

산업폐수처리를 위한 호기성 생물막 유동층 반응기의 연구(Ⅲ)

- 유기물 제거에 관한 수학적 모델 -

안갑환* · 박상준** · 송승구

부산대학교 공과대학 화학공학과, *지산전문대 환경관리과
**경원대학교 공과대학 화학공학과
(1993년 11월 2일 접수)

A Study on Aerobic Fluidized-Bed Biofilm Reactor for Treating Industrial Wastewaters(Ⅲ)

- Mathematical model for organic removal -

Kab-Hwan Ahn*, Sang-Joon Park** and Seung-Koo Song

Dept. of Chem. Eng., Pusan National University
**Dept. of Enviro. Sci. & Tech., Jisan Junior College*
***Dept. of Chem. Eng., Kyungwon University*
(Manuscript received 2 November 1993)

Abstract

A mathematical model for organic removal efficiency was investigated in a fluidized bed biofilm reactor by changing the feed flow rate, the residence time and the recycle flow rate.

In batch experiment, organic removal could be assumed as first order and an intrinsic first order rate constant(k_1) was found $6.4 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{mg}\cdot\text{sec}$ at influent COD range of 3040 - 6620 mg/L.

In continuous experiment, at the condition of the influent COD, 3040 mg/L, the superficial upflow velocity, 0.47 cm/sec, the biofilm thickness 336 μm and the biofilm dry density 0.091 g/mL, the calculated COD removal efficiency from the mathematical model gave 60 % which was very close to the observed value of 66 %.

As the feed flow rate was increased, the COD removal efficiency was sharply decreased and at constant feed flow rate, the COD removal efficiency was decreased also as the residence time being decreased.

Key Words : fluidized-bed biofilm reactor, organic removal, mathematical model

1. 서 론

생물막 유동층 반응기는 살수여상이나, 활성슬

러지법과 같은 재래식 폐수 처리공정에 비해 물질 전달 및 열전달이 잘 이루어지므로 부착 미생물에 산소 및 기질 공급이 잘 되며, 지지 매체의 종류

에 따라 비표면적이 넓어지므로 미생물과 기질의 접촉면적이 증가되고, 유속조절에 따라 미생물막의 두께 및 농도가 조절된다. 또한, 미생물이 지지매체에 부착되어 증식되므로 슬러지의 반송과 2차 침전지의 역할이 감소되며 반응기가 수직으로 설계되므로 폐수 처리장의 설치면적이 적게 요구된다(Cooper, 1981; Theodore, 1980).

위와 같은 많은 장점에도 불구하고 아직 현장에 많이 적용되지 않는 이유는 생물막 유동층 반응기가 미생물의 부착 특성에 의해서 영향을 받을 뿐만 아니라 유동 특성에 대해 민감한 영향을 받으므로 운전조작의 변수를 많이 가지고 있기 때문이다.

그러나 반응기내의 미생물이 고농도이고, 충격 부하 및 유독성 폐수에 대한 반응기의 안정도(Nutt *et al.*, 1984; Ademoroti and Sridhar, 1979)가 크다는 장점과 최근 microprocessor의 급격한 발달로 장치를 단순화 하면 안정적으로 운전할 수 있으므로 최근 많은 연구자의 관심을 끌고 있다(Reiber and Stensel, 1985; Ngian and Martin, 1980; Poncelet *et al.*, 1990).

본 연구에서는 생물막 유동층 반응기의 효과적인 운전조작과 효율적인 유기물 제거를 위하여 상향유속에 따른 미생물 농도 및 유기물 제거 효율을 예측하는 수학적 모델을 설정하고 실험값과 비교 검토하였다.

2. 재료 및 방법

본 실험에 사용된 합성폐수는 탄소원으로 글루코즈, 질소원으로 요소를 사용하고 여러가지 종류의 무기 염류를 첨가하여 Table 1과 같이 조성되었다. 유동층 장치는 내경이 8.9 cm, 높이가 190 cm, 총 부피가 12 L인 아크릴 원형관으로 제작되었다. 반응기 외부에는 항온용 jacket이 설치되어 순환용 펌프로 항온수가 순환되고, 유기물 농도와 미생물 농도를 측정하기 위해 약 40 cm 간격으로 6 개의 채취구를 설치하였으며, 전보에 그 구조와 상세한 운전방법이 기술되어 있다(박영식 외, 1993).

Table 1. Composition of the synthetic wastewater (UNIT : g/ℓ)

Components	Concentration(g/ℓ)
CODcr	2.5
Glucose	4
Nutrient broth	0.1
Na ₂ HPO ₄	1
KCl	0.14
Urea	1
CaCl ₂	0.14
NaCl	0.3
MgSO ₄	0.1

3. 생물막 유동층 반응기의 수학적 모델

3.1 회분식 실험 모델

Fig. 1과 같이 외부로의 유출입을 정지시키고 순환속도를 증가시킨 순환조 및 유동층은 완전혼합조로(Shieh and Keenan, 1986; Elmaleh and Grasmick, 1985) 가정할 수 있다.

순환조에서의 물질수지는 다음과 같이 되며

$$Q(S_b - S_{bF}) = V_R \frac{dS_{bF}}{dt} \tag{1}$$

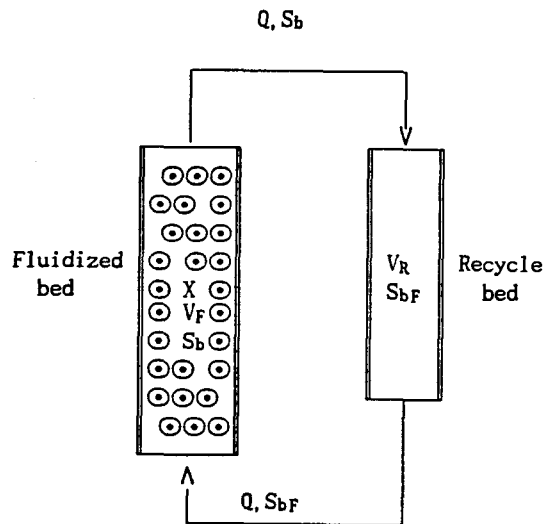


Fig. 1. Schematic diagram for a batch experiment.

여기서 Q 는 순환유량, S_b 는 유동층내의 기질농도, S_{bF} 는 순환조내의 기질농도, V_R 는 순환조의 부피이다.

유동층내에서의 물질수지와 초기조건은 다음과 같다.

$$Q(S_{bF} - S_b) = r_s \cdot V_F + V_F \frac{dS_b}{dt} \quad (2)$$

$$I.C.: t = 0, \quad S_{bF} = S_{bF0}, \quad S_b = S_{b0} \quad (3)$$

여기서 V_F 는 유동층의 부피, S_{bF0} 및 S_{b0} 는 초기 순환조 및 유동층에서의 기질농도이다.

기질이 생물막을 통과하여 지지 매체에까지 완전히 침투되면 1차반응으로 가정되므로(Shieh and Keenan, 1986), 유동층내의 반응속도식은 유효인자를 도입한 다음식으로 표현할 수 있다.

$$r_s = \eta_1 \cdot k_1 \cdot X \cdot S_b \quad (4)$$

여기서, k_1 은 고유 1차 속도상수, X 는 미생물의 농도, η_1 는 유효인자이다(Vos *et al.*, 1990; Fogler, 1986).

식(1)과 식(2)을 풀어 정리하면 다음과 같은 시간에 따른 순환조 내에서의 기질농도를 구할 수 있다.

$$S_{bF} = D_1 \cdot \exp(m_1 \cdot t) + D_2 \cdot \exp(m_2 \cdot t) \quad (5)$$

여기서 $m_1, m_2 = (-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}) / 2a$ 이며, D_1 과 D_2 는 다음과 같다.

$$K1 = \eta_1 \cdot k_1 \cdot X$$

$$a = V_F \cdot V_R$$

$$b = Q \cdot V_F + (Q + K1 \cdot V_F) \cdot V_R$$

$$c = K1 \cdot Q \cdot V_F$$

$$D_1 = \frac{S_{bF0}(m_2 \cdot V_R / Q + 1) - S_{b0}}{(m_2 - m_1) \cdot V_R / Q}$$

$$D_2 = \frac{S_{b0} - S_{bF0}(m_1 \cdot V_R / Q + 1)}{(m_2 - m_1) \cdot V_R / Q}$$

즉, 식(5)에서 시간에 따른 순환조 및 유동층에서의 기질농도변화를 해석적으로 구할 수 있다.

3.2 연속 실험 모델

Fig.2와 같이 폐수의 유입 및 유출이 연속적으로 이루어지는 연속 실험의 경우에 순환조에서 기질의 물질수지는 다음과 같으며

$$F \cdot S_{b0} + Q \cdot S_b = S_{bF}(F + Q) \quad (6)$$

여기서 F 는 기질 유입 유량속도이다.

유동층에서의 물질수지는 다음과 같고,

$$Q \cdot S_{bF} = Q \cdot S_b + V_F \cdot r_B \quad (7)$$

반응속도는 1차 속도식으로 표현되어지므로

$$r_s = \eta_1 \cdot k_1 \cdot X \cdot S_b$$

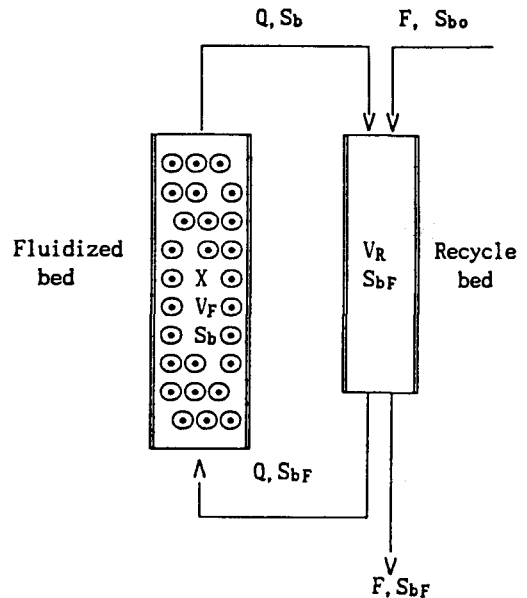


Fig. 2. Schematic diagram of a continuous experiment.

식(6)과 (7)을 정리하면 순환조내의 기질농도는 다음과 같이 유도된다.

$$S_{bf} = \left[\frac{S_{bo}(1 + K_1 \cdot \tau)}{[1 + (1 + R)K_1 \cdot \tau]} \right] \quad (8)$$

여기서, $\tau = V_F / Q$

$R = Q / F$

$K_1 = \eta_1 \cdot k_1 \cdot X$

순환조내에서의 기질농도는 유입농도(S_{bo}), 미생물 농도(X) 및 반응기의 체류시간(τ)의 함수로 표현되어 산술적 계산이 가능하다.

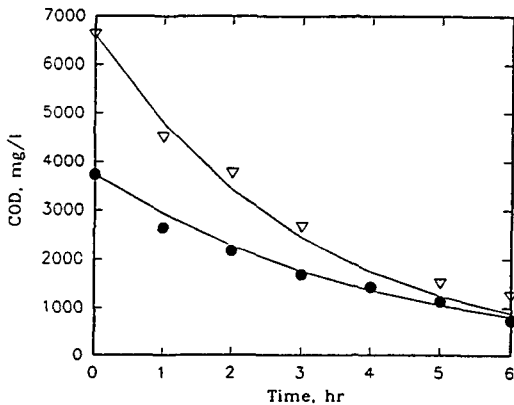


Fig. 3. Comparison of measured and predicted COD concentrations in a batch reactor

Initial concentration : ● : 3740mg/ℓ
 ▽ : 6620mg/ℓ

4. 결과 및 고찰

4.1 생물막 유동층 반응기의 반응속도

지지 매체에 부착된 미생물에 의한 유기물 제거 속도를 검토하기 위하여 기질의 초기 COD 농도를 3740 및 6620 mg/ℓ로 바꾸면서 Fig. 1과 같은 회분 실험을 행하여 1차 반응속도상수 k_1 를 시행-오차법으로 구하여 $6.4 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{mg} \cdot \text{sec}$ 를 얻었다. 실험값과 식(5)로부터 계산된 값을 비교한 결과를 Fig.3에 나타내었다. 순환 개시부터 5 시간

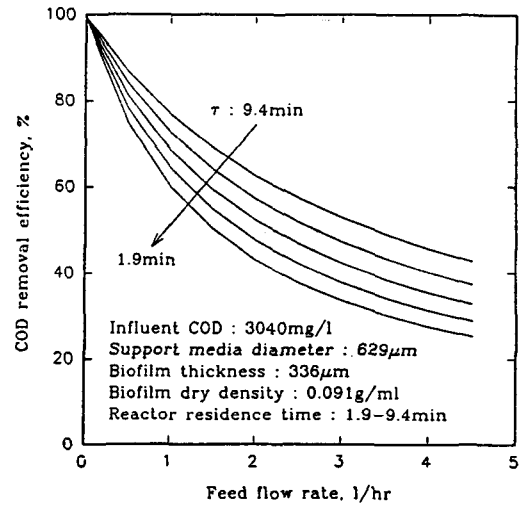


Fig. 4. Effect of feed flow rate on COD removal efficiency.

범위내에서는 계산값과 실측치가 비교적 잘 일치 하였으나 5시간 이후 부터는 계산값 보다 실측치의 농도가 조금 높게 나타났다. 초기 기질 농도가 COD 3740 mg/ℓ의 경우 10시간이 경과 되면 3220 mg/ℓ가 감소되었지만, 다시 10 시간이 더 경과 되었을 때에는 단지 376 mg/ℓ만 감소되었다. 이는 기질제거속도가 기질 농도의 함수이므로 폐수를 완벽하게 처리하는데는 많은 시간이 소요됨을 알 수 있다.

4.2 유입폐수 유량속도 및 순환체류시간 (τ)

연속실험은 정상상태에서 식(8)을 이용하여 유입폐수 유량속도(0 - 4.5 ℓ/hr) 및 반응기내의 순환체류시간 변화(9.4 - 1.9 min)에 따른 COD 제거효율을 예측하여 Fig.4에 나타내었다. 유입폐수 유량속도를 증가시키면 COD 제거효율은 급격하게 감소하였고, 일정 유입폐수 유량속도에서 순환 체류시간이 감소함에 따라라도 COD 제거효율은 감소하였다. 즉, 유입폐수 유량속도를 2.0 ℓ/hr 로 고정한 상태에서 유동층내 순환체류시간 τ 가 9.4 min 일 때의 제거효율은 63 %였지만 순환체류시간 τ 가 1.9 min으로 빨라지면 제거효율이 44 %로 나타남을 알 수 있었다. 유입 COD 3040 mg/ℓ,

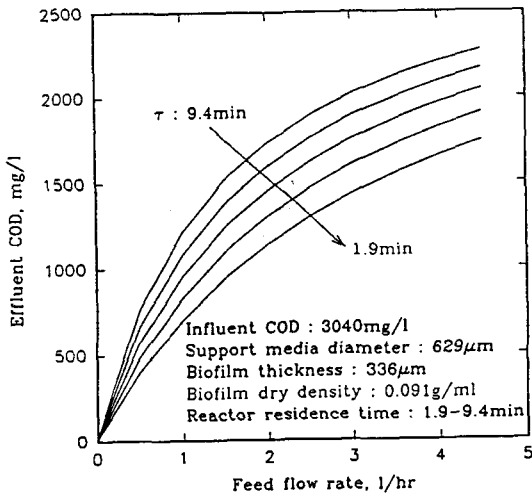


Fig. 5. Effect of feed flow rate on effluent COD concentration.

순환체류시간 4.4 min, 생물막 두께 336 µm, 건조 밀도 0.091 mg/l 에서 COD 제거효율의 실측값은 66 %였고, 예측된 값은 60 %로 나타났다.

위와 같은 조건에서 COD 3040 mg/l 의 농도가 유입되었을 때 유입폐수 유량속도의 변화에 따른 유출수의 COD 농도 변화를 Fig.5에 나타내었다. 그림에서 순환체류시간(τ)이 4.4 min이면 실험값의 유출 COD 농도는 1023 mg/l 였고, 식(8)로부터 예측된 유출 COD 농도는 1220 mg/l 로 나타

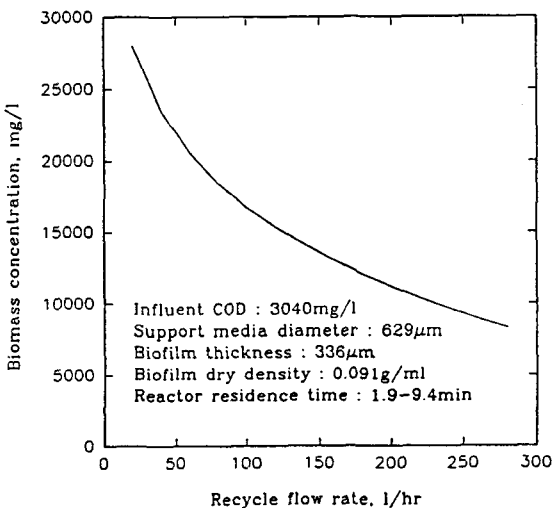


Fig. 6. Effect of recycle flow rate on biomass concentration.

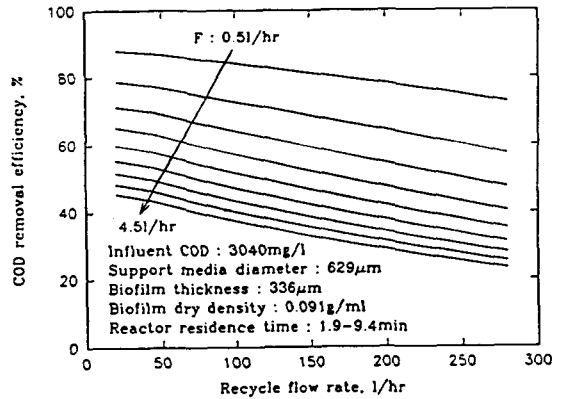


Fig. 7. Effect of recycle flow rate on COD removal efficiency.

났다. 이는 설정된 모델이 주어진 조건에서 COD 제거효율과 유출수의 COD를 잘 예측함을 알 수 있었다.

4.3 순환유량속도

순환유량속도의 변화는 유동층 반응기내의 층공극률을 변화시키고 생물막에 전단응력으로 작용함으로써 생물막 두께를 변화시켜 단위 부피당의 미생물 농도를 변화시키게 된다. 순환유량속도가 0 - 300 l/hr 로 증가함에 따라 Fig.6에서 처럼 미생물의 농도는 선형적으로 낮아졌다. 순환유량속도의 변화에 따른 COD 제거효율의 변화를 Fig.7에 나타내었다. Fig.7에서 보여주는 바와 같이 순환유량속도를 0 - 300 l/hr의 범위로 변화시키더라도 COD 제거효율은 약 10% 정도 변화였지만, 유입폐수 유량속도 F를 증가하였을 경우의 변화를 나타내므로, 순환유량속도를 변화시켰을 경우보다 더 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

5. 결 론

생물막 유동층 반응기에서 유기물 제거효율을 높이기 위하여 유입폐수 유량속도, 체류시간 및 순환유량속도의 변화에 따른 유기물 제거효율의 수학적 모델을 설정하고 실험값과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 회분 실험에서 기질의 초기 COD 농도가 3740 및 6620 mg/l의 범위일 때 미생물에 의한 유기물 제거는 유기물 농도에 대하여 1차식으로 표현되었으며 1차 반응속도상수, k_1 은 $6.4 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{mg} \cdot \text{sec}$ 로 구해졌다.
- 2) 유입 COD농도, 3040 mg/l, 상향유속, 0.47 cm/sec, 생물막 두께 336 μm , 건조 밀도 0.091 mg/l에서 COD 제거효율의 실측값은 66 % 였으나, 연속식 모델로 구한 값은 60 %로 나타났고, 유입폐수 유량속도를 증가시키면 COD 제거효율은 급격하게 감소하였으며, 일정 유입폐수 유량속도에서 체류시간이 감소함에 따라서도 COD 제거효율은 감소하였다.
- 3) 유입폐수 유량속도는 순환유량속도보다 COD 제거효율에 더 민감하게 작용하며 유입폐수 유량속도가 증가 할수록 COD 제거효율이 급격하게 감소됨을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 1992년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술 연구조성비에 의하여 연구되었습니다. 이에 대하여 감사 드립니다.

참고문헌

- 박영식, 김동식, 안갑환, 송승구, 1993, "산업폐수 처리를 위한 호기성 생물막 유동층 반응기의 연구(I)", 대한환경공학회지, 15(6).
- Ademoroti, C. M. A. and M. K. C. Sridhar, 1979, Fluidized Bed Technique in Physico-Chemical Treatment, Eff. and Wat. Treatment J., June, 291-297.
- Cooper, P. F., 1981, The Use of Biological Fluidized Beds for the Treatment of Domestic and Engineer, Aug. /Sept., 373-376.
- Elmaleh, S. and A. Grasmick, 1985, Mathematical Models For Biological Aerobic Fluidized Bed Reactor, ELSEVIER, 525-581.
- Fogler, H. S., 1986, Elements of Chemical Reaction Engineering, PRENTICE-HALL, 562-570.
- Ngian, K. F. and W. R. B. Martin, 1980, Bed Expansion Characteristics of Liquid Fluidized Particles with Attached Microbial Growth, Biotechnol. Bioeng., 22, 1843-1856.
- Nutt, S. G., H. Melcer and J. H. Pries, 1984, Two-stage Biological Fluidized Bed Treatment of Coke Plant Wastewater for Nitrogen Control, J. of WPCF., 56(7), 851-857.
- Poncelet, D., H. Naveau and E. J. Nyns, 1990, Transient Response of a Solid-Liquid Model Biological Fluidized Bed to a Step Change in Fluid Superficial Velocity, J. Chem. Tech. Biotechnol., 48, 439-452.
- Reiber, S. and D. Stensel, 1985, Biologically Enhanced Oxygen Transfer in Fixed Film System, J. of WPCF., 57(2), 135-142.
- Shieh, W. K. and J. D. Keenan, 1986, Fluidized Bed Biofilm Reactor for Wastewater Treatment, Advances in Biochem. Eng. Biotechnol., 33, 131-169.
- Theodore, C. S., 1980, Fluidized Bed for Biological Wastewater Treatment, ASCE, 106, 227-241.
- Vos, H. J., P. J. Heederik, J. J. M. Potters and K. Ch. A. M. Luyben, 1990, Effectiveness Factor for Spherical Biofilm Catalyts, Biopro. Eng., 5, 63-72.