

역 유동층 생물막 반응기에서 수리학적 부하가 생물막 성상에 미치는 영향

김 동 석 · 최 윤 찬 · 박 문 기* · 추 석 렬 · 송 승 구

부산대학교 화학공학과, *경산대학교 환경보건학과
(1994년 11월 13일 접수)

Effect of Hydraulic Loading on Biofilm Characteristics in an Inverse Fluidized Bed Biofilm Reactor

Dong-Seog Kim, Yoon-Chan Choi, Moon-Ki Park*,
Suck-Ruel Choo and Seung-Koo Song

Dept. of Chem. Eng., Pusan National Univ., Pusan, 609-735, Korea
**Dept. of Environ. Health, Kyungsan Univ., Kyungsan, 712-240, Korea*
(Manuscript received 13 November 1994)

Abstract

Stability of reactor and effect on biofilm characteristics were investigated by varying the hydraulic residence time in an inverse fluidized bed biofilm reactor(IFBBR). The SCOD removal efficiency was maintained above 90 % in the HRT range of 12hr to 2hr, but the TCOD removal efficiency was dropped down to 50 % because of biomass detachment from overgrown bioparticles. The reactor was stably operated up to the conditions of HRT of 2hr and F/M ratio of 4.5kgCOD/m³/day, but above the range there was an abrupt increase of filamentous microorganisms. The optimum biofilm thickness and the biofilm dry density in this experiment were shown as 200 μ m and 0.08 g/cm³, respectively. The substrate removal rate of this system was found as 1st order because the biofilm was maintained slightly thin by the increased hydraulic loading rate.

Key Words : inverse fluidized bed, biofilm, hydraulic loading

1. 서 론

지지매체(media)에 부착되어 있는 생물막을 이용하는 생물막 공정(biofilm process)은 증식속도가 느린 미생물도 외부로 유출되지 않으므로, 부유하는 미생물을 이용하는 활성슬러지 공정에 비하여 비교적 다종다양한 미생물이 증식할 수 있고 슬러지 일령(sludge age)을 길게 유지할 수 있으

며, 슬러지의 자기산화가 촉진되기 때문에 폐(waste) 슬러지의 발생량이 적으며, 미생물 군집(microconsortia)의 형성에 의해 온도, pH 변동, 충격부하 및 난분해성 물질유입에 따른 대처능력이 뛰어나고(Flemming, 1993), 무엇보다도 media에 미생물이 부착되어 성장되므로 슬러지 팽화(bulking)현상으로 인한 슬러지 부상현상은 적어지므로 안정적으로 운전관리가 용이하다.

생물막 공정 중에서 가장 최근에 연구되고 있는 역 유동층 생물막 반응기는 위에서 언급한 생물막 공정의 장점 이외에도, 생물막이 형성된 입자가 유체의 흐름에 의해 계속적으로 유동을 하므로 산소나 기질의 물질전달효과가 다른 생물막 공정에 비하여 우수하고, 수직적인 설치에 따라 반응기 설치부지확보에 대한 부담을 덜 수 있으며, draft tube 내부로 직접적인 포기에 의해 공기를 공급하므로 산소공급이 원활하며 또한 공기 분율의 증가에 의해 액체를 순환시켜 입자를 유동시킬 수 있으므로 입자의 유동에 따른 동력비를 절감할 수 있다.

Nikolov와 Karamanev(1987)는 폴리스티렌을 media로 하는 역 유동층 생물막 반응기와 air-lift 반응기에서 혼합 미생물을 이용한 폐수처리와 *Thiobacillus ferrooxidans*의 순수 균주에 의한 철이온의 산화에 관한 실험을 각각 수행한 바 있으며, Ramsay 등(1991)은 역 유동층 생물막 반응기에서 구조도 분말과의 접촉에 의해 표면이 거칠어진 폴리스티렌을 media로 이용하여 *Penicillium chrysogenum* ATCC 28089 균주에 의한 페니실린 생산을 시도한 바 있다. 국내에서는 김 등(1994a)이 역 유동층 생물막 반응기를 이용하여 생물학적 폐수처리에 대한 응용가능성을 타진한 바 있다.

실제 생물학적 폐수처리공정에서 미생물에 대한 수리학적 부하의 변동은 농도 부하의 변동에 못지않게 많이 발생하고 있으므로 반응기의 안정성 및 효율성의 측면에서 중요하게 고려되어야 한다.

Denac과 Dunn(1988)은 혐기성 유동층 생물막 반응기와 고정층 생물막 반응기에서 수리학적 체류시간의 변동에 따른 반응기의 안정성을 비교하여 보고한 바가 있었으며, Diaz와 Howell(1988)은 하향흐름의 고정 생물막 혐기성 반응기에서 농도 충격부하와 수리학적 충격부하에 의한 반응기의 안정성을 평가하였다. Trulear와 Characklis(1982)은 관형 생물막 반응기에서 체류시간변화에 의한 생물막 두께의 변화와 이에 따른 비기질 제거속도의 변화를 보고한 바 있다.

그러므로 본 연구에서는 역 유동층 생물막 반응기에서 수리학적 부하(hydraulic loading)변동에 따른 생물막 성장 즉, 반응기내 biomass 농도, 생

물막 두께 및 생물막 건조밀도 등을 조사하고, 이를 유기물의 처리효율과 연계시켜 관찰함으로써 역 유동층 생물막 반응기의 안정성을 조사하고자 하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 합성폐수 및 biomass

본 실험에서는 glucose를 주 탄소원으로, urea를 주 질소원으로 하는 Table 1과 같은 조성의 합성폐수를 사용하였다. Biomass는 W식품(주)의 반송슬러지를 이용하여 합성폐수에 약 15일 정도 순화시킨 후, media에 부착시켜 실험하였다.

Table 1. The Composition of the Synthetic Wastewater (Based on CODcr = 2500mg/ℓ)

Components	Concentration (g/l)
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

2.2 실험장치

Annular tube의 직경과 draft tube의 직경은 각각 내경 8cm와 내경 3cm이고, 높이가 100cm와 90cm인 아크릴 원형관을 반응기로 사용하였다. 반응기의 전체 부피는 5ℓ이었고 실제 반응부피는 4.5ℓ였으며, 개략적인 반응기의 구조는 Fig. 1과 같다. 항온을 유지시키기 위하여 반응기 외부에 2cm 간격의 water-jacket을 설치하였다. 반응기 내 생물막의 변화상태를 관찰하기 위하여, 생물막이 형성된 입자인 bioparticle을 채취할 수 있는 시료 채취구를 20cm 간격으로 4개 설치하였다.

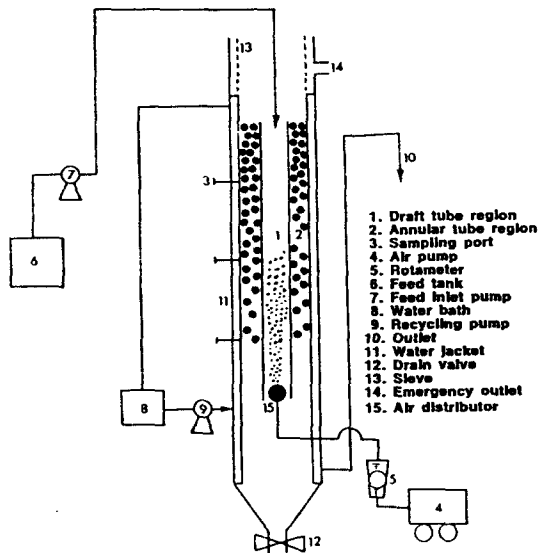


Fig. 1. Schematic diagram of an inverse fluidized bed biofilm reactor.

2.3 Media

실험에 사용된 media는 발포성 폴리스티렌을 뜨거운 물에서 팽창시킨 styrofoam 입자로서, 평균 직경이 $903\mu\text{m}$ 이고, 평균 밀도가 $0.13\text{g}/\text{cm}^3$ 이었으며, 미생물의 부착을 촉진시키기 위하여 media 표면에 진주암(perlite)으로 도포하였다(김 등, 1993b).

2.4 연속 실험

온도를 $22\pm 1^\circ\text{C}$, 유입되는 합성폐수의 COD 농도를 약 $1000\text{ mg}/\text{l}$ 로 일정하게 유지한 상태에서 연속실험을 행하였다. 반응기내로 공급되는 기체 유량은 $6\text{ l}/\text{min}$ 으로 일정하게 유지하였고, 기체유입에 따른 annular tube 영역에서의 평균액체순환 속도는 직접유량측정방법(김 등, 1993a)으로 $7.4\text{ cm}/\text{sec}$ 로 나타났다.

2.5 분석 및 측정방법

유출되는 유기물의 농도가 일정하게 유지될 때

를 정상상태로 보고, 본 실험의 모든 분석은 반응기가 정상상태에 도달하기 전과 도달했을 때 모두의 경우에서 행하였다.

2.5.1 COD 측정

유입되는 폐수와 유출되는 폐수의 농도분석방법(COD)은 Standard Methods(1988)를 기준으로 하였고, 각 시료에 대해 TCOD와 SCOD 모두를 측정하였다.

2.5.2 DO 측정

반응기 내 용존산소는 DO-meter(YSI G05514-00)를 사용하여 annular tube 영역의 하부 50cm 지점에서 직접 측정하였다.

2.5.3 Biomass 농도

반응기 내의 biomass 농도는 반응기 하부 40cm 지점의 시료 채취구에서 시료(폐수 + 부유 biomass + bioparticle)를 채취하여, 0.1% NaOH 용액을 일정량 섞은 후, 교반기로 맹렬 교반하여 media와 슬러지를 완전 분리시킨 다음, Standard Methods(209 D)(1988)에 의해 MLVSS를 측정하였다. 이때 측정에 사용된 media 양만큼 새로운 media를 반응기에 투입하여 반응기내의 media 양을 일정하게 유지시켰다.

2.5.4 생물막 두께(biofilm thickness)

Bioparticle의 직경은 현미경(Nikon Labophot-2A 40X)에 부착된 눈금자를 이용하여 50개 이상 직접 측정하고, 이를 평균하여 구하였다. Bioparticle의 장축과 단축을 측정하여 volume-equivalent(등가부피) 직경으로 전환하였으며, 평균 입자 직경은 Sauter mean diameter[Bailey와 Ollis, 1986]로 구하였다. 평균 생물막 두께(δ)는 위에서 구한 bioparticle 직경(d_p)에서 media의 직경(d_m)을 뺀 값으로부터 계산하였다.

2.6 생물막 건조밀도(biofilm dry density)

생물막 건조밀도(biofilm dry density, ρ_{bd})는 생물막의 부피에 대한 건조무게의 비로 정의되며, 생물막의 건조무게는 105°C에서 2시간 건조시킨 후의 bioparticle 건조무게에서 media의 건조무게를 뺀 값이다. 생물막 건조밀도는 미생물이 부착되지 않았을 때의 입자(styrofoam)에 대한 bioparticle의 크기 비(γ), media의 밀도(ρ_m) 및 초기입자질량에 대한 부착된 생물막의 질량비(X)에 의해 다음과 같이 표현된다[Ro와 Neething, 1990].

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

3. 결과 및 고찰

유입되는 합성폐수의 SCOD 농도를 1000 mg/l 정도로 일정하게 유지한 상태에서 수리학적 체류시간(HRT)을 각각 12, 8, 4, 2, 1시간으로 변화시켜 유기물 부하율(organic loading rate, OLR)을 2, 3, 4, 12, 21 kgCOD/m³/day로 변화시켰을 때의 유출수의 TCOD와 SCOD 농도변화를 Fig. 2에 나타내었다. 유출수의 SCOD 농도는 HRT가 12시간에서 4시간까지는 거의 일정하게 30mg/l 정도로 나타났으며, HRT의 감소에 따른 충격에도 유출수의 농도변화는 미미하였고 정상상태에 도달하는데 소요되는 시간도 짧았으나, HRT를 2시간 이하로 감소시켰을 때에는 유출수의 SCOD 농도 변화폭은 커져 최대 200mg/l까지 증가하였고 정상상태에 도달하는 시간도 길게 소요되었다. 그러므로 정상상태에서의 SCOD 처리효율은 HRT가 12시간과 8시간에서는 97%이상으로 매우 높게 나타났고, HRT를 감소시키기에 따라 유기물 부하가 증가하게 되어 SCOD 처리효율은 약간 감소하여 HRT 1시간에서 약 90%의 SCOD 처리효율을 나타냈으나, HRT 변화에 따른 전체적인 SCOD 처리효율은 본 실험범위에서 90% 이상으로 높게 나타났다(Fig. 3).

이에 비하여 유출수의 TCOD 농도는 유기물 부하율의 변화에 따라서 그 값의 변화가 상당한 차

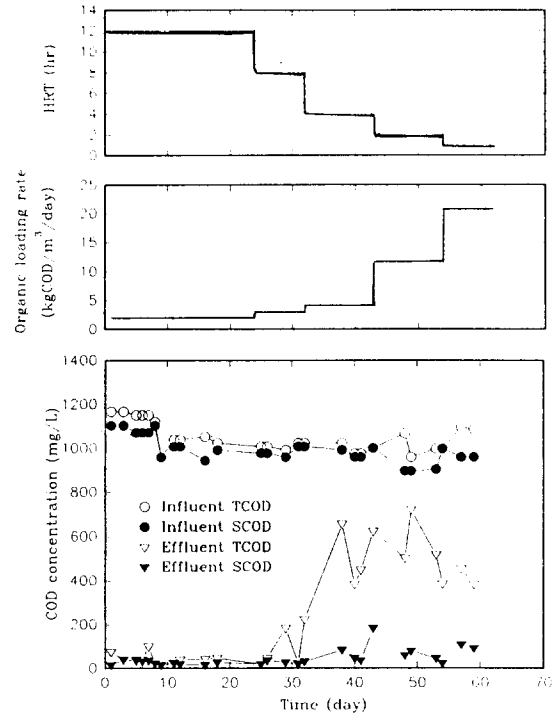


Fig. 2. Variation of COD concentration on time.

이를 나타내었는데, HRT가 12시간일 때 TCOD 처리효율은 98%, HRT가 8시간 일 때에는 75% 등의 비교적 높은 TCOD 처리효율을 보였으나, HRT가 4시간일 때에는 TCOD 처리효율이 49%, HRT가 2시간일 때 44%, HRT가 1시간일 때 48%로 나타나 초기 12시간과 8시간의 HRT에 비하여 TCOD 처리효율이 상당히 감소하였다. 이는 HRT 감소에 의해서 반응기 내부에 유기물질이 많이 유입되게 되므로 미생물의 신진대사가 활발해져 미생물의 증식이 많이 이루어지나, 과잉성장된 bioparticle들이 draft tube 내부의 기포와의 접촉에 의한 전단응력을 받아 생물막 중 일부가 탈리되어 부유상태로 유출됨으로써 TCOD 처리효율은 현저하게 감소하게 되었으며, HRT가 감소할수록 유기물 부하율이 증가하게 되어 유출수 중의 SS 농도가 증가하게 되었다.

또한, HRT를 계속적으로 감소시켜 1시간 이하로 유지시켰을 경우에는 사상성 미생물의 급작스러운 증가로 인하여 bioparticle의 밀도가 증가함

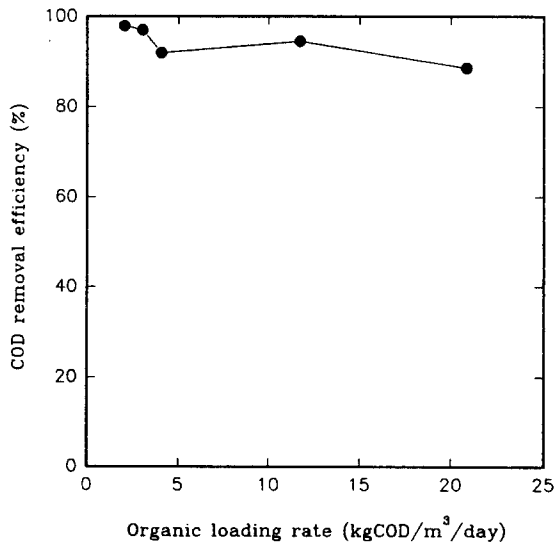


Fig. 3. Variation of SCOD removal efficiency according to the organic loading rate at steady state.

으로써 bioparticle이 반응기 하부로 침강하게 되어 유출수 중으로 혼입되어 나오는 현상이 발생하므로 운전이 거의 불가능하게 되었다.

Fig. 3은 각 유입농도에 대한 유출농도가 정상 상태에 도달하였을 때, 수리학적 부하에 대한 COD 처리효율을 나타낸 것으로, SCOD의 경우에서 HRT를 1시간까지 낮추어도 처리효율이 90% 정도는 유지되었으나, HRT를 2시간 이하로 감소 시킴에 따라 반응기내 biomass 농도(Fig. 4), 생물막 건조밀도 및 생물막 두께(Fig. 5) 등이 최대값을 벗어나 조금 떨어지는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 Diaz와 Howell(1988)가 농도부하에서 유입수의 농도가 계속적으로 증가함에 따라 자체 신진대사 과정에서 저해작용이 수반되어 처리효율이 감소한다고 보고한 박와 같은 현상으로 사료되었다.

Fig. 4는 유기물 부하율의 증가에 따른 반응기내의 용존산소의 변화와 반응기내 biomass농도의 변화를 나타낸 것으로써, 유기물 부하율이 증가함에 따라 반응기내 biomass의 농도가 증가함으로써 반응기 내의 용존산소의 농도는 감소하였고, 유기물 부하율이 12kgCOD/m³/day 이상에서는 유기물 부하변동에 따른 반응기내 biomass 농도

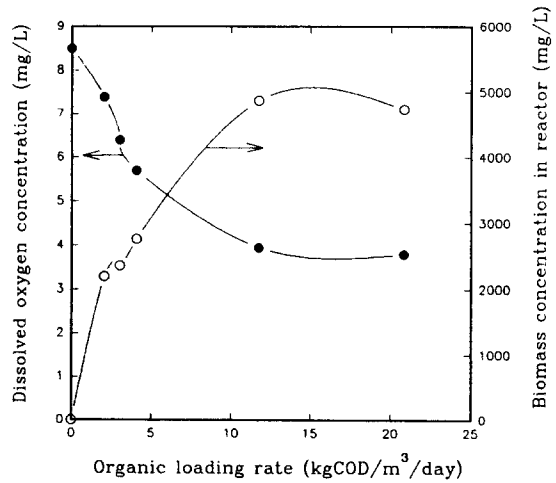


Fig. 4. Effect of organic loading rate on the biomass concentration in reactor(○) and the dissolved oxygen concentration(●).

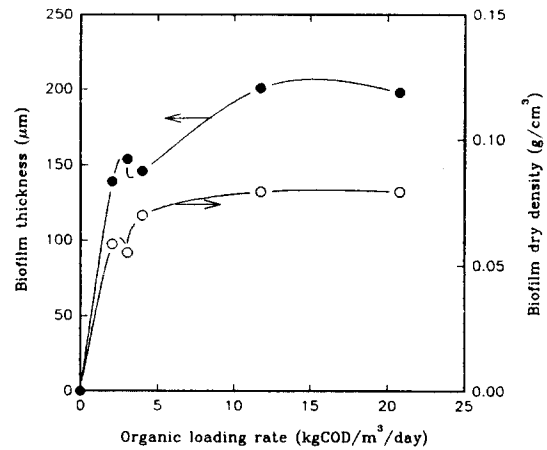


Fig. 5. Effect of organic loading rate on biofilm thickness(●) and biofilm dry density (○) at steady state.

가 거의 일정하게 유지됨으로써 반응기내 용존산소의 농도도 약 3 mg/l 정도로 일정하게 유지되었으며, 전체적인 반응기의 용존산소의 농도는 충분히 호기성 상태인 것으로 판단되었다. 또한, 반응기내 biomass 농도는 유기물 부하율이 증가함에 따라 계속적으로 증가하다가 유기물 부하율이 15kgCOD/m³/day 이상에서는 거의 일정하게 나타났는데, 이는 유기물 부하율이 15 kgCOD/m³/day

이하에서는 지속적인 생물막의 증가로 인하여 반응기내의 biomass 농도도 계속적으로 증가를 하나, 15kgCOD/m³/day 이상에서 과잉으로 성장된 bioparticle은 draft tube 관내에서 기포와의 접촉으로 bioparticle의 외곽 biomass는 생물막으로부터 탈리되어 유출됨으로써 반응기내 biomass 농도는 거의 일정하게 나타난 것으로 관찰되었다.

Fig. 5는 유기물 부하율의 증가에 따른 bioparticle의 생물막 두께와 생물막 건조밀도의 변화를 나타내었다. 일반적으로 생물막 두께가 증가함에 따라 생물막 건조밀도가 감소하는 경향을 보였는데, 본 연구에서는 유기물 부하율이 증가함에 따라 생물막 두께는 증가하는 경향을 보였으며, 생물막 두께가 증가함에 따라 생물막 건조밀도가 완만히 증가하였다. 일반적으로 농도부하를 증가시키는 경우에 생물막을 구성하고 있는 EPS(extracellular polymeric substance)의 점성이 떨어짐으로써 생물막이 저농도에 비하여 견고히 부착되지 못하고 형상도 사상성 구조로 변화하여 자연히 생물막 두께의 증가에 대한 생물막 건조 무게의 증가비가 작아서 생물막 건조 밀도는 감소하는 것으로 관찰되나, 수리학적 부하를 증가시킨 경우에는 그 지배인자가 유량에 있으므로 계속적으로 생물막이 증가하여도 상대적으로 밀도가 낮은 헐거운 biomass는 생물막 내로 축적되지 못하고 외부로 유출됨으로써 생물막 건조밀도는 감소하지 않고 일정하게 유지할 수 있었던 것으로 판단되었다. 본 실험의 범위에서는 최대 생물막 두께가 200 μm 로 나타났으며, 최대 생물막 건조밀도는 0.08 g/cm³이었다.

유기물 부하율의 변화에 따른 F/M 비의 변화를 Fig. 6에 나타내었는데, HRT를 감소시킴에 따라 유기물 부하율은 계속적으로 증가하고 이에 비례하여 biomass의 농도도 증가함으로써 유기물 부하율과 F/M 비는 거의 선형적인 관계를 가지는 것으로 나타났으며, 본 실험의 최대 F/M 비는 4.5kgCOD/kgTVS/day 정도로 나타났다. 일반적인 활성슬러지 공정에서 F/M 비가 0.5kgCOD/kgTVS/day인 것을 비교하면 매우 높은 F/M 비에서도 반응기를 운전할 수 있었는데, 이는 생물막을 형성시킴으로써 외부환경의 변화에 대한 대처 능력

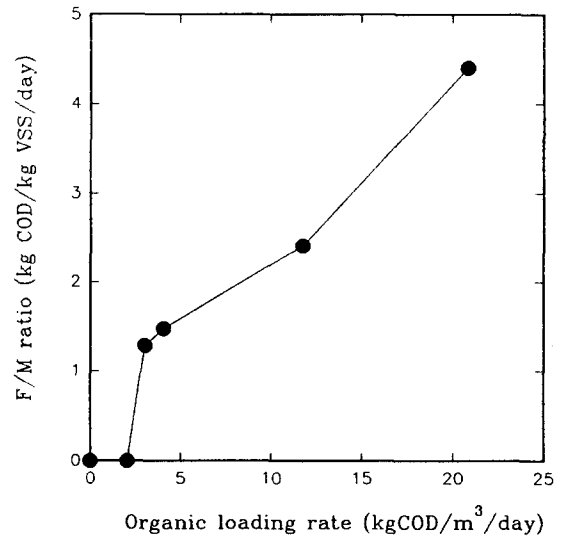


Fig. 6. Effect of organic loading rate on the F/M ratio.

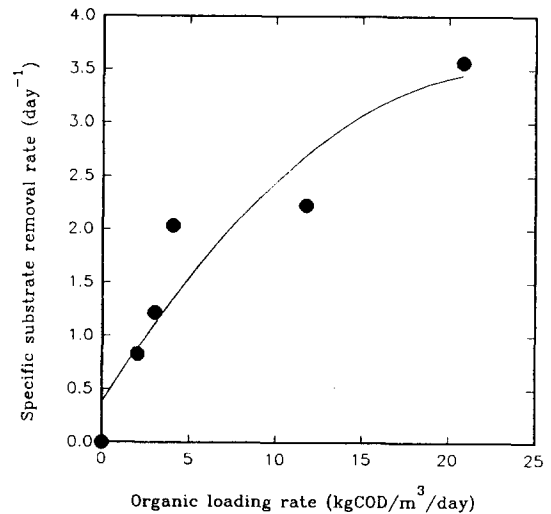


Fig. 7. Effect of organic loading rate on the specific substrate removal rate at steady state.

이 강해졌을 뿐만 아니라, 사상성 미생물의 급작스러운 출현으로 인하여 별킹 현상이 발생하더라도 media에 미생물이 부착되어 있으므로 슬러지 부상현상이 발생하지 않아 계속적으로 운전할 수 있었기 때문인 것으로 판단되었다. 그러나 역 유동층 생물막 반응기에서도 F/M 비가 4.5kgCOD/

kgTVS/day 이상으로 증가하면 사상성 미생물의 영향으로 bioparticle이 유출수 중에 포함되어 유출되는 현상이 발생하므로(김 등, 1994b) 지나친 F/M 비의 증가는 생물막 공정에도 상당한 영향을 미침을 알 수 있었다. 그러므로 본 실험범위에서 반응기를 안정적으로 운전하기 위해서는 F/M 비를 3kgCOD/kgTVS/day 이하로 유지시키는 것이 유리하였다.

Fig. 7은 유기물 부하율의 변화에 따른 비기질 제거속도(specific substrate removal rate)의 변화를 나타낸 것으로, 본 실험의 범위에서는 유기물 부하율을 증가시키에 따라 비기질 제거속도가 계속적으로 증가하는 것으로 미루어 보아 1차반응영역임을 알 수 있었으며, 김 [1994]이 역 유동층 생물막 반응기를 이용하여 유기물의 농도를 증가시키면서 유기물 부하율을 증가시킨 경우에 유기물 부하율이 10kgCOD/m³/day 이상에서는 비기질 제거속도가 0차 반응영역으로 표현되었다고 보고한 결과와 비교해 보면 유기물의 제거에 있어 수리학적 부하를 변동시키는 것이 농도부하를 변동시키는 것보다 유기물의 처리에 있어 효과적이라는 것을 간접적이라는 것을 알 수 있었다. 이는 계속적으로 탈리된 biomass가 반응기 외부로 빠르게 유출됨으로써 슬러지의 일령을 짧게 유지함과 동시에 생물막의 두께도 비교적 얇게 유지됨으로써 생물막에 물질전달의 저항도 적게 작용하였기 때문인 것으로 판단되었다.

4. 결 론

역 유동층 생물막 반응기에서 수리학적 부하변동에 의한 유기물 부하율의 변동이 생물막 성장에 미치는 영향을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수리학적 부하에서 SCOD의 처리효율은 90% 정도의 높은 처리 효율을 보였고 유출수의 변화도 그다지 크게 나타나지 않았으나, TCOD의 경우에는 HRT가 감소함에 따라 유출되는 biomass 농도가 증가함으로써 처리효율은 50% 이하로 감소

하여 침전조의 필요성을 시사해 주었다.

2. 수리학적 체류시간을 1시간 이하로, 즉, 유기물 부하율과 F/M비로 각각 20 kgCOD/m³/day와 4.5 kgCOD/kgVSS/day 이상으로 유지한 경우에는 사상성 미생물이 급격히 증가하여 bioparticle이 반응기 외부로 유출됨으로써 반응기의 운전이 불가능하였다.

3. 수리학적 부하를 통하여 형성된 bioparticle의 형태는 그 모양이 매끄럽고 생물막 건조밀도가 비교적 높은 생물막을 얻을 수 있었으며, 본 실험에서 구한 최대 생물막 두께는 200 μm이며, 최대 생물막 건조밀도는 0.08 g/cm³이었다.

4. 유기물 부하율에 따른 비기질제거속도는 생물막 두께가 비교적 얇게 유지됨으로써 전체 반응을 1차로 간주할 수 있었다.

참고문헌

- 김동석, 서봉국, 이민규, 송승구, 1993(a), 역 유동층의 동역학적 특성 연구, 화학공학, 31(5), 563-568.
- 김동석, 최윤찬, 송승구, 1993(b), 미생물 부착을 촉진시키는 입자의 제조, 특허, 93-19912.
- 김동석, 윤준영, 최윤찬, 박경기, 송승구, 1994(a), 역 유동층 생물막 반응기에서 액체순환속도가 생물막에 미치는 영향, 한국환경과학회지, 3(1), 49-56.
- 김동석, 박영식, 윤준영, 송승구, 1994(b), 역 유동층 생물막 반응기에서 형성되는 저밀도 bioparticle의 자유부상특성, 대한환경공학회지, 16(7), 877-884.
- 김동석, 1994, 유기성 폐수처리를 위한 역 유동층 생물막 반응기의 연구, 박사학위논문, 부산대학교.
- Bailey, J. E. and D. F. Ollis, 1986, Biochemical Engineering Fundamentals, McGraw-Hill, 2nd Ed., 482.
- Denac, M. and I. J. Dunn, 1988, Packed-and Fluidized-Bed Biofilm Reactor Perfor-

- mance for Anaerobic Wastewater Treatment, *Biotechnol. Bioeng.*, 32, 159-173.
- Diaz, C. V. and J. A. Howell, 1988, Downflow Fixed Film Anaerobic Reactors Stability Studies under Organic and Hydraulic Overloading at Different Working Volume, *Wat. Res.*, 22(5), 529-536.
- Flemming, H. C., 1993, Biofilms and Environmental Protection, *Wat. Sci. Tech.*, 27(7/8), 1-10.
- Robinson, J. A., M. G. Trulear, and William G. Characklis, 1984, Cellular Reproduction and Extracellular Polymer Formation by *Pseudomonas aeruginosa* in Continuous Culture, *Biotechnol. Bioeng.*, 26, 1409-1417.
- Nikolov, L. and D. Karamanev, 1987, The Inverse Fluidized Bed Biofilm Reactor : A New Laboratory Scale Apparatus for Biofilm Research, *J. Ferment. Bioeng.*, 69(4), 265-267.
- Ramsay, B. A., D. Wang, C. Chavarie, D. Rouleau, J. A. Ramsay, 1991, Penicillin Production in an Inverse Fluidized Bed Bioreactor, *J. Ferment. Bioeng.*, 72(6), 495- 497.
- Ro, K. S. and J. B. Neething, 1990, Terminal Settling Characteristics of Bioparticles, *J. WPCF*, 62(7), 901-906.
- Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water, 1988, 17th Ed, APHA, AWWA, WPCF, Washington D.C.
- Trulear, M. G. and W. G. Charakis, 1982, Dynamics of biofilm processes, *J. WPCF*, 54(9), 1288-1301.