

미생물막 유동층 반응기를 이용한 산업폐수 처리에 관하여

서명교 · 서정호* · 강준수

동의공업전문대학 식품공학과, *(주)서릉 재료개발연구소

The Treatment of Industrial Wastewater by the Fluidized-Bed Biofilm Reactor

Myung-Gyo Suh, Jung-Ho Suh*, Jun-Soo Kang

Department of Food Industry, Dongeui Technical Junior College

*Materials Development Research Institute, Suhryung Co., Ltd.

Abstract

Substrate removal efficiency of industrial wastewater from dye plant was investigated with fluidized-bed biofilm reactor(FBBR). Wastewater was diluted by 2, 3 and 6 times for experiment. When F/M ratio was increased 0.2 to 0.3, substrate removal efficiency of wastewater was rapidly decreased in all dilution ratio. Substrate removal efficiency was increased with dilution ratio in same F/M ratio, with hydraulic retention time. In case of 6 times diluted wastewater, below 0.2 F/M ratio, removal efficiency of BOD was 90~97%. For reactor design, the parameters such as Y , k_d and r was obtained as follows:

$Y=0.3365$ $k_d=0.03782 \text{ day}^{-1}$ $r=0.997$ in 2 times diluted

$Y=0.3341$ $k_d=0.02750 \text{ day}^{-1}$ $r=0.996$ in 3 times diluted

$Y=0.5460$ $k_d=0.03434 \text{ day}^{-1}$ $r=0.998$ in 6 times diluted

Key words: fluidized-bed biofilm reactor, industrial wastewater, dye, substrate removal efficiency, reactor design parameters

서 론

오늘날 다양한 식품 및 화학 공업의 발전과 더불어 식용유, 어묵, 스낵류, 라면, 농약 및 염료 등을 생산하는 공장에서 배출하고 있는 산업폐수는 지방족 탄화수소, 벤젠 및 톨루엔 등과 같은 방향족 탄화수소 화합물이 포함되어 있으며, 이들 화합물은 미생물에 의한 산화율이 낮고, 높은 농도에서는 독성을 유발한다. 따라서 이러한 폐수를 처리하기 위해서는 일반적으로 전처리로 화학응집 침전처리를 한 후, 회석하여 활성슬러지공법으로 처리한 후 3차처리를 하거나 또는 매질을 이용한 고정생물막공법으로 처리하고 있다^(1, 2).

그러나 활성슬러지공법의 경우 그 처리기능의 보완을 위해 여러 방법이 개발되고 있으나 처리공정상 폭기조 내의 미생물 농도가 일반적으로 5 g/l 이하로 제한되고 있어서⁽⁴⁾ 적용가능한 유입수 수질범위의 폭이 좁다는 등의 문제점이 있다. 살수여상법과 회전원판법은 미생물이 고농도로 부착할 수 있는 조건은 제공되나, 살수여상법은 미생물 성장에 따른 산소전달 등 물질확산에

어려움이 있고, 회전원판법은 처리효율은 좋으나 고농도 처리에 어려움이 있으며 잦은 기계적인 고장으로 인한 문제점을 가지고 있다⁽⁵⁾.

반면에 미생물막 유동층법은 산소 공급능력의 부족, 반응기내 부착미생물량의 유지관리, 반송펌프의 동력비 등 몇 가지 제약을 가지고 있으나^(6, 9) 작은 유동입자에다 미생물을 고정화 함으로써 반응기내 미생물농도가 8~40 g/l로 유지될 수 있으므로, 일반 생물학적 처리방법으로 처리가 곤란한 독성을 함유한 유기성 폐수는 물론 고농도의 폐수에도 효과적으로 적용할 수 있고^(10, 13) 또한 미생물의 wash out 없이 높은 처리효율도 가능하게 한다.

따라서 본 실험에서는 미생물막 유동층 반응기를 이용한 염료공장의 합성공정에서 배출되는 폐수를 처리하기 위하여 매질에 미생물을 부착시켜 폐수의 수리학적 체류시간, F/M비 등에 따른 유기물 제거효율과 반응기 설계를 위한 동역학적 계수를 산출하고자 한다.

재료 및 방법

시료

본 실험에 사용된 시료는 염료공장에서 합성공정을 거쳐나온 산업폐수를 수거하여 pH 7로 만들어 사용하였으며 원폐수의 특성치는 Table 1과 같다. Table 1에서

Corresponding author: Myung-Gyo Suh, Department of Food Industry, Dongeui Technical Junior College, Yangjeong-dong San 72, Pusanjin-gu, Pusan 614-715

Table 1. Characteristics of industrial wastewater from dye plant

Item	Conc.
BOD ₅ , mg/l	2,550
COD _{Cr} , mg/l	9,120
COD _{Mn} , mg/l	4,950
TSS, mg/l	370
PO ₄ -P, mg/l	0.87
NH ₄ -N, mg/l	0.08
pH	1.37

보면 본 실험에 사용된 폐수는 BOD₅/COD_{Cr}의 비가 작으므로 생물학적으로 분해하기가 힘든 폐수이며 pH도 1.37로 강산인 것을 알 수 있다.

동력학적 계수 산출

본 연구에서 사용된 미생물막 유동층 반응기는, 최저 230에서 최고 1382배까지의 반응율로 실험하였으므로 Levenspiel⁽¹⁴⁾의 반응기해석에 따라 혼합양상이 완전 혼합계로 볼 수 있으므로 활성슬러지공법의 해석방법에 따라 동력학적 계수를 산출한다.

생물학적 반응은 일반적으로 Michaelis-Menten 관계와 Monod 관계에 기초하고 있으며 Monod식의 기본적인 표현은 다음과 같다⁽¹⁵⁾.

$$\frac{dX}{dt} = \mu \cdot X \quad (1)$$

또한 미생물의 비성장속도는 다음 식으로 주어진다.

$$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_s + S} \quad (2)$$

따라서 단위 시간당 총미생물 성장율은 식 (3)과 같이 표시된다.

$$\frac{dX}{dt} = \mu \cdot X = \frac{\mu_m \cdot X \cdot S}{K_s + S} \quad (3)$$

또한 미생물은 증식하면서 내호흡을 하게 되므로 내호흡율에 의한 미생물 감소율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dX}{dt} = k_d \cdot X \quad (4)$$

따라서 미생물의 내호흡 영향을 고려한 순미생물 성장율은 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\mu_m \cdot X \cdot S}{K_s + S} - k_d \cdot X \quad (5)$$

또한 유기물 제거율은 식 (6)과 같이 나타내어진다.

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y} \frac{dX}{dt} \quad (6)$$

식 (3)을 식 (6)에 대입하면

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -\frac{1}{Y} \frac{\mu_m \cdot X \cdot S}{K_s + S} = -\frac{\mu_m}{Y} \frac{X \cdot S}{K_s + S} \\ &= -\frac{k \cdot X \cdot S}{K_s + S} \end{aligned} \quad (7)$$

로 된다. 여기서 $k = \frac{\mu_m}{Y}$ 이다.

한편 완전혼합 반응조 내에서 슬러지의 반응을 고려하지 않은 물질수지식은 다음 식으로 표현된다.

$$V \frac{dS}{dt} = Q S_0 - Q S - \frac{k \cdot X \cdot S}{K_s + S} V \quad (8)$$

반응조 내의 유기물 농도변화가 정상상태에 있으면 ($V \cdot dS/dt = 0$)

$$S_0 - S - \frac{\theta \cdot k \cdot K_s \cdot S}{K_s + S} = 0 \quad (9)$$

이 되고, 식 (9)를 이용하여 동력학적 계수를 구하기 위해 선형방정식으로 고치면 식 (10)과 같이 된다.

$$\frac{X \cdot \theta}{S_0 - S} = \frac{K_s}{k} \frac{1}{S} + \frac{1}{k} \quad (10)$$

한편 슬러지를 반응하는 활성슬러지 공법에서 미생물 체류시간은 식 (11)과 같이 표현된다.

$$\theta_c = \frac{V \cdot X}{Q_w \cdot X_w + (Q - Q_w) \cdot X_c} \quad (11)$$

폭기조 내의 미생물에 대해서 물질수지식을 취하면

$$\begin{aligned} V \frac{dX}{dt} &= Q X_0 - [Q_w X_w + (Q - Q_w) X_c] \\ &\quad + \left(\frac{\mu_m \cdot X \cdot S}{K_s + S} - k_d \cdot X \right) V \end{aligned} \quad (12)$$

로 되고, 유입수의 미생물 농도를 무시하고 반응조 내에 미생물농도가 변하지 않는 정상상태에서 식 (13)과 같다.

$$\frac{1}{\theta_c} = \left(\frac{\mu_m \cdot X \cdot S}{K_s + S} \right) / X - k_d \quad (13)$$

식 (9)와 식 (13)으로부터 동력학적 계수를 산출하기 위한 선형방정식 식 (14)을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{\theta_c} = Y \frac{S_0 - S}{X \cdot \theta} - k_d \quad (14)$$

이 식을 이용하여 ($S_0 - S/X \cdot \theta$)와 $1/\theta_c$ 의 관계로부터 Y 및 k_d 를 구할 수 있다.

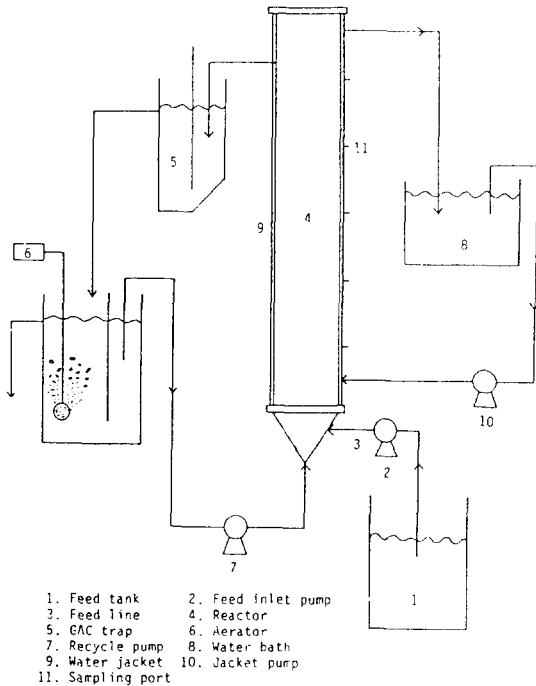


Fig. 1. Schematic diagram of fluidized-bed biofilm reactor(FBBR)

실험장치

본 실험에 사용된 장치는 Fig. 1과 같다. 사용된 반응기는 내경이 10 cm이고 높이가 165 cm, 총부피 13 L인 투명한 아크릴 원형관으로 제작하였다. 반응기의 측면에는 유기물 농도와 미생물 농도를 측정하기 위해 40 cm 간격으로 4개의 시료 채취구를 설치하였다. 매질은 비중이 약 2.0 g/cm³이고 직경이 0.6~1.2 mm인 granular activated carbon(GAC)을 사용하였으며 반응기내에 약 2 L를 채웠다.

반응기내의 유동을 위해 순환수를 22 m/hr의 속도로 반응기 하부로 주입하였으며(recycle ratio : 230~1382) 유입폐수는 정량주입펌프를 사용하여 시료 주입구로 유입시켰다. 상향유속조절 즉 층 팽창률을 조절하기 위해 가변전압조정기를 사용하였으며 미생물이 초과성장한 매질을 회수기 위해 trap을 설치하였다.

산소 공급방식은 간접폭기방식으로 산소를 순환수에 녹여 공급하였으며 온도조절은 냉각수조와 자동온도 조절장치를 사용하여 22±1°C 를 유지하였다.

반응기 운전방법

미생물의 매질 부착

반응기에 깨끗이 세척한 GAC를 약 2 L 정도 넣고 수도수를 가득채워 펌프로 순환시키면서, 부산시 우성

Table 2. FBBR operating conditions for the treatment of industrial wastewater

Type of waste	HRT (hr)	Influent CID (mg/l)	MLVSS (mg/l)	F/M (day ⁻¹)
6 times dilution	48	1174	5712	0.153
	24	1364	6845	0.174
	12	1468	6032	0.427
3 times dilution	48	2274	5593	0.182
	36	2446	5712	0.250
	24	2370	5818	0.358
2 times dilution	12	2350	5422	0.749
	72	4373	5355	0.238
	48	4318	4819	0.383
	36	4440	5025	0.517
	24	4420	5013	0.778

식품(주) 폐수처리장의 반응슬러지를 운반하여 60 mesh (φ : 0.24 mm)에 걸러 조금씩 반응기내에 주입시킴과 동시에 농도 2000 ppm인 글루코오스를 유입수로 수리학적 체류시간(HRT)을 48시간으로 하여 반응기에 주입시켜 미생물을 매질에 부착시킨 다음 본 실험에 사용할 원폐수를 6배 희석하여 폐수 : 글루코오스의 비율을 1 : 9, 3 : 7, 5 : 5 및 8 : 2로 높여가며 약 한달간 순환시켰다.

반응기 운전

유기물 부하량에 따른 잉여슬러지 생산량은 일정높이를 초과한 만큼의 부착매질을 반응기에서 빼내어 부착 미생물을 떨어냄으로서 계산되었고 부착 미생물이 제거된 매질입자는 다시 반응기로 주입하였다.

최적의 효율을 검토하기 위해 시료를 2배, 3배 및 6배로 희석. COD 농도를 각각 평균 4388 mg/l, 2360 mg/l, 1335 mg/l로 조정하여 3배, 6배 희석은 HRT를 12~48 시간, 2배 희석은 HRT를 24~72시간으로 조절하면서 실험하였다. 자세한 조절조건은 Table 2에 나타내었다.

분석

본 실험의 시료 분석방법은 미국공중보건협회의 표준 시험법^[16]를 기준으로 행하였으며 미생물의 농도측정은 각 채취구에서 일정한 양을 혼합 채취하여 매질로부터 미생물을 완전히 떨어낸 다음 매질을 가라앉힌 후 부유하는 미생물만을 일정량 채취하여 행하였다.

결과 및 고찰

Table 3은 실험폐수를 2배, 3배 및 6배 희석한 후 유입수로 사용하고 MLVSS 농도를 5~7 g/l로 조절하여 수리학적 체류시간별로 미생물학적 유동층 공법으로 정상상태에서 운전한 결과를 평균하여 나타낸 것이다.

HRT에 따른 유기물 제거효율

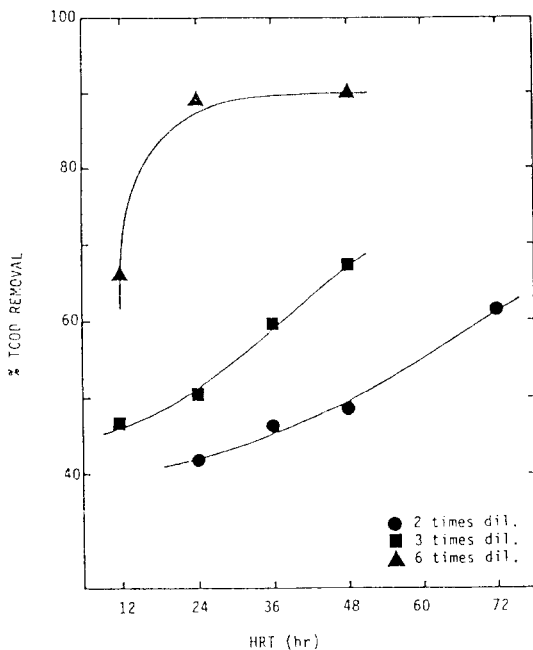
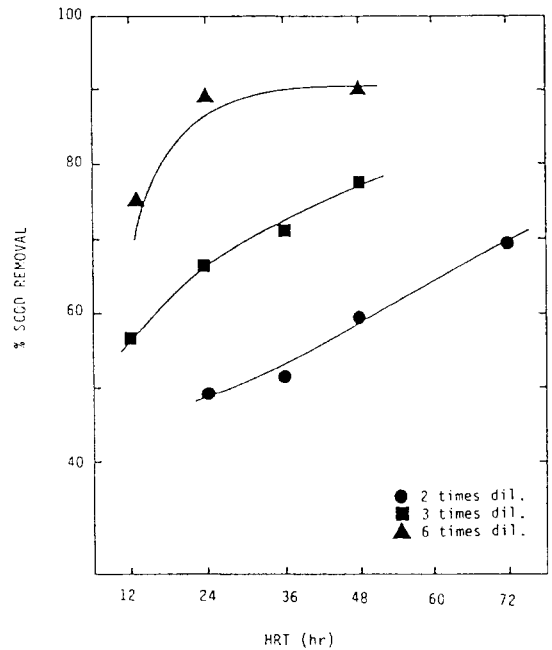
Table 3. Summary of steady state operating results in fluidized-bed biofilm reactor¹⁾

Type of W/W	HRT	Influent		Effluent					MLSS	MLVSS	F/M
		TCOD	TBOD	TCOD	SCOD	TBOD	SBOD	SS			
6 times dilution	48	1174	434	118	82	21	12	22	5712	5135	0.153
	24	1364	476	170	132	29	15	27	7823	6845	0.174
	12	1468	489	511	370	78	39	328	6841	6032	0.427
3 times dilution	48	2274	655	746	518	121	59	97	6250	5593	0.182
	36	2446	784	990	714	186	109	236	6527	5711	0.250
	24	2370	771	1174	798	212	120	252	6620	5818	0.358
2 times dilution	12	2350	772	1260	1029	216	137	276	6275	5422	0.749
	72	4373	1365	1688	1329	254	118	174	6120	5355	0.238
	48	4318	1342	2231	1760	335	196	296	5634	4819	0.383
	36	4440	1379	2386	2166	459	207	377	5724	5025	0.517
	24	4420	1371	2565	2245	492	289	404	5684	5013	0.778

¹⁾ Unit : HRT [=] hr

F/M [=] kg COD/kg MLSS·day

Other units where applicable, mg/l

**Fig. 2. Effect of hydraulic retention time on TCOD removal****Fig. 3. Effect of hydraulic retention time on SCOD removal**

미생물막 유동층 공법 처리시 COD의 제거효율은 Fig. 2(TCOD기준)와 Fig. 3(SCOD기준)에 나타난 바와 같이, TCOD의 경우 HRT가 24~72시간일 때 2배 희석 처리시 41.9~61.4%의 제거효율을 나타내었고, HRT가 12~48시간일 때 3배 희석처리시 46.4~67.2%, 6배 희석의 경우는 65.2~90.0% 범위의 제거효율을 보였다. 희석배율이 높아지면서 처리효율이 증가한 것은 폐수의 독성영향이 감소되기 때문인 것으로 여겨진다.

SCOD의 제거효율은 그림에서 보여지는 바와 같이 6배 희석 처리시의 경우를 제외하면 TCOD 제거효율보다 평균 10% 이상의 제거효율 증가를 나타내는데 이는 Table 1에서 보여주는 바와 같이 시료로 사용한 폐수에 약간의 고형물이 있기 때문으로 생각되어진다.

또 Fig. 4(TBOD기준)와 Fig. 5(SBOD기준)는 HRT에 따른 BOD의 제거효율을 나타낸 것인데, TBOD의 경우 HRT가 12~72시간일 때 2배와 3배 희석처리시 64.1~81.

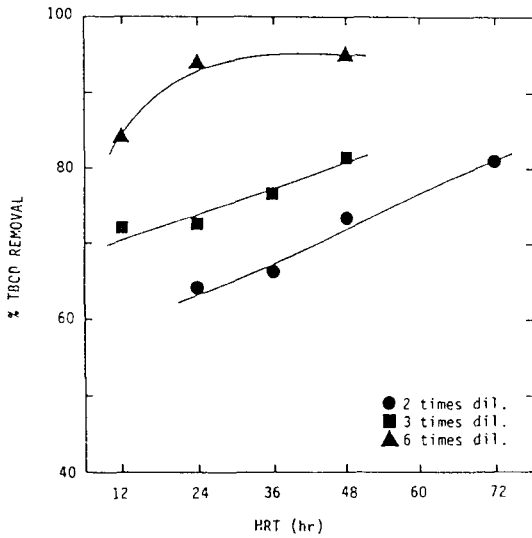


Fig. 4. Effect of hydraulic retention time on TBOD removal

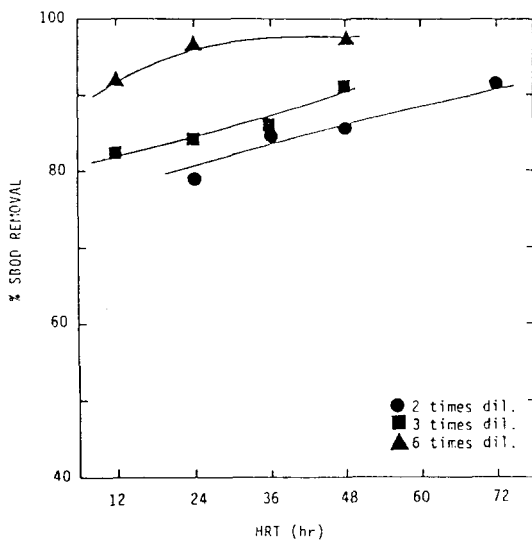


Fig. 5. Effect of hydraulic retention time on SBOD removal

5%의 제거효율을 나타내었다. SBOD의 제거효율은 HRT가 24시간 이상일 때는 회석율에 관계없이 80% 이상의 제거효율을 나타내었으며 48시간 이상일 때는 3배와 6배 회석처리시 90% 이상의 제거효율을 보였다. 따라서 전체적으로는 COD 제거효율이 BOD 제거효율 보다 떨어지는데 이는 본 실험에 사용한 폐수속에 non-biodegradable organic이 상당부분 있기 때문으로 여겨진다.

F/M비에 따른 유기물 제거효율

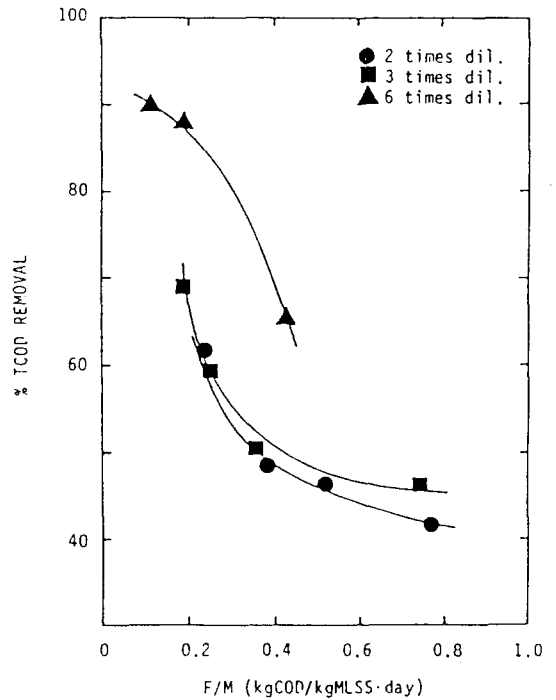


Fig. 6. Effect of F/M on TCOD removal

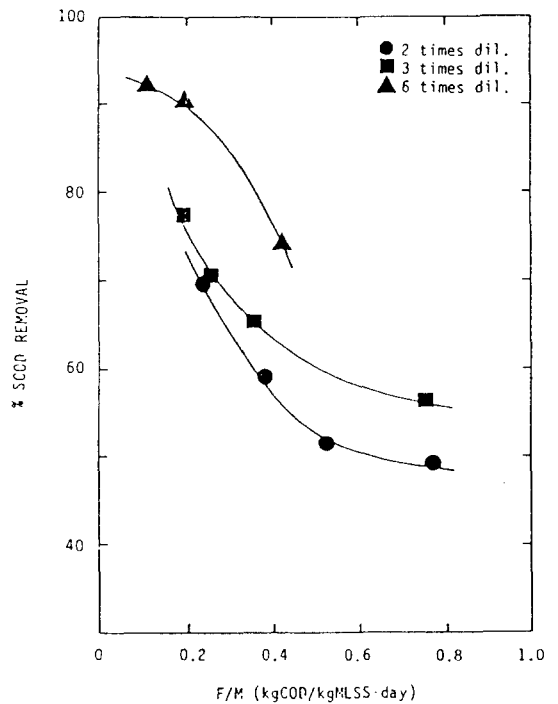


Fig. 7. Effect of F/M on SCOD removal

Fig. 6(TCOD기준)과 Fig. 7(SCOD기준)은 F/M비에 따

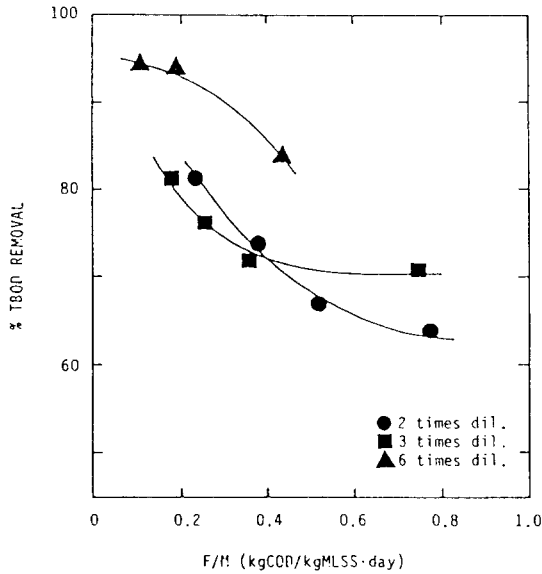


Fig. 8. Effect of F/M on TBOD removal

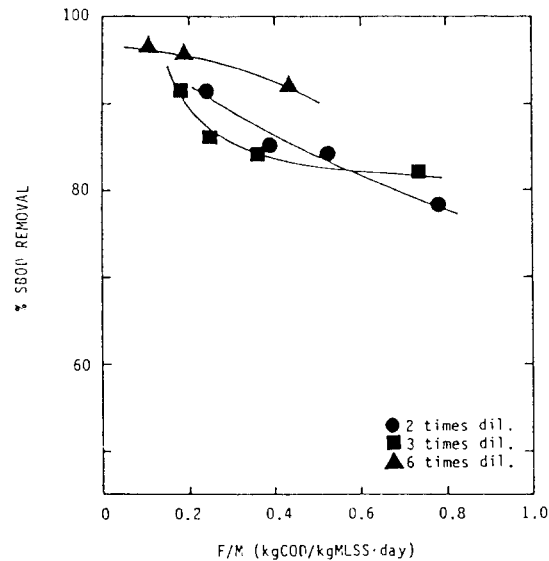


Fig. 9. Effect of F/M on SBOD removal

른 COD 제거효율을 나타낸 것으로 그림에서 보여지는 바와 같이 TCOD와 SCOD의 제거효율은 F/M비가 증가할 때 급격히 감소하는 것을 알 수 있는데 이것은 F/M비가 0.2~0.3일 때부터 회석율에 관계없이 독성의 영향을 받는 것으로 생각된다.

SCOD의 경우 F/M비가 0.2~0.3 이하이면 회석율에 관계없이 70% 이상의 유기물 제거효율을 기대할 수 있고 6배 희석의 경우 F/M비가 0.2 이하이면 TCOD와 SCOD 제거효율은 90% 정도임을 알 수 있다.

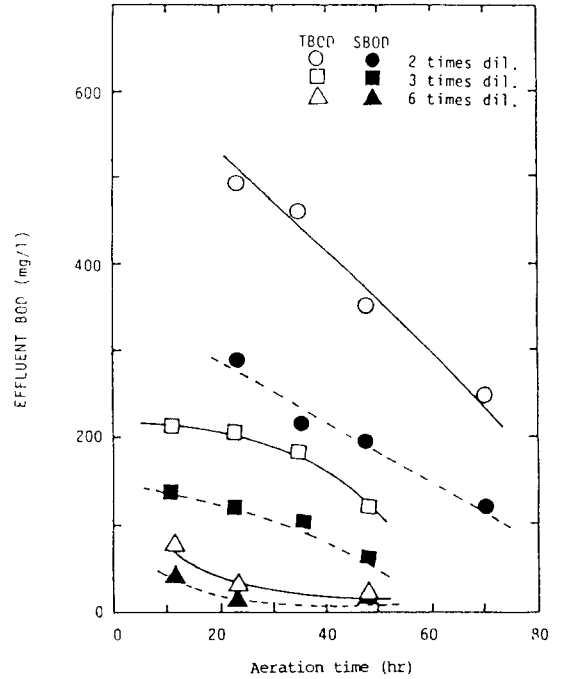


Fig. 10. Effect of aeration time on effluent BOD

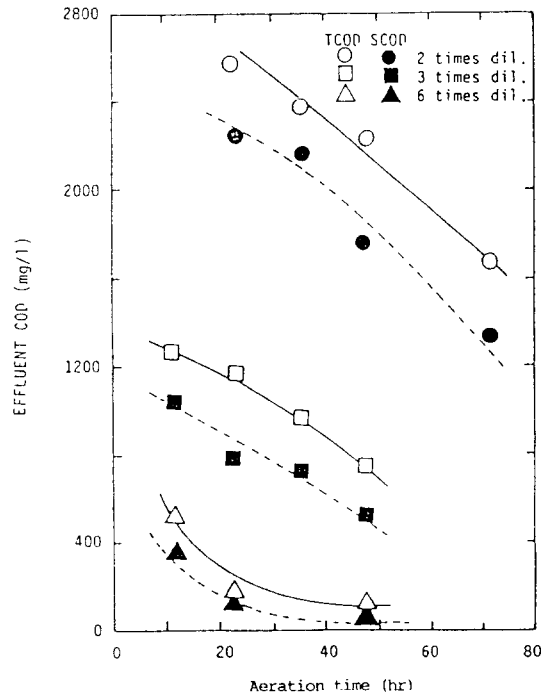


Fig. 11. Effect of aeration time on effluent COD

또 F/M비에 따른 BOD 제거효율은 Fig. 8(TBOD기준)과 Fig. 9(SBOD기준)에 나타내었는데, TBOD의 경우는

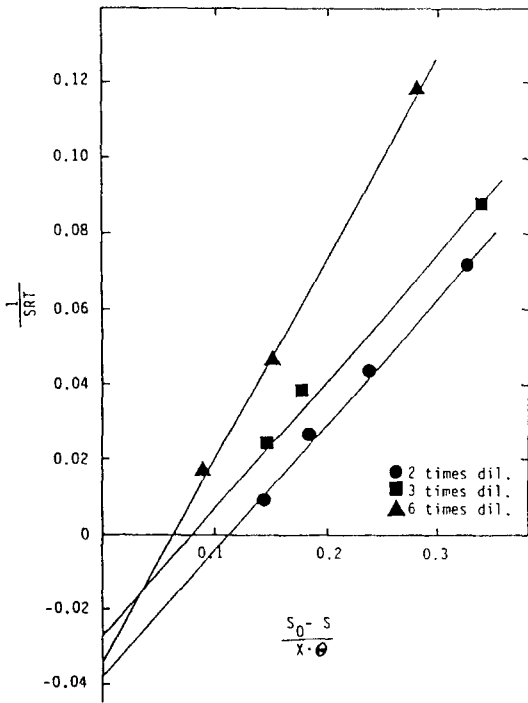


Fig. 12. Graphical determination of k_a and Y value

2배 희석시와 3배 희석시 제거효율이 저조하여 F/M비가 0.4~0.8의 범위에서 65% 내외의 제거효율 밖에 보여주지 않았다. 그러나 SBOD의 경우 COD의 경우보다 F/M비에 따른 제거효율의 영향이 적은 것으로 나타났으며 6배 희석의 경우를 제외하면 희석의 영향도 적게 나타나 F/M비 0.2 이하에서는 90% 이상의 제거효율을 나타내었다.

처리수의 수질

폭기시간에 따른 유출수의 BOD 농도는 Fig. 10에 나타난 바와 같이, 6배 희석의 경우를 제외하면 12~72시간의 폭기에서 121~492 mg/l의 농도범위를 나타내었다. 6배 희석의 경우 SBOD 및 TBOD는 폭기시간이 24시간이상 증가하여도 거의 비슷한 유출수의 농도를 보이며, TBOD는 29 mg/l에서 21 mg/l로 8 mg/l 감소하였고 SBOD의 경우는 폭기시간이 증가하여도 유출수질의 감소는 TBOD보다는 적어 24~48시간의 폭기에서 유출수질을 15 mg/l에서 12 mg/l로 3 mg/l밖에 감소하지 않았다. 그러나 SBOD의 경우 상대적으로 감소폭은 적었지만 절대적 값으로 보면 TBOD보다 처리수질이 우수하였는데 이것은 유출수내에 약간의 고형물이 포함되어 있기 때문인 것으로 여겨진다.

또 Fig. 11은 폭기시간에 따른 유출수의 COD 농도의 변화를 나타낸 것으로 6배 희석의 경우를 제외하면 12~48시간의 폭기시간에서 유출수의 농도가 TCOD의 경우

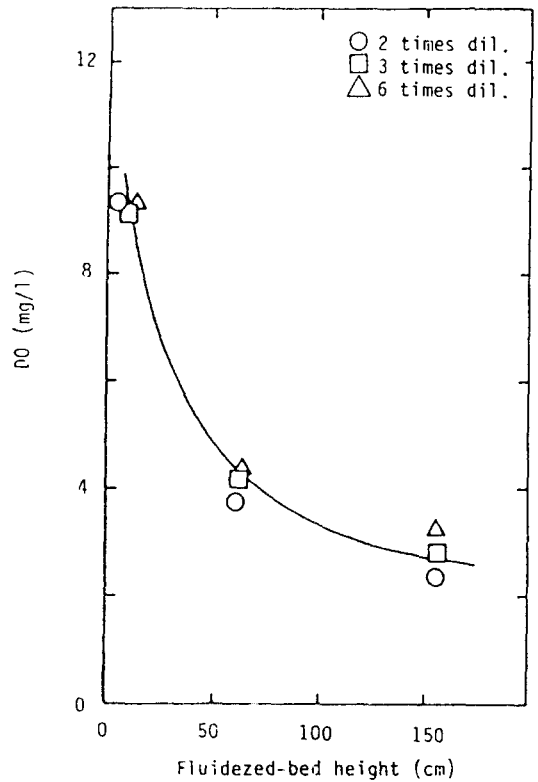


Fig. 13. The variation of DO with fluidized-bed height

2565~746 mg/l, SCOD의 경우 2245~518 mg/l로 농도의 변화 폭이 매우 크게 나타났으나 6배 희석처리시는 TCOD와 SCOD가 각각 511~118 mg/l, 372~92 mg/l로 나타나 3배와 2배 희석의 경우보다 변화폭이 적었다. 이는 상대적으로 독성의 영향을 적게 받는 6배 희석의 경우에 2배나 3배 희석의 경우보다 처리효율이 훨씬 좋기 때문인 것으로 생각되었다.

Y 및 k_a 값 계산

Y, k_a 값은 식 (14)에 나타난 것과 같이 $1/SRT = Y \cdot (S_0 - S)/(X \cdot \theta) - k_a$ 의 관계식에서 직선의 기울기와 절편으로 계산하였으며, Fig. 12는 본 실험결과 자료를 그림으로 나타낸 것이다.

2배 희석시 $Y = 0.3365$, $k_a = 0.03782 \text{ day}^{-1}$ 이었으며, 3배 희석시 $Y = 0.3341$, $k_a = 0.0275 \text{ day}^{-1}$ 이었으며 6배 희석시 $Y = 0.5460$, $k_a = 0.03434 \text{ day}^{-1}$ 로 나타났다. 이론식과 실험의 일치 정도를 나타내는 상관계수 r는 2배 희석시 0.997, 3배 희석시 0.996 및 6배 희석시 0.998로 나타났으며 이론식과 실험이 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

반응기내 DO 농도

반응기 높이에 따른 DO의 변화를 Fig. 13에 나타내었다. 그림에서 보여지는 바와 같이 반응기의 하부에서 약 60 cm 높이까지는 DO가 급격히 감소하고 최상단에 서의 DO도 2 mg/l 이상을 유지하는 것으로 나타났다. 그러므로 2상 유동층 반응기의 문제점중의 하나인 산소 부족 현상은 없는 것으로 나타났다.

요 약

미생물막 유동층 반응기로 염료공장 폐수의 유기물 처리효율을 고찰하였다. 공장폐수를 2배, 3배 및 6배 희석하여 처리하였던 바, 각 희석배율 모두 F/M비가 0.2에서 0.3으로 증가할 때 처리효율이 급격히 낮아졌다. 한편, 같은 F/M비에서는 희석율이 높을수록 처리효율이 높았으며 수리학적 체류시간이 증가함에 따라서 처리효율도 증가하였다. 6배 희석시 F/M비가 0.2 이하에서 BOD 처리효율이 90~97%로 가장 좋았다. 또 반응기 설계를 위한 동역학적 계수 Y , k_d 값 및 상관계수 r 은 2배 희석시 $Y=0.3365$, $k_d=0.03782 \text{ day}^{-1}$, $r=0.997$, 3배 희석시 $Y=0.3341$, $k_d=0.0275 \text{ day}^{-1}$, $r=0.996$ 및 6배 희석시는 $Y=0.5460$, $k_d=0.03434 \text{ day}^{-1}$, $r=0.998$ 로 나타났다.

기호 및 약어

BOD	: biochemical oxygen demand(mg/l)
COD	: chemical oxygen demand(mg/l)
DO	: dissolved oxygen(mg/l)
F/M	: feed per microorganism(kg COD/kg MLSS-day)
HRT	: hydraulic retention time(hr)
MLSS	: mixed liquor suspended solids(mg/l)
MLVSS	: mixed liquor volatile suspended solids(mg/l)
SBOD	: soluble BOD(mg/l)
SCOD	: soluble COD(mg/l)
SRT	: solid retention time(hr)
SS	: suspended solids(mg/l)
TBOD	: total BOD(mg/l)
TCOD	: total COD(mg/l)
TSS	: total suspended solids(mg/l)
Inf	: influent
Eff	: effluent
k	: maximum specific substrate utilization rate(day^{-1})
k_d	: endogenous respiration coefficient(day^{-1})
K_s	: Michaelis-Menten constant(mg/l)
Q	: flow rate(m^3/hr)
Q_w	: flow rate of waste(m^3/hr)
S	: effluent substrate concentration(mg/l)

S_0	: influent substrate concentration(mg/l)
V	: reactor volume(cm^3)
X	: biomass concentration(mg/l)
X_e	: effluent biomass concentration(mg/l)
X_0	: influent biomass concentration(mg/l)
X_w	: wasting biomass concentration in reactor(mg/l)
Y	: yield coefficient(-)
μ	: specific growth rate(day^{-1})
μ_m	: maximum specific growth rate(day^{-1})
θ	: hydraulic retention time(hr)
θ_s	: solid retention time(hr)

문 헌

- Eckenfelder, W.W., Roth, J.A. and McMullen, E.D.: Factors affecting the effluent quality from activated sludge plants treating organic chemicals wastewater. Proc of the 30th Ind. Waste Conf. Purdue Univ., 641 (1975)
- Calley, A.G., Foster, C.F. and Stafford, D.A.: Treatment of industrial effluent, Mobber and Stoughton, 273 (1977)
- Dennis, W.W. and Hodgson, A.G.: Dye wastewater alternative for biological waste treatment. Proc. of the 32th Ind. Waste Conf. Purdue Univ., 10(1977)
- Metcalfe & Eddy: Wastewater Engineering, Treatment/Disposal/Reuse, McGraw-Hill, N.Y., p.484(1979)
- Antonie, R.L. and Mike, J.H.: Evaluation of a rotating disc wastewater treatment. JWPCF, 46, 498(1974)
- Gauntlett, R.B.: Removal of ammonia and nitrate in the treatment of potable water. Biological Fluidized Bed Treatment of Water and Wastewater, Horwood, Chichester, U.K., p.48(1981)
- Nutt, S.G., Stephenson, J.P. and Pries, J.H.: Steady and non-steady-state performance of the aerobic (oxygenic) biological fluidised bed. Biological Fluidized Bed Treatment of Water and Wastewater, Horwood, Chichester, U.K. p.145(1981)
- Walker, I. and Austin, E.P.: The use of plastic, porous biomass supports in a pseudo-fluidised bed for effluent treatment. Biological Fluidized Bed Treatment of Water and Wastewater, Horwood, Chichester, U.K., p.272(1981)
- Cooper, P.F. and Wheeldon, D.H.V.: Complete treatment of sewage in a two fluidised bed system. Biological Fluidized Bed Treatment of Water and Wastewater, Horwood, Chichester, U.K., p.121(1981)
- Shieh, W.K., Sutton, P.M. and Kos, P.: Predicting reactor biomass concentration in a fluidized bed system. JWPCF, 53, 1574(1981)
- Mulcahy, L.T.: Mathematical model of the fluidized bed biofilm reactor. Ph.D. dissertation, Univ. of Massachusetts at Amherst (1978)
- Jerris, J.S., Owens, R.W., Hickey, R. and Flood, F.: Biological fluidized-bed treatment for BOD and nitrogen removal. JWPCF, 49, 816(1977)

13. Jerris, J.S., Owens, R.W. and Flood, F.: Secondary treatment of municipal wastewater with fluidised-bed technology. *Biological Fluidized Bed Treatment of Water and Wastewater*, Horwood, Chichester, U.K., p.112(1981)
 14. Levenspiel, O.: *Chemical Reaction Engineering*. Wiley, N.Y., p.144(1972)
 15. 조영일, 오영민, 이수구, 정연규, 정팔진, 이철희, 양병수, 신성희: *폐수처리공학, 동화기술*, p.435(1987)
 16. APHA: *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 16th ed., Amer. Publ. Health Assn. (1985)
-

(1992년 10월 28일 접수)