

역 유동층 생물막 반응기에서 액체순환속도가 생물막에 미치는 영향

김동석 · 윤준영 · 최윤찬 · 박경기* · 송승구

부산대학교 공과대학 화학공학과

*우성화학 주식회사

(1994년 2월 9일 접수)

Effect of the Liquid Circulation Velocity on the Biofilm Development in an IFBBR

Dong-Seog Kim, Joon-Young Yoon, Yoon-Chan Choi,
Kyung-Kee Park* and Seung-Koo Song

Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Pusan National Univ., Pusan 609-735, Korea

**Woo Sung Chemical Industrial Co., Pusan*

(Manuscript received 9 February 1994)

Abstract

Effect of the liquid circulation velocity on the biofilm development was investigated in an inverse fluidized bed biofilm reactor(IFBBR). To observe the effect of the influent COD concentration on biofilm simultaneously, the influent COD value was adjusted to 1000mg/ℓ for 1st reactor, and 2500mg/ℓ for 2nd reactor. The liquid circulation velocity was adjusted by controlling the initial liquid height.

As the liquid circulation velocity was decreased, the settling amount of biomass was increased and the amount of effluent biomass was decreased. Since the friction of liquid was decreased by the decrease of liquid circulation velocity, the biofilm thickness was increased and the biofilm dry density was decreased. In the 1st reactor, the SCOD removal efficiency was constant regardless of the variation of the liquid circulation velocity, but it was increased by the decrease of the liquid circulation velocity because of more biomass population in 2nd reactor.

Key Words : inverse fluidized bed biofilm reactor, IFBBR, liquid circulation velocity, initial liquid height, biofilm, shear stress

1. 서론

생물막 공정은, 부유하여 성장하는 미생물을 이용하는 활성슬러지 공정에 비해, 부착방법에 따라

높은 biomass 농도가 유지되므로 단위 체적당 유기물 제거율이 높고, 체류시간을 짧게 유지할 수 있으나(Rittmann,1982), media의 공극이 생물막의 성장에 의해 폐쇄되어 과도한 수두손실과 유체의 편류현상이 발생하는 단점이 있다.

그러므로 고정층 생물막 반응기에서 발생하기 쉬운 입자내 공극의 폐쇄 현상뿐만 아니라, 생물막의 증가에 따른 기질 및 산소의 확산제한 등의 문제점을 동시에 해결하기 위하여, biomass가 부착된 media를 유동시키는 방법이 많이 사용된다 (Shieh *et al.*, 1982). Gorris *et al.*(1989)은 실험실 규모의 혐기성 유동층 반응기에서 수력학적 체류 시간, 모래(media)의 양 및 공탑상향유속이 생물막의 전개에 미치는 영향을 살펴 보았고, Chang *et al.*(1991)은 액체의 전단응력, 생물막의 밀도와 두께, media의 양 및 유체의 난류특성이 생물막 탈착속도에 미치는 영향을 유동층 생물막 반응기에서 관찰하여, 생물막 탈착에 대한 mechanism을 규명하였다.

역 유동층 생물막 반응기(김동석 외, 1993)는 draft tube를 통한 공기의 공급으로 액체의 흐름을 유발시켜, annular tube 영역에서 유체를 하향으로 흐르게 하여 bioparticle을 팽창시킨다. 생물막이 과도하게 성장하여 밀도가 커진 bioparticle은 annular tube 밑으로 내려와 draft tube 속으로 빨려 들어가면서, 기포와의 직접적인 접촉에 의해 미생물이 탈착되므로 일정한 생물막 두께로 유지될 수 있다. 이렇게 역 유동층 반응기는 액체순환속도의 전단응력에 대한 영향뿐만 아니라, draft tube내에서 기포와의 마찰에 의해 생물막이 상당히 탈착되므로, 액체순환속도가 생물막에 미치는 영향은 상대적으로 크다.

그러므로, 본 연구에서는 역 유동층 생물막 반응기에서 액체의 순환속도를 변화시킴으로써, 이에 따른 생물막두께, 생물막 건조밀도 및 유기물 처리효율 등의 변화를 조사하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 합성폐수 및 미생물

실험에 사용된 폐수는 glucose를 주 탄소원으로, urea를 주 질소원으로 사용하여 Table 1과 같은 조성으로 제조하였으며(김동석 외, 1991), 첫번

째 반응기(R1)에서는 유입되는 COD를 1000mg/ℓ, 두번째 반응기(R2)에서는 2500mg/ℓ로 일정하게 유지시켜 실험하였다. 활성슬러지 공정에서 발생하는 반송슬러지를 본 실험실의 유동층 반응기에서 합성폐수에 15일 이상 순화시켜, 역 유동층 생물막 반응기의 media에 부착시켜 생물막을 형성시켰다.

Table 1. The Composition of the Synthetic Wastewater

(Based on COD_{Cr} = 2500mg/L)

Component	Concentration (g/L)
Peptone	6
Na ₂ HPO ₄	1
Glucose	4
KCl	0.14
Urea	1
CaCl ₂	0.14
NaCl	0.3
MgSO ₄	0.1

2.2 Media

역 유동층 생물막 반응기에서 사용되는 media는 물보다 가볍고 생물막이 쉽게 형성될 수 있는 표면을 가져야 하므로, 본 실험에서는 styrofoam (expanded polystyrene) 입자에 perlite를 도포시켜 사용하였다(특허, 1993).

2.3 실험장치

실험에 사용된 역 유동층 생물막 반응기는 Fig. 1과 같고, 반응기의 상세한 내역과 입자특성 및 실험조건 등을 Table 2에 나타내었다. 폐수는 반응기 상부로 공급되었으며, 처리수는 반응기 하부에서 연속적으로 유출되도록 하였다(Kim과 Song, 1993).

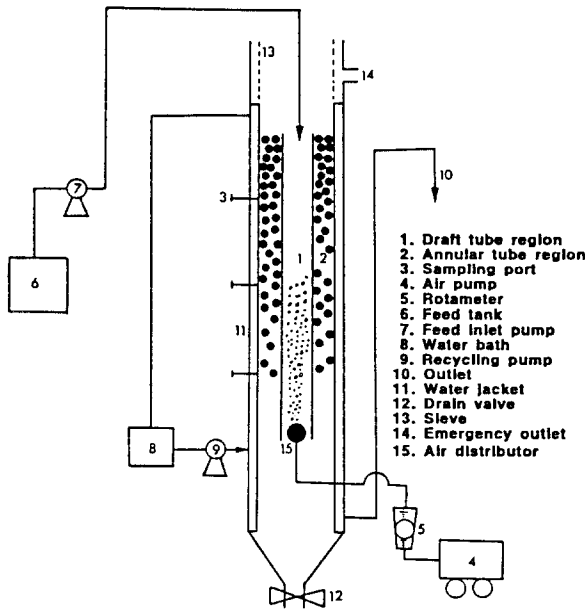


Fig. 1. Schematic diagram of an IFBBR.

Table 2. Specifications of operation, reactor and media

	Reactor number	
	R1	R2
Reactor volume (ℓ)	5	5
Annular tube height (cm)	100	100
Annular tube diameter (cm)	8	8
Draft tube height (cm)	90	90
Draft tube diameter (cm)	4.6	3
Temperature (°C)	22	22
Styrofoam density (g/cm ³)	0.13	0.13
Styrofoam diameter (μm)	903	903
Influent COD concentration (mg/ℓ)	1000	2500
HRT (h)	5	5

2.4 연속실험

두 반응기(R1, R2)의 온도는 22±1℃, 수력학적 체류시간(HRT)은 5시간으로 하고, R1의 공기유량은 6ℓ/min, R2는 4ℓ/min으로 고정된 상태에서, 각 반응기의 초기수위를 Table 3과 같이 변화시켜, 반응기 내의 액체순환속도를 직접유량측정장치(김동석 외, 1993)를 사용하여 측정하였다.

2.5 분석 및 측정방법

본 실험의 모든 시료분석방법은 Standard Methods(1985)를 기준으로 하여 행하였고, 반응기 내 용존산소는 DO-meter(YSI G05514-00)를 사용하여 annular tube 영역의 50cm 지점에서 측정되었다.

반응기 하부로부터 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, biomass 농도를 Standard Methods(1985)에 의해 측정하였다. 이 때 측정된 값에 NaOH 회석비용을 곱하여 biomass 농도로 결정하였다. 측정 후 media는 105℃에서 건조시켜 무게를 측정 후 폐기시켰고, 폐기시킨 media 양만큼 새로운 media를 반응기에 투입하여 반응기 내 전체 media의 양은 변함이 없도록 하였다.

Bioparticle의 직경은 현미경(Nikon Labophot-2A 40X)에 부착된 눈금자를 이용하여 50개 이상 직접 측정하고, 이를 평균하여 구하였다.

역 유동층 생물막 반응기에서 styrofoam을 media로 하여 형성되는 bioparticle은 거의 구형에 가까우나(김동석 외, 1994), 실험의 정밀성을 높이기 위

Table 3. The variance of the liquid circulation velocity on the initial liquid height

	R1-1	R1-2	R1-3	R1-4	R2-1	R2-2	R2-3	R2-4
Air flow rate (L/min)	6	6	6	6	4	4	4	4
Initial liquid height (cm)	82	79	77	75	80	78	76	74
Liquid circulation velocity (cm/sec)	7.4	6.7	6.2	5.7	5.83	5.33	4.83	4.33

하여 bioparticle을 타원형으로 가정하여, bioparticle의 직경을 volume-equivalent(등가부피) 직경으로 전환하였다.

$$d = \sqrt{(b_i a_i^2)} \quad (1)$$

여기서, a_i 는 짧은 직경이고 b_i 는 긴 직경이다.

평균 입자 직경은 50개 이상의 등가부피직경을 측정하여 Sauter mean diameter(Bailey와 Ollis, 1986)로 구하였다. Bioparticle은 크게 생물막과 media로 구성되어 있으므로, 평균 생물막 두께(δ)는 식(2)과 같은 방법으로 계산할 수 있다.

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

여기서, d_p 는 bioparticle의 평균직경이고 d_m 은 media의 평균직경이다.

생물막 건조밀도(biofilm dry density), ρ_{bd} 는 생물막의 부피에 대한 건조무게의 비로 정의되며, 미생물이 부착되지 않았을 때의 입자(styrofoam)에 대한 bioparticle의 크기 비(γ)와 초기입자질량에 대한 부착된 생물막의 질량비(X)에 의해 표현될 수 있다(Ro와 Neething, 1990).

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

여기서, ρ_m 은 media의 밀도이다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2(a)는 약 70일 동안 반응기 R1에서, 유입되는 합성폐수의 COD 농도를 1000mg/l, 공기유량을 6 l/min, HRT를 5시간으로 일정하게 유지한 상태에서 초기수위를 82, 79, 77, 75cm로 낮추어, 액체순환속도를 7.4, 6.7, 6.2, 5.7cm/sec로 감소시키면서, 유출수의 COD를 관찰한 결과를 나타낸 그림으로서, 유출수의 SCOD는 액체순환속도의 변화에 관계없이 거의 일정하게 50mg/l 정도로 나타났다.

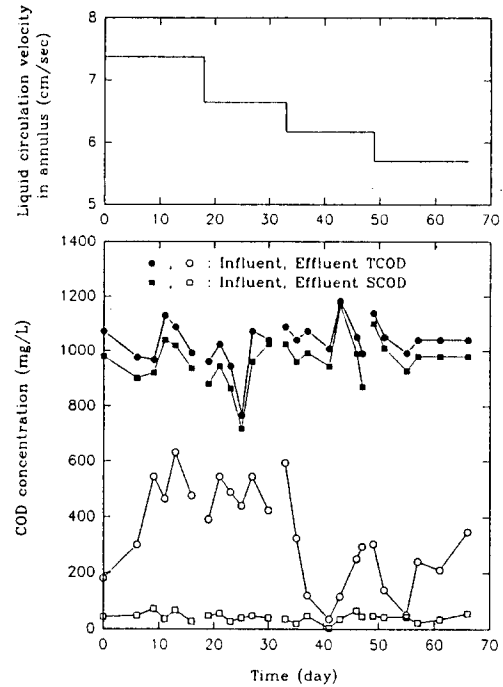


Fig. 2(a). The variance of COD concentration on time in R1 reactor.

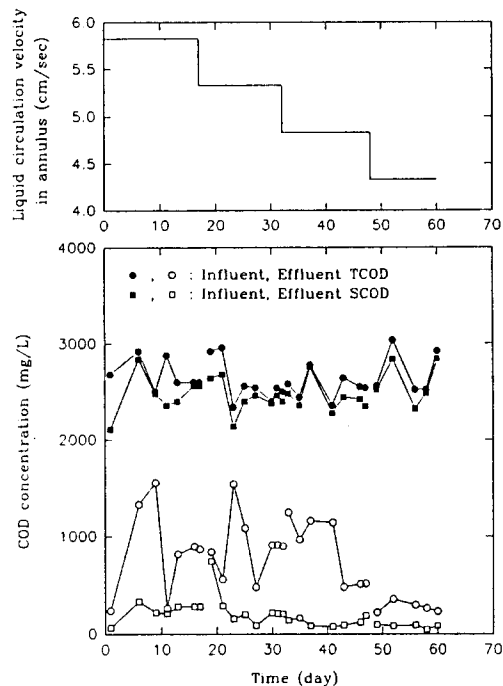


Fig. 2(b) The variance of COD concentration on time in R2 reactor.

그러나 유출되는 TCOD는 액체순환속도의 변화에 따라 상당한 차이를 나타내었는데, 액체순환속도가 7.4cm/sec와 6.7cm/sec로 비교적 빠를 때에는 액체순환속도의 전단응력으로 인하여, 생물막으로부터 biomass가 많이 탈착하여 유출수 중에 포함됨으로써, 유출수의 TCOD가 높았으나, 액체순환속도를 6.2cm/sec와 5.7cm/sec로 낮추었을 때에는, 전단응력의 감소로 biomass의 탈착이 감소하여 유출수의 TCOD는 감소하였다.

유입되는 합성폐수의 COD 농도를 2500mg/ℓ, 공기유량을 4 ℓ/min으로 일정하게 유지한 R2(Fig. 2(b))에서는 R1과 마찬가지로 액체순환속도를 감소시킴에 따라 유출되는 biomass의 양이 줄어들어 유출되는 TCOD는 감소하였고, SCOD의 경우는 액체순환속도를 낮추어 줌에 따라 반응기 내의 biomass 농도가 증가하고 유기물 처리도 증가하여, 액체순환속도 4.33cm/sec에서 유출되는 SCOD는 최소값 80mg/ℓ로 나타났다.

정상상태에서 액체순환속도의 변화에 따른 생물막 두께와 생물막 건조밀도의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 액체순환속도를 감소시킴에 따라 bioparticle에 주어지는 전단응력이 감소하여 생물막의 두께는 증가하였고, 생물막의 두께가 증가함에 따라 생물막 건조밀도는 감소하였다. 또한, 저농도의 합성폐수가 유입되는 R1에 비해 고농도의 R2에서 액체순환속도의 감소 폭에 대한 생물막의 증가 폭과 생물막 건조밀도의 감소 폭의 비가 증가하였다. 이는 고농도의 유기물이 유입됨에 따라 미생물의 대사활동이 활발하였기 때문에 많은 미생물이 증식한 것으로 생각되었다.

Fig. 4는 액체순환속도의 변화에 따라 bioparticle의 직경과 층 공극률과의 관계를 R1과 R2에서 비교하여 나타낸 그림으로써, 액체순환속도의 감소에 따라 생물막 두께가 증가하여(Fig. 3) bioparticle의 직경이 증가하고, bioparticle의 직경이 증가됨에 따라 층 공극률은 감소하였다. COD 2500mg/ℓ의 합성폐수가 유입되는 반응기 R2의 층 공극률은 COD 1000mg/ℓ의 R1보다 높게 나타났는데, 이는 높은 유기물의 공급으로 인한 생물막 두께의 증가에 기인하는 것으로 사료되었다.

반응기 R1과 R2에서 액체순환속도의 변화에 따른

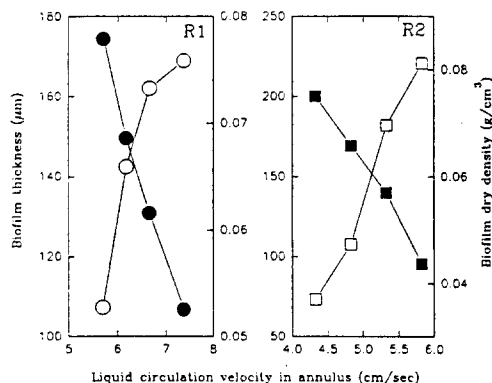


Fig. 3. Effect of the liquid circulation velocity on the biofilm thickness (● ■) and the biofilm dry density (○ □).

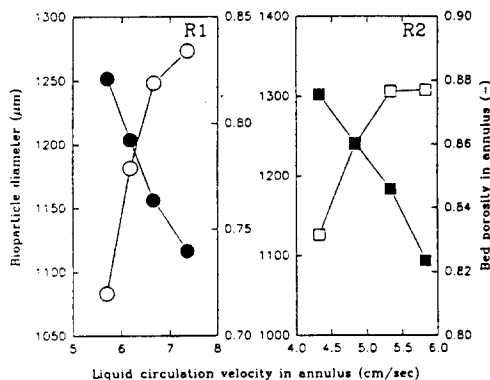


Fig. 4. Effect of the liquid circulation velocity on the bioparticle diameter (● ■) and the bed porosity in annulus (○ □).

유출수 중의 biomass 농도와 반응기 내의 biomass 농도 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 액체순환속도를 감소시킴에 따라 입자에 주어지는 전단응력의 감소로 말미암아 유출되는 biomass 농도는 감소하였는데 비해, 반응기 내의 biomass 농도는 생물막 두께의 증가로 인하여 선형적인 증가를 보였다.

Fig. 6은 반응기내 biomass 농도의 변화와 용존산소의 변화를 액체순환속도의 변화에 따라 나타낸 것으로, 액체순환속도를 감소시킴에 따라 반응

기내 biomass 농도는 증가하였고(Fig. 5) 용존산소는 감소하였다. 반응기 내 용존산소의 감소는 크게 미생물에 의한 소비와 총괄산소전달계수, K_{La} 의 감소로 대별할 수 있다.

역 유동층에서 초기 수위를 draft tube 이하로 낮추어 줌으로써 액체순환속도를 변화시킬 수 있고, 이 때의 총괄산소전달계수, K_{La} 는 거의 액체순환속도에 관계없이 일정하게 나타났다(Kim *et al.*, 1994). 그러므로 Fig. 6에서 액체순환속도의 감소에 따라 용존산소가 감소한 것은 액체순환속도의 감소에 따른 총괄산소전달계수, K_{La} 의 변화라기 보다는 biomass의 증가에 따른 산소소비량의 증가에 기인한 것으로 판단되었다.

공기유량이 6 l/min인 R1에서 용존산소의 범위는 7.3mg/l - 6.4mg/l로 나타났고, 공기유량이 4 l/min인 R2에서는 5mg/l - 2.6mg/l로 R1에 비해 낮게 나타났으나, 충분히 호기성 상태를 지속시킬 수 있는 용존산소농도를 유지하였다.

Fig. 7은 생물막 두께의 변화에 따른 생물막 건조밀도와 생물막 건조무게의 변화를 나타낸 그림으로써, 생물막 두께가 증가함에 따라 생물막 건조무게는 증가하였으나, 생물막 건조무게의 증가에 비해 생물막 두께의 증가가 크게 나타남으로써 생물막 건조밀도는 감소하였다.

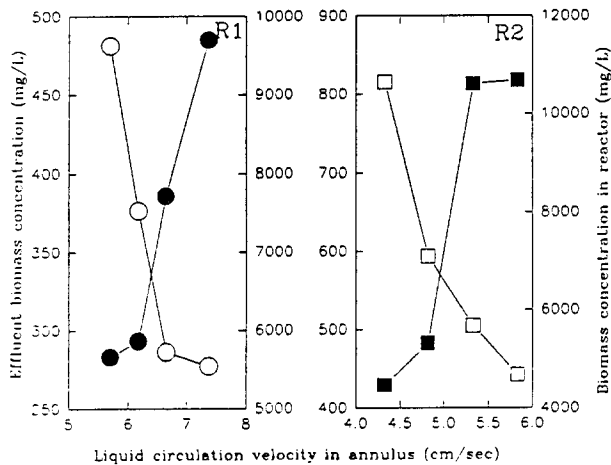


Fig. 5. Effect of the liquid circulation velocity on the effluent biomass concentration (● ■) and the biomass concentration in the reactor (○ □).

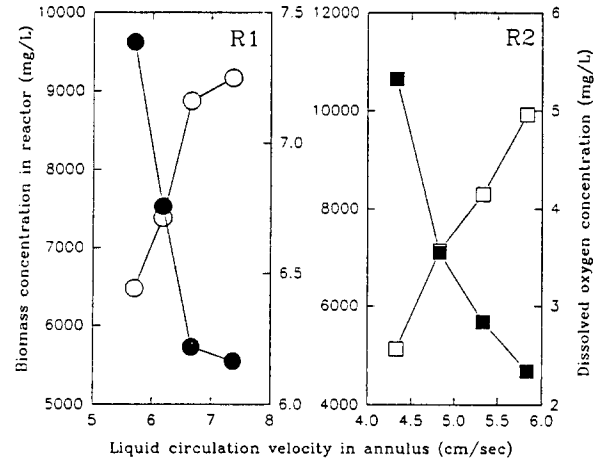


Fig. 6. Effect of the liquid circulation velocity on the biomass concentration (● ■) and the dissolved oxygen concentration (○ □).

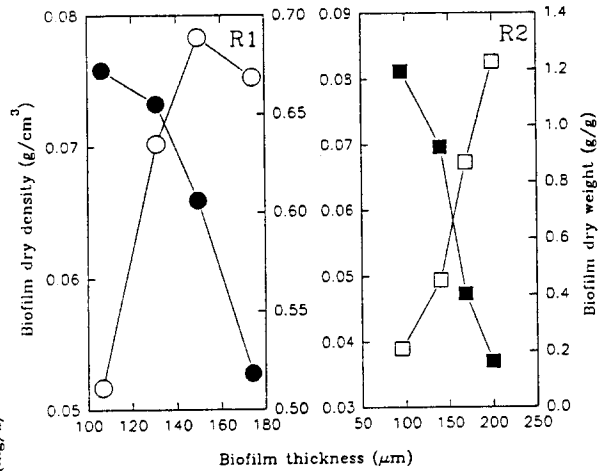


Fig. 7. Effect of the biofilm thickness on the biofilm dry density (● ■) and the biofilm dry weight (○ □).

Fan *et al.*(1987)은 폐놀 처리를 위한 3상 유동층 반응기에서, 생물막 두께가 25μm 이상에서는 생물막 두께가 증가함에 따라 생물막 건조무게가 증가함에도 불구하고 생물막 건조밀도는 선형적으로 감소하였다고 보고하였으며, Kim과 Song(1993)은 역 유동층 생물막 반응기에서 styrofoam 입자에 생물막을 형성시켜 유기물 부하변동에 따라 생물막의 변화상태를 관찰하였는데, 60μm의 생물막 두께 이하에서는 생물막 건조밀도가 급격하게 증

가하였고, 그 이후에는 생물막 건조밀도의 완만한 감소를 보였다고 발표한 바 있다.

반응기 R2에서는 높은 농도의 유기물 공급으로 인하여 생물막 건조무게도 0.2-1.2g/g으로 나타나, 0.5-0.7g/g의 생물막 건조무게 변화를 나타낸 R1에 비해 생물막 건조무게의 변화가 크게 나타났다.

액체순환속도의 변화에 따른 TCOD와 SCOD 처리효율을 반응기 R1과 R2에서 서로 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. SCOD의 처리효율적인 측면을 살펴보면, R1에서는 일정한 유기물 농도의 공급에 따라 biomass의 발생량이 일정하였으나, 액체순환속도의 감소에 따라 bioparticle에 주어지는 액체의 전단응력이 감소하여 media에 부착되는 biomass 양이 증가하게 되어 반응기 내의 biomass 농도는 증가하였으나, 유출수 중의 SCOD는 전 범위에서 평균 50mg/ℓ로 본 실험의 HRT에서 최저의 유출 SCOD 농도를 나타내어, SCOD 처리효율은 거의 변함없이 95%의 처리효율을 나타내었다. R1에 비해 유기물 농도가 높은 R2에서는 액체순환속도를 감소시키기에 따라 반응기 내 biomass 농도가 증가하여(Fig. 6) 유출되는 SCOD 농도는 80mg/ℓ로 감소하여 SCOD 처리효율은 90%에서 96%의 변화를 나타내었다. 액체순환속도를 감소시키기에 따라 액체순환속도에 의해 입자에 주어지

는 전단응력이 줄어들어 유출되는 biomass 양이 감소하여(Fig. 5) TCOD 처리효율은 증가하였다. R1에서는 50%에서 73%로 COD 처리효율이 증가하였고, R2에서는 65%에서 87%의 COD 처리효율의 증가를 보였다. 또한, R1과 R2 모두에서 액체순환속도의 감소에 따른 TCOD 효율의 증가는 SCOD의 유기물 제거율의 변화에 의한 것이라기 보다는 유출되는 biomass 양이 media에 부착되는 biomass로 전환되어 유출수중의 biomass 농도가 감소하였기 때문이다.

낮은 액체순환속도에서, 지나치게 두꺼운 생물막이 형성되어 있을 경우에는, 생물막내의 기질 확산저항으로 인해 기질제거속도가 감소하므로, 이 때는 액체속도를 높일수록 기질제거속도를 증가시킬 수 있었으나(Characklis, 1981), 본 실험의 전 범위에서 생물막 두께는 200μm 이하로 생물막내의 기질확산저항은 무시할 수 있으므로(Hoehn과 Ray, 1973), 액체순환속도를 감소시키는 것이 COD의 처리효율을 증가시키는 데 유리하였다.

4. 결 론

역 유동층 생물막 반응기에서 초기 수위의 변화에 의해 액체순환속도를 감소시키면서 생물막의 변화, biomass의 탈착 및 COD 처리효율을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 액체순환속도를 감소시키기에 따라 유출수 중의 biomass 양은 감소하였다.
2. 액체순환속도의 감소는 bioparticle에 주어지는 전단응력을 감소시켜 생물막 두께는 선형적으로 증가하였고 생물막 건조밀도는 이에 따라 감소하였다.
3. 액체순환속도를 감소시키기에 따라 유출수 중의 biomass 농도가 감소하여 TCOD의 처리효율은 증가하였고, 저농도의 합성폐수가 유입될 때의 SCOD 처리효율은 액체순환속도의 감소에 영향을 받지 않았으나, 고농도에서는 액체순환속도를 감소시키기에 따라 반응기 내 biomass의 증가로 인하여 SCOD 처리효율은 90%에서 96%의 증가를 보였다.

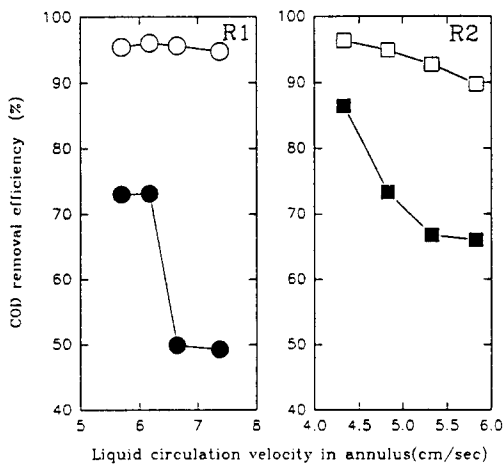


Fig. 8. Effect of the liquid circulation velocity in annulus on TCOD(● ■) and SCOD(○ □) removal efficiency.

참고문헌

- 김동석, 안갑환, 서명교, 박태주, 송승구, 1991, 생물막 유동층 반응기에서 고농도 합성 폐수의 처리효율과 미생물 성장, 화학공학, 29, 4, 448-456.
- 김동석, 안갑환, 이민규, 송승구, 1991, 생물막 유동층 반응기에서 미생물 성장에 따른 속도론적 고찰, 한국생물공학회지, 6, 2, 115-121.
- 김동석, 서봉국, 이민규, 송승구, 1993, 역 유동층의 동역학적 특성 연구, 화학공학, 31, 5, 563-568 .
- 김동석, 최윤찬, 송승구, 1993, 미생물 부착을 촉진시키는 입자의 제조방법, 특허 93-19912.
- 김동석, 윤준영, 박영식, 송승구, 1994, 역 유동층 생물막 반응기에서 형성되는 저밀도 bio-particle의 자유부상특성, 심사중.
- APHA, AWWA and WPCF, 1985, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 16th Ed.
- Bailey, J.E. and D.F. Ollis, 1986, Biochemical Engineering Fundamentals, McGraw-Hill, 482.
- Chang, H.T. and B.E. Rittmann, 1988, Comparative Study of Biofilm Shear Loss on Different Adsorptive Media, J. WPCF, 60, 3, 362-368.
- Chang, H.T., B.E. Rittmann, D. Amar, R. Heim, O. Ehlinger and Y. Lesty, 1991, Biofilm Detachment Mechanisms in a Liquid-Fluidized Bed, Biotechnol. Bioeng., 38, 499-506.
- Characklis, W.G., 1981, BIOENGINEERING REPORT Fouling Biofilm Development: A process Analysis, Biotechnol. Bioeng., 23, 1923-1960.
- Characklis, W.G. and K.C. Marshall, 1990, Biofilms, JOHN WILEY & SONS, INC., 112.
- Fan, L.S., K. Fujie, T.R. Long and W.T. Tang, 1987, Characteristics of Draft Tube Gas-Liquid-Solid Fluidized Bed Bioreactor with Immobilized Living Cells for Phenol Degradation, Biotechnol. Bioeng., 30, 498-504.
- Gorris, L.G.M., J.M.A. van Deursen, C. van der Drift and G.D. Vogel, 1989, Biofilm Development in Laboratory Methanogenic Fluidized Bed Reactors, Biotechnol. Bioeng., 33, 687-693.
- Hoehn, R.C. and A.D. Ray, 1973, Effect of thickness on bacterial film, J. WPCF, 45, 11, 2302-2320.
- Kim, D.S. and S.K. Song, 1993, Dynamic Characteristics in IFBBR and Its Application to Wastewater Treatment, The 5th International Energy Conference, Environmental Control and Waste Recycling, Seoul, Korea, Vol. 5, October, 313-320.
- Kim, D.S. , T.J. Park and S.K. Song, 1994, A Study on Volumetric Mass Transfer Coefficient of Oxygen in an Inverse Fluidized Bed Biofilm Reactor, Biotechnol. Bioeng., Submitted.
- Rittmann, B.E., 1982, Comparative Performance of Biofilm Reactor Types, Biotechnol. Bioeng., 24, 1341-1370.
- Ro, K.S. and J.B. Neething, 1990, Terminal Settling Characteristics of Bioparticles, Water Res., 21, 4, 451-458.
- Shieh, W.K., L.T. Mulcahy and E.J. LaMotta, 1982, Enzyme Microb. Technol. 4, 269-275.
- Speitel, G.E. and F.A. DiGiano, 1987, Biofilm Shearing under Dynamic Conditions, J. Environ. Eng. ASCE, 113, 464-475.
- Stewart, P.S., 1993, A Model of Biofilm Detachment, Biotechnol. Bioeng. 41, 111-117.
- Trulear, M.G. and W.G. Characklis, 1982, Dynamics of Biofilm Processes, J. WPCF, 54, 9, 1288-1301.