

## 역 유동층 생물막 반응기에서 유기물의 농도 부하와 수리학적 부하의 변동에 따른 생물막 성장과 COD 처리효율

김동석 · 최윤찬 · 박영식 · 서정호 · 추석열 · 송승구<sup>†</sup>

부산대학교 화학공학과  
(1995년 2월 13일 접수, 1995년 7월 26일 채택)

## Biofilm Characteristics and COD Removal Efficiency of an Inverse Fluidized Bed Biofilm Reactor with the Change of Both Substrate Loading and Hydraulic Loading

Dong-Seog Kim, Yoon-Chan Choi, Young-Seek Park, Jung-Ho Suh, Suck-Ruel Choo and Seung-Koo Song<sup>†</sup>

Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Pusan National Univ., Pusan 609-735  
(Received 13 February 1995; accepted 26 July 1995)

### 요 약

역 유동층 생물막 폐수처리 반응기에서 수리학적 부하와 농도 부하를 달리한 실험을 행하여 이에 따른 COD의 처리효율, 생물막의 두께, 생물막 밀도 및 biomass 농도의 변화 등을 고찰하였다. 농도 부하를 높게 가한 경우에는 높은 유기물 농도에 의한 미생물의 충격이 크게 나타났고, 수리학적 부하를 가한 경우에는 미생물의 충격이 상대적으로 적게 나타났다. 수리학적 부하를 가한 경우에서 반응기를 더 안정적으로 운전할 수 있었다. 또한 농도 부하를 증가시킨 경우에는 bioparticle의 외부 biomass는 헐겁게 부착되고 사상성 물질이 많았으므로 생물막 건조밀도는 낮았다. 그러나 수리학적 부하에서 나타난 bioparticle은 그 모양이 매끄럽고 생물막 건조밀도도 높게 나타났다. 최대 비기질 제거속도의 고찰에서도 수리학적 부하를 가한 경우가 농도 부하를 가한 경우보다 약 2배정도 높게 나타났다.

**Abstract**—The effects of substrate or hydraulic loading on COD removal efficiency, biofilm thickness, biofilm density and biomass concentration were investigated in an inverse fluidized-bed biofilm reactor(IFBRR). The shock on the microorganisms in the case of hydraulic loading was smaller than in that of substrate loading. Thus, the reactor was more stably operated in hydraulic loading in comparison with in substrate loading. At the change of substrate loading the external biomass of bioparticle was more loosely fitted and filamentous, and the biofilm dry density was lower than those in the case of hydraulic loading. The maximum specific substrate removal rate of hydraulic loading was also found about twice higher than that in the case of substrate loading.

**Key words:** Inverse Fluidized Bed Biofilm Reactor, COD Removal Efficiency, Film Thickness Biofilm Dry Density, F/M Ratio

### 1. 서 론

생물막(biofilm)은 입자표면 또는 내부에 고정화된 미생물로 형성된 또는 생체의 고분자 물질(extracellular polymer substance; EPS)에 둘러싸인 막으로 정의된다[1]. 생물막을 이용하는 폐수처리공정에서는 증식속도가 느린 미생물도 외부로 유출되지 않고 다종다양한 미생물이 증식할 수 있으므로 슬러지 일령(sludge age)이 길고, 슬러지의 자기산화가 촉진되기 때문에 폐슬러지의 발생량이 적으며, 다양한 미생물종이 군집(microconsortia)을 형성함으로써 온도나 pH 변동, 충격부하 및 난분해성 물질유입에 따른 대처능력이 뛰어나고[2], media에 미생물이 부착되어 있으므로 슬러지 팽화현상으로 인한 슬러지 부상 등과 같은 문제점을 줄일 수 있다고 알려져 있다.

그러나 생물막 공정에서는 우선적으로 생물막이 잘 형성되어야

하고, 또한 생물막의 형성 및 성상의 변화는 전체적인 폐수처리 공정에 매우 큰 영향을 미친다. Heijnen 등[3]은 초기 생물막 형성시에 media의 표면 거칠기와 액체순환속도의 유속이 생물막의 형성에 많은 영향을 미칠 뿐만 아니라, 수리학적 체류시간도 생물막의 형성에 상당한 영향을 미친다고 발표한 바 있고, Denac 등[4]은 혐기성 유동층 생물막 반응기와 고정층 생물막 반응기에서 수리학적 체류시간의 변동에 따른 반응기의 안정성에 관하여 보고한 바가 있으며, Converti 등[5]은 유동층 생물막 반응기에서 수리학적 체류시간 변동시 수리학적 체류시간이 5시간 이하의 수리학적 체류시간에서 wash-out 현상이 나타난다고 보고하였다.

역 유동층 생물막 반응기는 최근 김 등[6,7]에 의해 많은 연구가 되고 있는 새로운 형태의 유동층 생물막 반응기로서, 공기의 공급만으로 충분한 산소의 공급과 media의 유동을 동시에 얻을 수 있어 동력비의 측면에서 상당한 절감을 가져올 수 있고, draft tube 내에서

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

본 연구에서는 역 유동층 생물막 반응기에서 농도 부하(substrate loading)와 수리학적 부하(hydraulic loading)를 각각 변화시키면서 반응기 내 biomass 농도, 생물막 두께, 생물막 건조밀도 및 COD 처리효율 등의 변화를 관찰하여, 실제 현장에서 발생하기 쉬운 농도나 수리학적 부하변동에 따른 반응기의 대처능력 및 안정성을 고찰하고자 하였다.

1. Draft tube region  
2. Annular tube region  
3. Sampling port  
4. Air pump  
5. Rotameter  
6. Feed tank  
7. Feed inlet pump  
8. Water bath  
9. Recycling pump  
10. Outlet  
11. Water jacket  
12. Drain valve  
13. Sieve  
14. Emergency outlet  
15. Air distributor

Bioparticle의 직경은 현미경(Nikon Labophot-2A 40X)에 부착된 눈금자를 이용하여 50개 이상 직접 측정하고, 이를 평균하여 구하였다. Styrofoam을 media로 하여 형성되는 bioparticle은 거의 구형에 가깝다[11]. 그러나 실험의 정밀성을 높이기 위하여 bioparticle의 장축과 단축을 측정하여 volume-equivalent(등가부피) 직경으로 전환하였으며, 평균 입자 직경은 Sauter mean diameter법[12]

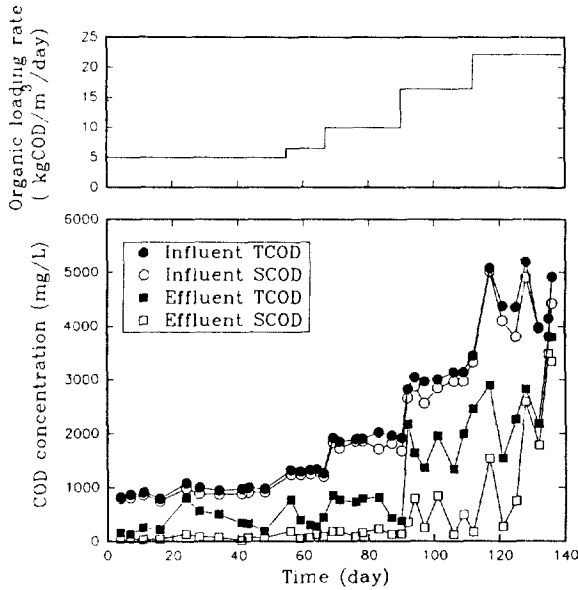


Fig. 2(a). The variation of COD concentration on time with changing of substrate loading.

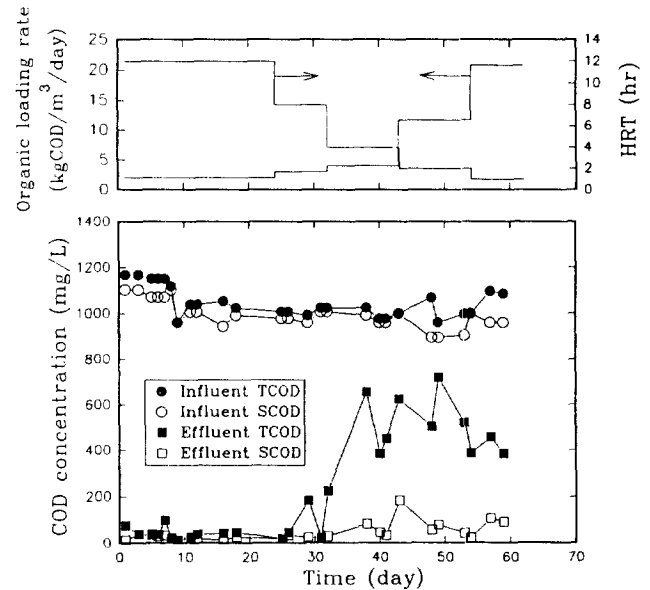


Fig. 2(b). The variation of COD concentration on time with changing of hydraulic loading.

으로 구하였다.

평균 생물막 두께( $\delta$ )는 위에서 구한 bioparticle 직경( $d_p$ )에서 media의 직경( $d_m$ )을 뺀 값으로부터 계산하였다.

$$\delta = \frac{d_p - d_m}{2} \quad (1)$$

#### 2-5-5. 생물막 건조밀도(biofilm dry density)

생물막 건조밀도(biofilm dry density,  $\rho_{bd}$ )는 생물막의 부피에 대한 건조무게의 비로 정의되며, 생물막의 건조무게는 105°C의 건조기에서 2시간 건조시킨 후의 bioparticle 건조무게에서 media의 건조무게를 뺀 값이다. 생물막 건조밀도는 media(styrofoam)에 대한 bioparticle의 크기 비( $\gamma$ ), media의 밀도( $\rho_m$ ) 및 초기 입자질량에 대한 부착된 생물막의 질량비( $X$ )에 의해 다음과 같이 표현된다 [13].

$$\rho_{bd} = \frac{X\rho_m}{\gamma^3 - 1} \quad (2)$$

### 3. 결과 및 고찰

약 140일 동안 안정되게 운전된 역 유동층 생물막 반응기에서 수리학적 체류시간(HRT)을 5시간으로 일정하게 유지시킨 후 유입 합성폐수의 COD 농도를 단계적으로 1000, 1500, 3000, 4000 mg/l로 증가시켜 유기물 부하율(organic loading rate, OLR)을 각각 5, 7, 10, 17, 22 kgCOD/m³/day로 상승시켰을 때 농도 부하의 증가에 따른 유기물 부하율과 유출수의 COD 농도변화를 Fig. 2(a)에 나타내었다.

유출수의 SCOD 농도는 유기물 부하율이 17 kgCOD/m³/day에 도달할 때까지는 유입폐수의 COD 농도에 비교적 무관하게 100 mg/l 이하의 값을 나타내었고 처리효율도 높았으나, 17 kgCOD/m³/day 이상의 유기물 부하율 영역에서는 급격하게 감소하여 500 mg/l 이상의 값을 나타내었으며, 유기물 부하율이 20 kgCOD/m³/day 이상이었을 때에는 유출수의 SCOD 값이 3000 mg/l를 넘어 처리가

거의 불가능하였다. 유출수의 TCOD를 관찰해 보면, 유기물 부하율 10 kgCOD/m³/day 영역에서부터 이미 반응기 내 bioparticle로부터 다량의 biomass가 탈착되어 유출되고, 유기물 부하율을 증가시키에 따라 유출되는 biomass의 양과 유기물의 농도도 증가됨을 알 수 있었다. 이는 유기물 부하율을 증가시키에 따라 반응기 내 biomass의 증식율이 증가하는 반면, 생물막을 단단하게 결합시켜 주는 생체의 고분자 물질의 점성이 약한 종으로 변성되어[14] biomass의 탈착이 심해지고, 생물막에서 과다하게 증식된 biomass는 유체와 기포의 전단응력을 많이 받게 되므로 biomass의 탈착량이 증가되고 생성된 미생물도 섬유상 미생물로 변화되었다. 또한 biomass의 과다한 증식으로 생물막 내 기질의 확산저항이 증가되고 유입되는 합성폐수의 COD 농도의 증가에 따른 미생물에 대한 농도 유기물 충격으로 인하여 SCOD의 처리효율도 급격하게 감소되는 경향을 나타내었다.

Fig. 2(b)는 유입폐수의 COD 농도를 1000 mg/l 정도로 일정하게 유지한 상태에서 HRT를 각각 12, 8, 4, 2, 1시간으로 변화시켜 유기물 부하율을 2, 3, 4, 12, 21 kgCOD/m³/day로 조절시켰을 때 70일 동안의 유출수의 COD 농도변화를 나타내었다. 유출수의 SCOD 농도의 경우, HRT 4시간까지는 HRT 변화에 따른 유출수의 농도 변화는 거의 없었고 정상상태에 도달하는 시간도 짧게 소요되었으나, HRT를 2시간 이하로 감소될 때에는 유출수의 농도변화폭은 커지고 정상상태에 도달하는 시간도 길게 소요되었다. 이에 비하여 유출수의 TCOD의 경우는 유기물 부하율이 2 kgCOD/m³/day일 때, 즉 HRT가 12시간일 때에는 TCOD 처리효율이 97.85%, 유기물 부하율이 3 kgCOD/m³/day(HRT : 8시간)일 때에는 74.62% 등의 비교적 높은 처리효율을 보였으나, 유기물 부하율이 4 kgCOD/m³/day(HRT : 4시간)일 때 TCOD 처리효율이 48.5%로 나타나 초기의 낮은 유기물 부하율에 비하여 TCOD 처리효율이 상당히 감소하였다. 이는 HRT 감소로 많은 유기물이 유입되어 미생물의 신진대사가 활발해져 상당한 biomass의 증식이 이루어지나, 증식된 biomass가 모두 생물막으로 형성되지는 못하고 반응기 외부로 유출되는 다량의 처리수와 더불어 외부로 유출된다.

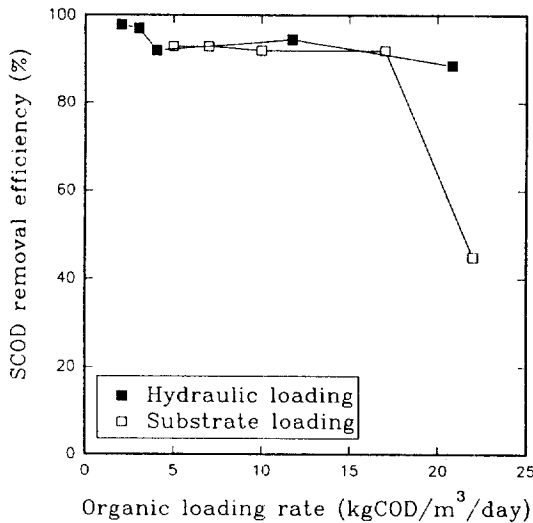


Fig. 3. Effect of organic loading rate on the SCOD removal efficiency (■ □) at pseudo-steady state.

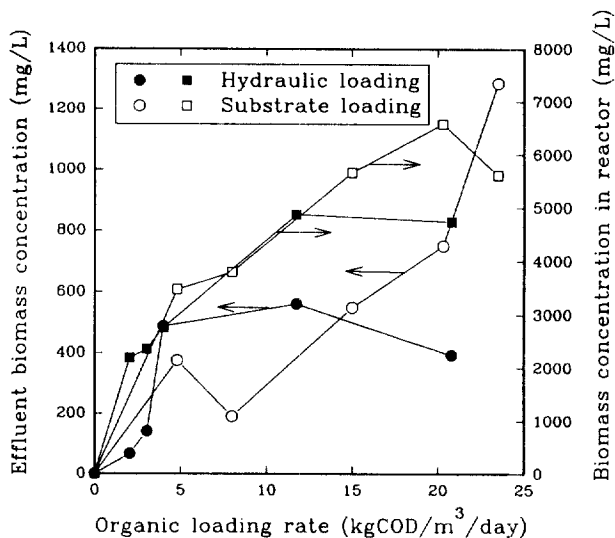


Fig. 4. Effect of organic loading rate on the effluent biomass concentration (● ○) and the biomass concentration in reactor (□ ■) at pseudo-steady state.

HRT를 계속적으로 감소시켜 1시간 이하로 유지시켰을 경우에는 유량의 증가에 따른 수리학적 흐름변화로 bioparticle이 유출수 중으로 휩쓸려 나오는 현상이 발생하여 운전이 거의 불가능하게 되었다. 또한, 지나친 유기물 부하율의 증가가 미생물에게 상당한 충격 부하로 작용하게 됨으로써 반응기 내에는 흰색의 거품들이 많이 발생하게 되고, 이 발생된 거품들은 물보다 가벼운 bioparticle들을 동반하여 반응기 상부로 부상시키게 되므로 반응기 운전이 치명적인 악영향을 미치게 되었다. Wongsamuth와 Doran[15]이 *Atropa belladonna*의 연구에서 거품의 형성량은 미생물이 분비하는 단백질의 양과 밀접한 관계가 있음을 밝힌 바와 같이 본 실험에서 형성된 거품도 미생물이 분비한 단백질과 밀접한 관계가 있는 것으로 사료되며, 지나친 유기물 부하율은 미생물로 하여금 이에 대한 대처 방안으로 단백질을 분비하게 하여 거품을 발생케 하는 것으로 추측되었다.

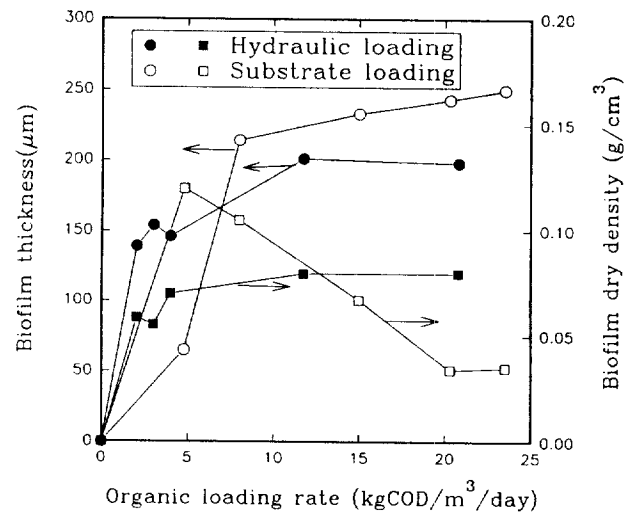


Fig. 5. Effect of organic loading rate on the biofilm thickness (● ○) and the biofilm dry density (■ □) at pseudo-steady state.

수리학적 부하와 농도 부하에 대한 SCOD 처리효율을 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 이 때의 SCOD 처리효율은 유출수의 농도변화가 5% 이내인 pseudo steady state에 도달하였을 때 약 4-5일치의 평균값으로부터 계산하였다. SCOD의 경우에는 수리학적 부하와 농도 부하 모두 20 kgCOD/m³/day 이하에서 처리효율이 90% 정도로 유지되었다. 수리학적 부하로 인한 유기물 부하율의 증가에서 처리효율에 가장 많은 영향을 미치는 인자는 유입수의 유량이며, 농도 부하를 증가시키는 경우에는 유입수의 고농도가 신진대사 과정에서 저해작용을 하므로 처리효율에 영향을 미치게 될 수 있었다. 따라서 유기물 부하율이 증가함에 따라 어느 유기물 부하율 영역 이상에서는 급격한 처리효율의 감소를 보이게 되는데 본 실험에서는 이러한 영역이 20 kgCOD/m³/day임을 알 수 있었다.

Fig. 4는 유기물 부하율의 증가에 따른 유출수 중 biomass 농도와 반응기 내 biomass 농도의 변화를 나타낸 것이다. 수리학적 부하를 준 경우에는 유출수의 biomass농도와 반응기 내 biomass농도는 넓은 유기물 부하범위에서 비교적 일정하게 유지되었으나, 농도 부하의 경우에는 유입수의 COD 농도가 증가하여 미생물의 대사과정이 대수 성장 단계까지 높아져 다량의 biomass가 생성되고, 그에 따라 많은 양의 biomass가 유출되며, 또한 농도증가에 따른 생물막 형성에 중요한 역할을 수행하는 EPS가 저농도에서는 점성이 높으나 고농도에서는 점도가 약한 종류로 변성되어 생성된 미생물의 부착력이 떨어지므로 상당량 유출수를 따라 외부로 유출시키게 된다 [14].

Fig. 5는 유기물 부하율의 증가에 따른 bioparticle의 생물막 두께와 생물막 건조밀도의 변화를 나타내었다. 유기물 부하가 증가함에 따라 생물막 두께는 증가하는 경향을 보였으며, 농도 부하를 준 경우가 수리학적 부하를 준 경우보다 생물막 두께의 최대치가 조금 더 크게 나타났다. 그러나 bioparticle의 성장에 따른 생물막 건조밀도에서는 두 경우가 서로 상이하게 나타났는데, 일반적으로 생물막이 증가하는데 따라 생물막 건조밀도는 감소하는 경향을 보이나[16], 농도 부하의 경우에는 일반적인 경향을 따라 생물막의 증가로 인해 생물막 건조밀도는 감소하였지만, 수리학적 부하인 경우에는 오히려 생물막 두께가 증가함에 따라 생물막 건조밀도가 완만히 상승하였다. 이는 농도 부하가 증가하는 경우에는 생물막을 구성하고 있는 EPS의 점성이 떨어짐으로써 생물막이 저

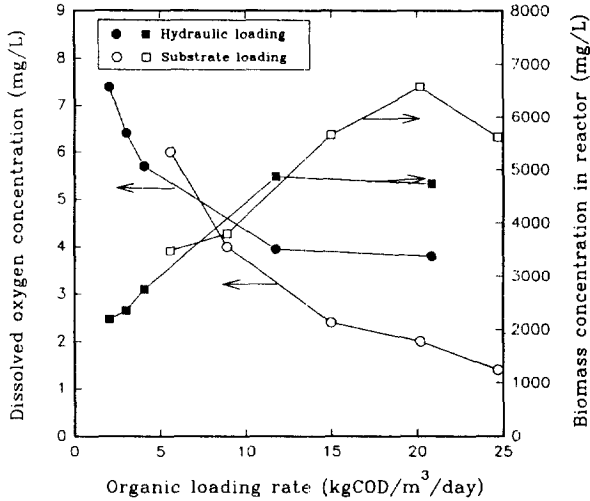


Fig. 6. Effect of organic loading rate on the dissolved oxygen concentration(● ○) and the biomass concentration in reactor(■ □) at pseudo-steady state.

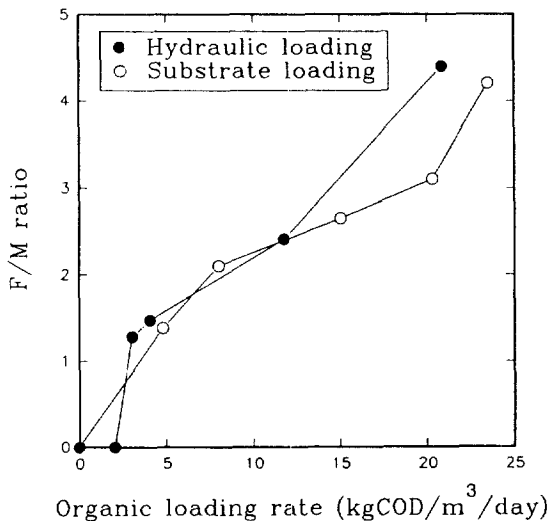


Fig. 7. Effect of organic loading rate on F/M ratio.

농도에 비하여 견고히 부착되지 못하고 형상도 filamentous한 구조로 변화하여 자연히 생물막 두께의 증가에 대한 생물막 건조 무게의 증가비가 작아서 생물막 건조 밀도는 감소하는 것으로 관찰되었다. 그러나 수리학적 부하를 증가시킨 경우에는 그 지배인자가 유량에 있으므로 계속적으로 생물막이 증가하여도 상대적으로 밀도가 낮은 bulky한 biomass는 생물막 내로 축적되지 못하고 탈리되어 외부로 유출됨으로써 생물막 건조밀도가 증가되는 것으로 사료되었다.

수리학적 부하의 경우에는 유기물 부하율 12  $\text{kgCOD/m}^3/\text{day}$ 의 영역에서 최대치의 biomass 농도를 나타내고, 농도 부하의 경우에는 유기물 부하율이 20  $\text{kgCOD/m}^3/\text{day}$ 에서 최대값을 나타내었다. 이에 따른 반응기 내 용존산소농도의 변화를 Fig. 6에 고찰하였다. 반응기 내 biomass의 농도의 증가에 따라 용존산소의 농도는 감소하고 있지만, 두 경우 모두 충분히 호기성 상태를 유지할 수 있는 것으로 판단되었다.

농도 부하와 수리학적 부하의 두 경우 모두 유기물 부하율의 증가로 인해 반응기 내 유기물의 농도가 증가함으로써 F/M비가

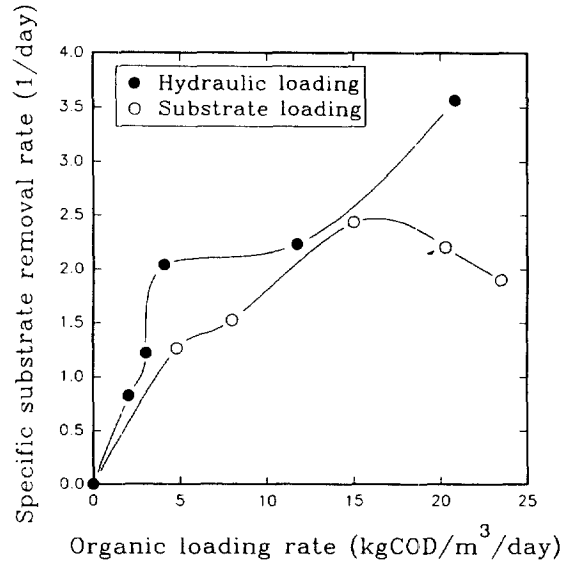


Fig. 8. Effect of organic loading rate on specific substrate removal rate.

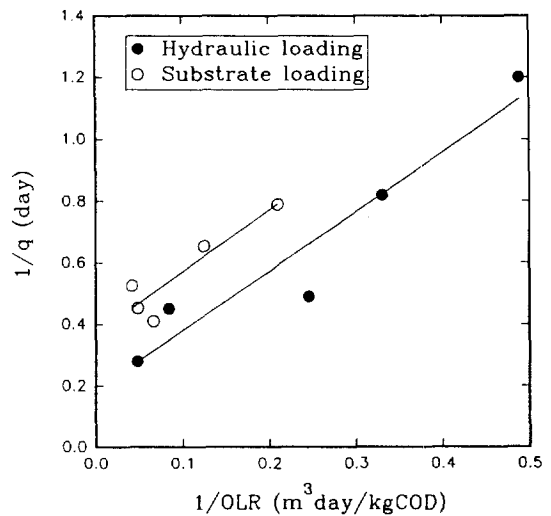


Fig. 9. Quantitative relationship between organic loading rate and specific substrate removal rate.

높아지지만, 수리학적 부하에서의 F/M비가 더 증가함을 알 수 있었다(Fig. 7).

또한, 농도 부하의 경우에는 유기물 부하율 15  $\text{kgCOD/m}^3/\text{day}$ 를 정점으로 비기질 제거 속도(specific substrate removal rate)가 감소하는데 반하여, 수리학적 부하를 준 경우에는 실험범위 내에서 계속적으로 증가함을 Fig. 8에서 알 수 있었다. 농도 부하가 증가하는 경우에는 생물막의 두께가 두꺼워지고 생물막내 기질의 확산저항이 크므로 실제 생물막 건조밀도는 감소하게 됨으로써 비기질 제거속도는 계속적으로 증가하지 못하고 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 수리학적 부하를 주는 경우에는 생물막 두께가 농도 부하에 비하여 상대적으로 얇게 유지됨으로써 기질의 생물막 내 확산저항이 적게 발생되고, 유량의 증가로 인하여 새로운 biomass의 교체가 원활하게 이루어짐으로써 비교적 높은 유기물 부하에서도 비기질 제거속도가 계속적으로 증가하는 것으로 판단

되었다. 그 정량적 관계를 살펴보기 위하여 Converti 등[5]은 반응기의 역학적 모델링에서 아래와 같이 비기질 제거속도와 유기물 부하율(OLR ;  $COD_{in}/\tau$ )과의 관계를 Monod-type의 식으로 설명하였다.

$$q = q_{max} \frac{COD_{in}}{\tau k + COD_{in}} \quad (3)$$

이를 Lineweaver-Burk plot 형식을 빌어 표현하면 식 (4)와 같이 되며 이를 Fig.9에 나타내고,

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_{max}} + \frac{k}{q_{max}} \frac{1}{OLR} \quad (4)$$

회귀 분석법을 이용하여 최대 비기질 제거속도를 구하면 농도 부하를 주는 경우  $q_{max} = 2.74 \text{ day}^{-1}$ 이며 수리학적 부하를 주는 경우에는  $q_{max} = 5.5 \text{ day}^{-1}$ 로 농도 부하에서의 최대 비기질 제거속도보다 두배정도 크게 나타났다. 이는 생물막 두께의 증가에 따른 기질의 확산 영향으로 비기질 제거속도가 감소한 것으로 사료되었다.

#### 4. 결 론

역 유동층 생물막 반응기에서 수리학적 부하(hydraulic loading)를 가한 경우와 농도 부하(substrate loading)를 가한 실험을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 농도 부하와 수리학적 부하 모두에서 SCOD는 90% 정도 높은 처리 효율을 보였으나 TCOD의 경우는 80% 정도로 비교적 높게 유지되다가  $15 \text{ kgCOD/m}^3/\text{day}$  이상의 유기물 부하에서는 급격히 감소하였다. 그러므로 유기물 부하를 증가시키면 bioparticle에 형성된 biomass가 쉽게 탈착됨을 알 수 있었다.

(2) 농도 부하에서는 bioparticle의 형태가 filamentous하고 생물막 건조밀도는 낮게 나타났으나, 수리학적 부하에서의 bioparticle 형태는 모양이 매끄럽고 생물막 건조밀도가 높았다.

(3) 농도 부하에서와 수리학적 부하에서 각각의 비기질 제거속

도와 유기물 부하율과의 관계를 회귀분석법으로 구한 결과, 농도 부하를 준 경우에는  $q_{max}$ 가  $2.74 \text{ day}^{-1}$ 이고 수리학적 부하를 준 경우에는  $q_{max}$ 가  $5.5 \text{ day}^{-1}$ 로 농도 부하의 경우보다 2배 정도 높았다.

#### 참고문헌

1. Bryers, J. D.: *Biotechnol. Bioeng.*, **26**, 948(1984).
2. Flemming, H. C.: *Wat. Sci. Tech.*, **27**(7/8), 1(1993).
3. Heijnen, J. J., van Loosdrecht, M. C. M., Mulder, A. and Tijhuis, L.: *Wat. Sci. Tech.*, **26**(3/4), 647(1992).
4. Denac, M., Miguel, A. and Dunn, I. J.: *Biotechnol. Bioeng.*, **31**, 1(1988).
5. Converti, A., Borghi, M. D. and Ferraio, G.: *Chem. Eng. J.*, **52**, B21(1993).
6. 김동석, 박영식, 추석렬, 송승구: 화학공학, **32**(5), 680(1994).
7. 김동석, 박영식, 윤준영, 송승구: 대한환경공학회지, **16**(7), 877(1994).
8. 김동석, 최윤찬, 송승구: 특허출원번호 93-19912(1993).
9. 김동석, 서봉국, 이민규, 송승구: 화학공학, **31**(5), 563(1993).
10. "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 17th Ed, APHA, AWWA, WPCF, Washington D.C. (1988).
11. 김동석, 박영식, 박경기, 송승구: 대한환경공학회지, **16**(8), 943(1994).
12. Bailey, J. E. and Ollis, D. F.: "Biochemical Engineering Fundamentals", 2nd Ed., McGraw-Hill, 482(1986).
13. Ro, K. S. and Neething, J. B.: *J. WPCF*, **62**(7), 901(1990).
14. Mian, F. A., Jarman, T. R. and Righelato, R. C.: *J. Bacteriol.*, **134**(2), 418(1978).
15. Wongsamuth, R. and Doran, P. M.: *Biotechnol. Bioeng.*, **44**, 4818(1994).
16. Trinet, F., Heim, R., Chang, H. T. and Rittmann, B. E.: *Wat. Sci. Tech.*, **23**, 1347(1991).