H}$	
Endogenous Respiration				-1		f _p
Units	mgO/L	mgCOD/L	mgCOD/L	mgCOD/L	mgCOD/L	mgCOD/L
Process	Process rate					
Heterotrophic growth on RBCOD	$\mu_{HR} \cdot \frac{S_S}{K_S + S_S} \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \cdot X_{HAB}$					
Heterotrophic growth on SBCOD	$\mu_{HS} \cdot \frac{X_S/X_{HAB}}{K_X + X_S/X_{HAB}} \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \cdot X_{HAB}$					
Endogenous Respiration	$b_H \cdot X_{HAB} \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O}$					
Units	mg/L/d					

$$\frac{dX_{HAB}}{dt} = (\mu_{HR} + \mu_{HS} - b_H) \cdot X_{HAB} \quad (4)$$

식 (4)를 적분하면 식 (5)를 얻을 수 있으며, 식 (5)를 식 (3)에 대입한 뒤, 자연로그를 취하면 식 (6)이 된다.

$$X_{HAB(t)} = X_{HAB(0)} \cdot e^{(\mu_{HR} + \mu_{HS} - b_H)t/24} \quad (5)$$

$$\ln OUR_{(t)} = \ln \left[\frac{1 - Y_H}{Y_H} \cdot (\mu_{HR} + \mu_{HS}) \cdot X_{HAB(0)} \cdot \frac{1}{24} \right] + \left(\frac{\mu_{HR} + \mu_{HS} - b_H}{24} \right) t \quad (6)$$

따라서, RBCOD가 완전히 소모되기 전까지의 OUR 실험결과에 대해 자연로그를 취하면 식 (6)으로부터 y절편과 기울기를 구할 수 있으며, Y_H 와 b_H 를 적절히 가정하면 $X_{HAB(0)}$ 의 값을 계산할 수 있다. $X_{HAB(0)}$ 의 값이 정해지면 식 (3)과 (5)를 이용하여 SBCOD와 미생물의 내생호흡이 동시에 반영된 OUR을 추정할 수 있다. 따라서 RBCOD는 실험으로부터 구한 전체 OUR과 SBCOD에 의한 OUR의 차이로부터 구할 수 있다. 그러나 식 (1)-(6)과 Table 1으로부터 SBCOD만을 독립적으로 구하기는 어렵기 때문에 본 연구에서는 Table 1에 제시한 동력학적 계수와 반응속도식을 이용한 모델링과 실험결과와의 calibration 과정을 통해 SBCOD를 간접적으로 추정하였다.

3. 결과 및 토의

Wentzel 등(1999)은 실제 하수를 사용했을 경우에도 OUR 회분실험으로부터 COD 회수율을 파악할 수 있다고 하였다. 그러나 본 연구에서는 OUR 실험 방법의 신뢰성 및 단일 종류의 기질에 대한 미생물의 반응을 파악하기 위해 포도당을 탄소원으로 하였을 경우, 인공기질에 대한 OUR 실험결과와 COD 회수율 및 몇몇 동력학적 계수 산정을 추가로 실시하였으며, 이 경우의 OUR 실험 및 분석결과를 각각 Fig. 2와 3에 제시하였다. Fig. 3은 식 (5)와 (6)에서 제시하였듯이 RBCOD가 완전히 소모되기 직전까지

OUR이 지수함수 형태로 증가하는 구간에 대한 자연로그를 취한 결과로서 y절편과 기울기, 그리고 식 (6)을 이용하여 $X_{HAB(0)}$ 의 값을 구할 수 있다. 이렇게 구한 $X_{HAB(0)}$ 값은 식 (3)과 (5)와 더불어 SBCOD와 종속영양미생물의 내생호흡에 의한 OUR의 이론적인 값을 추정하는데 사용되며, 추정된 OUR의 변화 곡선을 Fig. 2에 제시하였다.

포도당을 기질로 사용하였을 경우, RBCOD 분해에 따른 산소 소모가 8.7시간까지 지속된 반면, 생하수를 기질로 사용하였을 경우에는 (Fig. 4) 유입 TCOD가 매우 높았음에도 불구하고 RBCOD분해에 의한 산소 소모는 6.4시간에 그쳤다. 이는 생하수에

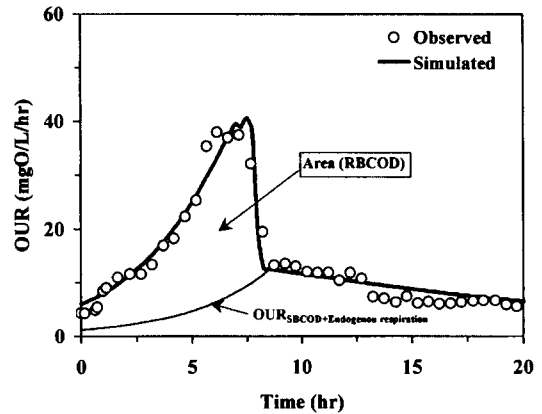


Fig. 2. OUR response under aerobic condition for synthetic wastewater.

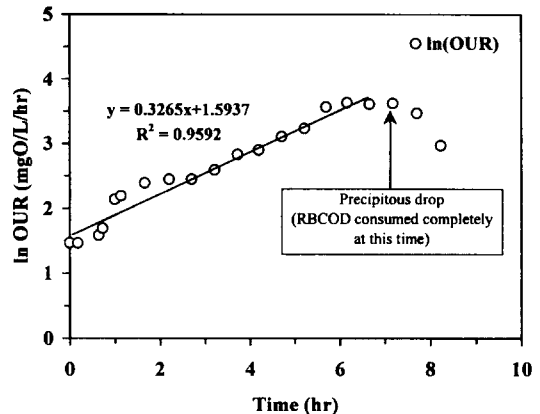


Fig. 3. lnOUR versus time for the measured OUR in Fig. 2 up to the precipitous drop in OUR.

포함된 상당량의 유기물이 미생물에 의해 직접적으로 이용이 불가능하다는 것을 의미한다. Fig. 2와 4에 나타난 OUR 실험결과와 해석을 위해 본 연구에서는 Wentzel 등(1999)이 제시한 방법을 사용하였으며, 이 해석 과정은 기존의 연구결과와는 달리 종속 영양미생물이 RBCOD와 SBCOD에 대해 각각 μ_{HR} 과 μ_{HS} 의 서로 다른 최대성장속도를 갖는다고 설정한 점에서 보다 현실적이라고 할 수 있다. 실제로 미생물 호흡을 측정할 기본으로 한 몇몇 연구결과들은 활성슬러지 미생물이 기질의 종류에 따라 각기 다른 분해특성을 나타낸다고 하였다(Çokgör et al., 1999; Wentzel et al., 1999). Fig. 2와 4에 제시한 모델링 결과는 Table 1을 이용하였고, 모델링에 사용된 동력학적 계수 및 일반적인 범위는 Table 2에 제시하였다. 모델링에 사용된 동력학적 계수는 실험결과를 가장 잘 모사하는 값으로서 일반적으로 알려져 있는 범위 내에서 정하였다.

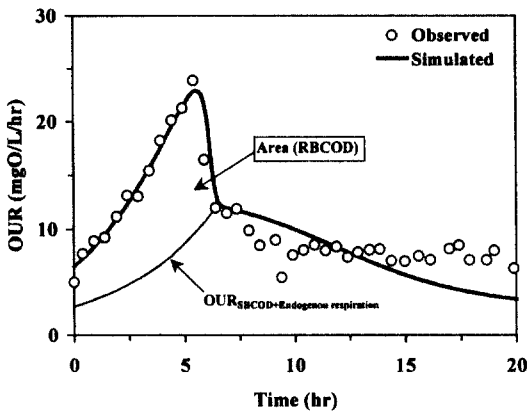


Fig. 4. OUR response under aerobic condition for primary settled raw wastewater.

OUR 실험결과로부터 얻어진 인공하수와 생하수의 유기물 분류 및 COD 회수율 계산 결과를 Table 3에 제시하였다. 생하수를 이용한 경우의 X_{HAB} 와 인공하수를 사용한 경우의 X_{HAB} 의 차이로써 생하수 자체에 포함된 X_{HAB} 함량을 추정해 본 결과 약 13.4 mgCOD/L로 나타나 전체 유입 COD의 2%에 불과한 것으로 나타났다. 보통 X_{HAB} 는 1차 침전조 유출수의 경우, TCOD의 약 3-15%로 알려져 있으나 (Mamais et al., 1993; Çokgör et al., 1999), 본 연구에서는 이 범위보다 낮게 나타나 실험당시 생하수 중에 X_S 성분을 포함한 다른 종류의 유기물이 비교적 많이 포함되어 있었던 것으로 판단되었다. COD 회수율은 95-105%일 때, 실험오차한계 내에서 신뢰성이 있다고 보고되고 있으며 (Ekama et al., 1986; Wentzel et al., 1999), 분석결과 인공하수의 경우 107%, 생하수의 경우 95%로 나타나 비교적 신뢰성이 있는 결과를 얻을 수 있었다. RBCOD 및 SBCOD의 농도는 μ_{HR} 보다는 μ_{HS} 에 더 큰 영향을 받는다. 생하수를 이용한 경우, 하수중의 SCOD 농도와 OUR 실험으로부터 구해진 RBCOD의 농도는 65mg/L의 차이를 보였다. 이는 여과와 같은 물리적 방법에 의한 SCOD 농도 평가는 실제 농도에 비해 과대평가될 가능성이 많고, 특히 생물학적 질소·인제거에 필요한 유기물량 산출시, 많은 오차를 유발할 수 있음을 의미한다. 일반적으로 하수의 SBCOD는 RBCOD에 비해 그 양이 상당히 높기 때문에 생물학적 질소제거에서 SBCOD가 가지는 의미는 상당히 크다. OUR 회분실험만으로 SBCOD를 구하는 것은 불가능하지만 Table 1과 2, 그리고 식 (1)-(6)에 제시된 동력학적 계수와 반응속도식을 이용한 모델링을 통해 간접적인 추정은 가능하다 (Wentzel et al., 1995; 최, 2001). 모델링 및

Table 2. Kinetic parameters required for simulation

Parameters	Assumed in this study	Suggested range from the references
Y_H	0.67	0.46-0.75 (Ekama et al., 1986; Henze et al., 1995)
b_H	0.62	0.1-1.2 (Henze et al., 1995; Wentzel et al., 1995)
μ_{HR}	4.3	3.0-5.0 (Wentzel et al., 1999)
μ_{HS}	1.8	1.0-3.0 (Wentzel et al., 1999)
K_O	0.1	0.1-0.6 (Gujer et al., 1991; Ante et al., 1994)
K_S	5	1.56-20 (Ante et al., 1994; Wentzel et al., 1995)
K_X	0.1	0.01-0.3 (Henze et al., 1995; Wentzel et al., 1995)
f_p	0.08	0.05-0.2 (Ekama et al., 1986; Henze et al., 1995)

Table 3. COD fractionation of glucose and primary settled raw wastewater (PRW)

		Unit	OURGlucose	OURPRW
Heterotrophs	X_{HAB}	mgCOD/L	42.1	55.5
	μ_{HR}	/d	5.75	4.31
	μ_{HS}	/d	1.36	1.82
SCOD _{observed} (t = 0h) ①		mgCOD/L	408	204
SCOD _{observed} (t = 20h) ②		mgCOD/L	34	-
RBCOD _{graphical} ③		mgCOD/L	402	139
SBCOD _{simulation}		mgCOD/L	-	253
TCOD _{PRW+seed} (0h) ④		mgCOD/L	-	839
TCOD _{PRW+seed} (20h) ⑤		mgCOD/L	-	594
$\int_{0h}^{20h} OUR \cdot dt$ ⑥		mgCOD/L	-	203
COD recovery (②+③)/①		(x100)%	107	-
COD recovery (⑤+⑥)/④		(x100)%	-	95

수치적 계산을 통해 구한 생하수의 SBCOD의 농도를 Table 3에 제시하였으며, 유입 TCOD의 38%로 추정되었다. RBCOD가 유입 TCOD의 21%에 불과한 점을 고려해본다면, RBCOD보다 두 배 정도 많은 함량을 보이는 SBCOD는 활성슬러지 공정의 운전지표를 결정하는 매우 중요한 인자라고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 미생물 호흡률 측정 및 동력학적 해석에 의해 하수의 RBCOD 농도를 정량하였으며, 기존의 수학적 모형을 적절히 조합한 모델을 이용하여 SBCOD의 농도를 추정하였다. 실험결과를 바탕으로 한 RBCOD를 해석하는 과정에서 종속영양미생물의 농도를 동시에 파악할 수 있었으며, COD 회수율은 인공하수와 생하수를 사용한 각각의 경우에 대해 107과 95%로 나타나 문헌에서 보고되는 실험오차 한계에 들거나 매우 근접하여 OUR 분석과정의 신뢰도가 매우 높은 것으로 판단되었다. 생하수 TCOD 663 mg/L에 대해 RBCOD 및 SBCOD의 농도는 각각 139와 253mg/L로 분석되어 생분해 가능한 유기물 중 SBCOD가 차지하는 비율이 매우 높은 것으로 나타났다. 또한 SCOD의 농도는 204mg/L로 조사되어 호흡률 측정에 의해 분석된 RBCOD와는 큰 차이를 나타내었다. 따라서 물리적인 여과 방법에 의해 RBCOD를 분류하는 것은 불가능할 것으로 판단 되었으며, SCOD를 RBCOD로 간주하여 생물학적 영양염류 제

거공정 등에 대한 동력학적 해석에 사용할 경우, 모든 해석과정에 큰 오차가 발생할 소지가 있다.

기호설명

- b_H : Specific decay rate of heterotrophs (/d)
- f_p : Inert COD production in endogenous respiration (mgCOD/mgCOD)
- K_O : Heterotrophic half saturation coefficient for dissolved oxygen (mgO/L)
- K_S : Heterotrophic half saturation coefficient for RBCOD (mgCOD/L)
- K_X : Heterotrophic half saturation coefficient for SBCOD (dimensionless)
- S_i : Soluble inert COD concentration (mgCOD/L)
- S_O : Concentration of dissolved oxygen (mgO/L)
- S_S : RBCOD concentration (mgCOD/L)
- X_{HAB} : Heterotrophic active biomass concentration (mgCOD/L)
- X_i : Particulate inert COD concentration (mgCOD/L)
- X_S : SBCOD concentration (mgCOD/L)
- Y_H : Yield coefficient of heterotrophs (mgCOD/mgCOD)
- μ_{HR} : Heterotrophic maximum specific growth rate on RBCOD (/d)
- μ_{HS} : Heterotrophic maximum specific growth rate on SBCOD (/d)

감사의 글

본 연구는 BK21 서울대/한양대 사회기반 및 건설 기술 인력양성 사업단의 지원과 환경부의 "차세대 핵심환경 기술개발사업(Eco-technopia 21 project)"의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 최영균(2001) 부식토양이 생물학적 질소제거 및 활성슬러지의 침전성에 미치는 영향. 서울대학교 박사학위논문.
- Ante, A., Besche, H. U. and Voss, H. (1994) "A mathematical model for enhanced biological phosphorus removal", *Wat. Sci. Tech.*, **30**(2), pp. 193-203.
- Bortone, G., Chech, J. S., Germirli, F., Bianchi, R. and Tilche, A. (1993) "Experimental approaches for the characterization of a nitrification/denitrification process on industrial wastewater", in *Proc. 1st Int. Spec. Conf. On Microorganisms in Activated Sludge and Biofilm Processes*, Sept 27-28, Paris, pp. 129-136.
- Çokgör, E. U., Sozen, S., Orhon, D. and Henze, M. (1999) "Respirometric analysis of activated sludge behavior-I. Assessment of the readily biodegradable substrate", *Wat. Res.*, **32**(2), pp. 461-475.
- Dircks, K., Pind, P. F., Mosb k, H. and Henze, M. (1999) "Yield determination by respirometry — The possible influence of storage under aerobic conditions in activated sludge", *Water SA*, **25**(1), pp. 69-74.
- Dold, P. L., Ekama, G. A. and Marais, G. v. R. (1980) "A general model for the activated sludge process", *Prog. Wat. Tech.*, **12**(6), pp. 47-77.
- 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", *Wat. Sci. Tech.*, **18**, pp. 91-114.
- Gujer, W. and Henze, M. (1991) "Activated sludge modeling and simulation", *Wat. Sci. Tech.*, **23**, pp. 1011-1023.
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, C. M. and Marais, G. v. R. (1995) *Activated Sludge Model No. 2*, IAWQ Sci. and Tech. Report No. 3. IAWQ, London, UK.
- Marnais, D., Jenkins, D. and Pitt, P. (1993) "A rapid physical-chemical method for the determination of readily biodegradable soluble COD in municipal wastewater", *Wat. Res.*, **27**(1), pp. 195-197.
- Wentzel, M. C., Mbewe, A. and Ekama, G. A. (1995) "Batch test for measurement of readily biodegradable COD and active organism concentrations in municipal wastewaters", *Water SA*, **21**(2), pp. 117-124.
- Wentzel, M. C., Mbewe, A. Lakay, M. T. and Ekama, G. A. (1999) "Batch test for characterization of the carbonaceous materials in municipal wastewaters", *Water SA*, **25**(3), pp. 327-335.