

회분식 실험 Substrate/Microorganisms 비에 따른 종속영양미생물의 특이거동 연구

이병준 · Wentzel, M.C.* · Ekama, G.A.* · 민경석†

경북대학교 환경공학과

*케이프타운대학교 토목공학과

Abnormal Behavior of Ordinary Heterotrophic Organism Active Biomass at Different Substrate/Microorganisms Ratios in Batch Test

Lee, Byung-Joon · Wentzel, M.C.* · Ekama, G.A.* · Min, Kyung-Sok†

Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University

*Department of Civil Engineering, University of Cape Town, South Africa

(Received 17 October 2003, Accepted 2 February 2004)

Abstract : Batch test methods have developed for a long time to measure kinetic and stoichiometric parameters which are required to perform steady state design and mathematical modelling of activated sludge processes. However, at various So/Xo ratios, abnormal behaviors of ordinary heterotrophic organism in batch tests have been reported in many researches. Thus, in this research, abnormal behaviors of heterotrophs in batch tests were investigated at various So/Xo conditions by measuring and interpreting oxygen utilization rate. As So/Xo ratio increased, the calculated values of maximum specific growth rates, $\mu_{H,max}$ and $K_{MP,max}$, increased. However, at a certain point of So/Xo (around 10mgCOD/mgMLAVSS), $\mu_{H,max}$ and $K_{MP,max}$ values started to decrease. According to this observation, three prominent behaviours of heterotrophs were identified at various So/Xo conditions. (1) At low So/Xo region (below 5 mgCOD/mgMLAVSS), the oxygen utilization rate of heterotrophs in batch tests were almost stable and consequently yielded lower maximum specific growth rate. (2) At high So/Xo region (up to 5~10 mgCOD/mgMLAVSS), oxygen utilization rate increased sharply with time and indicated more upward curvature than the predicted OUR with conventional activated sludge model, which consists of single heterotrophs group. Thus, in this region, competition model of two organisms, fast-grower and slow-grower, seemed to be appropriate. (3) At extremely high So/Xo region (over 10mgCOD/mgMLAVSS), significant oxygen utilization rate was still observed even after depletion of readily biodegradable COD. This might be caused by retarded utilization of intermediates which were generated by self inhibition mechanism in the process of RBCOD uptake.

keywords : Batch test, So/Xo ratio, Maximum specific growth rate, Competition, Inhibition

1. 서 론

생물학적 처리의 동역학 및 양론계수들을 구하기 위한 회분식 실험에 대하여 많은 연구가 수행되어 왔다. 회분식 실험의 경우 정상상태 실험에 비하여 단 시간에 계수들을 구할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 실제 폐수처리장의 현장조건과는 차이가 있으므로 적용에 한계를 가진다. Kappeler(1992)는 회분식 실험에서 산소소모율(OUR; oxygen utilization rate)을 측정하여 활성슬러지의 종속영양미생물과 관련한 동역학 및 양론계수들을 구하였다. Wentzel(1995) 및 Mbewe(1995)는 회분식 실험의 산소소모율을 측정하여 활성슬러지내 종속영양미생물 농도를 측정하였다. 그러나 회분식 실험으로 측정된 종속영양미생물의 농도 및 동역학/양론계수들이 온도, 반응조 형태 그리고 SRT에 따라 크게

차이가 났으며 이와 관련한 근본적인 이유는 제시하지 못하였다.

이와 같은 회분식 실험에서의 미생물 이상거동에 대하여, Chudoba(1992) 및 Novak(1994)은 미생물 동역학 및 양론계수를 구하기 위한 회분식 실험에서 So/Xo(Substrate/Microorganisms; 회분식 실험의 최초기질농도/최초미생물농도) 비 변화에 따라 미생물이 상이한 거동을 나타냄을 보고하였다. 또한 Grady(1996)는 So/Xo 비에 따라 미생물의 최대성장속도상수(maximum specific growth rates on Readily biodegradable COD and on Slowly biodegradable COD; $\mu_{H,max}$ and $K_{MP,max}$)가 변화한다고 보고하였으며, Pollard(1998)는 높은 So/Xo 비를 가지는 회분식 실험동안 종속영양미생물의 최대성장속도상수가 점진적으로 증가함을 미생물학적 접근법(ATP 측정법)을 통해 실증하였다.

그러므로 본 연구에서는 So/Xo 비에 따라 미생물거동이 변화한다는 이전의 연구 결과들을 바탕으로, 여러 가지 So/Xo 조건에서 회분식 실험을 수행하여 회분식 실험의 미

† To whom correspondence should be addressed.
ksmin@knu.ac.kr

생물 특이거동에 대한 이론을 정립하고자 하였다.

2. 실험방법

먼저 SRT(sludge retention time)가 각각 10일 및 20일인 실험실 규모의 MLE 반응조를 운전하여 회분식 실험에 필요한 정상상태의 활성슬러지를 공급하였고, 정상상태 설계식(WRC, 1984)에 따라 회분식 실험에 사용된 활성슬러지의 종속영양미생물 농도를 계산하여 최종적으로 반응조에 투입된 종속영양미생물의 량(X_0)을 평가하였다. MLE 반응조는 67%의 호기성 반응조, 33%의 무산소 반응조와 2차 침전조로 구성되었고, 슬러지 반송율은 유입유량 대비 100%, 내부반송율은 유입유량 대비 100%로 운전하였다. 유입수는 도시생활하수(Mitchells Plain Treatment Plant, Cape Town, South Africa)를 $750 \pm 50 \text{mgCOD}/\ell$ 로 회석하여 $10 \ell/\text{d}$ 의 유량으로 유입시켰다. 일반적으로 남아공의 도시하수의 경우 건조한 기후특성 및 분류식 관거의 사용으로 인하여 $1000 \sim 1200 \text{mgCOD}/\ell$ 의 강한 농도를 나타내었다. 유입수의 pH는 CaCO_3 를 주입하여 7.5 정도를 유지하였다. 매일 유입수의 COD, TKN; 모든 반응조의 nitrate, nitrite; 호기조의 산소소모율(oxygen utilization rate), TSS, VSS, COD, TKN; 유출수의 COD, TKN, nitrate, nitrite를 측정하여 설계식(WRC, 1984; Ekama, 1986)에 따라 COD/N 물질수지, 유입유기물 성장(f_{us}, f_{up}), COD/VSS 및 TKN/VSS 비(f_{cv}, f_n), 최종적으로 활성슬러지의 종속영양미생물 분율(f_{av}) 및 농도를 계산하였다. 다음의 식 (1)은 정상상태 설계식(WRC, 1984)에 기초한 종속영양미생물의 분율(f_{av})을 구하는 계산식을 나타내고 있다.

$$\frac{1}{f_{av}} = 1 + f \cdot b_{HT} \cdot R_S + \frac{f_{S,up} \cdot (1 + b_{HT} \cdot R_S)}{f_{cv} \cdot Y_H \cdot (1 - f_{S,us} - f_{S,up})} \quad (1)$$

여기서, $f_{S,up}$ = fraction of influent substrate that is unbiodegradable particulate

$f_{S,us}$ = fraction of influent substrate that is unbiodegradable soluble

f = fraction of OHO active biomass that is endogenous residue = 0.2

b_{HT} = specific endogenous mass loss rate at T °C (/d) = $b_{H20} \cdot 1.029^{(T-20)}$

b_{H20} = 0.24/d at 20°C (endogenous respiration theory (Dold, 1991))

Y_H = OHO active biomass yield (mgVSS/mgCOD) = 0.45 (WRC, 1984)

R_S = system sludge age (d)

회분식 실험은 MLE 반응조의 호기조에서 추출된 슬러지와 응집 및 여과된 하수(flocculated and filtered sewage)를 3ℓ의 회분식 반응조에 혼합시켜 수행하였다(modified batch test(Cronje, 2000)). 응집 및 침전의 여유는 유입수 자체에 포함되어 있는 종속영양미생물을 제거하여 회분식 실험 동안 간섭효과를 배제할 수 있기 때문이다(Cronje, 2000). 산소가 공급되고 회분식 실험 동안의 산소소모율은 Randall(1991)의 자동 측정법에 의해 측정되었다. 질산 및 아질산 측정을 위하여 일정시간 간격으로 시료채취 및 시료여과 후 2~3 방울의 염화수은(HgCl_2)을 가하여 시료를 냉장하여 보관하였다. 또한 % COD recovery 측정(Ubisi, 1997)을 위해 최초 및 최종 COD 농도가 측정되었다. 특히 본 연구에서는 독립영양 질산화미생물의 회분식 실험에 대한 영향을 배제하기 위해, 회분식 실험을 통해 얻은 전체 산소소모율에 질산화미생물에 의한 산소소모율을 감하여 순수하게 종속영양미생물에 의한 산소소모율을 구하였다(Cronje, 2000; Randall, 1991; Ubisi, 1997). Fig. 1은 회분

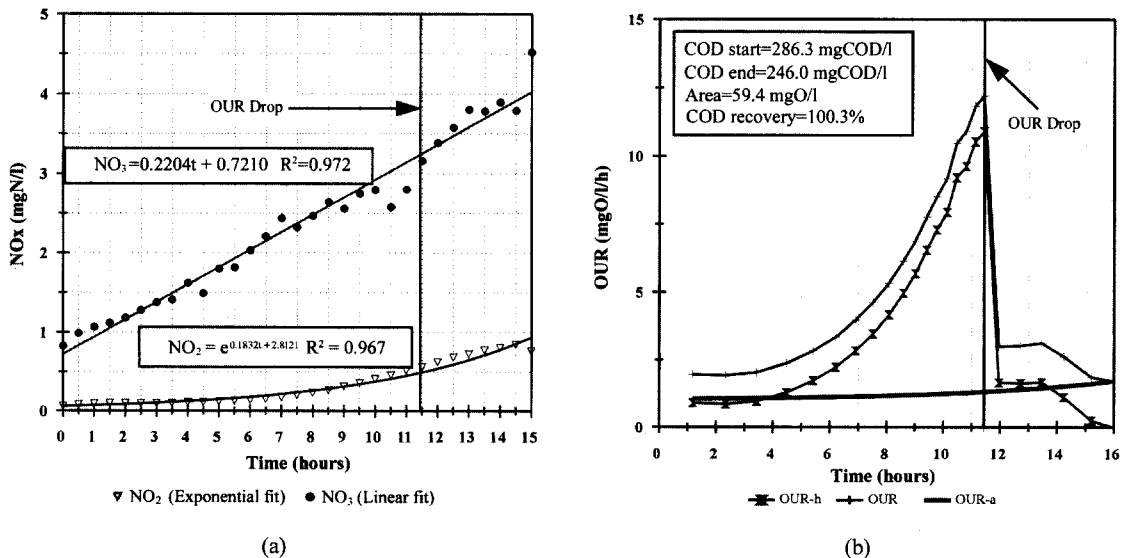


Fig. 1. (a) Nitrate and nitrite concentrations & (b) Oxygen Utilization Rate responses (OUR-h: OUR of OHO active biomass, OUR: Total OUR, OUR-a: OUR of Nitrifier) with time for a modified batch test.

식 실험에서의 전형적인 (a) 질산/아질산 농도변화 그리고 반응조의 (b) 전체 산소소모율, 종속영양미생물 및 질산화 미생물에 의한 산소소모율의 변화를 나타내고 있다. 질산화 미생물에 의한 산소소모율은 질산화에 따른 질산 및 아질산 농도 변화값에 양론계수값(4.57mgO/mgNO₃⁻ and 3.43 mgO/mgNO₂⁻)을 곱하여 얻어지고, 본 연구의 주 목적인 회분식 실험에서의 종속영양미생물의 정량화 및 거동변화의 관찰에는 질산화가 제외된 순수한 종속영양미생물에 의한 산소소모율만을 고려하였다. 특히 주목할 점은, 회분식 실험의 질산 및 아질산의 농도변화가 선형 또는 지수적인 변화를 가질 수 있으므로, 본 연구에서는 선형 및 지수식 중 상관관계수가 높은 관계식을 취사선택하여 질산 및 아질산의 농도변화값을 구하였다는 점이다(Cronje, 2000). 또한 회분식 실험의 So/Xo 비에 따라 독립영양 질산화미생물의 거동변화도 예상할 수 있지만, 본 연구에서는 일차적으로 회분식 실험에 있어서 순수한 종속영양미생물의 거동변화를 확인함을 목표로 하였다. 측정된 실험결과는 Wentzel(1995), Ubisi(1997) 및 Cronje(2000)에 의해 제시된 해석 절차에 의거 % COD recovery, 종속영양미생물의 최대성장속도상수(maximum specific growth rate; $\mu_{HT,max}$ 및 $K_{MPT,max}$), 회분식 실험에서의 종속영양미생물 최초농도($Z_{BH(0)}$)등을 계산하게 된다. 여기에서 $\mu_{HT,max}$ 및 $K_{MPT,max}$ 의 경우, 각각 분해가 빠른 기질(Readily Biodegradable COD) 및 분해가 느린 기질(Slowly Biodegradable COD)에 대한 최대성장속도상수를 나타낸다.

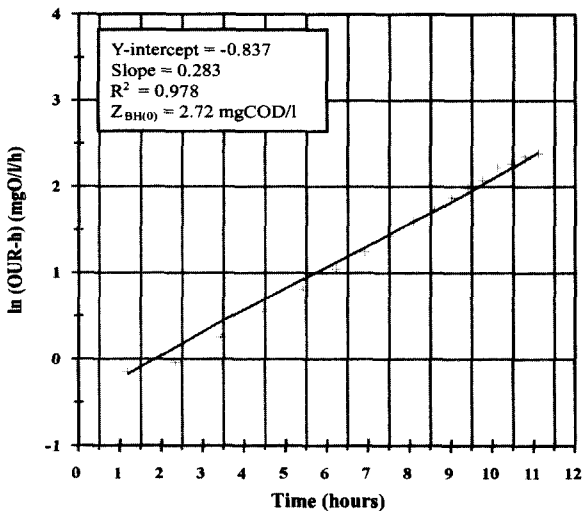


Fig. 2. ln (Oxygen Utilization Rate; OUR) due to OHO active biomass ln (OUR_H) versus time for the OUR data in Fig. 1(b) up to the OUR precipitous drop.

Fig. 2는 로그 스케일을 취하여 직선화된 산소소모율을 나타내고 있다. Fig 2와 같이 회분식 실험결과인 종속영양 미생물의 산소소모율 값을 직선식 (2)에 대하여 회귀분석을 하게 되면 기울기(Slope)와 Y-절편(Y-intercept)을 구하게 되고, 식 (3), (4) 및 (5)를 통해 회분식 실험 초기의 종속 영양미생물 농도($Z_{BH(0)}$) 및 최대성장속도상수($\mu_{HT,max}$ 및

$K_{MPT,max}$)를 구하게 된다. 주의할 점은 회분식 실험에서는 미생물 사멸에 대하여 정상상태 실험이나 회분식 호기성 소화 실험에 적용되는 내생호흡원리(endogenous respiration theory)를 대신하여 사멸/재생산원리(Death regeneration theory)를 적용하는 점이다. Dold(1991)에 따르면 정상상태 나 호기성 소화의 경우 위의 두 원리가 동일한 결과를 나타내지만, 회분식 실험과 같은 전이영역(transient region; 기질농도가 변화하는 경우)에서는 사멸/재생산원리가 정확한 결과를 나타내는 것으로 보고하였다. 따라서 본 회분식 실험에서는 사멸/재생산원리를 적용하여 미생물 사멸계수 ($b_{H20^{\circ}C}$)를 0.62/d로 설정하였다.

$$\ln OUR_{(t)} = \ln \left[\frac{1 - Y_{ZH}}{Y_{ZH}} (\mu_{HT,max} + K_{MPT,max}) Z_{BH(0)} / 24 \right] + (\mu_{HT,max} + K_{MPT,max} - b_{HT})t / 24 \quad (2)$$

$$Z_{BH(0)} = \frac{e^{y - \text{Intercept} \cdot 24}}{\frac{1 - Y_{ZH}}{Y_{ZH}} (\text{Slope} \cdot 24 + b_{HT})} \quad (3)$$

$$K_{MPT,max} = \frac{OUR_{SBCOD(t=s)} \cdot 24}{\frac{1 - Y_{ZH}}{Y_{ZH}} \cdot Z_{BH(0)} \cdot e^{\text{Slope} \cdot (t=s)}} \quad (4)$$

$$\mu_{HT,max} = \text{Slope} \cdot 24 - K_{MPT,max} + b_{HT} \quad (5)$$

여기서,

- $Z_{BH(0)}$ = OHO active biomass concentration (mgCOD/ℓ)
- $\mu_{HT,max}$ = maximum specific growth rate of OHO on RBCOD at temperature T (/d)
- $K_{MPT,max}$ = maximum specific growth rate of OHO on SBCOD at temperature T (/d)
- b_{HT} = specific endogenous mass loss rate at T°C (/d) = $b_{H20} \cdot 1.029^{(T-20)}$
- Y_{ZH} = OHO active biomass yield (mgCOD/mgCOD) = 0.666 (Wentzel, 1995)
- $OUR_{SBCOD(t=s)}$ = OUR observed immediately after the precipitous drop (mgO/ℓ/h)
- (t=s) = time immediately after the precipitous drop (h)

그리고 본 연구에서는 So/Xo 비에 대한 종속영양미생물의 거동특성을 파악하기 위해서 So/Xo 비의 정의 및 측정이 필요하므로, 기질의 농도(So)의 경우 회분식 실험에 투입된 응집 및 여과된 폐수의 Total COD 농도로 정의하였다. 폐수에는 난분해성 COD가 포함되어 있어 폐수의 Total COD가 종속영양미생물이 소모하는 기질의 농도와 동일하게 볼 수 없지만, 분해성 기질 자체에 대한 측정이 불가능하므로 Total COD를 기질의 대표값으로써 정의하였다. 미생물 농도(Xo)는 일반적으로 사용되는 MLVSS 및 MLTSS 농도가 아니라, 정상상태 설계식(WRC, 1984)에 의해 계산

된 활성인 종속영양미생물 농도(mgMLAVSS/ℓ)를 사용하였다. 따라서 회분식 실험에서 사용된 So/Xo 비는 다음과 같이 정의된다.

$$S_o = COD_{total} \cdot \frac{V_{reactor} - V_{ML}}{V_{reactor}} \quad (\text{mgCOD}/\ell) \quad (6)$$

$$X_o = f_{av} \cdot X_v \cdot \frac{V_{ML}}{V_{reactor}} \quad (\text{mgMLAVSS}/\ell) \quad (7)$$

여기서,

COD_{total} = Total COD concentration of flocculated and filtered sewage (mgCOD/ℓ)

$V_{reactor}$ = Volume of the batch reactor = 3 ℓ

V_{ML} = Volume of the mixed liquor added into the batch reactor (ℓ)

f_{av} = OHO active fraction of VSS

X_v = VSS concentration of the parent system (mgVSS/ℓ)

3. 실험결과 및 고찰

Table 1에서는 정상상태 MLE 반응조에 대하여 정상상태 설계식(WRC, 1984)에 의해 계산된 슬러지 농도 및 활성슬러지내 종속영양미생물 분율(f_{av})을 나타내고 있다. 활성슬러지 공정의 일반적인 수학적 모델(Henze, 1987)에 따르면, SRT가 증가함에 따라 슬러지내의 내생호흡미생물의 분율이 커지고, 반대급부로 활성인 종속영양미생물의 분율(f_{av})이 줄어들게 되는데, 계산된 f_{av} 값은 10day-SRT 및 20day-SRT MLE 반응조에 대하여 각각 0.385 및 0.286으로 나타나 두 반응조건 명확한 차이를 보여주고 있다. 또한 Table 1에서는 Wentzel(1995)의 회분식 실험 해석절차에 따라 계산된 결과를 나타내는데, 종속영양미생물의 최대

성장속도상수($\mu_{H,max}$ 및 $K_{MP,max}$) 및 농도($Z_{BH(0)}$)를 보여주고 있다. 주목할만한 점은, Table 1에서 So/Xo과 관련하여 종속영양미생물의 최대성장속도상수($\mu_{H,max}$ 및 $K_{MP,max}$)를 살펴보면 So/Xo 비가 커질수록 증가하고, 일정한계가 넘어서면 다시 감소한다는 점이다.

Fig. 3은 로그스케일 산소소모율 그래프(Fig. 2)의 기울기 값인 ($K_{MP,max} + \mu_{H,max} - b_{HT}$)을 So/Xo 비에 따라 도식화하였는데, 일반적인 슬러지 농도(mgMLVSS/ℓ)를 대신하여 활성인 종속영양미생물 농도(mgMLAVSS/ℓ)를 X_o 로 정의한 경우 (Fig. 3(b)), 서로 다른 SRT에 대하여 그래프의 개형이 보다 균일한 형태를 나타내었다. 따라서 슬러지 (MLVSS)를 대신하여 활성인 종속영양미생물(MLAVSS)을 생물학적 반응의 주 매체로 정의함으로써 다양한 SRT를 가지는 활성슬러지 공정이 보다 명확히 표현될 수 있음을 간접적으로 확인할 수 있었다(Ekama, 1986; Henze, 1987). So/Xo 비가 대략 10 mgCOD/mgMLAVSS의 범위까지는 서로 다른 SRT에 대하여 So/Xo 비가 증가할수록 기울기 값이 균일하게 증가하였으나, So/Xo 비가 4 mgCOD/mg MLVSS (10 mgCOD /mgMLAVSS) 보다 큰 영역에서는 아래 3.3절에 소개될 자가 저해에 의한 영향으로 두 가지 SRT 모두에 대하여 기울기 값이 매우 불균일하게 나타났다.

Fig. 4에서는 각각 분리된 종속영양미생물의 최대성장속도상수($\mu_{H,max}$ 및 $K_{MP,max}$)를 나타내고 있는데, 종속영양미생물의 거동이 기질농도에 따라 성장속도가 증가하는 Monod 형태의 성장거동을 나타내지만 아래의 Fig. 5, 7 및 8을 살펴보면 모든 회분식 실험에서 산소소모율이 일정시간 경과 후 급격하게 떨어짐을 보여주어 종속영양미생물은 Monod 형태와는 상관없이 산소소모율이 급격하게 떨어지는 지점이전까지 최대성장속도를 유지함을 의미한다. 만약 각 회분식 실험에서 최대성장속도에 도달하지 않고 Monod 식을 따른다면, 산소소모율의 급락지점이 나타나지 않고 다소 완만한 곡선을 나타낼 것이다. 따라서 Fig. 4에 나타난

Table 1. Experimental results of MLE systems and modified batch tests

MLE system	MLE system		Test No.	Modified batch test			Regression			Growth Rate (/d)		$Z_{BH(0)}$ (mgCOD/ℓ)
	MLVSS (mgVSS/ℓ)	f_{av}		Volume (ℓ)		So/Xo	Y-int.	Slope	R^2	$K_{MP,max}$	$\mu_{H,max}$	
10days	2532	0.385	A1	2.40	0.60	1.014	2.688	0.000	0.000	0.42	0.20	1093.8
			A2	2.60	0.40	1.607	2.085	0.078	0.985	1.35	1.14	150.8
			A3	2.80	0.20	3.312	0.896	0.178	0.962	1.90	3.00	23.3
			A4	2.90	0.10	7.289	0.301	0.275	0.978	1.79	5.42	8.7
			A5	2.93	0.07	10.61	0.438	0.261	0.994	0.97	5.91	10.5
			A6	2.95	0.05	17.43	1.085	0.172	0.995	0.60	4.14	29.0
			A7	2.97	0.03	25.52	1.362	0.161	0.989	0.62	3.87	40.5
20days	2460	0.286	B1	2.34	0.66	1.163	2.247	0.083	0.984	1.44	1.16	169.2
			B2	2.50	0.50	1.654	1.945	0.064	0.941	0.92	1.24	150.7
			B3	2.70	0.30	2.849	1.000	0.157	0.945	1.69	2.71	28.8
			B4	2.80	0.20	4.708	0.591	0.238	0.974	1.84	4.51	13.3
			B5	2.90	0.10	9.835	-0.320	0.307	0.994	2.06	5.92	4.2
			B6	2.93	0.07	16.55	0.115	0.265	0.971	0.99	5.98	7.5
			B7	2.95	0.05	20.35	0.929	0.237	0.990	0.81	5.49	18.7

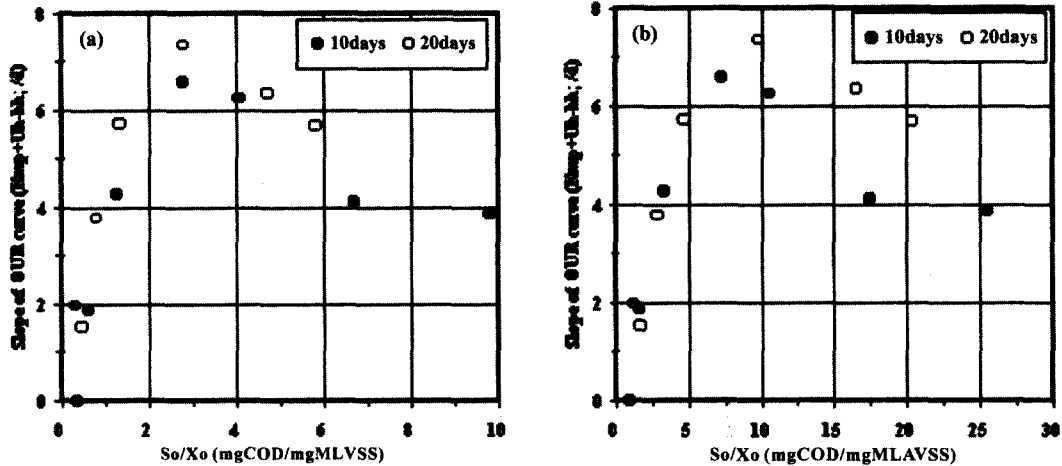


Fig. 3. Slope of OUR curve ($K_{MP,max} + \mu_{H,max} - b_{HT}$) (a) versus So/Xo ratios ($mgCOD/mgMLVSS$) and (b) versus So/Xo ratios ($mgCOD/mgMLAVSS$) for the set of the modified batch tests.

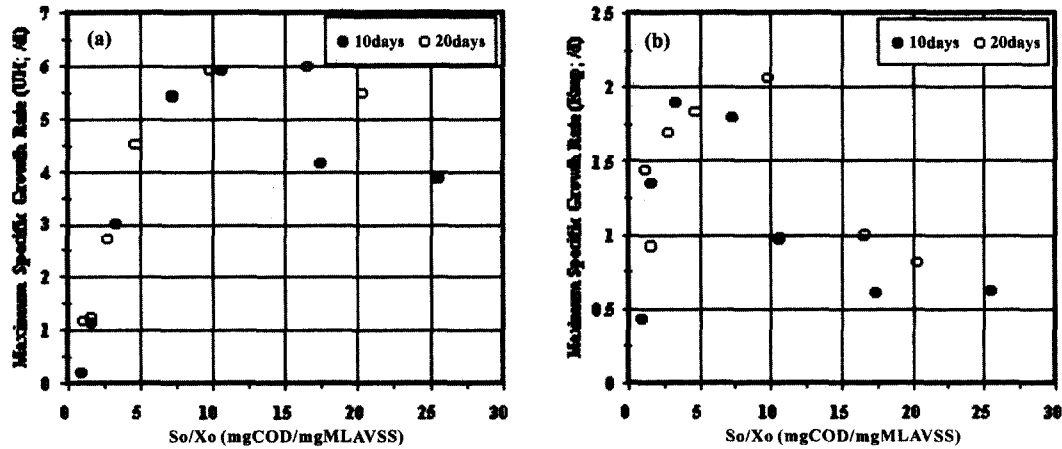


Fig. 4. Maximum specific growth rates (a) on readily biodegradable COD ($\mu_{H,max}$) and (b) on slowly biodegradable COD ($K_{MP,max}$) versus So/Xo ratio ($mgCOD/mgMLAVSS$) for the set of the modified batch tests.

모든 값들이 회분식 실험에서 구해진 최대성장속도상수($\mu_{H,max}$, 및 $K_{MP,max}$)을 나타내고, 이 값들은 고정되어 있지 않고 So/Xo 에 따라 매우 크게 변화한다는 점이 분명하게 나타났다.

그리고 Fig. 4(a)에서 나타난 RBCOD(Readily Biodegradable COD)에 대한 종속영양미생물의 최대성장속도상수($\mu_{H,max}$)의 경우 일반적인 활성슬러지 모델에 사용되는 값(1.5~3.5/d)보다 아주 크게 나타났다. 이와 관련하여, Chudoba (1992)와 Novak(1994)의 경우 일반적으로 회분식 실험에 적용되는 높은 So/Xo 에서 $\mu_{H,max}$ 값이 크게 나타나고, 또한 실험진행 중 지속적으로 증가함을 보고하였다. 특히 Novak (1994)은 정상상태 활성슬러지에 소량 포함되어 있는 성장속도가 빠른 종속영양미생물이 회분식 실험과 같이 So/Xo 비가 높은 환경에서 다량의 성장속도가 느린 종속영양미생물과의 경쟁관계에서 우세해지므로 전체적인 걸보기 $\mu_{H,max}$ 값을 증가시킨다고 보고하였다. Grady(1996) 또한 높은 So/Xo 환경에서는 일반적인 종속영양미생물보다는 성장속도가 빠른 종속영양미생물의 거동을 반영한다고 보고한 바 있다.

결국 So/Xo 비가 커질수록 실험초기 소량으로 포함되어 있는 성장속도가 빠른 종속영양미생물(Fast-grower)에 유리한 환경조건이 조성되어 회분식 실험결과가 실험초기 우점종이었던 성장속도가 느린 종속영양미생물(Slow-grower)의 일반적인 거동에서 벗어나게 되고 높은 최대성장속도상수를 산출하게 되는 것이다.

그러나, Fig. 3에서 So/Xo 비가 대략 10mgCOD/mg MLAVSS보다 큰 경우에는 종속영양미생물의 최대성장속도상수($\mu_{H,max}$, 및 $K_{MP,max}$)가 오히려 감소하였다. Blanch(1996)에 따르면 과잉의 기질이 존재하는 경우 반응매체의 물리화화적인 특성이 변하게 되어 오히려 미생물 성장을 방해할 수 있다고 하였다. 여기에서 물리화화적인 특성에는 미생물 멤브레인의 투과성에 영향을 미치는 용액의 삼투압, 이온세기, 전기화학적성질 등이 있다. 그리고 이러한 기질 과잉의 환경에서는 생물학적 반응동안 중간생성물(Intermediates)이 과잉 생산되어 전체적인 반응에서 방해효과를 나타낸다고 하였다. Rittmann(2002)은 이와 같은 과잉 기질에 의한 저해를 자가저해(Self-inhibition)로 정의하였으며,

“이 경우에 효소 촉매에 의한 기질 분해는 고농도의 기질 자체에 의해서 느려질 수 있다”고 보고하였으며, 이를 Hal-dane 또는 Andrews 속도론으로 표현하였다.

이처럼 S_o/X_o 비는 종속영양미생물의 최대성장속도상수 ($\mu_{H,max}$, 및 $K_{MP,max}$)에 큰 영향을 미치게 된다. 즉, 회분식 실험의 초기 기질농도(S_o)는 Monod 식의 불변의 구성요소로 간주되는 최대성장속도상수($\mu_{H,max}$, 및 $K_{MP,max}$)를 변화시키게 된다. 앞서의 관찰을 토대로, 각 회분식 실험들의 S_o/X_o 비에 따른 각 회분식 실험에서의 종속영양미생물의 성장 거동을 산소소모율-시간 그래프를 통하여 자세하게 살펴보면, 종속영양미생물의 성장거동은 S_o/X_o 비에 따라 크게 3가지의 경우들로 구별되었다. 각 구간은 S_o/X_o 가 낮은 경우(5 mgCOD/mgMLAVSS 이하), S_o/X_o 가 높은 경우(5 ~ 10 mgCOD/mgMLAVSS) 및 S_o/X_o 가 아주 높은 경우(10 mgCOD/mgMLAVSS 이상)로 구분되었다. 그러나 본 연구에서의 S_o/X_o 에 대한 각 구간의 구분은 회분식 실험의 연속적으로 변화하는 상태에 대한 구분이므로 정확한 값으로는 구분이 불가능하여, 대표 구간으로 구분하였다. 즉, 각 구간사이의 경계구간에서의 회분식 실험은 양 구간의 특성을 중첩하여 나타낸다.

3.1. S_o/X_o 비가 낮은 경우

Fig. 5는 S_o/X_o 가 5 mgCOD/mgMLAVSS 이하의 낮은 영역에서의 회분식 실험의 산소소모율을 보여주고 있다. 여기에서 5 mgCOD/mgMLAVSS 는 일반적인 생물학적 처리 공정의 운전조건보다는 큰 값이지만, 일반적으로 동역학 및 양론계수를 구하기 위한 회분식 실험조건과 비교하게 되면 낮은 값이 된다. 주어진 Fig. 5에 대하여 Wentzel(1995)의 해석절차에 따르면, 로그-스케일 산소소모율의 기울기가 낮으므로 종속영양미생물의 최대성장속도상수는 과소하게 평가되고, 종속영양미생물 농도는 과잉으로 평가된다. 미생물 성장의 동역학적 거동을 파악하기 위해서는 회분식 실험을 진행하면서 미생물농도 및 이의 간접적 기준인 산소소모율

이 실험 초기에 비하여 충분히 증가되어야 하지만, 이 경우 증가가 뚜렷하게 나타나지 않아 미생물성장의 동역학적 거동평가에는 적합하지 않음을 보여주고 있다.

Chudoba(1992)에 따르면, 미생물 성장(Microbial growth)은 바이오매스의 증가를 의미하는데, 바이오매스의 증가는 미생물증식(multiplication)을 통해 일어날 수 있고, 또한 미생물증식 없이도 기질저장(storage or accumulation)을 통해 일어날 수 있다고 보고하였다. 즉, 미생물증식에서는 기질이 미생물 내부로 이동하여 일부는 에너지 생산에 사용되거나 미생물증식에 사용되지만, 기질저장에서는 미생물 내부로 이동한 기질이 에너지 생산이나 미생물증식을 대신하여 탄수화물, 지질 (Carbohydrate 또는 Lipid)과 같은 저장물질(Storage polymer)의 합성에 사용된다고 보고하였다. 그리고 낮은 S_o/X_o 비의 회분식 실험에서는 미생물증식보다는 기질저장이 우선함을 관찰하였다. 따라서 각 회분식 실험들에서 미생물의 기질저장을 평가하기 위하여 Wentzel (1995)의 해석 절차에 따라 종속영양미생물에 의해 소모된 RBCOD 분율을 계산하여 S_o/X_o 비와 연관하여 나타내었다(Fig. 6). 모든 회분식 실험에서 동일한 폐수를 사용하였으므로 동일한 RBCOD의 분율을 나타낼 것으로 예상할 수 있으나, Chudoba(1992)의 실험과 같이 낮은 S_o/X_o 비에서는 계산된 RBCOD 분율이 상대적으로 낮게 나타났다. 본 실험에서의 RBCOD의 계산은 산소소모율(OUR)을 환산하여 계산하였는데, 위의 Chudoba(1992)의 이론에 따르면 기질저장(Storage)이 우선하는 경우 기질의 산화되는 분량이 줄어들기 때문에 산소소모율이 줄어들고 결국은 낮은 RBCOD 값을 산출하게 된다. 결국, RBCOD의 일부는 산화과정을 거치지 않고, 단순히 저장물질(Storage polymer)의 합성에 이용되었다고 판단된다.

본 실험에서는 RBCOD를 측정할 수 있는 낮은 S_o/X_o 비의 구분은 대략 ± 1 mgCOD /mgMLAVSS에서 이루어지는 것으로 판단되었다. Chudoba(1992)의 경우, 회분식 실험에 있어서 여러 가지 다른 인자들이 영향을 미칠 수 있으므로

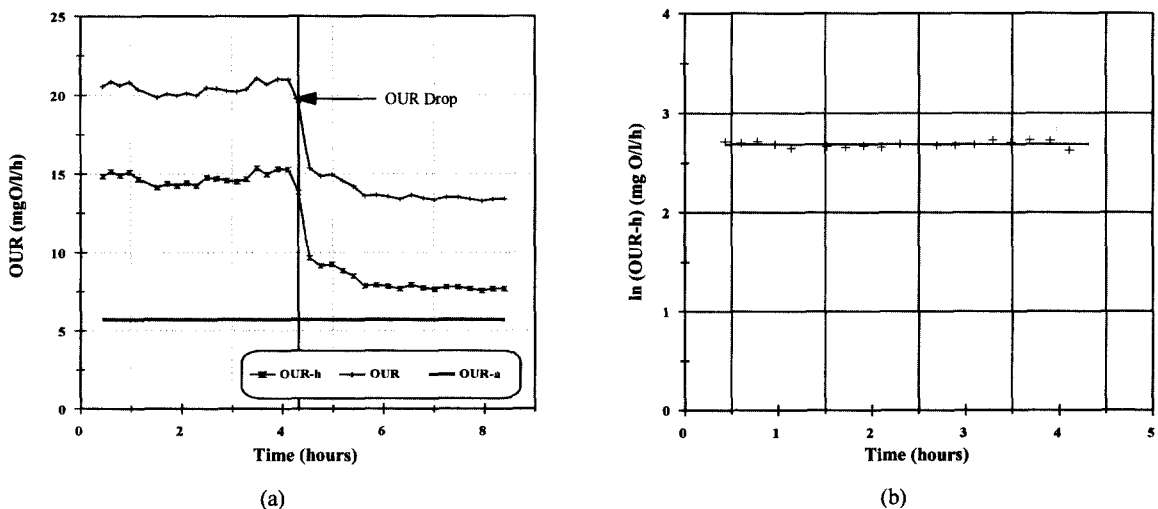


Fig. 5. OUR (h-heterotrophs, measured and a-autotrophs) and $\ln(OUR-h)$ versus time profiles for a representative modified batch test in case of low S_o/X_o condition. Test No. A1.

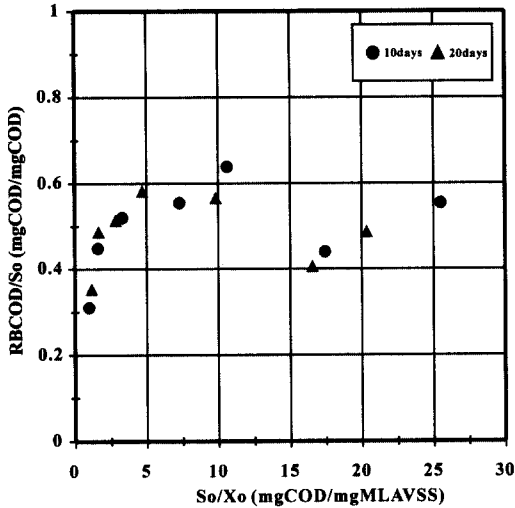


Fig. 6. RBCOD as a fraction of total wastewater COD (So) determined from the area under the OURH-time profile in the initial batch test versus So/Xo ratio.

낮거나 높은 So/Xo 비를 명확하게는 구분할 수 없지만, 대략 2-4 mgCOD/mgMLVSS 정도로 구분된다고 보고한 바 있다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 회분식 실험은 So/Xo 비의 변화에 따라 미생물증식과 기질저장과 같은 특성의 연속적인 변화가 일어나므로 정확한 값으로써 구분하기에는 불가능한 것으로 판단된다. 그리고 아주 높은 영역의 So/Xo(10mgCOD/mgMLAVSS 이상)에서는 RBCOD 값이 다시 떨어지는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 자가저해로 인한 영향으로 판단된다.

3.2. So/Xo 비가 높은 경우 - Case of competition

Fig. 7에서는 높은 So/Xo 비에서의 종속영양미생물의 전형적인 성장 거동을 보여주고 있다. 특히 Fig. 7(b)는 로그스케일 산소소모율의 선형회귀분석을 보여주고 있는데, 실측된 산소소모율이 Wentzel(1995)의 해석절차에 따라 회귀

분석된 직선식보다 더 큰 곡률을 보여주고 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 단일종의 종속영양미생물로 구성된 기존의 활성슬러지 모델은 이처럼 높은 So/Xo 비를 가지는 회분식 실험을 설명할 수 없음을 증명하고 있다.

이전의 많은 연구(Chudoba, 1992; Novak, 1994; Ghosh, 1972; Pitter, 1990)에서 종속영양미생물을 성장이 빠른거나 느린 미생물로 구분될 수 있다고 하였고, 높은 So/Xo 비에서는 성장이 빠른 미생물이 경쟁관계에서 우세하게 된다고 보고하였다. 그러므로 Fig. 7에 대하여 두 미생물간 경쟁모델(Novak, 1994)에 기초하여 이론적 설명을 한다면, 먼저 회분식 실험 초기에는 아주 소량의 성장이 빠른 그리고 다량의 성장이 느린 종속영양미생물이 존재하게 된다. 이후 실험진행과 함께 성장이 빠른 종속영양미생물이 기질에 대한 경쟁에서 우세하므로 점진적으로 슬러지내 분율이 커지고 동시에 전체 종속영양미생물의 성장속도에 대한 영향도 커지게 된다. 그러므로 Fig. 6처럼 전체 산소소모율 그래프에서는 마치 실험진행과 함께 최대성장속도상수가 점진적으로 증가하는 것으로 나타나게 되고, 결국 보통의 경우보다 높은 값의 최대성장속도상수를 산출하게 되는 것이다.

3.3. So/Xo 비가 아주 높은 경우 - Case of inhibition

아주 높은 So/Xo 비에서는 반응매체의 물리화학적 특성이 변동하여 오히려 미생물의 성장에 자가저해를 나타내게 된다(Blanch, 1996; Rittmann, 2002). Fig. 8에서는 자가저해영역에서의 회분식 실험의 전형적인 산소소모율을 보여준다. 상대적으로 낮은 So/Xo 비를 가지는 경우(Fig. 5 및 Fig. 7)에서는 산소소모율이 급격하게 떨어지는 지점이 보였으나 아주 높은 So/Xo를 가지는 영역에서는 산소소모율이 소폭 하락 후 다시 완만하게 감소하는 곡선을 보여주고 있다.

이는 기질의 농도가 매우 높은 경우 기질로부터 중간생성물이 과도하게 생성되고 미생물 내부에 축적하게 되고 실험기간동안 지속적으로 소비되는 것으로 판단된다. 산소소

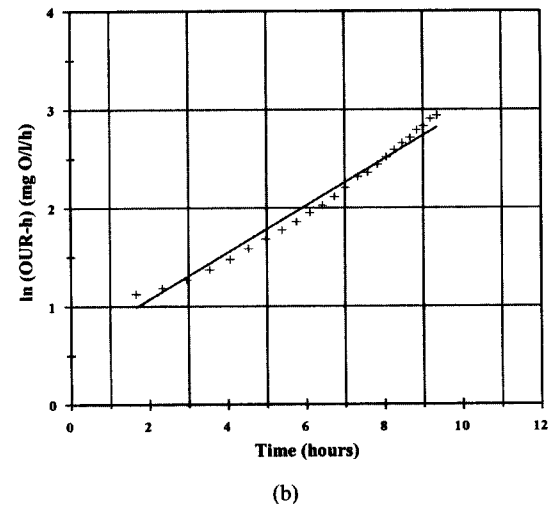
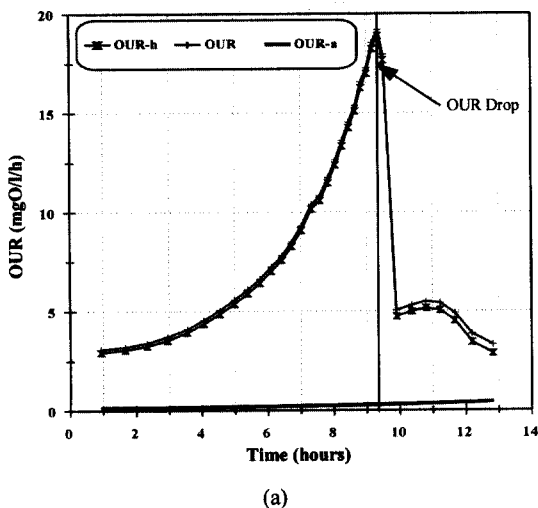


Fig. 7. OUR (h-heterotrophs, measured and a-autotrophs) and ln(OUR-h) versus time profiles for a representative modified batch test in case of high So/Xo condition. Test No. B4.

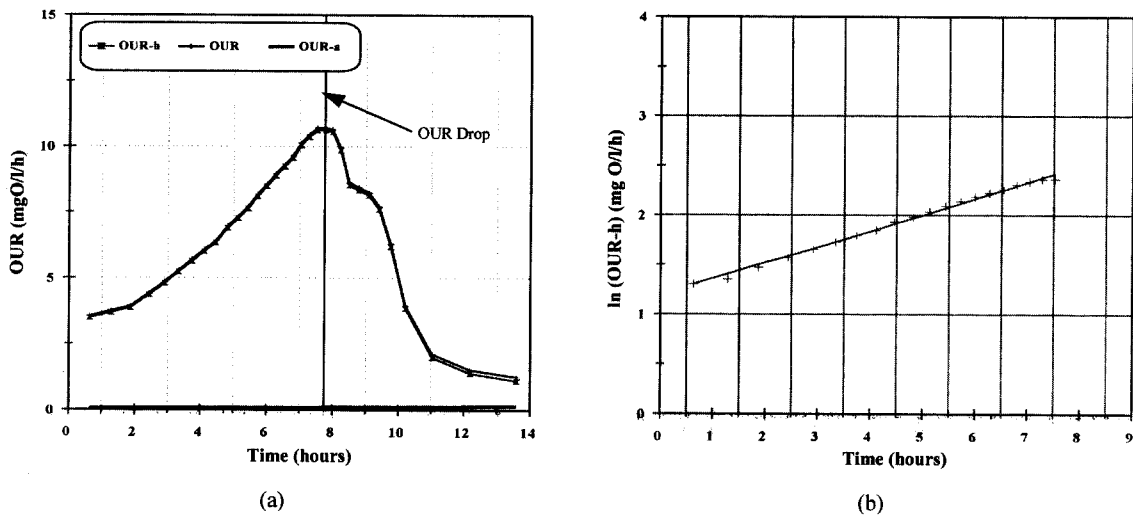


Fig. 8. OUR (h-heterotrophs, measured and a-autotrophs) and $\ln(OUR-h)$ versus time profiles for a representative modified batch test in case of very high So/X_o condition. Test No. A5.

모율이 절정에 달하기 이전에는 중간생성물이 미생물 성장으로 이어지는 일련의 반응들(Coupling reactions)이 원활하게 연결되지 못하여 최대성장속도상수가 이전의 경쟁영역보다 상대적으로 낮게 나타나게 되고, 산소소모율이 절정에 달한 이후에는 생성된 중간생성물이 지속적으로 분해되면서 산소소모율이 다소 완만하게 감소하는 것으로 사료된다.

따라서 현재 생물학적 고도처리시설 설계에 많은 동역학 및 양론계수에 대하여 측정이 용이한 회분식 실험을 다수 적용하고 있음을 고려하면, 본 연구에서 도출된 결론, 즉 회분식 실험에서의 미생물의 특이거동을 충분히 인식하고 회분식 실험을 수행한다면 계수들에 대한 정확한 평가가 이루어지리라 판단된다.

4. 결론

참고문헌

So/X_o 비가 대략 10mgCOD/mgMLAVSS 범위를 기준으로, 이전에는 So/X_o 비가 증가할수록 종속영양미생물의 최대성장속도상수가 계속 증가하며, 이후부터는 오히려 감소하기 시작하였다. 이를 바탕으로, 산소소모율의 변화, 즉 종속영양미생물의 성장 거동은 다음의 세 가지 영역으로 구분되었다.

1. So/X_o 비가 낮은 경우(5 mgCOD/mgMLAVSS 이하), 산소소모율(미생물농도)의 증가가 뚜렷하지 않았다. 또한 RBCOD의 일부가 미생물의 성장에 사용된 것이 아니라 미생물내부에 저장되는 것으로 사료된다.
2. So/X_o 비가 높은 경우(5~10 mgCOD/mgMLAVSS), 실측된 산소소모율이 Wentzel(1995)의 해석절차에 따른 회귀분석식보다 더 큰 곡률을 보여주고 있다. 따라서 기존 활성슬러지 모델을 대신하여 성장이 빠르거나 느린 종속영양미생물종 간의 경쟁모델로 설명될 수 있다.
3. So/X_o 비가 아주 높은 경우(10 mgCOD/mgMLAVSS 이상), 산소소모율이 소폭 하락 후 다시 완만하게 감소하는 곡선을 보여주고 있는데, 이는 기질의 농도가 매우 높은 경우 기질로부터 중간생성물이 과도하게 생성되고 미생물 내부에 축적한 후, 실험기간동안 지속적으로 소비되는 것으로 판단된다.

결론적으로, 본 연구에서 회분식 실험의 So/X_o 비에 따라 실험결과가 매우 상이하게 나타나고 있음을 보여주었다.

1. Kappeler, J., and Gujer, W., Estimation of kinetic parameters of heterotrophic biomass under aerobic conditions and characterization of wastewater for activated sludge modelling, *Wat. Sci. Tech.*, **25**(6), pp. 125-140 (1992).
2. Wentzel, M. C., Mbewe, A., and Ekama G. A., Batch test for measurement of readily biodegradable COD and active organism concentrations in municipal wastewaters, *Wat. S. A.*, **21**(2), pp. 117-124 (1995).
3. Mbewe, A., Wentzel, M. C., and Ekama, G. A., Characterization of the carbonaceous materials in municipal wastewaters, *Res. Rept. W84*, Department of Civil Eng., University of Cape Town, Rondebosch 7700, South Africa, (1995).
4. Chudoba, P., Capdeville, B., and Chudoba, J., Explanation of biological meaning of the So/X_o ratio in batch cultivation, *Wat. Sci. Tech.*, **26**(3-4), pp. 743-751 (1992).
5. Novak, L., Larrea, L., and Wanner, J., Estimation of maximum specific growth rate of heterotrophic and autotrophic biomass: a combined technique of mathematical modelling and batch cultivations, *Wat. Sci. Tech.*, **30**(11), pp. 171-180 (1994).
6. Grady, CPL. (Jr), Smets, B. F., and Barbeau, D. S., Variability in kinetic parameter estimates: a review of possible causes and a proposed terminology, *Wat. Res.*, **30**(3), pp. 742-748 (1996).
7. Pollard, P. C., Steffens, M. A., Biggs, C. A., and Lant,

- P. A., Bacterial growth dynamics in activated sludge batch assays, *Wat. Res.*, **32**(3), pp. 587-596 (1998).
8. WRC, *Theory, design and operation of nutrient removal activated sludge processes*. Published by Water Research Commission, PO Box 824, Pretoria 0001, South Africa, (1984).
 9. Ekama, G. A., Dold, P. L., and Marais, GvR., 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 (1986).
 10. Cronje, G. L., Wentzel, M. C., and Ekama, G. A., Measurement of active heterotrophic organism concentration in the nitrification-denitrification activated sludge systems, *Res. Rept. W102*, Department of Civil Engineering, University of Cape Town, Rondebosch 7700, South Africa, (2000).
 11. Randall, E. W., Wilkinson, A., and Ekama, G. A., An instrument for the direct determination of oxygen utilization rate, *Wat. S. A.*, **17**(1), pp. 11-18 (1991).
 12. Ubisi, M. F., Wentzel, M. C., and Ekama, G. A., Activated sludge mixed liquor heterotrophic active biomass, *Wat. S. A.*, **23**(3), pp. 239-248 (1997).
 13. Dold, P. L., Wentzel, M. C., Billing, A. E., Ekama, G. A., and Marais, GvR., *Activated Sludge Simulation Programs*, Water Research Commission, PO Box 824, Pretoria 0001, South Africa, (1991).
 14. Henze, M., Grady, CPL. (Jr), Gujer, W., Marais, GvR., and Matsuo, T., *Activated Sludge Model No.1, IAWPRC Scientific and Technical Report No.1*, IAWPRC, London, (1987).
 15. Dold, P. L., Ekama, G. A., and Marais, GvR., A general model for the activated sludge process, *Prog. Water Technol.*, **12**(6), pp. 47-77 (1980).
 16. Blanch, H. W., and Clark, D. S., *Biochemical Engineering*, Published by Marcel Dekker, 270 Madison Avenue, New York, (1996).
 17. Rittmann, B. E., and McCarty, P. L., *Environmental Biotechnology*, McGraw-Hill Korea, Seoul, Korea, (2002; 배우근 외 2인 공역).
 18. Ghosh, S., and Pohland, F. G., Kinetic of assimilation multiple substrates in dispersed growth systems, *Wat. Res.*, **6**, pp. 99-115 (1972).
 19. Pitter, P., and Chudoba, J., *Biodegradability of Organic substances in Aquatic environment*, CRC press, Boca Raton, U. S. A., (1990).