

생물막 유동층 반응기를 이용한 폐수처리시 미생물 농도 예측에 관한 연구

이민규*, 안갑환**, 김성수**

A Study on Biomass Concentration Prediction in a Fluidized-Bed Biofilm Reactor for Wastewater Treatment

*Min-Gyu Lee**, *Kab-Hwan An***, *Sung-Soo Kim***

Summary

This experiment was carried out to investigate biomass concentrations of attached biofilm in a Fluidized-Bed Biofilm Reactor(FBBR) which was run by varying influent COD from 2,070mg/ℓ to 12,400mg/ℓ. The following conditions fixed during the experiments: superficial upflow velocity was 0.47 cm/s, operating temperature was 22±1°C and pH was 7±0.1. The Substrate was glucose based synthetic wastewater. The COD removal efficiency was shown as 73% and 93%, respectively, when influent COD was increased from 2,070mg/ℓ to 12,400mg/ℓ. The observed biomass concentrations were pretty close to those calculated from the equation with measured parameters, such as biofilm thickness, biofilm density, bed porosity and bioparticle diameter.

서 론

최근 석유화학공업 관련 공장에서 배출되고 있는 폐수는 업종에 따라 높은 유기물질을 함유하고 있을 뿐만 아니라 미생물 성장에 유해한 독성물질을 함유하고 있어 이를 효과적으로 처리하기 위한

여러 공정이 연구 개발되고 있다(Fan 등, 1990; 주 등, 1988; 박 등, 1990).

생물막 유동층 반응기(FBBR : Fluidized-Bed Biofilm Reactor)는 반응기에 비교적 크기가 작은 지지체를 넣고 유체의 흐름으로 지지체에 유동성을 주어 지지체와 지지체사이의 공극 폐쇄현상을 배제하고 미생물막과 폐수와의 접촉면적을 증가시키기 위한 반응기이다. 따라서, 유동층이 갖는 특

* 공과대학 화학공학과(Dept. of Chem. Eng., Cheju Univ., Cheju-do, 690-756, Korea)

** 지산간호보건전문대학 환경관리과

인해 반응기내에 고농도의 미생물을 유지할 수가 있고, media에 부착된 미생물막의 두께가 균일하게 유지되기 때문에 고농도의 유기성 폐수를 효과적으로 처리할 수 있으며, 2차 침전지를 설치하지 않아도 되는 장점을 가지고 있으므로 활성 슬러지법과 실수 여상법의 단점을 보완하는 한편 이들 두 공법의 장점만을 병합한 공정이라 할 수 있다 (Theodore, 1980; Michael 등 1980).

생물막 유동층 반응기는 미생물의 특성에 의해서 영향을 받을 뿐만 아니라 유동 특성에 대해 민감한 영향을 받으며, 동력비가 비교적 많이 소요되고 운전조작이 까다롭기 때문에 현장에서 일반적으로 적용하기에는 아직 많은 문제점을 가지고 있다. 그러나 media에 미생물을 고농도로 부착 유지하는 것이 가능하므로, 반응기내 미생물 농도를 높게 유지할 수 있어 고농도 유기물 함유 폐수를 효율적으로 처리할 수 있고, SRT(solid retention time)가 길게 유지되어 슬러지의 발생량이 적고 반응기 내에서 유출되는 슬러지의 양이 적어질뿐 아니라, 특히 충격부하 및 유독성 폐수에 대한 반응기내의 안정도가 크다(Reiber, 1985)는 커다란 장점때문에 최근 많은 연구가 이루어지고 있다(Ngian, 1980; Kargi와 Park, 1982; Shieh 등 1982; 김 등, 1991).

또한 FBBR은 수직 반응기이므로 수평으로 이어진 활성슬러지법에 비해 물질전달과 확산의 잇점 이외에도 산소 이용율이 증가되므로 적은 용량으로 높은 처리효율을 얻을 수 있을 것으로 기대되고, 부유 미생물 농도가 적어 반송펌프가 불필요하게 되며, 수직 설비에 의해 설치부지 면적을 적게 요구하므로 우리나라와 같이 국토가 좁은 나라에서는 비교적 적합한 공정이라 할 수 있다.

미생물막 반응기에서 기질전환속도는 일반적으로 미생물의 농도가 증가함에 따라 증가하므로 처리효율이 증가하지만 과도하게 성장한 미생물막은 bioparticle의 전체 밀도를 감소시켜 반응기로부터 쉽게 유출되므로, 미생물막 유동층 반응기에 있어서 미생물 농도와 bioparticle의 밀도가 중요한 인자가 된다. 따라서 본 연구에서는 생물막 유동층 반응기내에서 이들 인자들을 예측할 수 있는 식을 제시하고, 실험적으로 높은 유기물 부하로 운전시

유기물 농도의 변화에 따른 미생물 농도와 미생물막 두께의 변화 및 유기물 처리효율 등을 검토하였으며, 미생물 농도에 영향을 미치는 미생물막 두께, 층 공극율, 미생물막 건조 밀도 등을 이용하여 예측한 미생물 농도와 실측한 미생물 농도를 비교 검토하였다.

이 론

반응기 내의 미생물 농도 예측식을 도출하기 위하여 media의 직경 및 밀도는 일정하며, 또한 반응기 상부와 하부에서의 미생물막 두께는 모두 균일하다고 가정하였다(Shieh와 Chen, 1984).

Fig. 1에서 보여지는 바와 같이 bioparticle 직경(d_p)은 다음과 같이 표현된다.

$$d_p = d_m + 2\delta \dots \dots \dots (1)$$

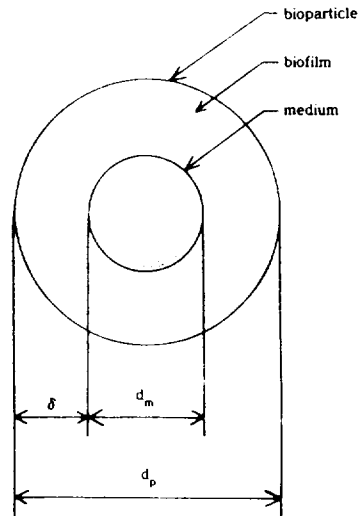


Fig. 1. Analytical shape of the bioparticle.

층공극율은 미생물의 부착에 따라 변하므로 미생물이 형성되기 전의 초기층공극율은

$$\epsilon_0 = 1 - \frac{V_m}{h_0 A} \dots \dots \dots (2)$$

이며, 미생물이 media에 부착된 후의 층공극율은

다음과 같다.

$$\epsilon = 1 - \frac{V_p}{hA} \dots\dots\dots (3)$$

반응기내 미생물막의 총부피는 bioparticle의 부피에서 media의 부피를 빼준것과 같으므로

$$V_{Tb} = V_p - V_m \dots\dots\dots (4)$$

따라서 식(2)와 (3)을 식(4)에 대입하고 정리하면 다음과 같이 된다.

$$V_{Tb} = hA(1-\epsilon) \left[1 - \frac{h_0(1-\epsilon_0)}{h(1-\epsilon)} \right] \dots\dots\dots (5)$$

팽창된 층의 단위 부피당 미생물막의 부피는 다음과 같으며,

$$V_b = \frac{V_{Tb}}{hA} = hA(1-\epsilon) \left[1 - \frac{h_0(1-\epsilon_0)}{h(1-\epsilon)} \right] \dots\dots\dots (6)$$

팽창된 층의 단위 부피당 미생물막의 무게는 다음과 같으므로

$$W_b = \rho_{bw} \cdot V_b \dots\dots\dots (7)$$

식(6)을 식(7)에 대입하여 정리하면 단위 부피당 미생물막의 무게는 아래와 같이 표현 가능하다.

$$W_b = \rho_{bw}(1-\epsilon) \left[1 - \frac{h_0(1-\epsilon_0)}{h(1-\epsilon)} \right] \dots\dots\dots (8)$$

또한 함수율, P는 다음과 같으므로

$$P = 1 - \frac{\rho_{bw}}{\rho_{bd}} \dots\dots\dots (9)$$

팽창된 층의 단위 부피당 미생물 농도는 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$X = \rho_{bw}(1-P)V_b \dots\dots\dots (10)$$

식(10)에 식(6)과 식(9)를 대입하여 정리하면 다음 식과 같이 된다.

$$X = \rho_{bd}(1-\epsilon) \left[1 - \frac{h_0(1-\epsilon_0)}{h(1-\epsilon)} \right] \dots\dots\dots (11)$$

미생물이 부착되지 않은 모래 n개의 부피는 다음과 같으며,

$$V_m = h_0A(1-\epsilon_0) = n \frac{\pi}{6} d_m^3 \dots\dots\dots (12)$$

전체 media가 균일한 미생물막으로 형성되어 있다고 가정하면 미생물이 부착된 bioparticle의 부피는

$$V_p = hA(1-\epsilon) = n \frac{\pi}{6} d_p^3 \dots\dots\dots (13)$$

와 같이 표현될 수 있으므로, 식(12)와 식(13)를 더하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{h_0(1-\epsilon_0)}{h(1-\epsilon)} = \left(\frac{d_m}{d_p} \right)^3 \dots\dots\dots (14)$$

따라서 식(14)를 식(11)에 대입하면 미생물농도 예측할 수 있는 다음식이 얻어진다.

$$X = \rho_{bd}(1-\rho) \left[1 - \left(\frac{d_m}{d_p} \right)^3 \right] \dots\dots\dots (15)$$

윗 식은 bioparticle의 특성인 미생물막의 건조 밀도, 공극율, 지지체 직경 및 bioparticle 직경 등을 실험적으로 구하면 미생물 농도가 계산되어 질 수 있음을 보여준다.

실험재료 및 방법

본 실험에 사용된 실험장치의 개요도는 Fig.2와 같으며, 실험에 사용된 폐수는 Table 1과 같은 합

Table 1. Composition of synthetic wastewater (COD_{cr} 2,500mg/l)

Item	Value (g/l)
Nutrient broth	0.1
Na ₂ HPO ₄	1
Glucose	4
KCl	0.14
Urea	1
CaCl ₂	0.14
NaCl	0.3
MgSO ₄	0.1

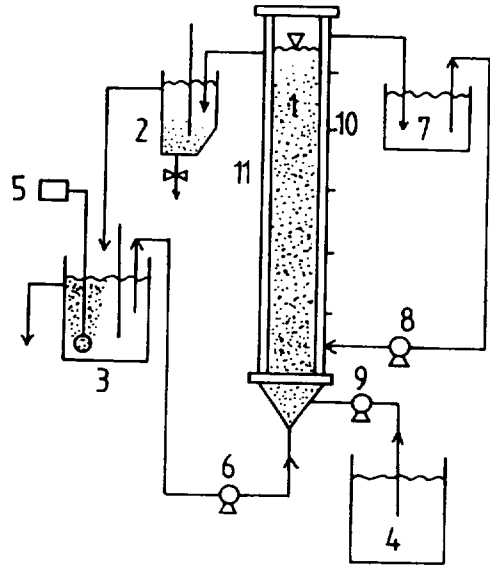
성 폐수를 사용하였다.

반응기는 내경이 8.9cm, 높이가 190cm, 총부피가 12L인 아크릴 원형관을 사용하였다. 반응기는 유기물 농도와 미생물 농도를 측정하기 위해 약 40cm 간격으로 6개의 채취구를 설치하였으며, 반응기 측면에 아크릴로 jacket을 설치하여 순환용 펌프로 항온수를 순환시켜 항온을 유지시켰다. Media는 비중이 약 2.65인 동해안산 규사를 체로 걸러서 sauter 평균직경이 약 629 μ m인 입자를 사용하였다.

유입 폐수는 정량펌프를 사용하여 반응기 하부에 설치된 시료 유입구에서 주입시켰으며, 반응기 상부에 교반기를 설치하여 과도 성장한 bioparticle을 깨뜨려 media는 다시 반응기로 유입시키고 슬러지는 반응시켰다. 반응기 밖으로 유출되는 media는 상부에 설치된 media trap을 다시 반응기로 유입시켰다. 반응기내 산소의 공급방식은 간접 폭기방식으로 저장탱크에서 산소를 순환수에 용존시켜 반응기로 공급하였으며, 반응조내의 온도는 항온수조와 자동 온도조절 장치를 사용하여 22 \pm 1 $^{\circ}$ C로 유지하였다.

초기 미생물막을 형성할 시에는 반응기에 수도 물을 채우고 상향 유속이 1cm/s가 되도록 순환시키면서 media를 5L 정도 반응기에 유입시킨 후, 1,000mg/l의 합성폐수를 체류시간(HRT)이 2일 정도로 되게끔 하여 공급하였다. 주입 5시간 정도 후에 미생물이 모래에 부착되기 시작하였으며, 이때 형성된 bioparticle은 역삼각형 형태로 약간의 충격 및 용력에도 분리되어 떨어져 나갔다. 약 10시간 후 주입한 슬러지가 모두 부착된 후 다시 2L

정도의 슬러지를 주입하였다. 이 상태로 보통 정도 유지하자 bioparticle이 어느 정도 형태를 갖추고 단단해졌다.



1. FBBR
2. sand trap
3. aeration tank
4. feed tank
5. aerator
6. recycle flow pump
7. water bath
8. jacket pump
9. feed pump
10. sampling port
11. water jacket

Fig. 2. Schematic diagram of fluidized-bed biofilm reactor.

미생물막이 단단하게 형성되어 정상상태에 도달한 후에는 상향 유속을 0.47cm/s, 총 높이를 165cm로 고정한 상태에서 합성 폐수를 HRT 5시간에서 2,070~12,400mg/l로 변환시켜 가면서 실험하였다. 유기물 부하에 따라 반응기내 총 높이가 165cm 이상 증가하는 bioparticle은 반응기 105cm의 채취구에서 시료를 채취하여 미생물 농도를 측정하고, 모래는 깨끗이 세척하여 105 $^{\circ}$ C의 건조기에서 2시간 말린 후 무게를 측정한다 다음 다시 반응기에 투입시켰다.

본 실험에서 시료분석은 Standard method (1985)에 따라서 행하였으며, 미생물 농도는 지지체와 분리한 후 건조시켜 측정하였으며, 지지체와 bioparticle의 직경 및 미생물막 두께는 현미경으로 실측하였다.

결과 및 고찰

미생물막 반응기에서 기질전환속도는 미생물 농도의 함수이므로 미생물의 농도가 증가함에 따라 증가하지만 과도하게 성장한 미생물막은 bioparticle의 전체 밀도를 감소시켜 반응기로부터 쉽게 유출되게 된다. 또한 기질전환 속도는 미생물농도 결정의 중요 요소인 미생물막 건조 밀도와 두께의 영향을 받는다.

Fig. 3은 상향유속을 0.47cm/s 로 일정하게 유지하고 유입수의 농도를 변화시킨 실험 결과를 나타낸 것으로, 유입수의 농도가 $2,070\text{mg/l}$ 에서 $12,400\text{mg/l}$ 로 증가함에 따라 미생물농도도 증가하다가 감소하는 경향을 보였다. 이는 유동층 반응기의 물질전달 저항이 적으므로 유입수의 농도를 5배 증가시켜도 미생물농도가 크게 변화하지 않는 때문으로 생각되었다.

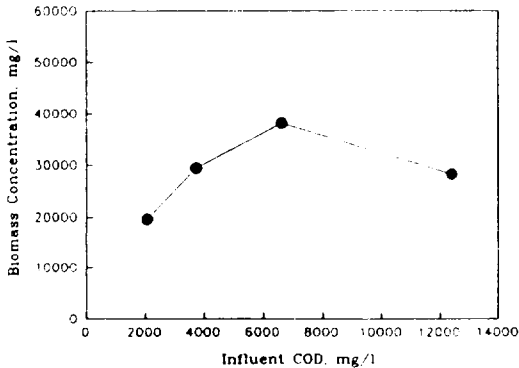


Fig. 3. The effect of influent COD on biomass concentration.

Fig. 4는 유입수 농도에 따른 미생물막 두께의 변화를 나타낸 것으로 그림에서 보여지는 바와같이 유입수 농도가 증가함에 따라 미생물막 두께는 거의 직선적으로 증가함을 알 수 있었다. Characklis (1981)는 관형 반응기에서 미생물막 두께는 주어진 유체의 전단 용력하에서 유기물 부하속도의 직접적인 함수이며, Shieh와 Keenan (1986)은 유기물 부하속도가 적고 전단 용력이 클수록 미생물막 두께는 얇아진다고 하였다.

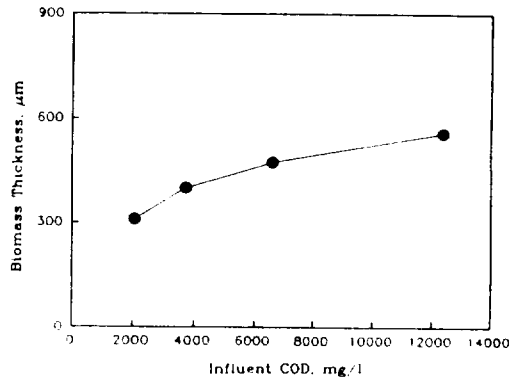


Fig. 4. The effect of influent COD on biofilm thickness.

측정한 미생물막 건조밀도와 미생물막 두께와의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. Hoehn과 Ray (1873)는 미생물막 건조밀도는 미생물막 두께에 따라서 변화하고 최대 활성을 띤 미생물막 두께에서 최대 값을 갖는다고 하였다. 본 실험에서는 그림에서 보여지는 바와 같이 미생물막 두께가 증가함에 따라 미생물막 건조 밀도가 증가하다가 $475\mu\text{m}$ 이상에서는 변화가 미소한 것을 알 수 있었다.

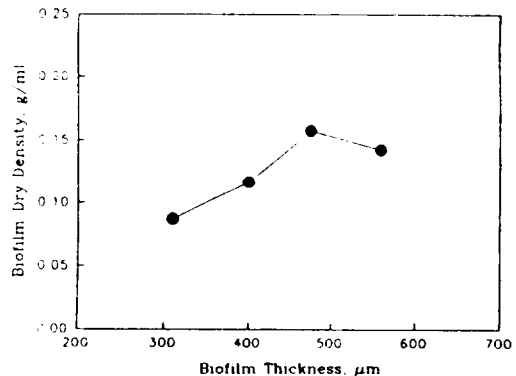


Fig. 5. The effect of biofilm thickness on biofilm dry density.

Fig. 6은 미생물막 두께에 따른 미생물 농도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 미생물막 두께가 증가함에 따라 미생물 농도도 급격히 증가하다가 미생물막의 두께가 $475\mu\text{m}$ 이상에서는 미생물농도의 변화는 둔화되었다. 이는 미생물막의 두께가 증가함에 따라 물질전달제한의 영향으로 기질부족현상이 발생하여 미생물막 두께가 증가하

면 미생물 농도는 증가하나 미생물막 두께가 커질수록 미생물막 건조밀도가 감소하여, 미생물막 건조밀도가 미생물 농도를 감소하는 방향으로 영향을 미친 것으로 생각되었다.

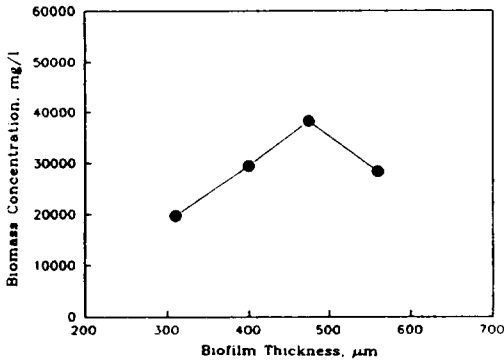


Fig. 6. The effect of biofilm thickness on biomass concentration.

Fig. 4와 6에서 보면 지속적인 유기물 증가에 의해 미생물막 두께의 증가에 따라 미생물막 건조밀도도 증가했으나, 475μm 이상에서는 물질전달 저항등의 영향이 커져서 미생물막 건조 밀도의 변화가 미소한 것으로 나타났다. 따라서 미생물막이 얇거나 유입 기질농도가 높을 때는 미생물막 속으로 기질이 완전히 침투할 수 있기 때문에 미생물의 성장은 기질의 부족에 영향을 받지 않게 되며, 높은 미생물막 건조밀도를 형성하게 되지만 미생물막 두께가 증가할수록, 유입 기질 농도가 감소할수록 미생물내에 물질전달제한이 발생하여 미생물 성장이 방해를 받게 되므로 미생물막 내부의 미생물은 내호흡상태에 있게 되어 미생물막 건조밀도를 감소시키는 원인이 된것으로 사료되었다.

미생물 농도를 높게만 유지하는 것은 과도한 미생물막 두께를 초래함으로써 유기물의 확산저항에 의해 최적의 유기물 처리효율을 얻지 못하기 때문에 최적의 유기물 처리효율을 얻을 수 있는 미생물막 두께와 미생물 농도가 더욱 중요하다(김 등, 1991).

Fig. 7은 미생물 농도와 미생물막 건조밀도와의 관계를 나타낸 것으로서, 미생물막 건조밀도가 증가함에 따라 미생물 농도가 증가함을 알 수 있었다. 그러므로 최대 미생물 농도를 유지하기 위해

서는 미생물막 건조 밀도가 클수록 유리하나 미생물막 두께가 475μm 이상에서는 미생물막 건조 밀도가 감소하는 경향을 보이므로 미생물막 두께를 475μm 정도로 유지하는 것이 효율적인 것으로 판단되었다.



Fig. 7. The effect of biofilm dry density on biomass concentration.

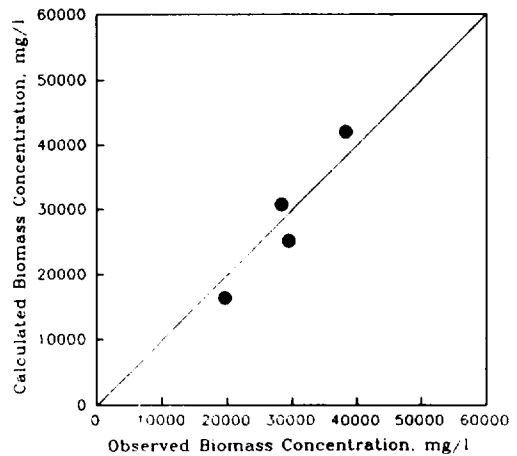


Fig. 8. Comparison of calculated and observed biomass concentration.

미생물농도에 영향을 미치는 인자들은 총공극율, 미생물막 건조밀도 및 미생물막 두께로부터 식(15)를 이용하여 구한 미생물농도를 실측치 미생물농도와 비교하여 Fig. 8에 나타내었으며, 미생물막 두께는 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 보여지는 바와 같이 계산치와 실측치가 잘 근접하였다.

유기물 부하율에 대한 유기물 제거효율의 변화를 Fig. 10에 나타내었는데, 유기물 농도가 2.070

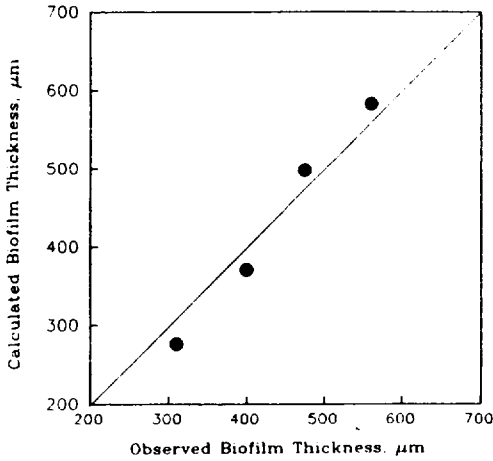


Fig. 9. Comparison of calculated and observed biofilm thickness.

mg/l 경우에는 유기물 제거효율이 93%였으며, 유기물 농도를 12,400mg/l까지 증가시켰을 때에도 유기물 제거효율이 73%에 달하므로 일반적인 활성슬러지 공정과 비교할 때 FBBR 공법이 고농도의 유기성 폐수를 처리하는데 우수할 뿐만 아니라 유기물 농도의 변화에도 안정함을 알 수 있었다.

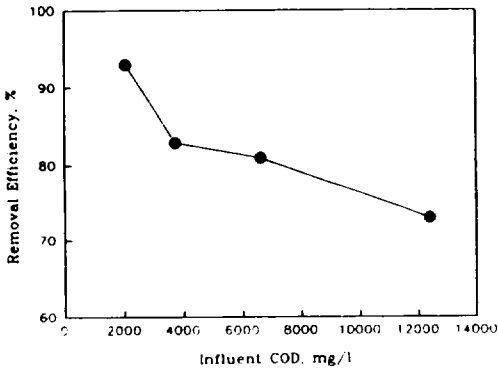


Fig. 10. Influent COD versus removal efficiency.

적 요

생물막 유동층 반응기에서 유입폐수를 2,070mg/

l에서 12,400mg/l로 변화시키면서 운전시 media에 부착된 미생물막의 두께, 미생물막 건조밀도 및 미생물 농도변화를 조사하였다.

글루코오스를 주기질로 한 합성폐수를 상향유속 0.47cm/s, 체류시간 5시간, 운전온도 22±1°C에서 운전시 유기물 농도 2,070mg/l에서 처리효율은 93%였으며, 유기물 농도를 12,400mg/l로 증가시켰을 때에도 73%의 높은 처리효율을 나타내었다.

실험에서 측정된 미생물막 두께, 미생물막 밀도, 층 공극률 및 bioparticle 직경 등을 이용하여 계산한 미생물 농도와 실측한 미생물 농도를 비교해 본 결과 90%의 일치율을 보였다.

기 호 설 명

A	reactor cross-section area	(L ²)
COD	chemical oxygen demand	(ML ⁻³)
d _m	media diameter	(L)
d _p	bioparticle diameter	(L)
h	expansion bed height	(L)
h ₀	initial expansion bed height	(L)
n	total number of bioparticle per unit volume	-
P	biofilm moisture content	-
V _b	total biofilm volume per unit expanded bed volume	-
V _m	unseeded media volume	(L ³)
V _p	seeded media volume	(L ³)
V _{TP}	total biofilm volume	(L ³)
W _b	total biofilm weight per unit expanded bed volume	(ML ⁻³)
X	biomass concentration	(ML ⁻³)

그리이스 문자

ρ _{bd}	biofilm dry density	(ML ⁻³)
ρ _{bw}	biofilm wet density	(ML ⁻³)
ε ₀	initial bed porosity	-
ε	bed porosity	-
δ	biofilm thickness	(L)

참 고 문 헌

- Charackis, W. G., 1981. Fouling Biofilm Development: A Progress Analysis. *Biotech. and Bioeng.*, Vol. 23, 1923~1931.
- Fan, L. S., R. Leyva-Ramos, K. D. Wisecraver and B. J. Zehner, 1990. Diffusion of Phenol through a Biofilm Grown on Activated Carbon Particles in a Draft-Tube Three Phase Fluidized Bed Bioreactor. *Biotech and Bioeng.*, Vol. 35, 279~286.
- Hoehn, R. C. and A. D. Ray, 1873. Effect of Thickness on Bacterial Film. *J. WPCF*, Vol. 45, 2308~2316.
- 주승팔, 이민규, 박태주 및 송승구, 1988. 염료공장의 물루이딘 슬론산 공정폐수와 종합폐수의 생물학적 처리. *화학공학회지*, Vol. 26(2), 212~220.
- Kargi, F. and J. K. Park, 1982. Optimal Biofilm Thickness for Fluidized-Bed Biofilm Reactors. *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, Vol. 32, 744~748.
- 김동석, 안갑환, 이민규 및 송승구, 1991. 생물막 유동층 반응기에서 미생물 성장에 따른 속도론적 고찰. *한국생물공학회지*, Vol. 6(2), 115~121.
- Michael, B., F. Frank and J. Jeris, 1980. Fluidized Beds Improve Treatment, Cut Cost. *J. Wastewater Treatment*, 25~28.
- Ngian, K. F., 1980. Bed Expansion Characteristics of Liquid Fluidized Particles with Attached Microbial Growth. *Biotech. and Bioeng.*, Vol. 22, 1843~1856.
- 박태주, 이민규, 안갑환 및 송승구, 1990. 고정 생물막 공법을 이용한 고농도 폐수처리시 비표면적 영향. *화학공학회지*, Vol. 28(1), 114~123.
- Reiber, S. and D. Stensel, 1985. Biologically Enhanced Oxygen Transfer in Fixed Film System. *JWPCF*, Vol. 57(2), 135~142.
- Shieh, W. K. and C. Y. Chen, 1984. Biomass Hold-up Correlations for a Fluidized Bed Biofilm Reactor. *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol. 62, 133~136.
- Shieh, W. K. and J. D. Keenan, 1986. Fluidized Bed Biofilm Reactor for Wastewater Treatment. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, Vol. 33, 131~169.
- Shieh, W. K., L. T. Mulcahy and E. J. La Motta, 1982. Mathematical Model of the Fluidized Bed Biofilm Reactor. *Enzyme Microb. Technol.* Vol. 4, 269~275.
- "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 1985. APHA, AWWA, WPCF, 16th ed.
- Theodore, C. S., 1980. Fluidized Bed for Biological Wastewater Treatment. *ASCE*, Vol. 106, 227~241.