

MBR 공정에서 미생물 성장의 동력학적 특성

황명구, 정태영, 차기철
연세대학교 환경공학과

Dynamic Modeling of Cell Growth in a MBR Process

Myoung Goo Hwang, Tai young Chung, Gi Cheol Cha
Department of Environmental Engineering, Yonsei University

1. 서론

고농도 유기성폐수의 처리에 있어서 분리막을 응용한 생물학적 처리공정(membrane bioreactor, MBR)은 높은 미생물의 밀도와 미생물의 활성도 등의 이점으로 최근 들어 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 막의 투과특성으로 인하여 막공경(pore size) 이상이 되는 미생물은 차단되어 계외로 빠져나가지 못하고 반응조내에 축적하게 되며, 이에 따른 미생물의 과도한 반응조내 축적은 자칫 미생물의 활성을 저해시킬 뿐 아니라, 막오염의 주된 원인으로 알려진 용해성 대사산물(soluble microbial product, SMP)의 생성을 가중시킬 수 있어 이에 대한 연구가 필요한 실정이다. 생물학적 폐수처리에 있어서 생성된 미생물 및 잔여유기물은 F/M ratio, 기질과 미생물의 농도, HRT (hydraulic retention time), SRT (sludge retention time) 등과 같은 운전인자의 변화와 관계를 갖는다.¹⁾

본 연구에서는 포기방식에 변화를 준 MBR 공정에서의 미생물 성장에 대한 동력학적 접근과 미생물의 활동에 기인하여 생성되는 SMP의 생성특성에 대한 동력학적 접근을 시도하였다.

2. MBR 공정에서 미생물에 대한 동력학적 모델링

연속흐름식 MBR 공정에 있어서 미생물 성장의 동력학적 특성은 일정기간동안의 증식기(unsteady state, 비정상상태)를 통하여 최종적으로 반응조내 VSS성분의 농도가 일정하게 도달하는 정상상태(steady state)에 이르게 된다.^{2),3)}

이러한 비정상 상태(혹은 대수증식기)에 있어서 미생물의 성장속도(μ)에 대한 표현은 Monod식과 contois식³⁾으로 널리 사용되고 있으며, 이를 직선회귀형태로 변형하여 연속반응조내 최대비증식계수(μ_{max})와 반포화상수(K_s) 등과 같은 운전인자를 결정하는데 사용된다.

$$\text{- Monod 식 : } \mu = \frac{\mu_{\max} \cdot S}{K_s + S} \quad (1)$$

$$\text{- Contois 식 : } \mu = \frac{\mu_{\max} \cdot \frac{S}{X}}{K_s + \frac{S}{X}} \quad (2)$$

여기서, μ : specific cell growth rate (1/day), μ_{\max} : maximum specific cell growth rate (1/day), K_s : half-velocity constant (mg/L), S : substrate concentration (mg/L), X : cell concentration (mg/L)

2-1. 비정상 상태에서의 동력학적 특성

일반적으로 반응조내의 기질분해 특성에 대한 진술은 물질수지식을 이용하는 데, 차 등²⁾은 MBR 공정에서의 물질수지식을 기질에 대한 부분(dS/dt)과 미생물 성장에 대한 부분(dX/dt)으로 구분하였으며, 이를 다시 정렬하여 다음과 같은 식으로 물질수지식을 정립하였다. 또한 이식은 실험을 통해 얻어진 $1/X \cdot dX/dt$ 와 $1/X \cdot [(S_i - S_r - S_p) \cdot D - dS/dt]$ 값을 통하여 직선 형태로 표현함으로써 기질분해와 미생물 성장에 관련한 Y 와 K_d 값을 구할 수 있다.

$$\frac{1}{X} \cdot \frac{dX}{dt} = \frac{1}{X} \cdot [(S_i - S_r - S_p) \cdot D - \frac{dS}{dt}] \cdot Y - K_d \quad (3)$$

여기서 S_i : influent substrate concentration(mg/L), S_r : residual substrate concentration in the reactor(mg/L), S_p : substrate concentration in the permeate(mg/L), Y : yield coefficient(mgVSS/mgTOC), D : dilution rate(1/day), K_d : cell decay rate(1/day)

2-2. 정상상태에서의 동력학적 특성

MBR 공정에서 정상상태(steady state)란 반응조내 미생물의 증식속도와 사멸속도가 같은 값을 유지하는 상태($\mu = K_d$)를 말하며, 따라서 dX/dt 는 0으로 간주할 수 있다. 또한 dS/dt 역시 0이 되며, 따라서 위의 식 (3)은 다음과 같이 표현된다. 식 (4)를 통하여 정상상태에서의 기질분해특성에 관련한 Y 값을 구할 수 있다.

$$Y = \frac{\mu \cdot X}{(S_i - S_r - S_p) \cdot D} \quad (4)$$

3. 실험방법 및 재료

Fig. 1에 본 연구에 사용된 실험장치를 나타냈다. 유효면적 12L의 반응조가 실험에 사용되었으며, 기질은 쉽게 분해되는 저분자량의 유기물인 phenol(600mg/L)을 탄소원으로 하는 합성인공기질을 사용하였다. 또한 생물 대사 성분의 정량은 반응조내 phenol농도가 1.0mg/l 이하로 분해 되었을때의 반응조 혼합액 TOC 농도(1.2 μm GF/C로 여과후 0.45 μm 의 membrane filter를 통과한 것)를 생물 대사 성분의 지표로 사용하였다.

유효면적 0.1m², 공경 0.4 μm , 그리고 Polyethylene재질의 Microfiltration membrane을 사용하였으며, flux을 10LMH로 유지하여 HRT를 12시간으로 고정하였다. aeration은 10 L/min으로 일정하게 유지하였으며, Time controller를 사용하여 switch on/off 시킴으로써 간헐포기에 따른 oxic/anoxic 상태를 조성하였다. 실험초기 반응조내 미생물 농도는 1800 mgVSS/L였다.

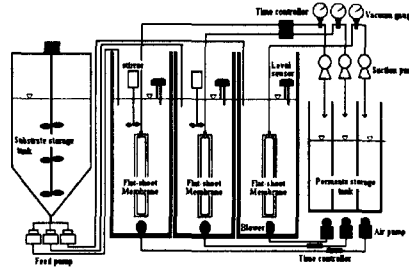


Fig.1. Schematic diagram of membrane bioreactor

4. 결과 및 고찰

Fig. 2에 운전기간동안의 TS 및 VSS의 농도변화를 나타냈다. 초기 TS 농도 3500mg/L에서 각각의 실험조건 모두가 운전경과 약 40일동안 지속적으로 미생물농도가 증가하는 비정상상태를 보였으며, 40일 이후에는 미생물농도가 일정하게 유지되었다. 정상상태에서는 연속포기로 운전된 Run 1이 가장 높은 미생물 농도(약 20,000mg/L)를 보였으며, Run 2와 3가 각각 15,000 mg/L 17,000mg/L에서 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 무산소(anoxic)조건에서의 미생물 내 생 호흡에 의한 자기산화에 기인한 것이라 사료된다.⁴⁾

Fig. 3은 포기조건의 변화에 대한 비정

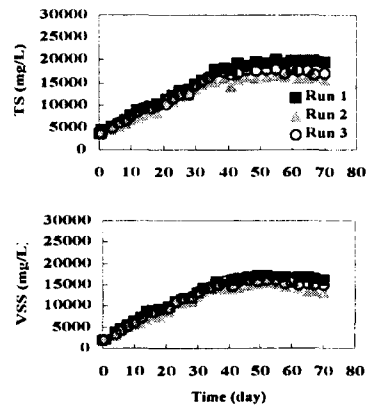


Fig. 2. Accumulation of MLSS and MLVSS in a MBR at each Run

상상상태에서의 각각의 factor를 식 (3)에 대입하여 그 상관성을 나타낸 것으로 직선으로 표현할 수 있었으며, 이 직선식의 기울기 및 절편값이 각각 Y 와 K_d 를 의미한다. $[S_i - S_r - S_p]$ 에서 S_r 과 S_p 는 반응조 및 투과수의 농도가 1.0mg/L 이하였으므로 무시할 수 있었다. 도식결과 각각의 운전조건에서 Y 는 0.621, 0.447, 0.593 mgVSS /mgTOC로 나타났으며, 사멸율(K_d)은 0.02, 0.008, 0.017 1/day로 나타났다. 또한 monod 식과 contois식에 대한 적합성 판단에서 세가지 실험 모두 monod식보다는 contois 식에 더 가까운 연관성을 가지고 있었으며, 식 적용에 따른 μ_{max} 는 각각 0.166, 0.068, 0.058 1/day로 나타났다. 또한 정상상태에서의 식(4)를 이용하여 정상상태의 증식수율, Y 값을 계산해 본결과 각각 0.022, 0.115, 0.005를 보였으며, K_d 값은 0.0012, 0.0075, 0.0005 1/day를 나타냈다.

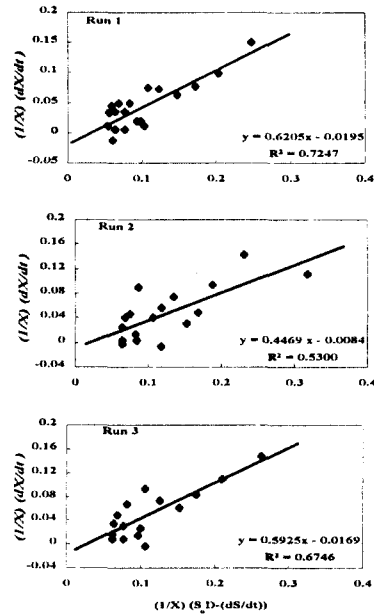


Fig. 4. Simulation of unsteady state using eq (3)

5. 참고문헌

- 1) Pribyl, M., Tucek, F., Wilderer, P. A., and Wanner, H. (1996) "Amount and nature of soluble refractory organic produced by activated sludge microorganism in SBR and continuous flow reactors-A comparative study.", First IAWQ specialized conference on sequencing Batch Reactor Tech., P. 33 (1996).
- 2) 차기철, 이동열, 정형근, 김동진. (2001) "침지형 막분리 활성슬러지 법에 있어서 생물대사산물의 동력학적 특성". 대한환경공학회지, 23(2), pp269~279.
- 3) 栢分英助, 前田嘉道, 菅健一, (1989) "七ルローズ系廢水の嫌氣性消化における動力學的解析." 醱酵工學會誌, 67(2), 99~104.
- 4) 황명구, 차기철, 정태영 (2000) "막분리 활성슬러지 공정에서 호기-무산소 조건 변화에 따른 유기물 분해 특성 및 용해성 생물대사산물이 막투과유속에 미치는 영향" 한국막학회 추계학술대회, pp127~130.