

부하율에 따른 막오염 및 미생물의 성장특성

유영욱 · 정태영 · 차기철

연세대학교 환경공학부

Kinetic Characteristics of Cell Growth and Membrane Fouling by the Loading Rate

You, Young Uk, Jeong, Tae Young, Cha, Gi Cheol
Division of Environmental Engineering, Yon Sei University

1. 서론

분리막을 응용한 생물학적 처리공정(membrane bioreactor, MBR)은 높은 미생물의 밀도와 미생물의 활성도 등의 이점으로 중수도 시스템과 오,폐수 처리에 있어서 MBR공정의 사용이 점차 증가하고 있는 실정이다. 그러나 많은 장점에도 불구하고 그 도입이 망설여지는 이유는 막오염 문제가 충분히 해결되고 있지 않기 때문이다. 기존의 많은 연구를 통해 MBR공정에서 막오염을 야기하는 물질들은 유입수 중에 포함된 미분해 물질에 기인하기 보다 미생물의 대사과정에서 생성된 생분해성을 갖지 않은 성분인 세포외 중합물질 (extracellular polymeric substances, EPS)[1]과 $0.45\mu\text{m}$ 이하의 용해성대사생성물질(soluble microbial products, SMP)로 알려져있다. 이러한 물질들은 floc형성에 악영향을 주며 막공경의 폐색을 유발하고 막면 gel층형성에 기인하여 막투과유속의 저하에 직접적인 영향을 미친다고 보고되고 있으며, 최종 처리수 내에 존재하여 처리수중 유기물 농도를 증가시키고 처리수질에 악영향을 유발시킨다고 보고되고 있다.[4]

이러한 막오염 원인물질에 대해 각각 EPS, SMP물질이 막오염 원이라고 규명되고 있지만 이들 상호간의 관계에 따라 막에 미치는 영향에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 유기물의 유입부하에 변동을 주었을 때 미생물의 대사에 따른 생물대사성분(SMP)과 세포외중합물질(EPS)의 생성과 구조, 그리고 각각의 메카니즘을 파악하고 이에 따른 미생물의 성장과 사멸을 동력학적으로 접근하고자 한다.

2. 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]

기질 소비에 따른 미생물 성장에 있어서 미생물의 성장속도(μ)에 대한 표현은 Monod식과 Contois식으로 널리 사용되고 있다.

$$\text{Monod 식 : } \mu = \frac{\mu_{\max} \cdot S}{K_s + S} \quad (1) \quad \text{Contois 식 : } \mu = \frac{\mu_{\max} \cdot \frac{S}{X}}{K_s + \frac{S}{X}} \quad (2)$$

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)

또한, 반응기내에서의 기질분해 및 미생물의 성장은 물질수지식을 이용하여 설명이 가능하며, 차 등[2]은 MBR 공정에서의 물질수지식을 기질분해와 미생물성장으로 나누어 설명하고, 이를 토대로 비정상상태에서와 정상상태($dS/dt = dX/dt = 0$)에서의 수리학적 모델식과 SMP형서의 모델식을 다음과 같이 정립하였다.

(비정상상태)

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

(정상상태)

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

SMP formation

$$\frac{dSMP}{dt} = \alpha \left(\frac{dX}{dt}\right) + \beta X - D \cdot SMP \quad (5)$$

X에 의하여 양값을 나누면 α, β 값을 구할수 있다.

$$\left(\frac{dSMP}{dt} + D \cdot SMP\right) \cdot \frac{1}{X} = \alpha \left(\frac{dX}{dt}\right) \cdot \frac{1}{X} + \beta \quad (6)$$

여기서 S_i : 유입기질의 농도(mg/L), S_r :반응조내 잔여기질의 농도(mg/L), S_p : 투과수중의 기질농도 (mg/L), D : 희석율(1/day), Y : 성장수율 (mgVSS/mgTOC), K_d : 사멸율(1/day) α :기질대사로부터 형성되는, UAP factor (dimensionless), β :미생물물질대사로 형성되는, BAP factor (1/day), SMPp: 투과수중 SMP의 농도(mg/L)

3. 실험 장치 및 방법

실험에 사용한 원수의 성상은 탄소원으로 C_6H_5OH 과 질소원으로는 NH_4Cl 를 사용하였고, pH buffer로 $NaHCO_3$ 를 이용하였다.

실험에 사용된 분리막은 일본 M사에서 제작된 막으로서 막의 면적은 $0.1m^2$, 막공경은 $0.4\mu m$ 이며, 막의 재질은 polyethylene인 plate & frame membrane을 사용하였다.

운전은 막투과 유속의 영향을 배제하기 위해 Flux를 $8.333L/m^2/hr$ 로 일정하게 유지시킨 상태에서 반응조의 용적을 20L,15L,10L로 변화를 주어 유입 부하량[TOC loading rate (Kg TOC/m³/day)]을 0.26, 0.346, 0.52 로 맞추어 운전하고 반응조의 온도는 열제어기 (thormo- controller)를 사용하여 $25^\circ C \pm 1$ 로 유지시켜 주었고, 기질주입은 peristaltic pump를 사용하여 일정하게 유입하고 송기량은 10LPM으로 유지시켜 실험에 임하였다. 생물 대사 성분의 정량에 대해서는 쉽게 분해되는 저분자량 유기물인 페놀이 $1.0mg/l$ 이하로 분해 되었을 때부터 이때의 반응 혼합액의 TOC 농도($1.2\mu m$ GF/C로 여과하여 $0.45\mu m$ 의 membrane filter를 통과한 것을 SMP의 지표로서 사용한다. ECP의 지표는 고속원심분리후 0.1N NaOH를 사용하여 ECP를 추출하는 방법을 사용하였다.

TOC 분석은 TOC-5000A (Shimadzu)을 사용하고, E260의 분석은 자외선 흡광광도계(UV Spectrophotometer, Shimadzu)를 사용하고, 단백질 (Protein)분석은 Lowry method를 사용하고 탄수화물(Carbohydrate)은 Anthron 황산법을 사용하였다. 암모니아성 질소(NH_4-N),등 기타 항목은 Standard Method를 통해 분석하였다.

SMP의 지표는 반응조 혼합액의 phenol의 농도가 $1mg/L$ 이하로 분해되었을 때 반응조 혼합액의 TOC($1.2\mu m$ GF/C로 여과하여 $0.45\mu m$ 의 membrane filter를 통과한 것)농도로 설정하였다. ECP의 지표는 고속원심분리후 0.1N NaOH를 사용하여 ECP를 추출하는 방법을 사용했다.

4. 결과 및 고찰

운전초기 미생물 농도(MLSS)는 약 2,500 mg/L 였으며, 유입부하량이 가장 적은 Run-1의 경우 운전경과 125일째 미생물 농도가 10,600mg/L까지 증가한 반면, Run-2의 경우 운전경과 84일 후 10,920mg/L까지 증가한 것을 확인할 수 있었다. 반면 가장 높은 유입부하로 운전된 Run 3의 경우 불과 운전개시 68일 경과 후 10,350mg/L까지 증가한 것을 확인할 수 있었으며, 유입부하가 높을수록 높은 미생물 성장을 보이는 것을 관찰할 수 있었다.

또한 비정상상태에서의 실험값을 식 (1),(2)에 대입해 본 결과 Monod 식보다는 Contois 식에 보다 적합한 것을 확인할 수 있었다.

동력학적 모델식에 적용시켜 본 결과 각각의 실험조건에 따른 동력학적 인자는 Table 1과 같이 나타났다.

Table 1. kinetical factor for each Run

	Run 1	Run 2	Run 3
loading rate	0.26	0.346	0.52
Y	0.4458	0.6721	0.8462
Kd	0.0125	0.0222	0.0366
α (dimensionless)	0.0013	0.0057	0.0156
β (1/day)	0.0077	0.0085	0.0091

5. 참고 문헌

- 1) M.Pribyl, F., Tucek and P.A.Wilderer., J. Wanner., 1996, *Amount and Nature of Soluble Refractory Organics Produced by Activated Sludge Microorganisms in SBR and Continuous Flow reactors-A Comparative study*, First IAWQ specialized conference on Sequencing Batch Reactor Technology.
- 2) 차기철, 이동열, 정형근, 김동진.,2001, 침지형 막분리 활성슬러지 법에 있어서 생물대사산물의 동력학적 특성, 대학환경공학회지 23(2), pp 269-279
- 3) 황명구, 정대영, 차기철.,2001 *MBR 공정에서 미생물 성장의 동력학적 특성*, 한국막학회 춘계학술대회. pp120-123 .
- 4). Namkung, E. and Rittmann, B.E. 1986, *Soluble microbial products (SMP) formation kinetics by biofilms*, Water Science and Technology, 20, 795-806.