

## 미생물 호흡률에 의한 유입 하수의 유기물질과 미생물 분율 측정

†신 항 식·정 형 석·남 세 용  
한국과학기술원 토목공학과  
(접수 : 2001. 6. 30., 게재승인 : 2001. 8. 17.)

### Measurement of the Organic and Biomass Fractions in Sewage by Respirometry

Hang-Sik Shint, Hyeong-Seok Jeong, and Se-Yong Nam  
Department of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 373-1 Kusong-Dong,  
Yusong-Ku, Taejon 305-701, Korea  
(Received : 2001. 6. 30., Accepted : 2001. 8. 17.)

The information about organic and biomass fractions in sewage is essential for the optimal operation and model calibration of biological treatment processes. In the respect of that oxygen is directly associated with respiration and growth of biomass as well as substrate reduction, the respirometry is well known as a suitable method for the analysis of wastewater composition and active biomass. Thus, the organic and biomass fractions in sewage were measured using respirometry. The fraction of readily biodegradable substrate, slowly biodegradable substrate, inert soluble substrate and inert particular substrate are about 10-16%, 1-8%, 32-50% and 2-47%, respectively. The active heterotrophic biomass fraction is about 10-24%, but the autotrophic biomass was not detected in influent sewage.

**Key Words** : respirometry, sewage, organic fractions, active biomass

#### 서 론

호흡률은 활성슬러지 공정의 운영상태를 잘 나타내주는 기술로서 운전제어 인자로 사용할 수 있는 가능성이 오래 전부터 제시되어 왔었다. 과거에는 호흡률을 연속적으로 측정하는 기술이 부족했었으나 지금은 포기조 내의 호흡률을 연속 측정할 수 있는 기법이 개발되면서 적용범위 및 응용분야가 확대되었다. 이러한 호흡률 측정법은 단위 시간, 단위 부피당 미생물이 호흡에 사용하는 산소의 양을 측정하여 이를 해석하는 방법으로써 생물학적 처리공정으로 유입되는 생물학적 분해 가능물질의 농도가 높을수록, 시스템에 존재하는 미생물이 많고, 활성이 높을수록 높은 산소소모량, 즉 호흡률을 나타낸다. 특히, 산소가 미생물의 호흡과 성장 및 기질의 소모에 직접적으로 관여한다는 점에서 하수 및 미생물의 특성을 분석하는데 알맞은 방법이며, 생물학적 처리공정에서 생물학적으로 분해 가능한 물질의 분해 및 속도에 관한 정보를 제공할 수 있는 주요 인자로 알려져 있다(1).

한편 기존의 유기물 측정 방법인 TCOD와 SCOD는 미생물이 사용 가능한 유기물의 농도를 결정하는데는 부적합하기 때문에 활성 슬러지 공정을 모사하는데 사용되는 ASM No.1 (Activated Sludge Model No.1) 등에서는 유입되는 하수의 COD 성분을 미생물의 사용 속도에 따라 4가지 성분으로 구분하고 있다(2). 이는 미생물에 의해 분해가 빠른 readily biodegradable organic matter ( $S_s$ ), 분해가 느린 slowly biodegradable organic matter ( $X_s$ ), 분해되지 않는 용존성 유기물인 soluble inert organic matter ( $S_i$ ), 분해되지 않은 고형 유기물인 particulate organic matter ( $X_i$ )로 구성되며 이와 더불어 미생물인 heterotrophic biomass ( $X_{B,H}$ )도 하수 내에 포함되어 있다고 가정하고 있다. ASM No.1에 의하면 이들 유기물 중  $S_s$  성분은 heterotrophic biomass에 의해 호흡과 성장에 직접 사용되고  $X_s$ 는 가수분해 (hydrolysis)를 통하여  $S_s$ 로 전환된 뒤 사용된다. 그리고 분해되지 않는  $X_i$ 는 침전되어 슬러지와 함께 폐기처분되며,  $S_i$ 는 유출수에 포함되어 배출된다. 또한 탈질 과정에 있어서도  $S_s$ 는 미생물에 의해 바로 탄소원으로 소모 가능하지만  $X_s$ 는 가수분해를 통하여 사용되는 것으로 가정되고 있다. 이러한 세분화된 구분은 하수의 유기물 산화 및 하수의 탈질 능력 뿐 아니라 인 제거 기작에서 미생물에 의한 유기물의 저장 기작에 사용되는 유기물의 성상에 대한 구체적인 정보를 제공해 줄 것으로 기대된다.

본 연구에서는 미생물의 호흡률 측정법을 적용하여 하수의

†Corresponding Author : Department of Civil Engineering,  
Korea Advanced Institute of Science and Technology, 373-1  
Kusong-Dong, Yusong-Ku, Taejon 305-701, Korea  
Tel : +82-42-869-3613, Fax : +82-42-869-3610  
E-mail : hangshin@kaist.ac.kr

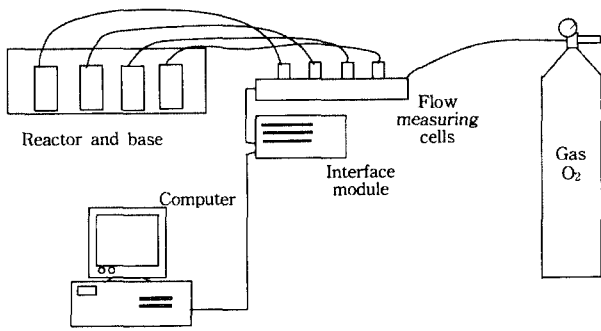


Figure 1. Schematic diagram of respirometer.

유기물질 산화 속도를 측정하였다. 이를 바탕으로 하수 내 유기물 성상을 ASM No. 1을 바탕으로 구분하고 아울러 하수에 포함되어 있을 active heterotrophic biomass와 active autotrophic biomass의 농도를 정량함으로써 하수의 성상을 밝혀보고자 하였다.

재료 및 방법

호흡률 측정기

본 연구에서 사용된 호흡률 측정기는 Challenge Environmental Systems, Inc.에서 제작한 Challenge AER-200 system으로서, 회분식 형태의 미생물 반응조 (reactor), 산소 공급 장치 (gas supplier), 유량 측정 셀 (flow measuring cell) 및 데이터처리와 저장을 위한 컴퓨터 부분 (interface module, computer)으로 구성되어 있다. 실험에 사용된 AER-200 system의 주요 구성도를 Figure 1에 도시하였다.

슬러지 및 하수

본 연구에서는 SRT 18일 정도로 운영되는 장방형의 SBR

공정에서 채취한 슬러지를 사용하였으며 분석을 위해 K 대학 하수처리장으로 유입되는 실하수를 채취하여 사용하였다. 하수처리장은 생활 하수와 오수가 함께 유입되었으며, 실하수의 성상은 시간과 요일, 그리고 날씨의 영향에 민감하게 반응하였다. 평균적인 성상은 Table 1과 같다.

슬러지의 전처리

호흡률 측정에 사용할 슬러지를 후탈질 단계에서 채취하였다. 미량 원소가 포함되어 있는 세척수를 이용하여 2회 이상 세척하고, 2시간 이상 폭기 시킴으로서 슬러지가 포함하고 있을 잔류 COD 및 기타 성분들을 제거하였다. 또한 세척으로 인하여 부족할 수 있는 인 성분과 alkalinity를 각각 5 mg-P/L와 200 mg-CaCO<sub>3</sub>/L로 보충하여 주었다. 세척수에 사용된 미량 원소 및 보충한 성분은 Table 2에 명시하였다.

하수 내 유기물 성분 측정

전처리 된 슬러지에 하수를 주입하고 슬러지의 호흡률을 측정하였다. 질산화에 의한 산소의 소모를 방지하기 위하여 질산화 억제제인 allythiourea (ATU)를 기존의 문헌을 참고하여 30 mg/L로 주입하였다(3). 동시에 하수를 주입하지 않은 슬러지만의 호흡률을 측정하였는데, 이는 미생물의 내생 호흡 (endogenous respiration)을 제외하고 주입한 하수에 의한 호흡률만을 측정하기 위해서이다. 슬러지와 하수의 농도를 변화시켜가며 호흡률 곡선을 측정하였으며, 측정된 호흡률 곡선을 바탕으로 유기물 성상을 구분하였다. 실험에 사용된 조건은 Table 3에 나타나 있다.

하수 내 미생물 농도 측정

미생물의 농도를 도출한 기존의 연구를 바탕으로 하수 내의 heterotrophic biomass 농도를 측정하였다(4-5). 하수 내 미생물은 미생물의 성장에 따른 호흡률의 증가 곡선을 사용하

Table 1. Wastewater characteristics

Components	TCOD	SCOD	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	TKN	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	T-P
Concentration (mg/L)	450 (160~680)	130 (60~180)	40 (35~45)	65 (60~70)	5 (3~7)	6 (5~7)

Table 2. Concentrations of minerals and substrates

	Substrate	Concentration
Phosphate source	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	5 (mg-P/L)
Alkalinity	NaHCO <sub>3</sub>	200 (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )
Minerals	MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	50 (mg/L)
	CaCl <sub>2</sub>	3.75 (mg/L)
	FeCl <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.25 (mg/L)
	MnSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	5 (mg/L)

Table 3. Experimental conditions for organic oxidation monitoring

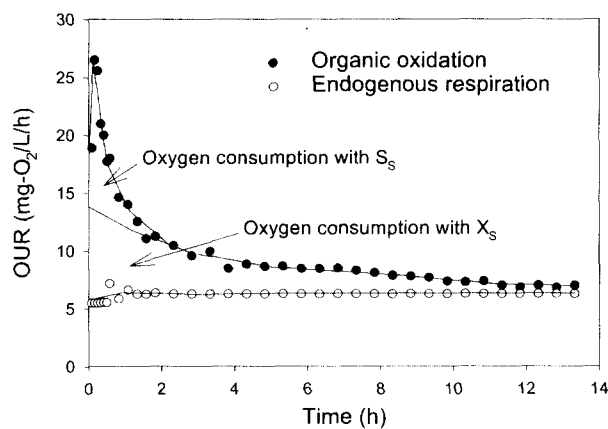
	Organic oxidation	Endogenous respiration
Sludge (mg VSS/L)	1476	1476
Wastewater (mg COD/L)	200	-
Alkalinity (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	200	200
phosphate (mg P/L)	6	6
ATU (mg/L)	30	30

**Table 4.** Experimental conditions for determination of heterotrophic biomass in wastewater

Wastewater (mL)	49
Filtered Wastewater (mL)	601
Alkalinity (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	200
phosphate (mg P/L)	6
ATU (mg/L)	30

**Table 5.** The organic fractions in wastewater

Run	Wastewater		S <sub>s</sub>	S <sub>i</sub>	X <sub>s</sub>	X <sub>i</sub>
	TCOD	SCOD	(S <sub>s</sub> /TCOD)	(S <sub>i</sub> /TCOD)	(X <sub>s</sub> /TCOD)	(X <sub>i</sub> /TCOD)
1	338	163	57 (16%)	28 (8%)	170 (50%)	54.7 (16.2%)
2	148	40	19 (13%)	7 (5%)	47 (32%)	59.38 (40.26%)
3	213	47	22 (10%)	3 (1%)	68 (32%)	100.70 (47.33%)



**Figure 2.** OUR graph for the sludge and wastewater mixture.

였다. 별도의 슬러지의 주입 없이 하수만의 호흡률을 측정하면 하수 내 미생물이 하수의 풍부한 기질을 사용하여 성장하는데 이때 성장과 더불어 호흡률이 증가하게 된다. 이 증가하는 호흡률 곡선을 ASM No.1이 제공하는 미생물 성장식에 대입하여 미생물 농도를 정량하였다. 하수 내 미생물의 분율이 높은 이유로 실 하수를 희석 없이 바로 사용할 경우 미생물의 성장을 효과적으로 관찰할 수 없었다. 따라서 하수(Wastewater, Table 4)를 1.2 μm GF/C로 거른 하수(Filtered wastewater, Table 4)로 희석하여 측정하는 방법을 사용하였다. 또한, 질산화를 억제하기 위해 ATU를 30 mg/L로 주입하였다. 실험에 사용된 슬러지 및 하수의 농도는 Table 4에 나타내었다.

**실험 결과 및 고찰**

**유기물 성장 분석**

호흡률 측정기에 슬러지와 하수를 주입하고 호흡률을 측정 한 실험의 결과는 Figure 2와 같다.

유기물을 주입하지 않은 슬러지의 호흡률은 실험 기간 동안 일정한 반면, 유기물을 주입한 슬러지는 초반에 높은 호흡률을 보이고 이후 천천히 감소하였다. 두 호흡률의 차이가 주입한 하수에 의한 호흡률임을 알 수 있었다. 주입한 하수의 성장 구분을 위해 초반의 높은 호흡률에 의한 산소 소모

(OC<sub>I</sub>)는 S<sub>s</sub>에 의한 것으로 가정하였고, 그 후 내생호흡까지 이어지는 낮은 호흡률에 의한 산소 소모 (OC<sub>II</sub>)는 X<sub>s</sub>에 기한 것으로 가정하였다. 호흡률이 일정해지는 시점을 유기물이 완전히 소모되고 내생호흡이 시작되는 시점으로 판단하고 실험을 중단하였다. S<sub>i</sub>는 실험이 중단된 뒤 호흡률 측정기 반응조의 SCOD 값으로 가정하였고, X<sub>i</sub>의 경우에는 전체 TCOD에 대한 mass balance를 이용하여 구하였다. 유기물의 성장별 농도를 구하는 식을 Eqn. (1), (2), (3), (4)에 나타내었다. 이때, heterotrophic biomass의 yield coefficient는 ASM No.1에서 제공하는 생활하수의 대표값인 0.67을 사용하였다.

$$S_s = \frac{1}{1 - Y_{II}} \cdot OC_I \tag{1}$$

$$X_s = \frac{1}{1 - Y_H} \cdot OC_{II} \tag{2}$$

$$S_i = \text{12 시간 이상 운전한 호흡률 측정기 반응조 유출수의 SCOD} \tag{3}$$

$$X_i = TCOD - S_s - S_i - X_s - X_H - X_A \tag{4}$$

Table 5에 몇 번의 실험에서 밝혀진 하수의 유기물 성장분석 결과를 정리하였다. S<sub>s</sub>의 경우 전체 TCOD의 10-16%, X<sub>s</sub>의 경우 32-50%, S<sub>i</sub>의 경우 1-8% 정도를 차지하는 것으로 밝혀졌고, X<sub>i</sub>의 경우 2-47% 범위를 나타내었다. X<sub>i</sub>의 경우는 COD mass balance를 이용하였기 때문에 값의 변화가 크게 나타났다. Table 6은 본 실험의 결과를 유럽의 생활 하수의 성장과 비교한 것이다. 외국의 자료(2)는 하수 내 미생물 분율을 측정하지 않은 것이므로 본 실험에서 얻어진 실험 결과와 비교할 때 유기물 성장만을 100%로 환산하여 비교하였다. 그 결과 K 대학 하수는 S<sub>s</sub> 부분이 10% 작은 반면, X<sub>i</sub> 성분이 10% 정도 큰 것을 알 수 있다.

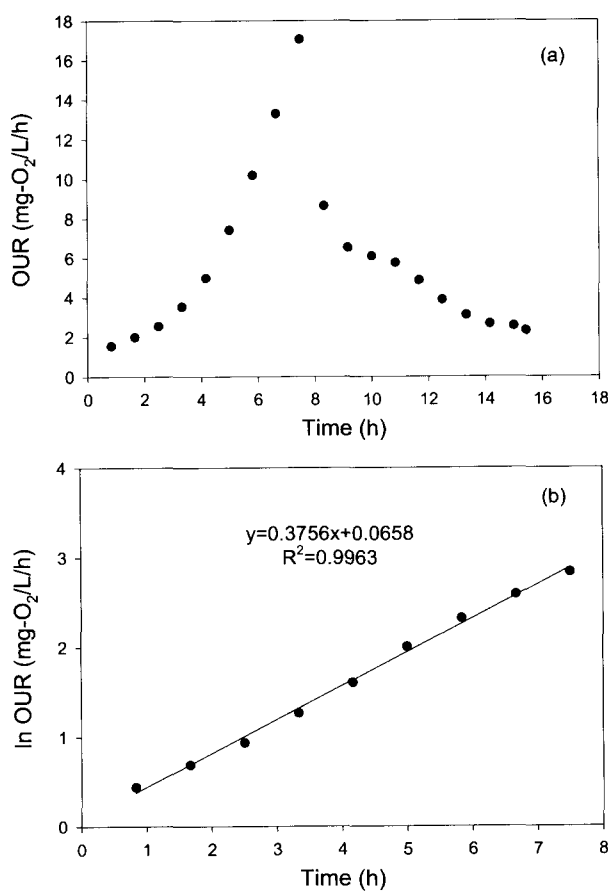
Figure 2에서 유기물 산화 그래프는 ASM No.1에서 제안하는 것처럼 X<sub>s</sub>에 대해서 Monod 식을 따르지 않았고, 오히려 지수 함수 형태로 천천히 감소하는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 실 하수 내에 다양한 유기 물질들이 존재하기 때문으로 판단된다. 또한 하수 내의 다양한 유기물질은 모델의 가정에

**Table 6.** Typical characteristics of settled domestic sewage in Europe(2) and in this study

	Denmark	Switzerland	Hungary	In this study
S <sub>s</sub>	125 (24%)	70 (32%)	100 (29%)	20%
S <sub>i</sub>	40 (8%)	25 (11%)	30 (9%)	5%
X <sub>s</sub>	250 (49%)	100 (46%)	150 (43%)	48%
X <sub>i</sub>	100 (19%)	25 (11%)	70 (20%)	27%

**Table 7.** The active heterotrophic biomass fraction in wastewater

Run	Graph		Biomass concentration (mg-COD/L)	Biomass fraction (X <sub>B,H</sub> /TCOD)
	y-intercept	slope		
1	0.0658	0.3759	98	21%
2	-0.8107	0.4394	40	10%
3	-1.3122	0.3779	70	23%



**Figure 3.** OUR graph of wastewater for the active heterotrophic biomass fraction(a) and the log-linear line of exponential increase of initial OUR(b).

복잡함을 더해 주고 이로 인한 시뮬레이션의 오차도 커지게 됨으로 이에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

**하수 내 미생물의 분율 측정**

하수 내의 X<sub>B,H</sub> 를 정량하기 위해 슬러지의 주입 없이 하수 자체의 호흡률을 측정하였다. Figure 3(a)는 하수 내의 X<sub>B,H</sub>를 정량하기 위해 회석한 원 하수의 호흡률 곡선을 나타내고 있다. 하수 내의 heterotrophic biomass의 호흡률은 기질에 의한 성

장으로 인해 지수 성장 곡선을 그리며 증가하고 이후에 기질의 소모와 더불어 급격히 감소하는 모습을 보였다. 이는 슬러지 내의 active biomass의 농도를 정량하는 기존의 실험(6)과 일치하는 것으로서 하수 내 heterotrophic biomass의 존재를 확인시켜 주는 것이다. 호흡률 곡선의 지수 성장 부분에 자연로그를 취하여 선형화 한 직선을 Figure 3(b)에 나타내었다.

Heterotrophic biomass의 성장식과 biomass 농도에 따른 산소 소모율을 연립하면 호흡률의 증가 곡선으로부터 반응조 내의 초기 미생물 농도를 측정할 수 있는 식을 도출할 수 있다 (Eqn. 5).

$$X_{B,H}(0) = \frac{e^{(y - \text{intercept})} \cdot 24}{\frac{1 - Y_H}{Y_H} \cdot (\text{slope} \cdot 24 + b_H)} \quad (\text{mgCOD/L}) \quad (5)$$

여기서 slope와 y-intercept는 호흡률 증가 곡선을 선형화 한 직선의 기울기와 y-절편을 나타내고, Y<sub>H</sub>와 b<sub>H</sub>는 heterotrophic biomass의 yield와 decay coefficient로서 본 실험에서는 ASM No.1에서 추천하는 값인 0.67과 0.24를 사용하였다.

직선의 기울기와 y 절편, 그리고 Eqn. 5를 이용하여 하수의 active heterotrophic biomass를 정량하면 다음의 Table 7과 같다. 그 결과를 하수의 TCOD 값과 비교하였을 때 하수 내 active heterotrophic biomass는 TCOD의 10~23% 정도를 차지하는 것으로 밝혀졌다.

하수 내 autotrophic biomass를 정량하기 위해서는 질산화에 의한 호흡률을 전체 호흡률에서 구분하여야 한다. 이를 위해 heterotrophic biomass를 정량하는 방법을 동일하게 사용하되, ATU를 주입한 반응조와 그렇지 않은 반응조의 호흡률 곡선의 차이를 구하여 이를 autotrophic biomass에 의한 호흡이라 가정하였다. 그러나 실험한 대상 하수에서는 ATU를 주입한 반응기의 호흡률과 주입하지 않은 반응기의 호흡률의 차이가 나타나지 않았고 이로 미루어 볼 때 하수 원수 내에는 active autotrophic biomass가 존재하지 않는 것으로 판단할 수 있었다.

**요 약**

호흡률 측정법을 이용하여 하수의 유기물 성분을 ASM

No.1에서 제안한 네 가지 성분으로 구분하였다. Ss의 경우 전체 TCOD의 10-16%, Xs의 경우 32-50%, S<sub>i</sub>의 경우 8-1% 정도를 차지하는 것으로 나타났으며, X<sub>i</sub>의 경우 2-47% 정도를 차지하는 것으로 관찰되었다. 그리고 이 결과는 외국의 결과와 비교해 볼 때 Ss 성분이 10% 작은 반면 X<sub>i</sub> 성분은 10% 정도 큰 것으로 비교되었다. 하수의 미생물 농도를 분석한 결과, active heterotrophic biomass가 TCOD의 10-23% 정도를 차지하고 있었으며, active autotrophic biomass는 검출되지 않았다. 본 실험은 현재 TCOD, SCOD로 구분하는 하수의 유기물 성분을 미생물의 이용 정도를 나타내는 호흡률 측정법으로 세분화함으로써, 본 실험 방법을 이용하여 유기물 분해 과정 및 탈질화 그리고 인 제거 기작에 사용되는 유기물에 대한 정보를 구체적으로 제공할 수 있음을 보여 주었다.

### 감 사

본 연구는 광주과학기술원 환경모니터링 신기술 연구센터 를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원과 교육부 두뇌한국 21 사업에 의한 연구결과입니다.

### REFERENCES

1. Spanjers, H., Vanrolleghem, P. A., Olsson, G., and Dold, P.L. (1998), *Respirometry in Control of the Activated Sludge Process: Principles*. IAWQ Scientific and Technical Report No. 7. London, UK.
2. Henze, M., Grady, C. P. L., Jr, Gufer, W., Marais, G. v. R., and Matsuo, T. (1987), *Activated sludge model No. 1*, IAWPRC Scientific and Technical Report No. 1, IAWPRC, London.
3. Spanjers, H. and Vanrolleghem, P. (1995), *Respirometry as a tool for rapid characterization of wastewater and activated sludge*, *Wat. Sci. Tech.*, **31**(2), 105-114.
4. Wentzel, M. C., Mbeve, 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), 117-123.
5. Ubisi, M. F., Jood, T. W., Wentzel, M. C., and Ekama, G. A. (1997), *Activated sludge mixed liquor heterotrophic active biomass*, *Water SA*, **23**(3), 239-247.
6. Shin, Hang-Sik, Hyeong-Seok Jeong and Se-Yong Nam (2001), *Determination of active biomass concentrations in sludge by respirometry*, *J. of KSCE*, **21**(2-B), 165-170.