

## 역 유동층 생물막 반응기에서의 생물막 탈착에 관한 연구

김동석 · 박영식 · 박동근\* · 송승구

부산대학교 화학공학과, \*동서공과대학 환경공학과  
(1994년 4월 8일 접수)

## A Study on Biofilm Detachment in an IFBRR

Dong-Seog Kim, Young-Seek Park, Dong-Keun Park\*, and  
Seung-Koo Song

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

\*Dept. of Environ. Eng., Dong Seo Univ., Pusan, 616-716, Korea

(Manuscript received 8 April 1994)

### Abstract

A detachment of biofilm was investigated in an inverse fluidized bed biofilm reactor(IFBRR). The biofilm thickness,  $\delta$  and the bioparticle density,  $\rho_{pd}$  were decreased by the increase of Reynolds number,  $Re$  and the decrease of biomass concentration,  $b_c$ . The correlations were expressed as  $\delta=61.6+16.33b_c-0.04Re$  and  $\rho_{pd}=0.3+0.027b_c-2.93\times 10^{-5}Re$  by multiple linear regression analysis method. Specific substrate removal rate,  $q$  was derived by  $F/M$  ratio and biofilm thickness as  $q=0.44+0.82F/M-5.1\times 10^{-4}\delta$ . Specific biofilm detachment rate,  $b_{ds}$  was influenced by  $F/M$  ratio and Reynolds number as  $b_{ds}=-0.26+0.26F/M+2.17\times 10^{-4}Re$ . Specific biofilm deachment rate in an IFBRR was higher than that in a FBRR(fluidized bed biofilm reactor) because of the friction between air bubble and the bioparticles.

Key Words : biofilm detachment mechanism, inverse fluidized bed biofilm reactor, shear stress, liquid circulation velocity

### 1. 서 론

생물막 공정은 부유상태로 성장하는 미생물을 이용하는 공정에 비하여, 미생물이 고체 표면에 부착되어 미생물 군집(micro-consocium)(Fleming, 1993)을 형성함으로써, 외부로부터의 수력학적 부하 변동이나 충격 부하(shock loading) 등에 강할 뿐만 아니라 반응기내 미생물 농도를 높게 유지할 수 있는 장점이 있어, 많은 연구의 대상이 되고 있다(Heijnen *et al.*, 1993; 김동석 외 4인, 1991).

이러한 생물막의 형성과정을 Trulgar과 Characklis(1982)는 다음과 같은 물리적, 화학적, 생물학적 공정의 복합적인 결과라고 설명하고 있다. 1)유기물질의 입자 표면으로의 전달과 흡착, 2)입자표면으로의 미생물 전달, 3)입자 표면에서의 미생물 부착, 4)입자표면에서 미생물의 성장과 부산물(exopolymer) 분비에 의한 생물막의 형성, 5)유체의 전단력에 의한 생물막의 부분적 탈착. 특히, 이 5가지 단계 중에서 생물막의 탈착은 유체의 전단력에 많이 의존한다.

생물막이 고정되어 있는 고정 생물막 반응기(fixed-film reactor, FFR)에 비해 생물막을 유동시키는 유동층 생물막 반응기(fluidized bed biofilm reactor, FBBR) 또는 역 유동층 생물막 반응기(inverse fluidized bed biofilm reactor, IFBBR)에서는 유체의 전단력에 의한 생물막의 탈착이나 biomass의 유실은 반응기의 설계와 운전을 고려할 때 중요한 인자로 인식된다. 그럼에도 불구하고 생물막의 탈착이나 biomass의 유실에 관한 기본적인 고찰과 액체 전단력에 의한 생물막 탈착을 수학적으로 해석한 연구는 그다지 많지 않았다.

생물막 탈착속도는 유체 흐름의 동역학적인 인자, 생물막 형태 및 media의 특성 등의 복합적인 영향을 받는 것으로 알려져 있으며(Chang *et al.*, 1991), 비교적 많이 사용되고 있는 생물막 탈착모델은 생물막 탈착속도가 생물막 무게와 두께에 1차적으로 비례한다는 가정하에서 이루어졌다(Stewart, 1993).

Speitel과 DiGiano(1987)는 입상 활성탄(GAC)이 층진된 원형관에서 미생물의 비중식속도의 변화에 따른 비전단속도를 측정하여, 이에 대한 수학적 모델을 제시하였고, Stewart(1993)는 통상적으로 많이 사용되고 있는 여러 연구자들의 경험적인 생물막 탈착속도로부터 이론적인 모델을 제시한 바 있다.

역 유동층 생물막 반응기(IFBBR)는 draft tube

내로 직접적인 공기의 공급이 있으므로, annular tube 영역에서의 유체에 의한 전단응력뿐만 아니라 draft tube 영역에서 공기와의 마찰에 의해서도 많은 생물막의 탈착이 형성되므로, 기존 유동층 생물막 반응기나 고정층 생물막 반응기에서 사용하였던 수학적 모델의 적용은 곤란하였다.

본 논문에서는 역 유동층 생물막 반응기에서 유체의 난류특성과 유기물의 농도가 생물막 탈착속도에 미치는 영향을 관찰하고, 이에 대한 수학적 모델을 개발하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 실험장치와 실험조건

역 유동층 생물막 반응기(Kim과 Song, 1993)는, draft tube를 통한 공기의 공급으로 액체의 순환이 발생하는, 변형된 air-lift 반응기의 형태이며, 실험에 사용된 반응기들과 media의 내역을 Table 1에 기술하였다.

본 실험에서 사용한 media는 styrofoam (expanded polystyrene; EPS) 입자에 진주암(perlite)을 도포시켜 미생물이 잘 부착되도록 한 것이다. 폐수는 반응기 상부에서 유입시켰고, 처리수는 반응기 하부에서 연속적으로 유출시켰다.

Table 1. Specification of reactor and media in IFBBR(R1,R2,R3) and a FBBR(R4).

	IFBBR			FBBR
	R1	R2	R3*	R4**
Reactor volume (L)	5	5	5	11
Annular tube height (cm)	100	100	100	210
Annular tube diameter (cm)	8	8	8	8.9
Draft tube height (cm)	90	90	90	-
Draft tube diameter (cm)	4.6	3	3	-
Temperature (°C)	22	22	22	25
Media density (g/m <sup>3</sup> )	0.13	0.13	0.13	2.65
Media diameter (μm)	903	903	903	320

\* (김동석 외 3인, 1994)

\*\* (Jang, 1990)

반응기들(R1, R2, R3)의 온도는  $22 \pm 1^\circ\text{C}$ , 수력학적 체류시간(HRT)은 5시간으로 고정한 상태에서, R1과 R2 반응기에 유입되는 유기물의 농도를 각각 COD로 1000mg/L와 2500mg/L로 일정하게 하고, 액체순환속도를 변화시키면서 액체흐름이 생물막 탈착속도에 미치는 영향을 고찰하였다. 이 때 액체순환속도의 변화는 유입되는 공기의 유량은 일정하게 유지한 상태에서 액체의 초기수위를 변화시킴으로써 이루어졌다(김동석 외 4인, 1994).

반응기, R3에서는 유기물 부하가 생물막 탈착에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 초기수위와 유입되는 공기유량을 고정한 상태에서, 유기물의 부하를 변화시키면서 실험하였고, 반응기, R4(Jang, 1990)는 간접포기 방식의 유동층 생물막 반응기로서, 유기물 부하를 일정하게 유지한 상태에서 액체의 공탑상향속도를 변화시키면서 운전하였다.

R1, R2, R3, R4 반응기들의 자세한 실험조건을 Table 2에 나타내었다.

## 2.2 실험폐수 및 biomass

실험에 사용된 폐수는 glucose를 주 탄소원으로, urea를 주 질소원으로 사용하였으며(김동석 외 4인, 1994), R3 반응기에서 유입폐수의 증가는 각 시약의 비례적인 증가에 의해 이루어졌다. 활성슬러지 공정의 반송슬러지를 약 15일 이상 합성폐수에 순화시킨 다음, styrofoam을 media로 하는 역 유동층 생물막 반응기에 직접 조금씩 투입하여, 생물막이 형성되도록 하였다.

Table 2. Operating conditions in IFBRR(R1,R2,R3) and a FBBR(R4).

Run Number	IFBRR										FBBR				R4**				
	R1					R2					R3*					1	2	3	
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	1	2	3
HRT (h)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	24	24	24
Influent COD concentration (g/l)	1	1	1	1	1	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	0.3	0.5	1	1.7	2.2	2.8	5	5	5
Air Flow rate (l/min)	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	-	-	-
Initial Liquid Height (cm)	82	79	77	75	73	80	78	76	74	72	78	78	78	78	78	78	-	-	-

\* (김동석 외 3인, 1994)

\*\* (Jang, 1990)

## 2.3 분석 및 측정방법

생물막 탈착속도( $b_{ds}$ )에 생물막 두께( $\delta$ ), 생물막 건조밀도( $\rho_{bd}$ ), bioparticle 밀도( $\rho_{pd}$ ), shear stress ( $\tau$ ), Reynolds number( $Re$ ) 등이 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 생물막 탈착속도와 생물막 두께는 직접적으로 측정하거나 계산하였고, 생물막 건조밀도, bioparticle 밀도, shear stress, Reynolds number는 생물막의 물성으로부터 계산하였다.

### 1) 비 생물막 탈착속도

(specific biofilm detachment rate)

비 생물막 탈착속도,  $b_{ds}$ 는 media에 부착된 전체 biomass 무게에 대한 탈착되는 biomass 속도의 비로써, 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} b_{ds} &= \frac{\text{total biomass detachment rate}}{\text{total attached biomass on the media}} \\ &= \frac{Q(X_e - X_i) + Q_w X_w}{W_m X_b} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $Q$ 는 유입유량(L/day),  $X_e$ 는 유출되는 biomass 농도(mg/L),  $X_i$ 는 유입되는 SS 농도(mg/L),  $Q_w$ 는 1일에 반응기 하부에 침전되어 폐기되는 biomass 량(L/day),  $X_w$ 는 폐기되는 biomass 농도(mg/L),  $W_m$ 은 반응기내 media의 전체 무게(g),  $X_b$ 는 단위 media 무게에 대한 생물막 건조무게(mg/g)이다.

## 2) 생물막 두께(biofilm thickness)

생물막 두께,  $\delta$ 는 접안렌즈에 눈금자(micrometer)가 달린 현미경(Nikon Labophot-2A 40X)을 사용하여 직접적인 방법으로 측정하였으며, bioparticle의 직경과 media의 직경은 등가부피직경(volume-equivalent length)으로 전환한 다음, Sauter mean diameter법(Bailey와 Ollis, 1986)을 사용하여 구하였다.

## 3) 생물막 건조밀도(biofilm dry density)

생물막 건조밀도(biofilm dry density),  $\rho_{bd}$ 는 생물막 부피에 대한 생물막 건조무게의 비로 정의하였다(Ro와 Neethling, 1991).

$$\begin{aligned}\rho_{bd} &= \frac{\text{biofilm dry weight}}{\text{biofilm volume}} \\ &= \frac{X\rho_m}{\gamma^3 - 1}\end{aligned}\quad (2)$$

여기서,  $\rho_m$ 은 media의 밀도( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $X$ 는 media의 무게에 대한 생물막의 건조무게비(-),  $\gamma$ 는 media의 직경에 대한 bioparticle의 직경비(-)이다.

## 4) 생물막 함수밀도(biofilm wet density)와 bioparticle 밀도

생물막 함수밀도,  $\rho_{bw}$ 는, biomass는 80%의 휘발성 고형물(volatile solids)과 20%의 비휘발성 고형물(nonvolatile solids)로 구성되어 있고 물의 부피는 bioparticle의 부피에 비해 무시될 정도로 작다(Chang *et al.*, 1991)는 가정으로부터 다음과 같이 구하였다.

$$\rho_{bw} = \frac{g(\text{biofilm} + \text{H}_2\text{O})}{\text{cm}^3 \text{biofilm}} = 1.0 + \rho_{bd}/0.8 \quad (3)$$

Bioparticle의 밀도,  $\rho_{pd}$ 는 media의 무게에다 생물막의 무게를 더한 값을 media의 부피와 생물막의 부피를 더한 값으로 나눈 것을 의미한다.

$$\begin{aligned}\rho_{pd} &= \frac{V_m \rho_m + V_b \rho_{bw}}{V_m + V_b} \\ &= \rho_m \left( 1 + \frac{\delta}{r_m} \right)^{-3} \\ &\quad + \rho_{bw} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{\delta}{r_m} \right)^{-3} \right]\end{aligned}\quad (4)$$

여기서,  $V_m$ 은 media의 부피,  $V_b$ 는 생물막의 부피,  $r_m$ 은 media의 반경이다.

## 5) 전단응력(shear stress)

액 유동층 내에서의 전단응력은 부력과 매우 밀접한 관계가 있으므로 다음과 같이 표현될 수 있다(Chang *et al.*, 1991).

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{\frac{4}{3} \pi (r_p + \delta)^3 (\rho_l - \rho_{pd}) g}{4\pi(r_p + \delta)^2} \\ &= \frac{(\rho_l - \rho_{pd}) g (r_p + \delta)}{3} \quad (\text{when } \rho_l > \rho_{pd})\end{aligned}\quad (5)$$

여기서,  $\rho_l$ 은 액체의 밀도이다.

## 3. 결과 및 고찰

반응기 내부에 있는 bioparticle 직경간의 표준 편차는 5%이내이므로(김동석 외 4인, 1994), bioparticle의 크기와 생물막 두께는 균일하다고 가정하였다.

Fig. 1은 Reynolds number의 변화에 따른 생물막 두께와 bioparticle 밀도의 변화를 나타낸 그림이다. 액체속도가 증가하면 전단응력이 증가하므로 일반적으로 생물막 두께는 감소하게 된다. 이들의 관계를 Reynolds number로 나타내었다.

$$\delta = 760 - 0.8Re \quad (r^2=0.86) \quad (6-1)$$

$$\delta = 695 - 0.9Re \quad (r^2=0.87) \quad (6-2)$$

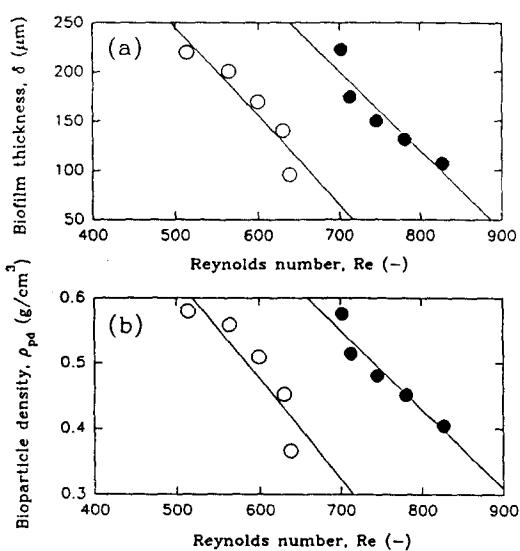


Fig. 1. Influence of Reynolds number,  $Re$  on biofilm thickness,  $\delta$  and bioparticle density,  $\rho_{Md}$  in R1(●) and R2(○).

Characklis(1981)는 원형관에 형성된 고정생물막에서 유기물 부하와 액체속도를 변화시키면서 생물막의 축적정도를 관찰하였는데, 유기물 부하가 클수록 전단응력은 생물막 두께에 상당히 큰 영향을 미쳤으나, 기질제한 상태에서 전단응력은 생물막 두께에 거의 영향을 미치지 않았다고 보고한 바 있지만, 본 연구에서는 모두 유기물 부하가  $5\text{kgCOD/m}^3/\text{day}$  이상으로 비교적 높은 영역이며 Reynolds number의 변화에 따라 생물막 두께는 상당한 영향을 받는 것으로 나타났다. 유입되는 폐수의 COD 농도가  $1000\text{mg/L}$ 인 R1에 비하여  $2500\text{mg/L}$ 인 R2에서 미생물의 증식이 활발하므로, Reynolds number의 변화에 대한 생물막 두께의 변화가 약간 높게 나타나기는 하였으나, 그다지 큰 차이는 아니었다. 이는 역 유동층 생물막 반응기에서는 원형관 생물막반응기나 다른 생물막 반응기에 비하여 기포에 의한 전단응력이 첨가됨으로써, 전단응력이 생물막 두께에 미치는 영향이 훨씬 크기 때문에 유입 유기물의 농도가 높은 R2에서 유입 유기물 농도가 낮은 R1에 비해 생물막의 탈착속도가 높아(Fig. 5(b)), 상대적으로 생물막의 축적은 그다지 증가하지 못한 것으로 판단되었

다.

또한, Reynolds number가 증가함에 따라 bioparticle의 밀도는 선형적으로 감소하였으며, 그 관계는 다음과 같다.

$$\rho_{Md} = 1.4 - 0.0012Re \quad (r^2=0.92) \quad (\text{in R1}) \quad (7-1)$$

$$\rho_{Md} = 1.4 - 0.0015Re \quad (r^2=0.81) \quad (\text{in R2}) \quad (7-2)$$

일반적으로 Reynolds number가 증가하면 환경적인 자극에 대한 미생물 대사반응과 유체압력에 의해 생물막 내의 수분 압착 등의 이유로 생물막 건조밀도는 증가한다(Characklis, 1981).

그러나 생물막과 media가 함께 고찰되는 bioparticle의 밀도는 Reynolds number의 증가함에 생물막 두께가 감소하게 되고, 생물막 두께가 감소함에 따라 생물막 내 험수율이 감소하게 되어, bioparticle의 단위 부피당 무게가 감소함으로써, bioparticle의 밀도는 감소하여 궁극적으로는 media의 밀도에 접근하게 된다.

또한, 생물막 두께의 변화와 마찬가지로, 유입되는 유기물 농도가 높은 R2에서 Reynolds number의 변화에 따른 bioparticle 밀도의 변화도 다소 크게 나타나기는 하였으나, 그다지 큰 차이를 나타내지 못하였다. 이는 생물막 두께의 변화에서와 같은 맥락으로 고찰할 수 있었다.

위와 같이 생물막 두께와 bioparticle 밀도는 Reynolds number에 영향을 받을 뿐만 아니라, 반응기 내의 biomass농도에도 많은 영향을 받으므로 (김동석 외 4인, 1991), 다변량 회귀분석법(multiple linear regression analysis method)(Chapra 외 Canale, 1989)을 사용하여 정리하면 다음 식으로 표현되었다.

$$\delta = 61.6 + 16.33b_c - 0.04Re \quad (r^2=0.87) \quad (8)$$

$$\rho_{Md} = 0.3 + 0.027b_c - 2.93 \times 10^{-5}Re \quad (r^2=0.85) \quad (9)$$

식(8)과 (9)에서 Reynolds number를 증가시킬 수록 입자에 주어지는 전단응력은 증가하여(Table

3), 생물막 두께는 감소되고 bioparticle의 밀도는 작아지며, 반응기 내 biomass 농도가 높을수록 생물막 두께는 증가하고(김동석 외 4인, 1991) bioparticle 밀도도 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 2는 실측한 생물막 두께와 계산한 bioparticle 밀도를 모델식(8)과 (9)를 이용하여 예측한 결과들과 비교한 그림으로서, 생물막 두께의 경우에서 실측한 값과 예측한 값은 87%의 일치도를 보였고, bioparticle 밀도의 경우는 85%의 일치도를 보였다.

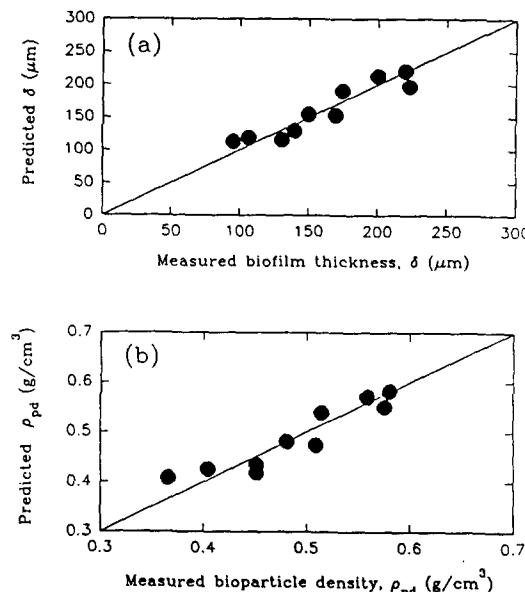


Fig. 2. Correspondence of experimental results and correlation model for biofilm thickness,  $\delta$  and bioparticle density,  $\rho_{pd}$ .

R1과 R2에서 생물막 두께와  $F/M$  비가 비 기질제거속도에 미치는 영향을 고찰하여 Fig. 3에 나타내었다. 생물막 두께가 증가할수록 비 기질제거속도는 감소하였는데(Fig. 3(a)), 이는 일정한 유기물 농도에서 생물막 두께가 증가함에 따라 생물막 내 유기물의 물질전달이 제한되기 때문인 것으로 생각되며, 유입되는 유기물의 농도가 높을수록 비 기질제거속도가 높게 나타났다. Fig. 3(b)에는  $F/M$  비의 변화에 따른 비기질제거속도의 변화를 나타내었다. 유입되는 유기물의 농도는 각 반응기

에서 일정하였으나, 액체순환속도의 변화에 따라 탈착되는 biomass의 양이 변화함으로써, 반응기내 biomass의 양이 변화하게 되어, 결국에는  $F/M$  비의 변화를 초래하게 되었다. 유입되는 유기물의 농도차이에 관계없이  $F/M$  비에 따라 비 기질제거속도는 선형적인 증가를 보였고, 그 관계는  $q=0.88F/M$  ( $r^2=.99$ )로 나타났다.

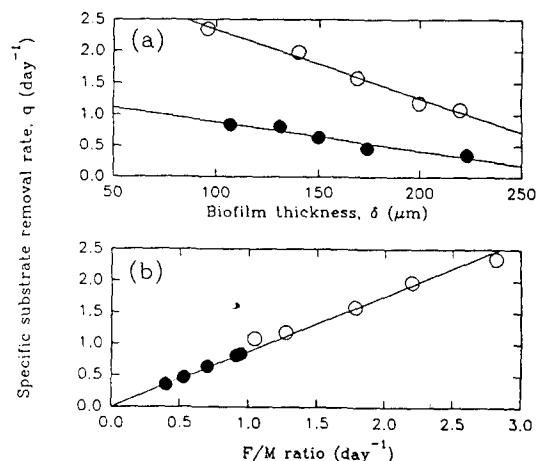


Fig. 3. Effect of biofilm thickness,  $\delta$  and  $F/M$  ratio on specific substrate removal rate,  $q$  in R1(●) R2(○).

Fig. 3에서 비 기질제거속도는  $F/M$ 비와 생물막 두께에 복합적으로 영향을 받으므로, 이를 다변량 회귀분석하여 다음과 같은 식을 얻었다.

$$q = 0.44 + 0.82F/M - 5.1 \times 10^{-4}\delta \quad (r^2=0.99) \quad (10)$$

식(10)을 살펴보면 Fig. 3에서와 마찬가지로 비 기질제거속도는  $F/M$ 비와 정비례의 관계에 있고, 생물막 두께에는 역비례관계를 가짐을 확인할 수 있었다.

실측한 비 기질제거속도와 모델식 (10)을 이용하여 예측한 비 기질제거속도를 비교하여 Fig. 4에 나타내었는데, 실측한 값과 예측한 값은 99%의 일치를 보였다.

생물막 탈착에 관한 실험을 통하여 직접 측정되거나 계산된 반응기, R1, R2, R3, R4의 결과들을 Table 3에 자세히 나타내었다.

Table 3. Measured and calculated parameters for all experimental runs with the IFBBR(R1,R2,R3) and FBBR(R4).

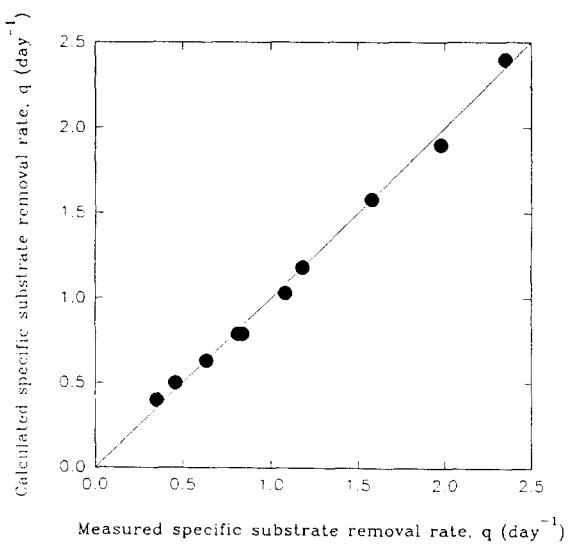
	Liquid circulation velocity U (cm/sec)	Specific biofilm detachment rate, $b_{ds}$ (day <sup>-1</sup> )	Biofilm thickness $\delta$ ( $\mu\text{m}$ )	Biomass conc. $b_c$ (mg/L)	Reynolds number Re (-)	Shear stress $\tau$ (dyne/cm <sup>2</sup> )	Bioparticle density $\rho_{pd}$ (g/cm <sup>3</sup> )	F/M ratio (day <sup>-1</sup> )	Specific substratate removal rate, $q$ (day <sup>-1</sup> )	
R1	1	7.4	0.119	107	5550	827	10.87	0.404	0.94	0.836
	2	6.7	0.105	131	5230	781	10.32	0.452	0.91	0.810
	3	6.2	0.093	150	7530	746	10.21	0.481	0.70	0.634
	4	5.7	0.085	174	9625	713	9.92	0.515	0.53	0.460
	5	5.2	0.061	223	10050	701	9.35	0.576	0.40	0.350
R2	1	5.83	0.660	96	4690	638	11.33	0.366	2.82	2.350
	2	5.33	0.513	140	5680	631	10.59	0.452	2.20	1.980
	3	4.83	0.223	169	7100	599	9.96	0.509	1.78	1.580
	4	4.33	0.162	200	10647	564	9.38	0.559	1.27	1.180
	5	3.83	0.138	220	11000	514	9.21	0.580	1.04	1.080
R3	1	2.83	0.037	11	4434	262	7.90	0.222	0.32	0.260
	2	2.83	0.062	25	4780	270	7.00	0.341	0.53	0.450
	3	2.83	0.109	30	5194	273	6.74	0.375	1.03	0.900
	*	2.83	0.139	71	5336	296	5.07	0.582	1.58	1.400
	4	2.83	0.229	91	6268	307	4.28	0.665	1.76	1.640
	6	2.83	0.282	114	7000	320	2.97	0.780	2.03	1.600
R4	1	0.61	0.042	340	7067	61	4.65	1.21	0.71	0.270
	2	0.89	0.050	224	7335	68	6.54	1.36	0.77	0.350
	**	1.17	0.057	191	5613	82	7.34	1.43	0.91	0.300

\* (김동석 외 3인, 1994)

\*\* (Jang, 1990)

IFBBR(R1, R2)에서 Reynolds number의 변화에 따른 비 생물막 탈착속도,  $b_{ds}$ 는 FBBR(R4)에 비해 매우 크게 나타났다. IFBBR내에는 공기가 직접적으로 공급되는 draft tube가 있어, 과도 성장한 bioparticle은 draft tube 내로 흡입되어, 기포와의 직접적인 접촉에 의해 마찰을 받게 되므로, 순수하게 액체만의 순환에 의해 영향을 받게 되는 FBBR에 비하면, 월등히 높은 비 생물막 탈착속도를 나타내어, 생물막 두께를 조절하는 데 매우 유리한 것으로 판단되었다.

IFBBR에서는 Reynolds number 외에 비 생물막 탈착속도에 영향을 주는 기포의 영향을 분리하여 고찰하여야 하나, 기포의 크기나 양 등을 적절한 수식으로 표현하기가 어려워 본 논문에서는 기포의 영향을 Reynolds number에 포함시켜 고찰하였으나, 기포의 영향을 분리하여 고찰하는 실험을 계속하고 있다.

Fig. 4. Correspondence of experimental results and correlation model for specific substrate removal rate,  $q$ .

Reynolds number의 변화에 따른 전단응력,  $\tau$ 의 변화를 살펴보면, Reynolds number가 증가함에 따라 bioparticle의 부피는 감소하나, bioparticle의 밀도가 감소하게 됨으로써 액체와 밀도차이가 커져, 전체적으로 bioparticle에 주어지는 액체의 전단응력은 증가하게 되었다. 또한, FBBR에서의 전단응력에 비해 IFBRR의 전단응력이 크게 나타났는데, 이는 저밀도 bioparticle의 항력계수가 모래와 같이 무거운 입자를 media로 하여 형성된 고밀도 bioparticle의 항력계수보다 훨씬 높게 나타났기 때문이다(19). 유입되는 유기물의 농도가 높은 R2에서의 전단응력이 유입 유기물 농도가 낮은 R1보다, Reynolds number의 변화에 따른 전단응력의 변화가 크게 나타난 것은, 유입 유기물의 농도가 클수록 생물막의 두께와 bioparticle 밀도의 변화폭이 모두 크게 나타났기 때문이라고 사료되었다.

Fig. 5는 비 생물막 탈착속도에 대한 F/M 비와 Reynolds number의 영향을 고찰한 그림으로써, F/M 비의 증가에 따라 R1과 R2 모두에서 비 생물막 탈착속도는 선형적으로 증가하였고, 그 관계는  $b_{ds} = 0.19F/M$  ( $r^2 = 0.84$ )로 나타났다(Fig. 5(a)). Reynolds number를 증가시킴에 따라 비 생물막 탈착속도는 증가하였고, 유입 유기물 농도가 낮은 R1에 비해 유입 유기물 농도가 높은 R2에서 Reynolds number에 대한 비 생물막 탈착속도에 대한 영향이 크게 나타났다. 이는 유입농도의 증가에 따른 미생물의 비 증식속도가 크기 때문인 것으로 판단되었다(Fig. 5(b))。

비 생물막 탈착속도는 Reynolds number뿐만 아니라 F/M비에도 많은 영향을 받으므로, 이들에 대한 영향을 다변량 회귀분석법으로 표현하면 다음과 같다.

$$b_{ds} = -0.26 + 0.26F/M + 2.17 \times 10^{-4}Re \quad (11)$$

식(11)을 보면 Reynolds number와 F/M비를 증가시킬수록 더 높은 탈착속도를 나타내었다. 이는 Fig. 5(a)와 (b)의 결과와 일치하였다.

실측한 비 생물막 탈착속도와 모델식(11)을 이

용하여 예측한 비 생물막 탈착속도를 비교하여 Fig. 6에 나타내었는데, 실측한 값과 예측한 값은 92%의 일치를 보여, 반응기 내 media의 양이 일정한 상태의 역 유동층 생물막 반응기에서  $F/M$  비와 Reynolds number의 측정에 의해 비 생물막 탈착속도를 예측가능하게 하였다.

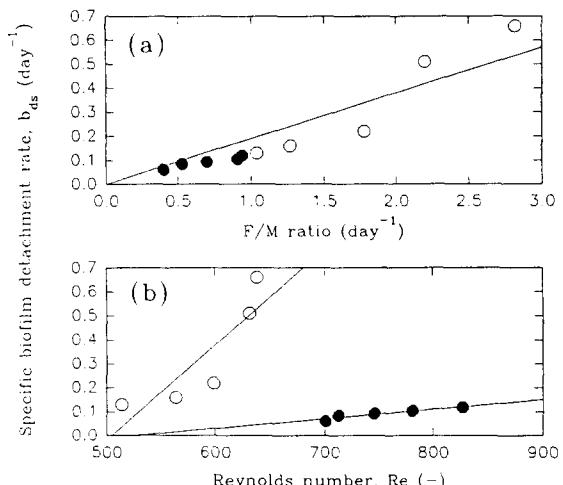


Fig. 5. Effect of F/M ratio and Reynolds number on specific biofilm detachment rate in R1(●) and R2(○).

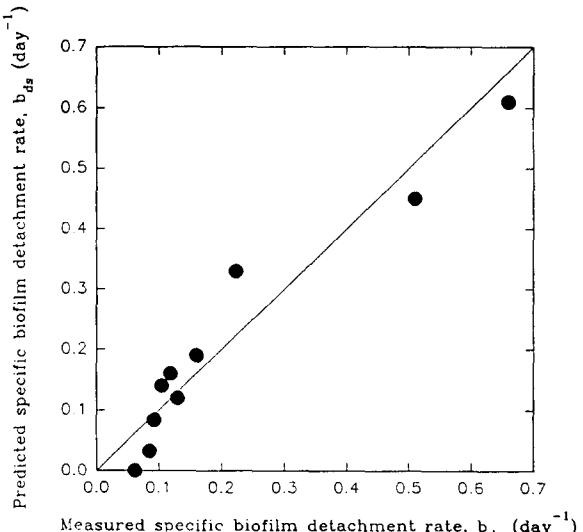


Fig. 6. Correspondence of experimental results and correlation model for specific biofilm detachment rate,  $b_{ds}$ .

## 참 고 문 헌

- 김동석, 안갑환, 서명교, 박태주, 송승구, 1991, 생물막 유동층 반응기에서 고농도 합성폐수의 처리효율과 미생물 성상, 화학공학, 29(4), 448.
- 김동석, 박영식, 박경기, 송승구, 1994, IFBRR에서 유기물 부하변동에 따른 생물막 성상의 변화, 대한환경공학회지, 심사중.
- 김동석, 윤준영, 최윤찬, 박경기, 송승구, 1994, 역유동층 생물막 반응기에서 액체순환속도가 생물막에 미치는 영향, 한국환경과학회지, 인쇄중.
- Bailey, J.E. and Ollis, D.F., 1986, Biochemical Engineering Fundamentals, 2nd Ed., McGraw-Hill, 482.
- Chang, H.T., Rittmann, B.E., Amar, D.R., Ehlinger, H.O. and Lesty, Y., 1991, Biofilm Detachment Mechanisms in a Liquid-Fluidized Bed, Biotech. Bioeng., 38, 499.
- Chapra, S.C. and Canale, R.P., 1989, Numerical Methods for Engineers, McGraw-Hill, 351.
- Characklis, W.G. and Marshall, K.C., 1990, Biofilms, John Wiley & Sons, 73-86.
- Characklis, W.G., 1981, BIOENGINEERING REPORT Fouling Biofilm Development: A Process Analysis, Biotechnol. Bioeng., 23, 1923.
- Flemming, H.C., 1993, Biofilms and Environmental Protection, Wat. Sci. Tech., 27(7/8), 1.
- Heijnen, J.J., van Loosdrecht, M.C.M., Mulder, R., Weltevrede, R. and Mulder, A., 1993, Development and Scale-Up of an Aerobic Biofilm Air-Lift Suspension Reactor, Wat. Sci. Tech., 27(5), 253.
- Jang, H.J., 1990, Application of Fluidized Bed Biofilm Reactor for Treating Brewery Wastewater, M.S. Thesis, Dept. of Chem. Eng., Pusan Nat. Univ., Pusan.
- Kim, D.S. and Song, S.K., 1993, Dynamic Characteristics in IFBRR and Its Application to Wastewater Treatment, The 5th International Energy Conference, Environmental Control and Waste Recycling, Seoul, Korea, October, 5, 313.
- Ro, K.S. and Neething, J.B., 1991, Biofilm Density for Biological Fluidized Beds, Research J. WPCF, 63(5), 815.
- Speitel, G.E. and DiGiano, F.A., 1987, Biofilm Shearing under Dynamic Conditions, J. Environ. Eng., 113(3), 464.
- Stewart, P.S., 1993, A Model of Biofilm Detachment, Biotech. Bioeng., 41, 111.
- Trulcar, M.G. and Characklis, W.G., 1982, Dynamics and Biofilm Process, J. WPCF, 54(9), 1288.