

생물막 유동층 반응기에서 고농도 합성 폐수의 처리효율과 미생물 성장

김동석 · 안갑환 · 서명교 · 박태주* · 송승구

부산대학교 공과대학 화학공학과
*부산대학교 공과대학 환경공학과
(1991년 2월 11일 접수, 1991년 6월 24일 채택)

Biomass Characteristics and Substrate Removal Efficiency Using High Concentrated Synthetic Wastewater in FBBR

Dong-Seog Kim, Kab-Hwan An, Myung-Gyo Suh, Tae-Joo Park* and Seung-Koo Song

Dept. of Chemical Engineering, Pusan National University
**Dept. of Environmental Engineering, Pusan National University*
(Received 11 February 1991; accepted 24 June 1991)

요 약

이 실험의 목적은 생물막 유동층 반응기내에서 미생물 성장의 변화를 관찰하여 유기물 처리효율과 최대 미생물 농도를 안정적으로 유지할 수 있는 조건을 고찰하는데 있다. 모래를 여재로 사용하여 수리학적 체류시간을 5시간, 상향유속을 17 m/hr, 운전온도는 $22 \pm 1^\circ\text{C}$, pH는 7 ± 0.1 로 고정한 상태에서 유기물 부하율을 $10 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{day}$ 에서 $80 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{day}$ 로 증가시키면서 실험을 수행하였다. 또한 실험에 사용한 폐수는 글루코오스를 기질로 한 합성폐수를 조제하여 사용하였다. 유기물 부하율이 $10 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{day}$ 에서 COD는 96%의 제거율을 나타내었고, 반응기내 미생물 농도는 $6,530 \text{ mg/l}$ 이었다. 또한, 유기물 부하율이 $80 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{day}$ 로 증가되어도 COD는 73%의 높은 제거율과 반응기내 미생물 농도는 $37,000 \text{ mg/l}$ 를 나타내었다. 유기물 제거율의 관점에서 보면 F/M비가 1.7 이하, 미생물막 두께가 $420 \mu\text{m}$ 이하에서 운전하는 것이 가장 효율적인 것으로 나타났다.

Abstract—The purposes of this experiment were to investigate biomass characteristics and substrate removal efficiency and to find the optimum conditions on holding up higher biomass concentration in Fluidized-Bed Biofilm Reactor(FBBR). A number of experiments were conducted under the following conditions by increasing organic loading rate from $10 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{day}$ to $80 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{day}$. Superficial upflow velocity was 17 m/hr, operating temperature was $22 \pm 1^\circ\text{C}$ and pH was 7 ± 0.1 . The synthetic wastewater based on glucose was used as a substrate in this experiment. The removal of chemical oxygen demand(COD) with volumetric loading rates of $10 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{day}$ to $80 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{day}$ was investigated to show the efficiency of aerobic FBBR. The corresponding COD removal efficiencies were 96 and 73% with volumetric loading rate of 10 to $80 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{day}$, respectively, and the concentrations of biomass remaining inside the reactor were shown $6,500 \text{ mg/l}$ and $37,000 \text{ mg/l}$, respectively. These experimental conditions of the F/M ratio of 1.7 and the biofilm thickness of $420 \mu\text{m}$ was proved to be a most appropriate condition in operating FBBR in the view of substrate removal.

1. 서 론

미생물막 공법은 1970년대에 개발되기 시작하여 실용화 단계에 있으며 media를 이용하는 이 공법(fixed-film biological process)은 media 표면에 미생물을 부착시켜 단시간내에 고농도의 유기성 폐수를 처리하기 위한 공법이다.

생물학적 폐수처리를 위한 미생물막 유동층 반응기(Fluidized Bed Biofilm Reactor : FBBR)는 폐수를 반응기 하부에서 media를 유동시킬 수 있을 정도의 유속으로 media층을 통과시키면, 개개의 media는 유동이 되면서, 미생물막이 형성되어질 수 있는 충분한 비표면적을 형성한다. FBBR은 유동층이 갖는 특성으로 인해 반응기내에서 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 활성슬러지법과 살수여상법의 단점을 보완할 수가 있다[1].

고정 생물막 공법에서 각 공법들의 비표면적을 비교해 보면 살수여상법의 경우는 12-30 m²/m³, 회전원판법(RBC)에서는 40-50 m²/m³인데 반해 FBBR은 820-1,200 m²/m³ 정도의 비표면적을 유지할 수가 있으며, 반응기내 미생물 농도도 타반응기에서는 1,000-5,000 mg/l 정도이나, FBBR에서는 8,000-40,000 mg/l까지 증가시킬 수 있고, 유기물 부하율도 8-16 kg BOD₅ removed/m³·day로 훨씬 높게 운전할 수 있다[2].

또한, anaerobic filters와 같은 packed bed 반응기에서는 미생물의 축적에 의한 반응기내 압력 증가로 인해 폐쇄현상이 발생하므로 비교적 공극율을 크게 유지하고 비표면적과 미생물 농도를 제한해야 하지만, FBBR에서는 유동층이 갖는 특징으로 인하여 낮은 공극율과 높은 비표면적의 media를 사용할 수가 있으므로 유입 부유물질의 크기가 별문제가 되지 않고 media를 간편하게 반응기내외로 유입-유출할 수 있다. 그리고 FBBR은 수직설계에 의함으로서 설치부지면적을 적게 요구하여 우리나라와 같이 국토가 좁은 나라에서는 비교적 적합한 공정이라 할 수 있다.

그러나 FBBR은 미생물의 특성에 의해서 영향을 받을 뿐만 아니라 유동특성에도 매우 민감한 영향을 받으므로, 많은 parameter로 인하여 반응기 해석에 어려움이 있어 현장에서의 운전이 용이하지는 않지만, 미생물 농도를 높게 유지하여 고농도의 유기물을 효율적으로 처리할 수 있다는 커다란 장점때문에 많은 연구의 대상이 되어 오고 있다.

지금까지 FBBR에 관한 많은 연구는 대부분 저농도

Table 1. Composition of synthetic wastewater (COD=2,500 mg/l) (unit : g/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
pH	7± 0.1

범위의 하수 및 공장폐수에 적용하여 처리효율면에서는 비교적 좋은 결과를 얻었으나, 실험에 사용한 기질이 서로 상이하였고 유기물 부하율의 범위도 낮아 타반응기와의 효율 비교에는 단점이 많았다.

그러므로 본 실험에서는 기초적인 연구의 일환으로 주기질로 글루코오스를 사용한 합성폐수를 조제하여 기질을 단순화하고 농도범위를 넓혀 고농도까지 변화시키면서 미생물막의 변화를 관찰하고, 유기물 처리효율과 FBBR에서 최대 미생물 농도를 안정적으로 유지할 수 있는 조건을 고찰하고자 하였다.

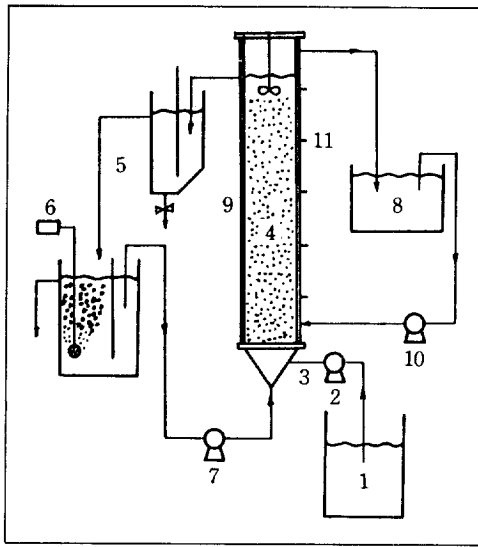
2. 실험방법

2-1. 실험장치

본 실험에 사용된 폐수는 Table 1과 같은 합성폐수이고, 장치는 Fig. 1과 같다. 반응기로는 내경이 8.9 cm, 높이가 190 cm, 총 부피가 12L인 아크릴 원형관을 사용하였다. 반응기 측면에는 항온용으로 1 cm 간격을 두고 같은 아크릴로 자켓을 설치하여 순환용 펌프로 항온수를 순환시켰고, 유기물 농도와 미생물 농도를 측정하기 위해 약 40 cm 간격으로 6개의 채취구를 설치하였다. Media는 비중이 2.65 g/cm³이고 입자크기가 sauter mean diameter로 629 μm인 동해안산 규사를 사용하였다.

유입폐수는 정량유입 펌프를 사용하여 반응기 하부에 설치된 시료 유입구로 주입시켰다. 반응기 상부에는 교반기를 설치하여 과도 성장한 bioparticle을 깨뜨려 media는 다시 반응기로 유입하고 슬러지는 반송시켰다. 또 반응기 밖으로 유출되는 media는 상부에 설치된 sand trap을 통하여 다시 반응기로 유입시켰다.

산소공급 방식은 간접 폭기 방식으로 저장탱크에서 산소를 순환수에 녹여 반응기로 공급하였다. 또한 반응기내 용존산소농도는 각 sample port에서 측정하였는데, 반응기 하부에서는 2 mg/l 정도였으나 반응기 상



- 1. Feed tank
- 2. Feed inlet pump
- 3. Feed line reactor
- 4. Reactor
- 5. Sand trap
- 6. Aerator
- 7. Recycle pump
- 8. Water bath
- 9. Water jacket
- 10. Jacket pump
- 11. Sampling port

Fig. 1. Schematic diagram of Fluidized-Bed Biofilm Reactor(FBBR).

부로 갈수록 용존산소농도는 낮아져 반응기 최상부에서는 약 0.3 mg/l 정도로 유지되었다. 반응기내 온도는 항온수조와 자동온도조절장치를 사용하여 22±1℃로 유지하였다.

2-2. 반응기 운전방법

2-2-1. 미생물의 media 부착

반응기에 수도물을 채우고 상향유속이 36 m/hr가 되도록 순환시킨다. 그 후 media를 5L 정도 반응기에 유입시킨 다음, 합성폐수를 1000 mg/l, HRT를 2일 정도로 하여 공급하고, 부산시 W식품(주) 폐수처리장의 반송 슬러지(MLSS : 12,000 mg/l)를 30 mesh(Φ : 0.54 mm)에 여과시켜 반응기내에 2L 정도 주입시켰다.

주입 5시간 정도 후에 미생물이 media에 부착되기 시작하였다. 이 때 형성된 bioparticle은 역삼각형 형태로 약간의 충격 및 응력에도 분리되어 떨어져 나갔다. 약 10시간 후 주입한 슬러지가 모두 부착된 후 다시 2L 정도의 슬러지를 주입했다. 모두 부착되고 나면 2L 정도 media가 반응기에 남도록 하고 잉여 media를 조금씩 빼주면서 상향유속도 17 m/hr에 이를 때까지 조금씩 낮춰 주었다. 위의 상태로 보름정도 유지하자 bioparticle이 어느 정도 형태를 갖추고 단단해졌다.

한편 반응기내 미생물량을 100으로 하였을 때 부착된 미생물량과 부유미생물량의 비가 대략 97 : 3이므로 전체 반응기내 미생물 농도는 media에 부착된 미생물 농도를 측정하여 반응기내 미생물 농도로 하였다.

2-2-2. 반응기 운전

상향유속을 17 m/hr, 층 높이를 165 cm로 고정한 상태에서 합성폐수를 HRT 5시간에서 1500, 3000, 5000, 7000, 9000, 13000 mg/l로 증가시키면서 실험하였다. 유기물 부하에 따라 반응기내 층 높이가 165 cm 이상 증가하는 bioparticle은 반응기 105 cm의 채취구에서 시료를 채취하여 미생물 농도를 측정하고 media는 깨끗이 세척하여 105℃ 건조기에서 2시간 건조시킨 후 무게를 측정하고 다시 반응기에 유입시켰다. 시료를 채취하지 않는 동안에는 반응기 상부에 있는 교반기를 이용하여 bioparticle을 깨뜨려서 media는 반응기로 떨어뜨리고 슬러지는 반송시켰다. 본 실험에 사용된 시료분석 방법은 Standard Method[3]를 기준으로 행하였다.

2-2-3. 미생물막 두께 측정

Bioparticle의 모양은 실제로는 균일한 구형이라기 보다는 긴 지름(a)와 짧은 지름(b)를 가진 달걀 모양의 타원형이다. 그러므로 각 입자는 아래와 같이 계산되는 di를 가진 대등체적(volume-equivalent)의 구형으로 전환하였으며,

$$d_i = \sqrt[3]{a_i \cdot b_i^2} \tag{1}$$

평균입자크기는 Sauter mean diameter법을 사용하여 구하였다.

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^3}{\sum_{i=1}^n d_i^2} \tag{2}$$

약 50개 정도의 모래 크기를 측정하여 위와 같은 방법으로 평균한 것을 dm이라 하고, bioparticle의 크기를 측정하여 평균한 것을 dp라 하면, 평균 미생물막 두께(δ)는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta = \frac{d_p - d_m}{2} \tag{3}$$

2-2-4. 건조밀도 및 함수율의 측정

Biofilm 건조밀도(biofilm dry density)의 계산은 아래와 같은 방법으로 하였다.

(1) 팽창된 층의 단위체적당 media의 수를 구한다.

$$n = \frac{\text{sand concentration}}{2.57 \times \frac{\pi}{6} \text{ dm}^3} \times 10^{12} \quad (4)$$

Sand concentration은 채취한 시료의 체적당 미생물막을 씻어낸 sand의 무게이다.

(2) 팽창된 층의 단위부피당 미생물막의 전체 체적은 다음과 같다.

$$V_b = n \times \frac{\pi}{6} (dp^3 - dm^3) \times 10^{-15} \quad (5)$$

(3) 단위 미생물막 체적당 건조무게, 즉 미생물막 건조밀도는 미생물 농도를 V_b 로 나눈 값으로 표현된다.

$$\rho_{bd} = \frac{\text{biomass concentration}}{V_b} \times 10^{-6} \quad (5)$$

(4) 팽창된 층의 단위체적당 폐수의 체적은 다음과 같으며

$$V_1 = 1 - n \times \frac{\pi}{6} dp^3 \times 10^{-15} \quad (6)$$

(5) 팽창된 층의 단위체적당 미생물막의 함수무게는 아래와 같다.

$$W_b = W_{\text{sample}} - \rho_1 \times V_1 \times 10^3 - 2.65 \times n \times \frac{\pi}{6} \text{ dm}^3 \times 10^{-12} \quad (7)$$

여기서 W_{sample} 는 팽창된 층의 단위체적당 시료(bio-particle + 폐수)의 무게이다.

(6) 미생물막의 함수밀도는 다음 식으로 표현되고,

$$\rho_{bw} = \frac{W_b}{V_b} \quad (8)$$

(7) 미생물막의 함수율은 아래와 같다.

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

3. 결과 및 고찰

3-1. 미생물막의 형성 및 성장

Fig. 2(a), (b), (c), (d)는 현미경에서 40배 또는 80배 확대하여 관찰된 bioparticle의 형태로서, (a)는 초기 미생물이 부착되어 조금씩 형태를 갖추어 가는 모습으로서 아직 media는 뚜렷이 관찰되고 미생물막 두께는 불명확하다. (b)는 완전히 bioparticle의 두께를 갖추고 있으며 media의 형태는 뚜렷이 나타나지 않고 윤곽만이

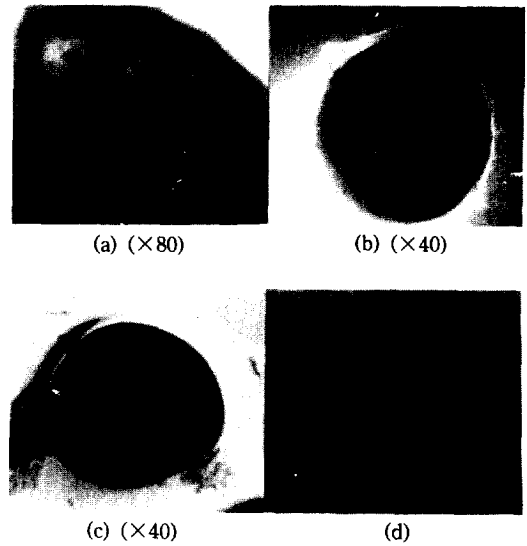


Fig. 2. The process of bioparticle development.

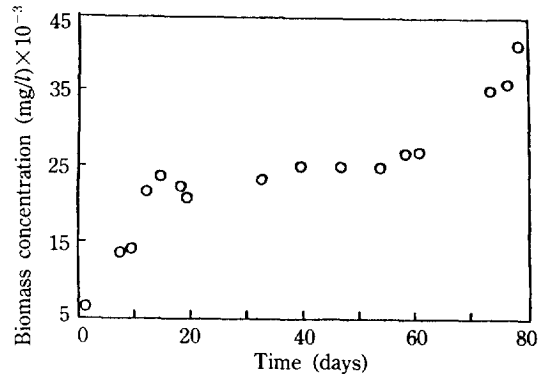


Fig. 3. Variation of biomass concentration with time.

HRT : 5 hour

pH : 7 ± 0.1

temperature : 22 ± 1°C

superficial upflow velocity : 0.47 cm/sec

substrate concentration : 1500-13000 mg/l

보이고 있다. (c)는 bioparticle이 한계 미생물막 형태보다 증가한 모양으로서 media는 완전히 보이지 않고, 안쪽에 보이는 시커먼 부분까지가 한계 미생물막 두께인 것으로 사료된다. 또한 위의 bioparticle의 형태를 보면 모두 달걀형을 이루고 있는 것을 알 수 있다. (d)는 bioparticle을 외부에서 관찰한 사진이다. Shieh[4]는 단일농도에 있어 시간에 따른 미생물 농도의 변화를 고찰하였는데, 본 논문에서는 농도를 증가시킴으로써 시간에 따른 미생물 농도변화와 미생물막 두께변화를 전체적으로 관찰하였는데, 각 농도에서 유출 유기물농도의

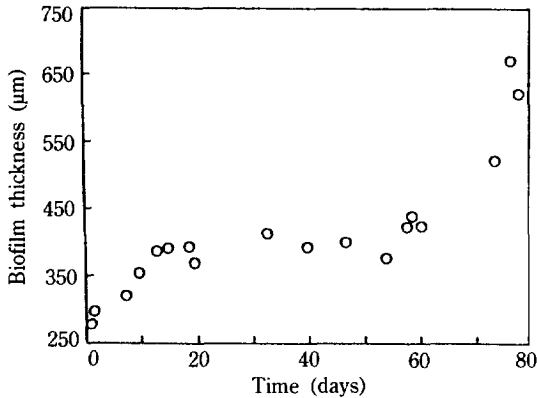


Fig. 4. Variation of biofilm thickness with time.

HRT : 5 hour
 pH : 7 ± 0.1
 temperature : 22 ± 1°C
 superficial upflow velocity : 0.47 cm/sec
 substrate concentration : 1500-13000 mg/l

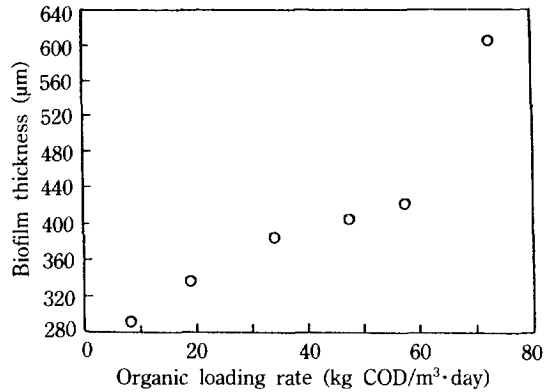


Fig. 5. Organic loading rate versus biofilm thickness.

HRT : 5 hour
 pH : 7 ± 0.1
 temperature : 22 ± 1°C
 superficial upflow velocity : 0.47 cm/sec
 substrate concentration : 1500-13000 mg/l

변화가 없을 때, 즉 정상상태에서 측정된 미생물 농도와 미생물막 두께를 나타내었다.

미생물 농도변화는 시간에 따라 Fig. 3과 같은 모양으로 나타났으며, 미생물막 두께의 성장도 Fig. 4에서 보는 바와 같이 Fig. 3과 유사하게 나타났는데, 이 그림들에서 보는 바와 같이 미생물 농도와 미생물막 두께는 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있었다.

3-2. 농도변화에 따른 미생물막의 성장

3-2-1. Biofilm 두께

미생물 농도는 미생물막 두께가 증가함에 따라 증가하나, 지나친 미생물막 두께의 성장은 bioparticle의 전체 밀도를 감소시키므로 적절한 미생물막 두께의 결정이 중요하다. 관형반응기에서 미생물막 두께는 주어진 유체의 전단응력하에서 유기물 부하율의 직접적인 함수이며, 유기물 부하율이 적고 전단응력이 클수록 미생물막 두께는 얇아진다고 보고된 바 있다[4, 5].

Fig. 5는 유기물 부하율에 따른 미생물막 두께에 대해 나타내었다. 유기물 부하율이 34 kg COD/m³·day일 때에 미생물막 두께는 360 μm였는데, 유기물 부하율을 증가시켜 81 kg COD/m³·day일 때에는 610 μm의 미생물막 두께를 나타내어, 유기물 부하율에 따라 미생물막 두께는 거의 직선적으로 증가함을 알 수 있었다.

또한 Fig. 6을 보면 미생물막 두께가 증가함에 따라 미생물 농도도 급격히 증가하다가 미생물막이 500 μm 이상에서는 농도의 변화가 거의 없었다. 이는 미생물막의 두께는 증가하지만 미생물막의 건조밀도 변화가 없기 때문에 일어나는 현상으로 사료된다.

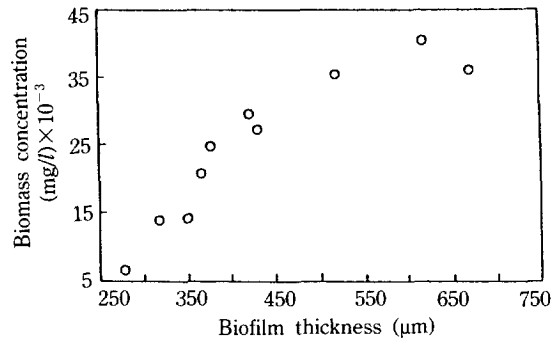


Fig. 6. The effect of biofilm thickness on biomass concentration.

HRT : 5 hour
 pH : 7 ± 0.1
 temperature : 22 ± 1°C
 superficial upflow velocity : 0.47 cm/sec
 substrate concentration : 1500-13000 mg/l

3-2-2. 미생물막 건조밀도

미생물막 건조밀도는 미생물막 두께에 따라 변화하고 미생물막이 모두 활성이 있을 때 최대값에 도달하며, 미생물막 건조밀도의 변화는 미생물의 생리학상의 변화에 기인한다고 가정하였다[6]. Biofilm이 얇을 때는 기질이 미생물막 전체에 침투하여서 미생물 성장이 기질 부족에 의해서 위축되지 않으므로 높은 미생물막 건조밀도를 초래한다. 그러나 미생물막 두께가 성장함에 따라 세공을 통한 기질농도가 상대적으로 감소하므로, 미생물막내 미생물 성장은 억제되고 물질전달 제한상

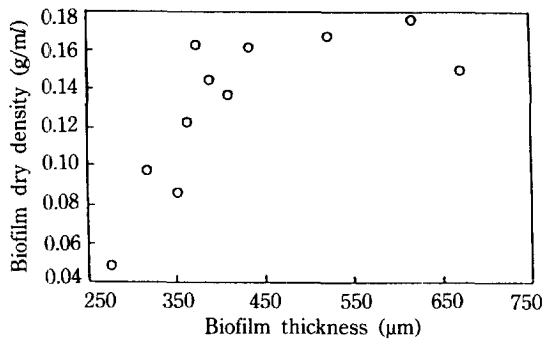


Fig. 7. The effect of biofilm thickness on biofilm dry density.

HRT : 5 hour
 pH : 7 ± 0.1
 temperature : $22 \pm 1^\circ\text{C}$
 superficial upflow velocity : 0.47 cm/sec
 substrate concentration : 1500-13000 mg/l

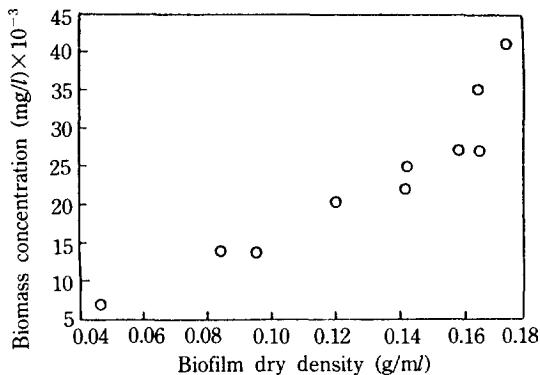


Fig. 8. The effect of biofilm dry density on biomass concentration.

HRT : 5 hour
 pH : 7 ± 0.1
 temperature : $22 \pm 1^\circ\text{C}$
 superficial upflow velocity : 0.47 cm/sec
 substrate concentration : 1500-13000 mg/l

태에 도달하게 된다. 이 경우에 미생물막 내부는 내호흡상태에 있게 되고 미생물막 건조밀도는 감소하게 된다.

Fig. 7은 미생물막 두께가 증가함에 따라 미생물막 건조밀도가 증가하다가 580 μm 이상에서는 거의 변화가 없는 것을 보여주고 있다. 일반적으로 미생물막이 증가할수록 미생물막 건조밀도는 감소하는 것으로 보고 되었으나, 본 연구에서는 계속적인 유기물 증가에 의해 물질전달량이 많으므로, 미생물막 두께가 증가해도 미생물막 건조밀도가 증가했으나, 400 μm 이상에서는 미

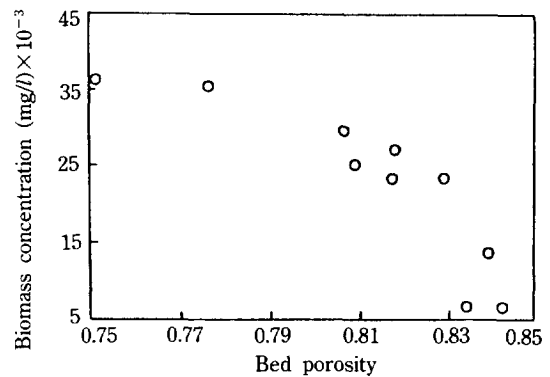


Fig. 9. The effect of bed porosity on biomass concentration.

HRT : 5 hour
 pH : 7 ± 0.1
 temperature : $22 \pm 1^\circ\text{C}$
 superficial upflow velocity : 0.47 cm/sec
 substrate concentration : 1500-13000 mg/l

생물막의 증가로 인해 기질의 확산이 저항을 많이 받으므로 미생물막 건조밀도에 거의 변화가 없었던 것으로 사료된다.

Biomass 농도와 미생물막 건조밀도의 관계를 Fig. 8에 나타내었는데, 미생물막 건조밀도가 증가함에 따라 미생물 농도도 증가하는 경향을 나타내었다. 그러므로 최대 미생물농도를 유지하기 위해서는 미생물막 건조밀도가 클수록 유리하나 미생물막 두께가 400 μm 이상에서는 미생물막 건조밀도가 거의 변화가 없었으므로 미생물막 두께를 400 μm 정도로 유지하는 것이 활성을 띤 미생물막을 유지하여 높은 유기물 처리효율을 유지할 수 있는데 유리한 것으로 나타났다. FBBR에서의 미생물막 건조밀도는 보통 0.03-0.09 g/ml의 값으로 나타났으나[7], 독성이 없는 합성폐수를 사용한 본 실험에서는 0.04-0.18 g/ml의 미생물막 건조밀도로 나타났다.

3-2-3. 총 공극율

총 공극율은 상향유속과 미생물막 두께에 영향을 받으며 일반적으로 상향유속이 증가함에 따라 총 공극율도 증가한다. Fig. 9를 보면 총 공극율이 증가함에 따라 미생물 농도도 거의 직선적으로 감소하였다. 그러므로 총 공극율이 낮아짐으로서 미생물막 두께가 증가되어 미생물 농도가 높게 유지됨을 알 수 있었다.

3-2-4. 함수율

함수율은 미생물막 두께와 미생물막 건조밀도에 영향을 미치며, Fig. 10에 따르면 미생물막이 증가함에 따라 함수율은 급격히 감소하다가 400 μm 이상에서는 완만히 증가하고, Fig. 11에서는 함수율이 증가함에 따라

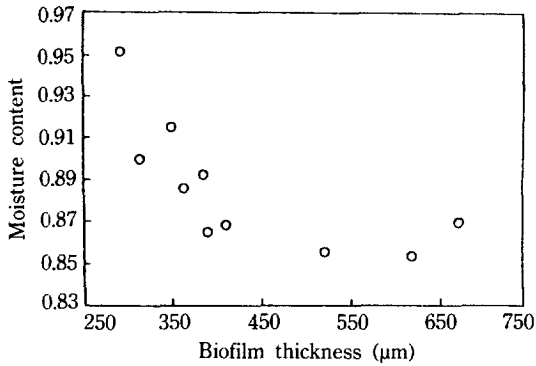


Fig. 10. Biofilm thickness versus moisture content.

HRT : 5 hour
 pH : 7 ± 0.1
 temperature : 22 ± 1°C
 superficial upflow velocity : 0.47 cm/sec
 substrate concentration : 1500-13000 mg/l

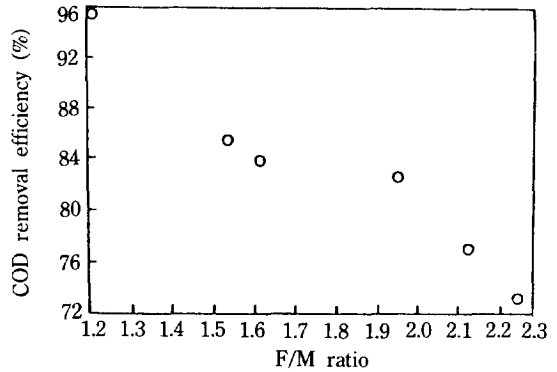


Fig. 12. F/M ratio versus COD removal efficiency.

HRT : 5 hour
 pH : 7 ± 0.1
 temperature : 22 ± 1°C
 superficial upflow velocity : 0.47 cm/sec
 substrate concentration : 1500-13000 mg/l

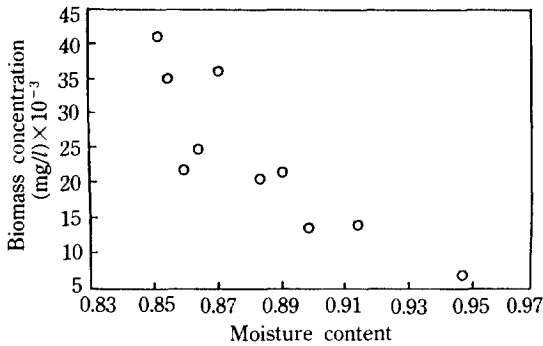


Fig. 11. The effect of moisture content on biomass concentration.

HRT : 5 hour
 pH : 7 ± 0.1
 temperature : 22 ± 1°C
 superficial upflow velocity : 0.47 cm/sec
 substrate concentration : 1500-13000 mg/l

미생물 농도는 거의 직선적으로 감소하고 있다. 그러므로 위의 Fig. 10, 11을 기준으로 하여 판단하면, 미생물막 두께를 400 µm 정도에서 운전하는 것이 고농도의 미생물을 유지하는데에는 좋은 것으로 나타났다.

3-3. 유기물 변화에 따른 제거효율

HRT를 5시간, 운전온도를 22°C를 유지하여, 미생물막이 완전히 정상상태에 도달했을 때, F/M비에 따른 COD 제거효율을 Fig. 12에 나타내었고, 유기물 부하율에 따른 COD 제거효율을 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 12에 의하면 F/M비가 1.5에서는 86% 이상의 제거효율을

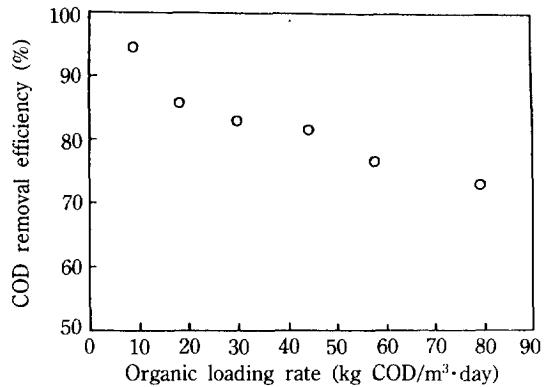


Fig. 13. Organic loading rate versus COD removal efficiency.

HRT : 5 hour
 pH : 7 ± 0.1
 temperature : 22 ± 1°C
 superficial upflow velocity : 0.47 cm/sec
 substrate concentration : 1500-13000 mg/l

보였으며 F/M비를 1.9까지 높여주어도 82% 이상의 제거효율을 보였으나, F/M비가 1.9보다 커지면 제거효율은 급격히 감소하여 F/M비 2.2 정도에서 73%의 제거효율을 보였다. 이와 같이 F/M비가 증가함에 따라 제거율이 감소하여, F/M비가 2.0 이상에서는 제거율이 80% 이하가 됨을 알 수 있었다. Fig. 13을 보면 유기물 부하율에 대한 제거효율도 F/M비에 대한 제거효율과 유사한 변화를 보였다. 유기물 부하율이 10 kg COD/m³·day에서 95% 이상의 제거효율을 보였고, 20-50 kg COD

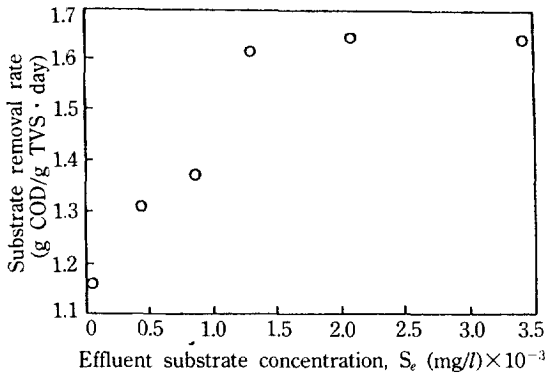


Fig. 14. Effluent substrate concentration versus substrate removal rate.

HRT : 5 hour
 pH : 7 ± 0.1
 temperature : $22 \pm 1^\circ\text{C}$
 superficial upflow velocity : 0.47 cm/sec
 substrate concentration : 1500-13000 mg/l

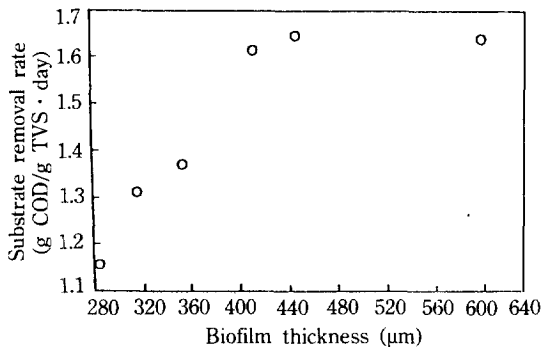


Fig. 15. The effect of biofilm thickness on substrate removal rate.

HRT : 5 hour
 pH : 7 ± 0.1
 temperature : $22 \pm 1^\circ\text{C}$
 superficial upflow velocity : 0.47 cm/sec
 substrate concentration : 1500-13000 mg/l

/m³·day에서도 83% 이상의 제거효율을 나타내었고, 유기물 부하율을 81 kg COD/m³·day까지 증가시켰을 때에도 73%의 제거효율을 보였으므로, 일반적인 활성 슬러지 공정의 유기물 부하율 1.5 kg COD/m³·day와 비교해 보면 FBBR 공법이 고농도 폐수를 처리하는데 우수할 뿐만 아니라 유기물 부하율의 변화에도 안정함을 알 수 있었다.

Fig. 14는 유출 유기물 농도에 따른 유기물 제거 속도를 나타내었는데, 유출 유기물 농도가 1,200 mg/l로 될 때까지는 유기물 제거율은 급격히 증가하였으나

1,200 mg/l 이상에서는 거의 유기물 제거율의 변화가 없는 것으로 나타났다. 그리고 Fig. 15를 보면 미생물막 두께가 증가함에 따라 유기물 제거율도 증가하다가 미생물막 두께가 420 μm 이상에서는 거의 변화가 없는 것으로 나타났는데, 이는 미생물막 두께가 420 μm까지는 활성을 띤 미생물막만이 존재하다가 420 μm 이상 증가하자 비활성의 미생물막이 내부에 발생한 것으로 사료된다. 유입 유기물 농도가 200 mg/l일 때 한계 미생물막 두께가 150 μm 정도라고 보고된 바가 있는데[7], 본 실험에서 420 μm 정도로 나타난 것은 유입 유기물 농도를 3,000-13,000 mg/l의 고농도 합성폐수를 사용함으로써 한계 미생물막 두께가 크게 나타난 것으로 사료된다.

위의 자료들로부터 고찰하면, 유입농도가 증가할수록 미생물 농도는 증가하여 고농도의 폐수를 처리할 수 있는 것으로 나타났으나, 유기물 제거율의 관점에서 보면 F/M비가 1.7 이하, 미생물막 두께가 420 μm 이하에서 운전하는 것이 가장 효율적임을 알 수 있었다.

4. 결 론

합성폐수의 유입농도를 증가시키면서 미생물막의 성장을 관찰하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

(1) Biofilm 두께가 증가함에 따라 유기물 제거 속도는 증가하였으나, 미생물막 두께가 420 μm 이상에서는 유기물 제거율은 더 이상 증가하지 않고 일정하게 유지되었다.

(2) 유기물 부하율의 증가에 따라 유기물 제거효율은 감소하는 경향을 나타내어, 유기물 부하율이 10 kg COD/m³·day에서는 96%의 COD 제거율을 나타내었고, 유기물 부하율을 80 kg COD/m³·day까지 증가시켰을 때에도 73%의 높은 COD 제거율을 나타내었다.

(3) 유입농도가 증가할수록 미생물 농도는 증가하여 고농도의 폐수를 처리할 수 있는 것으로 나타났으나, 유기물 제거율 관점에서 보면 F/M비가 1.7 이하, 미생물막 두께가 420 μm 이하에서 운전하는 것이 가장 효율적인 것으로 나타났다.

NOMENCLATURE

- a, : short diameter [L]
- b, : long diameter [L]
- BOD : biochemical oxygen demand [ML⁻³]
- COD : chemical oxygen demand [ML⁻³]
- \bar{d} : Sauter mean diameter [L]
- di : diameter of volume equivalent sphere [L]

dm : Sauter mean media diameter [L]
 dp : Sauter mean bioparticle diameter [L]
 F/M : Food : Microorganism ratio [-]
 HRT : hydraulic retention time [T]
 MLSS : mixed liquor suspended solids [ML⁻³]
 MLVSS : mixed liquor volatile suspended solids [ML⁻³]
 n : number of media per unit volume [-]
 P : moisture content [-]
 Vb : total volume of biofilm per unit volume [-]
 V₁ : volume of wastewater per unit volume [-]
 Wb : wet weight of biofilm per unit volume [M/L³]
 δ : average biofilm thickness [L]
 ρ_{bd} : dry density of biofilm [M/L³]
 ρ_{bw} : wet density of biofilm [M/L³]

2. Michael Barbara, Frank Flood and John Jeris : *J. Wastewater Treatment*, 35(1980).
3. "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", APHA, AWWA, WPCF, 16th Edition, (1985).
4. Wen K. Shieh and John D. Keenan : *Advances in Biochemical Engineering*, 33, 131(1986).
5. Characklis, W. G. : *Biotech. and Bioeng.*, 23, 1923 (1981).
6. Hoehn, R. C. and Ray, A. D. : *J. WPCF*, 45, 2308 (1973).
7. Leo T. Mulcahy and Wen K. Shieh : *Wat. Res.*, 21, 451(1987).
8. Enrique J. La Motta : *Envi. Sci. and Tec.*, 10, 765 (1976).

REFERENCES

1. Theodore, C. Stathis : *ASCE.*, 106, 227(1980).